



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA DE
VALPARAÍSO



Alberto Antonio Marín Aguilar

**Análisis y optimización electromagnética
de una máquina síncrona de imanes
permanentes con estator segmentado**

Informe Proyecto de Título de Ingeniero Civil Eléctrico



**Escuela de Ingeniería Eléctrica
Facultad de Ingeniería**

Valparaíso, 18 de julio de 2018



Análisis y optimización electromagnética de una máquina sincrónica de imanes permanentes con estator segmentado

Alberto Antonio Marín Aguilar

Informe Final para optar al título de Ingeniero Civil Eléctrico,
aprobada por la comisión de la
Escuela de Ingeniería Eléctrica de la
Facultad de Ingeniería de la
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
conformada por

Sr. Werner Eduardo Jara Montecinos
Profesor Guía

Sr. Rene Sanhueza Robles
Segundo Revisor

Sr. Sebastián Fingerhuth Massmann
Secretario Académico

Valparaíso, 18 de julio de 2018

Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a mis padres Manuel Marin y María Aguilar por la confianza, el apoyo y amor incondicional en esta etapa que parecía tan lejana. A mi hermana, Katherine Marin por apoyarme y ser fuente de inspiración cuando lo necesité en todo este tiempo.

A mis David Gonzales, Christian Ordenes, Jesús Martínez, Vicente Marin por ayudarme y acompañarme en los momentos que más los necesite, entregando además su alegría y su apoyo en todo este trascurso de mi vida universitaria.

A mis profesores guías Werner Jara y Rene Sanhueza, por entregarme la orientación, confianza, paciencia y las herramientas académicas necesarias para la realización de esta tesis, sus consejos fueron muy oportunos junto con su preocupación para la realización de esta tesis.

Por último, a mis compañeros y amigos de universidad integrantes del Laboratorio de máquinas, que hacían que la tarea de estudiar sea más armoniosa y fácil.

Valparaíso, 18 de Julio de 2018

Alberto Antonio Marín Aguilar

Resumen

Este estudio consiste en la optimización y análisis electromagnético de tres fenómenos que se producen o se manifiestan en una máquina sincrónica de imanes permanentes con estator modular, los cuales son; el torque de cogging, las pérdidas de los imanes permanentes y el torque neto de la máquina. Esto nace de la necesidad de analizar y comprender las máquinas con estator segmentado o modular, debido a sus grandes beneficios en el proceso de manufactura del bobinado, transporte y mantención de los estatores de grandes generadores eléctricos eólicos.

Se realizó un marco teórico del tema referido a las máquinas de imanes permanentes tanto modulares como convencionales, con el fin de comprender su funcionamiento, los beneficios, sus cualidades, etc. Todo esto con la intención de obtener la mayor cantidad de información con respecto al tema.

Se realizó una simulación detallada de la máquina que va ser estudiada, a través de un software de elementos finitos (Flux), el que nos permite trabajar a través de distintos escenarios electromagnéticos de la máquina y además de permitirnos variar la geometría de esta, a través de parámetros definidos previamente. Y con ello finalmente también proporcionar el comportamiento de esta máquina para los distintos fenómenos estudiados.

Se realizó un análisis del comportamiento de cada uno de los fenómenos electromagnéticos mencionados, con respecto a los parámetros geométricos utilizados para el estudio, los cuales son elegidos previamente en el trabajo de simulación. Luego encontrar ciertos patrones de comportamiento que permitan identificar regiones o valores óptimos de estos fenómenos estudiados, y además de realizar una comparación de los valores obtenidos tanto para una máquina sincrónica de imanes permanente modular como convencional.

Por último, de los análisis obtenidos anteriormente, se proponen modelos geométricos de una máquina sincrónica de imanes permanentes con estator modular, según su optimización, es decir, modelos para los cuales se quiera enfocar la optimización de un fenómeno en particular, o simplemente elegir un modelo equilibrado propuesto.

Palabras claves: máquina sincrónica de imanes permanentes, máquina sincrónica de imanes permanentes modular, devanados, torque de cogging, pérdidas de imanes permanentes.

Abstract

This study consists in the optimization and electromagnetic analysis of three phenomena that are produced or manifested in a synchronous machine with permanent magnets with modular stator, which are; the torque of cogging, the pair of gears of the machine. This is due to the need to analyze and understand machines with segmented or modular stator, due to their great benefits in the process of manufacturing the winding, transport and maintenance of large wind power generators.

A theoretical framework of the subject referring to magnets machines, both modular and conventional, was carried out in order to understand the operation, the benefits, its qualities, etc. All this with the intention of obtaining the largest amount of information regarding the subject.

A detailed simulation of the machine that is processed was carried out through a finite elements element (Flux), which allows us to work through different electromagnetic scenarios of the machine and also to allow us the geometry of this machine, through Unique changes previously. And with it finally it will also provide the behavior of this machine for the different phenomena studied.

An analysis of the behavior of each of the electromagnetic phenomena was performed, with the parameters previously chosen for the simulation work. The behavior patterns are adjusted to the characteristics or optimal values of these phenomena studied, and in addition to making a comparison of the values accepted for the machine.

Finally, from the analyzes obtained previously, geometric models of a synchronous machine of permanent magnets with modular stator are proposed, according to their optimization, that is, models for which the optimization of a particular phenomenon can be focused, or simply choosing a proposed balanced model.

Key words: synchronous permanent magnet machine, modular permanent magnet synchronous machine, windings, cogging torque, permanent magnet loss.

Índice general

Introducción.....	1
Hipotesis.....	2
Objetivo general.....	3
Objetivos específicos	3
1 Máquinas sincrónicas de imanes permanentes (PMSM).....	4
1.1 Imanes permanentes (PM).....	4
1.2 PMSM según el camino de flujo magnético	5
1.3 Ventajas y desventajas de las máquinas de PM.....	6
2 Tipos de devanados	7
2.1 Devanado distribuido	7
2.2 Devanado concentrado	7
3 Manufactura del estator con devanado concentrado	8
3.1 Métodos de producción del núcleo de estator	8
3.1.1 Núcleo completo	8
3.1.2 Núcleo segmentado	9
3.1.3 Núcleo laminado en espiral.....	9
3.1.4 Núcleo de junta.....	10
3.2 Tipos de diseño de estator.....	10
3.2.1 Estator con segmentos de un diente.....	10
3.2.2 Estator en compuestos magnéticos blandos (SMC)	10
3.2.3 Estator con puntas especiales	11
3.2.4 Estator con ranuras abiertas.....	11
3.3 Producción y montaje de las bobinas	11
3.3.1 Bobinas enrolladas por agujas	11
3.3.2 Bobinas enrolladas manualmente	11
3.3.3 Bobinas preenrolladas	11
4 Software Flux Cedrat	12
5 Máquina sincrónica de PM con estator modular (MPMSM)	13

6 Topología de la máquina a estudiar	15
7 Geometría de bordes rectos y redondeado de los dientes del estator y el PM. 16	
8 Definición de torque de cogging.....	18
9 Torque de cogging de una MPMSM	20
9.1 Torque de cogging para geometría con bordes rectos	21
9.2 Torque de cogging para geometría con bordes redondos.....	23
9.3 Análisis del torque de cogging entre una MPMSM y PMSM	25
9.4 Estudio del torque de cogging para MPMSM y PMSM con geometría de bordes rectos	26
9.5 Estudio del torque de cogging para MPMSM y PMSM con geometría de bordes redondos.....	28
9.6 Conclusión del capítulo.....	30
10 Análisis de las pérdidas en PM de una MPMSM sin carga	31
10.1 Definición de pérdidas en PM	31
10.2 Pérdidas en PM para MPMSM con diseño de geometría de bordes rectos	32
10.3 Análisis de las pérdidas de PM sin carga entre una MPMSM y PMSM con bordes rectos	33
10.4 Pérdidas en PM para MPMSM con diseño de geometría de bordes redondos	34
10.5 Análisis de pérdidas de PM sin carga entre una MPMSM y PMSM con bordes redondos	35
10.6 Conclusión del capítulo	36
11 Análisis de las pérdidas en PM de una MPMSM con carga.....	37
11.1 Pérdidas en PM con carga para MPMSM con diseño de geometría de bordes rectos.....	37
11.2 Pérdidas en PM con carga para MPMSM con diseño de geometría de bordes redondos	38
11.3 Conclusión del capítulo.....	39
12 Torque medio de la MPMSM.....	40
13 Torque neto de una MPMSM	43
13.1 Torque neto de una MPMSM con geometría de bordes rectos	44
13.2 Análisis del torque neto de bordes rectos entre una MPMSM y una PMSM	44
13.3 Conclusión del capítulo.....	45
14 Modelos geométricos propuestos de una MPMSM según su optimización..	46
Discusión y conclusiones.....	48
Bibliografía	52

Introducción

Las mejoras en el desarrollo tecnológico de las máquinas sincrónicas de imanes permanentes, ha permitido a estas ingresar a mercados que antes eran ocupadas por otras máquinas eléctricas, debido a los beneficios en términos de mantención, alta densidad de potencia, eficiencia, refrigeración, entre otras. Sin embargo, en su comienzo debido a la baja calidad de los imanes permanentes, no fue posible obtener buenos rendimientos, pero luego en los años 70, las máquinas de imanes permanentes obtuvieron un nuevo aire, con la aparición de los imanes permanentes de tierras raras, como es el caso de los imanes de neodimio o de samario-cobalto, que producían campos magnéticos significativamente más fuertes que otros tipos tales como imanes de ferrita o de alnico. Sin embargo, las máquinas sincrónicas de imanes permanentes requieren mayores costos de inversión en comparación con las máquinas de inducción, debido a la monopolización de los imanes de tierras raras, por lo que se hizo necesario encontrar nuevas tecnologías o diseños para aminorar los costos de fabricación para así lograr amortizar el costo del imán permanente, como es el caso del diseño de las máquinas sincrónicas de imanes permanentes modulares o de estator segmentado (MPMSM).

El enfoque del estudio, se basa en buscar la optimización y análisis electromagnético de tres fenómenos que se producen o se manifiestan en una máquina sincrónica de imanes permanentes con estator modular, los cuales son; el torque de cogging, las pérdidas de los imanes permanentes y el torque neto de la máquina. Dicho análisis se realiza a través del estudio del comportamiento de cada uno de estos fenómenos físicos, en función de parámetros geométricos, los cuales están relacionados con la geometría constructiva tanto del estator y del rotor de la máquina, para así lograr un adecuado compromiso de estos fenómenos, que permita la condición más óptima de la máquina, respaldando el uso de este tipo de máquinas para la reducción de los costos de manufactura del estator, a través de la automatización del enrollado del bobinado.

En la primera parte de este informe se realizará una investigación con respecto a los conceptos básicos referente al tema en cuestión, como por ejemplo, las máquinas sincrónicas de imanes permanentes, los tipos de devanados, manufactura del estator, máquina de imanes permanentes modulares, la topología a estudiar, etc. Con el fin de lograr comprender los conceptos más específicos del proyecto de título.

Además, se realizó el estudio electromagnético de la máquina sincrónica de imanes permanentes modular, analizando uno de los fenómenos propios de las máquinas de imanes permanentes que

es el torque de cogging, el cual es el resultado de la interacción del imán con las ranuras del estator, lo que provoca un torque pulsante, que distorsiona el torque medio de la máquina. Debido a que este torque es dependiente de la tasa de cambio de la reluctancia con respecto a la posición, es posible a través de la variación de los parámetros geométricos, tales como la separación de los módulos del imán permanente y el ancho del imán de la máquina estudiada, manipular su valor, es decir encontrar parámetros en los cuales este torque de cogging sea el más adecuado a nuestros requerimientos. Además, se compara este torque para dos tipos de configuraciones de los bordes del diente del estator y el imán permanente, lo que nos permite obtener una mayor información del comportamiento de este.

Otro fenómeno de gran importancia al momento de hablar de una optimización electromagnética de una la máquina sincrónica de imanes permanentes modular, son las pérdidas en los imanes permanentes tanto en vacío como con carga, las cuales serán analizadas en función de dos parámetros geométricos de la máquina, al igual que para el caso del torque de cogging, Y comparando estos valores de pérdidas, con los que se obtienen para una máquina de sincrónica de imanes permanentes convencional. Todo esto con la intención de encontrar la relación existente entre las pérdidas de imanes permanentes con la segmentación del estator.

Ya visto el comportamiento del torque de cogging y las pérdidas de imanes permanentes en la máquina estudiada, se comenzó con el análisis del torque neto de la máquina de imanes permanentes modular, ya que este torque es el que entrega la potencia mecánica de la máquina, todo esto para distintas variaciones de los parámetros geométricos y las dos configuraciones geométricas de bordes anteriormente mencionadas. Además, se comparó el torque neto de la máquina modular, con la que se obtiene en una máquina convencional del mismo tipo.

Por último, a través de los análisis electromagnéticos de los fenómenos anteriormente mencionados, se propone distintos diseños geométricos de la maquina estudiada, donde estos diseños se evalúan a través de ciertas consideraciones, como por ejemplo si se desea una maquina con menores pérdidas en los imanes permanentes u otra con el mayor torque neto, lo que permite una mayor flexibilidad de la máquina dependiendo lo que se desea optimizar.

Hipotesis

- Es posible encontrar una configuración adecuada de la máquina sincrónica de imanes permanentes modular, que nos permita obtener un torque de cogging similar a una máquina sincrónica de imanes permanente convencional.
- Es posible disminuir las pérdidas de imanes permanentes tanto en vacío como con carga, con una adecuada configuración de la máquina sincrónica de imanes permanentes modular.
- Es posible encontrar valores del torque neto de la máquina sincrónica de imanes permanentes modular, similares con los que se obtienen en una máquina sincrónica de imanes permanente convencional

Objetivo general

- En esta propuesta se propone desarrollar un análisis y optimización electromagnética de una máquina eléctrica de imanes permanentes modular, desarrollada para la disminución de costo de manufactura, que permita un buen compromiso entre las pérdidas de imanes permanentes, torque de cogging y torque neto de la máquina.

Objetivos específicos

- Desarrollar un modelo bidimensional de la máquina mediante el software en elementos finitos para el estudio de sus características de operación.
- Analizar los efectos de la variación de los parámetros geometría de los módulos de estator sobre el torque Cogging.
- Analizar el efecto de los parámetros geométricos de los módulos de estator sobre las pérdidas eléctricas en los imanes permanentes y el torque neto de la máquina.
- Realizar una comparación de todos los fenómenos electromagnéticos estudiados, considerando dos tipos de configuración geométrica del borde de los dientes del estator y el imán permanente (bordes rectos y redondeados).
- De los análisis obtenidos para la máquina sincrónica de imanes permanentes modular, realizar la comparación con los que se obtienen para una máquina sincrónica de imanes permanente convencional, para determinar los el pro y contras de la máquina a estudiar.

1 Máquinas sincrónicas de imanes permanentes (PMSM)

La principal característica de este tipo de máquina es que las bobinas de excitación presentes en las máquinas sincrónicas convencionales, son reemplazadas por imanes permanentes. El principio de funcionamiento es idéntico al de una máquina sincrónica clásica. El rotor gira a la misma velocidad del campo magnético rotatorio de estator, desfasado con respecto a dicho campo en un ángulo δ .

Debido a la facilidad que presenta el trabajo y disposición de los imanes, estas máquinas son ideales en aplicaciones de baja velocidad, como por ejemplo en generación eólica, aplicaciones navales, sistemas elevadores, etc.

1.1 Imanes permanentes (PM)

Los imanes permanentes son materiales que poseen una gran capacidad de almacenamiento de energía magnética, que perdura en el tiempo y que su degradación no es significativa. Un aspecto importante es la curva característica de magnetización o curva de histéresis, curva que es particular para cada tipo de material magnético.

La aparición de imanes a base de tierras raras como los de Neodimio-Fierro-Boro (NdFeB) y Samario-Cobalto (SmCo) di inicio una nueva era en el desarrollo de las máquinas eléctricas la cual se caracteriza por una alta eficiencia y densidad de potencia.

Los imanes pueden estar montados en la superficie del rotor o en insertos en el mismo como se muestra en la figura 1-1, con las definiciones descritas en [1].

- **Imanes insertos:** La principal característica de este tipo de máquinas es que los PM se encuentran insertos en el núcleo del rotor. Esta topología permite aumentar el torque por efecto de la saliencia. Su configuración permite introducir jaulas para partida asincrónica, que también actúan como devanados amortiguadores. Además, los PM se pueden disponer de formas especiales para aumentar la concentración de flujo generando tensiones menos distorsionadas [1].

- **Imanes Montados:** Este tipo de máquina se caracteriza porque los imanes están montados directamente sobre la superficie del rotor, generando estructuras simples, de alta eficiencia, bajo nivel de ruido y costo. Por otra parte, presentan distribución de flujo trapecoidal en el entrehierro y alta densidad de torque [1].

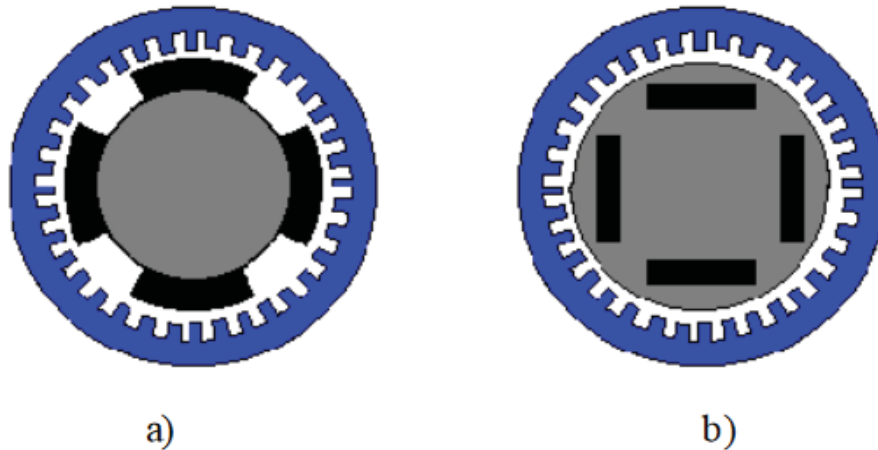


Figura 1-1: Montajes de imanes en el estator. a) Imanes montados b) Imanes insertos.

1.2 PMSM según el camino de flujo magnético

Dependiendo del camino del flujo magnético presente en la máquina de IP se distinguen 2 tipos de configuraciones [2] :

- La configuración de flujo radial, en donde el flujo magnético impuesto por los imanes cruza el entrehierro en forma radial.
- La configuración de flujo axial, cuando el flujo magnético cruza el entrehierro en forma axial.

Ambas configuraciones se muestran en la Figura 1-2:

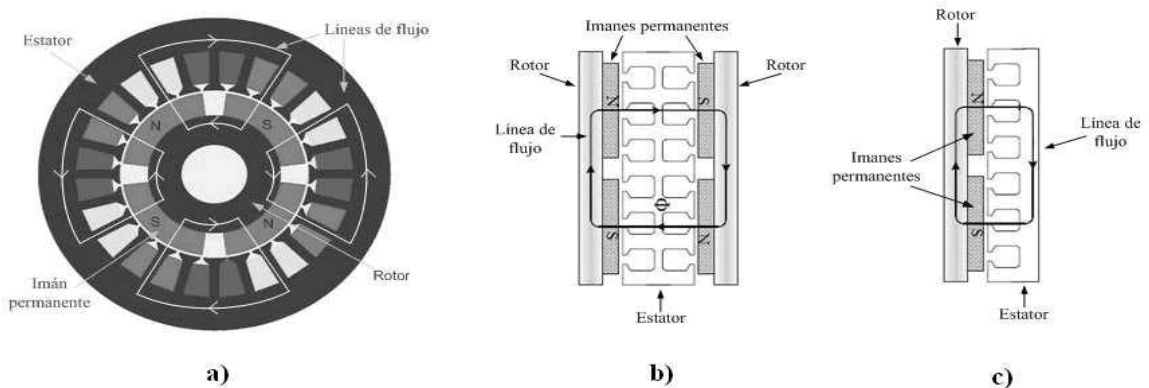


Figura 1-2: a) Máquina con flujo radial b) Máquina con flujo axial de dos rotores y un estator c) Máquina de flujo axial con un estator y un rotor.

1.3 Ventajas y desventajas de las máquinas de PM

A continuación, se presentan las principales ventajas y desventajas, que caracterizan a las máquinas de PM convencionales [1].

Ventajas:

- Mejora el rendimiento y confiabilidad al eliminar el bobinado de excitación y los contactos deslizantes, reduciendo las pérdidas Joule.
- Aumento en la relación potencia/peso ya que el bobinado de campo es reemplazado por PM con similares características de potencia, pero de menor volumen.
- Se pueden construir máquinas eléctricas con geometrías complejas.
- Facilita la construcción de máquinas de alta velocidad y baja inercia.
- Es menos susceptible a sufrir recalentamientos ya que los enrollados se encuentran solo en la parte externa del motor (es decir en el estator).
- No requiere anillos ni escobillas que implican una necesidad de mantenimiento periódica y limitan las velocidades de giro del rotor.

Desventaja:

- Excitación de campo fija, lo que dificulta el control sobre ella.
- Aparecen torques pulsatorios (Torque Cogging) debido a la interacción entre los PMs y la estructura de estator.
- Costo de los imanes de NdFeB hace prohibitivo su uso en máquinas de grandes potencias.

2 Tipos de devanados

Los devanados o arrollamientos son el conjunto de bobinas que conforman las fases de estator de la máquina sincrónica de imanes permanentes. El material conductor suele ser cobre en forma de hilo esmaltado (el esmalte sirve de aislamiento eléctrico entre conductores) o de pletina de sección rectangular y recubierta de un material aislante. En las máquinas eléctricas existen variadas configuraciones de devanados. Sin embargo, en este estudio solo se hará referencia a dos tipos; devanados distribuidos o concentrados con superposición y los devanados concentrados sin superposición o fraccionarios. Particularmente se pondrá un mayor énfasis a este último, ya que es el tipo de devanado de la máquina a estudiar.

2.1 Devanado distribuido

Este tipo de devanado se caracteriza porque las bobinas de estator se encuentran distribuidas en distintas ranuras sobre el paso polar, por lo que se producen cruzamientos entre las cabezas de bobinas. En el caso particular, cuando el número de ranuras por polo y por fase (q) es igual a 1, los lados de bobina se encuentran concentrados en una ranura, pero de igual manera se producen los cruzamientos entre las cabezas de bobina de las distintas fases de estator [1]. Debido a los cruzamientos entre las bobinas, se requiere una gran longitud de las cabezas de bobina, aumentando las pérdidas por efecto Joule en el devanado y la cantidad de cobre utilizado.

2.2 Devanado concentrado

En este tipo de devanado ($q < 1$), las bobinas son enrolladas alrededor de un solo diente por lo que no se producen cruzamientos. Son principalmente utilizadas en servomotores debido a su corta longitud de cabezas de bobinas y a la simpleza de su estructura. No son frecuentemente utilizados en grandes máquinas eléctricas, donde la eficiencia y la producción de torque son más importantes, ya que se caracterizan por tener un bajo factor de bobinado. Sin embargo, en la última década se han desarrollado diversos estudios demostrando que pueden ser utilizadas en máquinas de PM en la gama de potencia medias y altas. Esto debido a sus bobinados finales más cortos y a la baja ondulación del par se puede lograr [1]. Entre otras ventajas, se pueden destacar la alta densidad de potencia, alta eficiencia, factor de relleno de ranura altos, particularmente cuando se utilizan en estructuras de estator segmentados. Par de giro bajo y capacidad de debilitamiento de flujo y tolerancia a fallos.

3 Manufactura del estator con devanado concentrado

La manufactura de los estatores en las máquinas rotatorias es un campo amplio, que abarca tanto la producción del núcleo, como la producción y el montaje de las bobinas del mismo. Sus diferentes métodos de producción buscan siempre un punto perfecto entre menor costo y alta eficiencia. Pero al querer tener un estator con devanados concentrados, debido a sus grandes beneficios, es un costo que aumenta al momento de hablar de su manufactura. Es por ello que se presenta los distintos métodos comparando sus falencias y beneficios, los que son descritos a continuación [3].

3.1 Métodos de producción del núcleo de estator

El estator es la parte fija de la máquina eléctrica, su núcleo esta tradicionalmente hecho de láminas consecutivas de material ferromagnético de alta permeabilidad magnética, estas laminas están aisladas entre sí con el fin de reducir las corrientes de Foucault y las pérdidas magnéticas. Estos núcleos de estatores laminados son producidos por diferentes métodos. Sin embargo, debe considerarse que la elección del método para enrollar las bobinas está relacionada con el método de producción elegido del núcleo del estator.

3.1.1 Núcleo completo

En este método, toda la sección del núcleo está perforada en una sola pieza como se muestra en la figura 3-1, es la manera convencional de fabricar las laminaciones. Si la máquina no tiene un rotor laminado o un estator interior, la pieza central dejada después de la perforación no es útil. Por lo tanto, la cantidad de material de hierro gastado es grande, alrededor del 80 al 90% del material de hierro comprado total. Además, para un estator con un gran número de dientes, la fuerza requerida para el punzonado es considerable. Con este método, la técnica de fabricación y las máquinas herramienta son convencionales, pero el coste del hierro es alto debido a la gran cantidad de residuos.

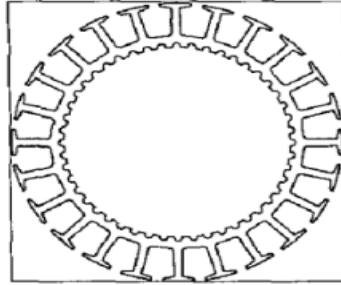
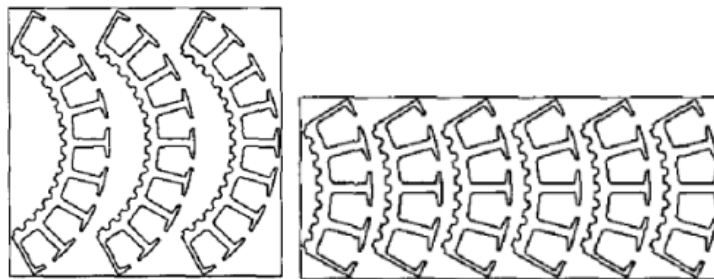


Figura 3-1 Estator de núcleo completo.

3.1.2 Núcleo segmentado

En este método, el hierro del estator se divide en segmentos como se muestra en la figura 3-2. De esta forma, se puede disminuir el coste del material y mejorar la productividad. Con segmentos de 120° , hay 50% a 60% de residuos de hierro, que es mucho menor que para el método descrito anteriormente, este porcentaje puede disminuir mucho más si el estator se segmenta a 60° . Después de la estratificación, los segmentos se sueldan entre sí.

La fabricación de estatores laminados segmentados es convencional, pero la cantidad de material desperdiciado sigue siendo alta, aunque se reduce en comparación con el método cuando se perfora toda la sección del estator. Finalmente, los segmentos deben soldarse, lo que aumenta el coste y el tiempo de producción. La soldadura también puede dañar localmente las propiedades magnéticas y provocar pérdidas adicionales en el hierro.

Figura 3-2 Estatores segmentados en 120° y 60° .

3.1.3 Núcleo laminado en espiral

Con este método, el núcleo se fabrica a partir de una banda de hierro larga. Las ranuras se perforan progresivamente en la banda. La banda se enrolla entonces en espiral y se suelda entre sí. El núcleo no soldado se parece a un slinky (juguete consistente en un muelle espiral) y se llama a menudo "slinky" por esa razón. Este método permite reducir significativamente el material no utilizado. Se estima que el residuo de hierro es del 30 al 40% del material necesario al perforar toda la sección del estator en una lámina cuadrada. El espesor de la parte posterior del estator es un factor limitante para la aplicación de este método. Aunque este método minimiza la cantidad

de hierro gastado, requiere técnicas especiales de fabricación y máquinas de producción. Además, no todas las geometrías pueden ser producidas de esta manera.

3.1.4 Núcleo de junta

Con este método, los segmentos se conectan junto con algunas juntas cilíndricas convexas o cóncavas que permiten la rotación de los segmentos. Existen muchas patentes para este método. Se describen diferentes maneras de conectar los segmentos entre sí, como con las articulaciones o los elásticos. En cuanto al método con núcleos de estator laminados en espiral, se minimiza la cantidad de material de hierro desperdiciado. Esta técnica de fabricación no es convencional y requiere herramientas especiales.

3.2 Tipos de diseño de estator

A continuación, se describe los diferentes perfiles de estratificación del estator que garantizan un factor de relleno de ranura elevado y bobinados finales cortos [3].

3.2.1 Estator con segmentos de un diente

Una primera solución para bobinas pre enrolladas es usar laminaciones que están segmentadas de una manera para facilitar la inserción de las bobinas en su posición en los dientes. Mecrow propuso una construcción, en la que las bobinas pre-enrolladas pueden pasar fácilmente a lo largo del núcleo trasero y deslizarse alrededor del diente. Este método permite alcanzar un factor de llenado de ranura alto.

El hierro desperdiciado durante la perforación de la laminación se minimiza con este método, como se ha visto anteriormente. Sin embargo, con un estator que tiene muchos dientes, aumenta el tiempo de montaje y soldadura del estator. Además, con muchos dientes, la soldadura en cada diente causa mayores pérdidas y la posibilidad de fugas es mayor si algunos segmentos no están bien montados juntos.

3.2.2 Estator en compuestos magnéticos blandos (SMC)

El alto coste para las laminaciones de hierro causadas por la cantidad de material desperdiciado puede hacer que el material SMC sea una buena solución para disminuir el precio del motor. El material SMC tiene el inconveniente de curvas de magnetización más pobres en comparación con la laminación de hierro convencional, pero la producción de piezas SMC es más fácil y más barata para un alto número de piezas. SMC también está bien adaptado para bobinados concentrados, ya que los dientes y el estator pueden ser producidos por separado. Las bobinas se colocan primero alrededor de los dientes, que luego se montan en la parte posterior del estator. Las propiedades magnéticas isotrópicas del SMC permiten que los dientes con forma redonda permitan un factor de llenado de ranura elevado.

3.2.3 Estator con puntas especiales

Un método que utiliza una geometría especial de las puntas de los dientes se describe en la patente de Yamada. En una primera etapa, las bobinas pre enrolladas se colocan fácilmente alrededor de los dientes, estando las puntas de los dientes alineadas verticalmente con el cuerpo del diente. A continuación, se utiliza una herramienta para doblar las puntas de los dientes hasta su posición normal. Este método requiere una gran distorsión de las puntas de los dientes, lo que podría causar algunas pérdidas extra de hierro en la deformación partes.

3.2.4 Estator con ranuras abiertas

Cuando las ranuras del estator están completamente abiertas, es decir, los dientes no tienen puntas, es posible colocar bobinas pre-enrolladas en el núcleo del estator, incluso si no está segmentado. Sin embargo, los inconvenientes de este método son la fuga de la ranura del estator más alta y la ondulación de par posiblemente más alta. Las bobinas también tienen que ser fijadas al núcleo del estator de alguna manera.

3.3 Producción y montaje de las bobinas

Con un núcleo laminado, de una sola pieza o segmentado, las bobinas se pueden enrollar alrededor de los dientes usando una máquina de bobinado especial equipada con una aguja. Si el núcleo laminado tiene una geometría adaptada, las bobinas también pueden pre-enrollarse antes de su montaje en el núcleo.

3.3.1 Bobinas enrolladas por agujas

Las bobinas se enrollan directamente alrededor del núcleo mediante una aguja. El inconveniente de esta técnica es el gran espacio que se requiere entre dos bobinas vecinas para permitir que la aguja se mueva. El espacio entre dos bobinas debe ser al menos 3,5 a 4 veces el diámetro del alambre. Esto da como resultado un factor de llenado de ranura bajo. Por lo tanto, el diseñador debe considerar pérdidas de cobre más altas o un mejor sistema de enfriamiento. El factor de relleno de ranura es de aproximadamente 0,4. Con bobinas enrolladas con aguja, pueden usarse técnicas de fabricación convencionales para la laminación y la producción de las bobinas puede ser automatizada. Sin embargo, la inversión en una devanadora de aguja es necesaria.

3.3.2 Bobinas enrolladas manualmente

Se puede lograr un factor de llenado de ranura elevado con cualquier geometría de núcleo si las bobinas se enrollan manualmente alrededor de los dientes. El inconveniente obvio es la producción muy lenta y costosa.

3.3.3 Bobinas preenrolladas

Las bobinas se enrollan antes de colocarlas en el núcleo del estator. El mismo método se utiliza para enrollar las bobinas de un devanado distribuido convencional.

4 Software Flux Cedrat

Flux es una aplicación de software de elementos finitos desarrollada en el laboratorio de electrotecnia de Grenoble Francia, usada para simulaciones de física electromagnética y térmica, tanto en 2D como en 3D. Flux puede manejar el diseño y análisis de cualquier dispositivo electromagnético. Para nuestra presente investigación se hará uso de flux en 2D.

Flux 2D permite resolver las ecuaciones de Poisson y a partir del vector de potencial magnético obtener la inducción magnética B, intensidad de campo magnético H y muchos otros resultados, tales como mapas de líneas de flujo, inducción, permeabilidad; curvas de distribución espacial inducción, potencial magnético, campo magnético; curvas de evolución temporal de corrientes, voltajes, torques: cálculos puntuales y globales de flujo, fuerza, inductancias, torques, etc.

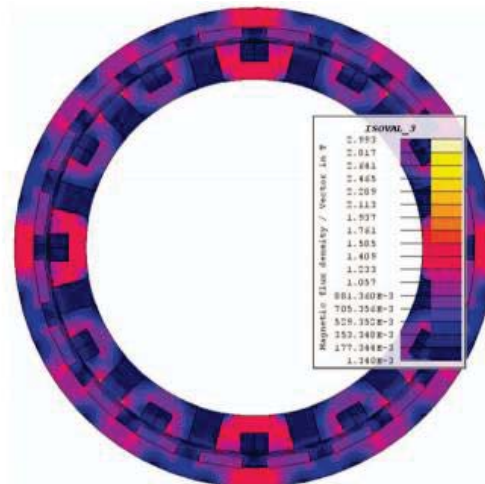


Fig. 4. Flux density distribution in the 2D model of the 24 slot and 20 pole machine.

Figura 4-1: Imagen entregado por FLUX de la densidad de flujo de una máquina de 24 ranuras y 20 polos.

5 Máquina sincrónica de PM con estator modular (MPMSM)

El uso de PMSM en aplicaciones de baja potencia y velocidad variable en lugar de máquinas eléctricas DC cepilladas o motores de inducción (IM) aumenta constantemente. Sin embargo, la transición de un tipo de accionamientos de motor a PMSM requiere inversiones significativas. Por lo tanto, es importante hacer el proceso de producción de nuevos tipos de máquinas eléctricas tan simple y barato como sea posible. Debido a que la parte activa de un rotor PMSM incluye principalmente acero laminado o sólido e imanes permanentes, es relativamente sencillo disponer el montaje automático de estas piezas. Sin embargo, el devanado del estator es un tema más desafiante, especialmente cuando se requiere un factor de espacio de cobre alto. Una de las posibles simplificaciones del proceso de producción de máquinas eléctricas es el uso de máquinas síncronas de imanes permanentes modulares (MPMSM) que facilitan la automatización del montaje del bobinado. Este bobinado se aplica preferentemente del tipo devanado concentrado, los cuales tienen la ventaja de tener una menor longitud de bobinado final, menores pérdidas de cobre en el devanado del estator, fabricación de armadura de bajo coste, y una mayor capacidad de tolerancia a fallos. También facilitan el logro de un factor de espacio de cobre alto en la ranura del estator.

En general, un estator segmentado puede ser dividido en dos estructuras principalmente diferentes. El primer tipo de segmentación se asemeja a un estator monolítico convencional, el cual debe tener un entrehierro mínimo entre los módulos (idealmente cero). Simplifica significativamente la rutina de bobinado (especialmente si el estator tiene ranuras cerradas o semi-cerradas). Sin embargo, se necesita un corte de laminación preciso para ensamblar los segmentos firmemente y estrechamente entre sí. El segundo tipo de segmentación no requiere una unión estrecha de los módulos del estator. Está diseñado para tener segmentos independientes separados que (idealmente) están aislados electromagnéticamente entre sí [4]. De acuerdo con la geometría de los módulos del estator, el segundo tipo de segmentación puede dividirse en la estructura en forma de E o en U como se muestra en la figura. 5-1 (a) y en la figura. 5-1 (b), respectivamente. Además, se muestra en la figura. 5-2 un esquema completo de una máquina modular de forma de U con rotor exterior.

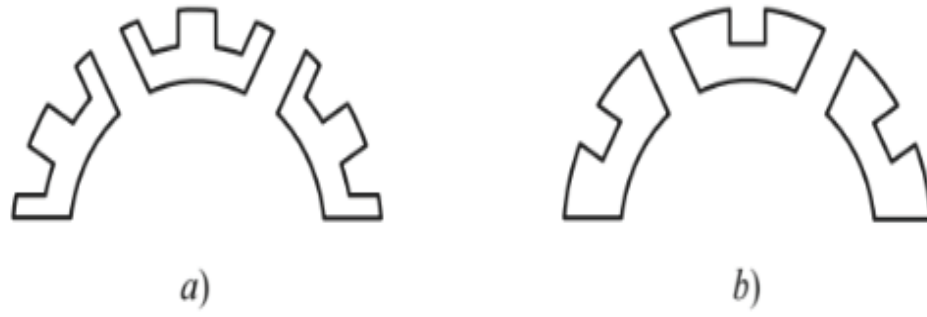


Figura 5-1 a) Máquina modular en forma de E. b) Máquina modular en forma de U.

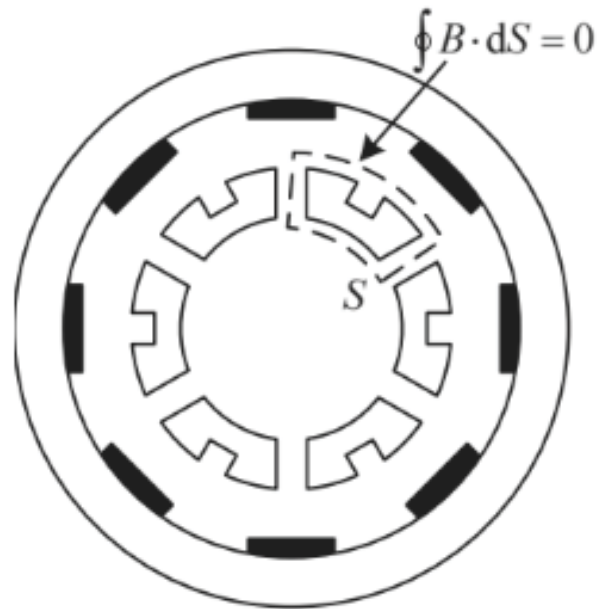


Figura 5-2: Máquina modular de forma de U con rotor exterior.

6 Topología de la máquina a estudiar

La topología de la máquina considerada para el estudio corresponde a una máquina de imanes permanentes de 20 polos y 24 ranuras con estator modular de flujo radial, con módulos en forma de U (12 módulos) como se muestra en la figura.6-1. Las principales dimensiones geométricas y sus valores respectivos que se resumen en la Tabla I.

Tabla 6-1: Dimensiones geométricas de la máquina a estudiar

Simbología	Parámetro	Valor	Unidad
l_{fe}	Longitud de hierro	38	mm
D_{ee}	Diámetro exterior estator	187	mm
D_s	Diámetro interior estator	138	mm
D_r	Diámetro exterior rotor	219	mm
Q	Número de ranuras	24	
p	Par de polos	10	
δ_g	Largo de entre-hierro	2	mm
h_{pm}	Altura de imán permanente	5	mm
h_s	Altura de ranura	8.7	mm
b_s	Anchura de ranura	12.6	mm

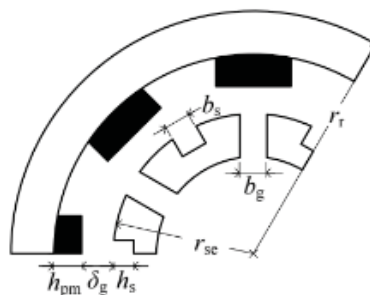


Figura 6-1: Dimensiones geométricas de la máquina.

7 Geometría de bordes rectos y redondeado de los dientes del estator y el PM

Para los análisis electromagnéticos de la máquina a estudiar que se presentaran en los siguientes capítulos, el estudio se realizara para dos casos distintos de los bordes de geométricos de los dientes del estator y el imán permanente, que son los casos de bordes rectos y bordes redondeados, que son representado en las figuras 7-1 y 7-2 respectivamente.

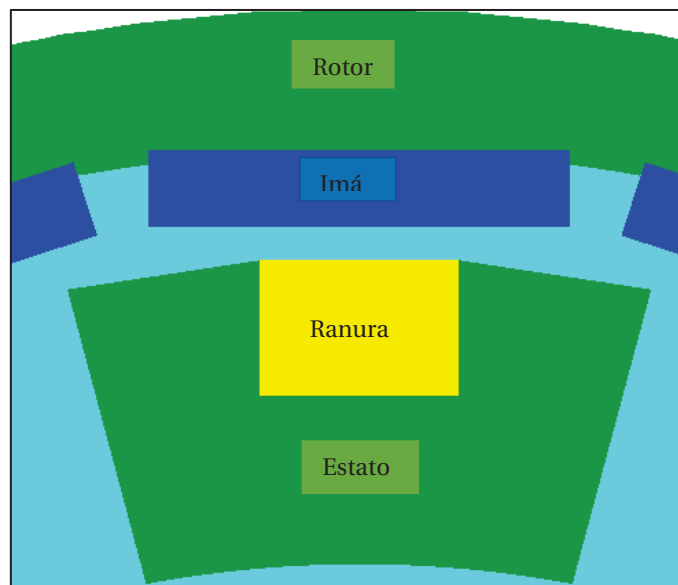


Figura 7-1: Geometría de bordes rectos tanto de los módulos del estator como de los imanes permanentes

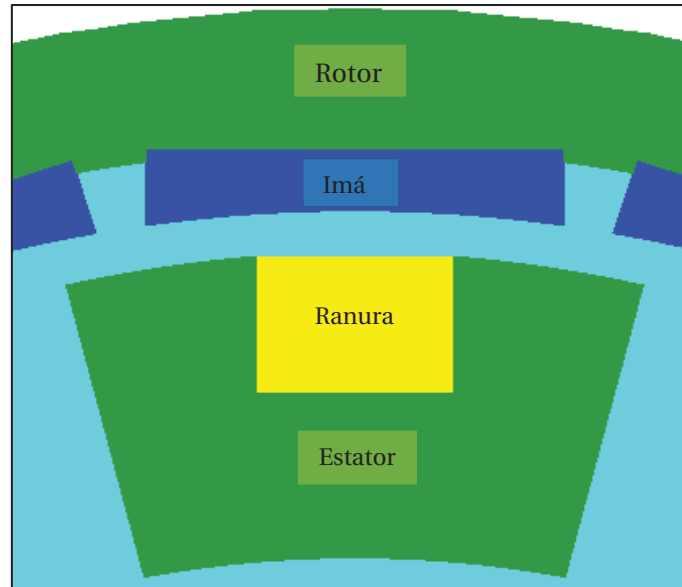


Figura 7-2: Geometría de bordes redondeados tanto de los módulos del estator como de los imanes permanentes

Los cuales nos permiten tener una variable más al momento de estudiar la optimización de la MPMSM, ya que la geometría de una máquina puede influir en gran manera ciertos fenómenos electromagnéticos, punto que será abordado en más detalle en los capítulos siguientes.

8 Definición de torque de cogging

El torque de cogging es uno de los fenómenos electromagnéticos que se estudiarán de una MPMSM, ya que es un efecto propio e intrínseco de las máquinas con imanes permanentes (IP) y que resulta de la interacción de los armónicos de FMM del IP y de los armónicos de la permeabilidad del entrehierro debido al ranurado. Se manifiesta por la tendencia de un rotor a alinearse en una serie de posiciones estables incluso cuando la máquina no está excitada, y da como resultado un par pulsante, que no contribuye al par efectivo. Sin embargo, dado que puede causar ondulaciones de velocidad e inducir vibraciones, particularmente a carga ligera y a baja velocidad, su reducción suele ser uno de los principales objetivos de diseño de máquinas de IP.

El torque de cogging se puede representar matemáticamente como la tasa de cambio de la reluctancia en el entrehierro en función del tiempo como se presenta a continuación:

$$T_c = \frac{\partial R}{\partial \theta} \quad (8-1)$$

Además de la reluctancia en el entrehierro que es el factor más predominante en el valor del torque de cogging, se encuentran otros agentes que afectan el valor del torque, como es el caso de la periodicidad magnética de la máquina, que se obtiene a través de la siguiente fórmula:

$$t = MCD(Q, p) \quad (8-2)$$

Q = número de ranuras

p = par de polos

MCD = el máximo común divisor

Por ejemplo, para una máquina con $Q=24$ y $p=10$, se obtiene una periodicidad igual a 2, que es el caso de nuestra máquina a estudiar.

Para lograr comprender cómo la periodicidad magnética afecta al torque de cogging, es necesario tener en consideración que la mayoría de los fenómenos físicos de las máquinas eléctricas son estudiados bajo el concepto de la periodicidad, donde el torque de cogging no es la excepción. Por lo cual, para obtener este torque en una cierta posición del rotor, basta con sumar las interacciones de los imanes con el entrehierro que se encuentran en el periodo magnético, y luego

multiplicar ese valor por la periodicidad magnética de la máquina. Es por esto último, que la periodicidad magnética afecta el valor del torque de cogging, ya que si mayor es la periodicidad magnética, mayor es el factor multiplicativo del torque de cogging total para una posición del rotor.

El tamaño del imán permanente, también es un factor que influye en el comportamiento del torque de cogging, ya que de él depende, la forma de interacción con el entrehierro, punto que será abordado con mayor detalle en el capítulo 4, donde se analizará como un parámetro para caracterizar el máximo torque de cogging de la máquina estudiada.

Para comprender de forma más sencilla el torque de cogging, se describirá el comportamiento de un imán, del tamaño del diente de una ranura de la máquina, al recorrer un paso polar sobre el estator. Cuando la superficie de este imán está sobre el diente del estator, sin que ninguno de sus vértices este fuera del diente, el torque de cogging es cero ya que no hay una fuerza que impulsen al imán de un lado a otro, se podría decir que está en una posición de equilibrio. Cuando el imán comienza a recorrer la ranura del estator a una distancia aun alejado del próximo diente, por efecto de dispersión magnética, se produce una fuerza que impulsa al imán a alinearse con el diente del estator más cercano. Posteriormente el imán comienza ser afectado no solo por una fuerza de atracción de un diente sino de ambos en proporción a la distancia que se encuentra entre ellos. Al cabo un tiempo el imán se posiciona en un punto intermedio entre las dos fuerzas de atracción, por lo que el torque de cogging en ese punto es cero. Por ultimo imán se encuentra cada vez más cercano del próximo diente, por lo cual la fuerza de atracción es mayoritariamente mayor hacia el último diente, hasta que finalmente vuelve a encontrarse en un punto de equilibrio en el último diente. La forma de la onda del torque de cogging para este recorrido anteriormente descrito, es mostrada en la siguiente figura 8-1.

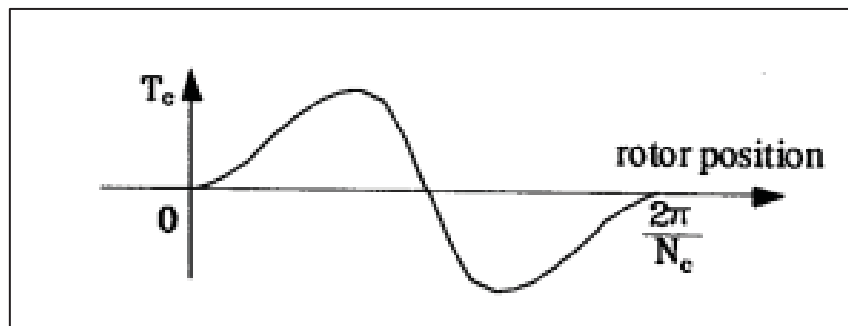


Figura 8-1: Forma de onda típica de torque de cogging en una máquina de imanes permanentes

Cabe destacar, que, para poder mitigar este torque, se han investigado y propuesto muchas técnicas eficaces tales como, la combinación de ranuras y números de polos, la anchura de las aberturas de la ranura del estator, el arco del imán y el ángulo de inclinación, así como la característica de diseño tales como dientes auxiliares y ranuras, con respecto a máquinas en las que los imanes están montados adyacentes al entrehierro.

9 Torque de cogging de una MPMSM

Este estudio es parte de un análisis del mejoramiento en la optimización de la máquina estudiada, donde se busca encontrar la geometría que permita menguar o aminorar el torque de cogging que se produce en la máquina. Este torque depende del valor de la derivada de la reluctancia (la resistencia de un material al paso de un flujo magnético) con respecto a la posición. Es por ello que es necesario identificar parámetros geométricos (variables) que nos permitan variar la reluctancia y por consiguiente el torque de cogging, lo que nos permite poder realizar un estudio comparativo entre estos factores y el torque de cogging producido por la máquina.

Los parámetros geométricos elegidos para realizar este estudio, son el factor k_g que nos permite variar la distancia entre los módulos en función de la siguiente expresión:

$$k_g = \frac{b_g}{b_s} \quad (9-1)$$

$b_g =$ distancia entre los modulos

$b_s =$ ancho de la ranura

Y α_{pm} que es un factor que nos permite variar el ancho del imán permanente, en función de la siguiente expresión:

$$\alpha_{pm} = \frac{w_{pm}}{t_{pm}} \quad (9-2)$$

$w_{pm} =$ ancho del iman permanente

$$t_{pm} = \frac{Q \cdot m}{p} \quad (9-3)$$

$m =$ número de fases

Pero analizados para dos casos, que serán comparados entre sí, para abarcar aún más el método de selección de una geometría que beneficie la disminución del torque de cogging los cuales son la geometría de bordes rectos y redondeados, los cuales fueron mencionados con anterioridad. Cabe mencionar que este estudio es solo una parte del estudio electromagnético de la máquina,

ya que no solo el torque de cogging es un factor indeseado, también se encuentra las pérdidas en los imanes permanentes, punto que será abordado con detalle en los capítulos posteriores, por lo cual este estudio se enfocara en mostrar el comportamiento del torque de cogging con respecto a los parámetros geométricos mencionados, señalando los valores o rango de valores de estos parámetros para los cuales el torque de cogging es mínimo.

9.1 Torque de cogging para geometría con bordes rectos

Tanto para el caso de bordes rectos y redondeados, el procedimiento de análisis es el mismo, como primer punto estudiamos el comportamiento del torque de cogging variando un solo factor geométrico que en este caso es k_g (separación de los módulos) en un rango de [0.1, 0.9] con intervalos de 0.05. A modo de ejemplo tomamos un $\alpha_{pm} = 0.599$, el que a través de la simulación que previamente se realizó en FLUX, se obtienen una serie de datos que luego son exportados en un Excel, los cuales son utilizados o llamados por con código en Matlab, que nos permite graficar el comportamiento del torque de cogging para distintos valores de k_g , en diferentes posiciones del rotor como se muestra en la figura 9-1.

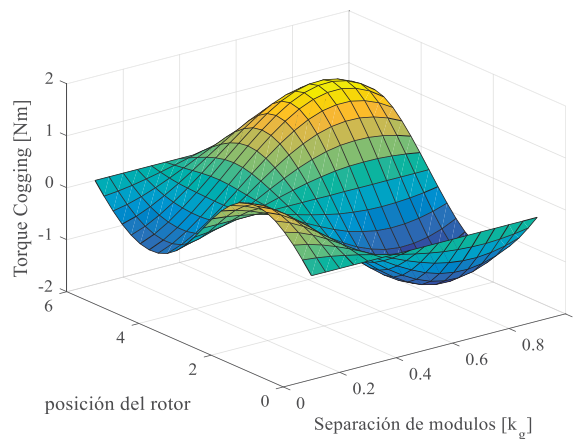


Figura 9-1: Gráfica del torque de cogging en función de la posición para distintos valores de k_g .

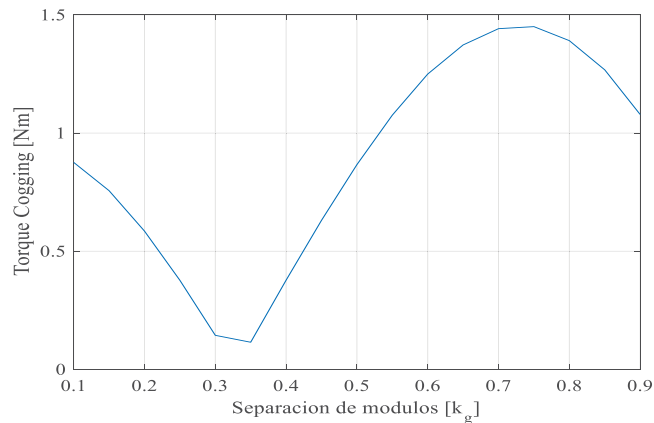


Figura 9-2: Gráfica de los valores máximos de torque de cogging para distintos k_g y un $\alpha_{pm} = 0.599$.

Más que la forma de onda, nuestro verdadero interés sobre el torque de cogging es saber identificar para que valores de sus factores geométricos se obtiene el menor valor máximo, punto que podemos apreciar con mayor claridad con la figura 9-2, en la que se aprecia que para un $\alpha_{pm} = 0.599$, el valor del menor máximo de torque de cogging está para un rango de k_g de 0.35 a 0.37. Esto nos permite evaluar de mejor manera la geometría de la máquina para un tamaño específico de un imán permanente, para así menguar el torque de cogging.

Luego como paso siguiente repetimos la formula anterior para obtener los torques de cogging máximos, pero con valores de α_{pm} en un rango de [0.6, 0.9], estos valores máximos son agrupados en una matriz [19x17] en Matlab los que son graficados como se observa en la figura 9-3.

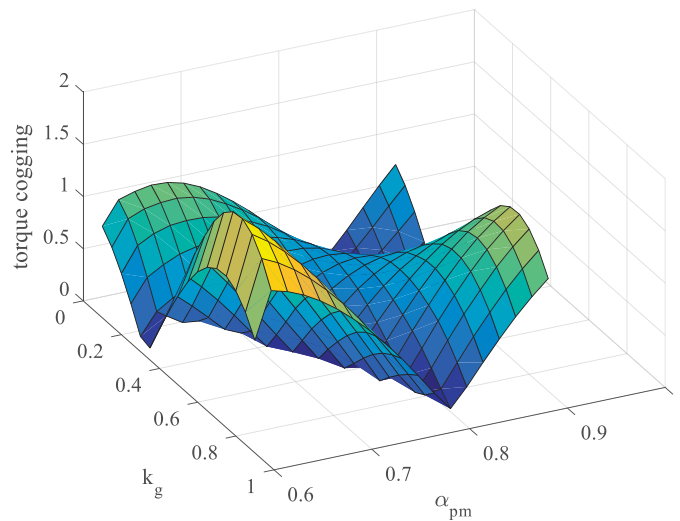


Figura 9-3: Torques de cogging máximos para una variación de k_g y α_{pm} (bordes rectos).

Nuestro objetivo como se mencionó anteriormente, es encontrar el valor o rango de valores en los que los factores geométricos estudiados minimizan el torque de cogging en la máquina, es por ello que es necesario ubicar la gráfica anterior en el plano de k_g y α_{pm} como se muestra a continuación en la figura 9-4. Al analizar la figura, se puede inferir que el menor torque de cogging que la máquina con bordes rectos presenta, se encuentra comprendida en dos regiones representadas con color morado, que indican un torque de cogging de 0.2 [Nm]. Como se puede apreciar no hay un único par de valores de parámetros para un torque mínimo, por lo cual es necesario analizar otros factores electromagnéticos que nos permitan un adecuado compromiso con este torque de cogging y los demás fenómenos a estudiar

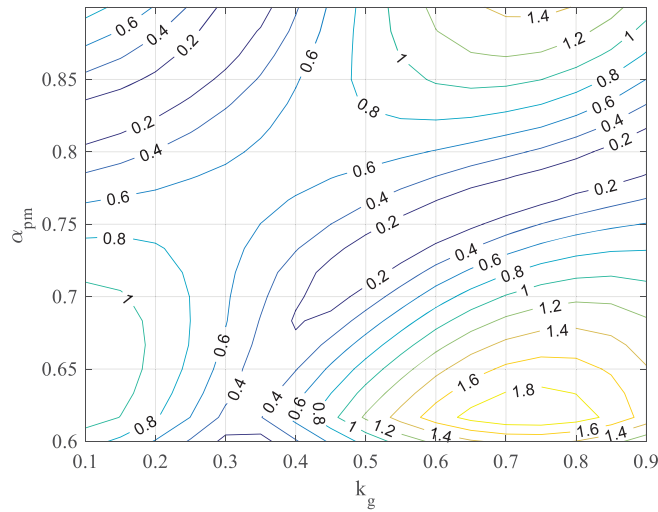


Figura 9-4: Torques máximos de la gráfica anterior en el plano de k_g y α_{pm} .

9.2 Torque de cogging para geometría con bordes redondos

Para este caso la geometría de los bordes tanto de los módulos como del imán permanente son redondeados, se desea al igual que el caso anterior obtener el comportamiento del torque de cogging, con respecto a los parámetros geométricos k_g y α_{pm} . El procedimiento para obtener los resultados del análisis, se abarcan de forma similar que en el caso anterior, es decir como primer punto estudiamos el comportamiento del torque de cogging variando un solo factor geométrico que en este caso es k_g (separación de los módulos) en un rango de [0.1, 0.9] con intervalos de 0.05, tomando un $\alpha_{pm} = 0.599$ a modo de análisis, con la diferencia que la simulación en Flux, se modifica la geometría recta a redondeada como se mostró en los puntos anteriores. Gracias a esto se obtienen la siguiente gráfica representada en la figura 9-5.

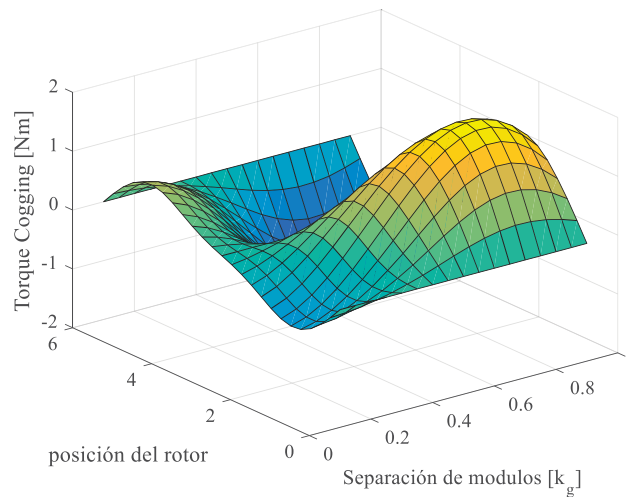


Figura 9-5: Gráfica de los valores máximos de torque de cogging para distintos k_g y un $\alpha_{pm} = 0.599$ (bordes redondeados).

Nuestro verdadero interés sobre el torque de cogging es saber identificar para que valores de sus factores geométricos se obtiene el menor valor máximo, punto que podemos apreciar con mayor claridad con la figura 9-6, en la que se aprecia que para un $\alpha_{pm} = 0.599$ el valor del menor máximo de torque de cogging está para un rango de k_g de 0.25 a 0.26. Esto nos permite evaluar de mejor manera la geometría de la máquina para un tamaño específico de un imán permanente, para así menguar el torque de cogging.

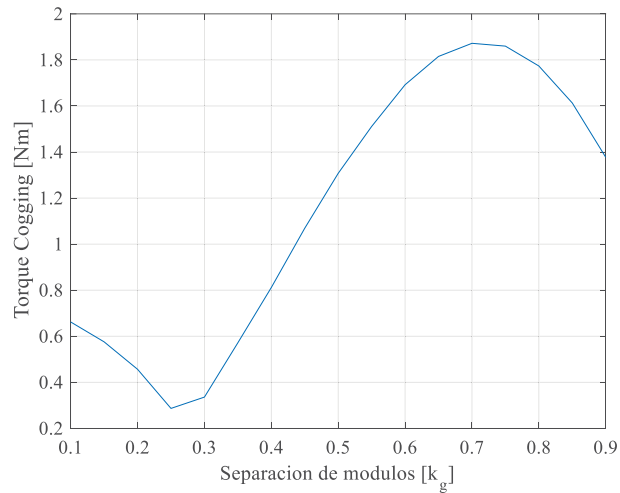


Figura 9-6: Gráfica de los valores máximos de torque de cogging para distintos k_g y un $\alpha_{pm} = 0.599$ (bordes redondeados).

De la misma manera que para el caso de la geometría de bordes rectos, obtenemos los torques de cogging máximos, pero ahora con valores de α_{pm} en un rango de [0.6, 0.9], estos valores máximos son agrupados en una matriz [19x17] en Matlab los que son graficados como se observa en la figura 9-7.

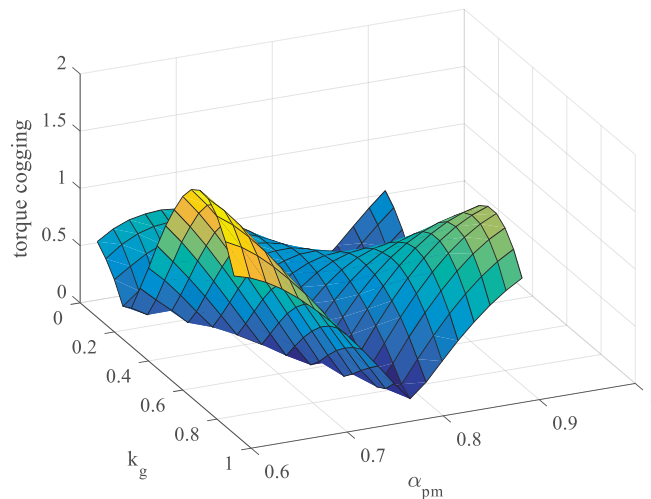


Figura 9-7: Torques de cogging máximos para una variación de k_g y α_{pm} (bordes redondeados).

Luego se ubica la gráfica anterior en el plano de k_g y α_{pm} como en el caso anterior para visualizar los torques de cogging máximos como se muestra a continuación en la figura 9-8. Al observar la figura, se puede inferir que el menor torque de cogging que la máquina con bordes redondeados presenta, se encuentra comprendida de igual manera en dos regiones representadas con color morado, que indican un torque de cogging de 0.2 [Nm]. Como se puede apreciar no hay un único par de valores de parámetros para un torque mínimo, por lo cual es necesario analizar otros factores electromagnéticos que nos permitan un adecuado compromiso con este torque de cogging y los demás fenómenos a estudiar

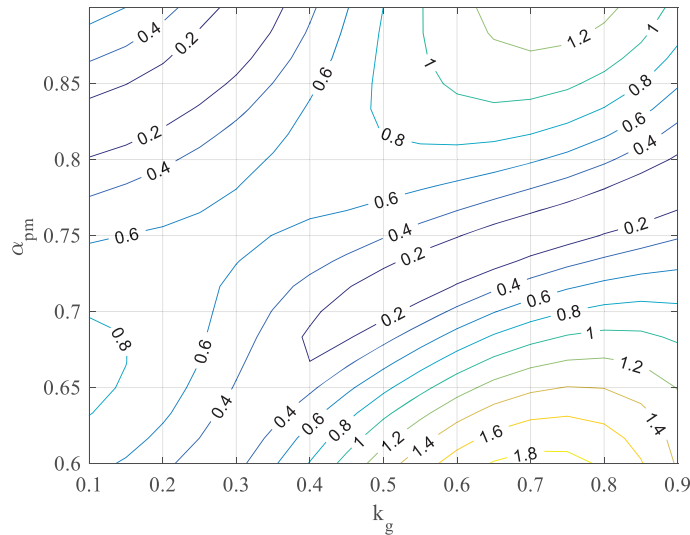


Figura 9-8: Torques máximos de la gráfica anterior en el plano de k_g y α_{pm} .

9.3 Análisis del torque de cogging entre una MPMSM y PMSM

Como complemento al estudio hecho con anterioridad sobre el torque de cogging de las MPMSM tanto para una geometría con bordes rectos y redondeados, se realizará un estudio comparativo del torque de cogging producido en las MPMSM y el efectuado por una PMSM convencional (estator monolítico) configuraciones que son representadas en la figura 9-9. El presente estudio nos permite visualizar las diferencias de los valores en magnitud de este torque cogging entre ambas configuraciones, demostrando que las PMSM convencionales se obtienen torques de cogging menores en comparación a las MPMSM. Pero a la vez con el estudio realizado anteriormente, es posible demostrar que para ciertos valores de k_g (separación de los módulos) y α_{pm} (ancho del imán permanente), se puede obtener valores de torque de cogging cercanos a los que se obtendrían en una PMSM con estator monolítico. Siguiendo el esquema del estudio anterior del torque de cogging, se presentará el estudio comparativo para una geometría de bordes rectos como redondeados tanto para la MPMSM y PMSM convencional.

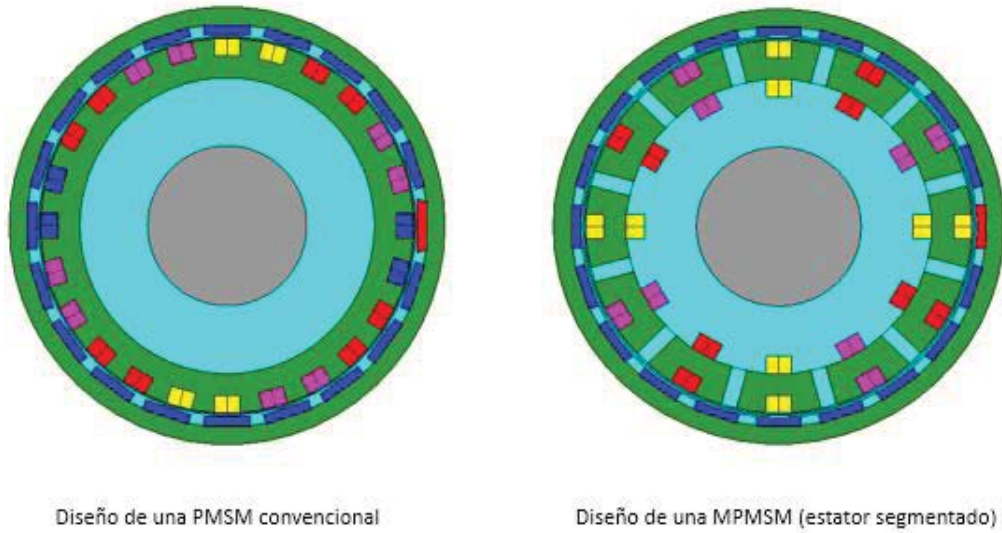


Figura 9-9: imagen demostrativa de una PMSM convencional y una MPMSM.

9.4 Estudio del torque de cogging para MPMSM y PMSM con geometría de bordes rectos

Para el siguiente análisis fue necesario realizar una simulación por elementos finitos (FLUX), para representar el caso de la PMSM tradicional, la que nos permite obtener los valores instantáneos del torque de cogging de esta configuración para distintos valores de α_{pm} y posiciones del rotor como se representa en la figura 9-10 a través de Matlab, pero nuestro verdadero interés sobre el torque de cogging es saber identificar para que valores de sus factores geométricos (para este caso α_{pm}) se obtiene el menor valor máximo, el cual es representado en Matlab a través de la figura 9-11.

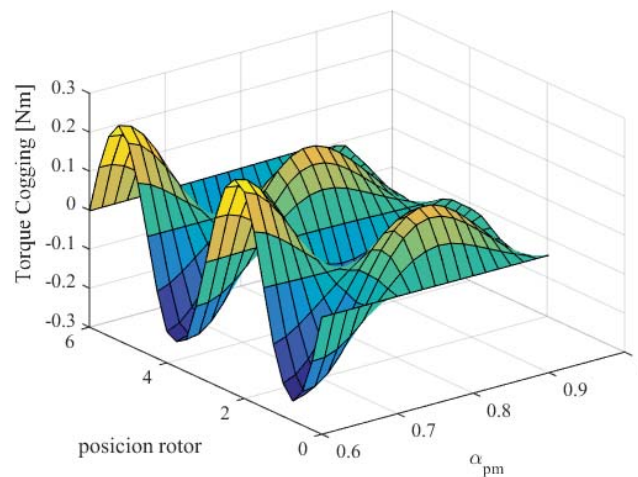


Figura 9-10: Valores instantáneos del torque de cogging de esta configuración para distintos valores de α_{pm} y posiciones del rotor para una PMSM convencional con bordes rectos.

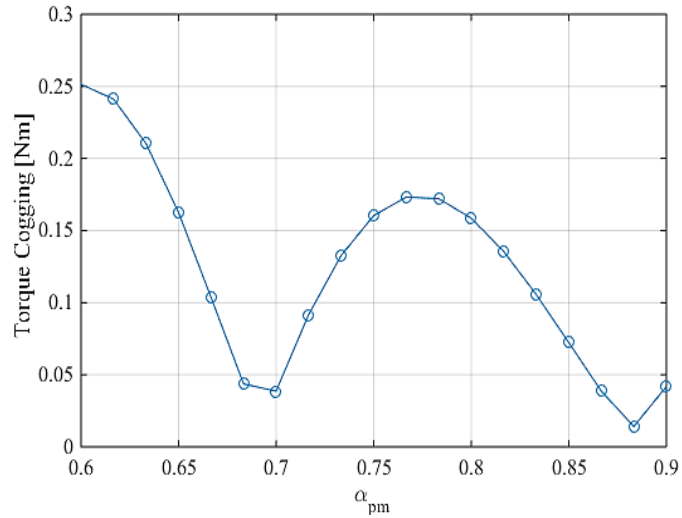


Figura 9-11 a) Valores máximos del torque de cogging para una PMSM convencional bordes rectos con respecto a α_{pm} .

Luego con los datos obtenidos en el capítulo anterior del torque de cogging máximo de una MPMSM, y los datos del torque de cogging máximo de una PMSM obtenidos del presente capítulo, además de agregar un factor nuevo de kg para la máquina modular ya que para esta configuración la máquina segmentada tiene la reluctancia lo más similar a una máquina convencional, se obtiene una gráfica que nos permite analizar comparativamente el torque de cogging máximo de ambas configuraciones como se representa en la figura 9-12, en la cual se puede identificar claramente que el torque de cogging de una PMSM convencional, tiene valores de torque de cogging máximo menores que en comparación a una MPMSM, lo que nos permite concluir que la modulación del estator de una PMSM afecta negativamente el aumento de los valores de torque de cogging, pero como también se aprecia en la figura , en una MPMSM es posible obtener un valor torque de cogging cercano a la de una máquina convencional, para una cierta configuración de los parámetros geométricos α_{pm} y k_g , que son las curvas en azul que se encuentran en el sector que representa la MPMSM.

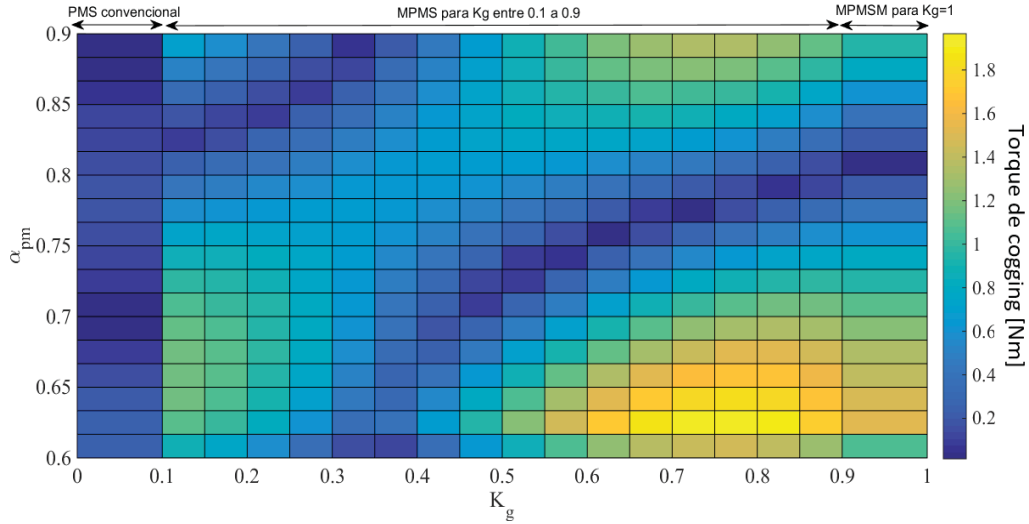


Figura 9-12: Gráfica comparativa del torque de cogging de bordes rectos entre una MPMSM y PMSM convencional.

9.5 Estudio del torque de cogging para MPMSM y PMSM con geometría de bordes redondos

Para el siguiente análisis al igual que para el caso de bordes rectos, fue necesario realizar una simulación por elementos finitos (FLUX), para representar el caso de la PMSM tradicional, la que nos permite obtener los valores instantáneos del torque de cogging de esta configuración para distintos valores de α_{pm} y posiciones del rotor como se representa en la figura 9-13 a través de Matlab, luego obtenemos los valores máximos del torque de cogging para distintos valores de α_{pm} , el cual es representado en Matlab a través de la gráfica de la figura 9-14.

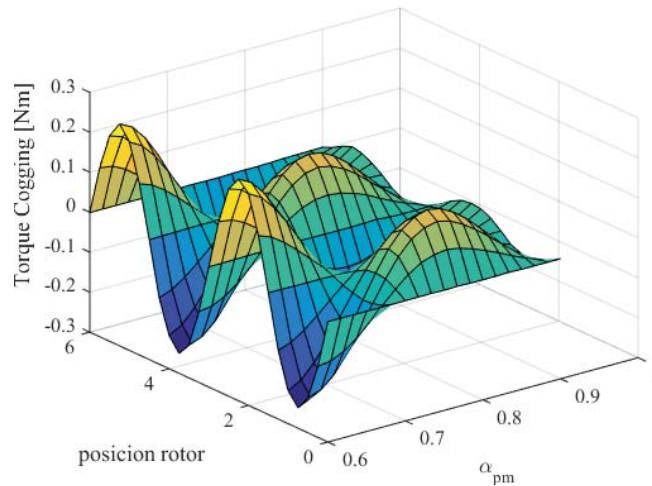


Figura 9-13: Valores instantáneos del torque de cogging de esta configuración para distintos valores de α_{pm} y posiciones del rotor para una PMSM convencional con bordes redondeados.

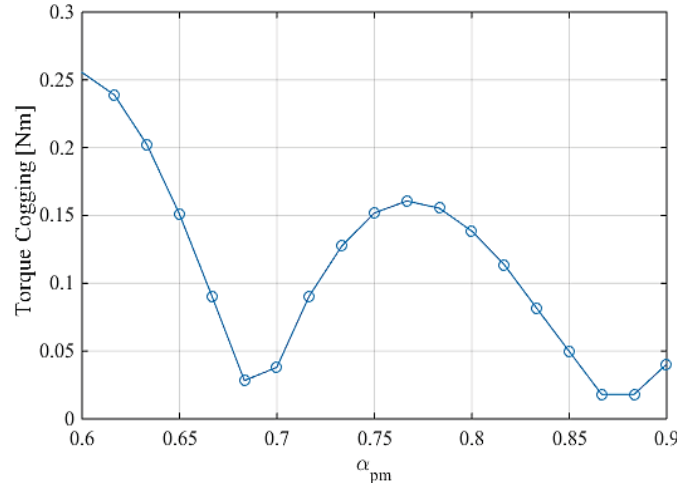


Figura 9-14 a) Valores máximos del torque de cogging para una PMSM convencional bordes redondeados con respecto a α_{pm} .

Luego con los datos obtenidos en el capítulo anterior del torque de cogging máximo de una MPMSM, y los datos del torque de cogging máximo de una PMSM obtenidos del presente capítulo, además de agregar un factor nuevo de k_g para la máquina modular ya que para esta configuración la máquina segmentada tiene la reluctancia lo más similar a una máquina convencional, se obtiene una gráfica que nos permite analizar comparativamente el torque de cogging máximo de ambas configuraciones como se representa en la figura...., las conclusiones sobre el análisis comparativos son idénticas a las obtenidas para el caso de bordes rectos, ya que la relación de los valores en la gráfica tanto para una PMSM convencional y la MPMSM son casi idénticas tanto para el caso de bordes redondeados y bordes rectos.

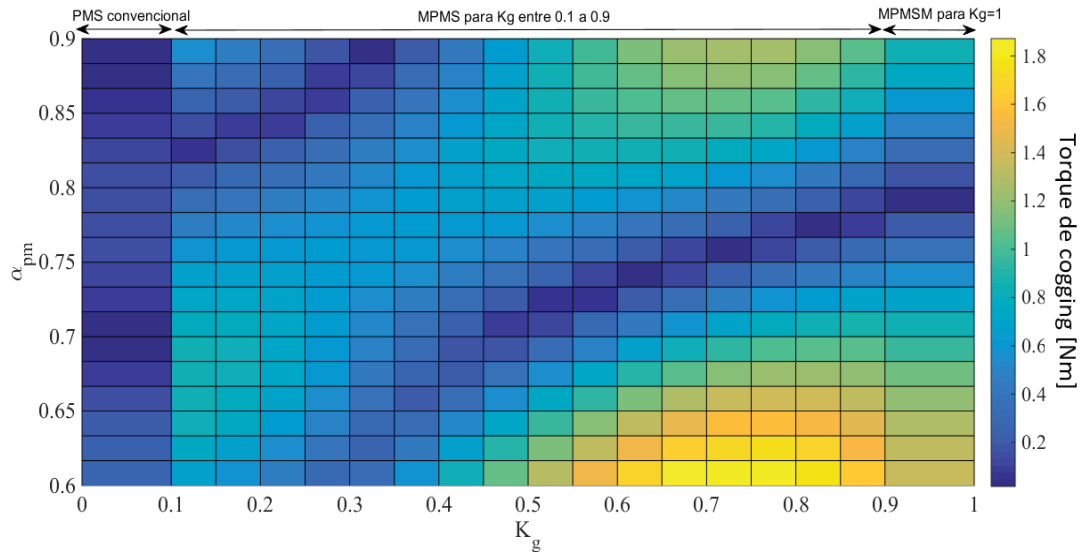


Figura 9-15: Gráfica comparativa del torque de cogging de bordes redondeados entre una MPMSM y PMSM convencional.

9.6 Conclusión del capítulo

Se decidió realizar el estudio del torque de cogging para los casos de los bordes rectos y redondeados, para analizar si este factor de geometría afectaría en el comportamiento y los valores máximos de este torque en la máquina sincrónica de imanes permanentes modular. El caso es que luego de obtener las simulaciones y el análisis gráfico de ambos casos, se aprecia que la relación entre los parámetros k_g , α_{pm} y del torque máximo siguen un patrón muy similar tanto en su forma de onda como en el rango de valores del torque máximo, como es apreciado al comparar la figura 9-4 y 9-8. Por lo que se concluye que no es determinante si la forma de los bordes tanto de los módulos del estator y como del imán, son rectos o redondeados, al momento de querer disminuir el torque de cogging de la máquina. Por lo cual la elección de la forma de los bordes de la geometría de la máquina, depende de cuál de las dos es más rentable o más rápida al momento de realizar su manufactura o mejorar otro de los fenómenos electromagnéticos.

El torque de cogging de una PMSM siempre es menor a los obtenidos en una MPMSM, independientemente del tipo de geometría de los bordes de la máquina, es más, el comportamiento del torque de cogging de una PMSM convencional, con respecto a la geometría de los bordes del rotor y estator es muy similar, por lo cual, al igual que para el caso de las MPMSM, la geometría de los bordes no es un factor de real importancia al momento de hablar de torque de cogging. Por último, es bueno destacar que independiente de la gran diferencia entre los valores del torque de cogging de una máquina convencional y modular, esta última, puede obtener valores de torque de cogging cercanos a los de un monolítico, a través de una adecuada configuración de parámetros, los que nos permite menguar en gran manera el desperfecto propio de un estator modular y aprovechar los beneficios que nos ofrece, como es el caso de la reducción del costo de manufactura.

10 Análisis de las pérdidas en PM de una MPMSM sin carga

En el presente capítulo se presentará un análisis de las pérdidas en PM, pero enfocados en una MPMSM, para un estado sin carga. Donde se pretende encontrar la relación existente entre las pérdidas de los PM y ciertos parámetros geométricos de la máquina, los cuales son k_g (separación de los módulos) y α_{pm} (ancho del imán permanente), para distintos diseños geométricos de los bordes de los dientes del estator y los PM del rotor, con la intención de encontrar un adecuado compromiso entre estas pérdidas en los PM, el torque de cogging y el torque propio de la máquina.

Antes de análisis de las pérdidas de PM de la máquina a estudiar, se hace necesario entender el fenómeno en sí, por lo que se presente una definición de las pérdidas en PM, como una introducción a este análisis, los que nos permite comprender las causas de estas pérdidas en las máquinas rotativas.

10.1 Definición de pérdidas en PM

Este tipo de pérdidas, se produce por la variación de la densidad de flujo en el volumen del imán. En las máquinas rotativas la variación de la densidad de flujo es producida por tres fuentes principales: los armónicos de permeancia producidos por la superficie irregular del estator debido a la apertura de la ranura, los armónicos de la conexión producidos por la distribución discreta de la corriente en el estator, y los armónicos relacionados con el inversor utilizados para suministrar a la máquina [1]. Debido a la alta conductividad de los materiales de imanes permanentes de tierras raras, la causa principal de producción de pérdidas es el efecto de las corrientes de Foucault. Las pérdidas de histéresis también son producidas en los imanes permanentes, pero con un adecuado diseño de la máquina estas pérdidas pueden ser insignificantes.

Para nuestra máquina a estudiar (MPMSM), las pérdidas en los PM cambia según la variación de los factores geométricos, debido a la variación de la densidad de flujo magnético que se producen, como se puede apreciar en la figura 10-1 y 10-2, donde se varia el parámetro de las separación de los módulos de la máquina, manteniendo el ancho del imán, lo que nos permite ver la diferencia

de la variación de la densidad de flujo, y como aumenta esta variación, con respecto al aumento del valor de esta separación de los módulos de $k_g = 0.5$ a $k_g = 1$. Caso similar ocurriría si aumentamos el ancho del imán permanente de la máquina, punto que veremos con mayor detalle en la siguiente sección.

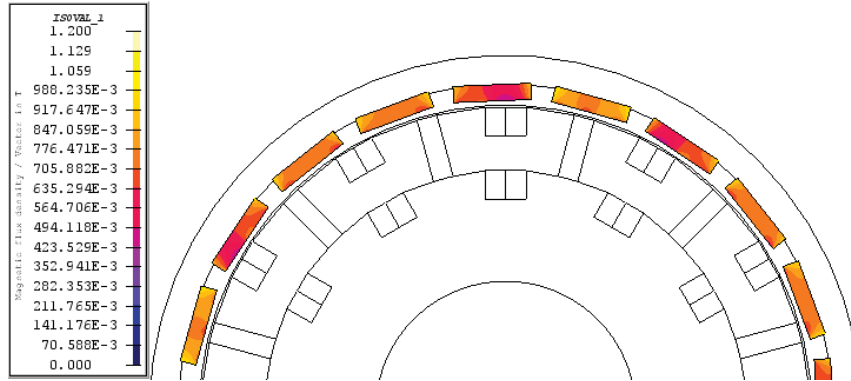


Figura 10-1: Variación de densidad de flujo sin carga en los imanes permanentes para diferentes posiciones del rotor para una MPMSM con $k_g=0.5$.

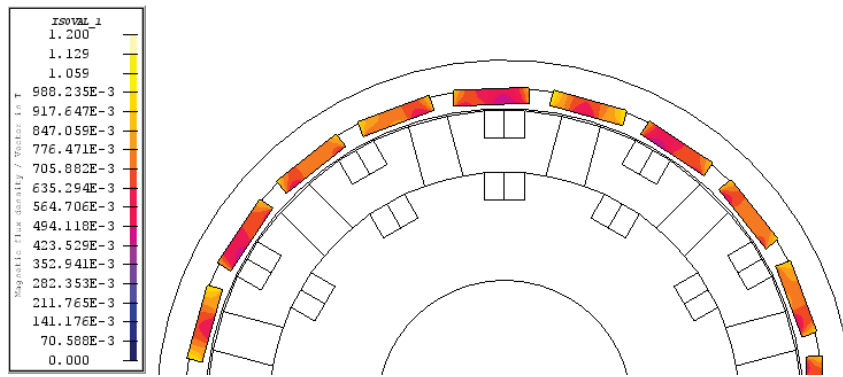


Figura 10-2: Variación de densidad de flujo sin carga en los imanes permanentes para diferentes posiciones del rotor para una MPMSM con $k_g=1$.

10.2 Pérdidas en PM para MPMSM con diseño de geometría de bordes rectos

En la siguiente sección se presenta el análisis del comportamiento de las pérdidas en los PM en función de la variación de los factores geométricos k_g y α_{pm} de la MPMSM, para una geometría de bordes rectos (dientes del estator y PM). Como primer paso para la obtención de los valores de las pérdidas en los PM, fue necesario diseñar nuestra máquina a través de elementos finitos (FLUX), el cual nos permite obtener el comportamiento instantáneo de las pérdidas en cierto intervalo de tiempo, para distintos valores k_g y α_{pm} , y además de encontrar los valores medios de estas pérdidas, que son los valores de real interés en nuestro análisis. Finalmente a través de Matlab, se obtiene la representación gráfica del comportamiento de las pérdidas medias en los PM en función de la variación de los factores geométricos k_g y α_{pm} como se presenta en la figura 10-3.

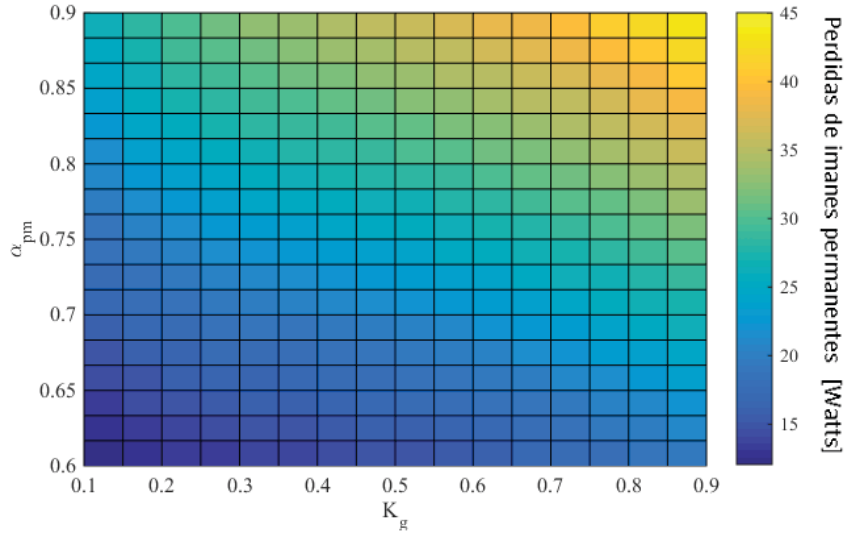


Figura 10-3: Pérdidas medias en imanes permanentes de una MPMSM con respecto a factores k_g y α_{pm} , para una geometría con bordes rectos.

De la figura se puede apreciar que los valores de las pérdidas en los PM aumentan de forma directamente proporcional con respecto a los valores de los factores k_g y α_{pm} , lo que es lógico ya que si aumentamos el volumen del imán, mayor será las pérdidas en el mismo y de igual manera si se aumenta la separación de los módulos del estator, mayor es la variación de la densidad de flujo magnético en el volumen completo del PM, lo aumentan las pérdidas. Por lo cual si se desea tener la menor pérdida de PM posible, claramente se debe optar por elegir los menores valores de k_g y α_{pm} .

10.3 Análisis de las pérdidas de PM sin carga entre una MPMSM y PMSM con bordes rectos

Como para el caso del torque de cogging de la MPMSM, es necesario realizar un estudio comparativo del fenómeno analizado con respecto a una PMSM convencional, ya que esto nos permite comprender de mejor manera el fenómeno en sí, ya que en general se está más familiarizado con esta última máquina. Por lo cual a través de una sola grafica adjuntamos tanto los valores de las pérdidas de PM de una máquina convencional y los valores obtenidos de las pérdidas en una MPMSM incluyendo un nuevo $k_g=1$, ya que para este k_g la configuración de la máquina modular tiene la reluctancia más parecida a la máquina monolítica, con lo que finalmente obtenemos la gráfica comparativa representada en la figura 10-4

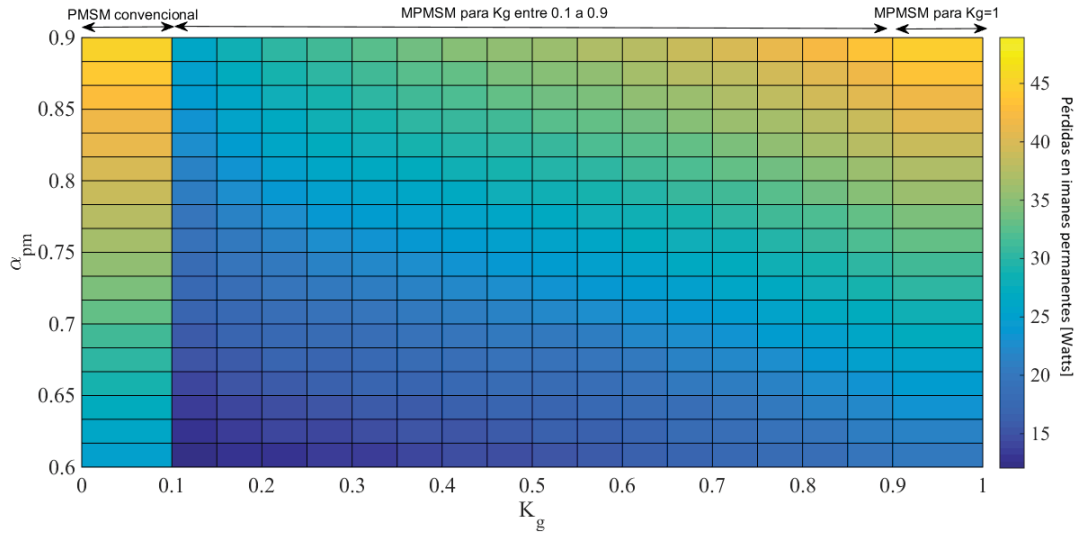


Figura 10-4: Grafica comparativa de pérdidas en PM de bordes rectos entre una MPMSM y PMSM convencional

Con respecto a la figura anterior, se puede apreciar que las pérdidas en los imanes permanentes en la máquina convencional, mantienen un valor alto de estas pérdidas para los distintos valores del ancho del imán, en cambio para la máquina modular, para ciertos valores de los factores k_g y α_{pm} (valores bajos de estos factores) se puede obtener pérdidas menores a los 30[Watts], es decir que a diferencia a lo que ocurría con el torque de cogging, la modulación del estator no es un factor negativo con respecto a las pérdidas en los imanes permanentes, sino todo lo contrario, por lo cual nos demuestra uno de los beneficios electromagnéticos que se obtiene al utilizar estatores segmentados.

10.4 Pérdidas en PM para MPMSM con diseño de geometría de bordes redondos

Del mismo modo de cómo se abordó el caso anterior, se diseña la MPMSM a través de elementos finitos con la diferencia que la geometría de los bordes en los dientes del estator y los PM del estator son redondeados, el cual nos permite obtener el comportamiento instantáneo de las pérdidas en cierto intervalo de tiempo, para distintos valores k_g y α_{pm} , y además de encontrar los valores medios de estas pérdidas. Luego a través de Matlab, se obtiene la representación gráfica del comportamiento de las pérdidas medias en los PM en función de la variación de los factores geométricos k_g y α_{pm} como se presenta en la figura 10-5.

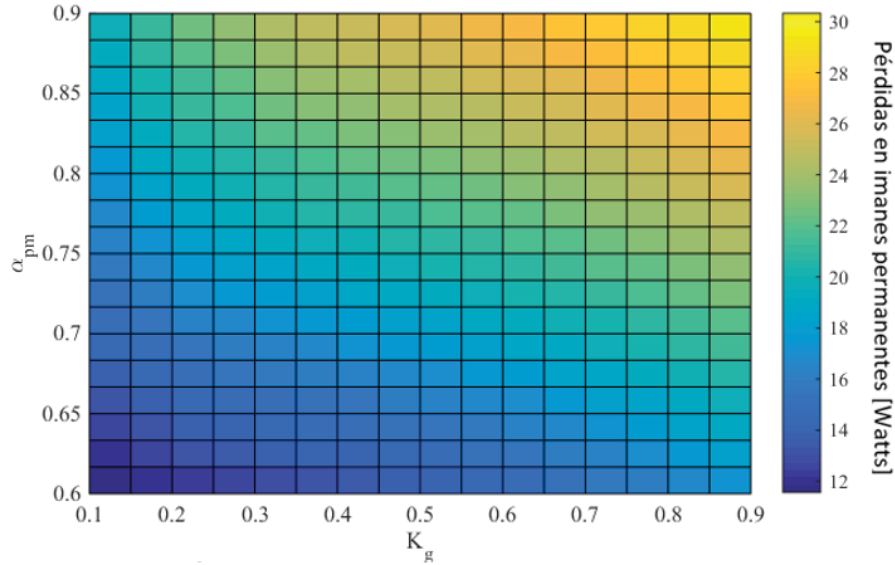


Figura 10-5: Pérdidas medias en imanes permanentes de una MPMSM con respecto a factores k_g y α_{pm} , para una geometría con bordes redondeados.

De la figura anterior se puede apreciar que los valores de las pérdidas en los PM aumentan de forma directamente proporcional con respecto a los valores de los factores k_g y α_{pm} , siguiendo la misma dinámica del caso anterior, pero con valores de pérdidas menores. La relación directamente proporcional de los factores k_g y α_{pm} con respecto a las pérdidas en los PM, es lógico, debido a que si el volumen del imán aumenta mayor será las pérdidas en el mismo y de igual manera si se aumenta la separación de los módulos del estator, mayor es la variación de la densidad de flujo magnético en el volumen completo del PM, lo aumentan las pérdidas. Por lo cual si se desea tener la menor pérdida de PM posible, claramente se debe optar por elegir los menores valores de k_g y α_{pm} , como se mencionó con anterioridad para la configuración de bordes rectos.

10.5 Análisis de pérdidas de PM sin carga entre una MPMSM y PMSM con bordes redondos

Se realiza un estudio comparativo del fenómeno analizado con respecto a una PMSM convencional, ya que esto nos permite comprender de mejor manera el fenómeno en sí, ya que en general se está más familiarizado con esta última máquina. Al momento de comparar las diferencias de las pérdidas medias entre la MPMSM y PMSM convencional, se puede apreciar de mejor manera este análisis, cuando se adjunta además de los valores de la MPMSM entre 0.1 a 0.9 k_g los valores de la MPMSM cuando $k_g = 1$ debido a que para esta configuración la MPMSM tiene la reluctancia más similar a una máquina monolítica. Este análisis es representado en la figura 10-6 a través de Matlab como se muestra a continuación.

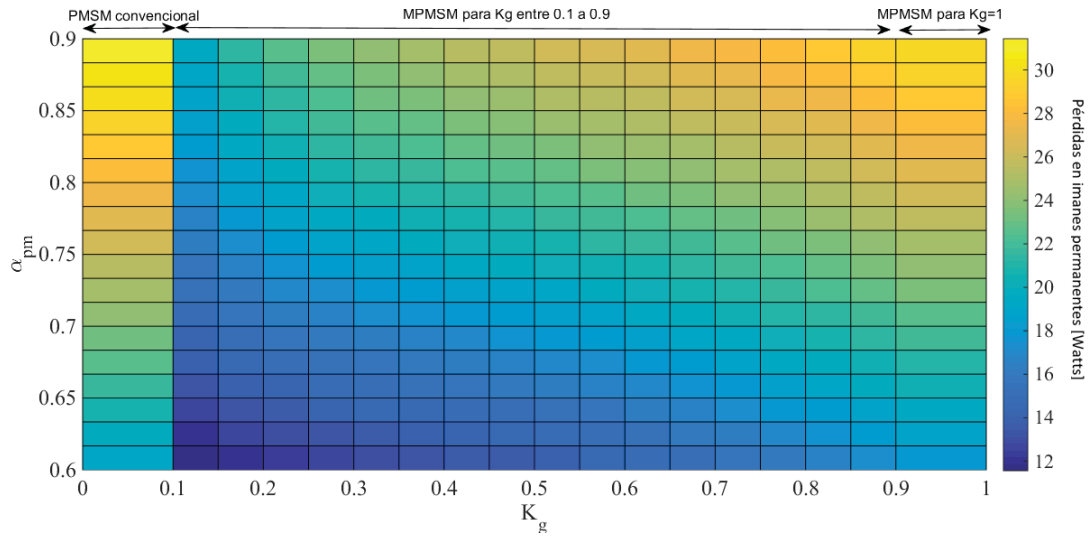


Figura 10-6: Grafica comparativa de las pérdidas de PM de bordes redondeados entre una MPMSM y PMSM convencional.

10.6 Conclusión del capítulo

La importancia del estudio de las pérdidas en los PM en las MPMSM, es encontrar la mayor optimización posible que nos permite su adaptable configuración, a través los factores k_g y α_{pm} . Se puede concluir, que esta optimización ocurre cuando los valores tanto de k_g y α_{pm} , son bajos, ya que como se explicó anteriormente, estos factores influyen directamente con la densidad de flujo alrededor del volumen del PM. Además se aprecia que los valores de las pérdidas en los PM varían en su valor notablemente dependiendo de la geometría de los bordes de los dientes del estator y del PM, ya que entre la geometría de los bordes rectos y redondeados, en este último se obtienen valores menores de pérdidas en los PM, para mayores valores de k_g y α_{pm} . Esto debido a que existen menores variaciones de la densidad de flujo magnético en los momentos en que el PM pasa del diente a la ranura debido a su geometría más constante en el entrehierro.

11 Análisis de las pérdidas en PM de una MPMSM con carga

En el presente capítulo se presentará un análisis de las pérdidas en PM, pero enfocados en una MPMSM, para un estado con carga. Donde se pretende encontrar la relación existente entre las pérdidas de los PM y ciertos parámetros geométricos de la máquina (k_g y α_{pm}), para distintos diseños geométricos de los bordes de los dientes del estator y los PM del rotor, con la intención de encontrar un adecuado compromiso entre estas pérdidas en los PM tanto en vacío como con carga, el torque de cogging y el torque propio de la máquina.

Debido a que solo es necesario incluir las corrientes en los bobinados en la simulación, el procedimiento de la obtención de las pérdidas de PM con carga, es idéntico a las pérdidas en vacío, tanto para la configuración geométrica de bordes rectos y redondeados, es por eso que a modo de simplificación no se explicara los procedimientos intermedios y solo se entregara los datos en concreto obtenidos.

11.1 Pérdidas en PM con carga para MPMSM con diseño de geometría de bordes rectos

A modo de simplificación al momento de presentar las pérdidas de PM con carga para una geometría de bordes rectos, se presentara el análisis completo obtenido de las pérdidas en las MPMSM, la que incluye tanto las pérdidas para el caso de la máquina modular y las de la máquina monolítica, por lo cual es posible comprender el comportamiento tanto de las pérdidas de PM en la MPMSM, como también realizar la comparación de estas pérdidas de PM y las producidas por la PMSM convencional, y realizar su respectivo análisis. Todo lo anteriormente descrito es representado en la figura... que se muestra a continuación.

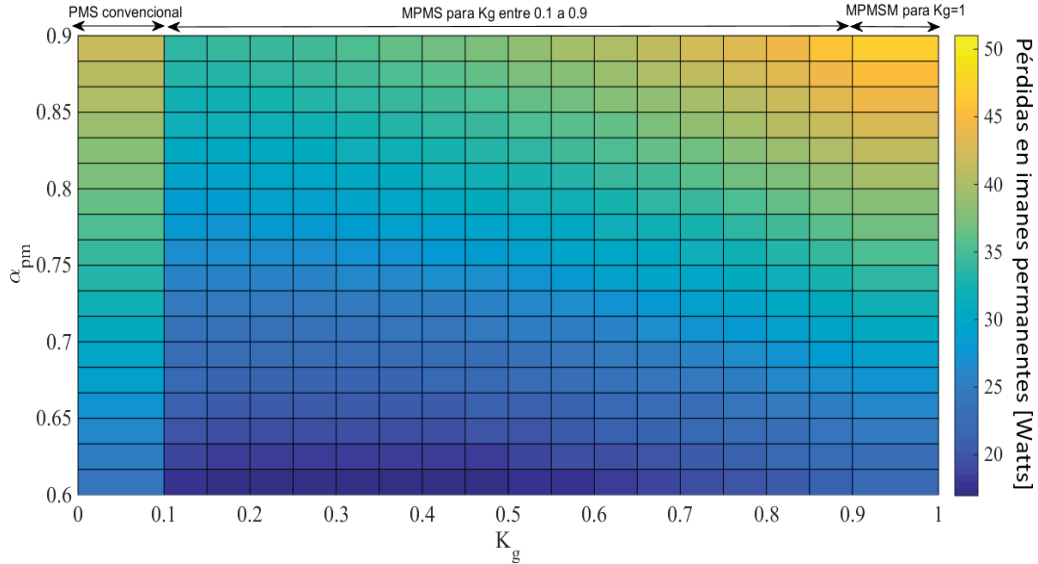


Figura 11-1: Grafica comparativa de las pérdidas de PM con carga de bordes rectos entre una MPMSM y PMSM convencional.

Se puede analizar de la figura anterior, que al igual que las pérdidas de PM en vacío, los valores de las pérdidas en los PM de la MPMSM aumentan de forma directamente proporcional con respecto a los valores de los factores k_g y α_{pm} , lo que es lógico ya que si aumentamos el volumen del imán, mayor será las pérdidas en el mismo y de igual manera si se aumenta la separación de los módulos del estator, mayor es la variación de la densidad de flujo magnético en el volumen completo del PM, lo aumentan las pérdidas. Por lo cual si se desea tener la menor pérdida de PM posible, claramente se debe optar por elegir los menores valores de k_g y α_{pm} .

Con respecto a la comparación de los valores de las pérdidas de PM de la MPMSM y la PMSM convencional, se puede inferir que para ciertas configuraciones de la MPMSM, es decir para ciertos valores de los factores k_g y α_{pm} , es posible obtener pérdidas menores a la que se obtienen en una máquina modular, lo que nos proporciona un antecedente positivo con respecto a la modulación del estator con respecto a las pérdidas de PM tanto en vacío como con carga.

11.2 Pérdidas en PM con carga para MPMSM con diseño de geometría de bordes redondos

De la misma manera de cómo se presentó las pérdidas de PM con carga con bordes rectos, se presentara el análisis completo obtenido de las pérdidas en las MPMSM, la que incluye tanto las pérdidas para el caso de la máquina modular y las de la máquina monolítica, por lo cual es posible comprender el comportamiento tanto de las pérdidas de PM en la MPMSM, como también realizar la comparación de estas pérdidas de PM y las producidas por la PMSM convencional, la cual es presentada en la siguiente figura 13-2.

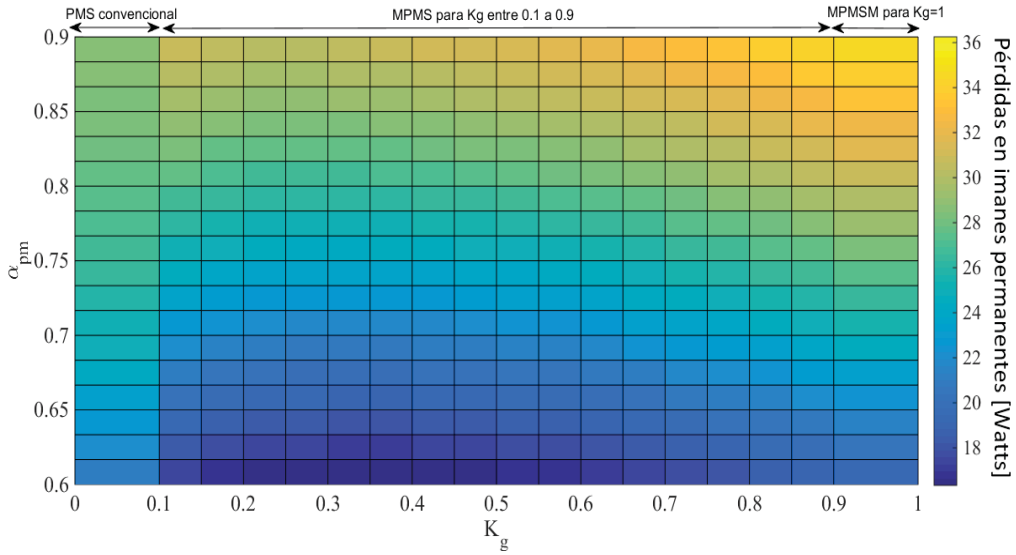


Figura 11-2: Grafica comparativa de las pérdidas de PM con carga de bordes redondeados entre una MPMSM y PMSM convencional

Se puede analizar de la figura anterior, que los valores de las pérdidas en los PM de la MPMSM aumentan de una forma no tan directamente proporcional con respecto a los factores k_g y α_{pm} , como se vio en el caso anterior de borde rectos, pero aun así los valores máximos y mínimos tienden a encontrarse para los valores altos y bajos respectivamente de los factores geométricos k_g y α_{pm} .

Con respecto a la comparación de los valores de las pérdidas de PM de la MPMSM y la PMSM convencional, se puede inferir que para ciertas configuraciones de la MPMSM, es decir para ciertos valores de los factores k_g y α_{pm} , es posible obtener pérdidas menores a la que se obtienen en una máquina modular, lo que nos proporciona un antecedente positivo con respecto a la modulación del estator con respecto a las pérdidas de PM tanto en vacío como con carga, y para las distintas configuraciones geométricas de la máquina.

11.3 Conclusión del capítulo

La importancia del estudio de las pérdidas en los PM en las MPMSM con carga, es encontrar la mayor optimización posible que nos permite su adaptable configuración, a través los factores k_g y α_{pm} . Se puede concluir, que esta optimización ocurre cuando los valores tanto de k_g y α_{pm} , son bajos, ya que como se explicó anteriormente, estos factores influyen directamente con la densidad de flujo alrededor del volumen del PM. Además se aprecia que los valores de las pérdidas en los PM varían en su valor notablemente dependiendo de la geometría de los bordes de los dientes del estator y del PM, ya que entre la geometría de los bordes rectos y redondeados, en este último se obtienen valores menores de pérdidas en los PM, para mayores valores de k_g y α_{pm} . Esto debido a que existen menores variaciones de la densidad de flujo magnético en los momentos en que el PM pasa del diente a la ranura debido a su geometría más constante en el entrehierro, al igual que para el caso en que la máquina se encuentra en vacío.

12 Torque medio de la MPMSM

En este capítulo se comienza con explicar la importancia de encontrar nuestro valor de torque medio de la máquina a estudiar, este torque se obtiene a través de elementos finitos (Flux), simulando la MPMSM en un estado estático magnético, pero considerando una corriente alterna en sus devanados, es decir es encontrar el torque para cuando las corrientes se encuentran en un tiempo igual a cero, para así lograr obtener la posición del rotor para cual el torque es máximo. Este torque máximo, en resumidas cuentas, representa el torque medio de la máquina, el cual nos permitirá obtener tanto la potencia de la máquina, como la posición de torque máximo que nos servirá para ajustar las corrientes de los devanados, para el estudio electromagnético para condición de carga. A continuación, a través de la figura 11-1 se muestra la gráfica del torque con respecto a la posición del roto, obtenido a través de la simulación en elementos finitos,

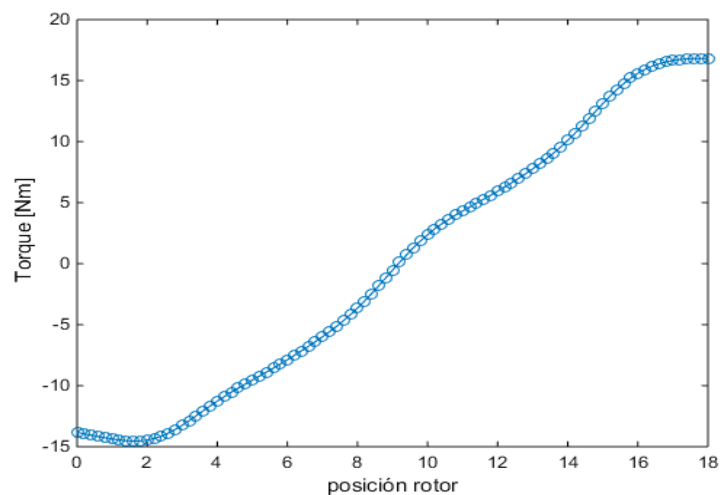


Figura 12-1: Torque medio de la máquina a estudiar.

Se puede apreciar que el torque obtenido es simétrico con respecto a cero, por lo cual está claro que el valor máximo del torque se encuentra sobre el eje cero, es por ello que los datos que se representara en la tabla II. solo serán los valores positivos de la gráfica anterior, esta tabla nos permitirá identificar el valor máximo del torque y su respectiva posición del rotor en ángulos mecánicos.

Tabla 12-1: Torque medio de la máquina a estudiar

posición del rotor	torque [Nm]
9.2000000E+00	1.12568541E-01
9.4000000E+00	7.19578938E-01
9.6000000E+00	1.32643309E+00
9.8000000E+00	1.87675465E+00
1.0000000E+01	2.35892472E+00
1.0200000E+01	2.84153269E+00
1.0400000E+01	3.25810929E+00
1.0600000E+01	3.61971525E+00
1.0800000E+01	3.98844770E+00
1.1000000E+01	4.32178310E+00
1.1200000E+01	4.63332403E+00
1.1400000E+01	4.96030324E+00
1.1600000E+01	5.28052047E+00
1.1800000E+01	5.60117188E+00
1.2000000E+01	5.93673216E+00
1.2200000E+01	6.27911680E+00
1.2400000E+01	6.63102032E+00
1.2600000E+01	6.99419006E+00
1.2800000E+01	7.37153485E+00
1.3000000E+01	7.76630553E+00
1.3200000E+01	8.17469393E+00
1.3400000E+01	8.61047566E+00
1.3600000E+01	9.07792137E+00
1.3800000E+01	9.57201541E+00
1.4000000E+01	1.01040927E+01
1.4200000E+01	1.06725006E+01
1.4400000E+01	1.12666749E+01
1.4600000E+01	1.18800325E+01
1.4800000E+01	1.24996048E+01
1.5000000E+01	1.31138025E+01
1.5200000E+01	1.37034668E+01
1.5400000E+01	1.42545696E+01
1.5600000E+01	1.47628390E+01
1.5800000E+01	1.52110215E+01
1.6000000E+01	1.55926671E+01
1.6200000E+01	1.59144923E+01
1.6400000E+01	1.61743239E+01
1.6600000E+01	1.63755232E+01
1.6800000E+01	1.65308464E+01
1.7000000E+01	1.66475228E+01
1.7200000E+01	1.67289190E+01
1.7400000E+01	1.67826908E+01
1.7600000E+01	1.68123942E+01
1.7800000E+01	1.68161367E+01
1.8000000E+01	1.67950350E+01

De la anterior tabla se subrayó de color rojo el valor del torque máximo con su respectiva posición del rotor, donde esta posición corresponde a la configuración para cual la máquina trabaja a su mayor torque, debido que esta posición está en grados mecánicos, al momento de configurar las corrientes es necesario pasarlo a grados eléctricos, con la siguiente ecuación.

$$\delta_e = p * \delta_m \quad (12-1)$$

$$p = \text{par de polos}$$

$$\delta_e = 10 * 17.8 = 178^\circ \approx 180^\circ \text{ eléctricos}$$

Ya con este valor de la posición en grados eléctricos es posible configurar nuestras corrientes en el bobinado de la siguiente manera, la será representada solo para la corriente de una fase a modo de ejemplo.

$$I_a = |I| * \cos(2 * \pi * f * t - \pi) \quad (12-2)$$

Donde el π de color rojo, representa el ángulo eléctrico anteriormente obtenido pero en radianes, las demás corrientes de fase del bobinado se configuran de la misma manera, es decir, a todas se le resta este ángulo en radianes.

Además de la configuración de las corrientes para el estado transitorio de la máquina, el torque medio obtenido nos permite calcular la potencia mecánica de la máquina, la cual se obtiene de las siguientes ecuaciones.

$$P_{mec} = T_m * \omega = T_m * 2 * \pi * \frac{n}{60} \quad (12-3)$$

$$n = \text{revoluciones por minuto} = 1000 \left[\frac{rev}{min} \right]$$

$$T_m = \text{torque medio}$$

$$P_{mec} = 16.8 * 2 * \pi * \frac{1000}{60} = 1.759 [KW]$$

13 Torque neto de una MPMSM

El siguiente estudio busca encontrar el comportamiento del torque neto de la máquina para una condición de carga, es decir que a diferencia del torque de cogging que se trabajó en régimen estático magnético, se trabaja en régimen transitorio. Para el estudio nuevamente es necesario utilizar elementos finitos para obtener las simulaciones del caso respectivo, para esta condición de carga, fue necesario trabajar con corrientes alternas de la forma de la ecuación 12-2, las cuales se implementan en el circuito del software Flux como se muestra en la figura 13-1, donde podemos encontrar también inductancias, bobinados y resistencias, además de las respectivas tierras del circuito.

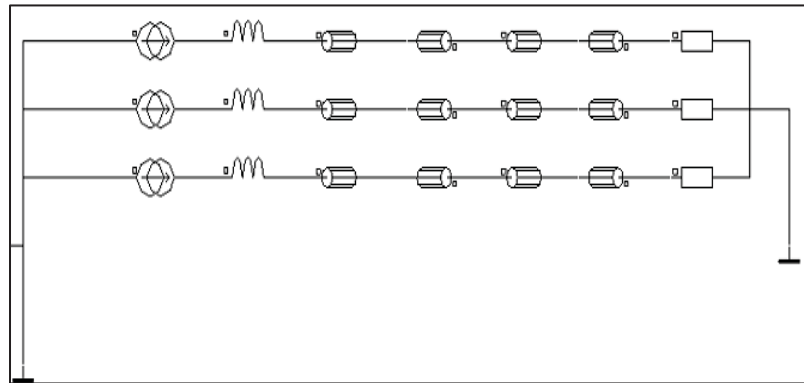


Figura 13-1: Circuito para la simulación en estado transitorio, en software flux.

Ya con estas configuraciones realizadas el sistema se encuentra trabajando con carga, por lo cual los siguientes pasos para obtener el torque neto, son a través de los mismo procedimientos y parámetros realizados para el torque de cogging, pero a diferencia de este, solo se presentará para la condición de bordes rectos de los dientes del estator y el PM, debido a la gran similitud de los resultados obtenidos, por lo que no se es necesario abordar los dos casos. A modo de simplificación no se explicará los procedimientos intermedios y solo se entregará los datos en concreto obtenidos.

13.1 Torque neto de una MPMSM con geometría de bordes rectos

Este análisis del torque neto se realiza con respecto a una MPMSM con bordes rectos, los parámetros de diseño o geométricos que servirán para el análisis del torque, son los mismos ocupados para el torque de cogging y en general para todos los fenómenos electromagnéticos estudiados, que son k_g y α_{pm} . A continuación se muestra figura 12-2 los torques netos máximos de la máquina con carga, para distintos valores de α_{pm} , y k_g .

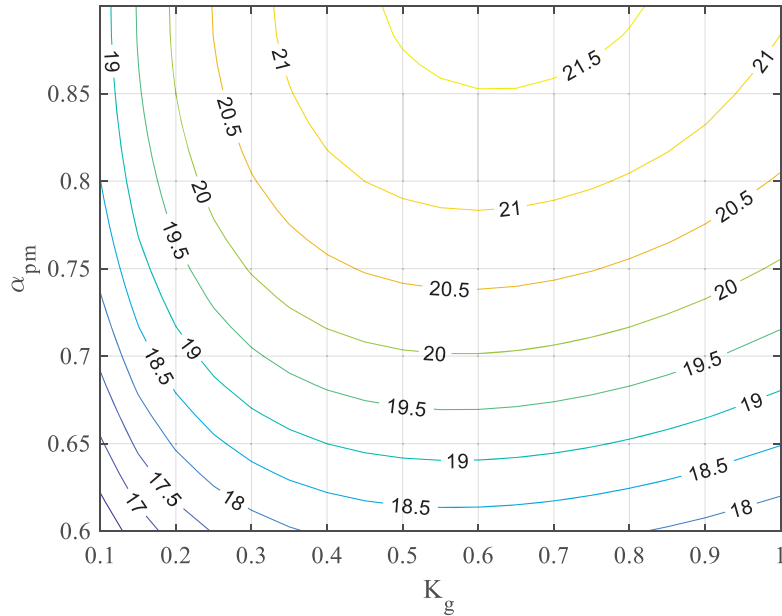


Figura 13-2: Torques netos de la máquina con carga de bordes rectos, para distintos valores de α_{pm} , y k_g .

Analizando la figura anterior, se aprecia que los valores de estos torques netos aumentan según crece α_{pm} , y k_g , llegando a valores máximos de alrededor de 21,5[Nm], es decir que la zona en donde el torque neto de la MPMSM con bordes rectos es mayor o máxima, se encuentra para k_g , entre 0.49 a 0.82 y para α_{pm} , mayores de 0.86 aproximadamente.

13.2 Análisis del torque neto de bordes rectos entre una MPMSM y una PMSM

Al igual que para el estudio del torque de cogging con bordes rectos, se es necesario realizar un estudio comparativo del torque neto tanto de una MPMSM y una PMSM convencional, para analizar los cambios que produce la modulación del estator con respecto a este torque, en contra posición a una PMSM convencional, lo cual se representa a través de la siguiente figura, donde además se adjunta los valores de una MPMSM con $k_g = 1$, debido a que para esta configuración la MPMSM se obtiene una reluctancia más similar a la máquina monolítica, lo que nos ayuda a mejorar la comparación entre estas dos configuraciones de la máquina, el gráfico que nos permite el análisis comparativo es representado en la siguiente figura.

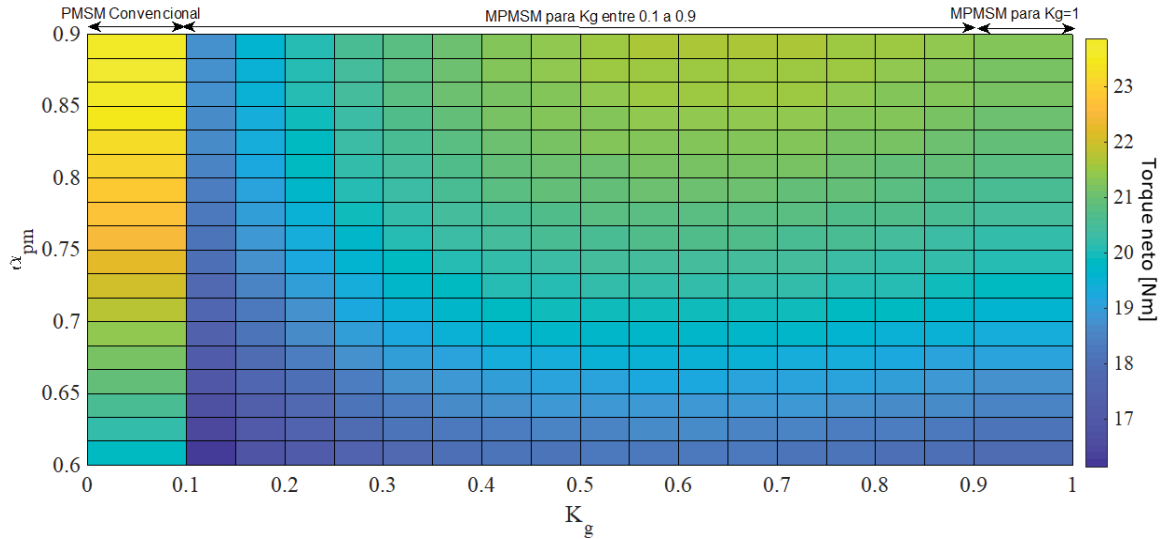


Figura 13-3: Grafica comparativa del torque neto de bordes rectos entre una MPMSM y PMSM convencional.

De la figura anterior se puede apreciar que para ciertas configuraciones α_{pm} , y k_g , la MPMSM, se puede obtener torques netos cercanos a valores obtenidos en la máquina PMSM convencional, con valores máximos de entre 21 [Nm] de los 23 [Nm] máximos obtenidos en la máquina monolítica, los que nos indica, que a pesar de que nuestra máquina modular se obtienen valores menores de torque en comparación a una máquina monolítica, pero para ciertos valores de los parámetros α_{pm} , y k_g es posible obtener valores cercanos a los obtenidos de forma monolítica. Que nos permite así, aprovechar los beneficios de la modulación de nuestra máquina, con un torque neto dentro de los parámetros aceptables.

13.3 Conclusión del capítulo

Se puede observar claramente del estudio presentado en los párrafos anteriores, que en una máquina monolítica, los valores del torque neto son mayores, debido a que existe una reluctancia más uniforme en comparación a una máquina modular, pero gracias a que la variación de los parámetros α_{pm} , y k_g , los cuales fueron estudiados en este informe, nos permite encontrar una solución a la caída de este torque tan fundamental, ya que para ciertos valores de estos parámetros el torque neto obtiene valores cercanos a los de la maquina monolítica, lo que nos entrega una máquina con características del torque, dentro de los valores esperados para nuestra aplicación.

14 Modelos geométricos propuestos de una MPMSM según su optimización

En la siguiente sección, se realiza una proposición de distintos modelos geométricos de la máquina estudiada, los cuales dependen del requerimiento de optimización que se necesite, es decir, si se requiere una máquina con pérdidas de PM mínima, una máquina la cual permita un torque cogging mínimo, una máquina con un torque neto máximo o una máquina relativamente equilibrada, todos estos modelos respaldados de los análisis previos realizados.

Como se explicó en los capítulos anteriores, la variación realizada en la geometría de la máquina para el análisis electromagnético, depende de los factores α_{pm} , y k_g , que son los que nos permiten variar el ancho del PM y la separación de los módulos respectivamente. Además, se cuenta con una segunda variable que son los bordes geométricos de los PM y los dientes del estator. Debido a lo anteriormente mencionado, los parámetros que rigen a los siguientes modelos geométricos de la máquina, son tanto α_{pm} , k_g y si la máquina presenta bordes redondeados o rectos, parámetros que fueron utilizado a lo largo del todo el análisis electromagnético de los fenómenos físicos de la MPMSM. Estos modelos geométricos anteriormente mencionados son expresados en la siguiente tabla, que entrega los valores de los parámetros geométricos de los modelos de las máquinas propuestos, según el requerimiento que se desea.

Tabla 14-1: Modelos geométricos propuestos de una MPMSM según su optimización

Geometría de máquinas propuestas			
Tipo de optimización	Factores geométricos		Tipo de bordes geométricos
	α_{pm}	k_g	
Perdidas de PM mínima (con carga)	0.6 a 0.63	0.15 a 0.5	Bordes redondeados
Torque de cogging mínimo	0.71 a 0.73	0.5 a 0.55	Cualquiera de los dos tipos
Torque neto máximo	0.86 a 0.9	0.49 a 0.82	Cualquiera de los dos tipos
Equilibrada	0.75 a 0.8	0.35 a 0.45	Bordes rectos

Los valores que se escogieron para el caso de una optimización de la disminución de las pérdidas de PM con carga, fueron obtenidos de la figura 11-2, que representa las pérdidas de PM de bordes redondeados (el caso de bordes redondeados da perdidas menores en comparación a los bordes rectos), donde se aprecia claramente que los valores propuestos en la tabla, se obtienen valores mínimos de estas pérdidas.

Para el caso de una optimización focalizada en el torque de cogging, la obtención de los valores fue gracias a la figura 9-15, que representa la gráfica del torque de cogging para el caso de bordes redondeados, como se explicó en capítulos anteriores el torque de cogging no varía según el tipo de bordes geométricos, por lo cual puede elegirse cualquiera de los dos casos. Si puede apreciar que en la gráfica 9-15, los valores mínimos (óptimos) del torque de cogging se obtienen en varias regiones de la gráfica, por lo cual, el criterio que se utilizó para la elección de los valores en la tabla III, fue según los valores mínimos de torque de cogging donde se obtiene un valor menor de α_{pm} , ya que entre menor sea la longitud del imán permanente menor es el costo del mismo.

Con respecto a la optimización del torque neto de la máquina, los valores propuestos en la tabla III, se obtuvieron analizando la figura 13-3, que representan los torques netos para una geometría de bordes rectos (se elige esta geometría debido a que no hay una mayor diferencia entre las dos condiciones de bordes), donde se aprecia fácilmente los valores máximos. El criterio de la obtención de esos valores de parámetros, para la propuesta de la geometría de la máquina, sigue el mismo patrón que se mencionó para el caso de la optimización del torque de cogging.

Por ultimo para el caso de una optimización equilibrada, se tomaron valores tales que permitieran un buen compromiso entre los tres fenómenos electromagnéticos, es decir que permitieran una máxima disminución del torque de cogging y las pérdidas de imanes permanentes, sin permitir disminuir tanto el torque neto de la máquina.

Cabe destacar que debido a la variedad de puntos óptimos que se encuentran en cada uno de los fenómenos estudiados, es posible obtener una gran variedad de geometrías óptimas para nuestra máquina (según la optimización que se desee), es por ello que los valores de los parámetros geométricos representados en la tabla anterior son propuestos y no absolutos.

Discusión y conclusiones

La alternativa de uso de máquinas eléctricas de imanes permanentes modulares (MPMSM) como simplificación del proceso de producción es altamente eficaz al momento de reducir los costos, debido a que permite montajes más eficientes de los bobinados. Pero antes de cualquier análisis de costo, es imprescindible realizar un estudio electromagnético de la misma a modo de respaldo, ya que de nada sirve tener una máquina de bajo costo, si sus condiciones de trabajo no son óptimas, es por eso que el conocer el comportamiento de las MPMSM a nivel electromagnético tiene tal importancia, ya que gracias a esta información será posible optimizar la máquina que se propone lanzar al mercado.

Para realizar el análisis fue necesario identificar los fenómenos electromagnéticos más predominantes o de mayor importancia en las máquinas sincrónicas de imanes permanentes, lo cuales son; las pérdidas de PM, el torque de cogging y el torque neto de la máquina. Estos fenómenos se ven relacionados fuertemente con la disposición geométrica de la máquina, es decir que tienen un patrón de respuesta para diferentes variaciones de la geometría (estator y rotor).

El torque de cogging es un fenómeno intrínseco para las máquinas que utilizan imanes permanentes en el rotor, no es posible eliminarlo en su totalidad, pero si mitigarlo o atenuarlo, para lograr así, que este torque pulsante no afecte al par efectivo de la máquina, Es por eso que los fabricantes buscan soluciones a través de la alteración de la geometría de la máquina, como por ejemplo, la combinación de ranuras y números de polos, la anchura de las aberturas de la ranura del estator, el arco del imán y el ángulo de inclinación, entre otros, con el fin de buscar que la reluctancia que presenta el entrehierro, sea lo más uniforme posible, ya que como se mencionó anteriormente el torque de cogging depende de los cambios de la reluctancia. Para nuestro caso el torque de cogging fue analizado a través de la variación de la separación de los módulos del estator y el ancho del imán permanente, además, se agregó una tercera variable, la cual fue los bordes de los dientes del estator y el imán permanente. Del análisis realizado a través de lo anteriormente mencionado se encontraron las siguientes conclusiones:

- El torque de cogging de una PMSM convencional siempre es menor a los obtenidos en una MPMSM, independientemente del tipo de geometría de los bordes de la máquina, esto se debe principalmente a la menor variación de la reluctancia presente en un estator monolítico. Por último, es bueno destacar que independiente de la gran diferencia entre

los valores del torque de cogging de una máquina convencional y modular, esta última, puede obtener valores de torque de cogging cercanos a los de un monolítico, a través de una adecuada configuración de parámetros, los que nos permite menguar en gran manera el desperfecto propio de un estator modular y aprovechar los beneficios que nos ofrece, como es el caso de la reducción del costo de manufactura

- Cuando se tiene un estator modular, la diferencia de reluctancia en el entrehierro se ve más afectada, pero a la vez más controlable, debido a que ahora tenemos un parámetro al que llamamos k_g (separación entre los módulos), los que nos permite encontrar dimensiones de esta separación, en los cuales este torque sea menor. Si además le agregamos un nuevo parámetro controlable como es el caso estudiado del α_{pm} (ancho del imán permanente), se nos abre una mayor variedad de posibilidades geométricas, que se ajusten a nuestros requerimientos, tanto de aminoración del torque de cogging, como del torque neto de la máquina. Además, es importante destacar que los bordes geométricos tanto del imán como los dientes de los módulos, no afectan en gran medida al patrón del comportamiento del máximo torque de cogging, como fue comprobado en el análisis de este informe, por lo que nos permite ser indiferente a este factor geométrico, en términos de este torque pulsante. Esta versatilidad que nos permite la MPMSM con respecto los parámetros geométricos, no solo nos ayuda con el torque de cogging, sino en general con todos los fenómenos electromagnéticos que se estudiaron, que son las pérdidas de PM y el torque neto.

El otro fenómeno electromagnético mencionado son las pérdidas en los PM sin carga o vacío, propias de las PMSM, las cuales tienen una relación directa con respecto a los factores de configuración de la MPMSM estudiada (k_g y α_{pm}) y la tercera variable anteriormente mencionada (bordes geométricos), del análisis y el estudio realizado con respecto a este fenómeno se presentan las siguientes conclusiones:

- Las pérdidas de imanes permanentes son mayores, cuando k_g y α_{pm} aumentan y disminuyen para el caso contrario. Este comportamiento no varía según la distinta geometría de bordes de los dientes del estator y del PM, pero si sus valores máximos, para los cuales se obtienen menores pérdidas en máquinas con geometría de bordes redondeados, esto debido a que su geometría permite una menor variación de densidad de flujo al momento de pasar el PM, entre el diente y la ranura del estator.
- Para el caso de las pérdidas en los PM con carga, cuando la condición geometría de la máquina es de bordes rectos sigue perfectamente la relación anteriormente descrita, en cambio para bordes redondeados esta relación difiere un poco, pero aun así la relación de los valores máximo y mínimos de las pérdidas sigue el mismo patrón, es decir, para valores bajos de k_g y α_{pm} se encuentran las menores pérdidas, y mayores en el caso contrario.

El torque neto de la máquina es el último fenómeno estudiado, este torque como se mencionó con anterioridad, representa el torque mecánico de la máquina, por lo que resulta de gran importancia. Es por ello que si se desea implementar una nueva configuración geométrica de una máquina, como es el caso de la modulación del estator, es indispensable entender el

comportamiento de este torque, con respecto a esa variación geométrica. Punto que fue abordado en este informe y que obtuvo la siguiente conclusión al tema:

- De los valores obtenidos del torque neto para ambos casos de geometrías de bordes, se concluyó que no existe una gran diferenciación del torque neto entre ambos casos en la MPMSM, lo que difiere con el comportamiento que se obtuvo en las pérdidas de imanes permanentes, donde si ocurre una distinción en los valores tanto para bordes redondeados como rectos.
- En general del análisis obtenido, se puede apreciar que, con respecto a los torques netos de la MPMSM, se obtienen valores un poco menores, a los que se logra obtener en una PMSM convencional, de la misma forma a lo que ocurría para el caso del torque de cogging donde se veía una diferencia a los valores obtenidos para una máquina convencional y una máquina modular.

Con respeto al objetivo general planteado a comienzos del informe, se puede concluir a ciencia cierta que es posible encontrar un adecuado compromiso entre estos tres fenómenos electromagnéticos, para una MPMSM, ya que como se vio a lo largo del informe, debido a la versatilidad que presenta la alteración de la geometría (k_g , α_{pm} y bordes geométricos) en la máquina estudiada, los valores obtenidos de los fenómenos electromagnéticos estudiados, son muy variados y no existen zonas muertas entre los ellos, ya que los tres están relacionados con respecto a los mismos parámetros de análisis, por lo cual está claro que es posible encontrar un punto de óptimo entre estas tres fenómenos. Pero debido a que encontrar ese valor óptimo de forma analítica nos es sencillo y requiere un mayor tiempo, no fue posible encontrarlo ese valor en específico, por lo que se plantea como un trabajo a futuro.

Con respecto a los trabajos a futuro como continuación al presente proyecto de investigación, se propone realizar lo siguiente:

- Un estudio de puntos de operación de los datos y valores recopilados del análisis electromagnético de la MPMSM, a modo de optimización, de los fenómenos como el torque de cogging, pérdidas de imanes permanente y torque neto, logrando un buen compromiso entre estas. Esto debido a que en el presente informe no se realizó un análisis exhaustivo o más preciso, de la optimización de los datos obtenidos, ya que esto requiere un tiempo mayor
- Un estudio de la optimización de la geometría de los módulos del estator e inclinación de los PM de una MPMSM, con el objetivo de disminuir el torque de cogging de la máquina. Donde se busca encontrar ciertas modificaciones de la geometría de los módulos del estator, como por ejemplo aumentar los bordes de los dientes del estator de tal manera que se disminuya la variación de la reluctancia debido al ranura. Con respecto a los PM, se buscaría encontrar las inclinaciones óptimas y forma geométrica que nos permita mitigar lo más posible el torque de cogging.
- Como la mayoría de los trabajos de investigación de las máquinas eléctricas siempre el costo es un factor primordial, es más el presente proyecto de investigación nace de un modelo de una máquina eléctrica, que busca disminuir sus costos a través de la

manufactura de sus devanados, es por eso, que se propone realizar un análisis económico de la MPMSM tomando en consideración la optimización de esta, y compararlas con el obtenido para una PMSM convencional. Con esto obtendríamos una visión completa de la máquina, tanto técnica como económica, la que nos permitiría la verdadera factibilidad de esta nueva área de investigación.

Bibliografía

- [1] W. E. Jara Montecinos, «Construcción y puesta a punto de un generador de flujo axial con imanes permanentes y estator sin nucleo,» Universidad de Concepción, Concepción, 2010.
- [2] W. E. Jara Montecinos, «Axial Flux Permanent Magnet Machines,» Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, 2016.
- [3] F. Libert y J. Soulard, «Manufacturing Methods Of Stator Core with Concentrated Windings,» de *The 3rd IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives*, Stockholm, 2006.
- [4] Jara.Werner, I.Petrov, J.Tapia, J.Pyrhonen y P.Lindh, «Analytical Model of Tooth-Coil Winding Permanent Magnet Synchronous Machines With Modular U-shape Stator,» de *International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Lausanne, Switzerland, 2016.
- [5] El-Refai y A. M, «Fractional-slot concentrated-windings synchronous permanent magnet machines»: Opportunities and challenges,» *IEEE Trans. Ind. Electron*, vol. 57, nº 1, p. 107–121, 2010.
- [6] G.J.Li, Z.Q.Zhu y B.Ren, «Cogging torque and torque ripple reduction of modular permanent magnet machines,» *IEE Trans. Mag*, vol. 57, nº 1, pp. 193-199, 2016.
- [7] G. Heins, D. M. Ionel y M. Thiele, «Winding Factors and Magnetic Fields in Permanent-Magnet Brushless Machines With Concentrated Windings and Modular Stator Cores,» *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, nº 4, pp. 2924 - 2932, 2015.
- [8] N. Bianchi, M. Daipre, L. Alberti y E. Fornasiero, *Theory and design of fractional-slot PM machines*, Padova: Cleup, 2007.

- [9] Z. Q. Zhu y Z. Azar, «Influence of Additional Air Gaps Between Stator Segments on Cogging Torque of Permanent-Magnet Machines Having Modular Stators,» *Magnetics IEEE Transactions*, vol. 48, n° 6, pp. 2049-2055, 2012.
- [10] N. E. Fornasiero, «Index of rotor losses in three-phase fractional-slot permanent magnet machines,» *IET Electric Power Applications*, vol. 3, n° 5, pp. 381 - 388, 2009.