



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA DE
VALPARAÍSO



Carlos Alberto Montoya Mansilla

Diseño y Análisis Paramétrico de una Máquina de Imanes Permanentes con Estator Modular

Informe Proyecto de Título de Ingeniero Eléctrico



Escuela de Ingeniería Eléctrica



Diseño y Análisis Paramétrico de una Máquina de Imanes Permanentes con Estator Modular

Carlos Alberto Montoya Mansilla

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

Sr. Werner Eduardo Jara Montecinos

Profesor Guía

Sr. Jorge Luis Medina Hanke

Segundo Revisor

Sr. Sebastián Fingerhuth Massmann
Secretario Académico

Valparaíso, 04 de Diciembre de 2018

Agradecimientos

A mis padres Carlos y Felicita, que siempre han sido un ejemplo a seguir en la vida junto con el apoyo incondicional en los tiempos difíciles; son los responsables de la persona que soy y de que haya llegado a la instancia de escribir estas palabras. A mi hermano Marcelo.

A mis morochitos, Nicol y Maximiliano que son la razón de tratar de ser mi mejor versión para tenerlos a mi lado por siempre.

A Carlos Ortega, Nicolás Guzman y Pablo Álvarez que son los grandes amigos que me llevo del paso por esta universidad, por estar cada vez que los necesité, por todas las risas entregadas y recibidas en el transcurso de la vida universitaria.

A mi profesor guía Werner Jara porque realmente fue un guía este año, un mentor, una motivación para ampliar la visión dentro de la ingeniería eléctrica, un libro abierto esperando entregar su conocimiento y por brindar las herramientas necesarias para desarrollar este trabajo. A mis profesores correferentes Jorge Medina y Javier Riedemann por su ayuda cuando fue requerida, por la preocupación constante y las buenas palabras de ánimo en los momentos oportunos.

Para terminar a mis compañeros de laboratorio y amigos de universidad por ser un apoyo constante durante este año en el laboratorio.

Gracias.

Valparaíso, 04 de Diciembre de 2018

C. M.

Resumen

Este estudio consiste en el análisis electromagnético de dos principales topologías de máquinas sincrónicas de imanes permanentes con estator modular en forma de U, la de 28 polos 24 ranuras y 20 polos 24 ranuras. Los fenómenos a estudiar son la tensión inducida, el torque neto, el torque de cogging y las pérdidas en los imanes con y sin carga.

Se realizó un estudio sobre métodos de optimización de los fenómenos anteriormente nombrados, principalmente la variación del ancho de los módulos para reducir el espacio entre los módulos y la implementación de puntas de dientes para las distintas topologías.

Se muestra un estudio sobre la diferencia en el bobinado de una capa y el de doble capa para la topología de 20 polos y 24 ranuras, junto con una comparación con los valores obtenidos por una máquina con estator continuo.

Se analizaron las diferencias en las formas de tensión y las armónicas de la densidad de flujo en el entrehierro para las distintas configuraciones comentadas en esta tesis, éstas son la máquina con estator continuo, la MPMSM con bobinado en torno al diente, la MPMSM con bobinado en torno al yugo con y sin tooth tips.

En la parte final se mostró el dimensionamiento de un generador de baja potencia con las ecuaciones necesarias para este propósito y una comparación de los resultados obtenidos de las ecuaciones con los resultados obtenidos por la simulación en elementos finitos.

Palabras claves: máquina sincrónica de imanes permanentes, máquina modular, modelamiento electromagnético, generador de baja potencia, puntas de dientes.

Abstract

This study consists in the electromagnetic analysis of two main topologies of permanent magnet synchronous machines with U-shape modular stator, the 28 poles 24 slots and 20 poles 24 slots. The objects to be studied are the induced voltage, torque, cogging torque and the losses in magnets with and without load.

A study was made on optimization methods of the aforementioned objects, mainly the variation of the width of the modules to reduce the space between the modules and the implementation of tooth tips for the different topologies.

A study is shown on the difference in the winding of one layer and the double layer for the topology of 20 poles and 24 slots, added to a comparison with the values obtained with a monolithic stator machine.

It was analyzed the differences in the forms of induced voltage and the harmonics of the flux density in the air gap for the different configurations discussed in this thesis, these are the machine with monolithic stator, the MPMSM with teeth coil winding, the MPMSM with core coil winding with and without tooth tips.

In the final part was shown the sizing of a low power generator with the equations necessities for this purpose and a comparison of the results obtained from the equations with the results obtained by the simulation in finite elements analysis.

Key words: permanent magnet synchronous machine, modular machines, electromagnetic modeling, low power generator, tooth tips.

Índice general

Introducción	1
Hipótesis	2
Objetivos generales	3
Objetivos específicos	3
1 Estado del arte	4
1.1 Máquinas sincrónicas de imanes permanentes	4
1.1.1 Imanes permanentes	4
1.1.2 Fortalezas y Debilidades de las PMSM	6
1.2 Tipos de devanados	7
1.2.1 Devanados Distribuidos	7
1.2.2 Devanados Concentrados	7
1.3 Máquinas sincrónicas de imanes permanentes con estator modular	8
1.3.1 MPMSM 28 polos 24 ranuras	10
1.3.2 MPMSM 20 polos 24 ranuras	10
1.4 Metodología de estudio	12
2 Estudio y optimización paramétrico	15
2.1 MPMSM 28 polos 24 ranuras	15
2.1.1 Tensión inducida	16
2.1.2 Torque Neto	18
2.1.3 Pérdidas en los imanes de la MPMSM 28 polos 24 ranuras	19
2.1.4 Torque de Cogging	21
2.2 MPMSM 20 polos 24 ranuras bobinado de una capa	22
2.2.1 Tensión inducida	24
2.2.2 Torque Neto	25
2.2.3 Pérdidas en los imanes de la MPMSM con carga y sin carga	26
2.2.4 Torque de Cogging	28
2.3 MPMSM 20 polos 24 ranuras con bobinado de doble capa	29
2.4 Estudio de las diferencias en la forma de tensión y las armónicas en las distintas configuraciones	31

3 Aplicación aerogenerador de baja potencia	35
3.1 Diseño de la máquina estudiada para ser utilizada en un aerogenerador de baja potencia	35
3.1.1 Generador 10 polos 12 ranuras	36
3.1.2 Generador 20 polos 24 ranuras	38
3.1.3 Dimensionamiento máquina 20 polos 24 ranuras	40
3.1.4 Modelamiento Generador 20 polos 24 ranuras	41
Discusión y conclusiones	46
Bibliografía	51

Introducción

Según estimaciones hechas por el Ministerio de Energía de Chile, en el 2018 aún hay más de 15.000 familias sin acceso eléctrico en localidades rurales y/o aisladas, sumándose a éstas existen otras 15.000 familias con un suministro parcial o diésel dependiente. Es por esto que en los planes al corto plazo del Ministerio de Energía se espera crear un mapa de vulnerabilidad energética en Chile con el fin de focalizar acciones a tomar para disminuir la brecha energética actual. Las familias sin acceso eléctrico se ubican principalmente en las zonas cordilleranas de Arica y Parinacota, Tarapacá, sectores costeros de Antofagasta y Atacama, valles de la region de Coquimbo, lugares de difícil acceso de la Patagonia y comunidades indígenas del Bío Bío y la Araucanía.

Otro de los ejes claves incluidos en la planeación del Ministerio de Energía es la energía baja en emisiones, ya que es necesario diversificar y ampliar la matriz energética, potenciando las energías locales considerando la geografía donde será instalada. Uno de las objetivos a alcanzar es cuadruplicar la capacidad actual de generación renovable de pequeña escala al 2022. [1]

Los ejes definidos por el Ministerio de Energía son los que mejor muestran los problemas energéticos en nuestro país, y es por esto que es necesario pensar en soluciones que engloben los problemas detectados. La solución propuesta en esta tesis, tomando en cuenta los objetivos de buscar formas para entregar energía eléctrica para las familias más aisladas y aumentar la generación renovable a pequeña escala, es el diseño y análisis de una máquina sincrónica de imanes permanentes que pueda ser usada para la construcción de generadores eólicos de baja potencia.

Las máquinas sincrónicas de imanes permanentes (PMSM) se han ido incorporando en aplicaciones domésticas, industriales, aeroespaciales y de electromovilidad entre otras. Esto debido a los beneficios que presentan en términos de eficiencia, densidad de potencia y torque, permitiendo desarrollar máquinas compactas con bajos costes de mantenimiento en comparación con otras máquinas rotatorias. La inclusión de los imanes permanentes ha permitido la utilización de devanados concentrados en el estator. Este tipo de devanado (TCW por sus siglas en inglés) se caracteriza en que cada bobina está enrollada alrededor de un solo diente, evitando los cruzamientos de cabezas de bobina en las distintas fases.

La elección de usar un estator modular se basa en agregarle más valor al diseño, debido a que

es posible simplificar el proceso de producción y bobinado con este tipo de estator, junto con tener ventajas en transporte y desde el punto de vista constructivo al tener distintos módulos que luego son montados para formar el estator.

Para llevar a cabo el diseño y estudio del motor sincrónico de imanes permanentes con estator modular será ocupado la herramienta de simulación y diseño electromagnético FLUX 2D by Altair, el cual es un software de modelación en elementos finitos que permite hacer simulaciones del estado transitorio para obtener mapas de la densidad de flujo magnético, permeabilidad, torque, entre otras. El software da la posibilidad de variar los parámetros usados en la máquina para luego comparar los resultados obtenidos y ver el comportamiento de las principales variables electromagnéticas al realizar las variaciones geométricas en la máquina.

Las variables electromagnéticas a evaluar son principalmente la tensión inducida, las pérdidas en los imanes con y sin carga, el torque neto de la máquina y el torque de Cogging. Estas variables serán estudiadas para dos geometrías: PMSM con estator modular de 28 polos 24 ranuras y otra de 20 polos 24 ranuras, ambas con la inclusión de tooth tips. Los tooth tips son puntas en los dientes del estator que ayudan a mejorar el desempeño electromagnético de la máquina al disminuir la variación de reluctancia entre el espacio de aire que hay entre cada módulo. También será evaluada una variante a las configuraciones planteadas anteriormente, la PMSM de estator modular con 10 polos y 12 ranuras que es la misma configuración de 20 polos 24 ranuras pero escalado, esto debido es más fácil de producir y ensamblar al tener menor cantidad de módulos en el estator e imanes en el rotor.

Todas las evaluaciones están enfocadas en buscar la configuración que entregue los mejores valores de torque y tensión inducida pero que a la vez presente un nivel de pérdidas en los imanes permanentes y torque de Cogging relativamente bajos en comparación con una máquina con estator continuo, todo esto para terminar proponiendo una máquina sincrónica de imanes permanentes capaz de alcanzar 1 kW de potencia para ser usada en generación con energías renovables para lugares aislados sin acceso a la red eléctrica chilena.

Hipótesis

- Es posible afinar la geometría de los módulos del estator para disminuir la dispersión de flujo y aumentar la tensión inducida para buscar niveles de torque óptimos.
- Es posible disminuir la dispersión de flujo y el torque de Cogging al añadir tooth tips a los dientes del estator.
- Es posible encontrar una configuración con el torque neto deseado y a la vez un bajo torque de Cogging.

Objetivos generales

- Este proyecto busca diseñar un motor sincrónico de imanes permanentes con estator modular, que tenga en cuenta las dimensiones de los imanes permanentes, el uso de tooth tips y el diseño de los módulos del estator. Con la capacidad de funcionar para generadores eólicos de baja potencia.

Objetivos específicos

- Desarrollar un modelo de las máquinas sincrónicas de imanes permanentes con estator modular de 20 polos 24 ranuras y 28 polos 24 ranuras en el software Flux 2D.
- Añadir tooth tips a los modelos, teniendo en cuenta la orientación respectiva, y analizar el efecto que tiene en las principales variables electromagnéticas de las máquinas.
- Elegir una de las máquinas y ver las diferencias en el bobinado de una capa y el de doble capa.
- Analizar el comportamiento electromagnético de una máquina de 10 polos 12 ranuras y compararlo con las anteriormente evaluadas
- Hacer los cálculos necesarios para encontrar la potencia generada por la máquina y compararlos con los obtenidos mediante software 2D en elementos finitos.

1 Estado del arte

1.1 Máquinas sincrónicas de imanes permanentes

Las maquinas sincrónicas de imanes permanentes (PMSM por sus siglas en inglés) tienen el mismo principio de las máquinas sincrónicas clásicas, el rotor gira a la misma velocidad del campo magnético rotatorio del estator, desfasado con respecto a él en un ángulo θ . El cambio consiste en que las bobinas de excitación de las maquinas sincrónicas convencionales son reemplazadas por imanes permanentes. [2]

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.

1.1.1 Imanes permanentes

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

El uso de imanes permanentes en la construcción de máquinas eléctricas brinda los siguientes beneficios:

- el sistema de excitación de campo no absorbe energía eléctrica y, por lo tanto, no hay pérdidas por excitación, lo que significa un aumento sustancial de la eficiencia.
- mayor densidad de potencia y / o densidad de par que cuando se usa excitación electromagnética.
- mejor rendimiento dinámico que los motores con excitación electromagnética (mayor densidad de flujo magnético en el espacio de aire).
- simplificación de la construcción y el mantenimiento.

Los imanes pueden ser puestos en distintas formas en el rotor, las versiones de flujo radial

que se pueden encontrar son las mostradas en la figura 1.1

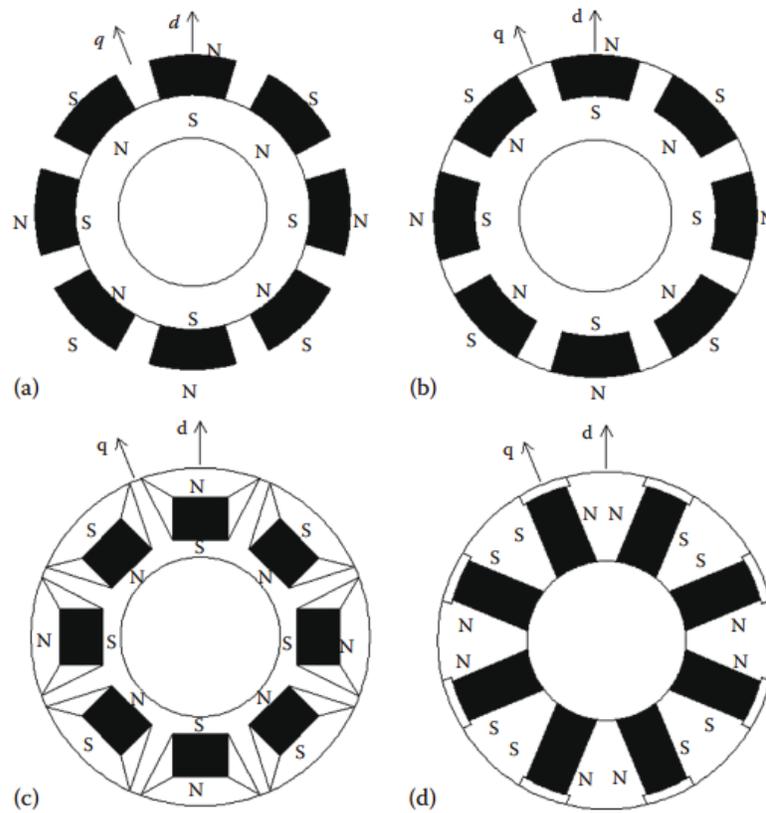


Figura 1.1: Distintas disposición de los imanes en el rotor [3]

La figura (a) muestra una máquina sincrónica con imanes en la superficie, la figura (b) muestra una máquina sincrónica con los imanes insertados en la superficie del rotor, la figura (c) muestra una disposición de imanes permanentes en el interior y la figura (d) muestra una disposición de imanes permanentes en el interior con una orientación circunferencial.

Imanes permanentes en la superficie del rotor

Su principal característica es que ofrece una alta eficiencia, bajo nivel de ruido, alta densidad de torque y el costo de producción de este tipo de rotor es menor. Esta disposición proporciona la mayor densidad de flujo porque se enfrenta directamente al entrehierro sin la interrupción de ningún otro medio.

Imanes permanentes en el interior del rotor

Su principal ventaja es que permite aumentar el torque por efecto de la saliencia. Los imanes permanentes se pueden disponer en formas especiales, como lo vimos en la figura (d), para aumentar la concentración de flujo generando tensiones menos distorsionadas.

1.1.2 Fortalezas y Debilidades de las PMSM

Las principales fortalezas son:

- Las PMSM utilizan un 30% menos de energía que el sistema convencional. Este mayor ahorro de energía se debe principalmente a la eliminación de las pérdidas de los conductores en el rotor. Por lo tanto, las PMSM son altamente eficiente, con una calificación de eficiencia del 97%.
- Una PMSM proporciona rotación a una velocidad fija en sincronía con la frecuencia de la fuente de alimentación, independientemente de la fluctuación de la carga o tensión de la línea.
- Con una densidad de energía muy alta, con muy alta eficiencia y alta respuesta, el motor es adecuado para la mayoría de aplicaciones sofisticadas. También tiene una alta capacidad de sobrecarga.
- Una PMSM es en gran parte libre de mantenimiento, lo que garantiza el funcionamiento más eficiente y los costes de mantenimiento reducidos.
- Las PMSMs también pueden funcionar a una temperatura reducida, lo que resulta en más tiempo que lleva y la vida de aislamiento.
- En comparación con los motores de inducción con ventilación abierta, la estructura cerrada del PMSM permite una reducción de 12dB del ruido de ventilación en todos los rangos de velocidad. Esto se puede apreciar en la figura 1.2 [4] [5]

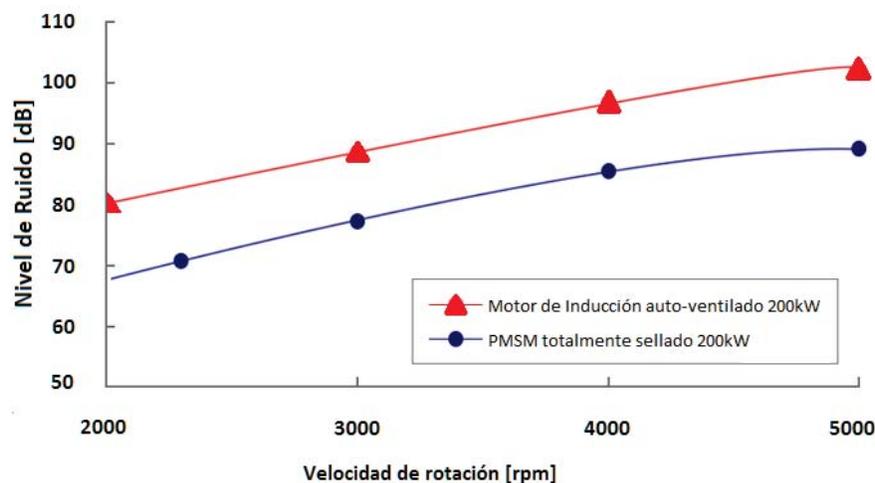


Figura 1.2: Comparación del ruido de un motor de inducción y de una PMSM.

Las principales debilidades son:

- Las PMSM no son capaces de operar en una configuración directa a la línea, y deben

ser utilizados en conjunción con un controlador electrónico, que utiliza la corriente de conmutación para activar el motor, y también para controlar su par de salida.

- Los imanes de NdFeB son caros, lo que explica el mayor precio de compra de las PMSM en comparación con los motores de inducción.
- Aparecen torques pulsatorios debido a la interacción de los imanes permanentes y la estructura del estator.
- Excitación de campo fija, lo que dificulta su control

1.2 Tipos de devanados

Los devanados son el conjunto de bobinas que conforman las fases del estator de la PMSM. El material usado es generalmente cobre en forma de hilo esmaltado, debido a que el esmalte sirve de aislamiento eléctrico entre los conductores. Existen distintas formas para configurar los devanados, pero este estudio abordará solamente dos tipos: Devanados distribuidos y devanados concentrados. Para consensuar, será establecida la ecuación 1.1 en donde q es el número de ranuras por polos por fases, Q es el número de ranuras y p el número de pares de polos.

$$q = \frac{Q}{3 \cdot 2p} \quad (1.1)$$

Con esta ecuación serán definidos los devanados distribuidos como aquellos en que q es mayor o igual a 1, en cambio los devanados concentrados serán aquellos con q menor que 1

1.2.1 Devanados Distribuidos

Se caracterizan 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. - Debido a los cruzamientos entre las las bobinas se requiere una gran longitud de las cabezas de bobina, aumentando las pérdidas por calor en el devanado y aumenta también la cantidad de cobre utilizado.

1.2.2 Devanados Concentrados

Se caracteriza por que las bobinas son enrolladas alrededor de un solo diente por lo que no se producen cruzamientos en los conductores. En los últimos años se han desarrollado diversos estudios demostrando que poseen diversas ventajas como una alta densidad de potencia, alta

eficiencia, cabezas de espira más cortas, alto factor de relleno de ranuras y aún más cuando se combina con estructura de estator segmentado, bajo torque de cogging, capacidad para debilitamiento de flujo y tolerancia a las fallas.[6]

Al tener cabezas de bobina más cortas se reduce la longitud del devanado final, por ende se reducen las pérdidas por calor en los conductores y el coste de la máquina.[7]

1.3 Máquinas sincrónicas de imanes permanentes con estator modular

Las máquinas sincrónicas de imanes permanentes (PMSM), como se ha mencionado anteriormente, necesitan una alta inversión inicial debido al costo de los imanes permanentes. Por lo tanto, es importante hacer el proceso de producción de éstas tan simple y barato como sea posible. Debido a que la parte activa del rotor incluye principalmente acero laminado 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 relleno alto. Una de las posibles simplificaciones del proceso de producción de máquinas eléctricas es el uso de máquinas sincrónicas de imanes permanentes con estator modular (MPMSM) que facilitan el montaje del bobinado. El bobinado que se aplica en estos casos es el bobinado en torno al diente (TCW).

Ventajas del bobinado en torno al diente

- El bobinado tiene una menor longitud final, lo que se traduce en una disminución en el costo del cobre a utilizar.
- Menores pérdidas de cobre en el devanado del estator.
- Fabricación de armadura de bajo coste, y una mayor capacidad de tolerancia a fallos.[8]
- Se facilita el logro de un factor de relleno de ranura alto.[6]

En este estudio se usará un estator modular en forma de U, el cual está diseñado para tener segmentos independientes que, idealmente, están aislados electromagnéticamente uno del otro y no requieren de una unión estrecha de los módulos del estator.[9]

Otra razón para usar este tipo de forma de módulo es que la otra posibilidad, el módulo en forma de E, complica el proceso de producción debido a que se necesita una mayor precisión para hacer el punzado o cortes del estator. [10]

El bobinado no será dispuesta de forma horizontal como se hace tradicionalmente, sino que será dispuesto de forma vertical con respecto al yugo del módulo del estator como se puede apreciar en la figura 1.3

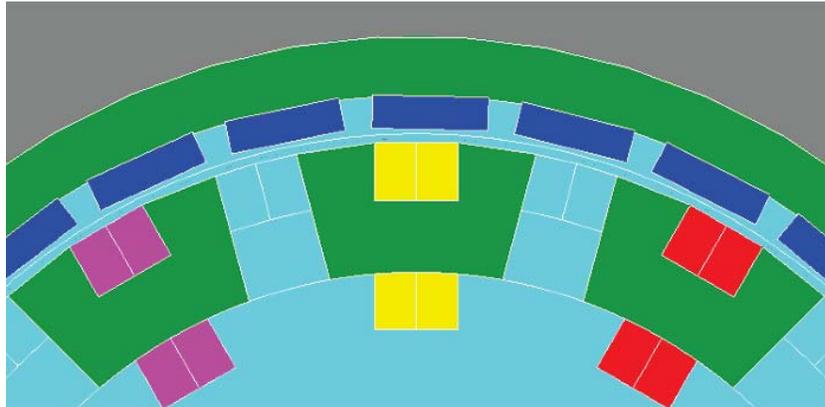


Figura 1.3: Forma del módulo y disposición del bobinado

En este informe es analizada una máquina modular, la cual nace a partir de un estator monolítico que es segmentado como se muestra en la figura 1.4 hasta convertirlo en una MPMSM con bobinado de una capa. La parte I de la figura muestra una máquina con estator continuo o monolítico, en la parte II se aprecia la separación del estator en módulos con un bobinado de tipo TCW; la parte III muestra el cambio del bobinado tipo TCW a CCW; y la parte IV de la figura muestra la máquina modular con bobinado en torno al núcleo (CCW).

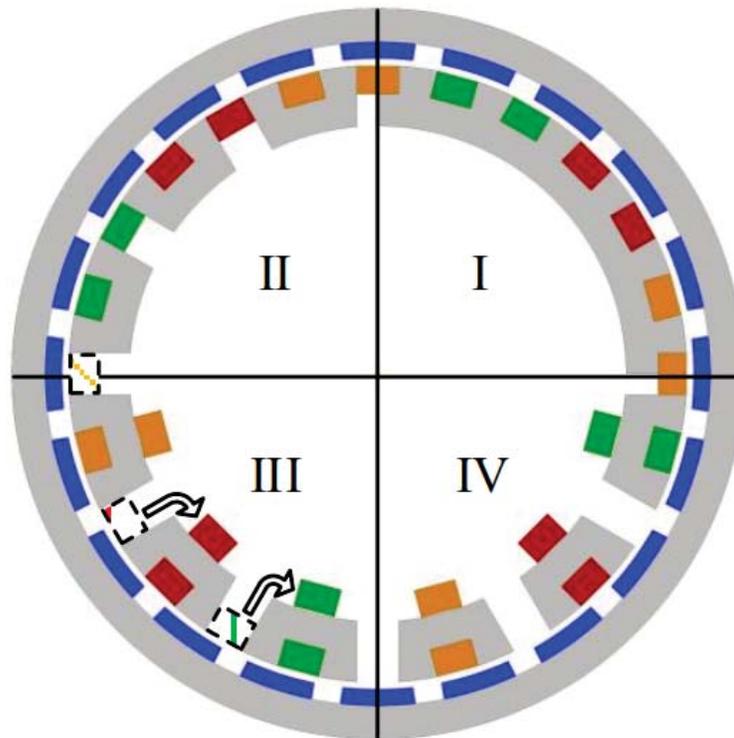


Figura 1.4: Transformación de un estator monolítico a modular

1.3.1 MPMSM 28 polos 24 ranuras

La primera máquina bajo análisis corresponde a una máquina sincrónica de imanes permanentes con estator modular (MPMSM), la cual tiene módulos con forma de U como se aprecia en la figura 1.5. En este tipo de topología deben seleccionarse un número de polos ($2p$) y ranuras (Q_s) de manera que $Q_s \approx 2p$. Esto debido a que el factor de bobinado k_w es cercano al que tiene la ampliamente utilizada máquina con estator continuo [11].

A diferencia de la estructura convencional, en donde las bobinas están enrolladas en torno a los dientes, en la configuración propuesta las bobinas están enrolladas con respecto al yugo, lo cual da la libertad de poder variar el ancho del hierro de los módulos al modificar el k_g . También serán agregados tooth tips en la búsqueda de mejorar el rendimiento electromagnético de la máquina; tomando en cuenta que al variar el k_g no se puede poner tooth tips que apunten hacia afuera del módulo, éstos obligatoriamente tendrán que apuntar hacia el interior del módulo para no abarcar espacio que está destinado a la variación del k_g . Otra razón de poner los tooth tips hacia adentro es debido a que el paso polar (τ_p) resulta ser menor que el paso de bobina (τ_u).

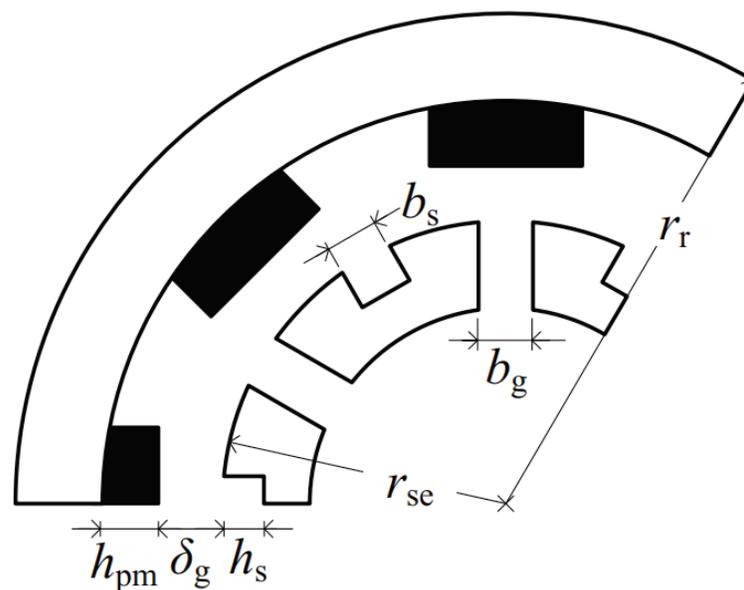


Figura 1.5: Dimensiones geométricas principales máquina 28 polos 24 ranuras.

1.3.2 MPMSM 20 polos 24 ranuras

La segunda topología en estudio es una máquina sincrónica con imanes permanentes y estator modular con 20 polos y 24 ranuras, en la cual se mantiene la diferencia de hacer el bobinado en torno al yugo y se analizan las variaciones producidas al incorporar puntas de dientes de distintos tamaños en las variables electromagnéticas más importantes de las máquinas sincrónicas para compararlos con la máquina de estator continuo. Los tooth tips son puestos

de la forma que lo muestra la figura 4.2, hacia afuera del módulo, para mantener el grado de libertad que se tiene al hacer este tipo de bobinado y para disminuir la variación de reluctancia lo que lleva a ofrecer un camino de alta permeancia al flujo impuesto por los polos del rotor. Otra razón para disponer de esta forma los tooth tips corresponde a que el paso polar (τ_p) es mayor que el paso de bobina (τ_u), alcanzándose una mayor concentración de flujo en las puntas de dientes entre los módulos. Ésta diferencia se aprecia con las figuras 1.6 y 1.7, en la figura 1.6 se pueden observar las distribución del flujo en el generador sin puntas de dientes y por esto hay líneas entre los módulos que no encuentran un camino que le facilite el paso para cerrarse con el imán siguiente al de donde parten. En cambio, como se observa en la figura 1.7, las líneas de flujo encuentran este camino de baja reluctancia en cual el flujo producido por un imán es conducido hacia el módulo del estator contiguo cerrando el circuito magnético principal, aumentando de esta forma el flujo enlazado por la bobina y, en consecuencia, aumentando también la tensión inducida del generador.

La geometría a usar para la máquina de 20 polos 24 ranuras se puede observar en la figura 1.8, en donde es posible distinguir los principales parámetros de esta topología, asimismo se puede ver la disposición de las puntas de dientes con una distribución hacia el interior del módulo por las razones anteriormente explicadas.

Para complementar la figura 1.8, se agrega la tabla 1.1 en la cual se presentan los valores de los parámetros principales usados en la simulación de esta máquina para poder tener una idea más concreta sobre las dimensiones de ésta.

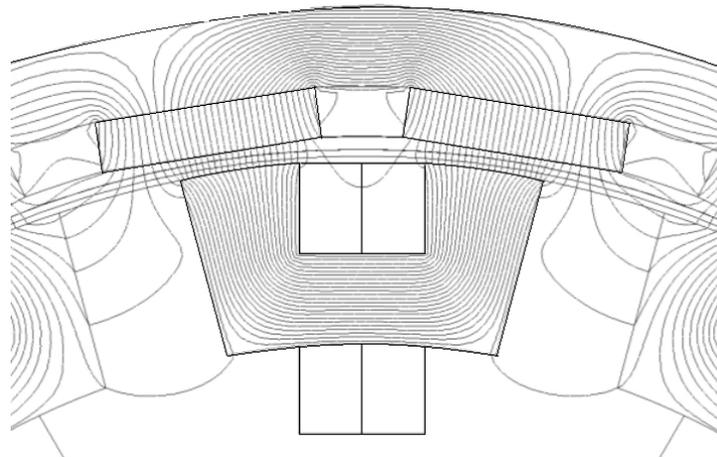


Figura 1.6: Distribución de flujo del generador sin puntas de dientes

Otra variante a analizar en esta topología es la diferencia del devanado de una capa y el de doble capa. Tanto la evaluación de la máquina de 28 polos 24 ranuras y la de 20 polos y 24 ranuras se evaluarán con devanado de una capa, pero en la búsqueda de aumentar el conocimiento sobre éstas máquinas se realizará el estudio de devanado de doble capa para la máquina de 20 polos 24 ranuras.

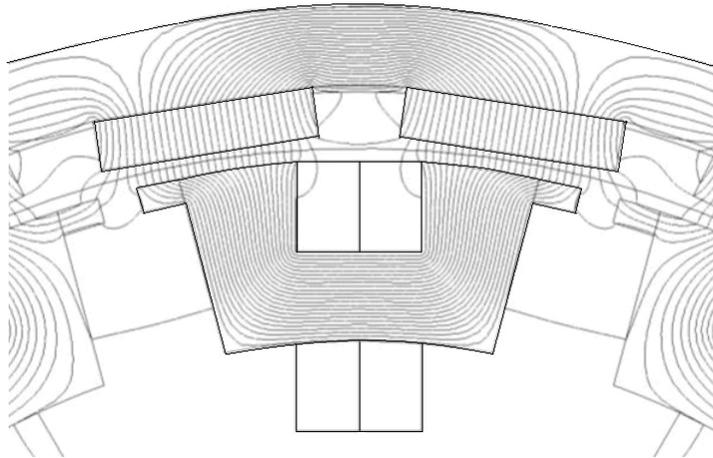


Figura 1.7: Distribución de flujo del generador al incluir las puntas de dientes.

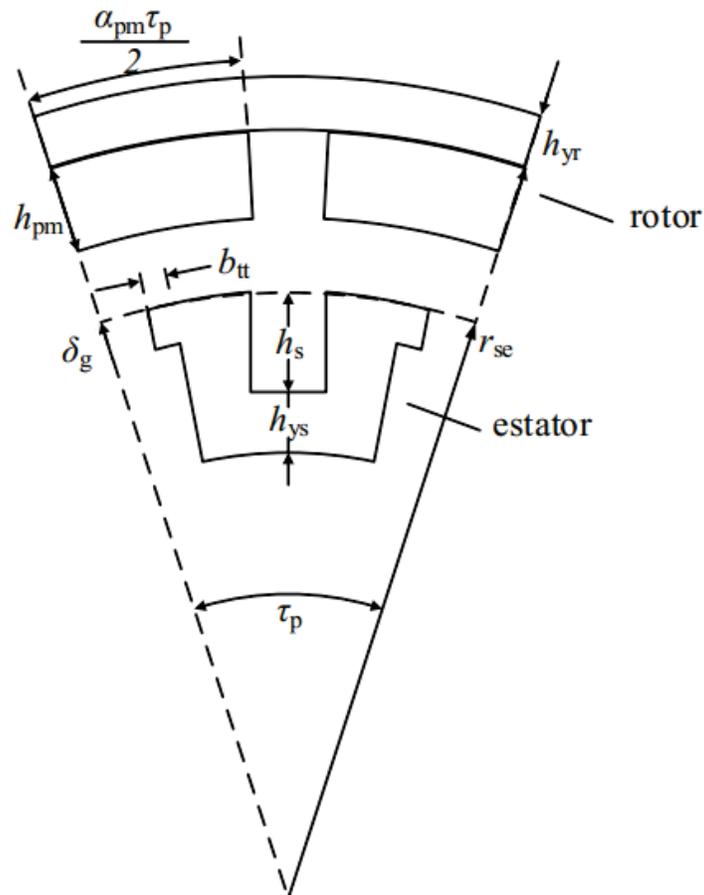


Figura 1.8: Dimensiones geométricas principales máquina 20 polos 24 ranuras.

1.4 Metodología de estudio

Como es señalado en el capítulo anterior, el estudio se realizará sobre la máquina sincrónica de imanes permanentes con estator modular en forma de U. Cabe mencionar que es necesaria

una metodología de estudio para obtener resultados válidos, completos, fáciles de interpretar y que puedan ser comparados correctamente con los obtenidos por las distintas topologías en estudio.

La metodología usado para el estudio de las topologías propuestas corresponde a un análisis electromagnético para la máquina en donde, en primera instancia, son comparados la relación del ancho del imán permanente α_{pm} con el ancho de las puntas de dientes b_{tt} . El segundo análisis corresponde a la relación del ancho del imán permanente α_{pm} con la separación entre los anchos de los módulos contiguos k_g . Éstas variables son elegidas debido a que generan cambios en las máquinas sin tener que cambiar parámetros principales de la máquina como lo son el tamaño de las ranuras ni el diámetro o profundidad de la máquina, lo que resulta en pequeños cambios que producen variaciones importantes en las variables electromagnéticas de interés. En las evaluaciones también se deberá presentar la el comportamiento de la máquina sincrónica común, la cual no tiene un estator modular sino continuo o monolítico.

Las principales variables electromagnéticas a analizar en las distintas topologías a estudiar son la tensión inducida, el torque neto, las pérdidas en los imanes con carga, las pérdidas en los imanes sin carga y el torque de Cogging.

A continuación son presentadas las relaciones anteriormente nombradas para su correcta comprensión, también es necesario mencionar que el uso de relaciones en la presentación de las variables es debido a que teniéndolas expresadas como relaciones es posible poder replicar este estudio con distintas dimensiones para otros estudios que puedan surgir de la misma máquina.

$$k_g = \frac{b_g}{b_s} \quad (1.2)$$

con b_g como la distancia entre módulos y b_s como el ancho de la ranura.

$$\alpha_{pm} = \frac{W_{pm}}{\tau_p} \quad (1.3)$$

con W_{pm} como el ancho del imán permanente y

$$\tau_p = \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{2 \cdot p} \quad (1.4)$$

siendo R el radio de la máquina en estudio.

Es necesario establecer los parámetros base de la máquina a utilizar, los cuales se mantendrán en todas las simulaciones y no cambiarán con el fin de tener una máquina base a la cual se le hacen cambios con respecto a ciertos parámetros como lo es el ancho del imán permanente, ancho de los tooth tips o la distancia entre los módulos contiguos del estator modular. Éstos parámetros base son presentados en la tabla 1.1

Tabla 1.1: Parámetros base a usar en la MPMSM en estudio.

Símbolo	Parámetro	Valor	Unidad
r_{se}	Radio externo estator	92.5	mm
l_{Fe}	Longitud del hierro	38	mm
h_{ys}	Altura yugo estator	9	mm
h_{yR}	Altura yugo rotor	9	mm
δ_g	Largo del entrehierro	2	mm
h_{pm}	Altura de imán permanente	5	mm
h_s	Altura de ranura	9	mm
b_s	Ancho de ranura	12.6	mm
Q_s	Número de ranuras	24	-
ω_m	Velocidad de rotación	1000	rpm
B_r	Remanencia imán permanente	1.1	-
μ_r	Permeabilidad relativa	1.041	-

2 Estudio y optimización paramétrico

El programa usado para simular la máquina, Flux2D/3D, es un software de simulación digital, el cual realiza un análisis en elementos finitos y permite el cálculo de los estados magnéticos, eléctricos o térmicos de los dispositivos en modos permanentes, transitorios y armónicos, con funcionalidades de análisis multiparamétricos, circuitos y acoplamientos cinemáticos. Debido a la cantidad de parámetros a simular, el código se divide en un conjunto de módulos que resuelven un tipo dado de problema.

Flux se desarrolla en el Laboratorio de Electrotecnia de Grenoble en Francia y es distribuido por la empresa CEDRAT SA.

Como es presentado en la metodología de estudio, son realizados los análisis que comparan el ancho de los imanes permanentes con la separación de los módulos y el ancho de los tooth tips, a continuación son presentados los resultados obtenidos para las distintas máquinas, siendo posible hacer la comparación entre ambas configuraciones.

2.1 MPMSM 28 polos 24 ranuras

El análisis de esta topología comienza con el estudio de una máquina de 28 polos y 24 ranuras, en la cual se analizará el efecto de variar el ancho de los imanes permanentes (α_{pm}) y la distancia entre los módulos (k_g) para comparar los valores principales como la tensión inducida, el torque neto y el torque de cogging. La figura 2.1 presenta el modelo usado para analizar la MPMSM, en la cual se puede observar la disposición de los tooth tips antes mencionados, y en la figura 2.2 se puede observar el cambio al variar el k_g y al disminuir los tooth tips.

La figura 2.3 muestra los valores de la densidad de flujo en los distintos puntos de la MPMSM en el punto de mayor flujo enlazado, los cuales se encuentran en los rangos máximos entregados por la literatura [12]. Para más claridad, se han recopilado los valores para la densidad de flujo en las distintas partes de la máquina sincrónica de imanes permanentes en la tabla 2.1, los cuales son los valores encontrados en la literatura sobre diseño de máquinas eléctricas.

Acá es posible observar que los rangos están dentro de lo visto en [12], menos la densidad de flujo en algunos tooth tips, los cuales están por sobre un 0.1 T del máximo.

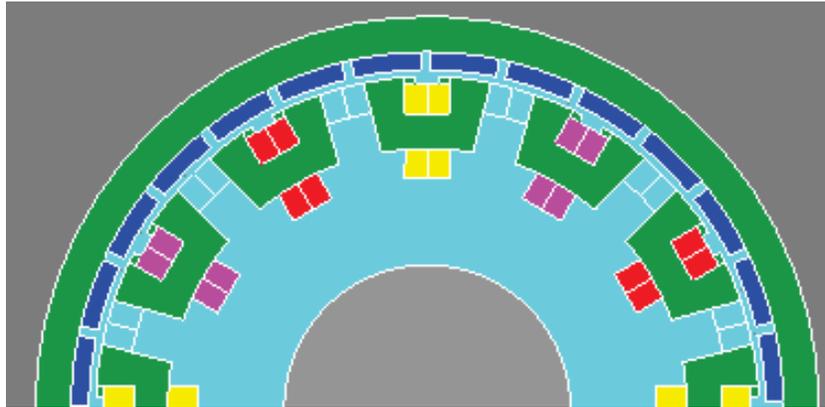


Figura 2.1: Modelo de 28 polos 24 ranuras con tooth tips y k_g de 1.

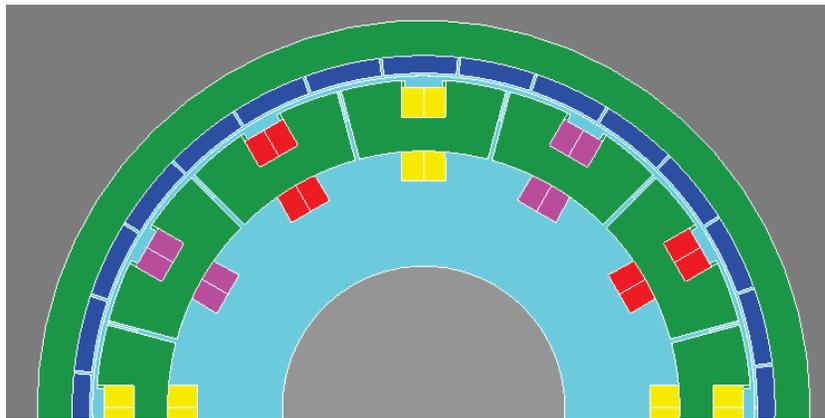


Figura 2.2: Modelo de 28 polos 24 ranuras con k_g de 0.1

Tabla 2.1: Valores de la densidad de flujo.

	Densidad de flujo (T)
Entrehierro	0.8 - 1.05
Yugo del estator	1.1 - 1.5
Punta de diente	1.5 - 2.0
Yugo del rotor	1.3 - 1.6

2.1.1 Tensión inducida

La figura 2.4 muestra los valores de la tensión inducida en la máquina al variar el ancho de los tooth tips (b_{tt}) y el ancho de los imanes permanentes (α_{pm}). Es posible observar que a medida aumenta el α_{pm} , la tensión inducida crece un 20%. Al variar el ancho de los tooth tips (b_{tt}) es posible observar que la tensión inducida aumenta cerca de un 15%, los cual nos da como resultado que la mayor tensión inducida obtenida por la máquina es al tener un mayor ancho de imán permanente y mayor ancho de tooth tips. La diferencia radica en que aumentar el ancho de los imanes permanentes conlleva un aumento significativo en el precio de la

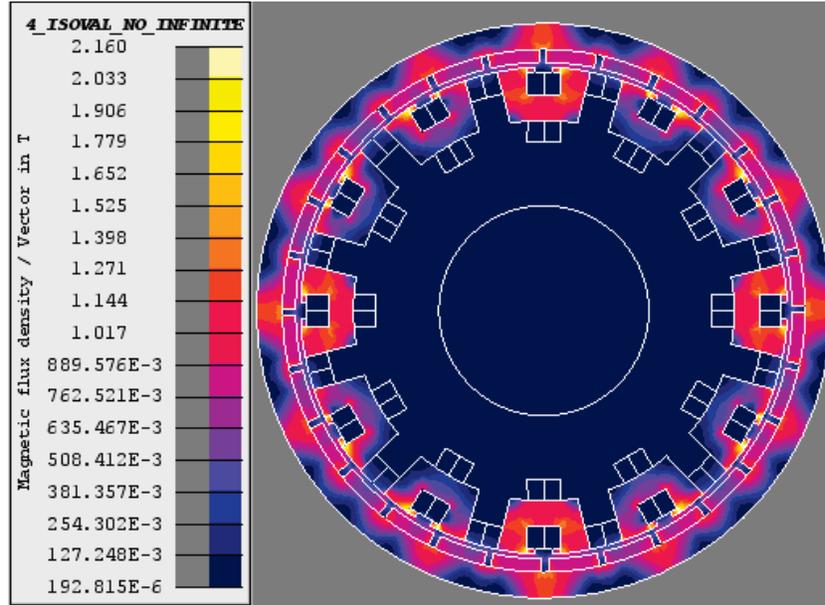


Figura 2.3: Densidad de flujo en la MPMSM de 28 polos y 24 ranuras.

máquina, sin embargo el aumento de los tooth tips no representa un aumento importante en el precio final debido a que la cantidad total de material del estator crece poco.

Es importante observar que, para unos tooth tips de ancho 4 mm y 5 mm, la tensión inducida por la MPMSM es similar a la obtenida por la máquina con estator monolítico.

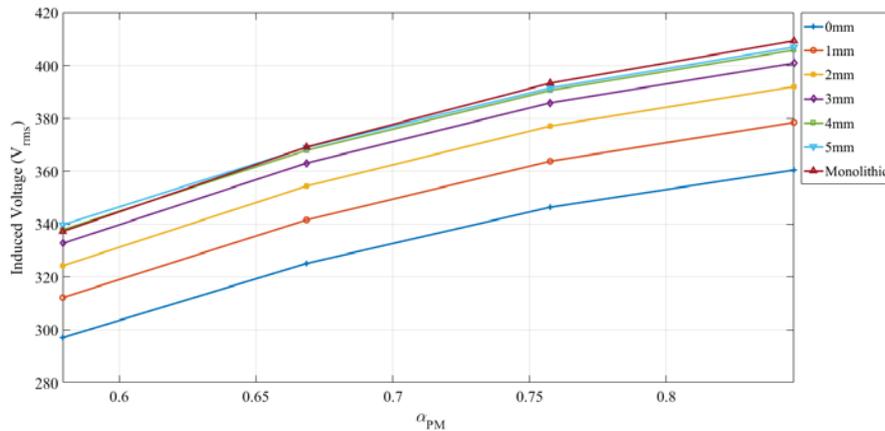


Figura 2.4: Tensión inducida en MPMSM 28 polos 24 ranuras variando el b_{tt} .

La figura 2.5 se presenta el resultado de la evaluación de la máquina cuando se varía el k_g y, al igual que el caso variando el b_{tt} , a medida que aumenta el ancho de los imanes permanentes la tensión inducida también aumenta. Otra característica importante es que la tensión inducida es siempre mejor a la producida por una máquina con estator modular, siendo la configuración con k_g igual a 0.9 la que presenta una mayor tensión inducida siendo menor un 10% que la

producida por el estator monolítico.

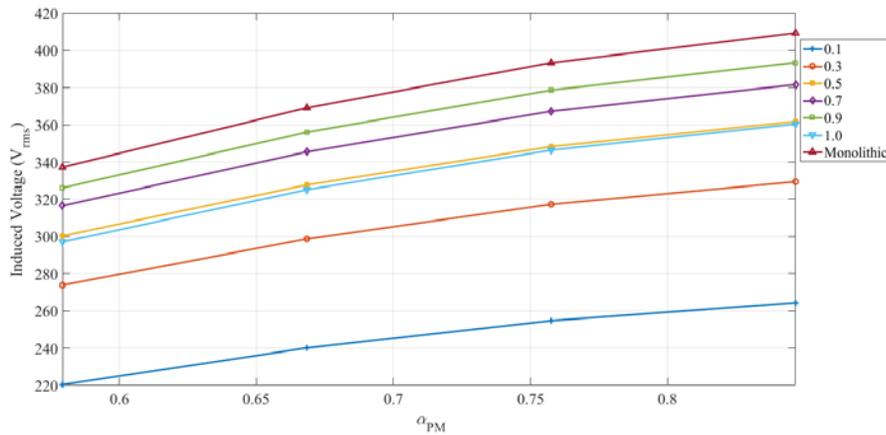


Figura 2.5: Tensión inducida MPMSM 28 polos 24 ranuras variando k_g

2.1.2 Torque Neto

El torque neto producido por la máquina es presentado en las figuras 2.6 y 2.7. En la primera se observa el comportamiento del torque con respecto del ancho de los imanes permanentes y con la variación del ancho en los tooth tips, en la segunda se mantiene la comparación del torque con respecto al ancho de los imanes permanentes pero ahora se analiza el cambio que produce el disminuir la separación entre módulos (o disminuir el k_g).

Comparando ambas gráficas es posible determinar que la variación de los tooth tips produce un torque neto mayor que el variar la separación entre módulos, siendo los tooth tips de ancho 4mm y 5mm los que producen un torque mayor y cercano, en partes igual, al producido por la máquina con estator monolítico. Por otra parte, al variar el k_g , el comportamiento no es tan regular como lo es el variar el ancho de tooth tips, debido a que al tener un k_g igual a 1.0 y uno de 0.5 el torque es igual, sin embargo el mayor torque es el producido por un k_g de 0.9 pero igual es menor al producido por el estator monolítico. Otra diferencia importante de la variación del k_g es que los valores son menos con respecto a cuando se varían los b_{tt} .

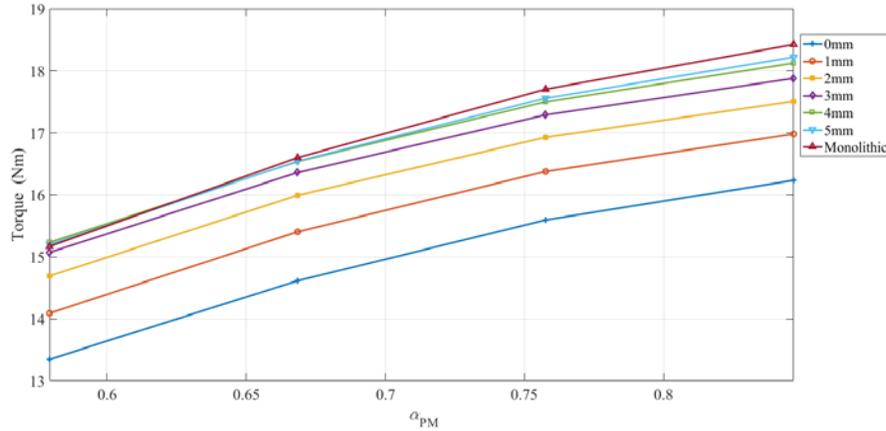


Figura 2.6: Torque al variar el ancho de los tooth tips en la MPMSM 28 polos 24 ranuras.

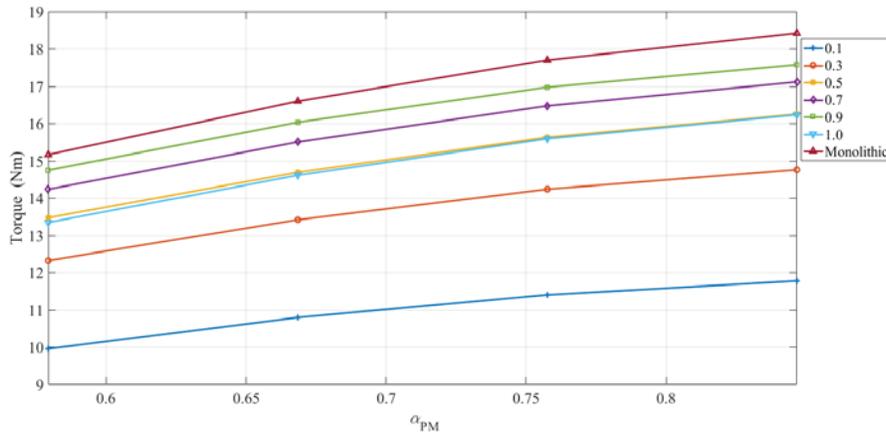


Figura 2.7: Torque al variar el k_g en la MPMSM 28 polos 24 ranuras.

2.1.3 Pérdidas en los imanes de la MPMSM 28 polos 24 ranuras

Las pérdidas en los imanes son producidas por la variación de la densidad de flujo en todo el volumen del imán y, además de disminuir la eficiencia de la máquina, son perjudiciales ya que generan calor adicional pudiendo ocasionar en casos extremos la desmagnetización irreversible del imán.

Existen 2 fuentes principales de variación de flujo en PMSM alimentada con tensiones sinusoidales: las armónicas de permeancia producidas por la superficie irregular del estator (ranuras-dientes) y las armónicas de corriente enlazada producidas por la distribución discreta de la corriente en las ranuras de estator. Las TCW se caracterizan por una alta distorsión en la corriente enlazada que incluyen sub- y superarmónicas.

Para identificar la naturaleza de las pérdidas, se analizarán las pérdidas en el caso de la máquina con y sin carga.

Pérdidas en los imanes con carga

Las figuras 2.8 y 2.9 muestran las pérdidas en los imanes al tener la máquina con carga, la primera muestra las pérdidas al variar el ancho de los tooth tips y la segunda al variar la distancia entre módulos.

Estas pérdidas son producidas por la variación de la densidad de flujo en los imanes, las cuales generan calor adicional en la máquina, el cual en casos extremos puede ocasionar una desmagnetización de los imanes permanentes.

Al comparar ambos gráficos se observa que ambos casos son buenos para reducir las pérdidas, ya que en ambos casos las pérdidas son menores que los presentados por la máquina con estator monolítico. Cabe destacar que las menores pérdidas se obtienen al disminuir la distancia entre los módulos (k_g más pequeños) o al aumentar el ancho de los tooth tips (b_{tt} mayores), siendo la configuración con un k_g igual a 0.3 y 0.1.

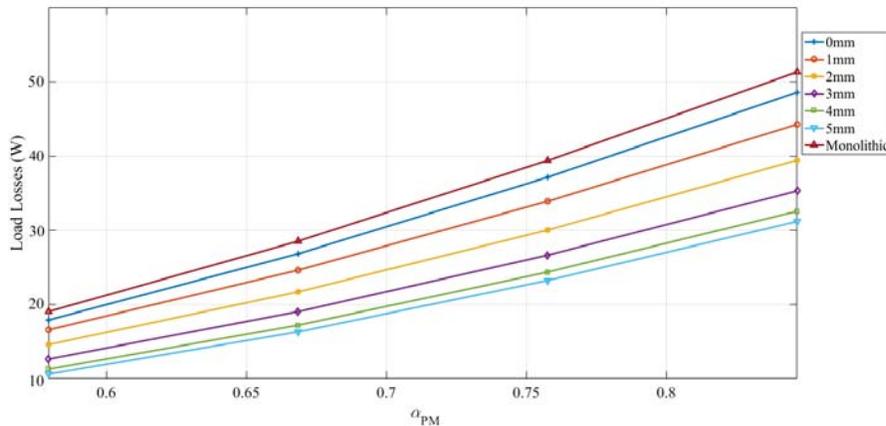


Figura 2.8: Pérdidas con carga en la MPMSM 28 polos 24 ranuras variando b_{tt} .

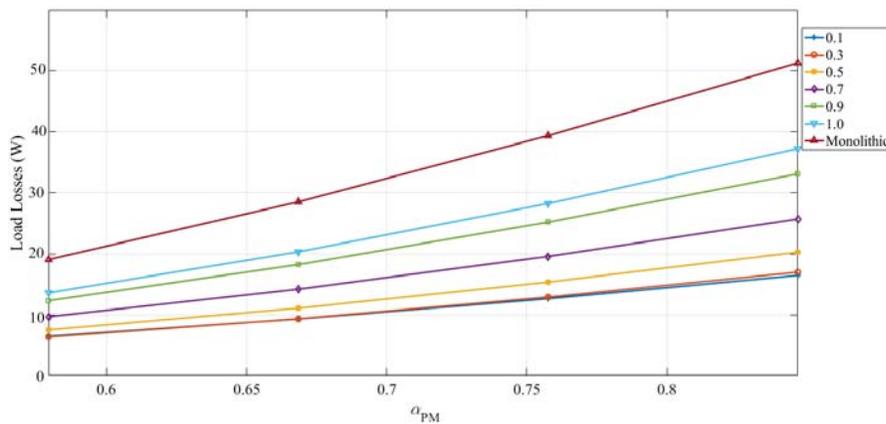


Figura 2.9: Pérdidas con carga en la MPMSM 28 polos 24 ranuras variando k_g .

Pérdidas en los imanes sin carga

Como es mostrado en las figuras 2.10 y 2.11, las pérdidas en los imanes cuando la máquina no está con carga son muy parecidos a los que presenta la máquina con carga, siendo la disminución de la distancia entre los módulos la que presenta menores niveles de pérdidas.

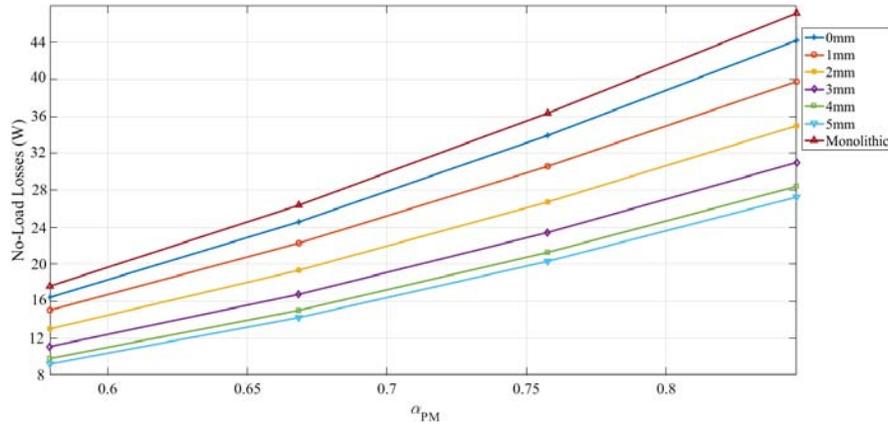


Figura 2.10: Pérdidas sin carga en la MPMSM 28 polos 24 ranuras variando b_{tt} .

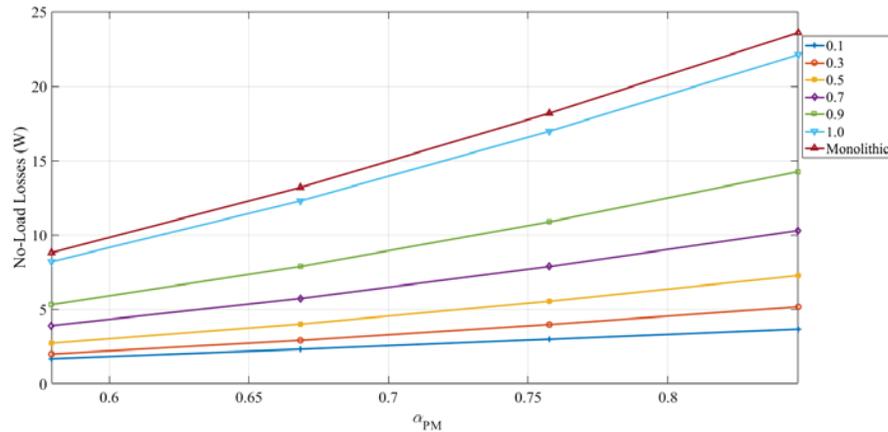


Figura 2.11: Pérdidas sin carga en la MPMSM 28 polos 24 ranuras variando k_g .

Con los resultados obtenidos de las pérdidas de la máquina con carga y sin carga, es posible concluir que la principal fuente de pérdidas en los imanes son las armónicas de permeancia.

2.1.4 Torque de Cogging

El torque de cogging es el producto de la interacción de los imanes y la superficie irregular del estator, este torque produce efectos indeseados en la máquina, los cuales son ruido y vibraciones.

Las figuras 2.12 y 2.13 muestran los valores del torque de cogging para la máquina donde se varía el ancho de los tooth tips y la separación entre módulos respectivamente.

Se observa que el valor máximo del torque cogging resulta mayor cuando se tiene una topología modular. Sin embargo, hay ciertas combinaciones de los parámetros α_{pm} y b_{tt} o α_{pm} y k_g que presentan un torque cogging relativamente bajo comparado con el torque de cogging producido por la máquina con estator monolítico. Por ejemplo, la máquina modular con α_{pm} 0.76 y b_{tt} de 1 mm, 2mm o 3 mm; o con α_{pm} de 0.76 y k_g 0.7 o 0.9 que presentan los niveles de torque de cogging más bajos.

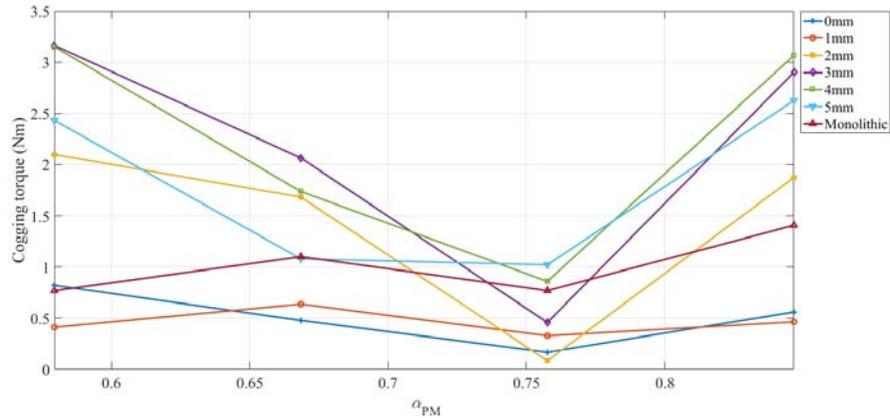


Figura 2.12: Torque de cogging en la MPMSM 28 polos 24 ranuras variando b_{tt} .

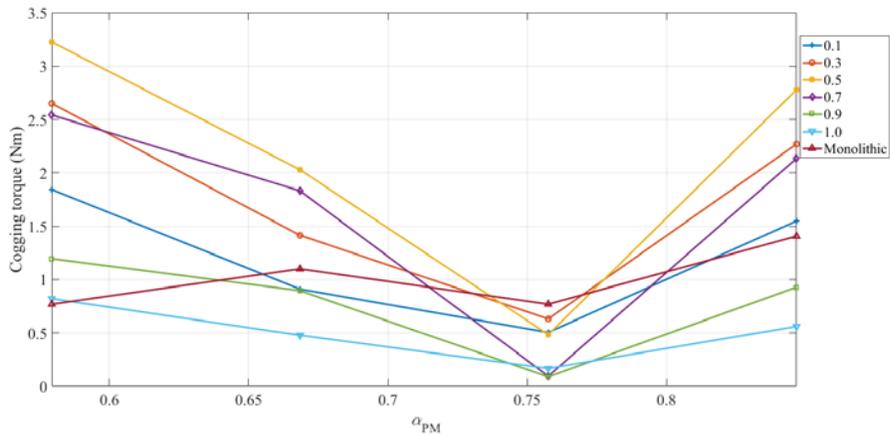


Figura 2.13: Torque de cogging en la MPMSM 28 polos 24 ranuras variando k_g .

2.2 MPMSM 20 polos 24 ranuras bobinado de una capa

Como fue visto en la máquina de 28 polos y 24 ranuras, al ocupar un número de polos ($2p$) y ranuras (Q_s) cercano, el factor de bobinado k_w es parecido al que se obtiene cuando el estator es continuo por eso se buscan combinaciones que entreguen este factor lo más cercano a 1 que sea posible.

Para poder hacer el estudio de la MPMSM se analizó un modelo bidimensional en elementos finitos. Para poder comparar el desempeño de la máquina, también fue creado el modelo con

estator continuo o monolítico, el cual es usado para poder mostrar que la máquina modular puede llegar a tener valores de tensión inducida, torque o torque de cogging cercanos o mejores que la máquina tradicional.

En esta topología se mantiene la metodología de análisis, realizar un estudio en que se pueda comparar la relación entre el k_g con α_{pm} y la de b_{tt} y el α_{pm} . Hay una diferencia en esta topología con respecto a la vista anteriormente, la cual es que los tooth tips apuntan hacia afuera permitiendo mantener las cualidades de tener un estator modular sin interferir con la simpleza del bobinado. La figura 2.14 presenta el modelo de esta máquina junto con la disposición de los tooth tips antes indicadas. Los tooth tips apuntan hacia afuera en esta configuración debido a que el número de polos es menor al número de ranuras, lo que equivale a tener un paso polar (τ_u) es mayor al paso de ranura (τ_r).

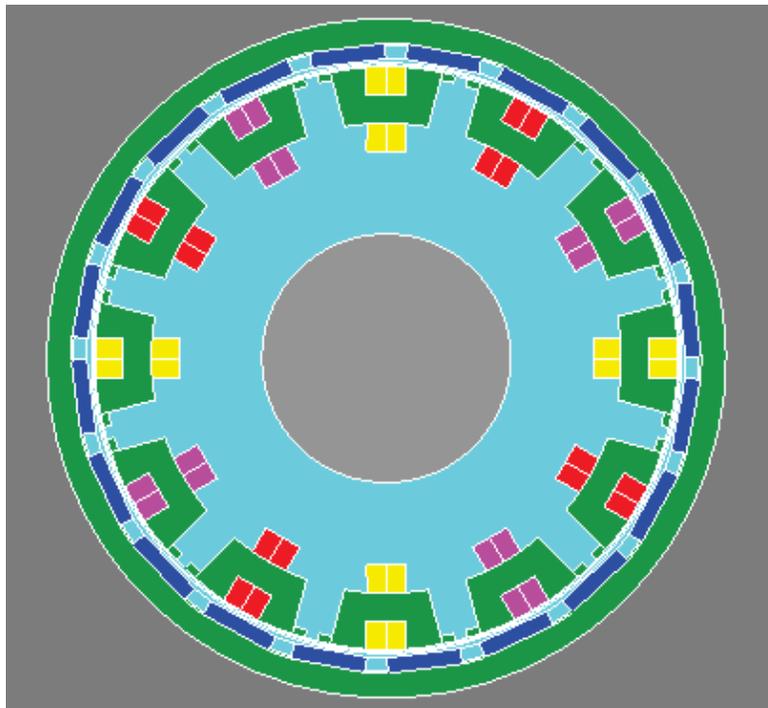


Figura 2.14: Modelo de 20 polos 24 ranuras con tooth tips hacia afuera.

La figura 2.15 muestra los valores de la densidad de flujo en los distintos puntos de la MPMSM, es posible observar que en el yugo del estator hay entre 1.1 y 1.4 T y que los mayores valores se encuentran en los tooth tips, en donde se hayan valores de 2.156 T, lo cual es relativamente alto y se debe al efecto de concentración de flujo que producen los tooth tips y la geometría seleccionada para esta región. Sin embargo su efecto sobre las pérdidas totales es menor ya que los tooth tips representan una pequeña porción del hierro total.

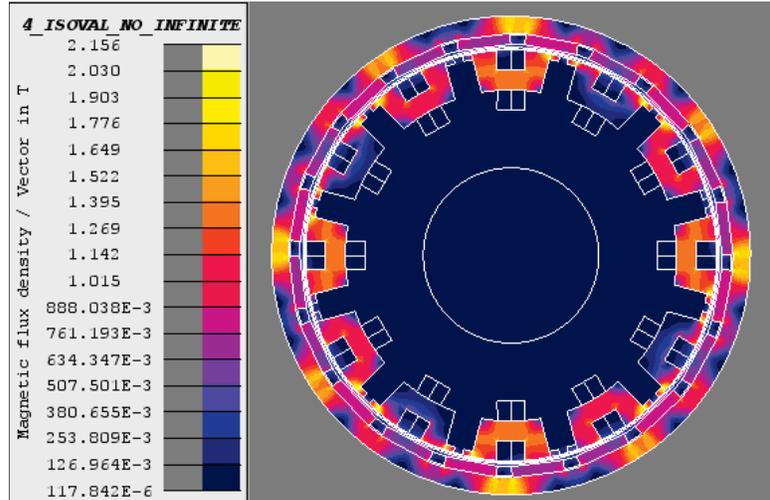


Figura 2.15: Densidad de flujo en la MPMSM de 20 polos y 24 ranuras con bobina de una capa.

2.2.1 Tensión inducida

Las figuras 2.16 y 2.17 muestran los valores de la tensión inducida en la máquina al variar el ancho de los tooth tips (b_{tt}) y el k_g respectivamente, junto a su comparación con el estator monolítico.

Si se comparan ambas figuras, es posible observar que para ciertos anchos de los tooth tips se obtiene mayores niveles de tensión inducida que la obtenida por la máquina con estator monolítico. Por contraparte, en los resultados de variar la separación entre los módulos (k_g), los niveles de tensión son menores que los obtenidos por la máquina con estator continuo.

Concretamente, cuando se tienen b_{tt} igual a 3 mm y 4 mm se tiene una tensión 3% mayor que la obtenida por el estator monolítico para cualquier α_{pm} menor o igual a 0.8, en cambio al variar el k_g la mayor tensión obtenida es menor un 4% que la producida por la máquina con estator monolítico.

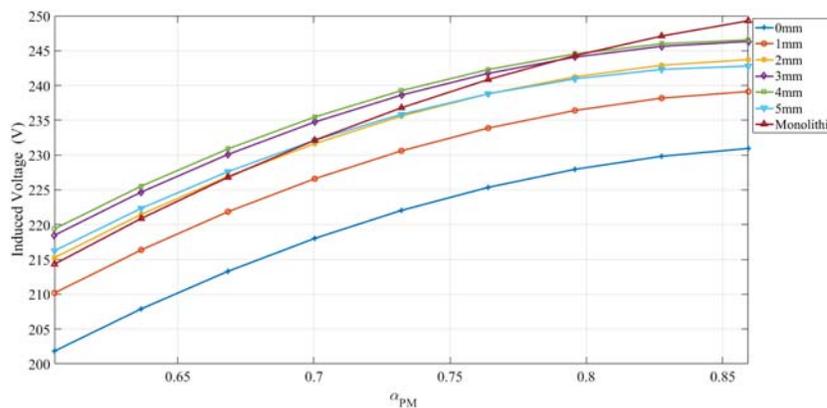


Figura 2.16: Tensión inducida en la MPMSM 20 polos 24 ranuras variando el b_{tt} .

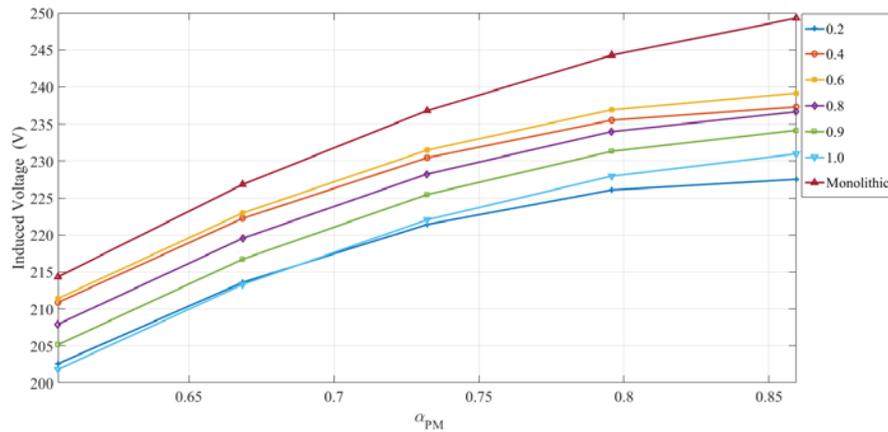


Figura 2.17: Tensión inducida en la MPMSM 20 polos 24 ranuras variando k_g .

2.2.2 Torque Neto

El torque neto producido por la máquina es presentado en las figuras 2.18 y 2.19. En la primera se observa el comportamiento del torque con respecto del ancho de los imanes permanentes y con la variación del ancho en los tooth tips, en la segunda se mantiene la comparación del torque con respecto al ancho de los imanes permanentes pero ahora se analiza el cambio que produce el disminuir la separación entre módulos (o disminuir el k_g).

Al igual que lo ocurrido en las gráficas de la tensión inducida, sólo obtenemos mejores valores de torque neto al variar el ancho de los tooth tips, porque los resultados obtenidos para la variación de la separación entre módulos (k_g) son siempre más bajos que los obtenidos con la máquina con estator monolítico. Los mayores niveles de torque son obtenidos con tooth tips de 3 y 4 mm de ancho y para cualquier valor de α_{pm} .

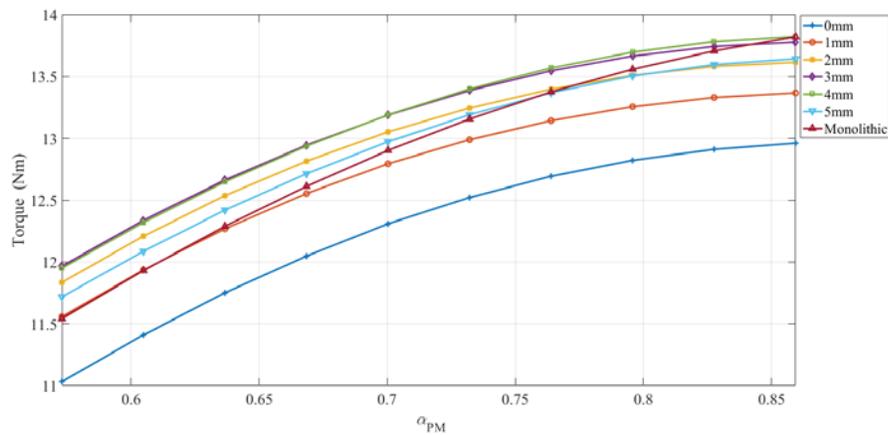


Figura 2.18: Torque al variar el ancho de los tooth tips en la MPMSM 20 polos 24 ranuras.

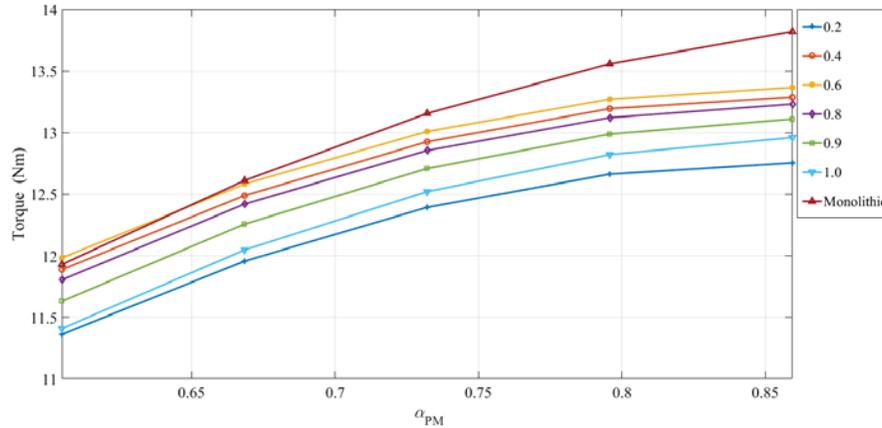


Figura 2.19: Torque al variar k_g en la MPMSM 20 polos 24 ranuras.

2.2.3 Pérdidas en los imanes de la MPMSM con carga y sin carga

Las figuras 2.20 y 2.21 muestran las pérdidas en los imanes al tener la máquina con carga, en ellas se varía el ancho de los imanes y la separación entre módulos respectivamente. Estas pérdidas son producidas por la variación de la densidad de flujo en los imanes, las cuales generan calor adicional en la máquina, el cual en casos extremos puede ocasionar una desmagnetización de los imanes permanentes. Es posible observar que al aumentar el ancho de los tooth tips se obtienen menores niveles de pérdidas en los imanes, siendo los anchos de 3, 4 y 5 milímetros los que producen pérdidas menores a los producidos por la máquina con estator monolítico.

Al observar la gráfica en donde se varió la distancia entre los módulos k_g , se puede observar que también es un buen método para disminuir las pérdidas en los imanes, ya que los niveles presentados son menores a los producidos por la máquina con estator monolítico para las configuraciones con k_g menor a 0.8.

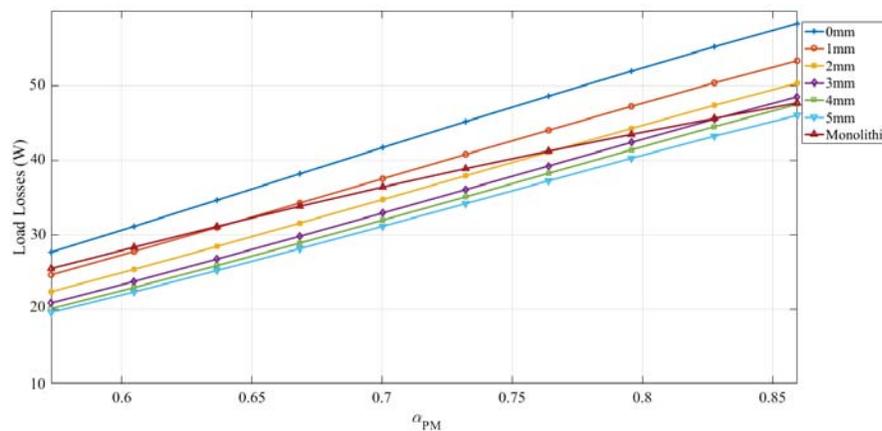


Figura 2.20: Pérdidas con carga en la MPMSM 20 polos 24 ranuras variando b_{tt} .

2 Estudio y optimización paramétrico

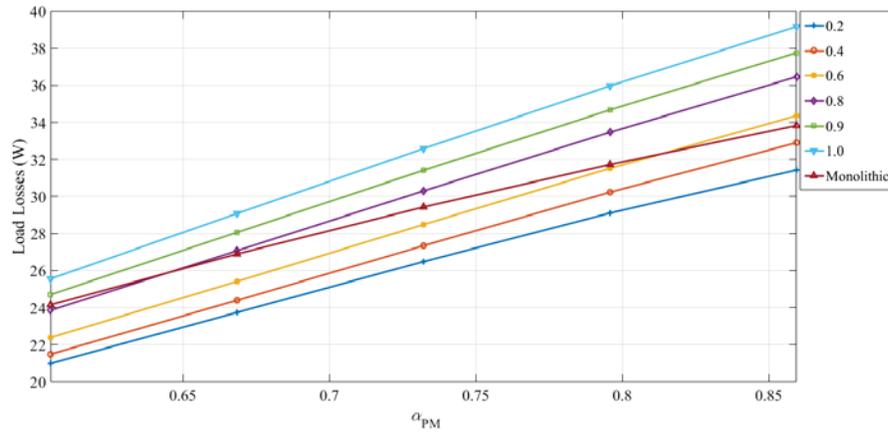


Figura 2.21: Pérdidas con carga en la MPMSM 20 polos 24 ranuras variando k_g .

En las figuras 2.22 y 2.23 se puede observar las pérdidas en los imanes de la máquina sin carga cuando se varía el ancho de los tooth tips y cuando es variada la separación entre los módulos respectivamente.

Al igual que las pérdidas con la máquina con carga, el incremento del ancho de los tooth tips genera menores pérdidas en los imanes, al igual que tener menor espacio de separación entre módulos. Con tooth tips mayores a 1 mm de ancho se obtienen pérdidas menores a los presentes en la máquina con estator continuo; lo mismo ocurre con k_g menores a 0.8.

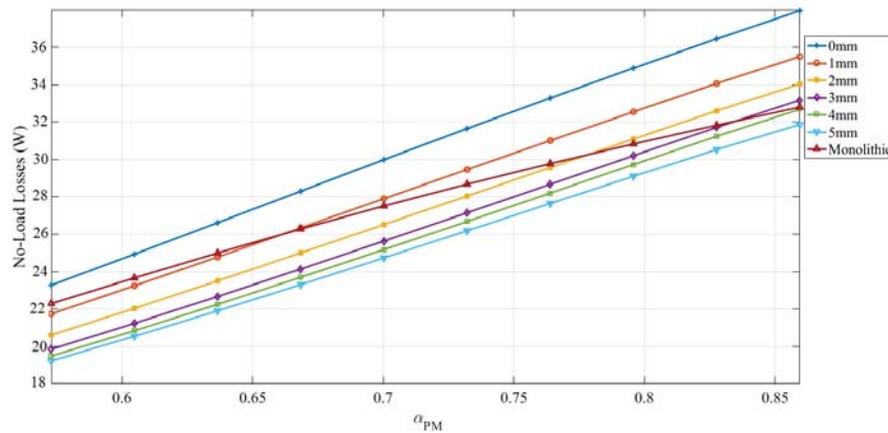


Figura 2.22: Pérdidas en los imanes con la MPMSM sin carga y variando b_{tt} .

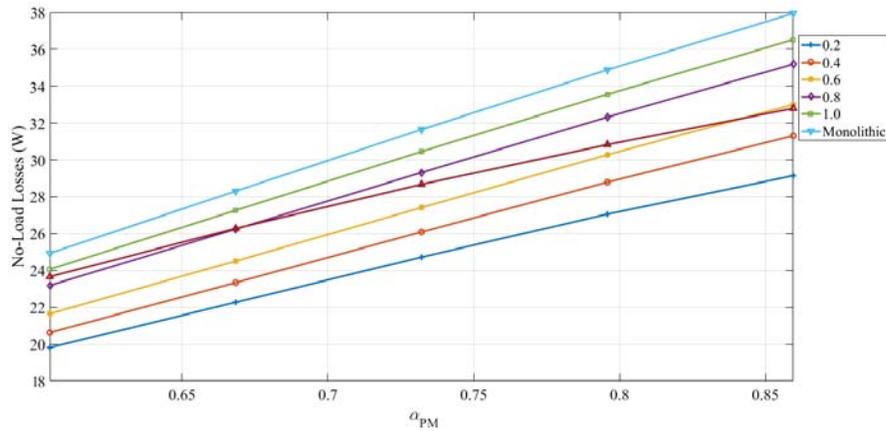


Figura 2.23: Pérdidas en los imanes con la MPMSM sin carga y variando k_g .

2.2.4 Torque de Cogging

La figura 2.24 muestra el torque de cogging en los diferentes valores de los parámetros en la máquina, pudiendo diferenciar que hay ciertos valores para α_{pm} y b_{tt} en donde se tienen unos valores bajos del torque de cogging, siendo cercanos al obtenido con un estator monolítico. Por ejemplo seleccionando un b_{tt} de 4 mm y un α_{pm} de 0.86 se tiene un torque de cogging cercano al de la máquina con estator continuo.

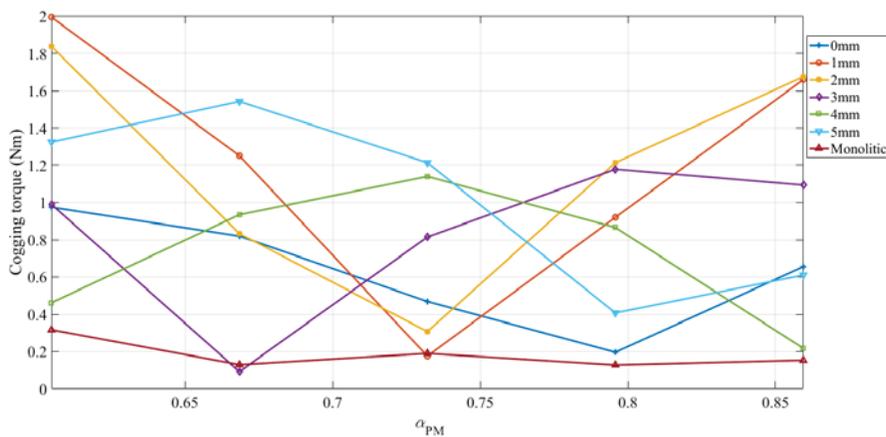


Figura 2.24: Torque de Cogging en la PMSM 20 polos 24 ranuras al variar b_{tt} .

La figura 2.25 muestra el torque de cogging al variar la separación entre los módulos contiguos de estator. Se aprecia que al variar la separación se obtienen valores de torque de cogging más altos en relación a los obtenidos por la máquina con estator continuo, pero hay ciertas configuraciones de α_{pm} y k_g que presentan un torque de cogging cercano al producido por la máquina con estator continuo, por ejemplo al tener α_{pm} de 0.73 y un k_g de 0.8.

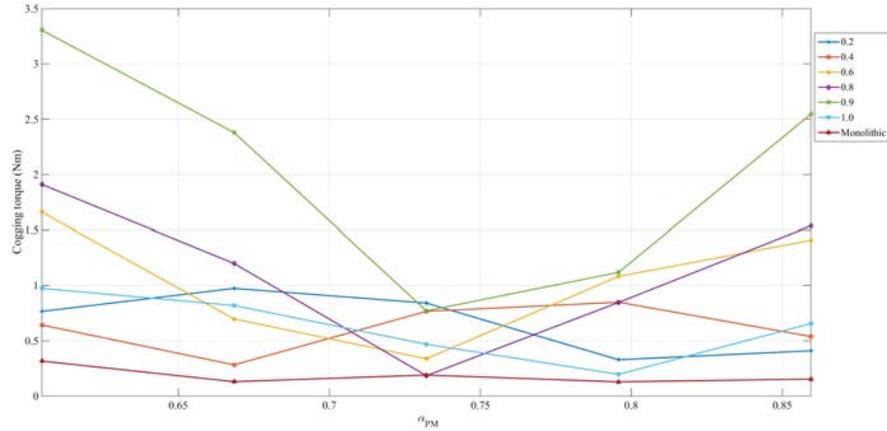


Figura 2.25: Torque de Cogging en la PMSM 20 polos 24 ranuras al variar k_g

2.3 MPMSM 20 polos 24 ranuras con bobinado de doble capa

En la creación del modelo de la máquina modular, es posible optar por una configuración de bobinado de doble capa. Éste tipo de bobinado se caracteriza por que en cada ranura hay dos lados de bobina los cuales están separados por un material aislante. Al comparar las figuras 2.14 y 2.26 se puede ver claramente la diferencia entre el bobinado de una capa y el de doble capa.

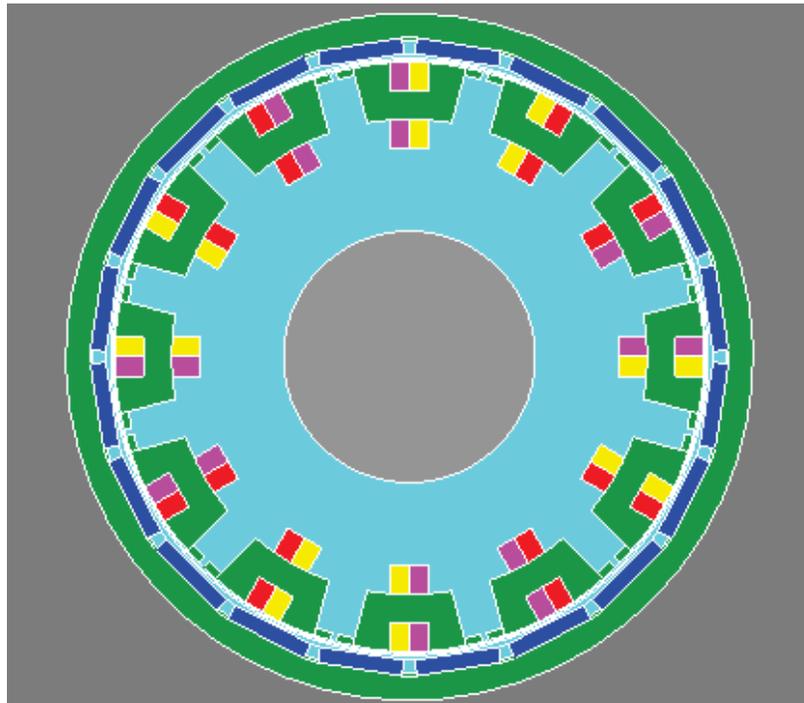


Figura 2.26: Modelo de la máquina 20 polos 24 ranuras con bobinado de doble capa.

2 Estudio y optimización paramétrico

El análisis a realizar para esta máquina inicia con las principales variables electromagnéticas en estudio al variar los parámetros, siendo éstas la tensión inducida y el torque neto de la máquina. Con los datos obtenidos de estas dos simulaciones es posible formar una idea de la viabilidad del bobinado de doble capa en la PMSM con estator modular en forma de U.

Las figuras 2.27 y 2.28 muestran la tensión inducida para una máquina con doble capa al variar el ancho de los tooth tips y la separación entre los módulos respectivamente. En éstas es posible observar que la tensión inducida para la doble capa es siempre menor a la producida por la máquina con estator continuo. La tensión para ambos casos es menor un 20% lo que muestra que para la configuración modular, con módulos en forma de U, no es una buena opción el uso de la doble capa del bobinado.

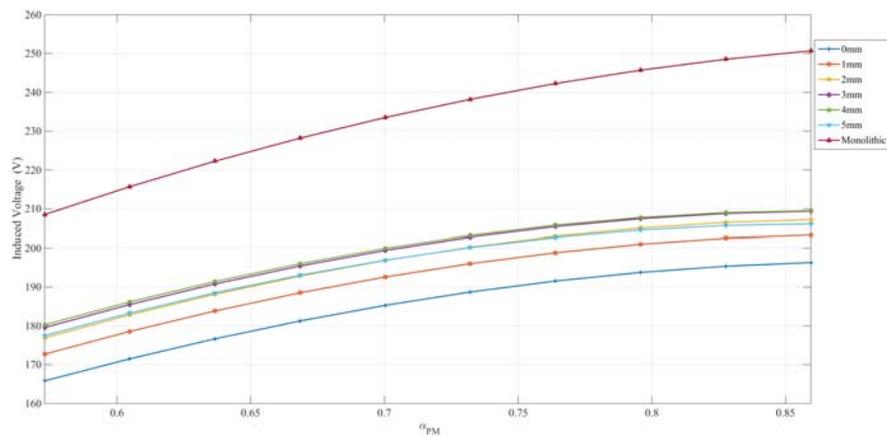


Figura 2.27: Tensión inducida en la MPMSM 20 polos 24 ranuras de doble capa.

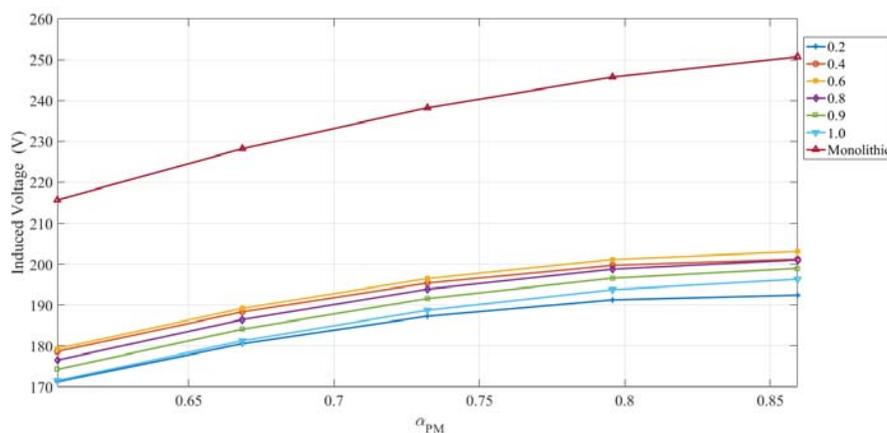


Figura 2.28: Tensión inducida en la MPMSM 20 polos 24 ranuras de doble capa.

Las figuras 2.29 y 2.30 presentan el torque neto de la máquina con doble. Para ambos casos, variando el ancho de los tooth tips y variando la distancia entre los módulos, se obtienen

valores menores que el producido por la máquina con estator continuo. Al igual que en el caso anterior, los niveles son un 20% menor al producido por la máquina con estator continuo.

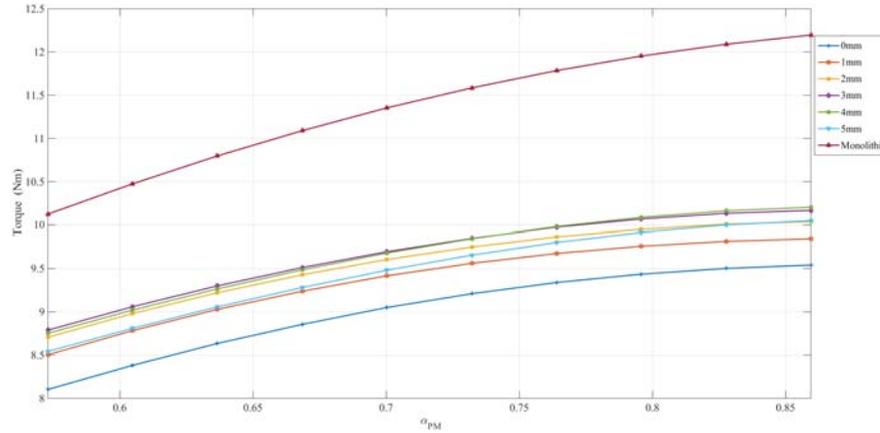


Figura 2.29: Torque neto en la MPMSM 20 polos 24 ranuras de doble capa.

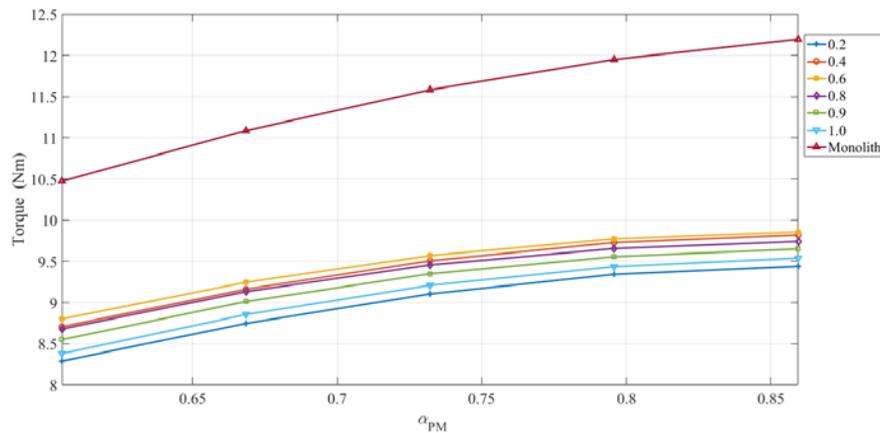


Figura 2.30: Torque neto en la MPMSM 20 polos 24 ranuras de doble capa.

Debido a los resultados negativos obtenidos por esta configuración se descartó seguir adelantándose en ésta variedad de bobinado, y por ende, el análisis del toque de cogging y pérdidas en los imanes no fueron estudiados.

2.4 Estudio de las diferencias en la forma de tensión y las armónicas en las distintas configuraciones

Es necesario dejar en claro las diferencias entre las distintas configuraciones evaluadas anteriormente: PMSM con estator continuo, MPMSM con bobinado en torno al diente, MPMSM con bobinado en torno al yugo sin tooth tips y MPMSM con bobinado en torno al yugo e

incluyendo tooth tips.

Dos variables importantes que exponen las diferencias entre las configuraciones son la forma de la tensión inducida y las armónicas más significativas de cada una.

La máquina sobre la cual se realizará el análisis es la MPMSM de 20 polos y 24 ranuras ya que tiene niveles de tensión inducida muy parecidos a los que presenta la máquina de 28 polos 24 ranuras con respecto a la configuración con estator monolítico de cada una y, con mayor importancia, la orientación de los tooth tips es hacia afuera del módulo, lo cual facilitaría aún más el bobinado para los módulos del estator.

Para visualizar correctamente la diferencia de la forma de onda de cada configuración ha sido necesario realizar las simulaciones usando los mismos valores base de los parámetros de la máquina vistos en la tabla 1.1, pero con parámetros añadidos e iguales para todas las máquinas a comparar. Estos parámetros están presentes en la tabla 2.2, en donde se destaca que el ancho usado para los imanes permanentes es de 28 mm en cada una de las distintas configuraciones de la máquina a estudiar.

Tabla 2.2: Parámetros a mantener constantes en la comparación de las topologías.

Símbolo	Parámetro	Valor	Unidad
p	Pares de polos	10	-
Q_s	Número de ranuras	24	-
N	Vueltas por fase	332	-

Los resultados obtenidos de las formas de onda de tensión son presentados en la figura 2.31, en donde se puede ver con un valor mayor y sinusoidal a la tensión de la máquina con estator continuo. Se agrega la figura 2.32 en la búsqueda de mostrar de una mejor forma la diferencia en la forma de las tensiones de las máquinas siguientes. Después viene la tensión de la máquina modular con bobinas en torno al diente, la cual tiene una forma sinusoidal y corresponde al 96% de la tensión de la máquina con estator continuo. La forma de onda de la máquina con bobinado en torno al yugo y con tooth tips tiene una forma de onda sinusoidal achatada y su valor es el 94.2% de la máquina con estator continuo. La última forma de onda corresponde a la máquina modular con bobinado en torno al yugo y sin tooth tips, la cual es la que presenta un menor valor de tensión, siendo éste del 90% del presentado por la máquina con estator continuo; al comparar esta última con la que si tiene los tooth tips es posible ver el efecto que tiene la inclusión de las puntas de diente en la máquina ya que al entregar un camino de baja reluctancia, el flujo enlazado por las bobinas es mayor debido a que ve menos tiempo el espacio de aire entre los módulos, lo que también explicaría la forma de onda achatada.

La figura 2.33 presenta la diferencia en las armónicas de densidad de flujo en el entrehierro para distintas configuraciones. Si se comparan los valores de la fundamental es posible apreciar que la PMSM con bobinado en torno al yugo y tooth tips es la que presenta el nivel más alto,

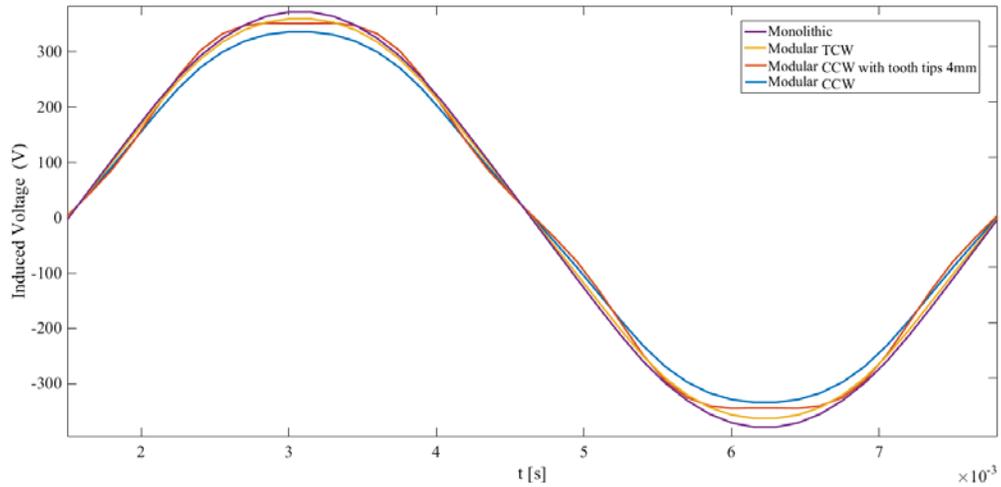


Figura 2.31: Formas de tensión para las distintas configuraciones.

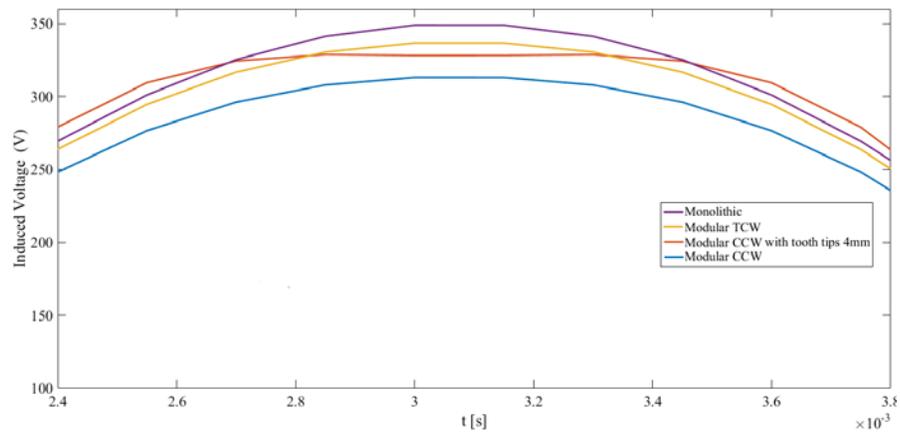


Figura 2.32: Formas de tensión para las distintas configuraciones acercada.

luego le sigue la máquina con estator continuo y, presentando menores niveles, la MPMSM con bobinado en torno al yugo y sin tooth tips junto con la que tiene el bobinado en torno a los dientes. La razón por la cual estas últimas dos tienen los menores niveles es debido a que la configuración usada es la que, según los análisis anteriores, presenta el menor torque de cogging. La MPMSM con bobinado en torno al yugo y con tooth tips es la que tiene los niveles más altos de armónicas.

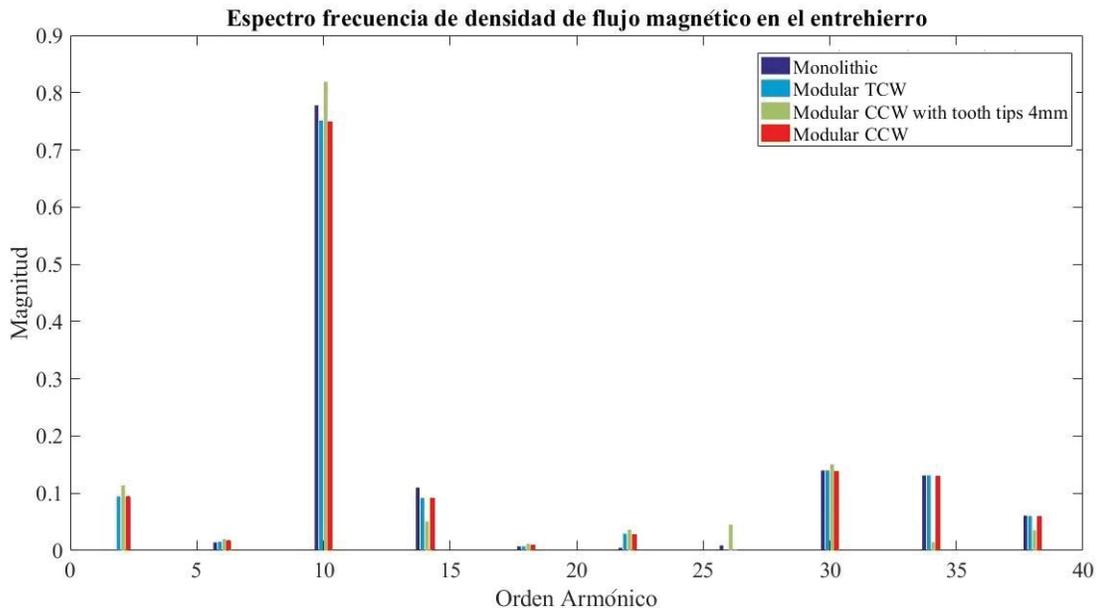


Figura 2.33: Espectro en frecuencia de la densidad de flujo magnético en el entrehierro con la máquina en vacío.

3 Aplicación aerogenerador de baja potencia

Según estimaciones hechas por el Ministerio de Energía de Chile, en el 2018 aún hay más de 15.000 familias sin acceso eléctrico en localidades rurales y/o aisladas, sumándose a éstas existen otras 15.000 familias con un suministro parcial o diésel dependiente. Es por esto que en los planes al corto plazo del Ministerio de Energía se espera crear un mapa de vulnerabilidad energética en Chile con el fin de focalizar acciones a tomar para disminuir la brecha energética actual. Las familias sin acceso eléctrico se ubican principalmente en las zonas cordilleranas de Arica y Parinacota, Tarapacá, sectores costeros de Antofagasta y Atacama, valles de la región de Coquimbo, lugares de difícil acceso de la Patagonia y comunidades indígenas del Bío Bío y la Araucanía.

Otro de los ejes claves incluidos en la planeación del Ministerio de Energía es la energía baja en emisiones, ya que es necesario diversificar y ampliar la matriz energética, potenciando las energías locales considerando la geografía donde será instalada. Uno de los objetivos a alcanzar es cuadruplicar la capacidad actual de generación renovable de pequeña escala al 2022. [1]

Los ejes definidos por el Ministerio de Energía son los que mejor muestran los problemas energéticos en nuestro país, y es por esto que es necesario pensar en soluciones que engloben los problemas detectados. La solución propuesta en esta tesis, tomando en cuenta los objetivos de buscar formas para entregar energía eléctrica para las familias más aisladas y aumentar la generación renovable a pequeña escala, es el diseño y análisis de una máquina sincrónica de imanes permanentes que pueda ser usada para la construcción de generadores eólicos de baja potencia.

3.1 Diseño de la máquina estudiada para ser utilizada en un aerogenerador de baja potencia

Al ver la problemática expuesta en los datos entregados por el Ministerio de Energía surge la necesidad de enfocar el trabajo realizado en los capítulos anteriores para crear una máquina sincrónica de imanes permanentes con estator modular con óptimos niveles de tensión inducida y bajo torque de cogging para que obtenga los beneficios de ser una máquina

sincrónica de imanes permanentes y los beneficios de tener un estator modular.

3.1.1 Generador 10 polos 12 ranuras

Para iniciar el diseño es creado el modelo de una máquina sincrónica de imanes permanentes y estator modular de 10 polos 12 ranuras, eso debido a que es necesario saber si es posible escalar a una menor cantidad de ranuras para el estator una de las máquinas estudiadas anteriormente, debido a que una menor cantidad de ranuras corresponde a una menor cantidad de módulos de estator y por ende un proceso de fabricación, transporte y montaje más rápido y eficiente. Para la simulación es creada la máquina usando a escala los datos de la máquina de 20 polos 24 ranuras y por ende agrandando los módulos para ocupar el espacio correspondiente al doble de los tenido anteriormente.

En la figura 3.1 se observa el modelo hecho de esta máquina y la distribución de la densidad de flujo en ésta. Los mayores niveles de densidad de flujo están presentes en el yugo del rotor de la máquina debido a que los imanes, son el doble de largos que en las máquinas pasadas y el ancho del yugo del rotor es demasiado pequeño para esos niveles de flujo. A pesar de tener estos valores altos de densidad de flujo en el yugo del rotor, es posible observar que los niveles de densidad de flujo de los módulos del estator son los esperados para ésta área de la máquina, por lo tanto es posible asumir que tiene un buen funcionamiento electromagnético en esta área.

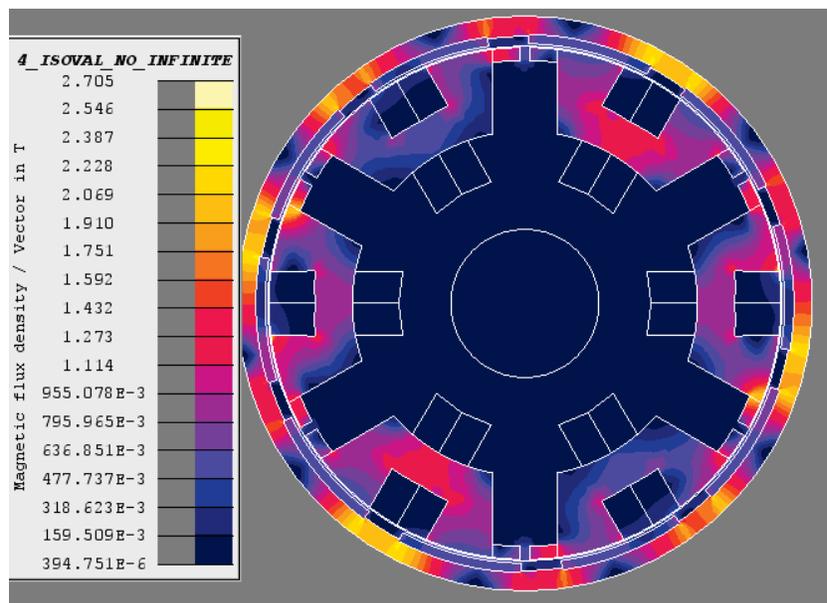


Figura 3.1: Distribución de la densidad de flujo en la máquina de 10 polos 12 ranuras.

La figura 3.2 muestra el torque medio para los distintos anchos de tooth tips, se logra apreciar que varía de una forma considerable dependiendo del ancho de los imanes, pero el verdadero problema de esta topología nace al observar la forma de onda del torque neto, el cual es

3 Aplicación aerogenerador de baja potencia

posible apreciar en la figura 3.3, debido a que la variación de los niveles de torque varían cerca del 40% respecto del torque medio de la máquina. Al variar los parámetros del ancho de los tooth tips se puede disminuir pero sin bajar de una variación del 30% respecto del torque medio. Esta variación tan grande es debido a que al disminuir las ranuras, se disminuye el número de módulos y la separación entre ellos aumenta, lo cual hace que los imanes vean un espacio de aire mucho más grande y por ende un camino de alta reluctancia impidiendo que las bobinas enlacen correctamente el flujo magnético.

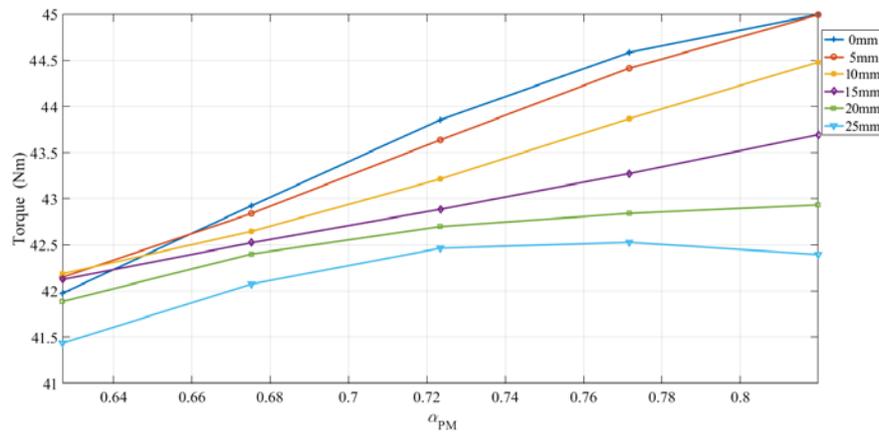


Figura 3.2: Torque neto para distinto ancho de los tooth tips.

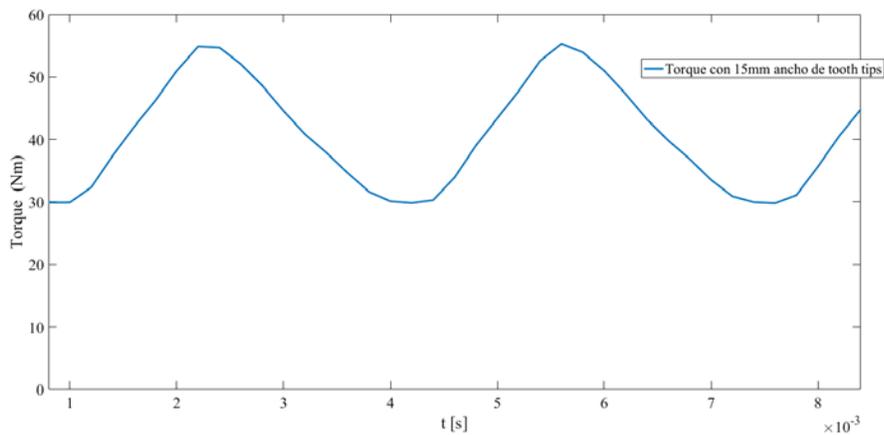


Figura 3.3: Forma de onda del torque neto de la máquina 10 polos 12 ranuras.

Por los datos obtenidos de la simulación anterior es descartado el escalamiento de esta máquina, debido a que al disminuir la cantidad de módulos el tamaño de éstos aumenta y aumenta también la distancia entre éstos, proporcionando un gran espacio de aire entre ellos lo cual conlleva a presentar una variación del torque en la máquina inviable.

3.1.2 Generador 20 polos 24 ranuras

Para continuar con el diseño de un generador sincrónico de imanes permanentes con estator modular volvemos al ampliamente analizado de 20 polos y 24 ranuras. Es elegida esta configuración porque los valores de tensión son muy parecidos a la MPMSM de 28 polos y 24 ranuras, pero a diferencia de esta otra, los tooth tips apuntan hacia afuera lo cual agregaría una mayor simplificación en el proceso de bobinado de los módulos de estator.

Como el objetivo al que se apunta es que el generador trabaje a la misma frecuencia que la red chilena, la cual es de 50Hz, es necesario hacer un cambio en los modelos usados anteriormente por lo tanto es preciso calcular la nueva velocidad de rotación a usar. Para este cálculo se ocupa la ecuación 3.1 la cual relaciona la velocidad sincrónica con la frecuencia y el número de pares de polos. Reemplazando la frecuencia por 50 y los pares de polos por 10, el resultado es que la nueva velocidad de rotación del modelo debe ser de 300 revoluciones por minuto.

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (3.1)$$

El segundo cambio necesario para realizar el nuevo modelo es el número de vueltas por fase de las bobinas, pero para realizar este cálculo es necesario conocer y desarrollar un conjunto de ecuaciones que son presentadas a continuación.

Ecuaciones necesarias para el dimensionamiento del generador

Para iniciar el dimensionamiento es necesario tener claro las dimensiones de las ranuras y el diámetro del estator y rotor. La ecuación de la potencia de una máquina sincrónica es la que se muestra en la ecuación 3.2, la cual relaciona la potencia de la máquina con el torque y en la velocidad de ésta.

$$P = T \cdot \omega_s \quad (3.2)$$

Como ya sabemos la velocidad de la máquina, aunque el cálculo anterior fue hecho en revoluciones por minutos y no en velocidad angular como está expresado en la ecuación de la potencia, es necesario calcular el torque de la máquina. Para este fin se presenta la ecuación 3.3, la cual nace del método del estrés tangencial para el cálculo del torque de la máquina en el cual se relaciona el torque con el estrés tangencial, el diámetro y largo de la máquina.

$$T = \sigma_{tan} \pi \frac{D^2}{2} l \quad (3.3)$$

Para conocer el estrés tangencial es necesario recurrir a la ecuación 3.4, la cual relaciona el estrés tangencial con la densidad de corriente lineal peak o no y la densidad de flujo peak en el entrehierro.

$$\sigma_{tan} = \frac{\hat{A}\hat{B}_\delta \cos \varphi}{2} = \frac{A\hat{B}_\delta \cos \varphi}{\sqrt{2}} \quad (3.4)$$

Reacomodando las dos ecuaciones anteriores, se obtiene la siguiente ecuación para el torque de la máquina. En la ecuación 3.5 se une en una sola las ecuaciones de torque y estrés tangencial para poder observar claramente los componentes que afecta el torque de la máquina, aunque aún es necesario saber la expresión de la densidad de corriente lineal peak.

$$T = \frac{\hat{A}\hat{B}_\delta \cos \varphi \pi D^2 l}{2} \quad (3.5)$$

La expresión del valor peak de la densidad de corriente lineal se observa en la ecuación 3.6, la cual se relaciona con varias características de la máquina como lo es el número de fases, números de vueltas por bobina, diámetro y factor de bobinado.

$$\hat{A} = \frac{2m\hat{I}NK_\omega}{(\pi D)} \quad (3.6)$$

Para tener todos los datos que se necesitan para encontrar la potencia de la máquina, hace falta saber el número de vueltas por fase. La ecuación 3.7 muestra la relación de la tensión de fase con el número de vueltas por fase, la velocidad de la rotación, el factor de bobinado, el valor peak de la densidad de flujo en el entrehierro, el diámetro, el largo y el numero de pares de polos de la máquina. Si sabemos la tensión de fase esperada, es posible despejar el número de vueltas por fase.

$$V_f = \frac{1}{\sqrt{2}} \omega_s K_\omega N \hat{B}_\delta \frac{Dl}{p} \quad (3.7)$$

3.1.3 Dimensionamiento máquina 20 polos 24 ranuras

Conociendo las expresiones necesarias para hacer el modelo de la máquina de 20 polos 24 ranuras a 300 revoluciones por minuto es posible calcular los valores que necesitamos. Para iniciar estos cálculos es necesario saber el número de vueltas por fase de las bobinas, las cuales son obtenidas con la ecuación 3.7 y sabiendo que la tensión peak es de 311.13 volts junto con un peak de densidad de flujo del entrehierro de 0.7626 Tesla, una profundidad de 8 centímetros para llegar a 1kW de potencia que es la buscada.

Después de resolver la ecuación 3.7 con los valores anteriormente expuestos, se llega a que el número de vueltas necesario es de 453 vueltas por fase.

Con esta cantidad de vueltas por fase es posible calcular la densidad de corriente lineal usando la ecuación 3.6. Sabiendo que el generador es trifásico y que la corriente de ranura es de 2.503[A] en conjunto con el número de vueltas anteriormente calculados, la densidad de corriente lineal peak es de 22371 A/m.

Con los valores hasta ahora calculados, es posible acercarse a uno de los últimos pasos antes de llegar a la potencia de la máquina. El estrés tangencial presentando en la ecuación 3.4, para este generador en particular, es de 8530.2 [Pa] , los cuales generan, según la ecuación 3.3, un torque de 37.4846 [Nm] y por ende una cantidad de 1178 [W] de potencia del generador si reemplazamos los datos en la ecuación 3.2.

Los cálculos anteriormente explicados y desarrollados son presentados en la tabla 3.2, la cual resume la máquina propuesta para ser un generador eólico de baja potencia, la cual a continuación será analizada mediante elementos finitos para comparar con los resultados obtenidos con las ecuaciones.

Tabla 3.1: Resumen generador 20 polos 24 ranuras mediante método estrés tangencial.

Símbolo	Parámetro	Valor	Unidad
p	Pares de polos	10	-
Q_s	Número de ranuras	24	-
ω_m	Velocidad de rotación	300	rpm
V_f	Tensión peak	311.13	V
N	Vueltas por fase	453	-
B_δ	Densidad de flujo en el entrehierro	0.7626	T
\hat{A}	Densidad de corriente lineal peak	22371	A/m
σ_{tan}	Estrés tangencial	8530	Pa
T	Torque	37.48	Nm
P	Potencia neta	1178	W

Los cálculos anteriormente realizados muestran que es posible construir un generador de 1 kW de potencia usando los valores de ranura modelados anteriormente y alargando el estator para alcanzar ese valor de potencia. Para continuar con el análisis de este generador el siguiente paso es modelarlo en elementos finitos y compararlos con los cálculos realizados en

el dimensionamiento del generador.

3.1.4 Modelamiento Generador 20 polos 24 ranuras

Para alcanzar la potencia esperada de 1kW es necesario aumentar la profundidad del estator alcanzando los 8 centímetros pero manteniendo las dimensiones iniciales de ésta máquina. Otro de los cambios calculados es la disminución de la velocidad de rotación del generador a 300 revoluciones por minuto para poder operar a la frecuencia de la red eléctrica chilena.

Con todos estos datos en mente es creada la tabla 3.2 la cual, complementada con los parámetros base mostrados en la tabla 1.1, presenta los parámetros que fueron utilizados en la creación del modelo final presentado para el generador eólico de baja potencia.

Tabla 3.2: Datos de las dimensiones principales generador 20 polos 24 ranuras.

Símbolo	Parámetro	Valor	Unidad
l_{Fe}	Longitud del hierro	80	mm
p	Pares de polos	10	-
ω_m	Velocidad de rotación	300	rpm
N	Vueltas por fase	453	-
b_{tt}	Ancho de los tooth tips	4	mm
α_{pm}	Relación ancho del imán permanente	0.86	-

El par α_{pm} y b_{tt} fueron elegidos según el análisis realizado a la máquina de 20 polos y 24 ranuras, en donde con estos valores se obtenía el menor valor para el torque de cogging y mayores prestaciones en el torque neto de la máquina. En las gráficas 2.18 y 2.24 es posible observar que éstos valores son los que presentan las mejores prestaciones para la máquina y tomándolos en cuenta se crea el modelo del aerogenerador presentado a continuación.

La distribución de la densidad de flujo entregada por el modelo en elementos finitos es mostrada en la figura 3.4, en ésta se puede observar que los valores de la densidad de flujo son los esperados para este tipo de máquina como fue presentado en la tabla 2.1, aunque con un ligero aumento en la densidad de los tooth tips el volumen de las puntas de dientes es una pequeña fracción del hierro total de la máquina por lo que su efecto en las perdidas totales es despreciable.

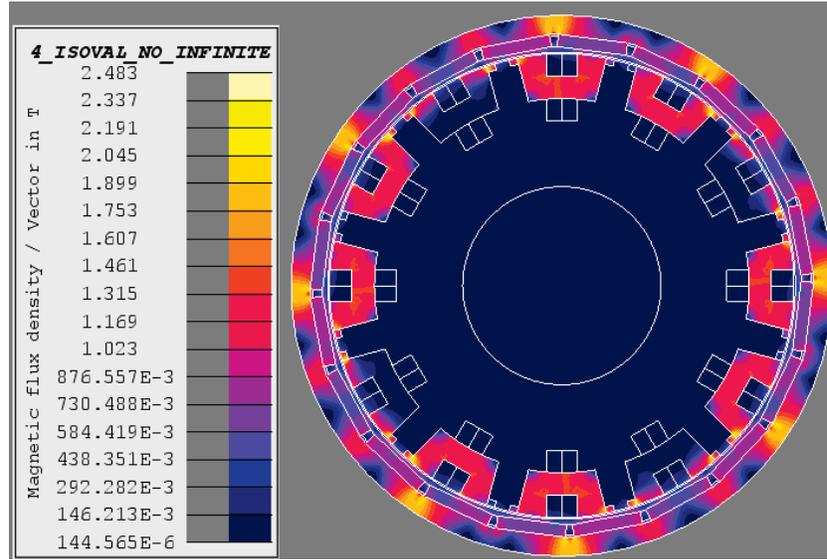


Figura 3.4: Distribución de la densidad de flujo generador 20 polos 24 ranuras.

Tensión inducida

La figura 3.5 muestra la forma de onda de tensión del aerogenerador de baja potencia, la tensión peak es de 283.75 [V]. Ésta tensión es menor a la esperada con los cálculos mostrados anteriormente, en los cuales se buscaba una tensión de 311.13 [V] debido a la forma de onda achatada obtenida con esta topología. La forma de onda es igual a la mostrada en 2.32, una sinusoidal achatada la cual, como fue visto anteriormente, es producto de tener tooth tips en los módulos del estator.

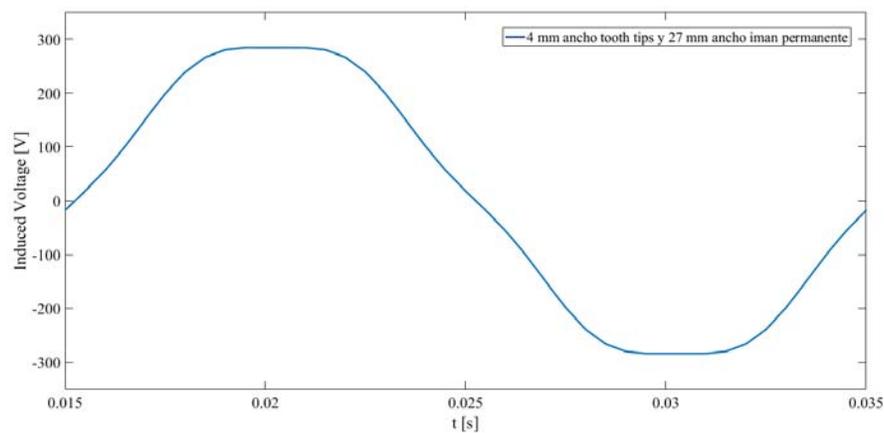


Figura 3.5: Tensión inducida aerogenerador de baja potencia.

Torque Neto

La figura 3.6 presenta la forma de onda del torque neto del aerogenerador de baja potencia analizado en elementos finitos. El torque medio entregado por el análisis en elementos finitos es de 35,52 [Nm], el cual es un valor cercano al obtenido mediante el método del estrés tangencial para calcular la potencia.

En este caso la diferencia con respecto de las ecuaciones presentadas en el método del estrés tangencial es de un 5%, esto representa un pequeño error con respecto a lo calculado usando el método de elementos finitos que tiene una precisión mayor al realizar el análisis.

La potencia generada por esta máquina es de 1116 [W].

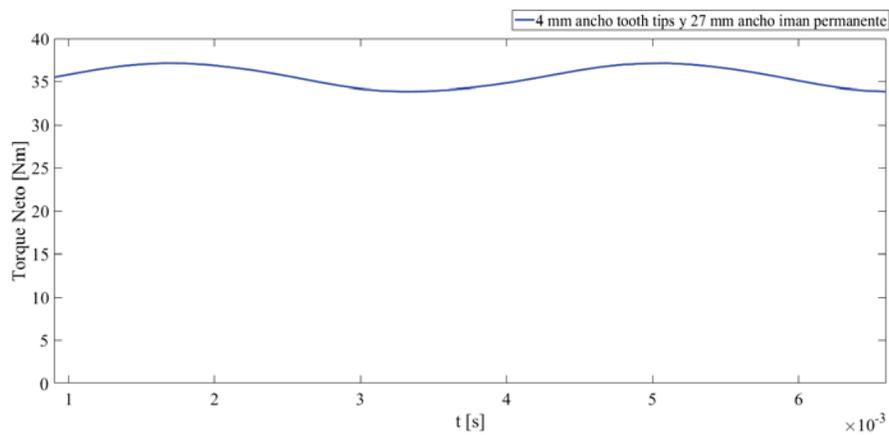


Figura 3.6: Torque neto aerogenerador baja potencia.

Pérdidas con carga

Observando la figura 3.7 se aprecia que las pérdidas con la máquina con carga son bajas, cercanas a 9 [W] de pérdidas en los imanes.

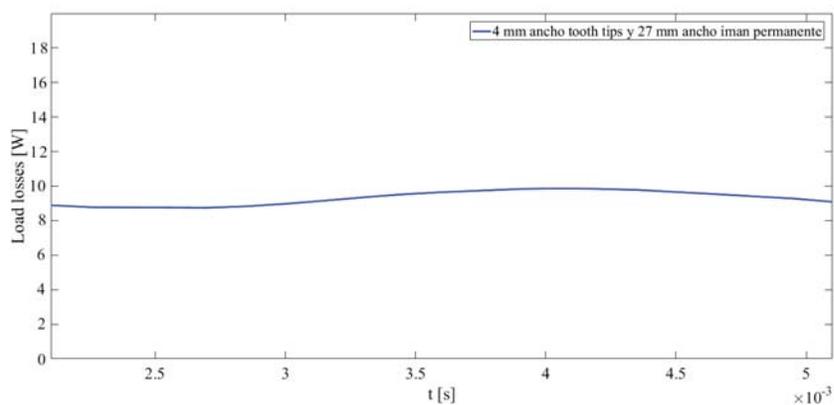


Figura 3.7: Pérdidas con carga aerogenerador de baja potencia.

Torque de Cogging

La figura 3.8 presenta el torque de cogging del aerogenerador al usar la configuración de un α_{pm} de 0.86 y b_{tt} de 4 milímetros. Ésta combinación fue el resultado de los estudios anteriores en donde se obtenía un torque neto elevado en conjunto con un torque de cogging bajo y cercano al producido por la máquina con estator continuo.

El valor máximo del torque de cogging es de 1.32 [Nm].

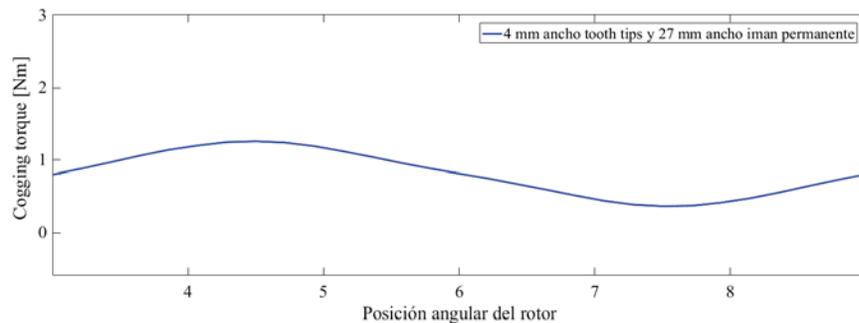


Figura 3.8: Torque de cogging aerogenerador de baja potencia.

Resumen de resultados aerogenerador

En resumen, el aerogenerador eólico resultante del estudio realizado tiene una relación del paso polar con el ancho de los imanes (α_{pm}) de 0.86, el cual se obtiene al tener imanes con un ancho de 27 milímetros y en conjunto con este α_{pm} , el ancho de los tooth tips es de 4 milímetros debido a que esta configuración presenta un torque neto mayor al obtenido por la máquina con estator continuo y un torque de cogging bajo y cercano al presentado por el estator monolítico.

Los resultados obtenidos mediante elementos finitos muestran una diferencia de 5% con respecto a los cálculos realizados con el método del estrés tangencial. El error presentado es bajo teniendo en cuenta las variadas simplificaciones que se realizan con el método del estrés tangencial para presentar ecuaciones que facilitan el cálculo y no demora ni el 5% que demora una simulación en elementos finitos.

En la tabla 3.3 se presentan los resultados obtenidos mediante el análisis en elementos finitos, el cual es posible comparar con los obtenidos en la tabla 3.2.

Los valores obtenidos son válidos para afirmar que es posible hacer un aerogenerador de baja potencia con una máquina sincrónica de imanes permanentes y estator modular, la cual presenta las diversas ventajas de usar imanes permanentes (por ejemplo el bajo mantenimiento que requieren) y a la vez las ventajas de tener un estator modular.

3 Aplicación aerogenerador de baja potencia

Tabla 3.3: Resumen generador 20 polos 24 ranuras mediante análisis en elementos finitos.

Símbolo	Parámetro	Valor	Unidad
p	Pares de polos	10	-
Q_s	Número de ranuras	24	-
ω_m	Velocidad de rotación	300	rpm
V_{rms}	Tensión rms	210.52	V
N	Vueltas por fase	453	-
T	Torque	35.52	Nm
P	Potencia neta	1121	W

Discusión y conclusiones

Aunque nos encontramos en el siglo XXI y Chile suele encabezar los listados como uno de los países más desarrollados y con mejor proyección de Sudamérica, aún existen muchas brechas por solucionar y una de ellas es, sin duda, el acceso a la electricidad. El número de familias sin acceso, o con acceso parcial, a la energía eléctrica es alarmante y crea un brecha cultural y social tremenda entre quienes tienen el acceso garantizado y cada día enfocándose en mejorar la percepción de los usuarios. Uno de los métodos que se van haciendo más accesibles con el paso de los años es el de usar las energías renovables para disminuir la brecha energética y, como se plantea en este trabajo, la energía eólica es una opción a evaluar. Las máquinas sincrónicas de imanes permanentes pueden servir para funcionar como generadores aunque presentan algunos inconvenientes que es posible superar, o disminuir, mediante una correcta elección de los parámetros que influyen en estas dificultades, como lo es por ejemplo el torque de cogging.

Para lograr la elección de estos parámetros es sumamente necesario el realizar un análisis electromagnético a la misma a modo de respaldo y para ayudar a encontrar el ajuste perfecto con el cual es posible minimizar los defectos que tienen estas máquinas, también este análisis electromagnético permite poder evaluar distintas topologías con sus fortalezas y debilidades para llegar a elegir una y enfocarse en ella.

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; la tensión inducida, el torque de cogging, las pérdidas de los imanes permanentes y el torque neto de la máquina. Estos fenómenos se ven afectados fuertemente por la disposición geométrica de la máquina.

El efecto que producen los tooth tips, o puntas de dientes, en la máquina fue revisado y demostrado que éstos ayudan a conducir el flujo magnético producido por los imanes hacia el módulo del estator para así ser dirigido al imán contiguo, lo cual produce un aumento en el flujo enlazado por la bobina y en consecuencia un aumento en la tensión inducida por la máquina.

Fueron evaluados distintos cambios en la geometría de los módulos, por ejemplo el factor k_g , el cual es la distancia entre los módulos o las puntas de dientes. En conjunto a estos se evaluaron distintas topologías, 28 polos 20 ranuras, 20 polos 24 ranuras o 10 polos 12 ranuras

por ejemplo. De los cuales las conclusiones obtenidas son

- El factor k_g , el cual es la distancia entre los módulos fue evaluado para ver si su inclusión disminuía el torque de cogging al minimizar la variación de la reluctancia entre los módulos, pero fue demostrado que no es muy efectivo al aumentar la tensión inducida, ya que se comparó con la adición de tooth tips los cuales resultaron mucho más efectivo y un gasto menor al no aumentar el costo de hierro que suponía el ensanchar los módulos del estator. Por esta razón fue descartada esta solución como forma de mejorar la máquina.
- 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).
- Como era de esperar, el aumento del ancho de los imanes permanentes genera una mayor densidad de flujo, pero por esta misma razón es necesario encontrar un equilibrio entre el tamaño de los imanes con el costo que éstos representan para la construcción de la máquina.
- Comparando el uso de tooth tips y la variación de k_g , la alternativa que mejores resultados entrega es el usar tooth tips por lejos, ayudando a disminuir de forma considerable el torque de cogging para ciertas configuraciones acercándose al producido por una máquina con estator monolítico. Es necesario recalcar que el torque de cogging es un fenómeno intrínseco para las máquinas que usan imanes permanentes en el rotor, sin poder eliminarlo en su totalidad, pero sí atenuarlo lo suficiente para que no afecte al par efectivo de la máquina.
- El uso de tooth tips tiene grandes ventajas tanto en la disminución del torque de cogging como en aumentar el flujo enlazado para lograr un mayor par efectivo tanto para la máquina de 28 polos 24 ranuras como para la de 20 polos 24 ranuras. La diferencia radica en que la relación del paso polar y el paso de ranura para ambos son distintas y por ende los tooth tips tienen que ser hacia adentro para el caso de la máquina de 28 polos y 24 ranuras, y de apuntar hacia afuera para el caso de la máquina de 20 polos 24 ranuras.
- La diferencia de la posición de los tooth tips permite elegir la máquina de 20 polos 24 ranuras como el objeto de estudio más en profundidad, debido a que permite mantener la simpleza en el bobinado ya que no cierra el paso hacia la ranura y permite una completa utilización de ésta para no disminuir el factor de relleno de ésta y mantener los beneficios de tener la topología modular.

- Otro punto trabajado fue el de escalar la topología estudiada para diseñar un aerogenerador con una menor cantidad de ranuras, y por ende de módulos, buscando una simplificación aún mayor de la producción y del montaje de la máquina. Los resultados de este estudio mostraron que no es recomendable disminuir la cantidad de módulos debido al aumento de espacio de aire entre los módulos, lo que conlleva a que el torque varíe demasiado (entre un 30 % y 40 % según lo evaluado) y que hace inviable la máquina.
- Al terminar las evaluaciones de las distintas topologías se presenta una comparación entre las formas de onda de tensión y armónicas de los distintos tipos de configuraciones (estator continuo, MPMSM bobinado en torno al diente, MPMSM bobinado en torno al yugo con y sin tooth tips) en donde se puede observar el efecto de los tooth tips en la forma de onda. En conjunto a esto se demuestra nuevamente que la topología que más se acerca a la de la máquina con estator continuo es el de la MPMSM con bobinado en torno al yugo y con tooth tips elegidos correctamente.
- Se realizó el estudio de el bobinado de una capa y la diferencia con el bobinado de doble capa, en el cual fue ampliamente más ventajoso el bobinado de una capa, presentando niveles de tensión mucho más altos que los presentados por el de doble capa. También es necesario destacar que en ambos casos fueron utilizados tooth tips para ver los límites de estos bobinados y poder compararlos a los niveles de tensión y torque presentados por la máquina con estator continuo.
- Para finalizar el informe se presenta el dimensionamiento de un aerogenerador de 20 polos 24 ranuras, en donde se presentan las ecuaciones y se realizan todos los cálculos necesarios para encontrar la potencia de la máquina, la cual es comparada con la obtenida por la simulación en elementos finitos. De esta comparación se obtuvo un error de aproximadamente el 6% el cual es debido a todas las simplificaciones realizadas para que el cálculo no sea tan complicado. Lo bueno de esto es que la complejidad de las ecuaciones es baja junto con el error que se obtiene. Lo que permite asegurar que el método del estrés tangencial es una muy buena herramienta para el dimensionamiento de las máquinas.

Como trabajo a futuro queda la creación del aerogenerador funcional, ya que en esta tesis se alcanzó solamente a crear la máquina que podría funcionar en un aerogenerador de baja potencia sin pensar en los retos de control de velocidad de un verdadero aerogenerador y el posible almacenamiento de la energía que produce ya que los aerogeneradores no tienen un horario en que funcionan, pero sí aparece el reto de que la velocidad del viento es variable durante el día y los meses.

Otro trabajo a considerar es el hacer el estudio económico de este aerogenerador con miras a compararlo con el precio y prestaciones que tienen los paneles solares para la misma potencia propuesta en este trabajo. Al existir las herramientas para ver la velocidad del viento y radiación solar en distintos puntos del país es posible encontrar ciertas regiones en donde es mejor la

utilización de paneles solares, como lo es en el norte de Chile debido a que posee los niveles más altos de radiación solar del mundo, o las regiones del sur de Chile, que es donde existe una brecha energética con los habitantes de las regiones más centrales, debido a que en el sur se encuentran los vientos más fuertes de nuestro país.

Bibliografía

- [1] M. de Energía de Chile, “Ruta energética 2018-2022 liderando la modernización con sello ciudadano,” 2018, 24-05-2018. [En línea]. Disponible en: <http://www.energia.gob.cl/rutaenergetica2018-2022.pdf>
- [2] M. C. Amaya Enciso y F. A. Roldán Hoyos, “Estudio de una máquina sincrónica de imanes permanentes por el método de los elementos finitos,” 2011. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10893/1318>
- [3] R. Krishnan, *Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives*, 1st ed., ser. Mechanical Engineering Marcel Dekker. CRC Press, 2009.
- [4] M. KONDO, Y. SHIMIZU, y J. KAWAMURA, “Development of totally enclosed permanent magnet synchronous motor,” *Quarterly Report of Rtri*, vol. 49, pp. 16–19, 02 2008.
- [5] T. Corporation, 2012. [En línea]. Disponible en: https://www.toshiba.com/tic/datafiles/permanent_magnet_synchronous_motor_for_propulsion_systems.pdf
- [6] A. M. EL-Refaie, “Fractional-slot concentrated-windings synchronous permanent magnet machines: Opportunities and challenges,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 1, pp. 107–121, Jan 2010.
- [7] L. Alberti, M. Barcaro, y N. Bianchi, “Design of a low torque ripple fractional-slot interior permanent magnet motor,” en *2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Sep. 2012, pp. 509–516.
- [8] U. Shipurkar, H. Polinder, y J. A. Ferreira, “Modularity in wind turbine generator systems — opportunities and challenges,” en *2016 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe)*, Sep. 2016, pp. 1–10.
- [9] W. Jara, I. Petrov, J. Tapia, P. Lindh, y J. Pyrhönen, “Analytical model of tooth-coil winding permanent magnet synchronous machines with modular u-shape stator,” pp. 145–151, Sept 2016.
- [10] F. Libert y J. Soulard, “Manufacturing methods of stator cores with concentrated windings,” en *2006 3rd IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives - PEMD 2006*, April 2006, pp. 676–680.

- [11] G. Heins, D. Ionel, y M. Thiele, “Winding factors and magnetic fields in permanent magnet brushless machines with concentrated windings and modular stator cores,” en *2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Sept 2013, pp. 5048–5055.
- [12] J. Pyrhonen, T. Jokinen, y V. Hrabovcova, *Design of Rotating Electrical Machines*. Wiley, 2013. [En línea]. Disponible en: <https://books.google.cl/books?id=4SUIAQAQBAJ>