

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



Profesor Patrocinante:

Dr. Juan A. Tapia Ladino

Co-Supervisor:

César Gallardo Sánchez

Informe de Memoria de Título
para optar al título de:

Ingeniero Civil Eléctrico

Análisis de un motor eléctrico de flujo axial con imanes permanentes tipo spoke

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Profesor Patrocinante:
Dr. Juan A. Tapia Ladino

Análisis de un motor eléctrico de flujo axial con imanes permanentes tipo spoke



Felipe Eduardo Ortiz Bustos

Informe de Memoria de Título
para optar al Título de

Ingeniero Civil Eléctrico

Agosto 2023

Resumen

En la presente Memoria de Título se realiza un análisis mediante el método de elementos finitos de un motor de flujo axial con imanes permanentes tipo spoke. Como base para el estudio se utiliza un prototipo construido en el Laboratorio de Ensayo de Máquinas Eléctricas de la Universidad de Concepción, para el cual se evalúan sus características y se analizan mejoras en el diseño con el objetivo de lograr un mejor desempeño.

En primer lugar, se hace una revisión del estado del arte sobre los últimos desarrollos y desafíos en el diseño de máquinas eléctricas de flujo axial con imanes permanentes. Para comprobar la hipótesis, se realiza un modelo de la máquina para cada diseño y se evalúa su desempeño, resaltando los resultados más importantes. Se presenta la máquina en estudio junto con el análisis en elementos finitos para evaluar el desempeño en su estado actual y la obtención de las curvas características. Se realiza una revisión acerca de los tipos de devanados adentrándose en las ventajas y desventajas de la utilización de devanados distribuidos o concentrados. Se proponen dos mejoras en el diseño para mejorar su desempeño. Además, se presenta un análisis de las pérdidas generadas por cada máquina obteniendo su eficiencia.

El devanado de tipo concentrado resulta una mejor opción en términos de la calidad del torque electromagnético generado por la máquina, obteniendo una reducción del del 94.2% en el torque *cogging* y un 49.3% en el *ripple* de torque, con el costo de un aumento en las pérdidas totales y, por lo tanto, una disminución en la eficiencia de un 3.8% respecto a la máquina con devanados distribuidos. Como paso siguiente, se propone una mejora en la estructura del rotor para aumentar la saliencia, en donde se obtienen resultados prometedores en cuanto al desempeño de la máquina con esta nueva topología, logrando una saliencia de hasta 3.8 en determinados puntos de operación con un torque medio de ~ 90 [Nm] y una reducción del *ripple* de torque de $\sim 74\%$ con respecto al diseño original. Además, el nuevo diseño alcanza una eficiencia de 95.7%. La adopción de una estructura de rotor de polos salientes entrega resultados prometedores de saliencia y torque, aumentando el rango de operación a potencia constante y habilitando la posibilidad de utilizar la máquina en aplicaciones de electromovilidad.



Dedicado a mi familia.

Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a mi familia, por el apoyo incondicional y su sacrificio a lo largo de todos estos años. Por confiar siempre en mis capacidades y enseñarme los valores que me han formado como persona.

A mi profesor guía, el Dr. Juan Tapia Ladino, por darme la oportunidad de conocer el mundo de la investigación y mostrarme el camino.

A mis amigos, los cuales fueron un pilar fundamental para superar las dificultades de la carrera, gracias por haberme escuchado, apoyado y acompañado en los momentos más tristes y en los más alegres.

A la gente del Laboratorio de Ensayo de Máquinas Eléctricas, gracias por recibirme con los brazos abiertos y darme la oportunidad de trabajar con ustedes, por la buena onda en el laboratorio además del apoyo y consejos entregados.

Agradecer a todos los profesores y funcionarios del DIE, quienes durante todos estos años ayudaron de manera directa o indirecta en mi formación.

Este proyecto de Memoria de Título ha sido financiado con ayuda, en parte, de los proyectos FONDECYT #1201667, FONDECYT #1230670 y FONDEF ID21110099.



Tabla de Contenidos

LISTA DE FIGURAS	6
LISTA DE TABLAS	8
NOMENCLATURA	9
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	10
1.1 INTRODUCCIÓN GENERAL.....	10
1.2 ESTADO DEL ARTE	11
1.2.1 Máquinas sincrónicas de imanes permanentes.....	15
1.2.2 Discusión	20
1.3 HIPÓTESIS DE TRABAJO	21
1.4 OBJETIVOS	21
1.4.1 Objetivo General	21
1.4.2 Objetivos Específicos.....	21
1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES	22
1.6 TEMARIO.....	22
CAPÍTULO 2. MÁQUINA ELÉCTRICA DE FLUJO AXIAL CON IMANES PERMANENTES EN ESTUDIO	23
2.1 INTRODUCCIÓN	23
2.2 MOTOR ELÉCTRICO DE FLUJO AXIAL CON IMANES PERMANENTES TIPO SPOKE	25
2.2.1 Características de diseño	25
2.2.2 Análisis electromagnético.....	27
2.2.3 Curvas características.....	27
2.2.4 Análisis de pérdidas y eficiencia	31
2.2.5 Discusión	34
CAPÍTULO 3. MEJORAS EN EL DISEÑO DE LA MÁQUINA PARA AUMENTAR SU DESEMPEÑO	35
3.1 INTRODUCCIÓN	35
3.2 MODIFICACIÓN DEL TIPO DE DEVANADO.....	35
3.2.1 Devanados Distribuidos	36
3.2.2 Devanados Concentrados.....	36
3.2.3 Comparación entre los devanados.....	38
3.2.4 Propuesta de bobinado.....	41
3.2.5 Comparación con la máquina original.....	47
3.3 MODIFICACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE LA MÁQUINA PARA AUMENTAR LA SALIENCIA	49
3.3.1 Análisis electromagnético.....	52
3.3.2 Análisis de pérdidas.....	55
3.3.3 Comparación con la máquina original.....	55
3.3.4 Discusión	57
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES	58
4.1 SUMARIO	58
4.2 CONCLUSIONES.....	58
4.3 TRABAJO FUTURO.....	59
BIBLIOGRAFÍA	60
ANEXO A. PUBLICACIÓN EN “INTERNATIONAL ELECTRICAL MACHINES AND DRIVES CONFERENCE IEMDC 2023”	64

Lista de Figuras

<i>Figura 1.1</i> Representación de los dominios magnéticos de un material ferromagnético.	13
<i>Figura 1.2</i> Ilustración de la curva de desmagnetización de un imán permanente [9].....	14
<i>Figura 1.3</i> Topologías de máquinas con imanes permanentes de flujo radial. (a) y (b) son estructuras con rotor interno e imanes permanentes montados en la superficie (a) e imanes insertos (b). En (c) un motor tipo tambor para aplicaciones de baja potencia debido a la fijación de los imanes. La estructura (d) es una configuración de doble rotor con un estator toroidal interno [12]......	15
<i>Figura 1.4</i> Representación de la dirección del flujo magnético en máquinas eléctricas de flujo axial (a) Máquina de Flujo axial tipo sándwich; (b) Máquina de Flujo axial un estator y un rotor [13]....	16
<i>Figura 1.5</i> Topologías de máquinas eléctricas con imanes permanentes de flujo axial. (a) Estructura de un estator y un rotor, (b) Estructura de un estator y dos rotores, (c) Estructura de dos estatores y un rotor, (d) Estructura multietapa incluyendo dos estatores y tres rotores [12].	16
<i>Figura 1.6</i> Topologías de máquinas sincrónicas de imanes permanentes.	19
<i>Figura 1.7</i> Tipos de magnetización de imanes permanentes.	20
<i>Figura 2.1</i> Máquina de flujo axial con imanes permanentes tipo spoke, configuración de dos rotores y un estator [29].....	23
<i>Figura 2.2</i> Motor de flujo axial con imanes permanentes de tipo spoke.	25
<i>Figura 2.3</i> Modelo 3D máquina de flujo axial con imanes permanentes con devanados distribuidos.	26
<i>Figura 2.4</i> Torque <i>cogging</i> operación en vacío.	28
<i>Figura 2.5</i> Voltaje inducido operación en vacío.....	28
<i>Figura 2.6</i> Torque electromagnético operación bajo carga.	29
<i>Figura 2.7</i> Relación de saliencia para diferentes valores de densidad y ángulo de corriente.....	29
<i>Figura 2.8</i> Superposición de las curvas de contorno para torque medio y saliencia. Punto azul, operación de máximo torque. Punto verde, operación de máxima saliencia.	30
<i>Figura 2.9</i> Distribución de densidad de flujo magnético sobre la superficie. Máquina con devanados distribuidos.	30
<i>Figura 2.10</i> Distribución de densidad de pérdidas en la superficie del rotor.	34
<i>Figura 3.1</i> Configuración de devanado de tipo distribuido trifásico. Fase A en rojo, fase B en verde y fase C en azul.	36
<i>Figura 3.2</i> Ilustración de un devanado concentrado para una sección de un polo [33]......	37
<i>Figura 3.3</i> Configuración de devanado de tipo concentrado trifásico. Fase A en rojo, fase B en verde y fase C en azul.	38
<i>Figura 3.4</i> Fuerza magnetomotriz devanado distribuido.	38
<i>Figura 3.5</i> Contenido armónico FMM devanado distribuido.	39
<i>Figura 3.6</i> Fuerza magnetomotriz devanado concentrado.....	39

<i>Figura 3.7</i> Contenido armónico FMM devanado concentrado.....	40
<i>Figura 3.8</i> Dimensiones del estator máquina con devanado concentrado.....	41
<i>Figura 3.9</i> Diseños obtenidos en el proceso de optimización.....	42
<i>Figura 3.10</i> Modelo de la máquina de flujo axial con imanes permanentes utilizando devanados concentrados.....	43
<i>Figura 3.11</i> Torque <i>cogging</i> operación en vacío.	44
<i>Figura 3.12</i> Voltaje inducido operación en vacío.....	44
<i>Figura 3.13</i> Torque electromagnético operación bajo carga.	45
<i>Figura 3.14</i> Distribución de densidad de flujo magnético sobre la superficie. Máquina con devanados concentrados.....	45
<i>Figura 3.15</i> Distribución de densidad de pérdidas en la superficie del rotor. Máquina con devanado concentrado.	46
<i>Figura 3.16</i> Comparación torque electromagnético ambas máquinas. (a) Torque <i>cogging</i> ; (b) Torque operación bajo carga.....	47
<i>Figura 3.17</i> Curva B-H materiales de fabricación. (a) Curva B-H del estator (acero laminado M250); (b) Curva B-H del rotor (acero al carbono 1020).....	48
<i>Figura 3.18</i> Configuración de 6 polos 36 ranuras del diseño propuesto.	50
<i>Figura 3.19</i> Esquema de un polo del rotor. (a) Rotor tipo spoke (original); (b) Diseño de rotor propuesto.	51
<i>Figura 3.20</i> Sección de un polo del diseño propuesto.....	53
<i>Figura 3.21</i> Curva de torque <i>cogging</i> diseño propuesto.....	53
<i>Figura 3.22</i> Relación de saliencia del diseño propuesto en función de la densidad y ángulo de corriente diseño propuesto.	54
<i>Figura 3.23</i> Característica de torque del diseño propuesto para diferentes valores de densidad y ángulo de corriente.	55
<i>Figura 3.24</i> Superposición de las curvas de contorno para torque medio y saliencia máquina propuesta.	56
<i>Figura 3.25</i> Torque electromagnético de la máquina en estudio. El valor de la densidad y ángulo de corriente se seleccionó para un punto específico de operación ($J = 8 \text{ A/mm}^2$ y $\alpha_{ie} = 70^\circ$).....	56

Lista de Tablas

<i>Tabla 2.1</i> Datos principales prototipo construido en el laboratorio.	26
<i>Tabla 2.2</i> Pérdidas máquina con devanados distribuidos.	33
<i>Tabla 3.1</i> Dimensiones máquina con devanado concentrado.	42
<i>Tabla 3.2</i> Pérdidas máquina con devanados concentrados.	46
<i>Tabla 3.3</i> Tabla comparativa de pérdidas y eficiencia.	48
<i>Tabla 3.4</i> Datos principales diseño propuesto.	50
<i>Tabla 3.5</i> Resultados de pérdidas para la máquina propuesta.	55



Nomenclatura

Escalares

K_{FW}	: Coeficiente de flujo magnético.
λ_{pm}	: Flujo magnético enlazado por los imanes.
L_d	: Inductancia de eje directo.
L_q	: Inductancia de eje cuadratura.
i_{max}	: Corriente máxima.
ξ	: Saliencia (relación entre las inductancias de eje cuadratura y de eje directo).
P_{out}	: Potencia eléctrica de salida.
n	: Velocidad nominal.
E_f	: Fuerza electromotriz (FEM).
D_{SE}	: Diámetro externo de estator.
D_{SI}	: Diámetro interno de estator.
D_{RE}	: Diámetro externo de rotor.
D_{RI}	: Diámetro interno de rotor.
h_t	: Altura de diente de estator.
b_t	: Ancho de diente de estator.
l_s	: Largo total estator.
g	: Largo del entrehierro.
N_s	: Número de vueltas de bobina.
Q_s	: Número de ranuras.
p	: Número de polos.
n	: Velocidad nominal.
$P_{núcleo}$: Pérdidas en el núcleo.
P_{cu}	: Pérdidas en el cobre.
P_c	: Pérdidas por corrientes de Eddy.
P_h	: Pérdidas por histéresis.
P_e	: Pérdidas adicionales o por exceso.
k_c	: Coeficiente de corrientes de Eddy.
k_h	: Coeficiente de histéresis.
k_e	: Factor de pérdidas adicionales.
f	: Frecuencia.
B	: Densidad de flujo magnético en el entrehierro.
B_m	: Valor máximo de densidad de flujo magnético.
σ	: Conductividad eléctrica.
J	: Densidad de corriente.
E	: Voltaje inducido.
ω	: Velocidad angular.
k_{ef}	: Constante de fuerza electromotriz.
θ_b	: Ángulo entre el eje de referencia y el flujo magnético.
α_i^e	: Ángulo de corriente.
i_s	: Corriente de alimentación
k_{wn}	: Factor de devanado.



Capítulo 1. Introducción

1.1 Introducción General

El planeta requiere con urgencia disminuir la huella de carbono para frenar el avance del cambio climático, es por esto los nuevos desarrollos de tecnología y en particular de la electromovilidad deben avanzar hacia el camino de los transportes limpios, de esta manera se busca innovar en el diseño de máquinas eléctricas para hacerlas más eficientes y adaptables a las distintas aplicaciones que existen hoy en día. La búsqueda de mejores niveles de rendimiento se traduce principalmente en el aumento de la eficiencia y densidad de potencia de las máquinas eléctricas, en donde los motores de flujo axial juegan un papel muy importante.

Las máquinas de inducción convencionales son ampliamente utilizadas en diversas aplicaciones debido a su robustez, bajo costo y fácil mantenimiento. Sin embargo, presentan un pobre desempeño en aplicaciones de baja velocidad debido principalmente a la inductancia de magnetización, ya que esta disminuye al aumentar el número de polos, lo que resulta en una reducción del torque producido por la máquina. Una solución efectiva para mejorar el rendimiento en aplicaciones de baja velocidad es el uso de máquinas de flujo axial con imanes permanentes. El diseño de estas máquinas compensa los efectos adversos asociados a la operación en bajas velocidades con un mayor número de polos, puesto que la magnetización es producida por los imanes [1].

Las máquinas sincrónicas de imanes permanentes (MSIP) se pueden dividir entre rotores con imanes permanentes montados en la superficie y rotores con imanes permanentes interiores. Estas últimas son diseñadas para producir torque por reluctancia y torque de excitación. En las etapas de diseño y evaluación de una MSIP se busca un torque medio adecuado para la aplicación, por ejemplo, en aplicaciones de tracción para vehículos eléctricos se busca una alta densidad de torque, alta eficiencia y un bajo *cogging* y *ripple* de torque [2].

El torque electromagnético se define como la fuerza generada por la interacción entre el campo magnético giratorio y la estructura magnética del rotor. Este torque resultante es el responsable de producir el movimiento de rotación en el rotor, permitiendo la conversión de energía eléctrica a mecánica. Analizar y minimizar el torque *cogging* es importante para lograr una operación más estable y silenciosa.

El voltaje inducido es una magnitud eléctrica que representa el potencial electromotriz generado en los devanados del estator debido al flujo magnético variable, el cual es producido por los imanes

permanentes en la estructura del rotor. Este voltaje se origina a través del fenómeno de inducción electromagnética y está directamente relacionada con el diseño del devanado y la geometría de los imanes permanentes. Por otro lado, analizar cómo se distribuye la densidad de flujo magnético en la estructura del rotor y estator es de suma importancia debido a que permite conocer las pérdidas y si existe saturación en los materiales que componen la máquina. La saturación causa una disminución en la eficiencia y un comportamiento no lineal en el material ferromagnético.

El objetivo de esta Memoria de Título es estudiar, modelar y analizar el desempeño de una MSIP mediante análisis con elementos finitos. El enfoque será evaluar el impacto de utilizar devanados distribuidos y concentrados. Además, se llevará a cabo una optimización de la estructura magnética, del rotor y estator, con el objetivo de mejorar la eficiencia y aumentar la saliencia.

1.2 Estado del arte

En la literatura se encuentran distintas clasificaciones y descripciones de máquinas con imanes permanentes, destacando las máquinas radiales con imanes interiores. En aplicaciones de electromovilidad mayormente se suelen utilizar MSIP con imanes interiores debido a que poseen ventajas respecto a otras topologías, como son: mayor densidad de potencia y torque, mejor eficiencia, mayor rango de operación a potencia constante (CPSR) y mayor robustez mecánica, debido a que los imanes se encuentran protegidos al interior de la estructura del rotor [3].

Para la evaluación y el diseño de este tipo de máquinas uno de los parámetros más importantes es la calidad del torque que ésta genera, puesto que la presencia de imanes permanentes produce componentes de torque pulsante indeseadas como el torque *cogging*, el cual surge como resultado de la interacción entre los imanes permanentes que se encuentran en la estructura del rotor y las ranuras del estator. Este depende directamente de las dimensiones de la máquina y de su combinación polo/ranura [4]. Dada la tendencia del rotor a alinearse en la posición de mínima reluctancia, se dificulta sacar el rotor de la máquina del reposo. Adicionalmente el torque *cogging* provoca perturbaciones en la potencia que desarrolla la máquina, lo que trae consigo vibraciones y ruidos indeseados.

Otra característica importante al momento de evaluar la operación de máquinas con imanes permanentes es la fuerza electromotriz (FEM) inducida, la cual se genera debido a la interacción entre el flujo magnético producido por los imanes del rotor y los devanados del estator. Esta depende directamente de la geometría y tipo de imanes. Analizar la FEM inducida en una máquina eléctrica es una condición previa importante para calcular correctamente los parámetros y determinar el

desempeño de la máquina [5].

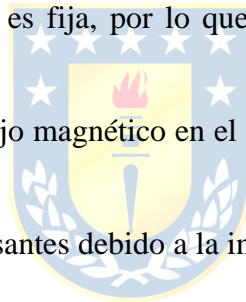
Las máquinas eléctricas con imanes permanentes difieren de otras topologías, como máquinas de inducción o de rotor bobinado, debido a que el devanado de campo se reemplaza por imanes permanentes, lo que trae consigo ciertas ventajas y desventajas [6], [7].

Dentro de las ventajas de las máquinas con imanes permanentes se tiene:

- Mejora en la confiabilidad al eliminar el devanado de excitación y contactos deslizantes reduciendo pérdidas Joule.
- Aumenta la densidad de potencia ya que los imanes permanentes poseen un menor peso y volumen en comparación a las bobinas en el rotor.
- Posibilita la construcción de máquinas con geometrías complejas.
- Poseen mejor desempeño en aplicaciones de baja velocidad (mayor número de polos) ya que la magnetización es provista por los imanes.

Algunas desventajas de este tipo de máquinas son:

- La excitación de campo es fija, por lo que dificulta el control sobre el flujo en el entrehierro.
- La forma de onda del flujo magnético en el entrehierro en la mayoría de los casos no es sinusoidal.
- Se presentan torques pulsantes debido a la interacción entre los imanes y la estructura del estator.
- Posibilidad de desmagnetización a altas temperaturas lo que reduce la confiabilidad.
- Costo elevado de los imanes de mejor desempeño.



Los imanes permanentes son aleaciones de materiales capaces de entregar flujo magnético. En palabras simples, la magnetización se debe a una serie de fenómenos cuánticos relacionados con los dominios magnéticos del material, los cuales son conjuntos de átomos que interactúan magnéticamente entre sí. Al no existir un campo magnético externo, estos dominios se distribuyen al azar y el material se encuentra desmagnetizado como se ve en la representación de la **Figura 1.1 (a)** [8]. Al aplicar un campo magnético externo, estos dominios se orientan de tal forma que suman sus efectos a los del campo externo, por lo tanto, se tiene un efecto resultante en la dirección de magnetización del material, ya que sus dominios se orientan en el sentido del campo magnético externo como se ve en la **Figura 1.1 (b)**.

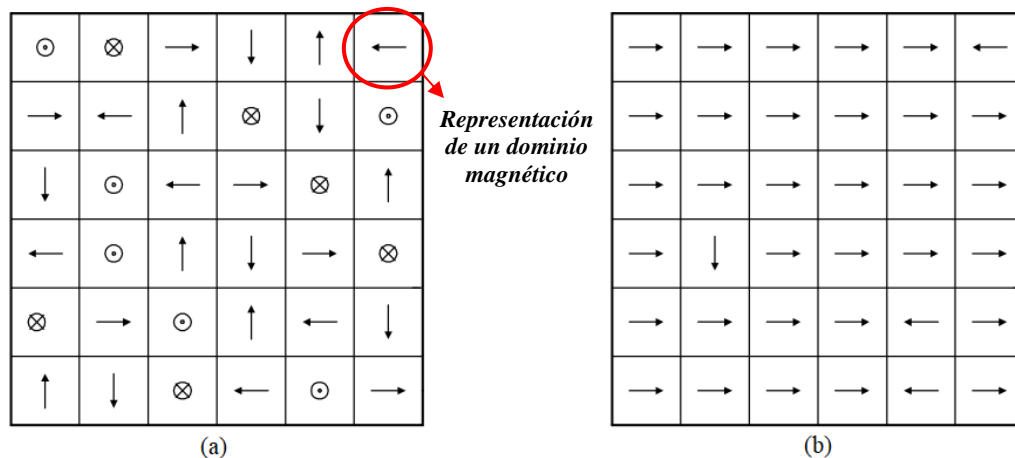


Figura 1.1 Representación de los dominios magnéticos de un material ferromagnético.

(a) Dominios no orientados; (b) Dominios orientados en presencia de un campo magnético externo [9].

Al desaparecer la excitación externa, algunos dominios quedan con la orientación que tenían, por lo tanto, el material queda magnetizado y de esta manera se convierte en un imán permanente. Excluyendo los imanes naturales (magnetita Fe_3O_4) el desarrollo y manufactura de imanes permanentes comenzó a principios del siglo XX con la producción de carbono y cobalto. Estos materiales poseían propiedades magnéticas bastante pobres por lo que el descubrimiento de la aleación de Aluminio Niquel (AlNi) y especialmente de Aluminio Niquel Cobalto (AlNiCo) en los años 30, impulsó el uso de materiales magnéticos para distintas aplicaciones. En los años cincuenta, fue introducida la ferrita que se caracteriza por su alta resistividad, la cual se sigue utilizando en la actualidad debido a su bajo costo. Luego, se dio paso a otras aleaciones utilizando compuestos de tierras raras y cobalto. Otro material importante en la década del sesenta y posteriores fue la aleación de samario cobalto (SmCo_5) y todas sus variaciones, debido a que posee cualidades magnéticas significativas, pero, la indisponibilidad y alto costo de los materiales llevó a la búsqueda de otras aleaciones. La aleación Neodimio Hierro Boro (NdFeB) se convirtió en la mejor opción en cuanto a producto energía hasta el día de hoy, además los materiales son mucho más comunes que los escasos samario y cobalto [1].

Los imanes permanentes se caracterizan de acuerdo a los siguientes parámetros: En primer lugar se tiene la **remanencia magnética (B_r)** la cual corresponde a la magnitud del campo magnético que el material puede retener aún en ausencia del campo magnético externo, la **fuerza coercitiva (H_c)** que corresponde a la capacidad de mantener el campo magnético cuando un campo externo en sentido

opuesto es aplicado. El **producto energía** es el valor absoluto del producto de la densidad de flujo B y la intensidad de campo H en cada punto a través de la curva de desmagnetización. El valor máximo es uno de los índices que indica la energía interna del imán. Su unidad de medida en el sistema MKS es J/m^3 . También se tiene la **recta de carga y el punto de operación** los cuales caracterizan el desempeño del imán. El estado B-H de los imanes permanentes es localizado en la intersección de la curva de desmagnetización y la recta de carga OP, como se muestra en la **Figura 1.2**. La recta de carga es determinada por la estructura del circuito magnético: largo del entrehierro, largo del circuito magnético y número de vueltas de las bobinas. Durante la operación, sin embargo, el punto de operación es inclinado por la reacción de las bobinas del circuito magnético, por ejemplo, corriente de armadura en máquinas eléctricas (fenómeno denominado reacción de armadura).

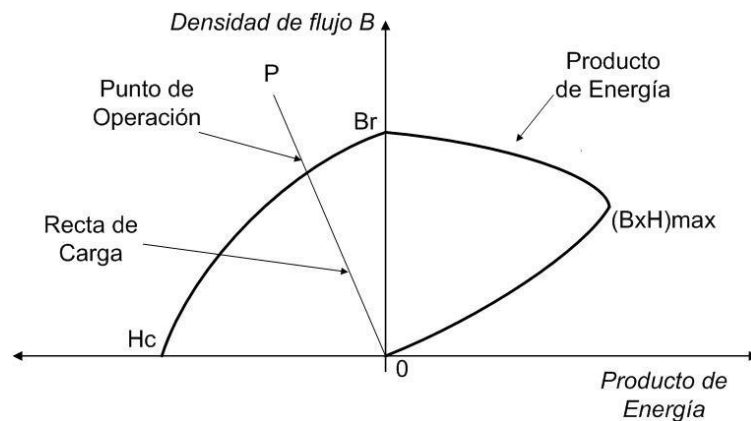


Figura 1.2 Ilustración de la curva de desmagnetización de un imán permanente [9].

La **temperatura Curie (T_c)** es la temperatura crítica por sobre la cual un material magnético se hace paramagnético (desmagnetización), esta es muy importante en el diseño de máquinas eléctricas con imanes permanentes, debido a que se debe tener especial cuidado con las temperaturas que alcanza el conjunto rotor-estator para no alcanzar esta temperatura crítica, lo cual produce la desmagnetización de los imanes.

1.2.1 Máquinas sincrónicas de imanes permanentes

Las MSIP son ampliamente utilizadas en diversas aplicaciones dadas sus características únicas, como son alta densidad de potencia/torque, amplio CPSR y alta eficiencia [3]. Se han realizado diversos estudios relacionados con el análisis y diseños de esta topología de máquinas eléctricas [10]-[11]. Estas se pueden clasificar en dos grandes grupos atendiendo a la dirección del flujo magnético que cruza el entrehierro. Para el caso de las máquinas de flujo radial, el flujo magnético cruza el entrehierro en dirección radial respecto al eje de rotación de la máquina, es decir, las líneas de flujo cruzan el entrehierro perpendicularmente al eje de rotación. En la *Figura 1.3* se pueden observar algunas topologías de máquinas de flujo radial con imanes permanentes.

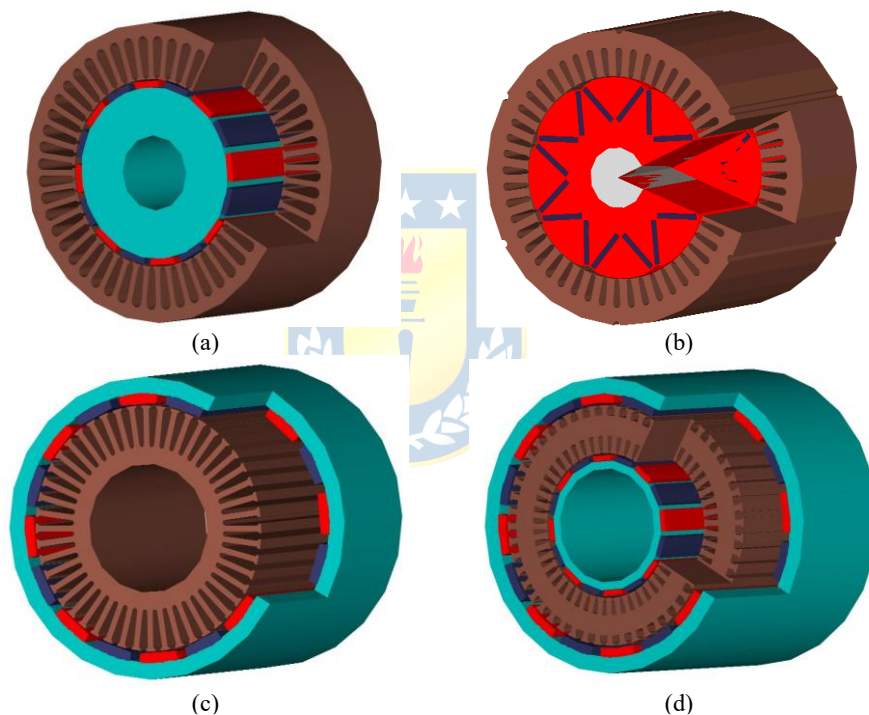


Figura 1.3 Topologías de máquinas con imanes permanentes de flujo radial. (a) y (b) son estructuras con rotor interno e imanes permanentes montados en la superficie (a) e imanes insertos (b). En (c) un motor tipo tambor para aplicaciones de baja potencia debido a la fijación de los imanes. La estructura (d) es una configuración de doble rotor con un estator toroidal interno [12].

Por otro lado, en máquinas de flujo axial, el flujo magnético principal cruza el entrehierro en la dirección axial o paralela al eje de rotación de la máquina, como se puede ver en la *Figura 1.4*. Este tipo de máquinas permite la construcción de motores con alto número de polos, lo que entrega una

alta eficiencia y un alto torque en aplicaciones de media y baja velocidad. También permite la construcción de motores con múltiples rotores y/o estatores de forma compacta. En la **Figura 1.5** se muestran distintas topologías de máquinas de flujo axial.

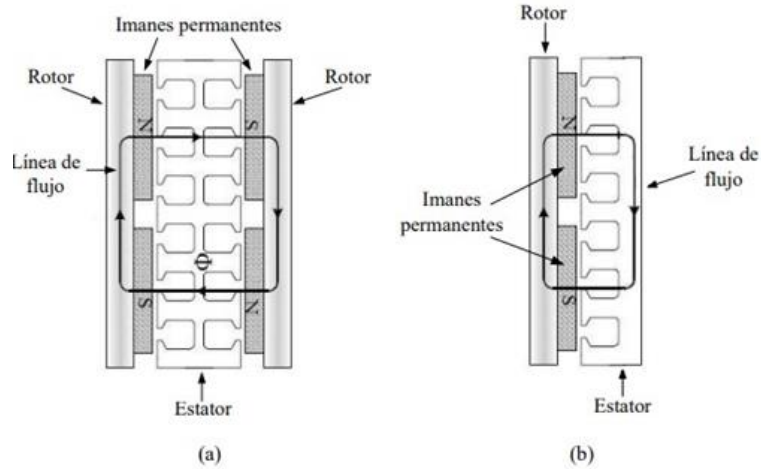


Figura 1.4 Representación de la dirección del flujo magnético en máquinas eléctricas de flujo axial
(a) Máquina de Flujo axial tipo sándwich; (b) Máquina de Flujo axial un estator y un rotor [13].

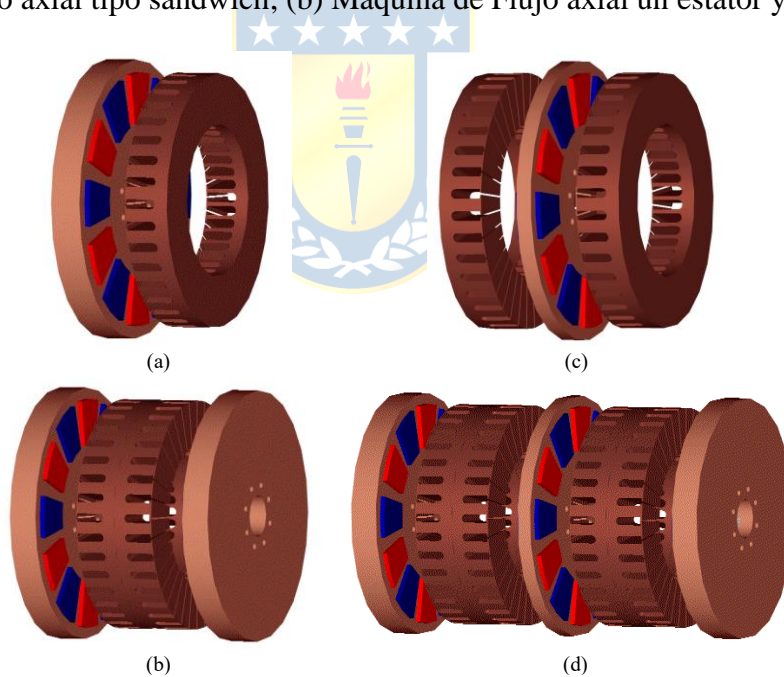


Figura 1.5 Topologías de máquinas eléctricas con imanes permanentes de flujo axial. (a) Estructura de un estator y un rotor, (b) Estructura de un estator y dos rotores, (c) Estructura de dos estatores y un rotor, (d) Estructura multietapa incluyendo dos estatores y tres rotores [12].

Las máquinas de flujo axial tienen una serie de ventajas sobre las de flujo radial, incluyendo una mayor densidad de potencia, lo que significa que para una misma potencia su tamaño y peso es

menor [14]. Son adecuadas para aplicaciones de baja velocidad, debido a su mejor relación de torque/volumen en aplicaciones con un número de polos elevado, lo que las habilita para aplicaciones de electromovilidad directamente en la tracción sin la necesidad de engranajes [15]. Dadas estas características, las máquinas de flujo axial son cada vez más populares en una amplia gama de aplicaciones [16].

El *cogging* es un fenómeno no deseado caracterizado por una resistencia periódica y discreta al movimiento del rotor, esta resistencia es causada por la tendencia de los imanes permanentes a alinearse en una posición particular respecto al estator. Desde el diseño de máquinas eléctricas se busca reducir este fenómeno para lograr un funcionamiento con menores vibraciones y ruido, lo que mejora la eficiencia total del sistema. El *ripple* de torque es otro fenómeno no deseado, el cual refiere a las fluctuaciones periódicas de torque mientras la máquina se encuentra en funcionamiento. Estas fluctuaciones se producen debido a diversas fuentes, como las irregularidades en la distribución del flujo magnético en el entrehierro, efectos de corrientes armónicas o también imperfecciones en el rotor. También puede causar vibraciones y ruido. Además, debido a que estas vibraciones son transferidas a las partes mecánicas, se reduce la vida útil de los componentes mecánicos de la máquina [17]. El *ripple* de torque es especialmente perjudicial en aplicaciones donde se requiere un alto nivel de precisión y suavidad en el funcionamiento del motor.

En [18] se presentan dos métodos para la reducción del torque *cogging* en máquinas de flujo axial de imanes permanentes con debilitamiento de campo. Por un lado, mediante el desplazamiento de las ranuras se busca aumentar la frecuencia del torque *cogging* para reducir su valor promedio. Por otro lado, aplicar un “*skew*” o rotación angular a los imanes del rotor. Aplicando estos dos métodos se logra reducir el torque *cogging* un 60% con respecto a la máquina original sin afectar el torque medio. Estas técnicas si bien permiten reducir el torque *cogging* considerablemente, tienen algunas desventajas, ya que disminuyen los enlaces de flujo en el estator e introducen mayores pérdidas en el bobinado. También introducen componentes de torque en otras direcciones.

Por otro lado, un método de atenuación activa del *ripple* de torque en una máquina de flujo axial con imanes permanentes se presenta en [19]. Esto se logra inyectando armónicos para reducir el *ripple* de torque total. Se toma la forma de onda de torque para descomponerla mediante series de Fourier, de esta manera, se observa que las armónicas más importantes que generan este *ripple* de torque son la 11, 13, 23 y 25. Así, mediante un proceso iterativo se calculan las corrientes a inyectar y la armónica de torque que se desea atenuar. Con este método se logra una reducción de alrededor de 95% en el *ripple* del torque.

En [20] se presenta el diseño y prueba de un motor de flujo axial de imanes permanentes enfriado por chaqueta de agua para aplicaciones en vehículos eléctricos. Se estudia el diseño electromagnético y mecánico para obtener el mejor desempeño, reduciendo el torque *cogging* mediante un “*skew*” y una segmentación de los imanes en cuatro zonas, con el objetivo de reducir las pérdidas por corrientes parásitas. Finalmente, se realizan pruebas en laboratorio para evaluar el desempeño, obteniendo eficiencias superiores al 90% a plena carga.

En [21] se presenta el diseño y prueba de una máquina de flujo axial de imanes permanentes montados en la superficie con capacidad de debilitamiento de campo. Esto es posible mediante el diseño propuesto, ya que se tienen dos devanados trifásicos independientes en el estator. Ambos devanados controlan las corrientes inyectadas. De esta manera, se tiene control sobre la componente de eje directo del flujo de reacción de armadura, reduciendo la magnitud de la densidad de corriente requerida para controlar el flujo en el entrehierro al operar a altas velocidades.

Cinco topologías de motores de flujo axial con imanes permanentes interiores son analizadas en [22], buscando una topología de rotor que entregue el mayor torque por reluctancia, esto tiene como ventaja el aumento de la potencia de la máquina sin incrementar su volumen. Lo anterior se logra aumentando la saliencia, la cual corresponde a la razón entre las inductancias de eje directo y cuadratura. Se comparó la saliencia de cada una de las topologías para llegar a una geometría de imán óptima. Como conclusión, en este trabajo se obtuvo una posición del imán perpendicular al eje de la máquina de tal manera que el largo axial del yugo del rotor disminuye en la misma proporción que lo hace el imán, dándole una forma de “cuña”.

En [3] se presenta un método para calcular corrientes de excitación para operar en condiciones óptimas en una máquina sincrónica de imanes permanentes interiores (específicamente el motor eléctrico de un Toyota Camry 2007). Este método permite acelerar el proceso de evaluación del desempeño de una máquina y crear mapas de eficiencia de manera rápida. Una técnica de control sobre el flujo magnético para una máquina de flujo axial con imanes permanentes montados en la superficie se discute en [13]. Se trata de un método en el cual es posible controlar el flujo magnético que cruza el entrehierro mediante un devanado DC en el campo, entre la parte interna y externa de los discos de estator. Al inyectar corriente a este devanado se puede debilitar o fortalecer el flujo que cruza el entrehierro. Mediante análisis en elementos finitos se tiene que es posible lograr un 87% de rango de control sin carga y un 51% a plena carga, lo cual es considerable. Este método presenta una serie de ventajas en comparación a otras técnicas ya que reduce las pérdidas Joule y presenta un reducido requerimiento de potencia en el devanado DC.

Los tipos de bobinados utilizados en máquinas eléctricas tiene una gran influencia en su desempeño. Estos mayormente se clasifican en dos grupos de acuerdo con el número de ranuras por fase por polo (q) [23]: i) devanado de ranura entera (q es un entero) y devanados de ranura fraccionaria (q no es un entero). En las máquinas de imanes permanentes mayormente suelen usarse devanados fraccionarios con un paso de bobina igual a uno, este bobinado recibe el nombre de devanados concentrados. En [24] se realiza un análisis exhaustivo acerca de la utilización de devanados concentrados en máquinas sincrónicas de imanes permanentes, en donde se observan grandes ventajas al utilizar este tipo de devanado, como mejor densidad de potencia, mayor eficiencia y cabezas de bobinas más cortas. Además, se discute la utilización de devanados de una capa o de doble capa. Los devanados de doble capa son más adecuados para aplicaciones de tracción debido a que generan menores pérdidas por corrientes parásitas y menor *ripple* de torque.

Una máquina de flujo axial de imanes permanentes con devanado concentrado con una estructura de rotor basada en fibra de vidrio y módulos segmentados de imanes permanentes es analizada en [25]. Esta estructura, en base a resultados de simulación y experimentales, mejora el desempeño de la máquina en cuanto a la eficiencia, tolerancia a fallas, producción de torque y aumenta el CPSR.

En [2] se analiza el diseño y control de MSIP interiores, de esta manera se estudia la influencia de la topología del rotor. Se tienen distintas configuraciones como se puede ver en el esquema de la **Figura 1.6**, haciendo énfasis principalmente en la disposición de los imanes, de tal manera de obtener un desempeño óptimo.

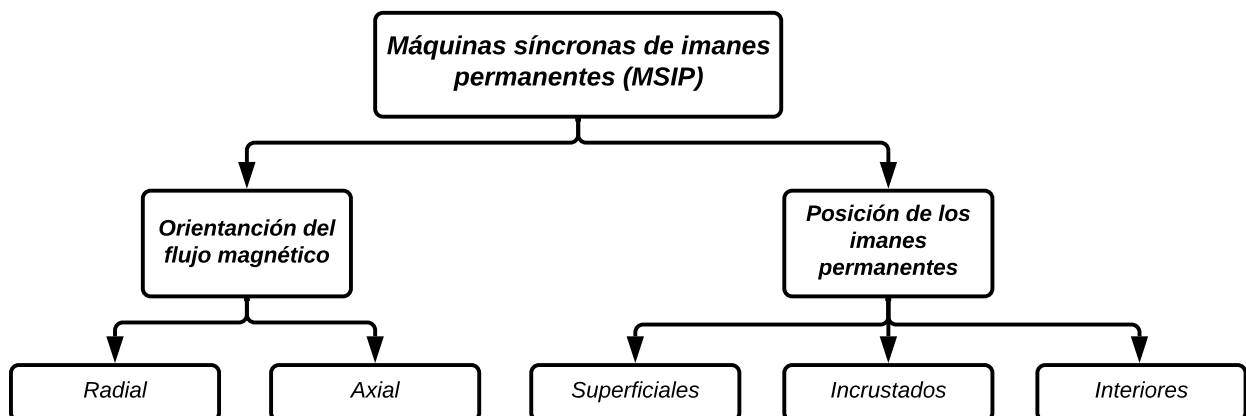


Figura 1.6 Topologías de máquinas sincrónicas de imanes permanentes.

Además, en [2] se analizan distintas disposiciones y magnetizaciones de los imanes en el rotor, como se puede ver en el esquema de la **Figura 1.7**. Al comparar los imanes con magnetización

tangencial y radial se concluye que una magnetización tangencial permite obtener una alta saliencia en este tipo de máquinas. Esto se logra debido a la diferencia de reluctancia que deben cruzar las líneas de flujo magnético entre el imán y el material ferromagnético.

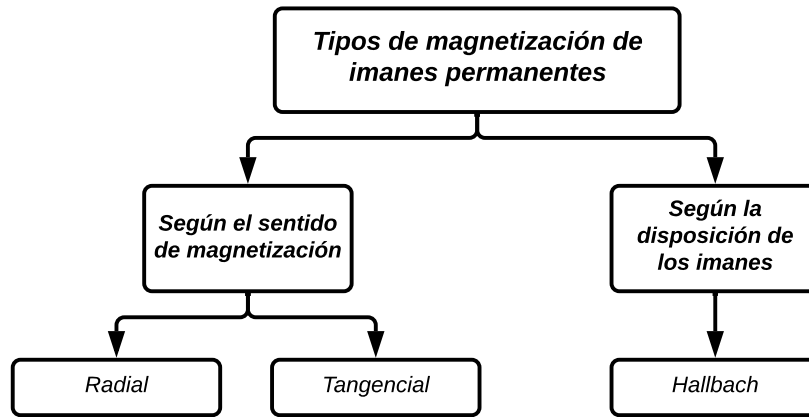


Figura 1.7 Tipos de magnetización de imanes permanentes.

Un rápido dimensionamiento al momento de diseñar una máquina eléctrica es algo deseado en la comunidad de diseñadores. Usualmente se utilizan métodos analíticos para realizar el dimensionamiento de una máquina, en [27] se presenta un método de optimización en el diseño de generadores sincrónicos de imanes permanentes mediante expresiones analíticas y relaciones geométricas. Se realiza un análisis y validación de los resultados mediante elementos finitos sujeto a restricciones de estrés tangencial. De esta manera se pueden obtener los parámetros óptimos del diseño de un generador de este tipo, siendo los resultados analíticos de la optimización muy cercanos a los obtenidos en el análisis de elementos finitos. Esto permite validar este tipo de análisis ya que entregan resultados cercanos a la realidad. En [28] se propone otro algoritmo de optimización basado en los Multiplicadores de Lagrange para determinar las dimensiones principales en máquinas de imanes permanentes resultando en una capacidad de torque ideal. También se busca mejorar la estimación de cálculo para el torque utilizando inductancias de fuga y magnetización. De esta manera los resultados analíticos concuerdan con los resultados de análisis con elementos finitos.

1.2.2 Discusión

El estado del arte muestra las distintas topologías y métodos de control en máquinas de flujo axial con imanes permanentes. Desde el diseño, para aplicaciones en electromovilidad, se busca principalmente reducir el *cogging* y *ripple* del torque, ampliar el CPSR y tener modelos analíticos más precisos que agilicen la etapa inicial de dimensionamiento. No obstante, no es común encontrar

artículos con respecto al diseño para mejorar la saliencia en estas topologías. Este tema podría abrir un nuevo nicho de aplicaciones especialmente en vehículos eléctricos. Ya que una mayor saliencia permite mejorar el CPSR y aumentar la potencia sin aumentar el volumen y peso del motor.

Por otro lado, la utilización de distintos tipos de devanados permite mejorar algunas características en el desempeño, como son la producción de torque, eficiencia, tolerancia a fallas y manipular la inductancia en beneficio de la aplicación requerida [24]. Para mejorar el desempeño de la máquina en estudio, se analiza la utilización de un estator con devanados concentrados, con el fin de reducir el torque *cogging* y el beneficio de reducir el cobre utilizado en las cabezas de bobina. Además, se propone una modificación en la topología, especialmente en la estructura del rotor con el objetivo de mejorar la saliencia de la máquina.

1.3 Hipótesis de Trabajo

Una nueva topología y/o configuración del devanado tendrá un impacto positivo en el rendimiento de la máquina de flujo axial con imanes permanentes tipo spoke. Se espera que esta modificación contribuya a mejorar tanto la calidad del torque producido como la característica de saliencia de la máquina. Se propone que, a través de este enfoque, se logrará una reducción del *cogging* y *ripple* de torque, lo que resultará en un funcionamiento más suave y eficiente de la máquina.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Evaluar el desempeño de un motor de flujo axial con imanes permanentes tipo spoke mediante el método de elementos finitos utilizando el software ANSYS 3D, bajo la operación con devanados distribuidos, concentrados y el diseño de una nueva topología.

1.4.2 Objetivos Específicos

- i) Desarrollar un modelo 3D de un motor de flujo axial con imanes permanentes tipo spoke con devanados distribuidos, concentrados y con una nueva topología.
- ii) Simular la operación en circuito abierto y corto circuito. Determinación de parámetros de desempeño.
- iii) Evaluar el desempeño del motor para operación trifásica balanceada.

1.5 Alcances y Limitaciones

(i) La propuesta se realiza en base a la información obtenida sobre el motor construido en el Laboratorio de Ensayo de Máquinas Eléctricas de la Universidad de Concepción.

(ii) Las simulaciones se realizan utilizando la herramienta electromagnética Maxwell del software ANSYS Electronics.

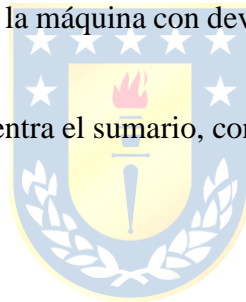
1.6 Temario

El capítulo 1 cubre el marco teórico en el cual se basa la presente Memoria de Título, abarcando la teoría detrás de las máquinas de flujo axial con imanes permanentes, la revisión del estado del arte y los tipos de topologías existentes.

En el capítulo 2 se presenta la máquina en estudio y se realiza un análisis mediante elementos finitos para evaluar su desempeño.

En el capítulo 3 a través del análisis mediante elementos finitos se evalúa el desempeño de las mejoras en el diseño realizadas, tanto de la máquina con devanados concentrados, como el análisis de la máquina con una nueva topología.

Finalmente, en el capítulo 4 se encuentra el sumario, conclusiones y trabajo futuro de la Memoria de Título realizada.



Capítulo 2. Máquina eléctrica de flujo axial con imanes permanentes en estudio

2.1 Introducción

En el presente trabajo Memoria de Título se analiza una máquina de flujo axial con imanes permanentes de tipo spoke cuyo principal objetivo de diseño es tener una alta saliencia. Esto se lograría con el aumento de reluctancia de eje directo mediante el uso de imanes interiores con magnetización tangencial. De esta manera, el camino que recorre el flujo magnético en la zona interpolar y en la zona polar difieren en reluctancia de forma considerable. Lo anterior, lleva a obtener inductancias de eje directo y cuadratura diferentes y por lo tanto se espera una alta saliencia. En la *Figura 2.1* se muestra un ejemplo de una máquina de flujo axial imanes permanentes tipo spoke utilizando una magnetización tangencial, en donde se puede apreciar el camino que toman las líneas de flujo magnético en los ejes directo y cuadratura.

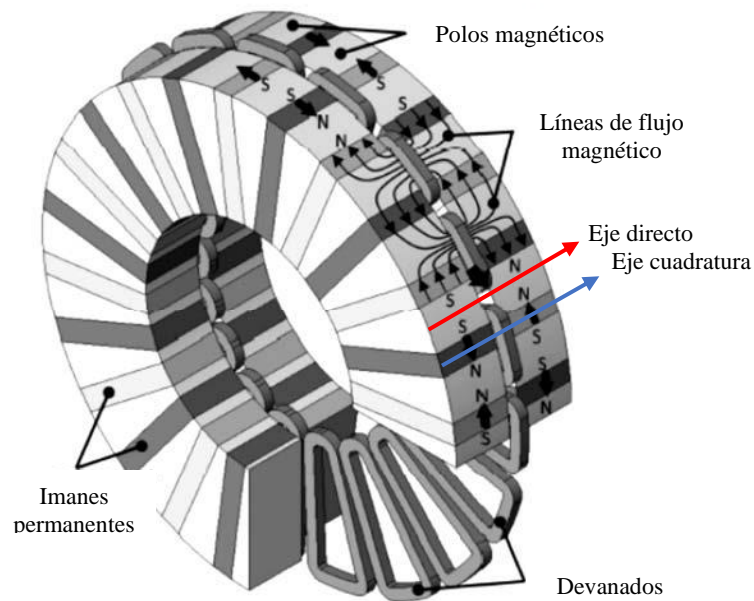


Figura 2.1 Máquina de flujo axial con imanes permanentes tipo spoke, configuración de dos rotores y un estator [29].

La saliencia se define como el cociente entre la inductancia de eje cuadratura L_q y la inductancia de eje directo L_d (ecuación 2.1).

$$\xi = \frac{L_q}{L_d} \quad (2.1)$$

En las máquinas de imanes permanentes convencionales, el torque electromagnético se puede obtener según la ecuación del circuito equivalente del rotor en estado estacionario utilizando la transformada de Clark-Park, como se puede ver en la ecuación (2.2).

$$T_{em} = \frac{3p}{2} \left[\lambda_{pm} i_s \cos(\alpha_i^e) + \frac{1}{2} (L_d - L_q) i_s^2 \sin(2\alpha_i^e) \right] \quad (2.2)$$

Donde p es el número de pares de polos, λ_{pm} es el valor fundamental máximo de los enlaces de flujo en los imanes permanentes, i_s es la corriente de alimentación y α_i^e es el ángulo de la corriente, que corresponde al desfase angular entre la corriente de alimentación y el flujo magnético de eje directo generado por el rotor. En la parte izquierda de la ecuación (2.2) se observa la componente de torque asociada a los imanes y en la parte derecha la componente asociada a la reluctancia. Por lo tanto, mientras mayor sea la diferencia entre las inductancias de eje directo y cuadratura, mayor será el torque desarrollado.

Las máquinas con alta saliencia exhiben un mayor torque por reluctancia debido a la diferencia significativa en permeabilidad magnética entre los caminos que el flujo magnético debe atravesar en el rotor. Esta diferencia en permeabilidad magnética crea una mayor resistencia al flujo magnético en ciertas áreas del rotor, lo que genera un incremento en el campo magnético resultante y, por ende, en el torque desarrollado. Esta característica es sumamente ventajosa, ya que permite obtener un mayor torque sin necesidad de aumentar el tamaño de la máquina.

En la mayoría de las máquinas de imanes permanentes se evalúa el coeficiente de flujo magnético de los imanes K_{FW} (ecuación 2.3) relacionado con la capacidad de debilitamiento de campo y la saliencia ξ (ecuación 2.1), relacionada con la capacidad de torque de reluctancia. De esta manera, para permitir un amplio rango de operación en la zona de potencia constante, las máquinas eléctricas deberían estar diseñadas con un coeficiente K_{FW} y una saliencia ξ lo más altas posibles [30].

$$K_{FW} = \frac{\lambda_{pm}}{\lambda_{pm} - L_d i_s} \quad (2.3)$$

En el diseño de este prototipo se optó por construir una máquina para baja velocidad (10 polos) por razones mecánicas y evitar que los imanes se desprendan de la estructura del rotor debido a la fuerza centrípeta generada por la rotación.

2.2 Motor eléctrico de flujo axial con imanes permanentes tipo spoke

A continuación, se presenta la máquina a estudiar en la presente Memoria de Título, se trata de un motor de flujo axial con imanes permanentes tipo spoke construido en la Universidad de Concepción, específicamente en el Laboratorio de Ensayo de Máquinas Eléctricas. En la **Figura 2.2 (a)** se observa el estator con una disposición de 30 ranuras y un devanado distribuido. En la **Figura 2.2 (b)** es posible apreciar la disposición de los diez imanes y las piezas de acero que ofrecen soporte a la estructura. En la **Figura 2.2 (c)** se observa la máquina ensamblada. Es importante mencionar el valor del análisis mediante el método de elementos finitos, ya que permite evaluar diseños complejos y brinda la posibilidad de estudiar distintos puntos de operación para analizar el desempeño de la máquina previo a la construcción del prototipo.

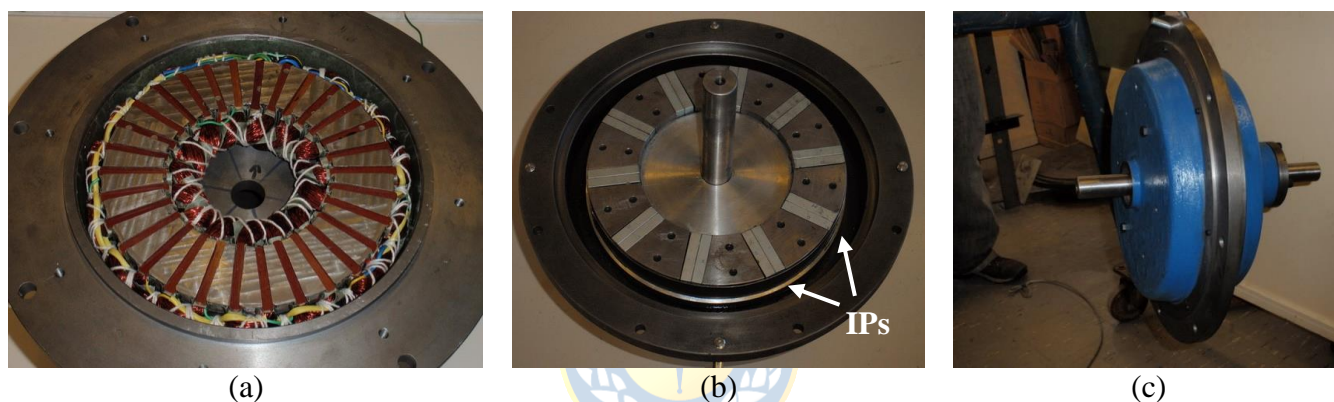


Figura 2.2 Motor de flujo axial con imanes permanentes de tipo spoke.
(a) Estator; (b) Rotor; (c) Máquina ensamblada

2.2.1 Características de diseño

Para obtener las características de diseño y construcción se recabó información de la construcción del prototipo, como planos CAD y el motor disponible. También se realizaron mediciones aprovechando que existían partes de la máquina como los imanes que se utilizaron en la fabricación, lo que sirvió para comparar con los datos obtenidos de planos y análisis anteriores. Se completó una tabla con la información necesaria para poder analizar el motor utilizando un software más avanzado. En la **Tabla 2.1** se encuentra la información completa recabada del prototipo construido en el laboratorio. Cabe mencionar que la máquina en estudio posee un devanado de capa simple con una ranura/fase/polo. A partir de la información obtenida fue posible desarrollar el modelo 3D en el software de análisis de elementos finitos ANSYS Electronics para su posterior análisis.

Tabla 2.1 Datos principales prototipo construido en el laboratorio.

Parámetro	Símbolo	Valor
Diámetro externo de estator	D_{SE}	250 mm
Diámetro interno de estator	D_{SI}	150 mm
Diámetro externo de rotor	D_{RE}	250 mm
Diámetro interno de rotor	D_{RI}	150 mm
Altura de diente de estator	h_t	25 mm
Ancho de diente de estator	b_t	9 mm
Largo total del estator	l_s	39 mm
Largo del entrehierro	g	2 mm
Número de vueltas de bobina	N_s	100
Número de ranuras	Q_s	30
Número de polos	$2p$	10
Velocidad nominal	n	600 rpm

A partir de la información recopilada se generó un modelo de la máquina utilizando el software de análisis mediante elementos finitos ANSYS 3D. Una representación del modelo se encuentra ilustrado en la **Figura 2.3**.

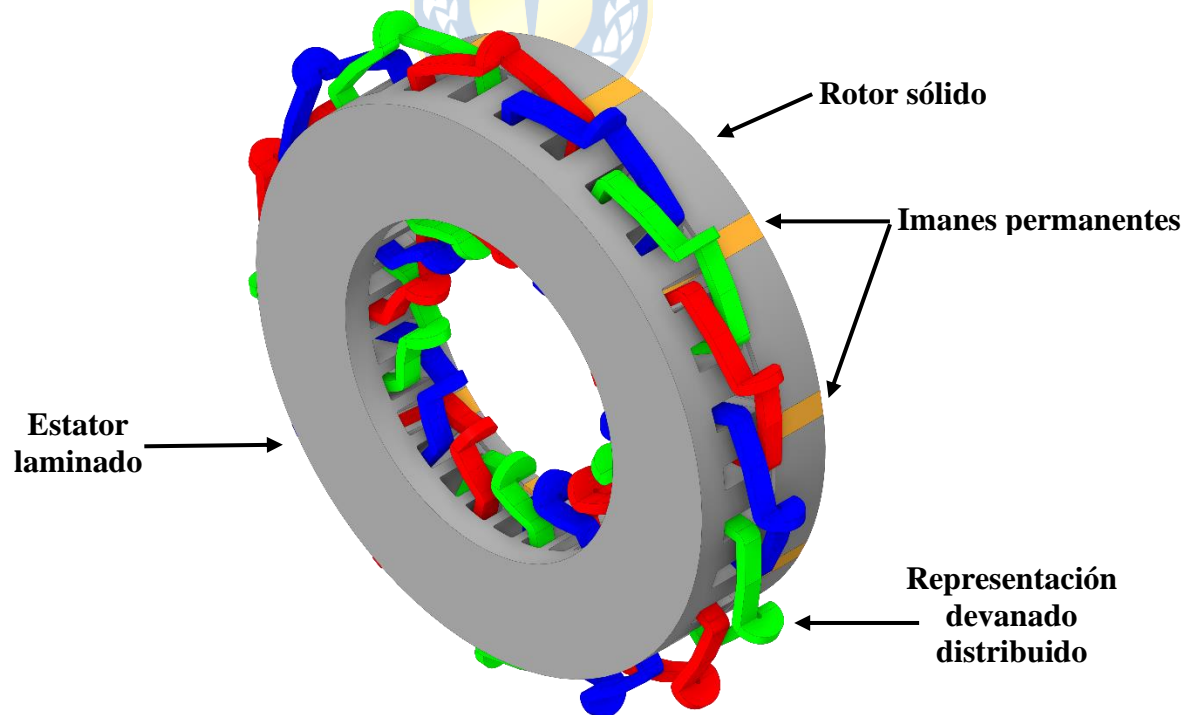


Figura 2.3 Modelo 3D máquina de flujo axial con imanes permanentes con devanados distribuidos.

Para el estudio del comportamiento magnético del motor utilizando el modelo en elementos finitos creado, se utilizó un devanado trifásico distribuido de una capa, con 100 vueltas por fase. La distribución de las fases está representada en la **Figura 2.3** con los colores rojos, verde y azul. También se puede observar de color naranja la disposición de los 10 imanes en la estructura del rotor. Los materiales utilizados son los siguientes:

- La estructura del estator está compuesta por acero laminado M250-50A.
- La estructura del rotor, al ser de tipo spoke con imanes insertos se utilizó un acero al carbono 1020 sólido para dar soporte a la estructura.
- Los imanes utilizados son de neodimio hierro (NdFe30) magnetizados de forma tangencial.

2.2.2 Análisis electromagnético

La máquina presentada se simuló en vacío y con carga. Se alimentó de tal forma que la densidad de corriente fuera de 5 A/mm^2 para la operación bajo carga y también se estudiaron distintos puntos de operación para analizar la saliencia. El torque *cogging* se obtuvo a partir de simulaciones magnetostáticas. Para calcular el voltaje se hace girar la máquina a velocidad nominal sin energizar los devanados. El voltaje inducido se mide en los terminales de las tres fases.

2.2.3 Curvas características

En la **Figura 2.4**, se muestra el torque *cogging* de la máquina. Se puede observar la presencia de fluctuaciones periódicas en el torque a medida que el rotor gira. Estas fluctuaciones son causadas por la interacción de los imanes permanentes con la estructura del estator. El torque *cogging* también se relaciona con otros parámetros de diseño como la combinación de polos y ranuras, la apertura de ranura y el largo del entrehierro. El periodo del torque *cogging* puede ser calculado con la ecuación (2.4).

$$\frac{MCM(Q_s, 2p)}{2p} \quad (2.4)$$

Donde Q_s es el número de ranuras del estator y p es el número de polos.

Se puede observar que el periodo es de 3 grados mecánicos llegando a un valor *peak-to-peak* de 8.2 [Nm].

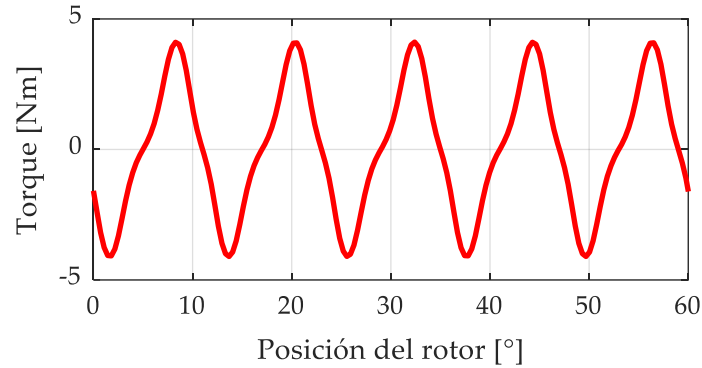


Figura 2.4 Torque *cogging* operación en vacío.

En la **Figura 2.5**, se muestra el voltaje inducido de la máquina en estudio para una velocidad de 600 rpm. El voltaje inducido es generado por el fenómeno de inducción electromagnética descrito por la Ley de Faraday, en donde la variación del flujo magnético en una bobina junto con la distribución trifásica de los devanados genera la distribución de voltaje mostrada. Para calcular el voltaje inducido se puede utilizar la ecuación (2.5). Variar la densidad de flujo en el entrehierro al modificar las dimensiones o el tipo de imán, modificar la velocidad o el número de vueltas de los devanados tiene un impacto directo en el voltaje inducido.

$$E = \omega \cdot k_{ef} \cdot N_s \cdot B \cdot \sin(\theta_b) \quad (2.5)$$

Donde ω es la velocidad angular de rotación en rad/s , k_{ef} es la constante de fuerza electromotriz, N_s es el número de vueltas del devanado, B es la densidad de flujo magnético en el entrehierro y θ_b es el ángulo entre el eje de referencia y el flujo magnético.

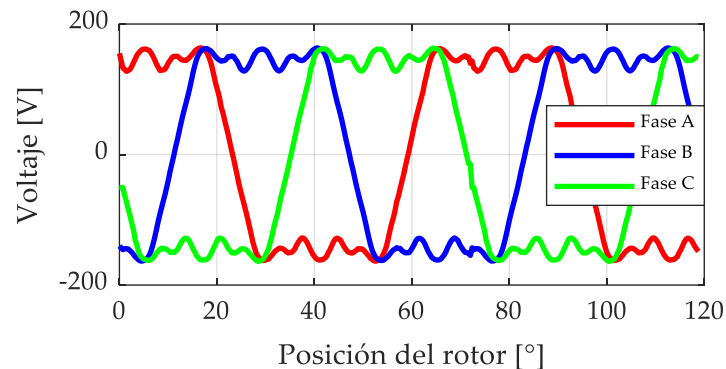


Figura 2.5 Voltaje inducido operación en vacío.

El torque electromagnético se muestra en la **Figura 2.6**. El valor medio del torque es de 23.1 [Nm] con un porcentaje de *ripple* de 53.3% equivalente a 12.3 [Nm] *peak-to-peak*. Este resultado se obtuvo para un punto de operación específico ($\alpha_i^e = 90^\circ$; $J = 5 \text{ A/mm}^2$).

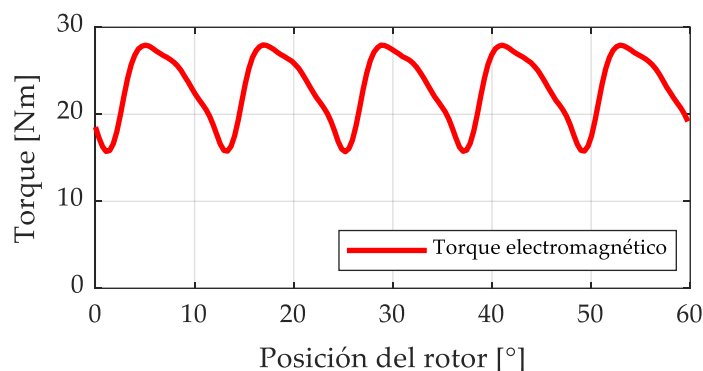


Figura 2.6 Torque electromagnético operación bajo carga.

En la **Figura 2.7** se muestra la saliencia obtenida para distintos puntos de operación de la máquina en estudio. Es posible notar que la saliencia disminuye al aumentar la densidad de corriente para ángulos de corriente bajos ya que la saliencia depende de la diferencia de permeabilidad magnética entre los caminos que debe cruzar el flujo magnético. Una mayor densidad de corriente implica una mayor saturación del material ferromagnético y la saliencia disminuye. Lo anterior no se cumple para ángulos de corriente elevados debido a que a medida que aumenta el ángulo de corriente la distribución del flujo magnético cambia significativamente lo que en este caso favorece a la saliencia.

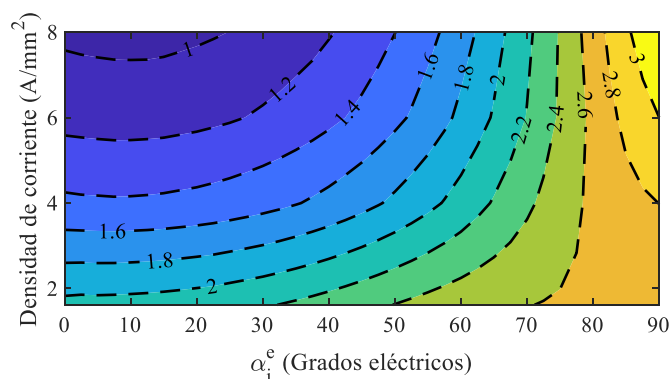


Figura 2.7 Relación de saliencia para diferentes valores de densidad y ángulo de corriente.

En la **Figura 2.8**, se puede observar la superposición entre las curvas de torque medio y saliencia para la máquina en estudio en distintos puntos de operación. De acuerdo con los resultados se tiene que no es posible obtener máximo torque y máxima saliencia de forma simultánea. El mayor

torque que se puede obtener en condiciones nominales es de 80 [Nm] con una saliencia máxima de 1.6 en el punto de operación marcado con azul. Mientras que la mayor saliencia que se obtiene es de 3 en el punto de operación indicado con verde de la **Figura 2.8**.

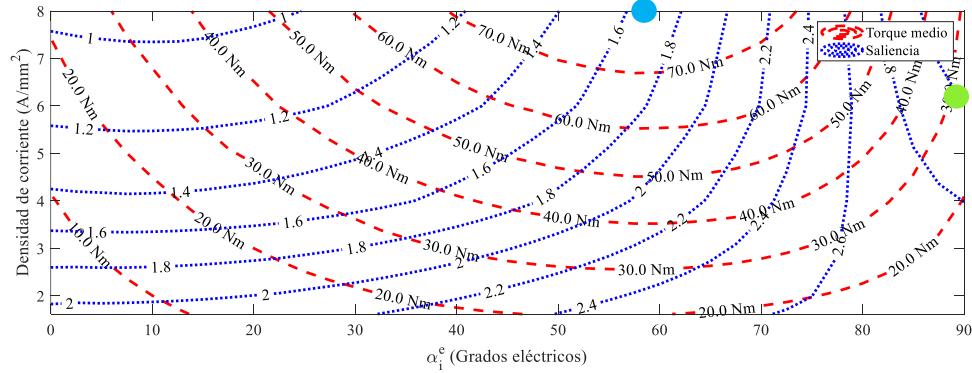


Figura 2.8 Superposición de las curvas de contorno para torque medio y saliencia. Punto azul, operación de máximo torque. Punto verde, operación de máxima saliencia.

En la **Figura 2.9**, es posible observar la distribución de densidad de flujo magnético en la superficie de la estructura magnética de la máquina. La mayor densidad de flujo magnético registrada se encuentra en los dientes del estator, llegando hasta 1.8 [T] en algunos puntos debido al flujo magnético en la zona interpolar.

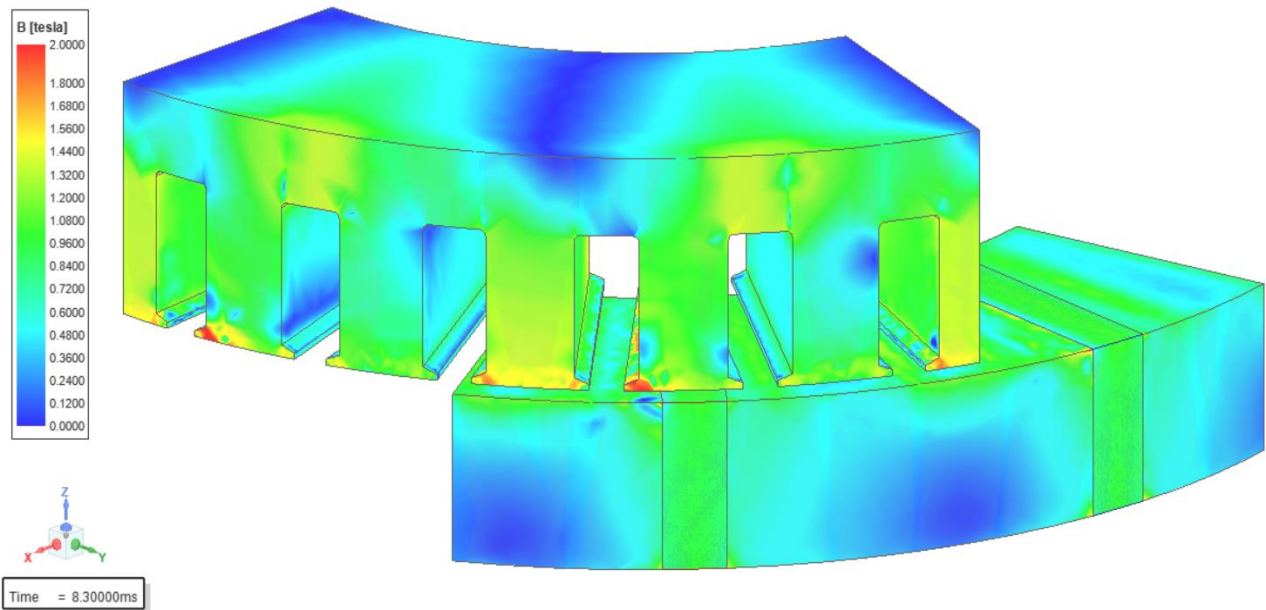


Figura 2.9 Distribución de densidad de flujo magnético sobre la superficie. Máquina con devanados distribuidos.

2.2.4 Análisis de pérdidas y eficiencia

El análisis de pérdidas es fundamental en el diseño de máquinas eléctricas ya que en algunos casos es necesario utilizar sistemas de enfriamiento complejos para mantener una temperatura adecuada y garantizar una operación óptima. Las pérdidas generadas en la máquina son la principal fuente de calor. Su cálculo a partir de simulaciones permite determinar el calor generado por la máquina para hacer un correcto diseño del sistema de refrigeración. En general, las máquinas eléctricas se fabrican con estructuras cerradas o parcialmente cerradas con el fin de proteger componentes activos de la máquina, como los devanados y partes móviles de factores ambientales adversos como la humedad, la abrasión y daños mecánicos, los cuales pueden reducir su vida útil.

La herramienta electromagnética de ANSYS Electronics permite calcular distintos tipos de pérdidas en una máquina eléctrica. Las pérdidas en el núcleo, que incluyen pérdidas por histéresis, pérdida por corrientes parásitas y pérdidas por exceso. Las pérdidas en el devanado que consideran las pérdidas por efecto Joule debido a la corriente a través de las bobinas. Las pérdidas sólidas corresponden a las pérdidas producidas por corrientes inducidas en las partes sólidas. Estas se usaron para calcular las pérdidas en los imanes y como opción para calcular las pérdidas en el núcleo del rotor de la máquina [31].

La estructura del rotor se fabricó en acero SAE-1020. Los datos necesarios para calcular las pérdidas en este tipo de acero no son entregados por el fabricante, por lo tanto, para calcular las pérdidas en el núcleo del rotor, se decide solo calcular las pérdidas generadas por corrientes parásitas y despreciar las pérdidas por histéresis. Esta estrategia daría una buena aproximación de las pérdidas totales ya que al tratarse de una máquina que opera a baja frecuencia estas se podría suponer que serían mínimas y al ser una estructura sólida deberían predominar las perdidas por corrientes parásitas.

Para calcular las pérdidas en el núcleo ANSYS incluye las siguientes tres componentes:

- 1) Pérdidas por corrientes de parásitas:

$$P_c = k_c (f B_m)^2 \quad (2.6)$$

- 2) Pérdidas por histéresis:

$$P_h = k_h (f B_m)^2 \quad (2.7)$$

- 3) Pérdidas adicionales o por exceso:

$$P_e = k_e (f B_m)^{1.5} \quad (2.8)$$

Donde f es la frecuencia, B_m es la densidad de flujo magnético máximo en el núcleo donde se están calculando las pérdidas, k_c corresponde al coeficiente de pérdidas parásitas en el núcleo, k_h al coeficiente de pérdidas por histéresis y k_e al coeficiente de pérdidas por exceso.

Así, las pérdidas en el núcleo están dadas por:

$$P_{\text{núcleo}} = P_c + P_h + P_e \quad (2.9)$$

Los coeficientes son calculados a partir de gráficos de pérdidas del material. Estos gráficos son conocidos como B-P (densidad de flujo magnético vs pérdidas). Para el correcto cálculo de las pérdidas en el núcleo es necesario conocer el comportamiento de la curva B-P de los materiales y tener la certeza del espesor de las laminaciones.

Por otro lado, las pérdidas en el devanado son calculadas con ecuación (2.10):

$$P_{cu} = \frac{1}{\sigma} \int_V J^2 dV \quad (2.10)$$

Donde J es la densidad de corriente y σ es la conductividad del material.

El procedimiento de cálculo para obtener la eficiencia se basa en lo siguiente: En primer lugar, con los datos de torque medio y velocidad angular es posible calcular la potencia mecánica de salida de la máquina, como se muestra en la ecuación (2.11):

$$P_{out} = \tau \cdot \omega \quad (2.11)$$

Luego, la potencia de entrada se calcula como la potencia de salida más las pérdidas obtenidas en el estator, rotor y en el cobre como se muestra en la ecuación (2.12):

$$P_{in} = P_{out} + P_{cu} + P_{estator} + P_{rotor} \quad (2.12)$$

De esta manera, la eficiencia se calcula como la potencia de entrada sobre la potencia de salida, tal como muestra la ecuación (2.13):

$$\eta = \frac{P_{in}}{P_{out}} \cdot 100 \quad (2.13)$$

En la **Tabla 2.2**, se presentan las pérdidas calculadas mediante el software de análisis de elementos finitos para la máquina en estudio en operación bajo carga, imponiendo una densidad de corriente de 5 A/mm² a velocidad nominal. Las pérdidas son agrupadas en tres partes, pérdidas en el estator, las cuales incluyen pérdidas por corrientes de parásitas, pérdidas por Histéresis y pérdidas

adicionales o por exceso. Las pérdidas adicionales corresponden a pérdidas de energía que se producen en adición a las pérdidas normales de la máquina, por ejemplo, pérdidas magnéticas adicionales asociadas al fenómeno de saturación magnética en el material del núcleo. Las pérdidas en el rotor, las cuales corresponden a las pérdidas ocasionadas por corrientes inducidas en los imanes y en el núcleo del rotor. Por último, las pérdidas en el cobre, que corresponden a las pérdidas generadas en los devanados por efecto Joule.

Según los resultados mostrados en la **Tabla 2.2**, se tiene un total de pérdidas de 264.8 [W], alcanzando una eficiencia de 84.5%.

Tabla 2.2 Pérdidas máquina con devanados distribuidos.

Tipo	Pérdidas Máquina con devanado distribuido
Pérdidas en el estator	17,1 [W]
Pérdidas en el rotor	3,1 [W]
Pérdidas en el cobre	244,6 [W]
Pérdidas totales	264.8 [W]
Eficiencia	84.5 %

En la **Figura 2.10** es posible notar como se distribuye la densidad de pérdidas en el rotor, donde las zonas con mayores pérdidas son en el núcleo, específicamente en la zona interpolar. Esto se debe a las corrientes inducidas, las cuales se producen debido a la variación del flujo magnético generado por el estator y percibido por el núcleo ferromagnético del rotor.

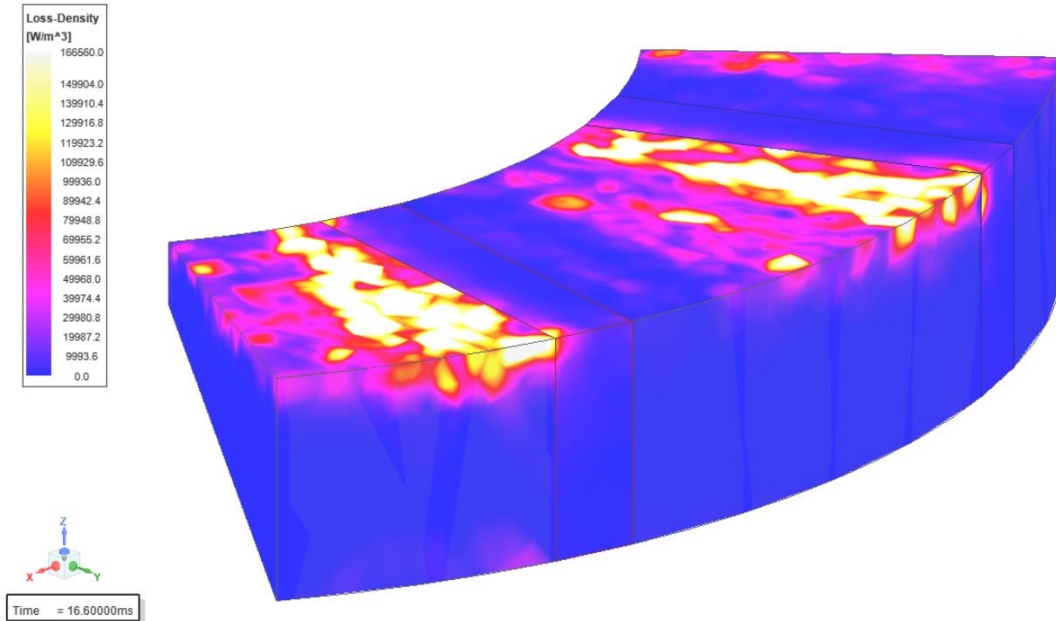


Figura 2.10 Distribución de densidad de pérdidas en la superficie del rotor.

2.2.5 Discusión

Los resultados obtenidos del análisis mediante elementos finitos realizado muestran el desempeño electromagnético de la máquina en estudio. La cual desarrolla un torque medio de 23.1 [Nm] en el punto de operación estudiado ($\alpha_i^e = 90^\circ$; $J = 5 \text{ A/mm}^2$) con un alto *ripple* de torque, llegando a un 53.3%. La máquina logra una eficiencia de apenas 84.5% debido mayormente a las pérdidas en los devanados. Lo anterior abre la posibilidad de mejorar el rendimiento de la máquina utilizando las herramientas de diseño disponibles, abordando las características del devanado trifásico y la geometría del rotor.

Capítulo 3. Mejoras en el diseño de la máquina para aumentar su desempeño

3.1 Introducción

En el presente capítulo se estudian diferentes estrategias para mejorar el desempeño de la máquina construida. Se incluyen modificaciones en el tipo de devanado, como también modificaciones en la estructura del rotor. Lo anterior se realiza utilizando ANSYS, software de análisis en elementos finitos para máquinas eléctricas.

Las configuraciones de devanados que son ampliamente utilizadas en máquinas trifásicas son devanados de tipo distribuido y devanados de tipo concentrado. La utilización de uno u otro dependerá de la aplicación para la cual haya sido diseñada la máquina. En un devanado de tipo distribuido, la fuerza magnetomotriz se distribuye de manera uniforme a lo largo del entrehierro. Esto se logra dividiendo el devanado en varias secciones o fases y conectando las bobinas de cada fase en serie. La distribución uniforme de la fuerza magnetomotriz ayuda a reducir el contenido armónico. Los devanados de tipo distribuido tienden a tener una respuesta más suave y una menor distorsión armónica, lo que puede resultar en un mejor rendimiento de la máquina. Por otro lado, en un devanado de tipo concentrado, la fuerza magnetomotriz se concentra en un número reducido de bobinas o grupos de bobinas. Esto puede resultar en una distribución desigual de la fuerza magnetomotriz a lo largo del devanado y puede generar un mayor contenido armónico. Los devanados de tipo concentrado a menudo se utilizan en aplicaciones donde se requiere una alta densidad de potencia y donde la distorsión armónica no es un factor crítico [32].

3.2 Modificación del tipo de devanado

De acuerdo con [23], los devanados se pueden clasificar de acuerdo con el número de ranuras por polo por fase (q) como: distribuidos cuando $q > 1$ y concentrados para $q \leq 1$. Cuando q es no entero son conocidos como devanados de paso fraccionario, en caso contrario, se les llama de tipo entero. De esta manera, existen dos tipos de devanados concentrados, cuando $q = 1$ se les llama concentrados de paso entero y para $q < 1$ concentrados de paso fraccionario. El estudio de la modificación del tipo de devanado utilizado se sustenta en la posible mejora del desempeño de la máquina.

3.2.1 Devanados Distribuidos

En los devanados distribuidos cada ranura aloja los conductores de una o más de una fase, como resultado, cada polo ubicado frente a estas ranuras experimenta distintas magnitudes de flujo magnético. En la construcción de máquinas de flujo axial con devanados distribuidos suelen existir dificultades en encontrar un espacio adecuado para las largas y voluptuosas cabezas de bobina. En este tipo de máquinas el espacio axial disponible es esencial para lograr un diseño compacto. Las cabezas de bobina pueden ocupar un espacio significativo, lo que puede resultar perjudicial en aplicaciones en las que el tamaño y el peso de la máquina son críticos. Además, la presencia de cabezas de bobina de mayor tamaño aumenta las pérdidas en el estator por corrientes parásitas en la zona [24].

Una ventaja de la utilización de devanados distribuidos es que permite aprovechar de mejor manera el núcleo ferromagnético del estator. Además, pueden ayudar a reducir los armónicos en el flujo magnético, así como también facilitar su control. En la **Figura 3.1** se presenta el devanado de tipo distribuido utilizado en la configuración que posee la máquina en estudio. Este fue diseñado y construido para un estator de 30 ranuras, con una configuración de 10 polos, 3 fases y por lo tanto, una ranura por fase por polo, con una configuración de devanado de una capa.

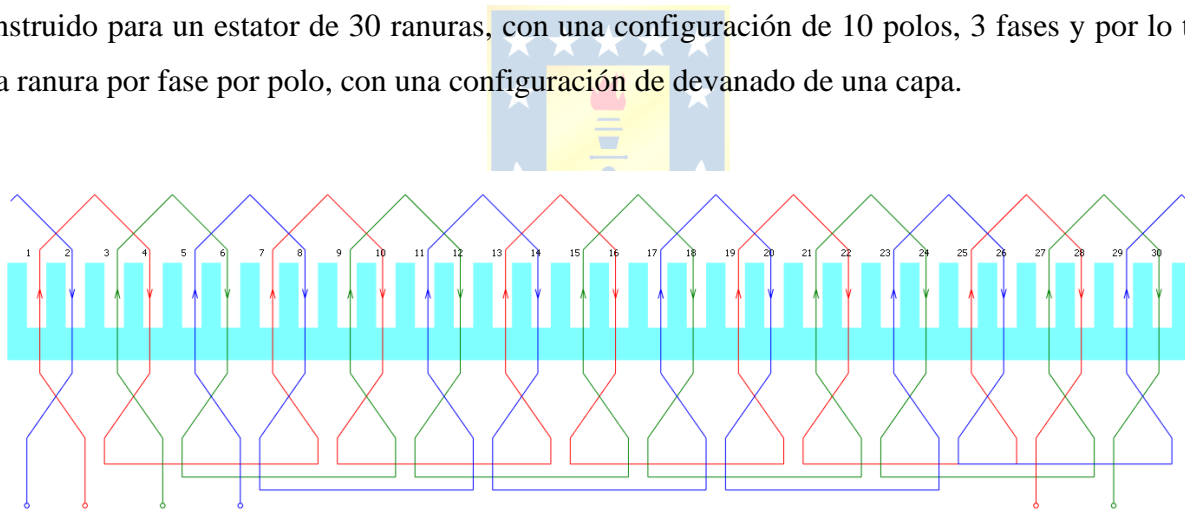


Figura 3.1 Configuración de devanado de tipo distribuido trifásico. Fase A en rojo, fase B en verde y fase C en azul.

3.2.2 Devanados Concentrados

Los devanados concentrados, como se muestra en la **Figura 3.2**, son un tipo de devanado en el cual cada ranura aloja los conductores de una misma fase o de dos fases como es el caso de los devanados concentrados de tipo fraccionario. Por lo tanto, los polos que se encuentran frente a esas ranuras son atravesados por un mismo flujo magnético principal.

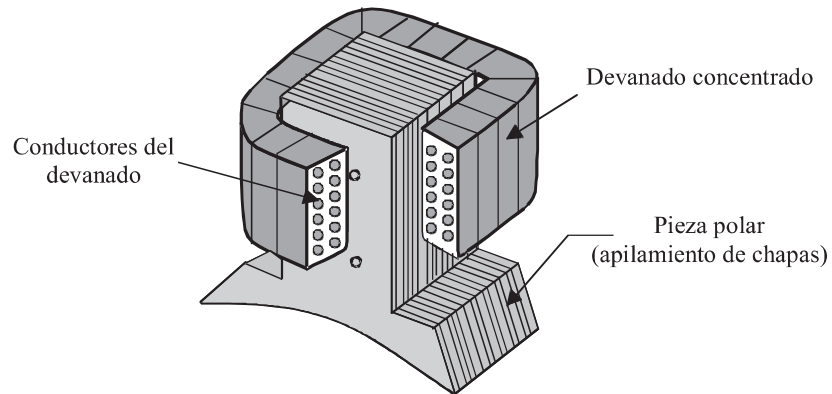


Figura 3.2 Ilustración de un devanado concentrado para una sección de un polo [33].

La ventaja principal de la utilización de este tipo de devanado es que poseen una cabeza de bobina más pequeña. Esto implica un menor uso de material produciendo menores pérdidas en el cobre y permite una manufactura simplificada del estator. En el caso que no existan cabezas de diente en el estator, las bobinas pueden ser preformadas, lo que simplifica la construcción. Además, este tipo de devanado ofrece otras ventajas, las que incluyen una alta densidad de potencia, alta eficiencia, un mejor factor de relleno, bajo torque pulsante y mejor tolerancia a las fallas. Uno de los desafíos importantes que se presentan en este tipo de devanados es el aumento significativo de las pérdidas en el núcleo del rotor, particularmente a altas velocidades, debido a la presencia de armónicos en el flujo magnético, los que son inherentes a este tipo de devanado y que no están en sincronismo con el rotor [24].

En la **Figura 3.3** se presenta el devanado concentrado de doble capa utilizado en el diseño propuesto. Esta configuración de devanado propuesta para un estator de 12 ranuras, 10 polos y 3 fases posee una configuración de doble capa con un paso fraccionario de 0.4 ranuras por fase por polo. Como se puede observar, la diferencia con el devanado distribuido radica principalmente en la disposición física de los conductores, en el primer caso se tiene que cada bobina se cruza con las bobinas de las otras fases a medida que recorre las ranuras del estator, lo que hace que las cabezas de bobina sean más largas. En cambio, en la configuración de devanado concentrado las bobinas no se cruzan, por lo tanto se pierde menos espacio y se utiliza menos cobre ya que las cabezas de bobina son más cortas.

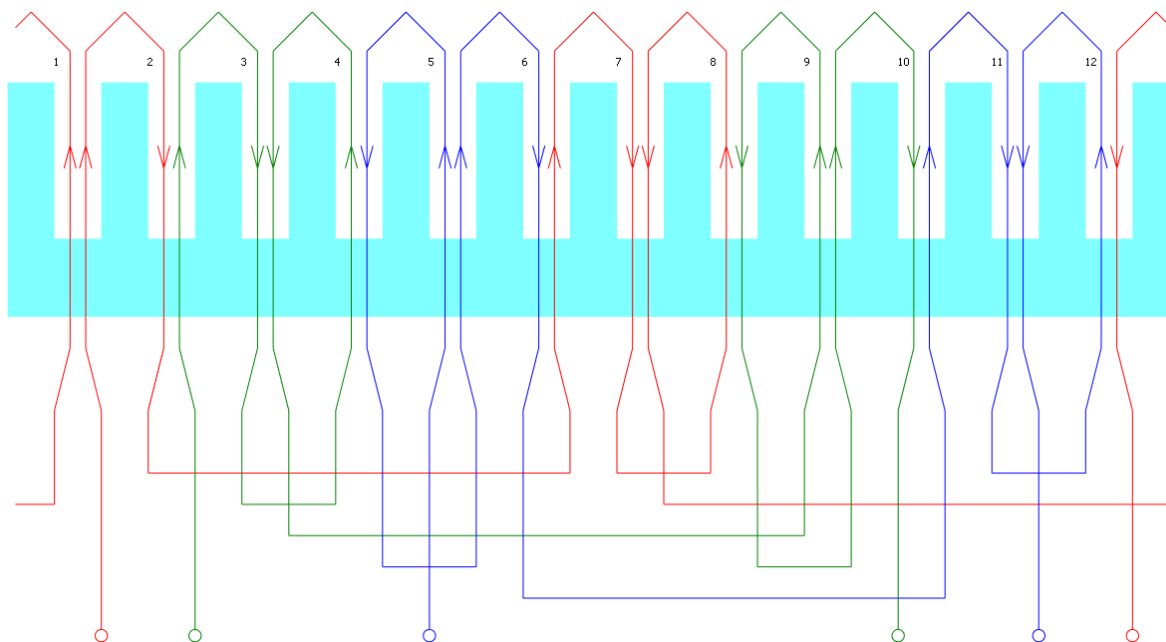


Figura 3.3 Configuración de devanado de tipo concentrado trifásico. Fase A en rojo, fase B en verde y fase C en azul.

3.2.3 Comparación entre los devanados

La fuerza magnetomotriz y el contenido armónico son dos aspectos importantes para considerar en el diseño de devanados para máquinas eléctricas. En la **Figura 3.4** se muestra la fuerza magnetomotriz obtenida para la configuración de la máquina con devanados distribuidos en estudio (10 polos, 30 ranuras y 3 fases). Los datos para la construcción de la distribución de la fuerza magnetomotriz fueron obtenidos utilizando la herramienta Koil del software Dolomites [34], ingresando el número de fases, ranuras y polos del motor. Se puede observar una distribución uniforme con un bajo contenido armónico.

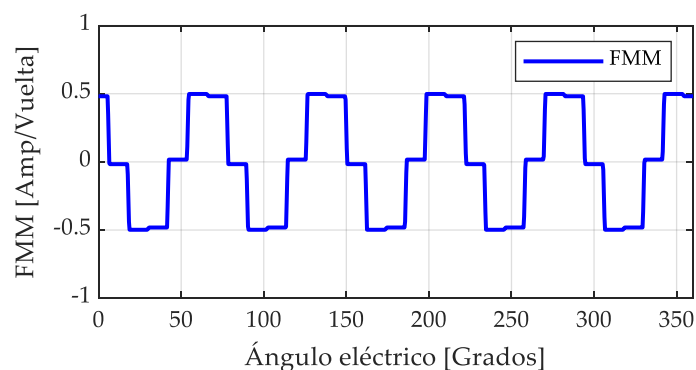


Figura 3.4 Fuerza magnetomotriz devanado distribuido.

La distribución armónica se muestra en la **Figura 3.5** y se calcula aplicando una transformada rápida de Fourier (FFT) a la forma de onda de la fuerza magnetomotriz obtenida. Es posible observar el contenido armónico de la fuerza magnetomotriz debido a la configuración de devanado utilizada, en donde la quinta armónica es la de trabajo, mostrando una baja distorsión armónica total.

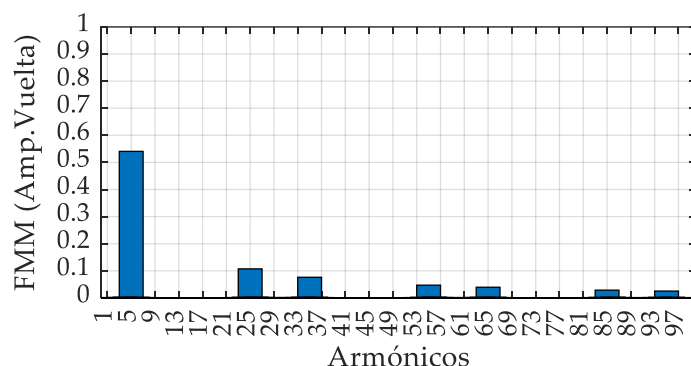


Figura 3.5 Contenido armónico FMM devanado distribuido.

Para la configuración con **devanado concentrado** se utilizó una configuración de 10 polos, 12 ranuras y 3 fases. En [35] se afirma que esta combinación de polos y ranuras desarrolla mayor torque medio y menor torque *cogging* en comparación a una máquina con menor número de ranuras y en [36] se demuestra que bajo distintas dimensiones de imanes permanentes la combinación de 10 polos y 12 ranuras desarrolla un *ripple* de torque inferior al 6% del torque medio, con un torque *cogging* mínimo. Utilizando los datos antes mencionados se obtiene la distribución de fuerza magnetomotriz que se muestra en la **Figura 3.6**. Se puede observar una distribución de fuerza magnetomotriz no uniforme, este tipo de devanado genera una concentración de la fuerza magnetomotriz en cada grupo de bobinas generando una mayor distorsión armónica total.

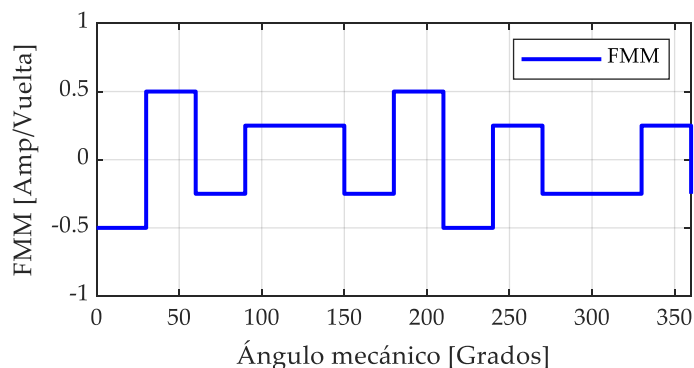


Figura 3.6 Fuerza magnetomotriz devanado concentrado.

En la **Figura 3.7** es posible observar la presencia de armónicos y sub armónicos, en donde la quinta es la armónica de trabajo ya que se trata de una máquina con 5 pares de polos. Por otro lado, se presenta un elevado contenido de séptima armónica, lo que se traduce en un aumento de las pérdidas producidas.

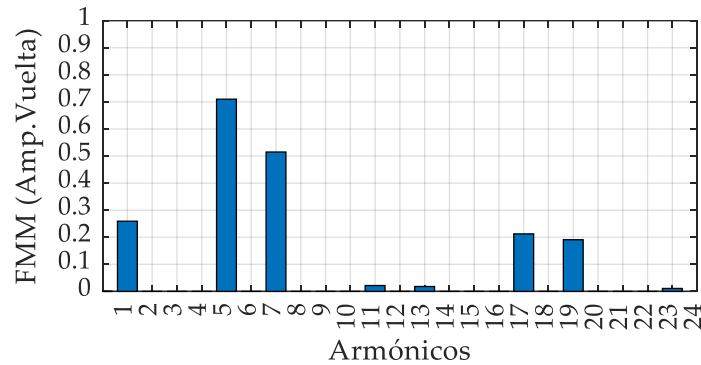


Figura 3.7 Contenido armónico FMM devanado concentrado.

La elección entre un devanado de tipo distribuido y un devanado de tipo concentrado en una máquina eléctrica de flujo axial con imanes permanentes depende de los requisitos específicos de la aplicación. Si se busca una operación con menor vibración y ruido y una menor distorsión armónica, el devanado de tipo distribuido puede ser atractivo. Sin embargo, si se prioriza una alta densidad de potencia y la distorsión armónica total de la fuerza magnetomotriz no es un criterio a considerar en el diseño, el devanado de tipo concentrado podría ser más adecuado. Por otro lado, en cuanto a las características de diseño del devanado, el factor de bobinado k_w depende del número de ranuras en donde se alojan las bobinas de la fase, de la separación entre estas ranuras y del paso de bobina. Este factor afecta la fuerza electromagnética inducida en el devanado y al campo magnético generado en el entrehierro de la máquina. Un factor de bobinado alto significa que las bobinas están más concentradas y alineadas con el eje de la fase, lo que produce una fuerza electromagnética mayor. En el caso de los dos tipos de devanado estudiados, la configuración con devanados distribuidos presenta un factor de bobinado de 1, mientras que la configuración con devanados concentrados presenta un factor de bobinado de 0.933, por lo tanto, bajo las mismas condiciones de operación, la máquina con devanado distribuido debe desarrollar mayor torque.

El uso de un devanado de tipo concentrado aumenta el contenido armónico total de la máquina, lo que puede tener repercusiones en el rendimiento. Puede presentarse un aumento en las pérdidas debido a que se genera una mayor densidad de corrientes parásitas en el núcleo. El rotor al no ser laminado provoca que se generen mayores corrientes inducidas y por lo tanto mayores pérdidas,

reduciendo la eficiencia de la máquina. Por otro lado, estas armónicas podrían generar vibraciones y ruido en la máquina debido a las fuerzas magnéticas y mecánicas no deseadas.

El uso de devanados concentrados es una solución atractiva debido a lo cortas y uniformes cabezas de bobina, especialmente cuando se usan conductores rectangulares. Además, es posible usar bobinas preformadas y estatores segmentados lo cual facilita la construcción y ensamblaje de este tipo de motores.

3.2.4 Propuesta de bobinado

De acuerdo con distintos estudios [24]-[32], la adopción de un bobinado de tipo concentrado permite mejorar el desempeño de la máquina, mejorando la característica del torque electromagnético. Para poder realizar una comparación justa del comportamiento magnético, las simulaciones se hicieron en base a una densidad de corriente constante de 5 A/mm^2 para ambas máquinas.

Para la construcción del modelo 3D de la máquina con devanados concentrados se realizó con exactamente el mismo rotor de la máquina con devanados distribuidos. La geometría del estator se modificó, adoptando una configuración de 12 ranuras. Para encontrar la geometría óptima del nuevo estator se utilizó la herramienta del software ANSYS Workbench, la cual permite optimizar las dimensiones del estator utilizando un algoritmo genético multiobjetivo (MOGA) integrado. El cual permite obtener el óptimo global a partir de múltiples objetivos y restricciones. Las funciones objetivo son maximizar el torque medio y minimizar el *ripple* de torque. Para llevar a cabo la optimización se realizó una parametrización de algunas dimensiones del estator, como son largo total del estator (l_s) y ancho y altura del diente (b_t y h_t) las que se pueden ver en la **Figura 3.8**.

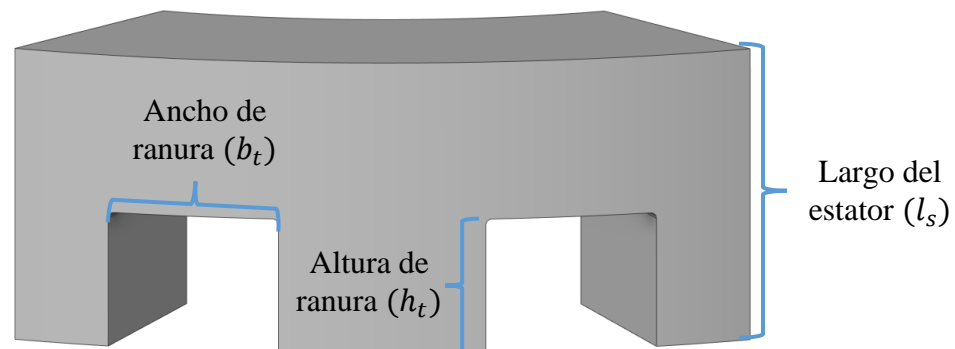


Figura 3.8 Dimensiones del estator máquina con devanado concentrado.

Se realizaron 20 iteraciones, cada iteración con un número de 100 diseños, donde fueron definidas las respectivas restricciones geométricas para evitar diseños inválidos. Los resultados se pueden observar en la **Figura 3.9**.

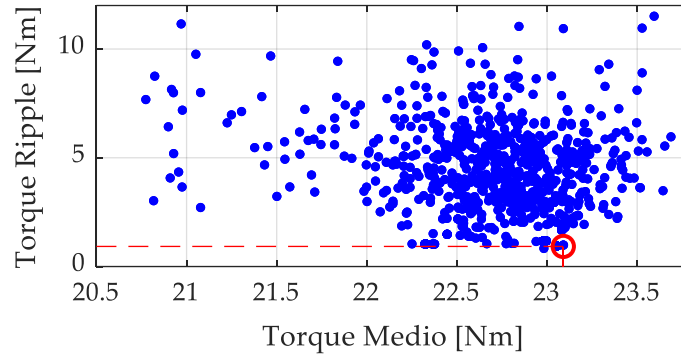


Figura 3.9 Diseños obtenidos en el proceso de optimización.

Como se puede apreciar en la **Figura 3.9**, el *ripple* de torque se mantiene acotado entre 0.9 y 15 [Nm]. Mientras que el torque medio varía entre 20.5 y 24 [Nm]. La justificación en la elección del candidato óptimo se basó principalmente en obtener un bajo *ripple* sacrificando la menor cantidad de torque medio. Se decidió elegir una máquina con bajo *ripple* de torque debido a que este genera vibraciones adicionales que eventualmente llegan a dañar partes mecánicas de la máquina como los rodamientos. El candidato óptimo obtenido maximizando torque medio y minimizando *ripple* de torque se encuentra resaltado con rojo en la **Figura 3.9**. Las nuevas dimensiones de la máquina se presentan en la **Tabla 3.1**.

Tabla 3.1 Dimensiones máquina con devanado concentrado.

Parámetro	Símbolo	Valor
Diámetro externo de estator	D_{SE}	250 mm
Diámetro interno de estator	D_{SI}	150 mm
Diámetro externo de rotor	D_{RE}	250 mm
Diámetro interno de rotor	D_{RI}	150 mm
Altura de diente de estator	h_t	23.976 mm
Ancho de diente de estator	b_t	28.663 mm
Largo total del estator	l_s	49 mm
Largo del entrehierro	g	2 mm
Número de vueltas de bobina	N_s	20
Número de ranuras	Q_s	12
Número de polos	$2p$	10
Velocidad nominal	n	600 rpm

El diseño obtenido se puede ver en la **Figura 3.10**, en donde se puede observar una representación del modelo creado a partir del software de análisis de elementos finitos ANSYS con la nueva geometría de la máquina. Esta máquina posee un devanado concentrado de doble capa tipo tooth coil con un paso fraccionario 0.4 ranuras por fase por polo. En cuanto a los materiales son exactamente los mismos utilizados en la máquina con devanado distribuido.

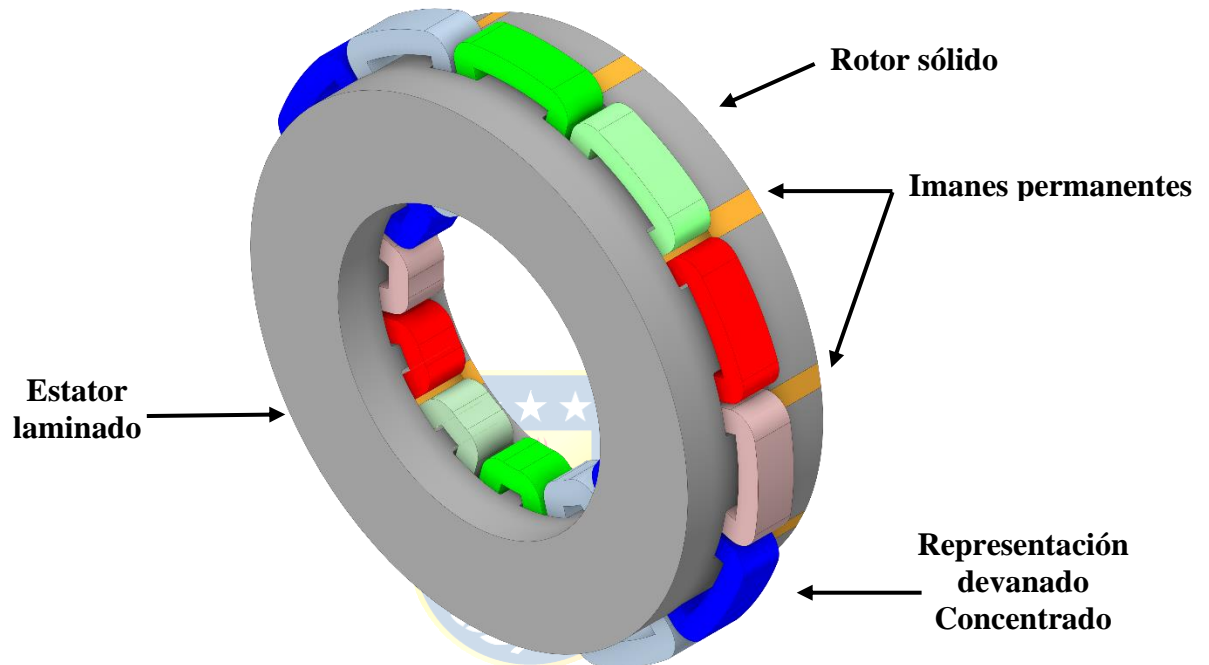


Figura 3.10 Modelo de la máquina de flujo axial con imanes permanentes utilizando devanados concentrados.

3.2.4.1 Curvas características

En la **Figura 3.11** se muestra el torque *cogging* de la máquina. Se puede observar la presencia de fluctuaciones periódicas, estas fluctuaciones son causadas principalmente por la presencia de imanes permanentes en la estructura del rotor. El torque *cogging* es menor en este caso debido a la utilización de devanados concentrados. El periodo del *cogging* se puede calcular con la ecuación (2.4), obteniendo un periodo de 6 grados mecánicos y un valor *peak-to-peak* de 0.4 [Nm].

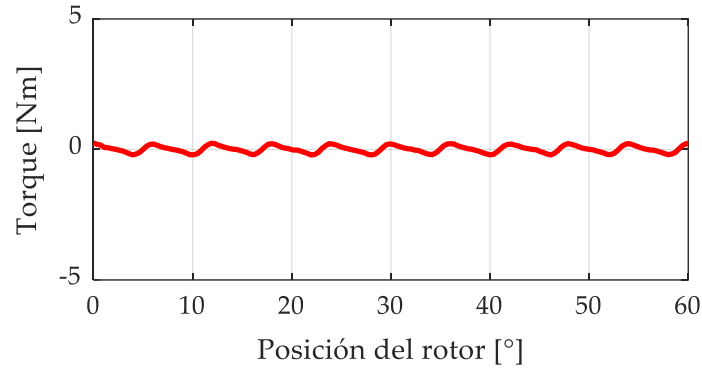


Figura 3.11 Torque cogging operación en vacío.

La **Figura 3.12** muestra el voltaje inducido de la máquina en estudio para una velocidad de 600 [rpm], los factores que influyen principalmente en el comportamiento del voltaje inducido son el número de vueltas de los devanados, la variación de la densidad de flujo debido a modificaciones en los imanes, la velocidad de rotación, así como también el factor de bobinado. Es posible notar una forma de onda con un valor máximo de ~30 [V] con una forma no sinusoidal debido al contenido armónico del flujo magnético en el entrehierro.

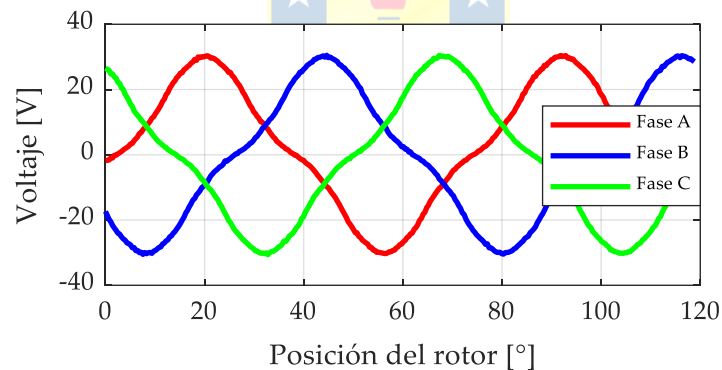


Figura 3.12 Voltaje inducido operación en vacío.

De la **Figura 3.13** es posible apreciar que la máquina desarrolla un torque medio de 23.3 [Nm] con un *ripple* de torque de 0.9239 [Nm] *peak-to-peak*, equivalente a un 4% para un determinado punto de operación ($\alpha_i^e = 90^\circ$; $J = 5 \text{ A/mm}^2$).

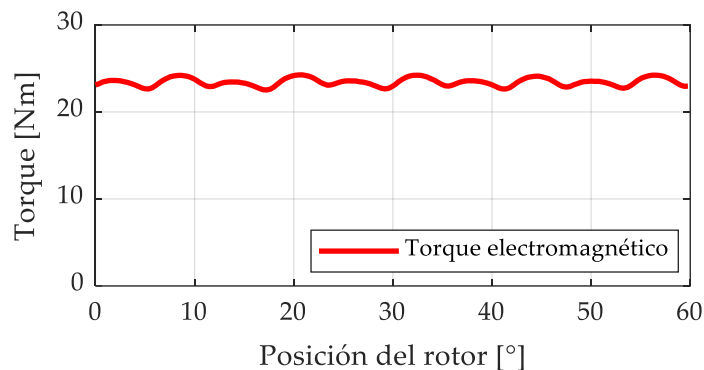


Figura 3.13 Torque electromagnético operación bajo carga.

La distribución de densidad de flujo magnético para el nuevo diseño de la máquina en estudio se muestra en la **Figura 3.14**. En cuanto a la distribución de la densidad de flujo magnético en la estructura del rotor y estator, es posible observar una menor concentración de flujo magnético en el yugo, situándose por debajo de 1.6 [T] en la mayoría de las zonas. En la estructura magnética del rotor es posible observar una concentración mayor de densidad de flujo magnético en la zona interpolar, esto, junto al mayor contenido armónico propicia alcanzar niveles de densidad de flujo magnético de hasta 2 [T].

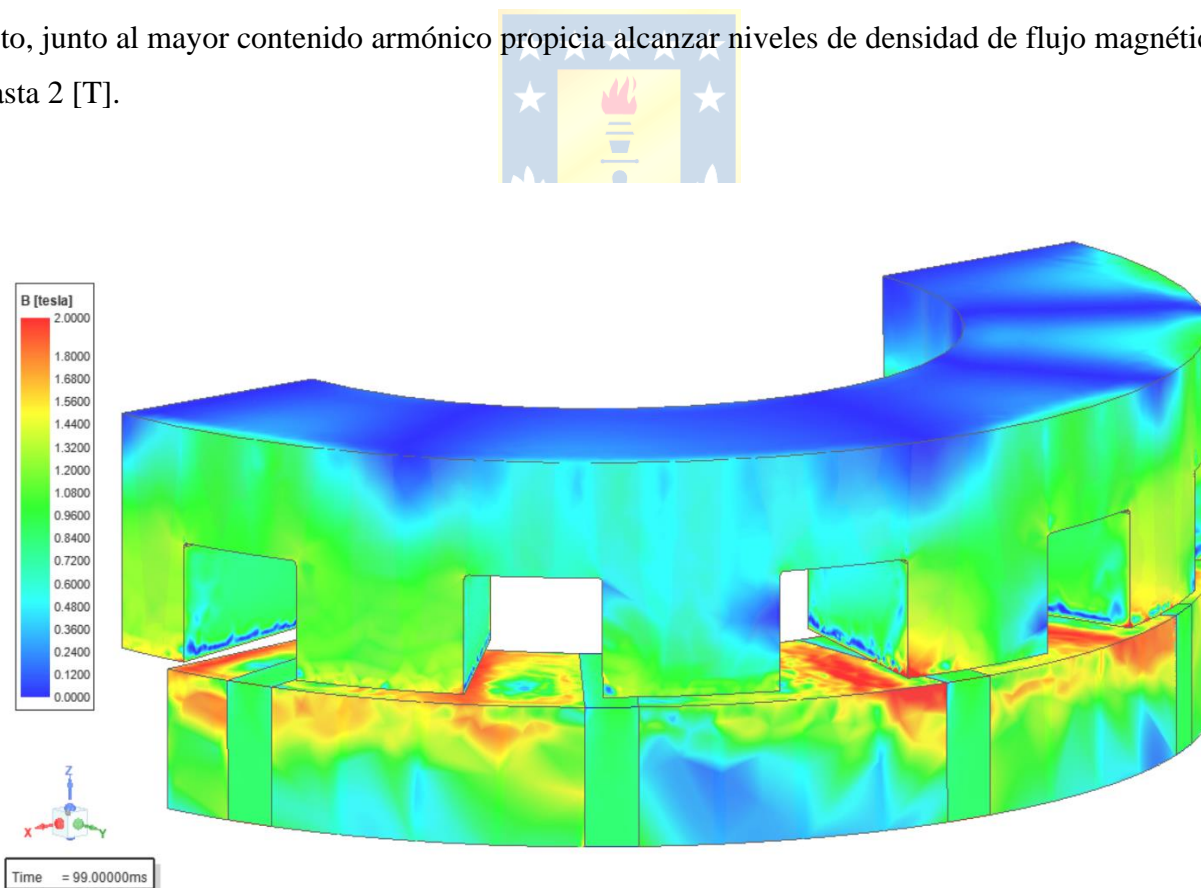


Figura 3.14 Distribución de densidad de flujo magnético sobre la superficie. Máquina con devanados concentrados.

3.2.4.2 Análisis de pérdidas

Las pérdidas para la máquina con devanados concentrados se muestran en la **Tabla 3.3**. Se puede observar que hay una mayor concentración de pérdidas en el rotor debido al mayor contenido armónico de la fuerza magnetomotriz, lo que provoca que existan mayores corrientes inducidas en la estructura sólida del rotor. El aumento considerable de pérdidas en el rotor provoca una baja notable en la eficiencia de la máquina de un 3.8%.

Tabla 3.2 Pérdidas máquina con devanados concentrados.

Tipo	Pérdidas Máquina con devanado distribuido
Pérdidas en el estator	11,3 [W]
Pérdidas en el rotor	267,3 [W]
Pérdidas en el cobre	70,7 [W]
Pérdidas totales	349.4 [W]
Eficiencia	80.7 %

En la **Figura 3.15** es posible notar como se distribuye la densidad de pérdidas en el rotor en el modelo con devanados concentrados. Las zonas con mayores pérdidas, al igual que en la máquina con devanados distribuidos, son en el núcleo del rotor, específicamente en la zona interpolar, llegando a valores ampliamente superiores a las pérdidas generadas en la máquina con devanados distribuidos.

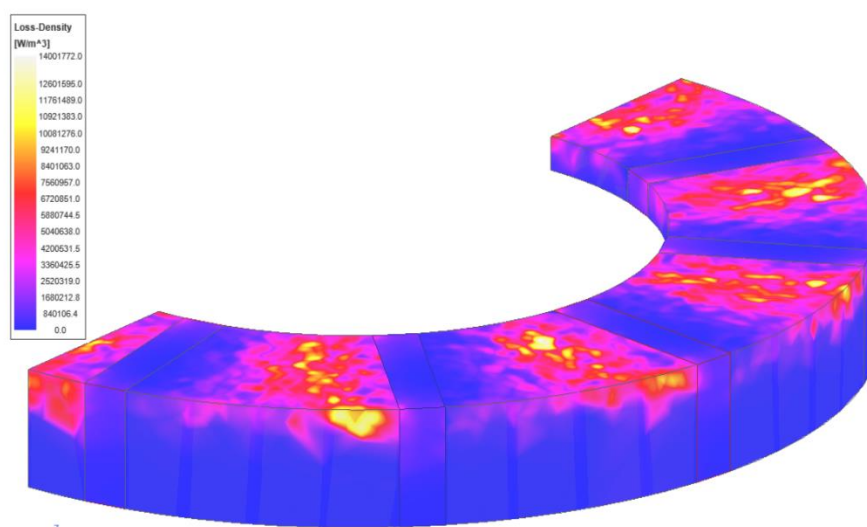


Figura 3.15 Distribución de densidad de pérdidas en la superficie del rotor. Máquina con devanado concentrado.

3.2.5 Comparación con la máquina original

A partir de los resultados obtenidos mediante el análisis con elementos finitos para ambos diseños se realiza un análisis comparativo del torque electromagnético resultante en el punto de operación estudiado. En la **Figura 3.16** se puede apreciar la característica de torque de ambas máquinas y de forma gráfica la diferencia que existe en las características de torque cogging y toque medio para cada una.

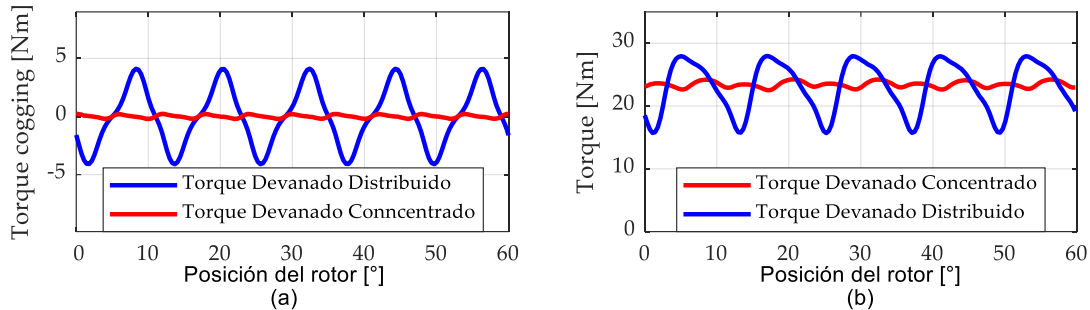


Figura 3.16 Comparación torque electromagnético ambas máquinas. (a) Torque *cogging*; (b) Torque operación bajo carga.

La máquina con devanados distribuidos posee un torque *cogging* elevado de 8 [Nm] *peak-to-peak* y en la operación bajo carga un *ripple* de torque de 53.3%. En aplicaciones de electromovilidad se requieren valores de *ripple* inferiores a 15%, por lo cual, los valores de la máquina con devanados distribuidos dificultan de manera considerable la operación y el rendimiento, pudiendo reducir la vida útil de las partes mecánicas de la máquina. Al adoptar un estator con devanados concentrados, existe una mayor concentración de corriente en un número inferior de ranuras, lo que aumenta el flujo magnético. En consecuencia, se distribuye de manera más compacta en el estator, aumentando la densidad de flujo magnético y mejorando las características de torque de la máquina. Los resultados muestran una reducción considerable en el torque *cogging* de un 94.2%, además se tiene un *ripple* de torque de apenas 3.95%, notablemente inferior a la máquina original. Esto se puede explicar debido a que la concentración de flujo en un número inferior de ranuras ayuda a suavizar el campo magnético y minimizar las variaciones en el torque, lo que resulta en un menor *ripple* de torque. Por otro lado, el torque medio obtenido para la máquina con devanado distribuido es de 23.1 [Nm] mientras que para la máquina con devanados concentrados es de 23.4[Nm], habiendo un leve aumento de 0.3 [Nm].

En cuanto a la distribución de la densidad de flujo magnético, en la máquina con devanados distribuidos se observa una baja saturación en el núcleo del estator. En la zona de los dientes y yugo se tienen valores de 1.5 [T], lo cual hace que la máquina opere por debajo de la rodilla de saturación en la curva BH. La **Figura 3.17 (a)** muestra la curva BH del material del estator. El punto de operación

de la máquina se encuentra resaltado en rojo. Los resultados para la máquina con devanados concentrados son similares, presentando niveles por poco mayores de densidad de flujo, pero inferiores a 1.6 [T] en el estator. En cuanto al rotor se observan niveles mayores de densidad de flujo magnético de hasta 2 [T] debido a la concentración en las zonas por debajo de los dientes del estator. De acuerdo con la curva B-H mostrada en la **Figura 3.17 (b)** en donde se encuentra resaltado en rojo el punto de operación, este se encuentra sobre la rodilla de saturación para el material. Esta saturación supondría mayores pérdidas en el núcleo del rotor.

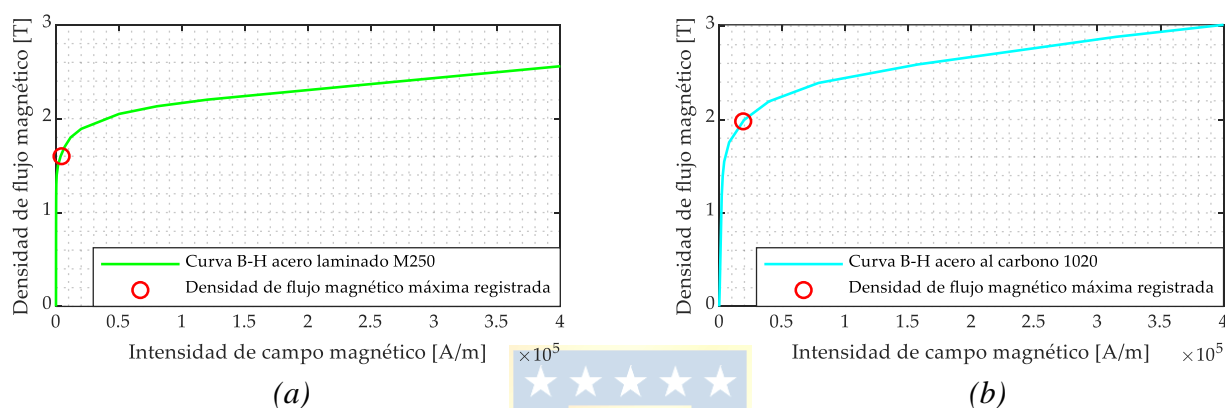


Figura 3.17 Curva B-H materiales de fabricación. (a) Curva B-H del estator (acero laminado M250); (b) Curva B-H del rotor (acero al carbono 1020).

En la **Tabla 3.3** se comparan las pérdidas para en la máquina original y en el diseño propuesto. Se puede notar un aumento en las pérdidas para la máquina con devanados concentrados debido al aumento considerable en las pérdidas en el rotor. Por otro lado, se compara la eficiencia para ambas máquinas, en donde se observa una disminución de 3.8% para la máquina con devanados concentrados.

Tabla 3.3 Tabla comparativa de pérdidas y eficiencia.

Tipo	Pérdidas Máquina con devanado distribuido	Pérdidas Máquina con devanado concentrado
Pérdidas en el estator	17,1 [W]	11,3 [W]
Pérdidas en el rotor	3,1 [W]	267,3 [W]
Pérdidas en el cobre	244,6 [W]	70,7 [W]
Pérdidas totales	264.8 [W]	349.4 [W]
Eficiencia	84.5 %	80.7 %

A partir de los resultados del análisis de pérdidas, es posible notar una gran diferencia en la distribución de las pérdidas en la máquina en estudio al pasar de un devanado distribuido a un devanado concentrado. Por un lado, se tienen las pérdidas en el estator, las cuales son notablemente menores en la máquina con devanados concentrados ya que se utilizó un estator con diferentes dimensiones. En cuanto a las pérdidas en el rotor, estas aumentan considerablemente al pasar a la configuración con devanado concentrado, registrando 264.2 [W] extra de pérdidas. Esto se debe a las corrientes inducidas en el estator debido a la concentración del flujo magnético en un menor número de dientes. Finalmente, se tienen las pérdidas en el cobre, las cuales se ven reducidas en un 71% debido a la menor utilización de este material. Al totalizar las pérdidas de ambas máquinas se tiene que la máquina con devanados concentrados genera 84.6 [W] más de pérdidas, lo que se traduce en un aumento de un 24.2%. En cuanto a la eficiencia, la máquina con devanado distribuido presenta un 84.5% y la máquina con devanado concentrado un 80.7%. Por lo tanto, existe una disminución de 3.8% en la eficiencia de la máquina propuesta.

En conclusión, el uso de un devanado concentrado en una máquina eléctrica de flujo axial con imanes permanentes de tipo spoke produce una disminución del torque *cogging*, una reducción notable del *ripple* de torque y un leve aumento del torque medio. Por otro lado, se tiene un aumento en las pérdidas totales, lo que se traduce en una disminución de la eficiencia de la máquina.

3.3 Modificación de la estructura de la máquina para aumentar la saliencia

Como alternativa para mejorar la saliencia de la máquina se llevó a cabo una modificación de la estructura del rotor. El diseño propuesto considera la misma configuración de un estator y un rotor, pero ahora modificando el número de polos a 6 y el número de ranuras a 36. De acuerdo con [37], la saliencia disminuye al aumentar el número de polos, por lo tanto, es preferible utilizar 2 o 3 pares de polos. Se tomaron los fundamentos de las máquinas sincrónicas de reluctancia y las máquinas de imanes permanentes convencionales para diseñar una nueva estructura capaz de desarrollar una mejor relación de saliencia. Una representación del modelo de la máquina diseñada en el software ANSYS se puede ver en la **Figura 3.18**. Las dimensiones principales de la máquina propuesta se pueden ver en la **Tabla 3.4**.

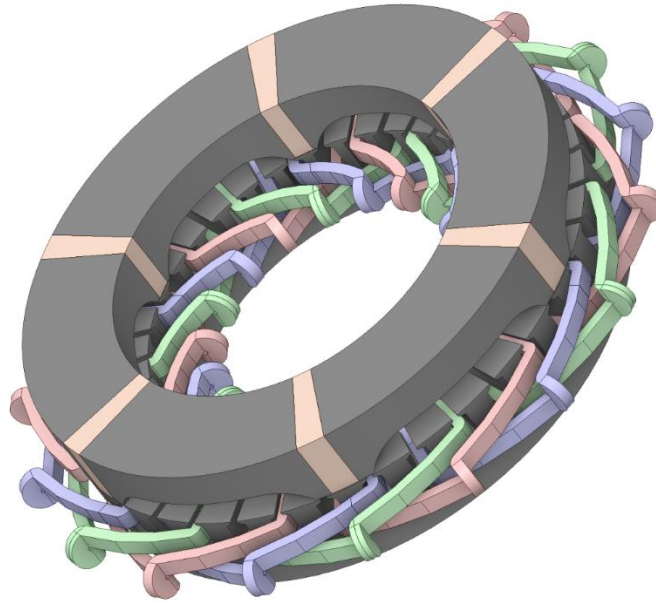


Figura 3.18 Configuración de 6 polos 36 ranuras del diseño propuesto.

Tabla 3.4 Datos principales diseño propuesto.

Parámetro	Símbolo	Valor
Diámetro externo de estator	D_{SE}	250 mm
Diámetro interno de estator	D_{SI}	164 mm
Diámetro externo de rotor	D_{RE}	250 mm
Diámetro interno de rotor	D_{RI}	164 mm
Altura de diente de estator	h_t	25 mm
Ancho de diente de estator	b_t	9 mm
Largo del entrehierro	g	1 mm
Número de vueltas de bobina	N_s	20
Número de ranuras	Q_s	36
Número de polos	$2p$	6
Velocidad nominal	n	3000 rpm

El rotor está compuesto por una estructura segmentada de material ferromagnético con una configuración de polos salientes intercalada por los seis imanes formando el arreglo de tipo spoke mostrado en la **Figura 3.19 (b)**. Se consideró una magnetización tangencial como en el diseño original. El espacio entre los imanes posee un tamaño de entrehierro variable, lo que contribuye al torque por reluctancia y es crucial para aumentar la saliencia de la máquina.

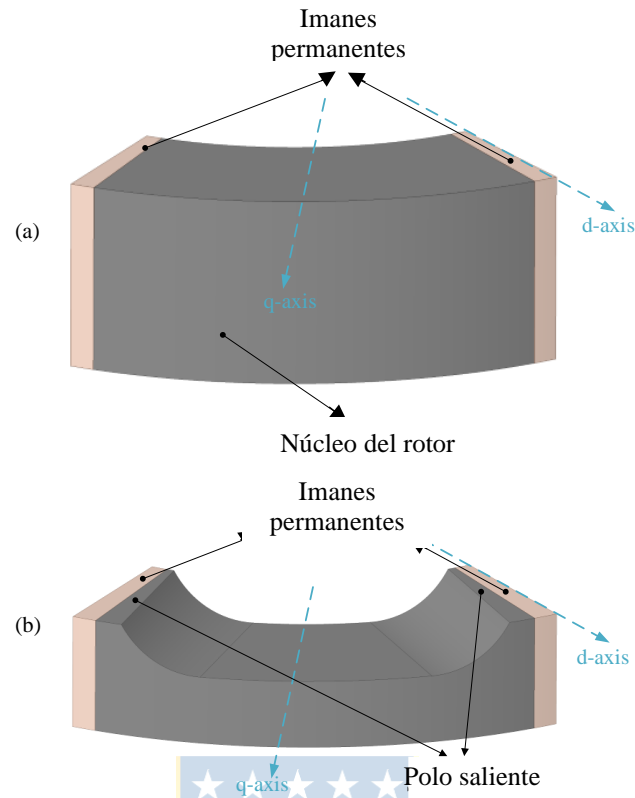


Figura 3.19 Esquema de un polo del rotor. (a) Rotor tipo spoke (original); (b) Diseño de rotor propuesto.

Como se mencionó anteriormente, el número de pares de polos afecta el torque medio (2.2) y la saliencia (2.1). A su vez, ambos índices de rendimiento dependen directamente de los enlaces de flujo de eje directo λ_d y eje cuadratura λ_q . Con los enlaces de flujo es posible obtener las inductancias de eje directo y cuadratura, las cuales definen la saliencia de la máquina. Para obtener las inductancias de eje directo y cuadratura, el flujo magnético se puede obtener para una fase arbitraria “j” desde la densidad de flujo en el entrehierro.

$$\lambda_j(\theta_m) = \int_0^{2\pi} B_g(\theta_m, \theta_s) N_j(\theta_s) r_g l_{st} d\theta_s \quad (3.1)$$

Donde B_g es la densidad de flujo magnético en el entrehierro, N_j es la función de devanado de la fase “j”, θ_s es la posición angular a través de la periferia del estator, θ_m es la posición del rotor, r_g es el radio del entrehierro y l_{st} es el largo de la máquina.

De acuerdo con [38], la función de devanado y su correspondiente serie de Fourier puede ser calculada como (3.2); para este análisis el devanado se asume estacionario, solo dependiendo de θ_s .

$$N_v(\theta_s) = \sum_{n=1,3,5\dots}^{\infty} \frac{4N_t k_{wn}}{pn\pi} \cos pn \left(\theta_s - k \frac{2\pi}{pm} \right) \quad (3.2)$$

Donde $k = 0, 1, 2 \dots$ para las fases A, B, C..., p es el número de pares de polos, m el número de fases y n el orden del armónico, N_t es el número de vueltas por fase por polo, k_{wn} es el factor de devanado para el armónico n .

Sustituyendo (3.2) en (3.1), es posible obtener el enlace de flujo en función de la posición del rotor como:

$$\lambda_v(\theta_m) = \frac{rl_{st}4N_t}{pn\pi} \int_0^{2\pi} \left[B_g(\theta_m, \theta_s) \sum_{n=1,3,5\dots}^{\infty} k_{wn} \cos pn \left(\theta_s - k \frac{2\pi}{pm} \right) \right] d\theta_s \quad (3.3)$$

Mediante la transformada de Park, las corrientes y enlaces de flujo en los ejes directo y de cuadratura quedan expresados por:

$$i_d = i_s \cos \alpha_i^e \quad (3.4)$$

$$i_q = i_s \sin \alpha_i^e \quad (3.5)$$

$$L_d = \frac{\lambda_d}{i_d} \quad (3.6)$$

$$L_q = \frac{\lambda_q}{i_q} \quad (3.7)$$

De acuerdo con (3.3), los enlaces de flujo son inversamente proporcionales al número de pares de polos y, en consecuencia, las inductancias. Las máquinas sincrónicas de reluctancia son diseñadas para maximizar L_d y minimizar L_q . Además, el torque y la saliencia son menores a medida que el número de polos aumenta. Es por esto que se prefiere utilizar un número de polos menor.

3.3.1 Análisis electromagnético

En esta sección, el diseño propuesto es modelado y evaluado mediante el uso de simulaciones de elementos finitos en 3D, apuntando principalmente a obtener el torque electromagnético y la saliencia de la máquina. La simulación se realizó utilizando una sección de un polo ya que se utiliza la periodicidad de los campos magnéticos para reducir la carga computacional.

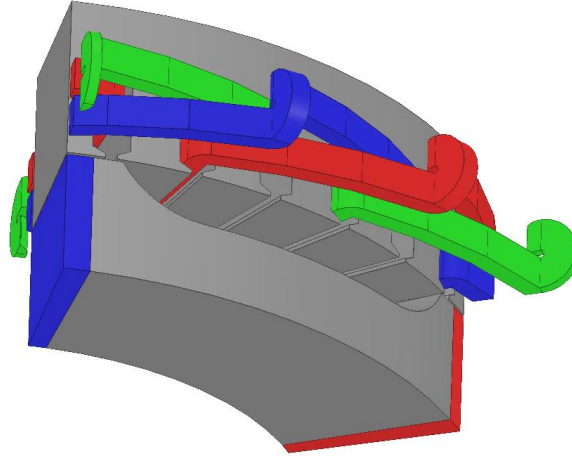


Figura 3.20 Sección de un polo del diseño propuesto.

En la **Figura 3.20** se puede observar la geometría de un polo del rotor y estator, resaltando la representación de la configuración del devanado trifásico en rojo, verde y azul. Se utilizó un devanado distribuido, el cual es típico de máquinas de reluctancia. Se evaluaron varias magnitudes de densidad de corriente para valorar el rendimiento de la máquina en diversas condiciones de operación. En ambos diseños, el eje d del rotor (donde se coloca el imán) está alineado con el eje simétrico de la fase A.

Para la operación en circuito abierto, en la **Figura 3.21** se muestra el torque *cogging* de la máquina. El valor *peak-to-peak* del torque cogging es de 91.8 [Nm] y es un considerablemente mayor en el modelo propuesto que en los diseños analizados anteriormente. Hay que destacar que el diseño propuesto fue pensado para demostrar que es posible mejorar la saliencia de la máquina al modificar la estructura del rotor. Realizar una optimización en la estructura propuesta lograría una reducción considerable en el valor del torque *cogging*, lo cual llevaría un tiempo considerable y se encuentra fuera del alcance de esta Memoria de Título. El periodo del *cogging* calculado mediante la ecuación (2.4) es de 6 grados mecánicos.

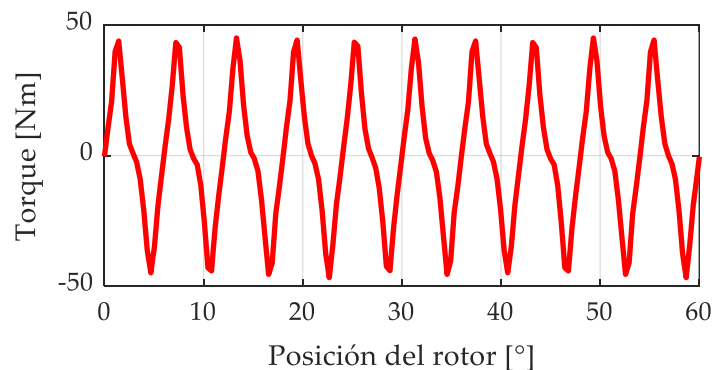


Figura 3.21 Curva de torque *cogging* diseño propuesto.

La saliencia, definida anteriormente en (2.1), se calculó para diferentes valores de densidad de corriente, lo que se presenta en la **Figura 3.22**. Es posible notar que la saliencia se ve penalizada a medida que la densidad de corriente aumenta. Esto debido a que la saliencia depende de la diferencia de reluctancia que existe en una máquina en diferentes ejes magnéticos (d y q). Cuando aumenta la corriente, el núcleo ferromagnético se satura, cambiando su permeabilidad y teniendo un comportamiento más parecido al aire. Cuando la saturación ocurre, la reluctancia en los ejes d y q tiende a igualarse y la saliencia disminuye considerablemente como se observa en la **Figura 3.22**. No obstante, se registra una saliencia de hasta 3.8 y mayor a 2 en la mayoría de los puntos de operación, lo que supone una ventaja consistente en comparación con la máquina original y con respecto a otros tipos de topologías como la máquina de imanes permanentes montados en la superficie en donde $\xi \approx 1$.

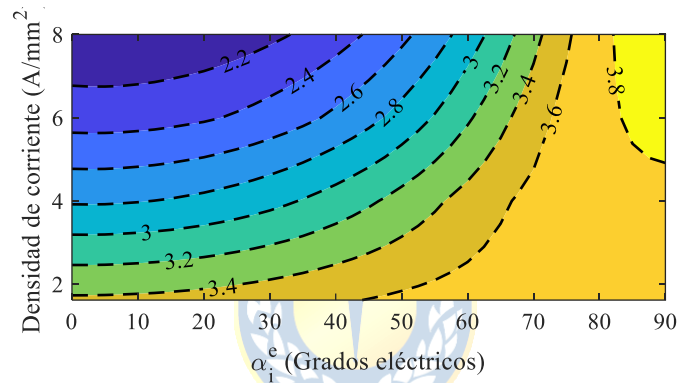


Figura 3.22 Relación de saliencia del diseño propuesto en función de la densidad y ángulo de corriente diseño propuesto.

De acuerdo con la ecuación (2.2), fue obtenida la característica de torque de la máquina como se muestra en la **Figura 3.23**. Es posible notar que el torque máximo se obtiene para un ángulo de corriente de entre 50 y 60 grados eléctricos, obteniendo hasta 100 [Nm] con una densidad de corriente de 8 A/mm². Cabe destacar que no es posible obtener máximo torque y máxima saliencia para un mismo ángulo de corriente.

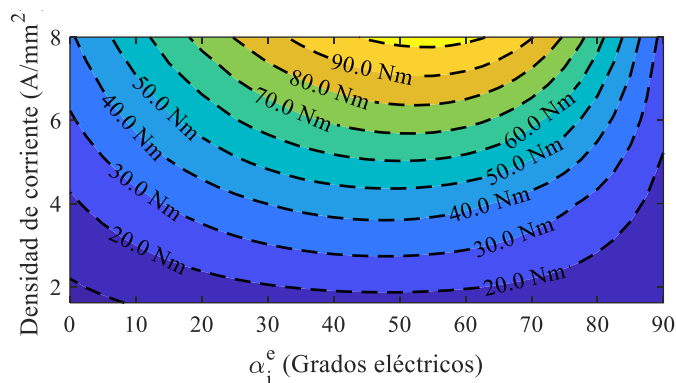


Figura 3.23 Característica de torque del diseño propuesto para diferentes valores de densidad y ángulo de corriente.

3.3.2 Análisis de pérdidas

En la **Tabla 3.5** se presentan las pérdidas obtenidas mediante el software de análisis de elementos finitos para el diseño propuesto. Se observa una baja cantidad de pérdidas en el rotor debido al uso de un devanado concentrado, pero por otro lado se observan pérdidas mayores en el devanado y en la estructura del estator las que totalizan 838.9 [W] de pérdidas totales. Lo anterior se traduce en un 95.7% de eficiencia para un punto de operación dado por $\alpha_1^e = 90^\circ$; $J = 5 \text{ A/mm}^2$.

Tabla 3.5 Resultados de pérdidas para la máquina propuesta.

Tipo	Pérdidas Máquina propuesta
Pérdidas en el estator	137.3 [W]
Pérdidas en el rotor	6.5 [W]
Pérdidas en el cobre	695.1 [W]
Pérdidas totales	838.9 [W]
Eficiencia	95.7 %

3.3.3 Comparación con la máquina original

Para evaluar la mejora en el desempeño del diseño propuesto como resultado de la incorporación de la nueva estructura con polos salientes, se presenta la superposición de las curvas de contorno para el torque medio y la saliencia para la máquina de polos salientes propuesta **Figura 3.24**. Es posible observar que la incorporación de esta nueva estructura proporciona una mayor capacidad

de torque en cualquier punto de operación. Además, la saliencia se ve incrementada en hasta un 50% en algunos puntos de operación específicos.

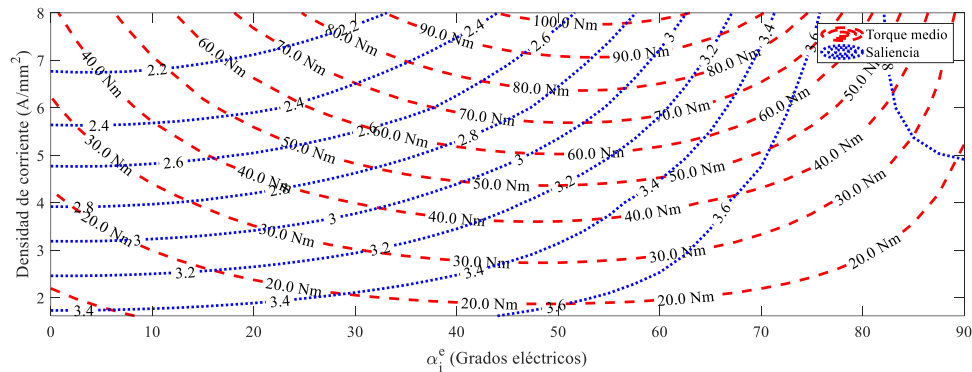


Figura 3.24 Superposición de las curvas de contorno para torque medio y saliencia máquina propuesta.

A pesar de registrar un peor torque *cogging*. El diseño propuesto registra una reducción significativa del *ripple* de torque como se puede observar en la **Figura 3.25**, en donde se muestra el torque electromagnético de ambas máquinas para una densidad de corriente mayor con el objetivo de equiparar el rendimiento de $J = 8 \text{ A/mm}^2$ y un ángulo de corriente $\alpha_i^e = 70^\circ$. La diferencia de *ripple* de torque es notable, se obtiene una reducción de $\sim 74\%$ al adoptar la estructura de polos salientes, entregando un mayor torque medio. Además, considerando el mismo punto de operación, la saliencia aumenta un 63%.

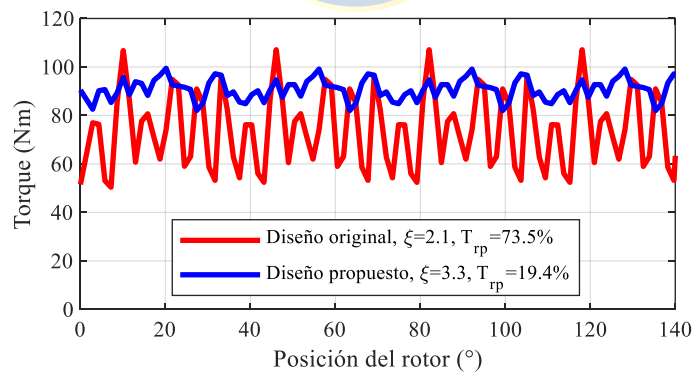


Figura 3.25 Torque electromagnético de la máquina en estudio. El valor de la densidad y ángulo de corriente se seleccionó para un punto específico de operación ($J = 8 \text{ A/mm}^2$ y $\alpha_i^e = 70^\circ$)

Esta nueva configuración además reduce la longitud axial del rotor un 40% permitiendo reducir también el peso y costo de la máquina lo que posibilita construir una máquina más compacta. Además, considerando que el coeficiente de flujo magnético de los imanes no varía y se tiene una mejora considerable en la saliencia, es posible extender el CPSR.

3.3.4 Discusión

Si bien se observa un torque *cogging* notablemente elevado, el torque medio desarrollado por la máquina es prometedor debido a la contribución de la componente de reluctancia y de los imanes permanentes en la nueva configuración propuesta. Por otro lado, si bien las pérdidas obtenidas son mayores a las registradas en los diseños anteriores, el aumento de torque y por ende de potencia generado por la máquina mejora la eficiencia total para el punto de operación estudiado.

El diseño propuesto con saliencia mejorada puede permitir utilizar esta configuración de motor para aplicaciones de vehículos eléctricos sin necesidad de cajas de engranajes. Además, la combinación del menor volumen total, la mayor producción de torque y los índices de saliencia mejorados configuran este diseño propuesto como prometedor en aplicaciones de tracción, Como se discutió anteriormente, la máquina no fue optimizada, por lo tanto, el torque *cogging* puede ser reducido aplicando técnicas de diseño como “*skew*” o mejorando la estructura rotórica, lo que se plantea como trabajo futuro.



Capítulo 4. Conclusiones

4.1 Sumario

A partir de la revisión del estado del arte se logró una profundización en el estudio de máquinas de flujo axial, sus características principales, ventajas y principales problemas que se han abordado para mejorar el desempeño de este tipo de máquinas. Una vez obtenidas las características constructivas de la máquina presente en el Laboratorio de Ensayos de Máquinas Eléctricas, se realizó el modelo de está utilizando el software ANSYS 3D. Se realizó una revisión de las ventajas y desventajas de la utilización de devanados distribuidos y concentrados para luego realizar simulaciones y análisis mediante elementos finitos. Se logró resaltar las cualidades de ambos tipos de devanado aplicados a la máquina en estudio considerando las curvas características de cada una de las máquinas como son la característica de torque y la comparación de las pérdidas obteniendo una reducción del del 94.2% en el torque *cogging* y un 49.3% en el *ripple* de torque. Por otro lado, se realizó una modificación de la estructura de la máquina para mejorar la saliencia, en donde se adoptó una nueva configuración combinando las ventajas de las máquinas con imanes permanentes y las máquinas de polos salientes. Se obtuvieron resultados prometedores en cuanto al desempeño del nuevo diseño propuesto, con valores de saliencia de hasta 3.8, una reducción del *ripple* de torque de ~74% y un torque medio de ~90 [Nm]. Además, el nuevo diseño alcanza una eficiencia de 95.7%.

4.2 Conclusiones

Los nuevos desarrollos en el diseño de máquinas eléctricas orientados a la adopción de una topología de flujo axial y la utilización de imanes permanentes presentan diversas ventajas y oportunidades en el campo de la ingeniería eléctrica. Mayores niveles de eficiencia y densidad de potencia, mejor control y rendimiento y la utilización en diversas aplicaciones son algunas de las ventajas de la utilización de estas topologías de máquinas eléctricas. El análisis mediante elementos finitos desempeña un papel fundamental en el desarrollo de estos nuevos diseños. Ofrece ventajas en el proceso de optimización y adopción de nuevas topologías ya que permite realizar una evaluación del rendimiento electromagnético y térmico. Otra ventaja del software en cuestión es la posibilidad de realizar optimizaciones multi-objetivo para llegar a las estructuras adecuadas de acuerdo con la aplicación requerida.

En la presente Memoria de Título se desarrolló un modelo 3D de un motor de flujo axial con imanes permanentes tipo spoke utilizando el software de análisis con elementos finitos ANSYS. Se

evaluó el desempeño de la máquina original y dos propuestas nuevas de diseño. Por una parte, se comparó el rendimiento de la máquina utilizando devanados distribuidos y concentrados. Se evaluó la máquina bajo condición de carga y en circuito abierto. El diseño con devanado concentrado mejora las características de torque de la máquina, reduciendo el torque *cogging* en un 94.2% y el *ripple* de torque en un 49.3% con el costo de aumentar las pérdidas generadas en el rotor debido a corrientes parásitas lo que disminuye la eficiencia en un 3.8% respecto a la máquina original. Por otro lado, se propone un nuevo diseño que toma los fundamentos de las máquinas sincrónicas de polos salientes y de las máquinas sincrónicas de imanes permanentes. Este diseño mejora la característica de torque debido a la contribución de las componentes magnéticas y de reluctancia. Se logra una mejora considerable en la saliencia de la máquina obteniendo valores de hasta 3.8, con un torque medio de ~90 [Nm] y una reducción del *ripple* de torque de ~74% con respecto al diseño original. Además, el nuevo diseño alcanza una eficiencia de 95.7%.

La adopción de devanados concentrados en una máquina eléctrica de flujo axial con imanes permanentes tipo spoke ofrece buenos resultados en las características del torque electromagnético. Esta configuración reduce la eficiencia considerablemente respecto al uso de devanados distribuidos debido a que existe una mayor distorsión armónica en la fuerza magnetomotriz. Por otro lado, la adopción de una nueva topología de rotor mejora el torque y la saliencia gracias a la utilización de los atributos de las máquinas de polos salientes y máquinas con imanes permanentes pudiendo extender el CPSR y habilitando su utilización en aplicaciones de electromovilidad.

4.3 Trabajo Futuro

En el trabajo futuro de la presente Memoria de Título se espera lograr armonizar los estudios sobre la máquina para llegar a una topología óptima de rotor-estator, con la cual se pueda desarrollar un diseño con buenas características de torque, alta eficiencia y un amplio rango de operación a potencia constante. De esta manera es posible habilitar su uso en aplicaciones de electromovilidad, en donde estas características son cruciales.

Como tareas específicas a desarrollar en el futuro se tiene la optimización de la estructura del rotor de polos salientes con el objetivo de mejorar el torque *cogging*. También, hacer un análisis de sensibilidad sobre el uso de diferentes tipos de bobinados para la topología de rotor de polos salientes. Analizar el desempeño electromagnético de la máquina para distintos puntos de operación. Hacer un análisis considerando ciclos de conducción para su posible aplicación en electromovilidad y mejorar las características mecánicas para aumentar la tolerancia a fallas.

Bibliografía

- [1] Juha Pyrhönen, Tapani Jokinen, "Design of Rotating Electrical Machines" WILEY Second Edition 2014.
- [2] J. -G. Lee and D. -K. Lim, "A Stepwise Optimal Design Applied to an Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicle Traction Applications," in IEEE Access, vol. 9, pp. 115090-115099, 2021.
- [3] W. Jiang, S. Feng, Z. Zhang, J. Zhang and Z. Zhang, "Study of Efficiency Characteristics of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 54, no. 11, pp. 1-5, Nov. 2018.
- [4] C. Madariaga, C. Gallardo, J. A. Tapia, W. Jara and D. Riquelme, "Quick Comparison of the Cogging Torque Severity in Permanent Magnet Synchronous Machines with Segmented Stator Core," 2022 IEEE International Conference on Automation/XXV Congress of the Chilean Association of Automatic Control (ICA-ACCA), Curicó, Chile, 2022.
- [5] Y. Li, J. Xing, T. Wang and Y. Lu, "Programmable Design of Magnet Shape for Permanent-Magnet Synchronous Motors With Sinusoidal Back EMF Waveforms," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 44, no. 9, pp. 2163-2167, Sept. 2008.
- [6] H. Wang and J. Leng, "Summary on development of permanent magnet synchronous motor," 2018 Chinese Control And Decision Conference (CCDC), Shenyang, China, 2018.
- [7] W. Fei, P. C. K. Luk, J. Ma, J. X. Shen and G. Yang, "A High-Performance Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motor Amended From a Small Industrial Three-Phase Induction Motor," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 45, no. 10, pp. 4724-4727, Oct. 2009.
- [8] Miguel A. Rodríguez P. "Materiales y circuitos magnéticos" Departamento de ingeniería eléctrica y energética, Universidad de Cantabria, España, 2014
- [9] H. D. Young, A. F. Roger, "University Physics with Modern Physics and Mastering Physics", Academic Imports Sweden AB, 2015.
- [10] A. E. Hoffer, R. H. Moncada, B. J. Pavez and J. A. Tapia, "A Novel Method for Finite-Element Modeling of a Commercial Synchronous Reluctance Machine," in IEEE Latin America Transactions, vol. 16, no. 3, pp. 806-812, March 2018.

- [11] T. F. Chan, L. L. Lai and S. Xie, "Field Computation for an Axial Flux Permanent-Magnet Synchronous Generator," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 24, no. 1, pp. 1-11, March 2009.
- [12] Parviainen Asko, "Design of axial-flux permanent-magnet low-speed machines and performance comparison between radial-flux and axial-flux machines". Lappeenranta University of Technology, Electrical Engineering, Electronics (2005-04-19).
- [13] Metin Audin, Surong Huang y Thomas A. Lipo. "A New Axial Flux Surface Mounted Permanent Magnet Machine Capable of Field Control". IEEE IAS Annual Meeting, Pittsburgh, PA, Oct. 11-19, 2002.
- [14] A. Cavagnino, M. Lazzari, F. Profumo and A. Tenconi, "A comparison between the axial flux and the radial flux structures for PM synchronous motors," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 38, no. 6, pp. 1517-1524, Nov.-Dec. 2002.
- [15] Â. P. Ferreira and A. F. Costa, "Electromagnetic finite element design of axial flux permanent magnet machines for low speed applications," 2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM), Berlin, Germany, 2014.
- [16] S. Amin, S. Khan and S. S. Hussain Bukhari, "A Comprehensive Review on Axial Flux Machines and Its Applications," 2019 2nd International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET), Sukkur, Pakistan, 2019.
- [17] L. Dosiek and P. Pillay, "Cogging Torque Reduction in Permanent Magnet Machines," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 43, no. 6, pp. 1565-1571, Nov.-dec. 2007.
- [18] Alvaro B. Letelier, Delvis A. González, Juan A. Tapia, Rogel Wallace, Aníbal Valenzuela. "Cogging Torque Reduction in an Axial Flux PM Machine via Stator Slot Displacement and Skewing. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 43, No. 3, May/June 2007,
- [19] David Soto P. "Reducción del torque pulsante de una máquina de flujo axial con imanes permanentes", Informe de tesis de grado para optar al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería con Mención en Ingeniería Eléctrica. Universidad de Concepción, mayo de 2006.
- [20] H. Qi, L. Ling and Z. Liwei, "Design and Research of Axial Flux Permanent Magnet Motor for Electric Vehicle," 2019 IEEE 3rd International Electrical and Energy Conference (CIEEC), 2019,

- [21] D. A. Gonzalez-Lopez, J. A. Tapia, R. Wallace and A. Valenzuela, "Design and Test of an Axial Flux Permanent-Magnet Machine With Field Control Capability," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 44, no. 9, pp. 2168-2173, Sept. 2008,
- [22] Alejandro Rojas, "Análisis de topologías de motores de flujo axial con imanes permanentes interiores". Informe de memoria de título para optar al título de Ingeniero Civil Eléctrico. Universidad de Concepción, Octubre de 2006.
- [23] G. De Donato, F. Giulii Capponi, G. A. Rivellini and F. Caricchi, "Integral-Slot Versus Fractional-Slot Concentrated-Winding Axial-Flux Permanent-Magnet Machines: Comparative Design, FEA, and Experimental Tests," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 48, no. 5, pp. 1487-1495, Sept.-Oct. 2012.
- [24] A. M. EL-Refaie, "Fractional-Slot Concentrated-Windings Synchronous Permanent Magnet Machines: Opportunities and Challenges," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 1, pp. 107-121, Jan. 2010.
- [25] W. Jara, P. Lindh, J. Tapia and J. Pyrhönen, "A novel rotor structure for an Axial Flux PM machine: Performance analysis," 2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Capri, Italy, 2016.
- [26] Nicola Bianchi, Thomas M. Jahns. "Design, Analysis, and control of interior PM synchronous machines" Tutorial course notes. October 2004.
- [27] J. A. Tapia, J. Pyrhonen, J. Puranen, P. Lindh and S. Nyman, "Optimal Design of Large Permanent Magnet Synchronous Generators," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 49, no. 1, pp. 642-650, Jan. 2013.
- [28] J. A. Tapia, A. Parviainen, J. Pyrhönen, P. Lindh and R. R. Wallace, "Optimal design procedure for an external rotor permanent-magnet machine," 2012 XXth International Conference on Electrical Machines, Marseille, France, 2012.
- [29] Radulescu, M. M.; Brevan, S.; Chirca, M. "Novel topologies of low-speed axial-flux permanent-magnet micro-wind generator". *Acta Electrotechnica*, vol. 57, no 3-4. 2016.
- [30] T. Transi, M. Murataliyev, M. Degano, E. Preci, D. Gerada and C. Gerada, "Influence of Rotor Design on Electromagnetic Performance in Interior Permanent Magnet Machines," *IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2020.

- [31] Loss calculation of induction motor with ring windings by “ANSYS Maxwell”, O. Tikhonova, I. Malygin, R. Beraya, N. Sokolov, A. Plastun. Actual problems of electromechanics and electrical technologies APEET-2017: collection of scientific papers. - Yekaterinburg: Publishing House UMC UPI, 2017.
- [32] Möller, G., Krennmair, L., & Kolar, J. W. (2014). Comparison of distributed and concentrated windings in high-speed permanent magnet machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(1), 236-243. Jan. 2014.
- [33] “Máquinas eléctricas” sexta edición Jesús Fraile Mora 2008.
- [34] L. Alberti, "Koil: A Tool to Design the Winding of Rotating Electric Machinery," 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM), Alexandroupoli, Greece, 2018.
- [35] S. Wang et al., "Comparative Study of E- and U-core Modular Dual-Stator Axial-Field Flux-Switching Permanent Magnet Motors With Different Stator/Rotor-Pole Combinations Based on Flux Modulation Principle," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 78635-78647, 2021.
- [36] H. Jussila, P. Salminen, M. Niemela and J. Pyrhonen, "Guidelines for Designing Concentrated Winding Fractional Slot Permanent Magnet Machines," 2007 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, Setubal, Portugal, 2007.
- [37] C. Gallardo, C. Madariaga, V. Rodriguez-Merchan and J. A. Tapia, "Comparative Analysis of a Synchronous Reluctance and a Solid-Rotor Induction Machine for High-Speed Applications," 2022 IEEE ANDESCON, Barranquilla, Colombia, 2022.
- [38] E. S. Obe, “Calculation of inductances and torque of an axially laminated synchronous reluctance motor,” *IET Electr. Power Appl.*, vol. 4, no. 9, pp. 783–792, 2010.

Design and Evaluation of Axial-Flux Permanent Magnet Machine with Enhanced Saliency

Felipe Ortiz
Department of Electrical
Engineering
University of Concepcion
Concepción, Chile
fortiz2017@udec.cl

Cesar Gallardo
Department of Electrical and
Electronic Engineering
University of Nottingham
Nottingham, United Kingdom
cesar.gallardosanchez@nottingham.ac.uk

Carlos Madariaga
Department of Electrical
Engineering
University of Concepcion
Concepción, Chile
carlosmadariaga@udec.cl

Juan A. Tapia
Department of Electrical
Engineering
University of Concepcion
Concepción, Chile
juantapia@udec.cl

Abstract— Axial flux permanent magnet synchronous machines (AF-PMSMs) are used in applications that require high power and torque densities like electrical vehicles. In such operation scenarios, a wide constant power speed range is crucial, but most PM machine designs lack this capability since they have low saliency. This paper proposes the design of an AF-PMSM with enhanced saliency, providing promising torque ratings. A 6-pole 36-slot spoke-type permanent magnet machine with a special rotor structure was designed and evaluated by means of three-dimensional finite element analysis. Results show that the proposed design can provide a high overall torque due to the contribution of both magnets and reluctance components, also delivering considerable saliency ratings. This can enable the machine to operate in a wide speed range for electrical or hybrid vehicle in-wheel applications.

Keywords— Saliency ratio, permanent magnet synchronous machine, constant power speed range.

I. Introduction

Permanent magnet synchronous machines (PMSMs) are an attractive solution in high-performance applications since they can provide high power density and high efficiency, relevant merits in electrical vehicles, aircrafts, and other applications 0-0. Moreover, in the case of electric-vehicle applications, the adoption of an axial flux topology enables direct in-wheel traction, hence eliminating the need of a gearbox 0. Axial flux permanent magnet (AF-PM) machines can be classified depending on the number of stators and rotors. The single-stator single-rotor configuration, shown schematically in Fig. 1, is the simplest structure and usually preferred in low- to medium-power applications and small-size designs, at the cost of potentially large electromagnetic axial forces over the bearings caused by rotor and stator attraction 0.

A crucial feature that in-wheel application motors must provide is a wide operational speed range. Notwithstanding, axial flux permanent magnet synchronous machines (AF-PMSMs) have inherently low field-weakening capability since the magnitude of the field generated by magnets is fixed. A powerful tool commonly used to command air-gap flux is vector

control, through which it is possible to inject a negative d-axis flux commanding the stator vector current to control the total air-gap flux. However, due to the high d-axis reluctance of surface mounted PMSMs, a large positive d-axis current will be required, saturating the stator and reducing torque capability. Moreover, a large negative d-axis current together with temperature rise caused by the copper loss may lead to irreversible PM demagnetization 0. To overcome such problems, some technical papers have addressed design and control aspects to increase the field-weakening capability of PMSMs 0-0. In these cases, additional windings are adopted to generate an additional dc flux component, resulting in the total excitation flux being a combination between the magnet and dc flux components.

Nevertheless, the most popular approaches agree that constant power speed range (CPSR) mostly depends on the

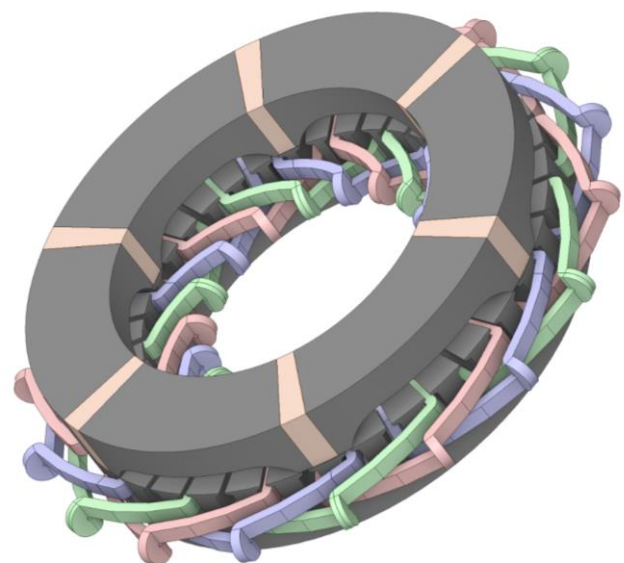


Fig. 1 Sketch of single-stator single-rotor AF-PMSM.

saliency ratio, as well as on the PM flux coefficient 0. In this regard, the design of an AF-PMSM with improved saliency may enable this motor configuration for electric vehicle applications without the need for gearboxes. Nevertheless, and to the best of the authors' knowledge, this has not been treated in the technical literature so far.

In this work, a novel high-saliency PM machine with a wide CPSR is proposed and evaluated by means of 3D FE simulations. Rotor structure is comprised by an axial flux spoke-type magnet arrangement and a salient-pole structure to improve the machine saliency. This magnet and reluctance component both contribute to the torque generation, also providing the machine with improved saliency when compared with a conventional PM machine. The remainder of this paper is organized as follows. In Section II, the proposed design is described and its main data is explained and summarized. Section III covers the numerical evaluation of the proposed design, focusing on the saliency and torque generation. In Section IV, a sensitivity analysis is performed considering main design parameters. Conclusions are drawn at the end of the paper.

II. Proposed Design

The proposed AFPM machine design considers a single-stator single-rotor topology with 36 slots and 6 poles, taking the fundamentals of both the salient pole SynRMs and conventional PMSMs. The main data of the machine is presented in Table I. The rotor is comprised by a segmented structure of

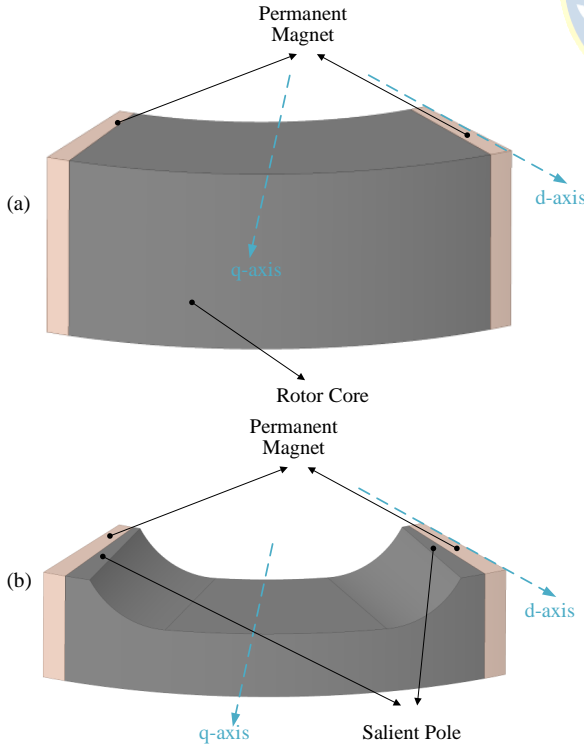


Fig. 2 Schematics of a rotor pole. Position of the dq -axis is indicated. (a) spoke type (original); (b) proposed rotor pole design.

TABLE I. MAIN DATA OF AF-PMSM.

Parameter	Symbol	Value
Stator outer diameter	D_{so}	250 mm
Stator inner diameter	D_{si}	164 mm
Rotor outer diameter	D_{ro}	250 mm
Rotor inner diameter	D_{ri}	164 mm
Tooth height	h_t	25 mm
Tooth width	b_t	9 mm
Minimum air-gap length	g	1 mm
Turns per slot	N_s	20
Number of slots	Q_s	36
Poles	$2p$	6
Speed	n	3000 rpm

ferromagnetic material with a salient pole configuration interspersed by six magnets forming a spoke-type arrangement, as depicted in Fig. 2 (b). Tangential magnetization of the magnets is considered. The space between consecutive magnets has different air-gap length that contribute with reluctance torque and is meant to improve the machine saliency. There are several design recommendations established in the literature for a proper selection of the number of magnetic poles to improve the saliency ratio.

The number of pole pairs affects the average torque (1) and the saliency ratio (2), and, in turn, both performance indices depend on the flux linkages of direct (λ_d) and quadrature (λ_q) axis.

$$T_{em} = \frac{3}{2}p(\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \quad (1)$$

where p is the pole pair of the machine, α_i^e is the current angle and i_s is the supply current. From the flux linkages, the d-axis and q-axis inductances can be obtained, which define the saliency ratio.

$$\xi = \frac{L_d}{L_q} \quad (2)$$

To obtain the inductances in d-axis and q-axis, the main flux linkage can be obtained for an arbitrary phase "j" from the airgap flux density modelling, the

$$\lambda_j(\theta_m) = \int_0^{2\pi} B_g(\theta_m, \theta_s) N_j(\theta_s) r_g l_{st} d\theta_s \quad (3)$$

where B_g is the airgap flux density, N_j is the winding function of the phase "j", θ_s is the angular position along the stator periphery, θ_m is the rotor position, α_i^e is the current angle, r_g is the airgap radius and l_{st} is the stack length.

According to 0, the winding function and its corresponding Fourier series can be calculated by (4); for this analysis the windings are assumed to be stationary, only depending on θ_s .

$$N_v(\theta_s) = \sum_{n=1,3,5\dots}^{\infty} \frac{4N_t k_{wn}}{pn\pi} \cos pn \left(\theta_s - k \frac{2\pi}{pm} \right), \quad (4)$$

where $k = 0, 1, 2 \dots$ for phases A, B, C..., p is the number of pole pairs, m the number of phases and n the order of the harmonic, N_t is the number of turns per phase per pole, k_{wn} is the winding factor for harmonic n .

By substituting (4) in (3), the flux linkage can be obtained as a function of the rotor position as

$$\lambda_v(\theta_m) = \frac{r_{l_{st}}^2 4N_t}{pn\pi} \int_0^{2\pi} \left[B_g(\theta_m, \theta_s) \sum_{n=1,3,5\dots}^{\infty} k_{wn} \cos pn \left(\theta_s - k \frac{2\pi}{pm} \right) \right] d\theta_s \quad (5)$$

By means of Park transformation, currents and flux linkages in direct and quadrature axis are expressed as

$$i_d = i_s \cos \alpha_1^e \quad (6)$$

$$i_q = i_s \sin \alpha_1^e \quad (7)$$

$$L_d = \frac{\lambda_d}{i_d} \quad (8)$$

$$L_q = \frac{\lambda_q}{i_q} \quad (9)$$

In agreement with (5), the flux linkages are inversely proportional to the number of pole pairs and, consequently, to the inductances. SynRM is designed to maximize L_d and minimize L_q , and thus, L_d decreases faster than L_q . Also, the torque and the saliency ratio are lower as the number of pole

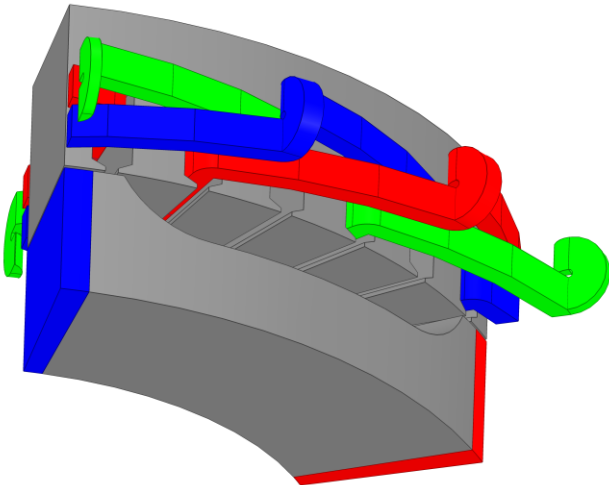


Fig. 3. One-pole section model of the proposed design. A salient pole rotor is adopted.

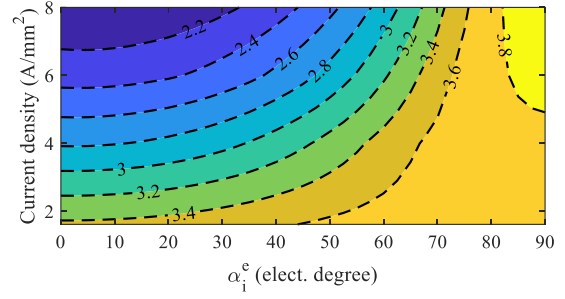


Fig. 4. Saliency ratio of the proposed design as a function of the slot current density and current angle.

pairs increases. Because of this, a small number of pole pairs is preferred. In 0, two or three pole pairs is recommended.

III. Finite element evaluation

In this section, the proposed design is modeled and evaluated by means of 3D FE simulations, aiming to obtain both the saliency and electromagnetic torque of the machine. The commercial package Ansys Electronics Desktop was used for this analysis, and only a pole section of the machine was modelled following the periodicity of the magnetic fields in order to decrease the computational burden.

A. Model and settings

A one-pole section of the machine was modeled taking into account the winding and end-winding geometry as depicted in Fig. 3. A distributed winding was adopted for the stator currents, which were modelled as purely sinusoidal for each phase of the machine. Several current density magnitudes were evaluated to assess the machine performance in several operation conditions, ranging from 2 to 12 A/mm². In both design the rotor d -axis (where the magnet is placed) is aligned with the a -phase symmetric axis.

B. Saliency

In this paper, saliency was defined as the ratio of q -axis and d -axis inductances as per (2). q -axis and d -axis inductances and the saliency of the proposed design were obtained for different current density values as presented in Fig. 4.

It may be noted that saliency is penalized as the current density increases, since saliency relies on the difference between the permeability of iron and air paths: higher current density translates into the stator and rotor core being more saturated, which drops their relative permeability in these operation points and gets them closer to air permeability. Nevertheless, the saliency ratio is higher than 3 in the majority of the operation points presented in Fig. 4, which is a consistent advantage with respect to conventional surface mounted PM machine ($\xi \sim 1$). Further actions could be taken to improve the saliency of the machine based on geometry optimization.

C. Electromagnetic torque

In the conventional PMSM the electromagnetic torque can be obtained according to the equation derived from the stationary rotor frame equivalent circuit using the Clark-Park transformation. (1) then becomes

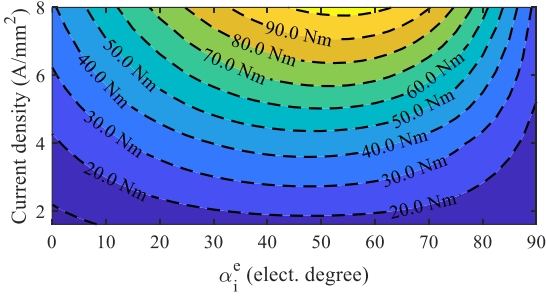


Fig. 5. Torque characteristic of the proposed machine design for different values of current density and current angle.

$$T_{em} = \frac{3p}{2} \left[\lambda_{pm} i_s \cos(\alpha_i^e) + \frac{1}{2} (L_d - L_q) i_s^2 \sin(2\alpha_i^e) \right], \quad (10)$$

where λ_{pm} is the peak fundamental value of PM flux linkage. On the right side of the equation, both the torque component associated to the magnets and the reluctance variations can be observed.

Based on (10), the torque characteristic for different current and current angle values were obtained by means of FE analysis and are presented in Fig. 5. It may be noted that maximum torque is obtained when the current angle is between 50 and 60°, and up to 100 Nm can be achieved with a current density of 8 A/mm².

IV. Comparison with spoke-type AF-PMSM

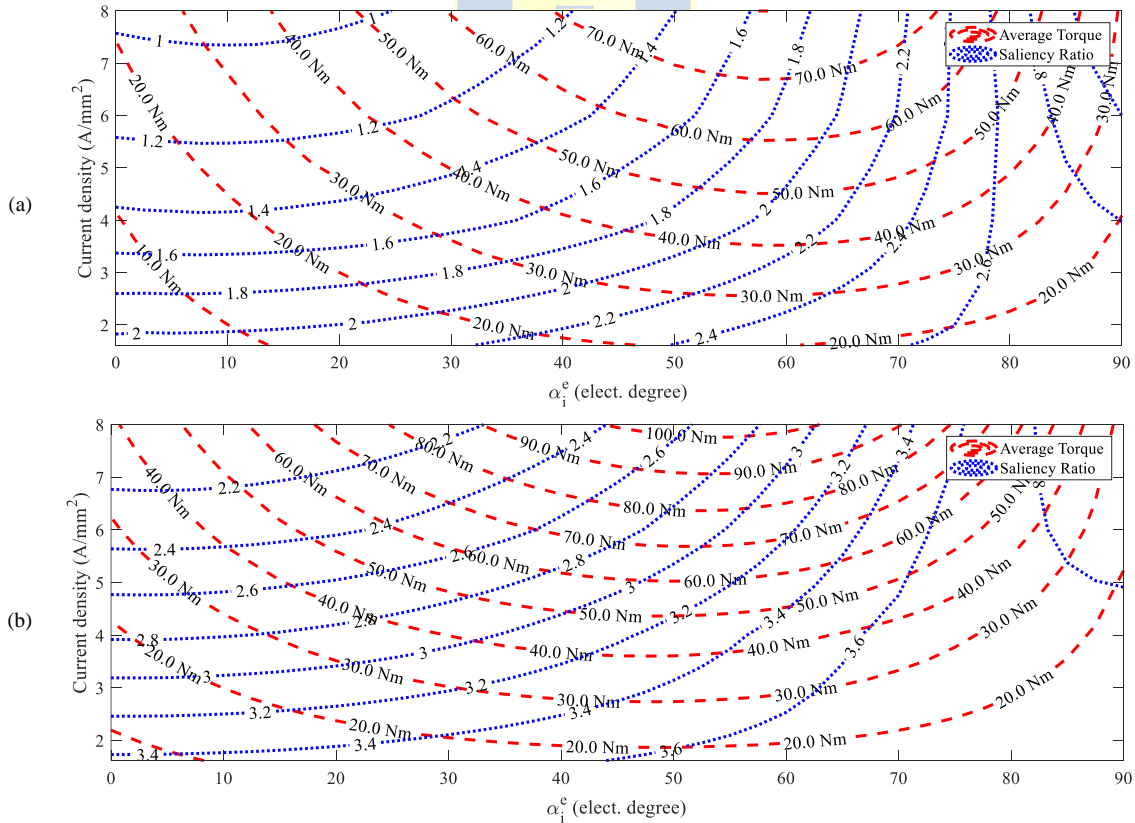


Fig. 5. Superposition of the contour curves of the average torque and saliency ratio. (a) spoke type machine; (b) salient pole machine.

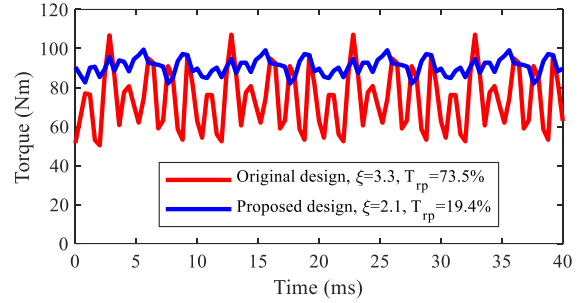


Fig. 6. Electromagnetic torque of the machine under study. The value of current density and current angle was selected for a specific operation point. ($J = 8 \text{ A/mm}^2$ and $\alpha_i^e = 70^\circ$)

To evaluate the improvement in the machine performance as a result of the incorporation of the salient pole structure, Fig. 5 (a) and (b) present the superposition of the contour curves of the average torque and saliency ratio for the spoke type machine (Fig. 2(a)) and the salient pole machine (see Fig. 2(b)), respectively. It is possible to observe that the incorporation of the salient pole structure allowed for a higher torque capacity in any operation point in the dq - plane. In addition, the saliency ratio also increases, improving in up to 50% in specific operation points.

Another benefit of the proposed design is the significant reduction in the torque ripple. Fig. 6 shows the electromagnetic torque waveform for both machine when $J = 8 \text{ A/mm}^2$ and $\alpha_i^e = 70^\circ$. The torque ripple difference is noticeable: a reduction of ~74% is obtained when adopting the salient-pole rotor

arrangement, delivering, at the same time, a higher torque generation. Furthermore, considering the same operation point in terms of current density and current angle, the saliency ratio of the machine increases in more than 63%.

This novel configuration of axial flux machine with salient poles, in corporation with the spoke type, permits to reduce the axial length of the rotor by 40%. In addition to reducing the weight and cost of the machine, this allows to make a more compact electric machine for in-wheel electromobility applications. In addition, considering that the PM flux coefficient is not varied and that a significant improvement of saliency was obtained, the CPSR can be expanded 0. In this regard, the design of the proposed AF-PMSM with improved saliency may enable this motor configuration for electric vehicle applications without the need for gearboxes. Furthermore, the combination of the lower overall volume, higher torque production and enhanced saliency ratings configures this proposed design as promising in traction applications.

V. Conclusions

In this paper, a new design of an axial flux permanent magnet synchronous machine with a salient pole configuration interspersed by six magnets forming a spoke-type arrangement is proposed. The fundamentals of the salient pole SynRMs and conventional PMSMs are considered. This design improves the saliency when compared with a conventional PMSM, providing high torque ratings, aiming to be suitable for electric-vehicle applications. A 6-pole 36-slot machine was designed and evaluated by means of three-dimensional finite element analysis. The results show a high overall torque due the contribution of both magnets and reluctance components and a considerable saliency of over 3 in several operation points.

Acknowledgment

This work was supported in part by the Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID), Chile through grant ANIDPFCHA/Doctorado Nacional/2020-21200350, grant ANID-PFCHA/Doctorado Nacional/2020-21200527, project FONDECYT REGULAR #1230670 and project FONDEF ID21110099.

References

- A. M. EL-Refaie, "Fractional-Slot Concentrated-Windings Synchronous Permanent Magnet Machines: Opportunities and Challenges," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 1, pp. 107-121, Jan. 2010.
- Y. Demir, A. El-Refaie and M. Aydin, "Comparison of Permanent Magnet Machines Equipped with Unbalanced Fractional-Slot Distributed Windings vs. Balanced Fractional-Slot Concentrated Windings," 2021 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2021, pp. 1-6.
- B. -O. Tak and J. -S. Ro, "Analysis and Design of an Axial Flux Permanent Magnet Motor for in-Wheel System Using a Novel Analytical Method Combined With a Numerical Method," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 203994-204011, 2020.
- J. Li, R. Qu and Y. Cho, "Dynamic eccentricity in single-rotor single-stator axial flux permanent magnet synchronous machine with parallel path windings," 2015 IEEE International Magnetism Conference (INTERMAG), 2015, pp. 1-1.
- F. Wei, Z. Q. Zhu, L. Yan and J. Qi, "Investigation of Stator/Rotor Pole Number Combinations and PM Numbers in Consequent-Pole Hybrid Excited Flux

Reversal Machine," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 37, no. 3, pp. 2092-2106, Sept. 2022.

- T. Takahashi, M. Takemoto, S. Ogasawara, T. Ogawa, H. Arita and A. Daikoku, "Development of a Consequent-Pole-PM-Type Axial-Gap Motor With DC Field Winding," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 57, no. 5, pp. 4363-4375, Sept.-Oct. 2021.
- X. Liu, H. Chen, J. Zhao and A. Belahcen, "Research on the Performances and Parameters of Interior PMSM Used for Electric Vehicles," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 6, pp. 3533-3545, June 2016.
- E. S. Obe, "Calculation of inductances and torque of an axially laminated synchronous reluctance motor," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 4, no. 9, pp. 783-792, 2010.
- C. Gallardo, J. A. Tapia, M. Degano and H. Mahmoud, "Accurate Analytical Model for Synchronous Reluctance Machine With Multiple Flux Barriers Considering the Slotting Effect," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 58, no. 9, pp. 1-9, Sept. 2022, Art no. 8107709.
- K. B. Tawfiq, M. N. Ibrahim, E. E. El-Kholy, and P. Sergeant, "Performance improvement of synchronous reluctance machines - a review research," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 57, no. 10. 2022.

