



PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA DE  
VALPARAÍSO



# Iván Patricio Zamora Olivares

## Evaluación de una máquina de flujo axial con imanes permanentes

Informe Proyecto de Título de Ingeniero Eléctrico



**Escuela de Ingeniería Eléctrica**  
**Facultad de Ingeniería**



# Evaluación de una máquina de flujo axial con imanes permanentes interiores mediante software en elementos finitos

Iván Patricio Zamora Olivares

Informe Final para optar al título de Ingeniero Eléctrico,

aprobada por la comisión de la

Escuela de Ingeniería Eléctrica de la

Facultad de Ingeniería de la

Pontificia Universidad Católica de Valparaíso

conformada por

Sr. Werner Eduardo Jara Montecinos

Profesor Guía

Sr. Jorge Luis Medina Hanke

Segundo Revisor

Sr. Sebastián Fingerhuth Massmann

Secretario Académico

Valparaíso, 05 de marzo de 2019

*A mi familia y amigos los PSJ.*



# Agradecimientos

A toda mi familia, en especial a mis padres y hermano por darme la oportunidad de estudiar y por entregarme todas las herramientas para poder lograr mis metas y deseos. Que me permitirá obtener mi título profesional. Y su apoyo incondicional que permitió seguir adelante en todo lo propuesto, que me acompañaron en todos mis deseos que me permitió ser más llevadera y gratos cada año de universidad.

A todos mis mejores amigos y amigas los PSJ, los cual me brindaron todo su apoyo en todo el proceso universitario y me regalaron grandes momentos cuando más lo necesitaba, lo cual me permitió seguir adelante con mis estudios y poder distraerme en los momentos estresante de la universidad.

Al profesor Werner Jara M, por la oportunidad de trabajar con usted y la buena disposición para el desarrollo de mi proyecto de título, con toda la ayuda brindada para poder realizar el proyecto, entregándome herramientas para fortalecerme en mis conocimientos.

A todos mis compañeros del laboratorio por su amistad, ayuda y gratos momentos compartidos durante la realización de este proyecto.

*Valparaíso, 5 de marzo de 2019*

Iván Zamora O.

# Resumen

En nuestros días, las máquinas eléctricas están ligadas con muchas de las actividades diarias. Por lo tanto, el diseño de la máquina juega un papel fundamental para realizar equipos más confiables y eficientes amigables con el medio ambiente. Y ya que, los espacios hoy en días son ilimitados es necesarios realizar máquinas compactas, que sea de gran desempeño y rendimiento. En consecuencia, una pequeña mejora en el diseño, construcción, uso de materiales, puede tener un gran impacto en la eficiencia de la máquina. En este contexto, el avance en el desarrollo tecnológico en las áreas de ciencia e ingeniería ha permitido promover el uso intensivo del imán permanente de alta densidad de energía en aplicaciones de máquinas eléctricas lo que dio inicio a la era de aparatos y sistemas de alta potencia y eficiencia.

En este proyecto de título se orienta al diseño electromagnético óptimo de máquinas de flujo axial con imanes permanentes en el interior para aplicaciones de baja velocidad. Evaluando el torque cogging de la máquina y se proponen una técnica para realizar la reducción de este, llamada skewing para la cual se evalúa dos casos, en donde, se rotan los imanes permanentes en su propio eje, en el primer caso cada par de imanes se realiza su rotación en el mismo sentido y en el segundo caso se rotan en sentido opuestos. Obteniendo mejor resultado o mayor reducción del torque cogging en el segundo caso, realizando la rotación en sentido opuesto de cada par de imanes permanentes. Con esto se logra reducir la variación del torque electromagnético, pero sigue existiendo esta, la cual no es recomendable para máquinas de baja velocidad y alta eficiencia. Por ende, se realiza un estudio de una nueva topología, en donde, se cambia la configuración del bobinado de estator, utilizando a devanado concentrado y realizando una comparación

con devanado distribuido. Realizando la evaluación de torque cogging, en existe una gran reducción al igual que el torque electromagnético, obteniendo menor torque ripple utilizando devanado concentrado.

Palabras claves: máquina de flujo axial con imanes insertos, torque cogging, skewing, devanado concentrado, devanado distribuido, pérdidas de potencia.



# Abstract

Nowadays, electric machines are linked with many of the daily activities. Therefore, the design of the machine plays a fundamental role to make more reliable and efficient equipment friendly to the environment. And since, the spaces nowadays are unlimited, it is necessary to realize compact machines, that are of great performance and performance. Consequently, a small improvement in the design, construction, use of materials, can have a great impact on the efficiency of the machine. In this context, the advance in the technological development in the areas of science and engineering has allowed to promote the intensive use of the permanent magnet of high density of energy in applications of electrical machines, which gave rise to the era of high-powered devices and systems. and efficiency.

In this title project it is oriented to the optimal electromagnetic design of axial flow machines with permanent magnets in the interior for low speed applications. Evaluating the torque cogging of the machine and propose a technique to perform the reduction of this, called skewing for which two cases are evaluated, where the permanent magnets are rotated on their own axis, in the first case each pair of magnets its rotation is carried out in the same direction and in the second case they rotate in the opposite direction. Obtaining better result or greater reduction of torque cogging in the second case, making the rotation in the opposite direction of each pair of permanent magnets. With this it is possible to reduce the variation of the electromagnetic torque, but this one still exists, which is not recommended for low speed and high efficiency machines. Therefore, a study of a new topology is carried out, where the configuration of the stator winding is changed, using a concentrated winding and making a comparison with distributed winding. Performing the

evaluation of torque cogging, there is a great reduction as well as the electromagnetic torque, obtaining lower ripple torque using concentrated winding.

Key words: Axial flux permanent magnet machines, torque cogging, skewing, tooth coil winding, distributed winding, power losses.



# Índice general

Introducción.....	1
Objetivos generales .....	5
1 Antecedentes generales .....	6
1.1 Objetivo general.....	7
1.1.1 Objetivo específico .....	7
1.2 Imanes permanentes .....	8
1.3 Máquina con imanes permanentes.....	13
1.3.1 Máquinas con Imanes Permanentes Montados en la Superficie.....	14
1.3.2 Máquinas con Imanes Permanentes Insertos.....	15
1.4 Máquina de flujo radial y axial.....	16
1.4.1 Máquina de flujo radial.....	16
1.4.2 Máquina de flujo axial.....	18
1.5 Aplicaciones de las máquinas de flujo axial.....	21
1.6 Geometría de la máquina .....	22
1.6.1 Geometría del estator.....	23
1.6.2 Geometría del rotor.....	24
2 Estudio de reducción del Torque Cogging.....	26
2.1 Construcción de rotor si biselado.....	26
2.1.1 Rotor sin biselado y con variación de los anchos de los IPs .....	29
2.2 Torque Cogging .....	32
2.3 Método de reducción del torque cogging: Skewing.....	36

---

2.3.1 Primer método de Skewing.....	37
2.3.2 Segundo método de Skewing.....	39
2.4 Devanado.....	42
2.5 Densidad de flujo magnético en el entrehierro.....	44
2.5.1 En Vacío.....	45
2.5.2 Con carga.....	47
2.6 Tensión inducida.....	48
2.7 Torque electromagnético .....	50
<b>3 Estudio de la máquina con devanado concentrado .....</b>	<b>53</b>
3.1 Topología de la máquina con devanado concentrado.....	54
3.2 Flujo magnético.....	56
3.3 Análisis magneto estático.....	57
3.3.1 Torque Cogging.....	57
3.4 Simulación magnético transitorio .....	58
3.4.1 Densidad de corriente .....	61
3.4.2 Densidad de flujo en el entrehierro .....	63
3.4.3 Tensión inducida .....	67
3.4.4 Torque electromagnético.....	68
3.5 Pérdidas de potencia.....	70
3.5.1 Pérdidas de devanado.....	70
3.5.2 Pérdidas de potencia del núcleo.....	72
3.5.3 Pérdidas de los imanes permanentes.....	73
3.5.4 Resultados .....	76
3.6 Tabla de comparación.....	77
3.7 Densidad de flujo magnético .....	78
3.8 Topología propuesta .....	82
3.8.1 Resultado.....	83
3.8.2 Densidad de flujo magnético .....	84
<b>Discusión y conclusiones.....</b>	<b>87</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>91</b>

# Introducción

El desarrollo de máquinas eléctricas con imanes permanentes comienza en la primera mitad del siglo 20, gracias a la disponibilidad de la aleación Alnico, la cual fue el primer material para imanes permanentes producido industrialmente. En los años 70 aparecen los imanes permanentes de tierras raras y con ello el continuo mejoramiento del desempeño magnético de este tipo de máquinas que junto al desarrollo de mejores y más confiables equipos de electrónica de potencia y componentes digitales han determinado el éxito de una amplia variedad de máquinas. Estas máquinas, en rangos de mediana y baja potencia, se caracterizan por su alto desempeño en términos de su respuesta dinámica, eficiencia energética y densidad de torque, ofreciendo así un sin número de aplicaciones.

[1]

Existen diversos tipos y configuraciones de máquinas con imanes permanentes, pero en particular las máquinas con imanes permanentes insertos son diseñadas para máquina de alto rendimiento para así producir mayor torque por reluctancia y torque electrodinámico. Y por lo mismo, presentan una gran ventaja por sobre otras, debido que se puede aumentar la potencia por reluctancia modificando la configuración del rotor sin aumentar el volumen de la máquina o de imán permanente lo que traería como consecuencia una máquina de mayor costo. [2]

En general, se pueden crear distintos tipos de máquinas determinado por la dirección con que el flujo cruza el entrehierro, para lo cual, las máquinas de flujo axial son utilizadas para aplicaciones donde el espacio no es amplio, debido que este tipo de máquinas son más compactas. Ya que hoy en día los espacios son reducidos, es necesario poder

realizar un estudio de nuevas topologías, para máquina de flujo axial con imanes permanentes en el interior.

Debido a las características estructurales de las máquinas eléctricas, las pérdidas de potencia desempeñan un papel fundamental en el funcionamiento de la máquina. Las máquinas eléctricas generalmente se fabrican como configuraciones semiencerradas o totalmente cerradas para proteger el devanado, los cojinetes y otras partes de la máquina de factores ambientales. Estos factores afectan la capacidad de disipación de potencia de la máquina y, por lo tanto, se debe utilizar un sistema de enfriamiento complejo o reducir estas pérdidas.

Cuando los materiales ferromagnéticos se excitan con una excitación variable en el tiempo, la energía se disipa debido a la histéresis y las pérdidas por corrientes parásitas. Estas pérdidas son difíciles de aislar, por lo tanto, sus pérdidas combinadas generalmente se miden y se llaman pérdidas en el núcleo. La pérdida de corriente de Foucault es causada por corrientes eléctricas inducidas dentro del material ferromagnético bajo excitación variable en el tiempo. Estas corrientes parásitas inducidas circulan dentro de la potencia de disipación del material (es decir, pérdidas  $I^2R$ ) debido a la resistividad del material. La pérdida de potencia de corriente parásita se describe aproximadamente por la relación del espesor del material y una constante dependiente del material. En este caso, la pérdida de potencia es proporcional al cuadrado de la frecuencia, la amplitud de la densidad de flujo y el grosor del material en el plano perpendicular al flujo del campo magnético.

La forma más sencilla de minimizar la pérdida de corrientes parásitas es aumentar la resistividad del material. Esto se hace comúnmente de varias maneras. Primero, los aceros contienen una pequeña cantidad de silicio. La presencia de silicio aumenta sustancialmente la resistividad del acero, reduciendo así las pérdidas por corrientes parásitas. Además, es común construir un aparato utilizando láminas de material. Estas finas láminas de material están recubiertas con una capa delgada de material aislante. Apilar estas laminaciones aumenta drásticamente la resistividad del material en la dirección de la pila. Dado que el material aislante es no magnético, es necesario orientar los bordes de laminación paralelos al flujo deseado. La pérdida de corriente parásita es proporcional al cuadrado del espesor

de la laminación. Por lo tanto, se requieren laminaciones delgadas para una operación de pérdida más baja. [3]

Debido que la construcción de la máquina mediante chapas magnéticas es una forma óptima de minimizar las pérdidas en el núcleo, pero la construcción de la máquina se encuentra con biselado, lo cual dificulta la construcción realizando esta metodología. Se modificará topología del rotor realizando sin biselado lo cual facilita la construcción de esta.

La alta densidad de torque y su capacidad de trabajar a bajas velocidades hacen que las máquinas de flujo axial con imanes permanentes sean muy favorables en aplicaciones de alto desempeño en espacio reducidos, sin embargo, estas máquinas presentan dos componentes de torque pulsante no deseadas. La primera corresponde al torque producido por el contenido armónico en las formas de onda de voltaje y corriente. Y la otra componente es el torque cogging de este tipo de máquinas posee efectos indeseados de torque ripple, ruido y vibraciones, por lo que es necesario reducirlo si se desea una máquina de alto desempeño y precisión.

El torque cogging es un efecto indeseado que se produce debido por la interacción entre el flujo de los imanes y la anisotropía del estator producida por las ranuras, es decir, a la tendencia que tienen los imanes de alinearse con los dientes de estator. En otras palabras, el torque de cogging es causado por la variación de la energía magnética almacenada en el entrehierro dada por la interacción entre el flujo magnético del rotor y la variación de reluctancia de estator a consecuencia de las ranuras, es decir, con el camino de menor reluctancia. Este efecto producido exclusivamente por los imanes permanentes, por lo que es independiente de la corriente y por lo mismo las técnicas para reducirlo deben buscar la interacción óptima entre el flujo del imán y la variación de reluctancia respecto de la variación angular. La componente de torque de cogging está presente en todas las máquinas con imanes permanentes que poseen ranuras y dientes en el estator, por lo que es necesario encontrar la manera de reducirlo, pero sin disminuir el flujo en el entrehierro.

Existen varias técnicas para realizar la reducción del torque cogging, pero la técnica utilizada en este proyecto se denomina skewing, en donde, en esta se aplica una variación

de la posición de los IPs, es decir, estos se rotan respecto a su eje. Para este método se utilizarán dos modos, el primero cada par de IPs se rotan ambos en el mismo sentido de giro y para el segundo caso el par de IPs se rotan en sentidos opuestos.

El otro componente de torque pulsante es el contenido armónico en las formas de onda de voltaje y corriente, esta es producida por la influencia en el flujo magnético en el entrehierro producido en la máquina. En donde, este contenido armónico es influenciado por la topología de la máquina, debido que con la forma de devanado el contenido armónico varía y que se puede producir que exista anulación de alguna de las componentes armónicas que tenga una gran participación en la variación.

Los devanados concentrados son aquellos en los que en cada una de las ranuras del estator se encuentran alojados las espiras de una misma fase y en todas las espiras de un polo están atravesadas por el mismo flujo magnético principal. Sin embargo, en el devanado distribuido las ranuras pueden estar ocupadas por espiras de distintas fases y esto da lugar a que las espiras de una fase correspondientes a un mismo polo no estén sometidas al mismo flujo magnético.

Las principales ventajas que presenta esta disposición de los conductores frente a la configuración distribuida son las siguientes: Las cabezas de bobinas no se solapan entre sí, ocupando menos espacio que las de los bobinados distribuidos. Esto implica ventajas tanto para la manufacturación como de coste de material. Además, presentan menor resistencia y menos inductancia, ya que la longitud ocupada por los conductores es menor. También presentan un valor superior del factor de relleno, ya que el proceso de insertado automático de las bobinas presenta menos dificultad que en los bobinados distribuidos. Los bobinados concentrados son muy utilizados en la actualidad debido principalmente a la reducción de espacio y ahorro de conductores. Pero la gran desventaja que se produce, es el bajo aprovechamiento del núcleo.

Es por lo cual, que este proyecto se enmarca en la evaluación de una máquina de flujo axial con imanes permanentes en el interior mediante software en elementos finitos; De forma preliminar se estudiará esta máquina y sus características. Para luego observar el comportamiento de la máquina a través de distintos tipos de ensayos que serán realizados. Lo anterior permitirá observar de forma empírica el comportamiento y funcionamiento del

motor a distintas topologías geométrías, además se hará uso del software “FLUX 3D by Altair” para respaldar de forma computacional, simulando el motor con las diferentes variaciones de los parámetros geométricos.

En donde, para la realización de este proyecto se definen los objetivos los cuales definirán la continuidad del proyecto de tesis.

### **Objetivos general**

- Desarrollar el diseño y evaluar electromagnéticamente las características de operación de una máquina de flujo axial e imanes permanentes insertos en el rotor utilizando devanado distribuido, a través del software en elementos finitos (FLUX 2D/3D by Altair).
- Realizar un análisis de la geometría del rotor, basado en el modelo en elementos finitos, para determinar una organización que maximice rendimiento de la máquina.
- Estudiar el torque de Cogging desarrollado por la máquina mediante el modelo en FLUX 3D.
- Estudiar la máquina con devanado concentrado y comparar con la máquina con devanado distribuido mediante simulaciones en software de elementos finitos Flux 3D.

# 1 Antecedentes generales

El desarrollo de máquinas eléctricas con imanes permanentes comienza en la primera mitad del siglo 20, gracias a la disponibilidad de la aleación Alnico, la cual fue el primer material para imanes permanentes producido industrialmente. En los años 70 aparecen los imanes permanentes de tierras raras y con ello el continuo mejoramiento del desempeño magnético de este tipo de máquinas que junto al desarrollo de mejores y más confiables equipos de electrónica de potencia y componentes digitales han determinado el éxito de una amplia variedad de máquinas. Estas máquinas, en rangos de mediana y baja potencia, se caracterizan por su alto desempeño en términos de su respuesta dinámica, eficiencia energética y densidad de torque, ofreciendo así un sin número de aplicaciones.

[1]

Existen diversos tipos y configuraciones de máquinas con imanes permanentes, pero en particular las máquinas con imanes permanentes insertos son diseñadas para máquina de alto rendimiento para así producir mayor torque por reluctancia y torque electrodinámico. Y por lo mismo, presentan una gran ventaja por sobre otras, debido que se puede aumentar la potencia por reluctancia modificando la configuración del rotor sin aumentar el volumen de la máquina o de imán permanente lo que traería como consecuencia una máquina de mayor costo. [2]

En general, se pueden crear distintos tipos de máquinas determinado por la dirección con que el flujo cruza el entrehierro, para lo cual, las máquinas de flujo axial son utilizadas para aplicaciones donde el espacio no es amplio, debido que este tipo de máquinas son más compactas. Y debido que hoy en día los espacios son reducidos, es necesario poder



realizar un estudio de nuevas topologías, para máquina de flujo axial con imanes permanentes en el interior.

Es por lo cual, que este proyecto se enmarca en la evaluación de una máquina de flujo axial con imanes permanentes en el interior mediante software en elementos finitos; De forma preliminar se estudiará esta máquina y sus características. Para luego observar el comportamiento de la máquina a través de distintos tipos de ensayos que serán realizados. Lo anterior permitirá observar de forma empírica el comportamiento y funcionamiento del motor a distintas topologías geometrías, además se hará uso del software “FLUX 3D by Altair” para respaldar de forma computacional, simulando el motor con las diferentes variaciones de los parámetros geométricos.

En donde, para la realización de este proyecto se definen los objetivos los cuales definirán la continuidad del proyecto de tesis.

## **1.1 Objetivo general**

- Este proyecto consiste en evaluar electromagnéticamente las características de operación de una máquina de flujo axial e imanes permanentes insertos en el rotor a través del software en elementos finitos (FLUX 2D/3D by Altair).

### **1.1.1 Objetivo específico**

- Análisis de la geometría del rotor, basado en el modelo en elementos finitos, para determinar una organización que maximice el rendimiento de la máquina.
- Estudio del torque de Cogging desarrollado por la máquina mediante el modelo en FLUX 3D y obtención de forma de reducción de este fenómeno.
- Diseño de una nueva topología para la máquina de flujo axial con imanes permanentes insertos la cual se obtenga el mayor rendimiento de la máquina.
- Estudio de diversos parámetros del motor como la densidad de flujo, tensión inducida, perdidas, etc; Para para la obtención de la máquina con mayor rendimiento.

## 1.2 Imanes permanentes

Los imanes permanentes (IPs) son materiales que, después de ser magnetizados por un campo magnético alto, mantienen su alta magnetización aun con cambios de temperatura o con la presencia de campos magnéticos externos. Los imanes permanentes poseen un alto campo magnético remanente después de que el campo magnetizante es retirado. Esto se debe a los espines no compensados que están presentes en la estructura cristalina del material ferromagnético. Un conjunto de espines conforma un dominio magnético, el cual está caracterizado por tener un momento magnético en una dirección particular. [2]

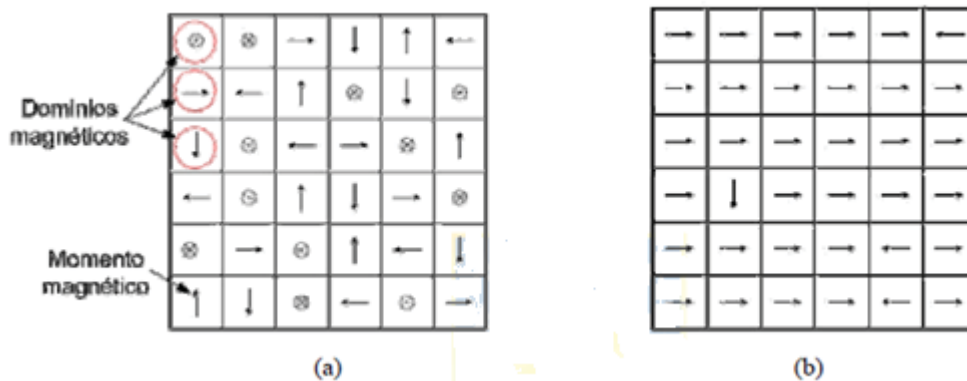


Figura 1-1: Orientación de los dominios magnéticos de un material ferromagnético  
(a) Dominios desorientados; (b) Dominios orientados por acción de un campo magnético externo.

[2]

Si bien la presencia de los imanes permanentes se remonta al año 600 A.C. con el descubrimiento de la magnetita, la evolución en la calidad magnética y mecánica de los IPs en los últimos 60 años ha sido muy significativa. La aparición de nuevos materiales y aleaciones con altos desempeños magnéticos, por ejemplo, Samario-Cobalto (Sm-Co) y Neodimio-Fierro-Boro (Nd-Fe-B) han hecho posibles innumerables aplicaciones para estos elementos. La calidad de un IPs comercial puede medirse por las características de desmagnetización. [1]

Remanencia magnética (Br): Magnitud del campo magnético que el material puede retener aun en ausencia del campo magnético externo.

Fuerza coercitiva ( $H_c$ ): Capacidad de mantener el campo magnético cuando un campo externo en sentido opuesto es aplicado.

Producto energía: Es el valor absoluto del producto de la densidad de flujo ( $B$ ) y la intensidad de campo ( $H$ ) en cada punto a través de la curva de desmagnetización. El valor máximo es uno de los índices que indica la energía interna del imán. Su unidad de medida es  $J/m^3$ .

Recta de carga y punto de operación: El estado B-H de los imanes permanentes es localizado en la intersección de la curva de desmagnetización y la recta de carga OP. La recta de carga es determinada desde las cantidades características de la estructura del circuito magnético: largo del entrehierro, largo del circuito magnético y número de vueltas de las bobinas. Durante la operación, sin embargo, el punto de operación es inclinado por la reacción de las bobinas del circuito magnético, por ejemplo, corriente de armadura en máquinas eléctricas (fenómeno denominado reacción de armadura).

Temperatura Curie ( $T_c$ ): Temperatura crítica por sobre la cual un material magnético se hace paramagnético.

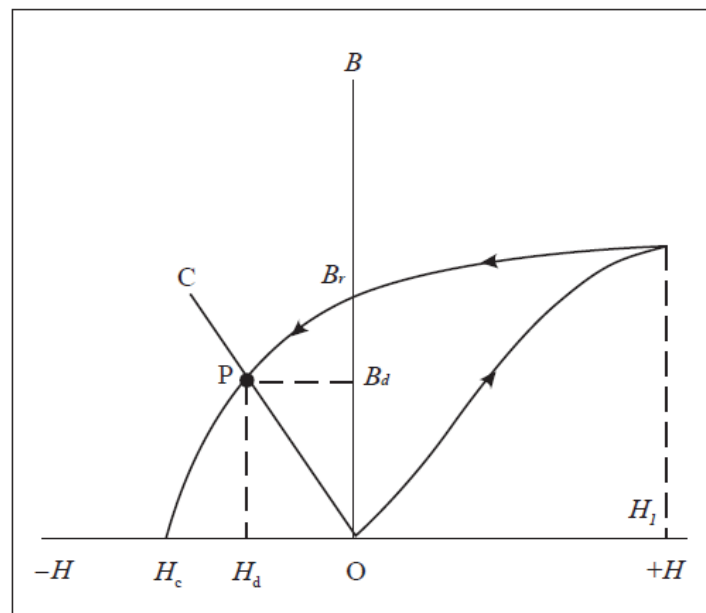


Figura 1-2: Curva de magnetización inicial y de desmagnetización. [4]

En la Figura 1-2 se ilustra el comportamiento de un imán permanente en los ciclos de magnetización y desmagnetización hasta alcanzar el campo coercitivo ( $-H_c$ ), pasando por la inducción magnética remanente ( $B_r$ ). Cuando el campo  $H$  se apaga, la inducción del imán se queda en  $B_r$  ya que cuando el campo  $H$  se aplicó, el imán se magnetizó y apareció un campo desmagnetizante  $-H_d$ , contrario a  $H$ . Por lo tanto, la curva de desmagnetización va hasta el punto  $P$ , donde el campo es  $-H_d$  y la inducción magnética es  $B_d$ .  $P$  es conocido como el punto de trabajo. [4]

Actualmente se dispone de diferentes tipos de imanes permanentes. Las propiedades de estos dependen de los materiales con los que son fabricados. Entre los más comunes se encuentran los imanes de Ferrita (cerámicos), los basados en tierras raras neodimio-hierro-boro (Nd-Fe-B) y samario-cobalto (Sm-Co) y los Alnicos (Al-Ni-Co). De todos estos los más populares son los imanes de ferrita debido a que es un material barato.

Sin embargo, en aplicaciones de alto rendimiento los más utilizados son los de tierras raras, en especial los de Nd-Fe-B por ser los que poseen mayor energía magnética (máximo producto  $B \cdot H$ ) y, además, son más económicos que los de Sm-Co.

Algunos de los imanes permanentes que se encuentran en el comercio actualmente se presentan en la Tabla 1-1.

Tabla 1-1: Características de algunos imanes permanentes.

Tipo	Br [T]	Hc [KA/m]	Tc [°C ]	Producto de energía [KJ/m <sup>3</sup> ]	Costo	Característica
Alnico	1.28 0	51	78 0	44	Medio	Quebradizo y duro al maquinar
Ferrita	0.38 5	235	45 0	28	Bajo	Quebradizo y duro al maquinar
Sm-Co	0.87 0	637	45 0	146	Alto	Quebradizo y duro al maquinar
Nd-Fe-B	1.23 0	881	31 2	290	Alto	Maquinable

Para poder compararlos se describen brevemente sus principales características:

- Ferrita

Están constituidos a partir de Estroncio y Bario. Las principales características que presentan son que poseen valores medios tanto en la intensidad de campo como en la magnetización remanente.

- Tierras raras

Los imanes se encuentran constituidos por los materiales que forman las tierras raras. La principal ventaja que presentan es que poseen una fuerza muy superior frente a los otros grupos de imanes permanentes descritos anteriormente. En cambio, el precio es más elevado que en los otros tipos.

A su vez, en este grupo se puede diferenciar dos familias:

Basados en el Samario-Cobalto (Sm-Co): Poseen la ventaja de que no se oxidan y son resistentes a las altas temperaturas, en cambio su precio es muy elevado.

Basados en el Neodimio (Nd-Fe-B): Presentan el inconveniente que se oxidan, por ello es necesario darles un baño de cinc o níquel. Su precio es menos elevado que en el caso anterior.

- Alnicos

Están constituidos por aluminio, níquel y cobalto y se producen mediante métodos de fundición. Las principales ventajas que presentan son la estabilidad a temperaturas muy altas, bajo costo y alta magnetización remanente. No obstante, su principal defecto es la baja fuerza coercitiva que se traduce en una gran facilidad de desmagnetización.

En la Figura 1-3 se ha representado el segundo cuadrante de la curva B-H de cada uno de ellos. Tras exponer las principales características se puede concluir que las propiedades deseadas en los imanes permanentes son las siguientes: un alto valor de campo magnético con poca masa y que no sea susceptible a cambios externos que pueda desmagnetizarlos. Si los imanes no cumplen esta última condición, bajo ciertas condiciones de funcionamiento pueden llegar a desmagnetizarse de formas irreversible.

A pesar de que en la actualidad se han conseguido niveles de temperaturas óptimos para que los imanes no pierdan sus propiedades no existen imanes que conserven sus propiedades para cualquier temperatura.

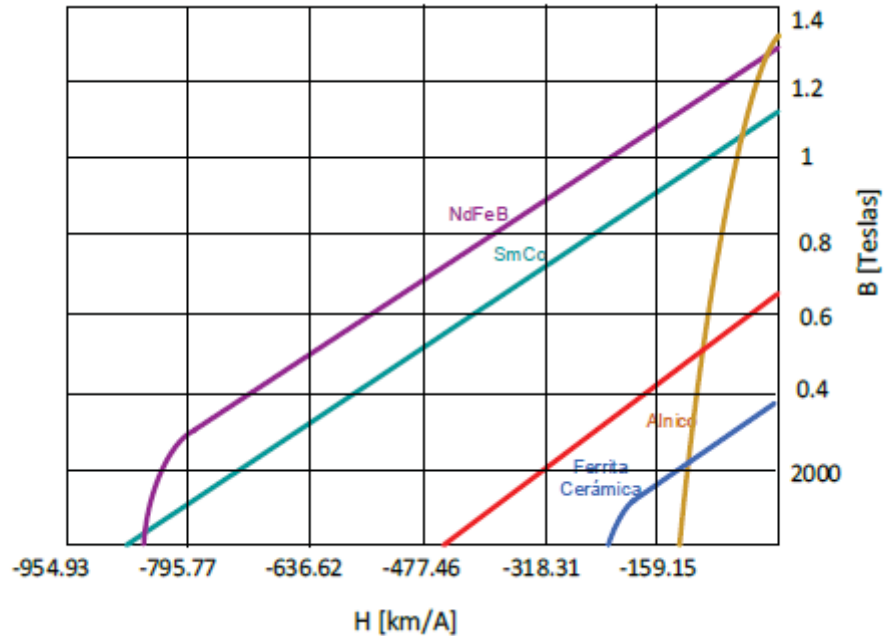


Figura 1-3: Curva B-H de los principales imanes permanentes usados hoy en día (fuente: <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es>)

### 1.3 Máquina con imanes permanentes

Los imanes permanentes basados en tierras raras como los de Neodimio-Fierro-Boro o Samario-Cobalto y el desarrollo tecnológico alcanzado en su elaboración han impulsado la búsqueda, diseño y desarrollo de nuevas topologías de máquinas sincrónicas con imanes permanentes. Estas difieren de máquina sincrónica convencional debido a que el bobinado de campo se reemplaza por imanes permanentes, lo que trae como consecuencia numerosas ventajas y ciertas desventajas.

Las principales ventajas de las máquinas con imanes permanentes son:

- Mejora el rendimiento y confiabilidad al eliminar el bobinado de excitación y los contactos deslizantes, reduciendo las pérdidas Joule.
- Aumento en la relación potencia/peso ya que el bobinado de campo es reemplazado por imanes permanentes de menor volumen y peso.
- Se pueden construir máquinas eléctricas con geometrías complejas.
- Facilita la construcción de máquinas de alta velocidad y baja inercia.

Algunas desventajas de los motores con IPs son:

- Excitación de campo fija, lo que dificulta el control sobre ella.
- Onda de flujo no sinusoidal en el entrehierro.
- Aparece el torque cogging debido a la interacción entre los IPs y la estructura de estator.
- Costo de los imanes de Nd-Fe-B hace prohibitivo su uso en máquinas de grandes potencias.

Según la disposición de los IPs en la máquina, estas se pueden clasificar en 2 categorías:

1. Máquinas con imanes montados en la superficie.
2. Máquinas con imanes insertos.

### **1.3.1 Máquinas con Imanes Permanentes Montados en la Superficie**

Este tipo de máquinas (Figura 1-4) se caracterizan principalmente en que los IPs van montados directamente sobre la superficie del rotor. Esto genera estructuras simples, de alta eficiencia y bajo costo. Por otro lado, presenta una distribución de flujo trapezoidal en el entrehierro y alta densidad de torque.



Algunas de las desventajas que presenta este tipo de máquinas es que debido al gran espacio que los imanes ocupan, se requiere de un entrehierro relativamente grande (no uniforme). Otra desventaja desde el punto de vista mecánico son las limitaciones de velocidad máxima producto de la adherencia de los imanes al rotor, es decir, al aumentar la velocidad también lo hacen las fuerzas centrífugas por lo que a velocidades muy altas podrían provocar que los IPs se suelten. [2]

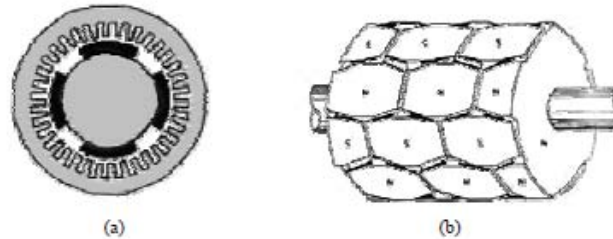


Figura 1-4: Máquina con imanes permanentes montados sobre la superficie del rotor  
(a) Máquina de flujo radial; (b) Rotor de flujo radial. (fuente: <https://www.monografias.com>)

### 1.3.2 Máquinas con Imanes Permanentes Insertos

Estas máquinas se caracterizan por tener los imanes insertos en el núcleo del rotor por lo que poseen un entrehierro prácticamente uniforme y no presentan problemas de adherencia producto de fuerzas centrífugas, ya que el yugo de rotor ayuda a su sujeción. Los IPs se pueden disponer de diversas formas, con variadas geometrías y tamaños para aumentar la concentración de flujo generando tensiones menos distorsionadas. Además, esta configuración permite también introducir jaulas de partida asincrónica, las que actúan como devanados amortiguadores. [2]

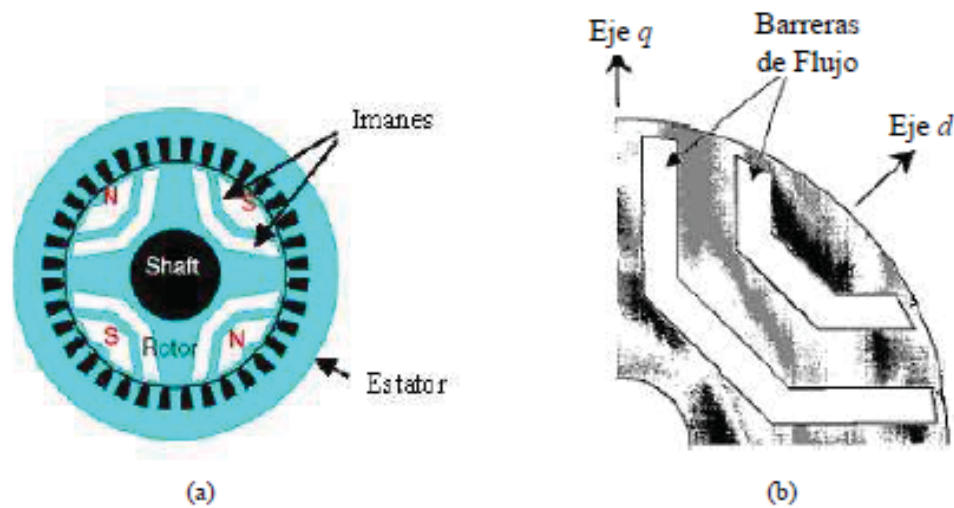


Figura 1-5: Máquinas de flujo radial con imanes insertos. [1]

## 1.4 Máquina de flujo radial y axial

Otra forma de clasificar las máquinas eléctricas con imanes permanentes es en función de la dirección con que el flujo principal cruza el entrehierro.

### 1.4.1 Máquina de flujo radial

Para las máquinas de flujo radial son aquellas en las que el flujo principal cruza el entrehierro en dirección radial respecto al eje de la máquina, es decir, las líneas de flujo se mueven desde y hacia el eje de la máquina (Figura 1-8a).

Por lo tanto, cuando el campo magnético resultante de un determinado motor, rota igual que infinitas agujas de reloj superpuestas a lo largo del eje, o sea, perpendiculares a este, entonces el motor es de flujo radial.

Esta topología es la más usada. Sus principales características son las siguientes:

- Las fuerzas de atracción entre el rotor y el estator son equilibradas alrededor del rotor, por lo tanto, no existe fuerza radial neta en el rotor.
- El calor producido por el bobinado situado en el estator es fácilmente evacuado debido a la superficie exterior del yugo de acero.
- El rotor es mecánicamente rígido y tiene facilidad de soporte en ambos extremos.
- El rotor y el estator son uniformes en la dirección axial excepto por la inclinación o sesgado, ya sea de los conductores que se alojan en las ranuras o bien, por la inclinación de los imanes.

En cambio, este tipo de máquinas eléctricas presentan los siguientes inconvenientes:

- Los imanes que se encuentran sobre el rotor (Figura 1-6 a) o sobre el estator (Figura 1-6 c y Figura 1-6 d) deben tener una superficie arqueada no pudiendo ser rectangulares.
- Se debe tener en cuenta si el motor opera a altas velocidades puesto que se requerirá de algún medio para sostener los imanes al rotor. Esto tiene que sumarse a la longitud de separación en el entrehierro.

También pueden ser fabricados con imanes interiores al rotor (Figura 1-6 b). En este caso los imanes pueden ser de forma rectangular y dispuestos de forma que se consiga aumentar el flujo por polo y también actuar en el modo de debilitamiento de campo.

En las máquinas de flujo axial la disposición geométrica entre el estator y el rotor es concéntrica.

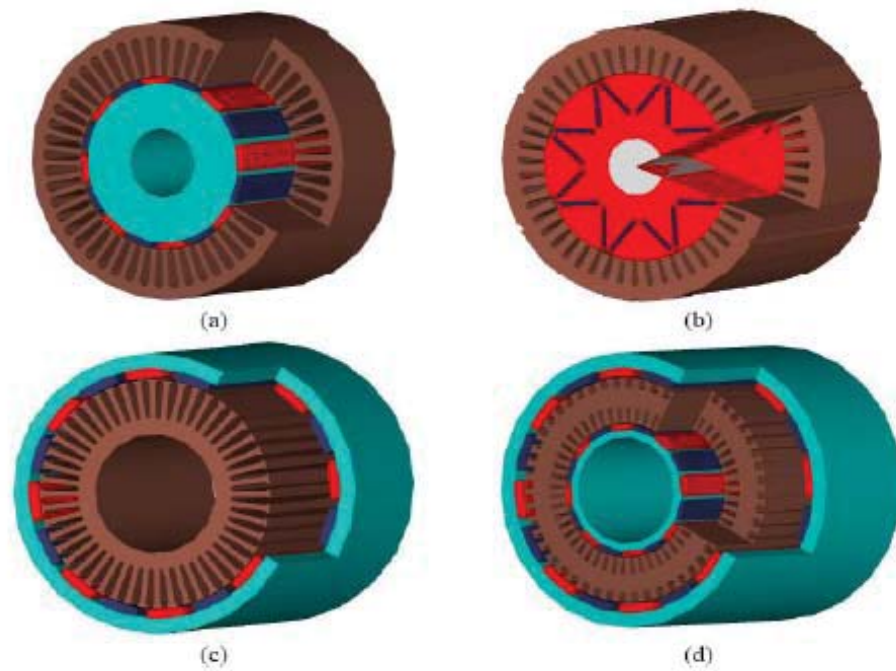


Figura 1-6: Máquina eléctrica de flujo radial. (a) Estator externo e imanes sobre el rotor; (b) Estator externo e imanes insertos; (c) Estator interno; (d) De doble rotor. [5]

### 1.4.2 Máquina de flujo axial

Las máquinas de flujo axial son aquellas en las que el flujo magnético cruza el entrehierro en la dirección axial o paralela al eje de la máquina, es decir, el flujo magnético es producido por los imanes permanentes en la dirección del eje de rotación (Figura 1-8b).

Por lo tanto, cuando el campo magnético resultante de un determinado motor rota concéntrica a su eje, entonces el motor es de flujo axial. Tradicionalmente, esta topología no ha sido muy común, pero ha aparecido en aplicaciones donde las dimensiones son más limitadas y no se puede usar un motor de flujo radial.

Las principales ventajas que presentan son:

- Si se emplean dos entrehierros (Figura 4.b), las fuerzas de atracción entre el rotor y el estator se equilibran y no hay carga axial sobre los rodamientos.
- El calor producido por el bobinado estático aparece en el exterior del motor, siendo relativamente fácil de eliminar.
- Los imanes tienen dos caras planas, aunque lo habitual es que se requiera de una forma arqueada.
- El entrehierro es ajustable durante el ensamblaje.
- El estator es relativamente fácil de bobinar puesto que está abierto y plano.

En cambio, los puntos débiles que muestran son los siguientes:

- Si no tiene muchos polos magnéticos o el radio exterior es grande, entonces, las longitudes de las cabezas de bobinas pueden tener importancia respecto a la dimensión de la ranura. De modo que se puede obtener una pobre utilización del bobinado.
- El espacio en el que se alojan las cabezas de bobinas de los conductores en el radio interior tiene un volumen limitado. En cambio, el radio de cabeza del radio exterior tiene un volumen muchísimo mayor.
- La laminación del estator debe de apilarse en dirección circunferencial por ejemplo de forma espiral, lo cual hace que el estator sea muy caro de fabricar.
- Al trabajar a baja velocidad disminuyen su capacidad de refrigeración por ventilación natural.
- La construcción y montaje deben ser muy precisos debido a los pequeños entrehierros y a grandes fuerzas axiales producidas por la magnetización de los imanes.

En la máquina de flujo axial, el estator tiene forma de anillo y el rotor (o los rotores) de disco, con sus caras activas paralelas, cumpliéndose que sus diámetros activos interior y exterior (longitud activa), son iguales respectivamente (Figura 1-7)).

Existen diferentes formas de realizar la máquina y se pueden clasificar según la posición del estator y del rotor como se muestra en la Figura 1-7:

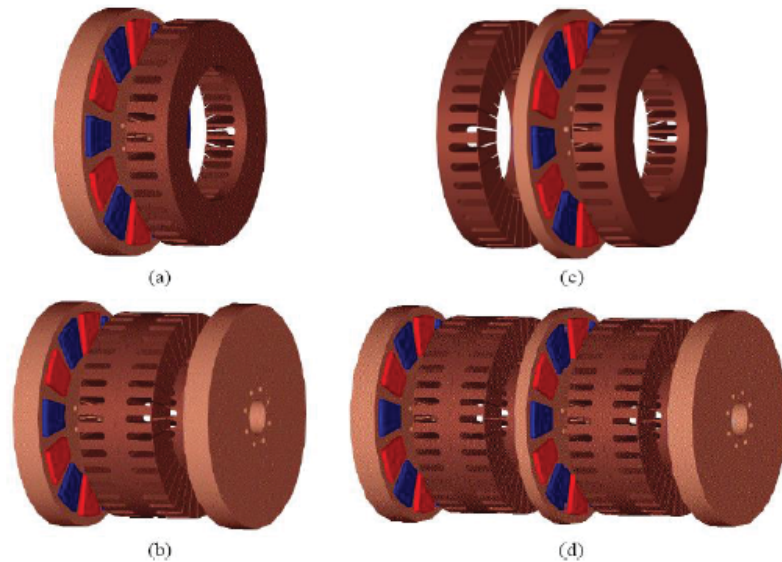


Figura 1-7: Máquinas eléctricas de flujo axial.

(a) De un rotor y un estator; (b) De dos rotores y un estator; (c) De un rotor y dos estatores; (d) Estructura multietapa incluyendo dos bloques de estator y tres bloques. [5]

En general, las propiedades especiales de las máquinas de flujo axial con imanes permanentes (AFPM), que se consideran ventajosos sobre las máquinas de flujo radial con imanes permanentes (RFPM) en ciertas aplicaciones se pueden encontrar:

- Permiten una construcción compacta.
- Cuanto mayor sea el diámetro exterior del núcleo, mayor será el número de polos que pueden ser acomodados, haciendo que las máquinas AFPM sean una elección adecuada para las operaciones de alta frecuencia y/o de baja velocidad.
- Se pueden configurar motores de tipo sandwich, es decir, con múltiples rotores y/o estatores.
- Mejor uso de la naturaleza anisotrópica del hierro.
- Capacidad de ser diseñado para poseer una mayor densidad de potencia con un cierto ahorro en material de núcleo.

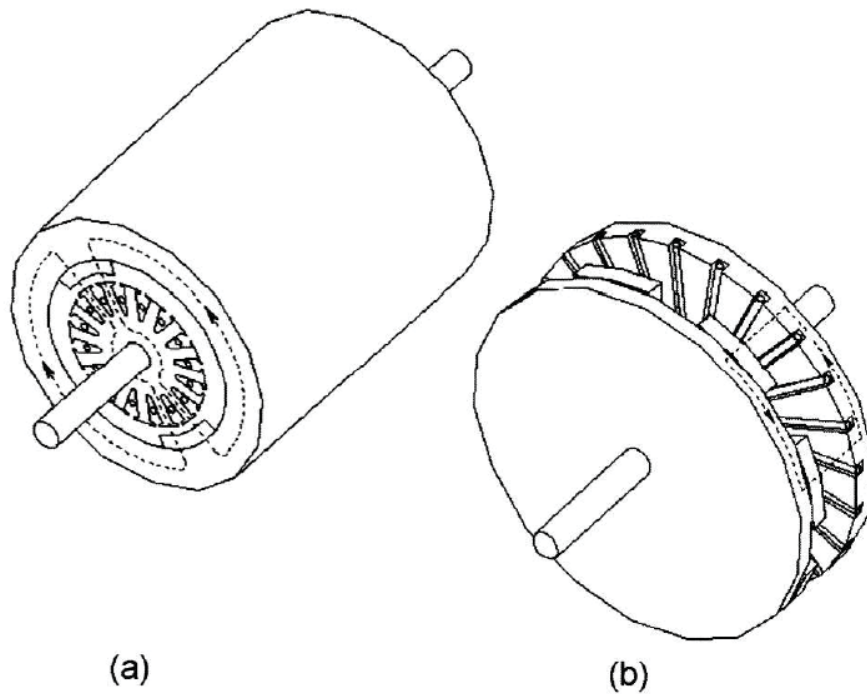


Figura 1-8: Topología de (a) Máquina de flujo radial con imanes permanentes; (b) Máquina de flujo axial con imanes permanentes. [6]

## 1.5 Aplicaciones de las máquinas de flujo axial

Las máquinas de flujo axial son especialmente recomendables en aplicaciones donde se cumplen las siguientes condicionantes:

- Elevado número de polos.
- Bajas velocidades.
- Geometría exterior con pequeña longitud comparada con el radio y radio interior y exterior similares.
- Pesos de máquina necesariamente bajos
- Sobrecargas elevadas y frecuentes

Las principales aplicaciones en las que aparecen son en ascensores, vehículos eléctricos y en aerogeneradores. Aunque existen muchas otras aplicaciones como la propulsión de barcos, sistemas de lanzamiento de aviones mediante sistema electromagnético, bombas

de balancín de petróleo, de motores miniaturas de flujo axial para las unidades de disco duro de un ordenador. [7]

Tabla 1-2: Principales aplicaciones de máquina de flujo axial.

Aplicación	Ventajas
Micromotores	Estructuras Multi-etapa
Grabadores video y lectores de disco	Ahorro de espacio
Motores sin cojinetes	Control simultaneo de par y posición
Ventiladores	Ahorro de espacio
Motor de ascensores	Tracción directa y ahorro de espacio
Coches eléctricos	Par específico alto y ahorro de espacio
Volantes de inercia	Altas velocidades
Alternadores turbina de gas	Comportamiento mecánico a alta velocidad y posibilidad multi-etapa
Generadores eólicos	Tracción directa y ahorro de espacio
Propulsión naval	Elevada potencia específica
Máquinas superconductoras sin hierro	Mejor aprovechamiento del campo magnético
Propulsión aeronáutica en aviones especiales (estratosféricos)	Reducción del peso

Todas ellas tienen en común la posibilidad de colocarlos en zonas más reducida que si se tratase de un motor de flujo radial, poseen una eficiencia más alta y el momento de inercia es más reducido cuanto menor es el espesor del rotor.

## 1.6 Geometría de la máquina

Luego de haberse revisado las características y beneficio de la máquina de estudio, se define los parámetros geométricos de esta. En donde estos valores se definen en las



siguientes tablas, los cuales se utilizarán en la máquina de flujo axial con imanes permanentes en el interior como un modelo base de estudio.

### 1.6.1 Geometría del estator

Las dimensiones de estator de la máquina a analizar se encuentran en las Tabla 1-3. En donde, el diseño la ranura de estator tiene geometría rectangular para así poder tener un mejor factor de relleno de la ranura, lo que produce como consecuencia dientes de estator con geometría trapezoidal como se muestra en la Figura 1-9. Esto implica una distribución de flujo irregular sobre los dientes, es decir, se producen altos niveles de saturación en el área más cercana al radio interno del estator los cuales no son compensados por el flujo en el área más cercana al radio externo del estator.

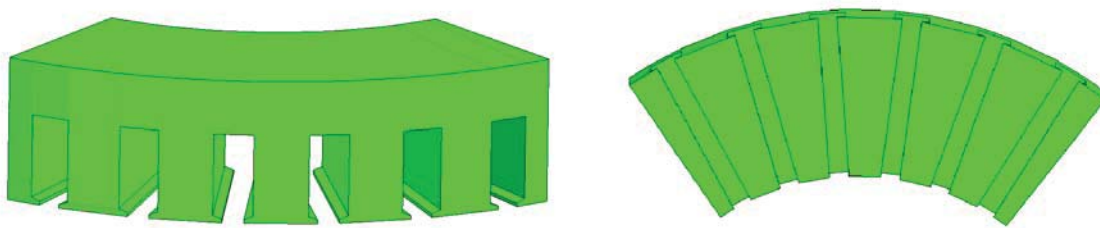


Figura 1-9: Geometría del estator inicial.

Tabla 1-3: Dimensiones del estator.

Medidas	Valor	Unidad
Diámetro exterior	250	mm
Diámetro interior	150	mm
Altura del estator	40	mm
Largo (axial) del estator	50	mm
Altura de la ranura	23	mm
Ancho de la ranura	11	mm
Altura de la cabeza del diente	1	mm
Ancho entre diente	6	mm
Entrehierro	1,5	mm
Numero de ranuras	30	
Numero de fase	3	
Numero de ranuras por fase	1	

### 1.6.2 Geometría del rotor

La configuración de rotor con imán permanente con magnetización tangencial cuya geometría se puede observar en la Figura 1-10. En donde, en la Tabla 1-2 se encuentran las dimensiones del rotor y los imanes permanentes, los cuales disminuyen su largo axial en la misma medida con la que los dientes de estator reducen su ancho. Esto permite tener una magnetización de los dientes de estator igual o similar en todo el radio de la máquina.



Figura 1-10: Geometría del rotor inicial.

Tabla 1-4: Dimensiones del estator.

Medidas	Valor	Unidad
Diámetro exterior	250	mm
Diámetro interior	150	mm
Altura superior IP	25	mm
Altura inferior IP	8	mm
Ancho del IP	20	mm
Largo del IP	50	mm
Numero de polos	10	

Para lo cual estos parámetros fueron utilizados para la creación de la máquina mediante software en elementos finitos, para lo cual, se muestra el método de creación de esta y los tipos de materiales utilizados en el Apéndice C.

## 2 Estudio de reducción del Torque

### Cogging

#### 2.1 Construcción de rotor si biselado

Cuando los materiales ferromagnéticos se excitan con una excitación variable en el tiempo, la energía se disipa debido a la histéresis y las pérdidas por corrientes parásitas. Estas pérdidas son difíciles de aislar experimentalmente, por lo tanto, sus pérdidas combinadas generalmente se miden y se llaman pérdidas en el núcleo.

La pérdida de corriente de Foucault es causada por corrientes eléctricas inducidas dentro del material ferromagnético bajo excitación variable en el tiempo. Estas corrientes parásitas inducidas circulan dentro de la potencia de disipación del material (es decir, pérdidas  $I^2R$ ) debido a la resistividad del material. La pérdida de potencia de corriente parásita se describe aproximadamente por la relación del espesor del material y una constante dependiente del material. En este caso, la pérdida de potencia es proporcional al cuadrado de la frecuencia, la amplitud de la densidad de flujo y el grosor del material en el plano perpendicular al flujo del campo magnético.

La forma más sencilla de minimizar la pérdida de corrientes parásitas es aumentar la resistividad del material. Esto se hace comúnmente de varias maneras. Primero, los aceros eléctricos contienen una pequeña cantidad de silicio. La presencia de silicio aumenta sustancialmente la resistividad del acero, reduciendo así las pérdidas por corrientes parásitas. Además, es común construir un aparato utilizando láminas de material. Estas finas láminas de material están recubiertas con una capa delgada de material aislante.

Apilar estas laminaciones aumenta drásticamente la resistividad del material en la dirección de la pila. Dado que el material aislante también es no magnético, es necesario orientar los bordes de laminación paralelos al flujo de flujo deseado. La pérdida de corriente parásita es proporcional al cuadrado del espesor de la laminación. Por lo tanto, se requieren laminaciones delgadas para una operación de pérdida más baja a altas frecuencias. [3]

Debido que la construcción de la máquina mediante chapas magnéticas es una forma óptima de minimizar las pérdidas en el núcleo, pero la construcción de la máquina se encuentra con biselado, lo cual dificulta la construcción realizando esta metodología. Se modificará topología del rotor realizando sin biselado.

La construcción del rotor sin biselado se realiza para poder facilitar la construcción del rotor mediante chapas magnéticas o laminación de material. Lo cual produce cambios importantes en la parte de funcionamiento debido que, al realizar la construcción mediante chapas produce una reducción de las pérdidas en el núcleo. Pero al realizar un rotor sin biselado se espera que se produzca una mayor saturación del hierro debido que se tiene una mayor cantidad de imanes permanentes en el rotor, por lo tanto, se debe modificar la estructura de la máquina para evitar este fenómeno, el cual produce una mayor cantidad de pérdida en el hierro de lo deseado.

En la siguiente figura se muestra el cambio de la estructura geométrica del rotor al realizar este con biselado y sin este. Para lo cual se mantuvieron las dimensiones geométricas, solo realizando el cambio de altura interna del rotor.

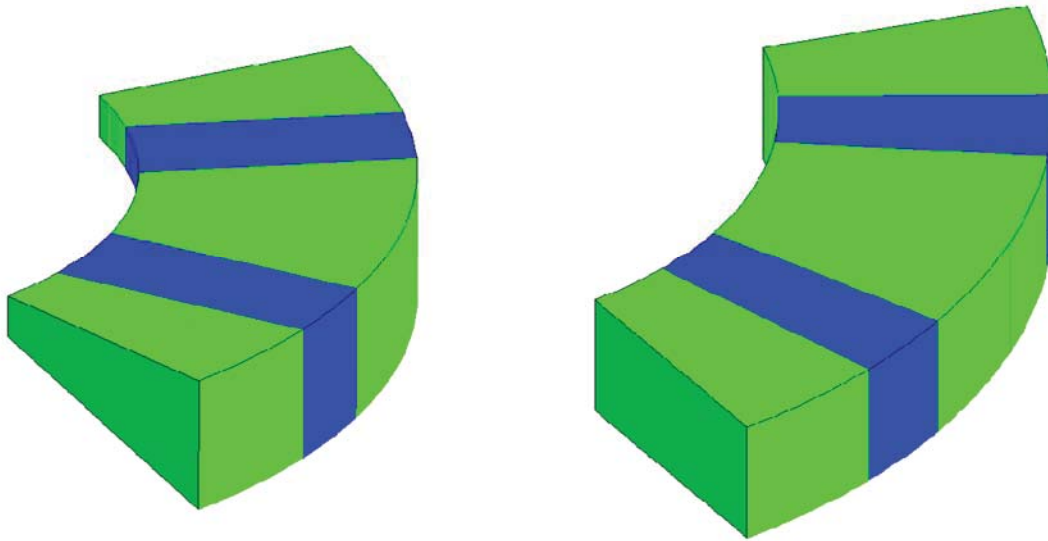


Figura 2-1: Rotor con y sin biselado.

### Densidad de flujo con el rotor sin biselado

Como se había analizado anteriormente, al realizar la construcción de un rotor sin biselado, esta genera una mayor saturación en el fierro de la máquina. En donde, se puede observar que se encuentran altamente saturado en los dientes del estator (Figura 2-2), los cuales quedan fuera de rango recomendados según los libro de estudio [8], la densidad de flujo obtenido son de 2.1 a 2.3 en los dientes de la ranura del estator, los cuales se encuentran fuera de un rango recomendado (Tabla B-1 valores deseados). Por lo cual se debe buscar un optima solución que evite este fenómeno.

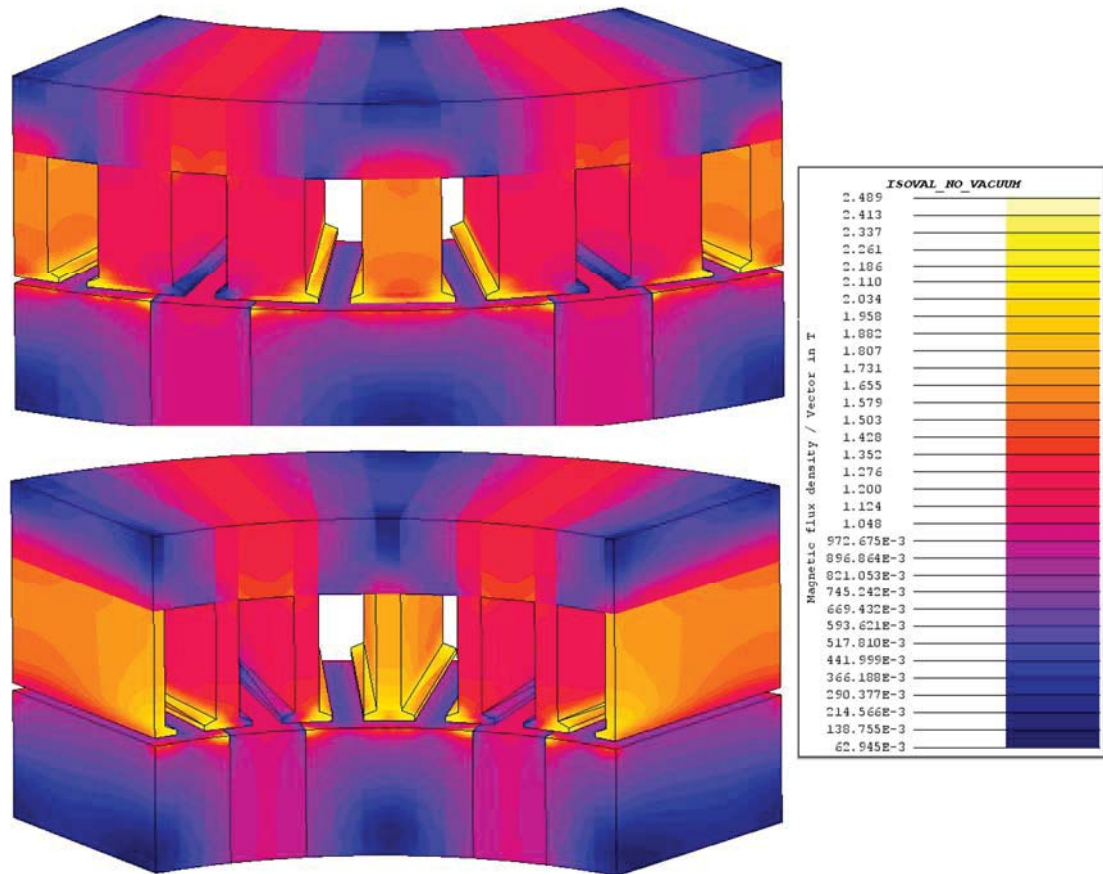


Figura 2-2: Densidad de flujo magnético con rotor sin biselado.

### 2.1.1 Rotor sin biselado y con variación de los anchos de los IPs

Para disminuir la densidad de flujo magnético en la máquina una solución encontrada para evitar este fenómeno se realiza una variación de los anchos de los IPs en ambos radios, debido que esto provoca que se obtenga menor volumen de los IPs, produciendo que la distribución de la densidad de flujo en los dientes del estator sea más homogénea o pareja y tan bien, produce una mejora en la construcción de la máquina facilitando la utilización de chapas en el rotor por motivos que esta deben ir en forma paralela al flujo.

Realizando las simulaciones en donde se varió los anchos de los IPs, ya sea en el diámetro interior con en el exterior, se encontró la solución óptima y la que se obtiene una homogénea magnetización de los dientes de estator en todo el radio de la máquina, Esta fue encontrada cuando los valores de los anchos de los IPs son de 5 [mm] en el

diámetro interior y de 15 [mm] en el exterior y la cual se muestra la geometría de esta en la Figura 2-3.

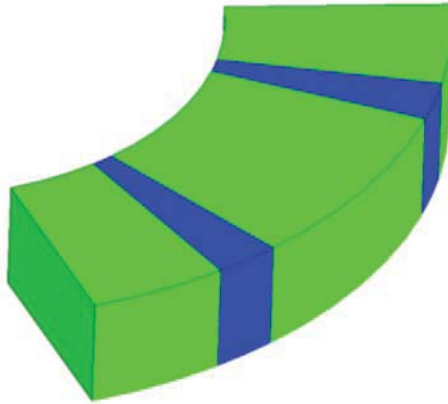


Figura 2-3: Rotor sin biselado y con variación de los anchos de los IPs.

### **Densidad de flujo con rotor sin biselado y con variación del ancho de lo IPs**

Para la comprobación de la disminución de la saturación en la máquina, se muestran los resultados de la densidad de flujo obtenido para la solución óptima encontrada de la variación de los IPs.



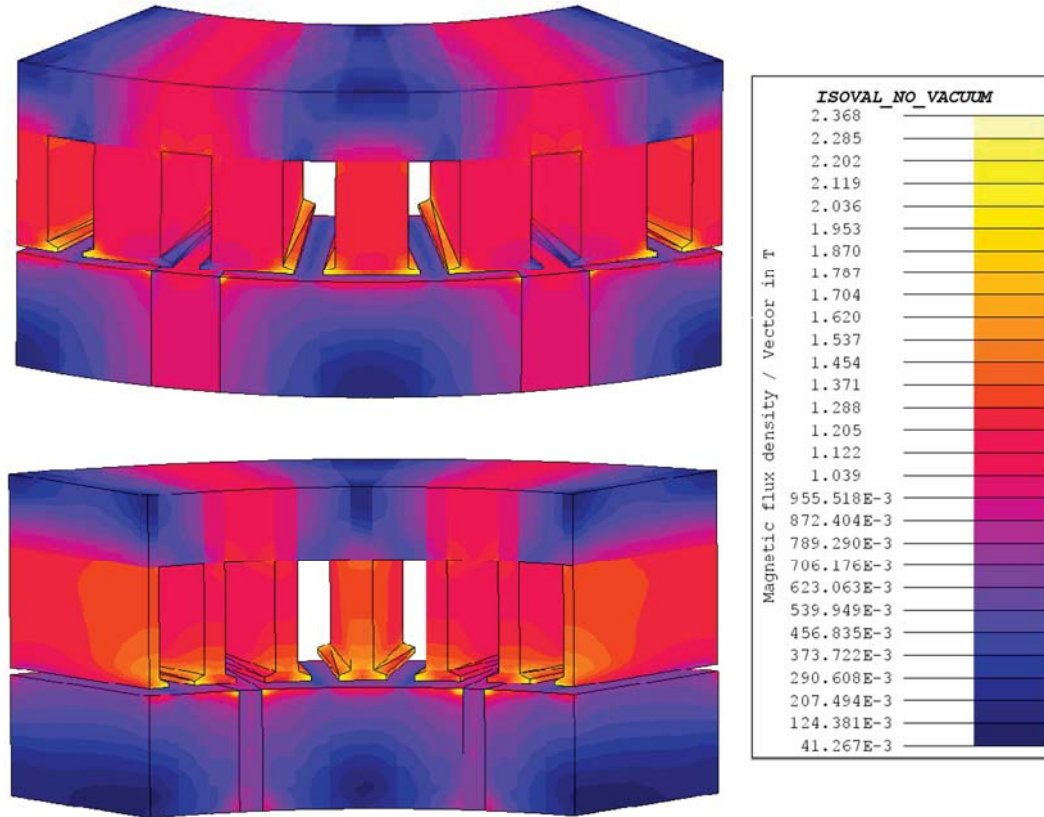


Figura 2-4: Densidad de flujo magnético con variación de anchos de los IPs.

Observando la figura anterior se puede determinar los niveles de saturación de esta, los cuales se encuentra en valores óptimos (Tabla B-1 valores deseados). Los cuales estos valores se especifican y se comparan en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1: Valores de densidad de flujo magnético.

Partes	Densidad de flujo	
	Valor Obtenido	Valor Optimo
Yugo del estator	1.28	1.0 - 1.5
Diente	1.8	1.6 - 2.0
Yugo del rotor	1.04	1.0 - 1.5
Núcleo del polo	1.28	1.3 - 1.7

Otro propósito de la realización de variación de los anchos de los IPs fue encontrar una igual magnetización de los dientes de estator en todo el radio de la máquina. En donde

en la Figura 2-5 se muestra este fenómeno, para lo cual se compara la magnetización de ambos casos, con rotor sin biselado, pero en el primer caso sin variación del ancho IPs (2-5a) y la siguiente (2-5b) con variación. Observando que se obtiene una magnetización semejante en todo el radio de los dientes para segundo caso.

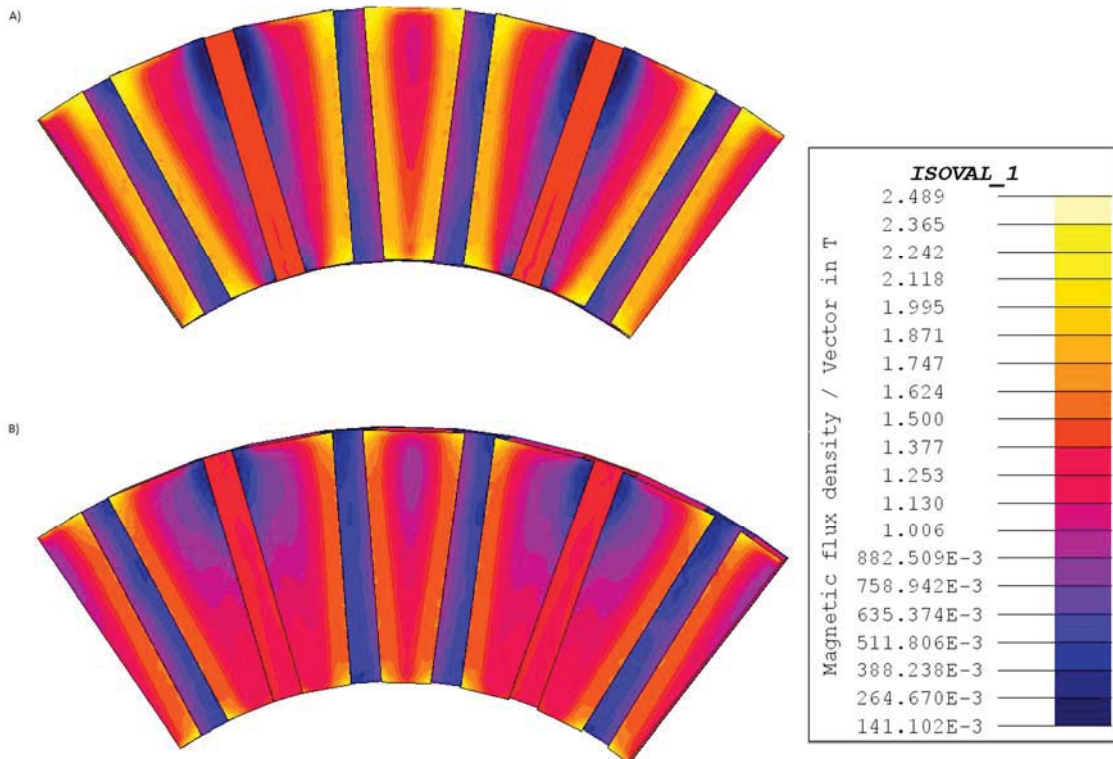


Figura 2-5: Densidad de flujo magnético en los dientes.

Obteniendo así una nueva topología de la máquina para la facilitación de la creación mediante chapas magnéticas, en donde, se obtuvo valores de densidad de flujo óptimo y una magnetización homogénea en los dientes del estator en todo el radio de la máquina, lo cuales se obtuvieron mediante el rotor sin biselado y la variación de los anchos IPs, reduciendo su tamaño a medida que disminuye en ancho de los dientes del estator, obteniendo un valor de 5 mm en el diámetro interior y de 15 mm en el diámetro exterior.

## 2.2 Torque Cogging

Las máquinas con imanes permanentes con ranuras en el estator presentan dos componentes de torque pulsante no deseadas. La primera corresponde al torque producido

por el contenido armónico en las formas de onda de voltaje y corriente. La otra componente es el torque cogging. Este torque es un efecto indeseado que se produce debido por la interacción entre el flujo de los imanes y la anisotropía del estator producida por las ranuras, es decir, a la tendencia que tienen los imanes de alinearse con los dientes de estator. En otras palabras el torque de cogging es causado por la variación de la energía magnética almacenada en el entrehierro dada por la interacción entre el flujo magnético del rotor y la variación de reluctancia de estator a consecuencia de las ranuras, es decir, con el camino de menor reluctancia (Ecuación 2.1), por lo que un estator sin ranuras no posee este tipo de torque. [9]

$$T_{cogg} = \sum_1^p \left( -\frac{1}{2} \phi_{gm}^2 \frac{dR}{d\theta_r} \right) \quad (2-1)$$

Donde:

$2p$  : Número de polos.

$R$  : Reluctancia.

$\phi_{gm}$  : Flujo en el entrehierro.

$\theta_r$  : Posición angular del rotor.

El torque cogging es un efecto producido exclusivamente por los imanes permanentes, por lo que es independiente de la corriente y por lo mismo las técnicas para reducirlo deben buscar la interacción óptima entre el flujo del imán y la variación de reluctancia respecto de la variación angular. La componente de torque de cogging está presente en todas las máquinas con imanes permanentes que poseen ranuras y dientes en el estator, por lo que es necesario encontrar la manera de reducirlo, pero sin disminuir el flujo en el entrehierro.

De la ecuación 2-1 se puede observar que para reducir el torque de cogging se debe minimizar la variación de reluctancia respecto de la posición angular del rotor  $dR/d\theta$ , ya que si se disminuye el flujo en el entrehierro ( $\phi_{gm}$ ) también lo hará la potencia de la máquina y su torque nominal.

$$R = \frac{l}{\mu_0 \mu_r \cdot A} = \frac{l}{\mu \cdot A} \quad (2-2)$$

Donde:

$l$  : Longitud media del material, medida en forma paralela a la dirección del flujo.

$A$  : Área de la sección transversal atravesada por el flujo.

$\mu_0$  : Permeabilidad relativa.

$\mu_r$  : Permeabilidad del vacío.

Según la ecuación la reluctancia  $R$  se puede definir en función de 3 factores ( $\mu$ ,  $l$  y  $A$ ) los cuales se pueden considerar constantes para todo un diente y toda una ranura respectivamente, pero debido a que la permeabilidad del aire o ranura es mucho menor que la del hierro, se puede decir que la reluctancia de ranura es mayor que la de diente y en general variable a medida que el rotor cambia su posición angular.

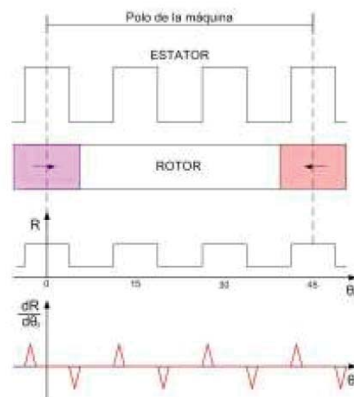


Figura 2-6: Distribución y variación de reluctancia a lo largo del entrehierro. [2]

La figura anterior muestra la variación de reluctancia  $R$  de un polo de la máquina. Esta se genera a medida que el rotor varía su posición angular  $\theta_r$ , enfrentándose a las reluctancias de dientes y ranuras, las cuales poseen diferente valor.

La frecuencia por ranura en la forma de onda del torque cogging está dada por la ecuación (2.3). [9]

$$N_{cogg} = \frac{2p}{\text{MCD}\{N_R, 2p\}} \quad (2-3)$$

Donde:

$2p$  : Número de polos.

$N_R$  : Número de ranuras.

$MCD$  : Máximo común divisor.

Utilizando la ecuación 2-3 se obtiene el periodo del torque cogging, en donde, el valor obtenido es de 1, debido que la máquina está diseñada para treinta ranuras y diez polos. Esto se significa que en un paso de ranura se produce un periodo de torque cogging y el paso de ranura tiene un valor de doce grados. Para lo cual en la siguiente figura se muestra un periodo de torque cogging.

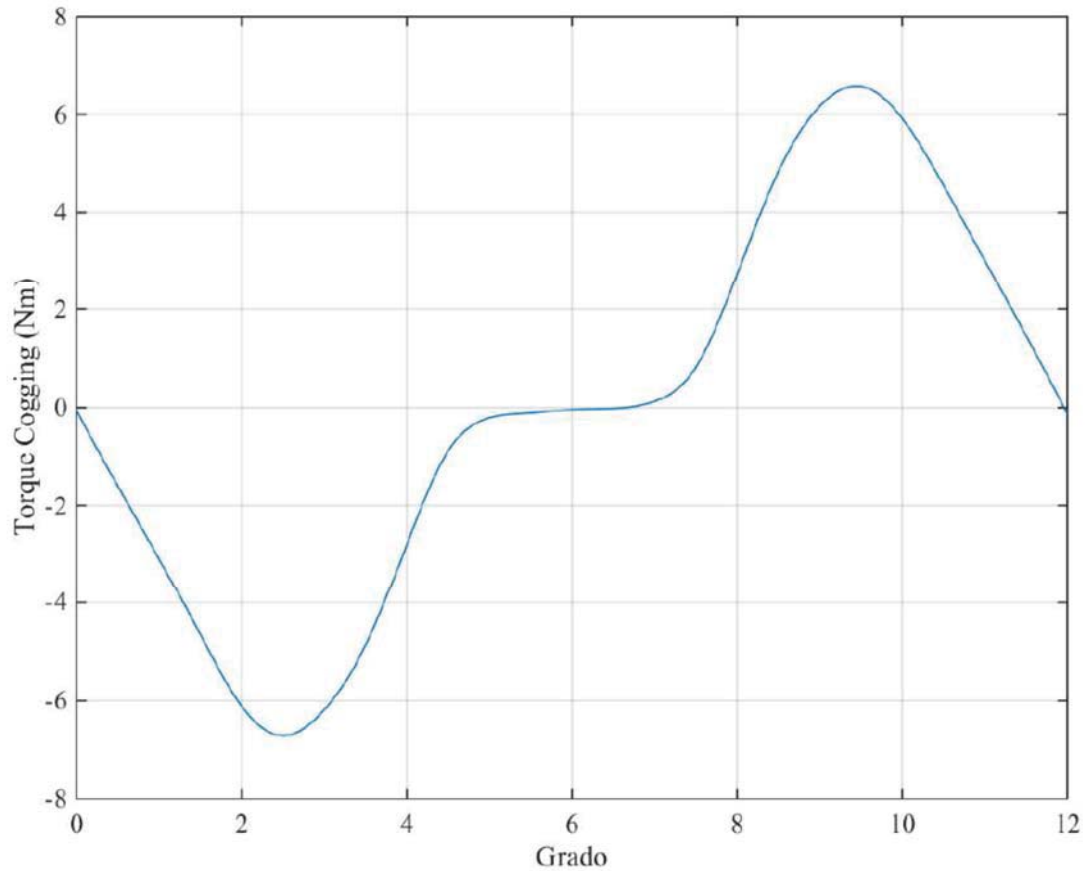


Figura 2-7: Torque Cogging.

De la figura se puede obtener que el valor máximo de este tiene un valor de 6.8 [Nm] y la variación de esta es casi el doble, por lo cual se debe analizar una forma de disminuir este efecto indeseado.

### 2.3 Método de reducción del torque cogging: Skewing

La alta densidad de torque y su capacidad de trabajar a bajas velocidades hacen que las máquinas de flujo axial con imanes permanentes sean muy favorables en aplicaciones de alto desempeño, sin embargo, el torque cogging de este tipo de máquinas posee efectos indeseados de torque ripple, ruido y vibraciones, por lo que es necesario reducirlo si se desea una máquina de alto desempeño y precisión.

Existen varias técnicas para realizar la reducción del torque cogging, pero la técnica utilizada en este proyecto se denomina skewing, en donde, en esta se aplica una variación

de la posición de los IPs, es decir, estos se rotan respecto a su eje. Para este método se utilizarán dos modos, el primero cada par de IPs se rotan ambos en el mismo sentido de giro y para el segundo caso el par de IPs se rotan en sentidos opuestos. [10]

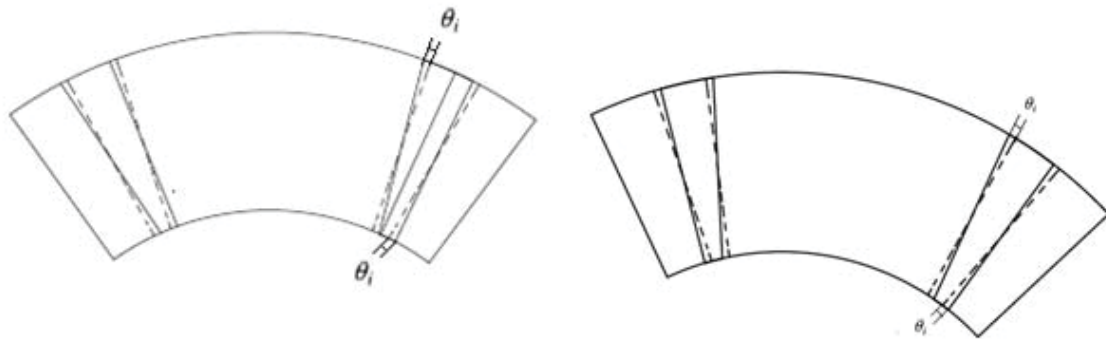


Figura 2-8: Método de reducción del torque cogging llamado Skewing.

### 2.3.1 Primer método de Skewing

Para este primer método de skewing, se produce la rotación por par de IPs, para el cual ambas rotaciones se producen para el mismo sentido. En donde la forma de la topología se muestra en la siguiente figura.

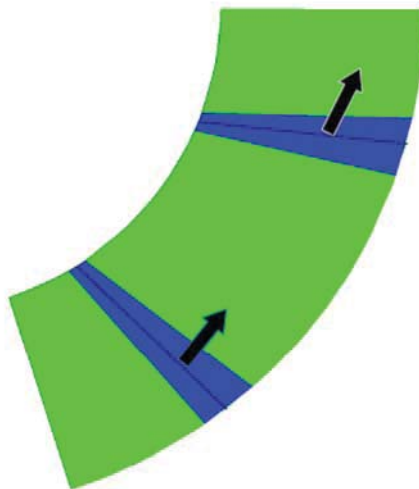


Figura 2-9: Metodología Skewing: rotación hacia el mismo sentido.

Para el análisis de la reducción del torque cogging mediante del método de skewing, se realizó la rotación de los IPs en su eje gradualmente mediante el corrimiento de 1 [mm] por simulación. Y los resultados obtenidos se muestran en la Figura 2-10, la cual se muestra cada forma de onda superpuestas entre sí, para así obtener una comparación entre hechas y obtener la topología que muestra menor variación del torque cogging.

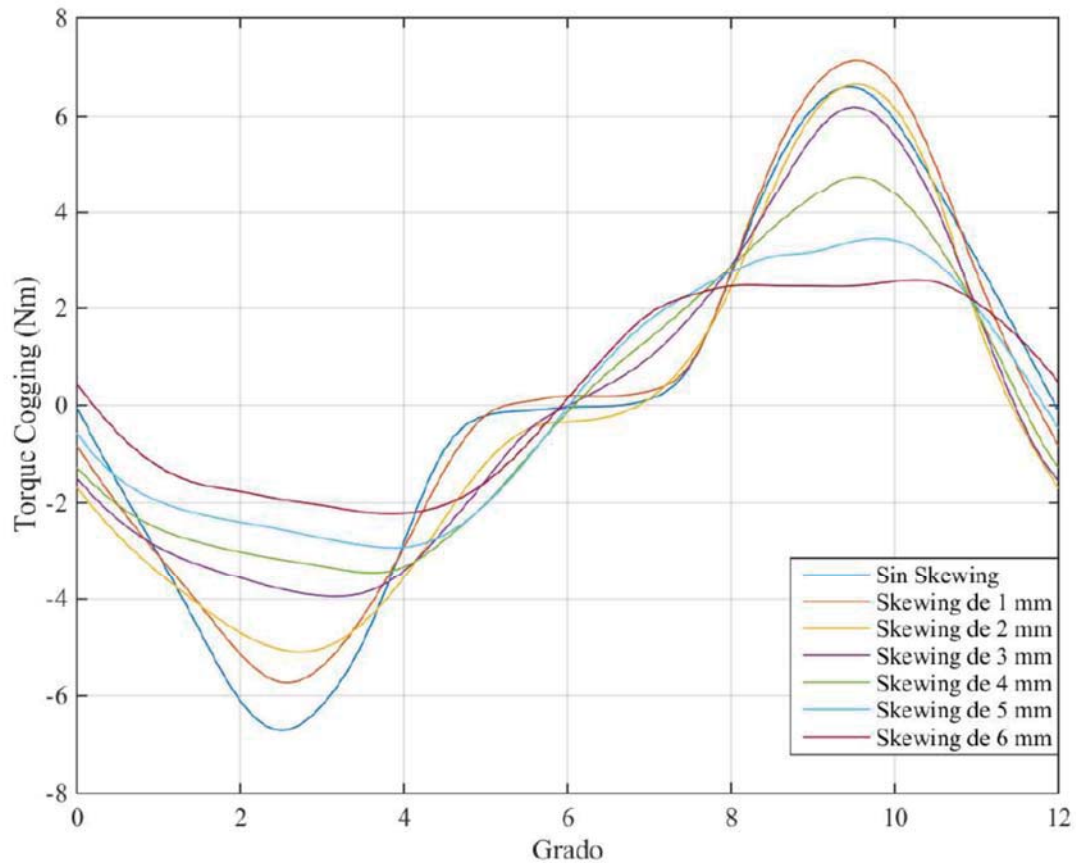


Figura 2-10: Torque Cogging a distintas variación de Skewing.

En las figuras se muestran las formas de onda del torque cogging para cada análisis de skewing, en donde su valor mínimo producido es de 2.56 [Nm], cuando el skewing tiene un corrimiento de 6 [mm] para la rotación en el mismo sentido ambos IPs.

Con los datos entregado de la figura anterior se puede obtener cada valor máximo para todos los casos del método skewing, con esto se realizó la Figura 2-11 la cual se muestra todos los valores máximos en función de la variación del skewing. De la cual, se puede



observar que el valor máximo del torque cogging va en disminución al realizar este método y se estabiliza a los 6 [mm], debido que en este punto es cuando se produce la mayor reducción, debido que los IPs alcanzan a cubrir todo el espacio de la ranura. Y esta topología se logró obtener una reducción del 62% aproximadamente.

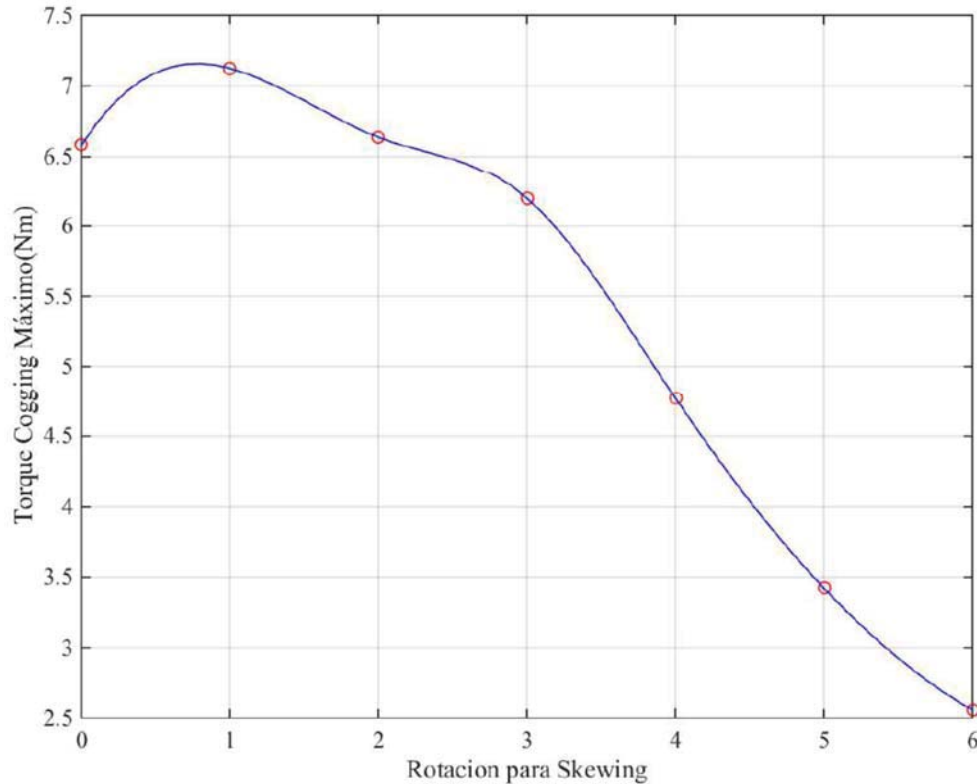


Figura 2-11: Función respecto al valor máximo de torque cogging.

### 2.3.2 Segundo método de Skewing

Para este segundo método de skewing, se produce la rotación por par de IPs en donde ambos se realiza una rotación en sentido opuesto. En donde la forma de la topología se muestra en la siguiente figura.

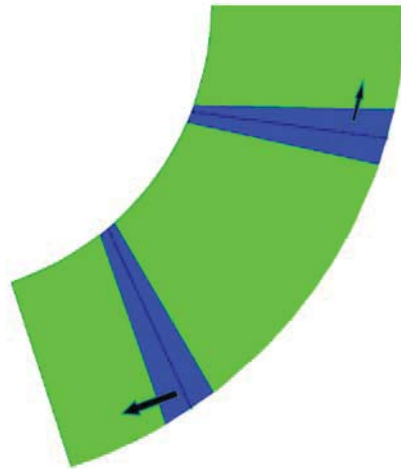


Figura 2-12: Metodología de Skewing: rotación en sentido opuesto.

Para el análisis de la reducción del torque cogging mediante el método de skewing, se realizó la rotación de los IPs en su eje gradualmente mediante el corrimiento de 1 [mm] por simulación. Y los resultados obtenidos se muestran en la Figura 2-13, la cual se muestra cada forma de onda superpuestas entre sí, para así obtener una comparación entre hechas y obtener la topología que muestra menor variación del torque cogging.

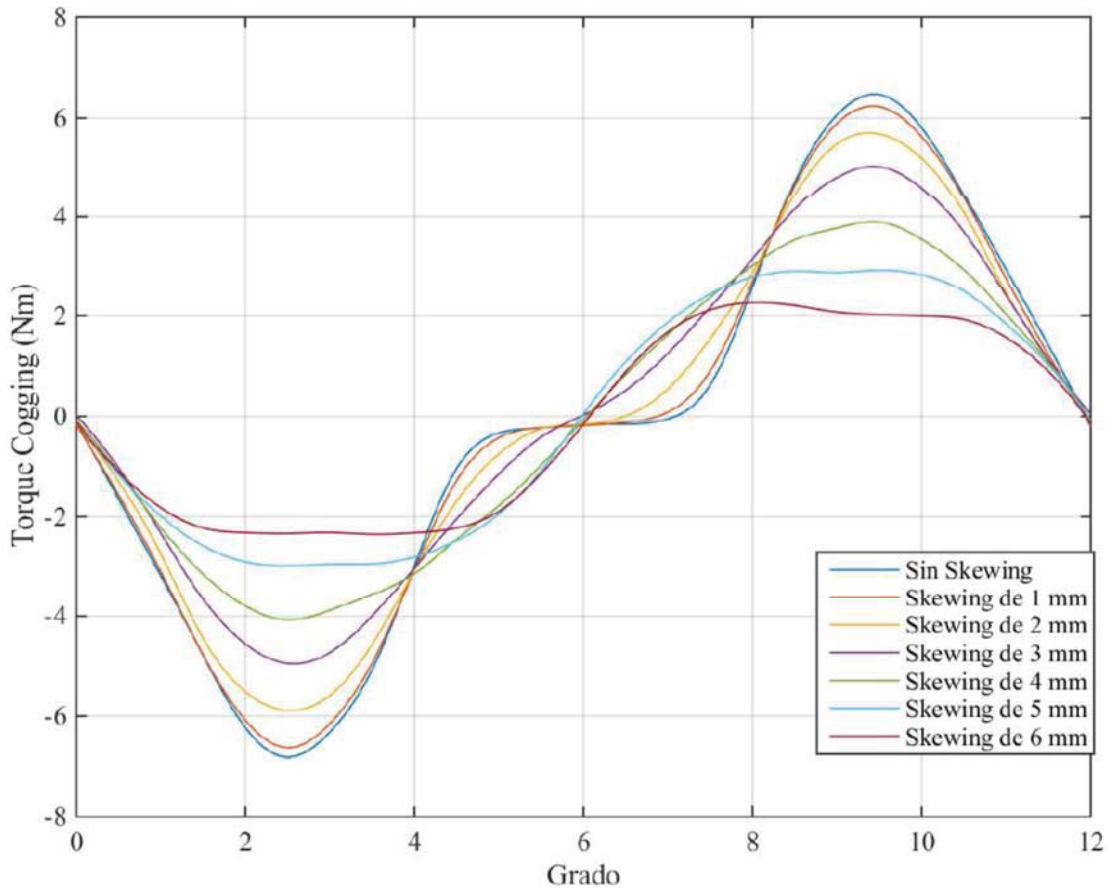


Figura 2-13: Torque Cogging a distintas variación de Skewing.

En las figuras se muestran las formas de onda del torque cogging para cada análisis de skewing, en donde su valor mínimo es de 2.34 [Nm], cuando el skewing tiene un corrimiento de 6 [mm] para la rotación en sentido opuesto ambos IPs.

Con los datos entregado de la figura anterior se puede obtener cada valor máximo para todos los casos del método skewing, con esto se realizó la Figura 2-14 la cual se muestra todos los valores máximos en función de la variación del skewing. De la cual, se puede observar que el valor máximo del torque cogging va en disminución al realizar este método y se estabiliza a los 6 [mm], debido que en este punto es cuando se produce la mayor reducción debido que los IPs alcanzan a cubrir todo el espacio de la ranura. Y esta topología se logró obtener una reducción del 65% aproximadamente.

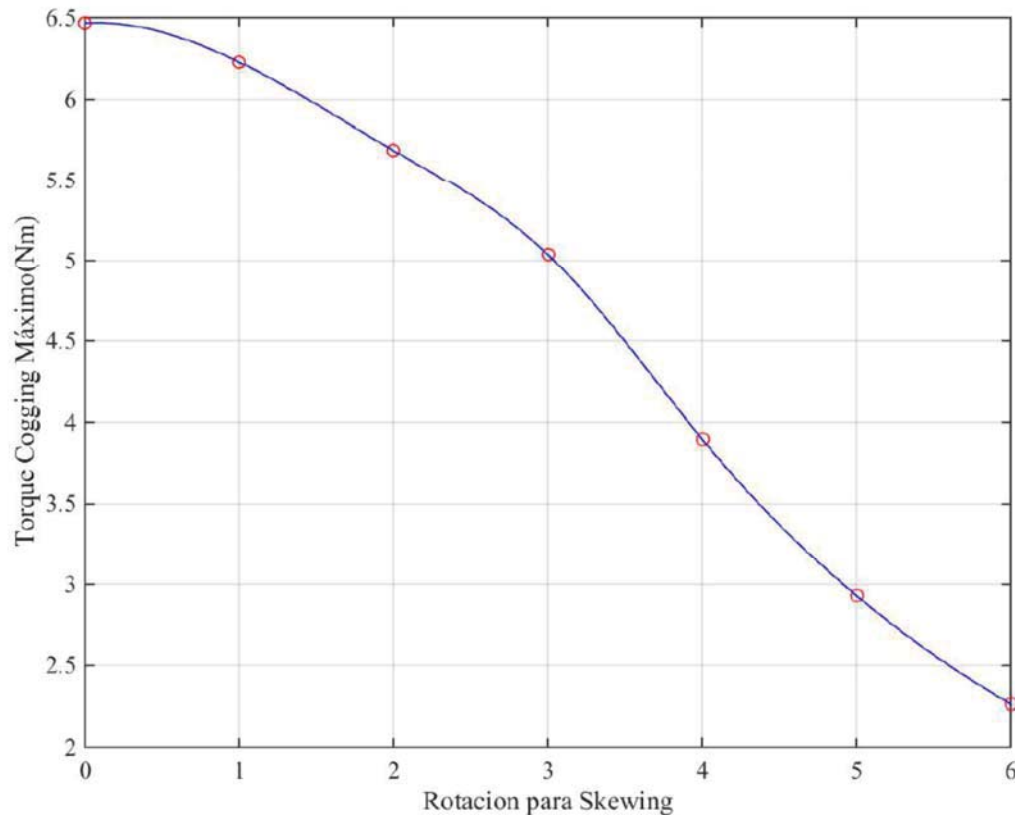


Figura 2-14: Función respecto al valor máximo de torque cogging.

Realizando el estudio del método de reducción del torque cogging llamado skewing, se pudo observar que al realizar la rotación de los IPs para el mismo sentido y el sentido opuesto los resultados para esta máquina fueron cercanos. Pero el que obtuvo mayor reducción de este fenómeno, fue utilizando la rotación en sentido opuesto de los IPs. Y esta mayor reducción se obtuvo para ambos casos cuando las posiciones de los IPs alcanzaban a cubrir en su totalidad el área de la ranura del estator de la máquina.

## 2.4 Devanado

Principio de operación de las máquinas eléctricas se basa en la interacción entre el campo magnético y las corrientes que circulan por los conductores de estator. La construcción del bobinado y conexiones junto a las corrientes y tensiones con que se alimenta el devanado, determinan el modo de operación y el tipo de máquina eléctrica.

### Devanado distribuido

Los devanados de tipo distribuido utilizan varias ranuras por polo y fase, permitiendo así un mejor aprovechamiento del núcleo de la máquina y, por tanto, optimizar su tamaño. En estos devanados los haces activos de una misma bobina se encuentran ubicados en polos contiguos de signo contrario, esto da lugar a que las espiras de una fase correspondientes a un mismo polo no estén sometidas a los mismos flujos magnéticos recibiendo por este motivo el nombre de distribuidos.

El sistema de devanados distribuidos es el más utilizado en la actualidad para la construcción de circuitos eléctricos en estatores, tanto en máquina de corriente alterna síncronas como asíncronas. [11] Y debido a la topología que tiene la máquina con treinta ranuras la forma más conveniente es utilizar devanado distribuido con una ranura por fase. Para lo cual se muestra la forma en la siguiente figura.

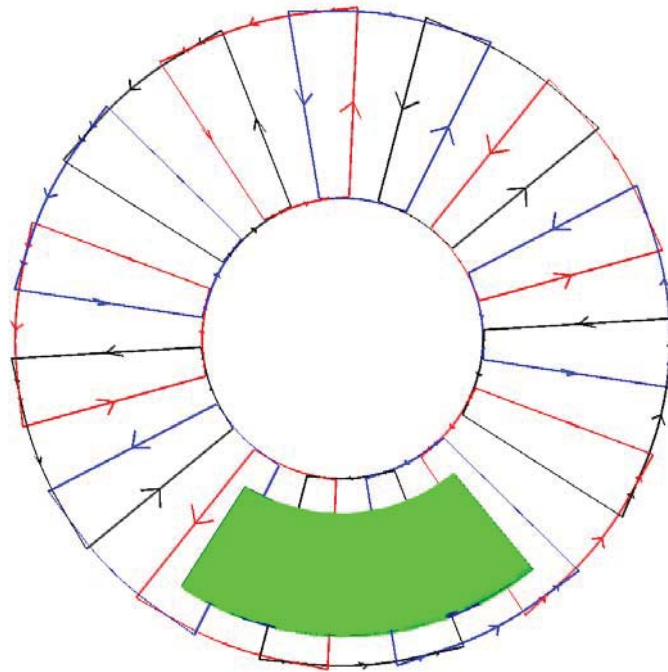


Figura 2-15: Devanado distribuido utilizado.

La obtención del número de vuelta por fase que utilizaran se realizara mediante la ecuación de tensión inducida. Pero para llegar a la obtención de esta, es necesario obtener el flujo magnético mediante la densidad de flujo magnético en el entrehierro.

### Flujo magnético

La magnitud matemática que está relacionada con el número de líneas del campo que atraviesa una superficie se le conoce como flujo magnético  $\Phi$ . Este se puede obtener por medio de la integral de superficie del campo B, el cual es normal al área a partir de la ley de Gauss, la cual nos dice:

$$\Phi_{polo} = \left( \frac{D_o^2 - D_i^2}{4p} \right) \cdot \hat{B}_g \cos \omega t \quad (2-4)$$

Donde:

$\Phi_{polo}$  : Flujo magnético.

$B$  : Densidad de flujo.

$B_g$  : Densidad de flujo magnético en el entrehierro.

$\vartheta$  : Grado mecánicos.

$\alpha$  : Grado eléctrico.

$p$  : Pares de polos.

$D_o$  : Diámetro exterior.

$D_i$  : Diámetro interior.

## 2.5 Densidad de flujo magético en el entrehierro

La intensidad de campo magnético H. es una medida del “esfuerzo” de una corriente por establecer un campo magnético. La potencia del campo magnético producido depende del material que contenga el camino de integración en el cual se produce la intensidad de campo magnético. Una vez establecida una corriente en una bobina se produce un flujo

magnético en el núcleo. El grado en el cual el flujo está concentrado se le conoce como densidad de flujo magnético  $B$ , el cual es medido en un punto dado. La relación entre intensidad de campo magnético  $H$  y la densidad de flujo magnético  $B$  producida dentro del material está dada por la expresión:  $B = \mu H$ .

### 2.5.1 En Vacío

La obtención de la densidad de flujo magnético en el entrehierro se realiza mediante el programa Flux, para el cual se obtiene un estimado debido que se solo se obtuvo en centro del entrehierro la cual se muestra en la siguiente figura.

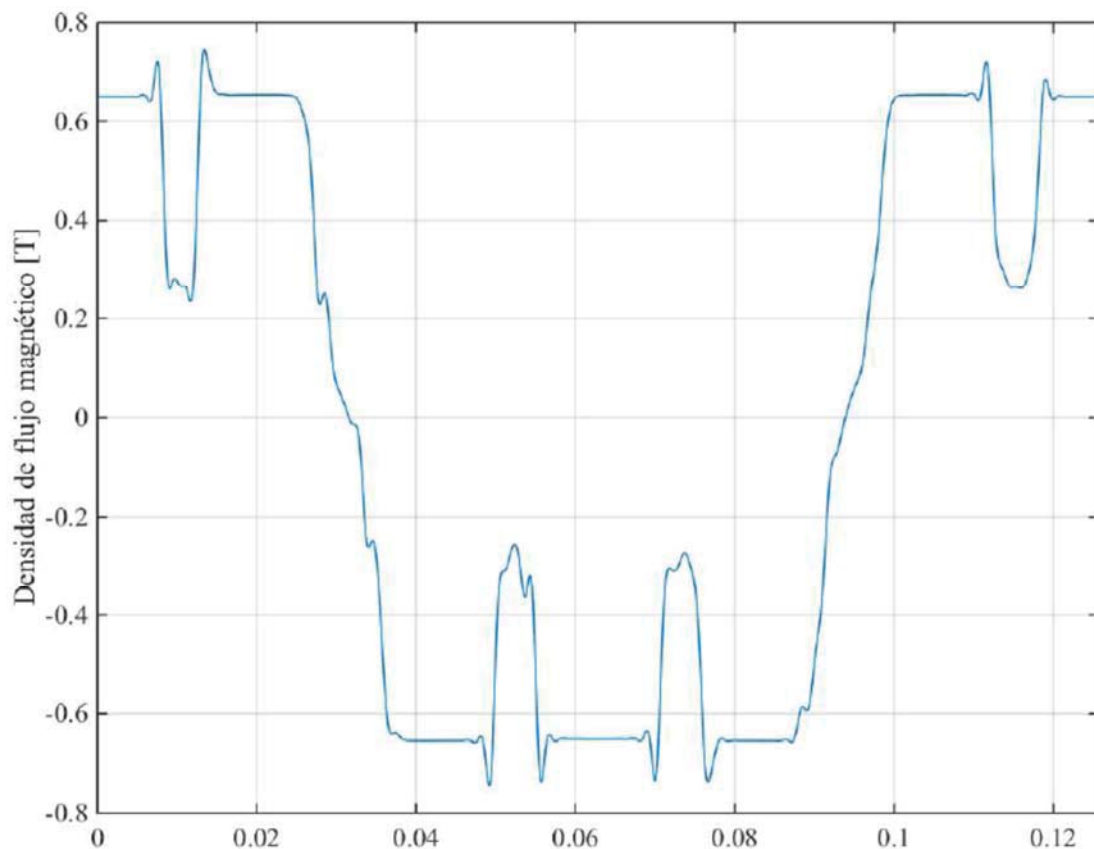


Figura 2-16: Densidad de flujo magnético en el entrehierro.

Se puede observar de la figura anterior que esta contiene algunas caídas de la densidad de flujo en el entrehierro, esto se debe la variación de reluctancia en el estator, producto de las ranuras de la máquina.

Y ya que la forma de onda no es completamente sinusoidal, por ende, la densidad de flujo magnético está compuesta por más de una frecuencia, y es necesario obtener el espectro de frecuencia, para así saber las magnitudes de las componentes involucradas y en especial la fundamental la cual será utilizada posteriormente.

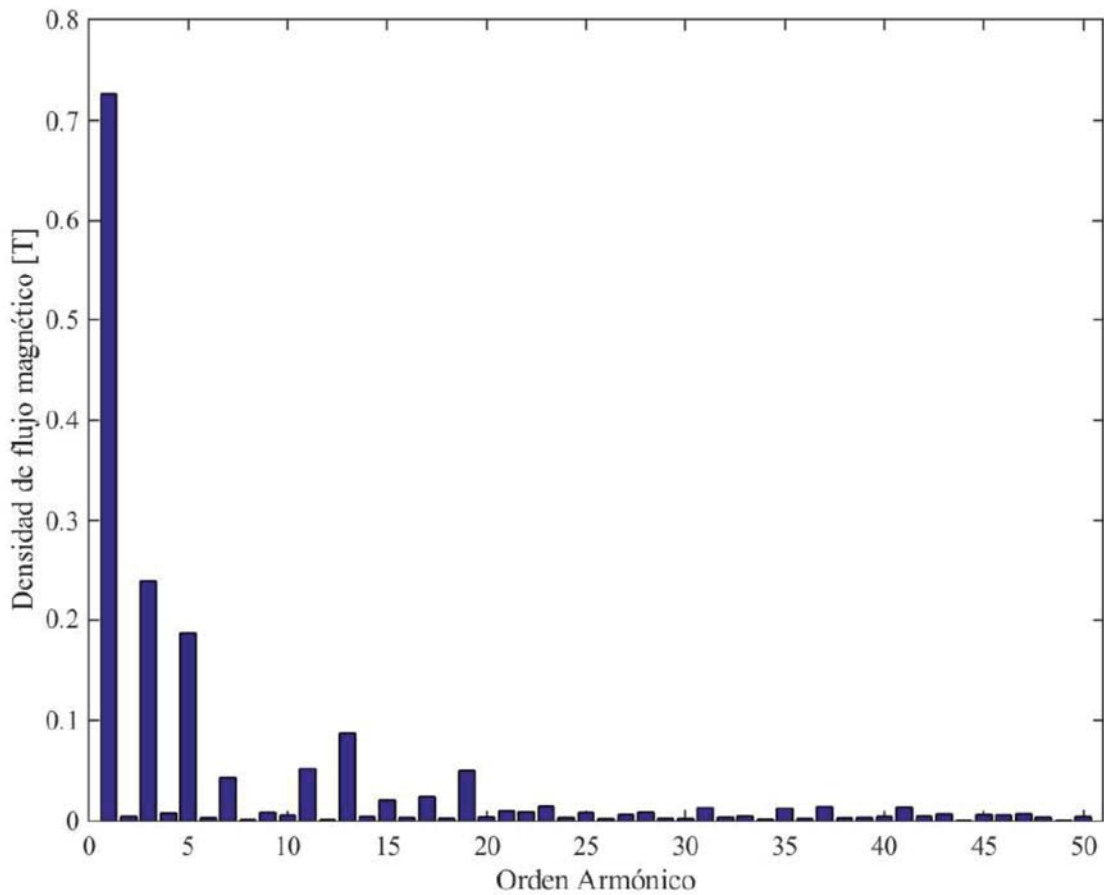


Figura 2-17: Espectro de frecuencia.

De la figura del espectro de frecuencia, el valor importante a utilizar es el de la frecuencia fundamental en donde tiene una magnitud de 0,726 [T]. Y también se observa que las componentes de frecuencia que tiene mayor influencia son las armónicas impares, especialmente la de orden 3° y 5° armónicas.



### 2.5.2 Con carga

También se obtiene la densidad de flujo en el entrehierro con carga, para poder observar la influencia que genera la corriente, debido que en vacío solo es el flujo producido por los IPs. Para obtención de la densidad de flujo magnético en el entrehierro se realiza mediante el programa Flux, para el cual se obtiene un optimado debido que se solo se obtuvo en centro del entrehierro la cual se muestra en la siguiente figura.

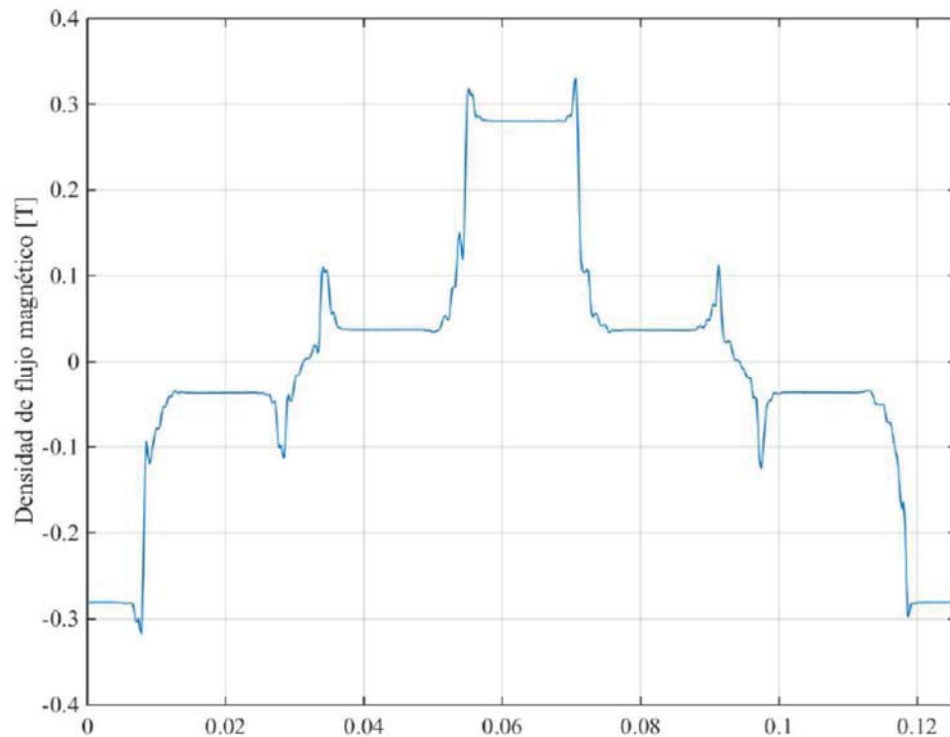


Figura 2-18: Densidad de flujo magnético.

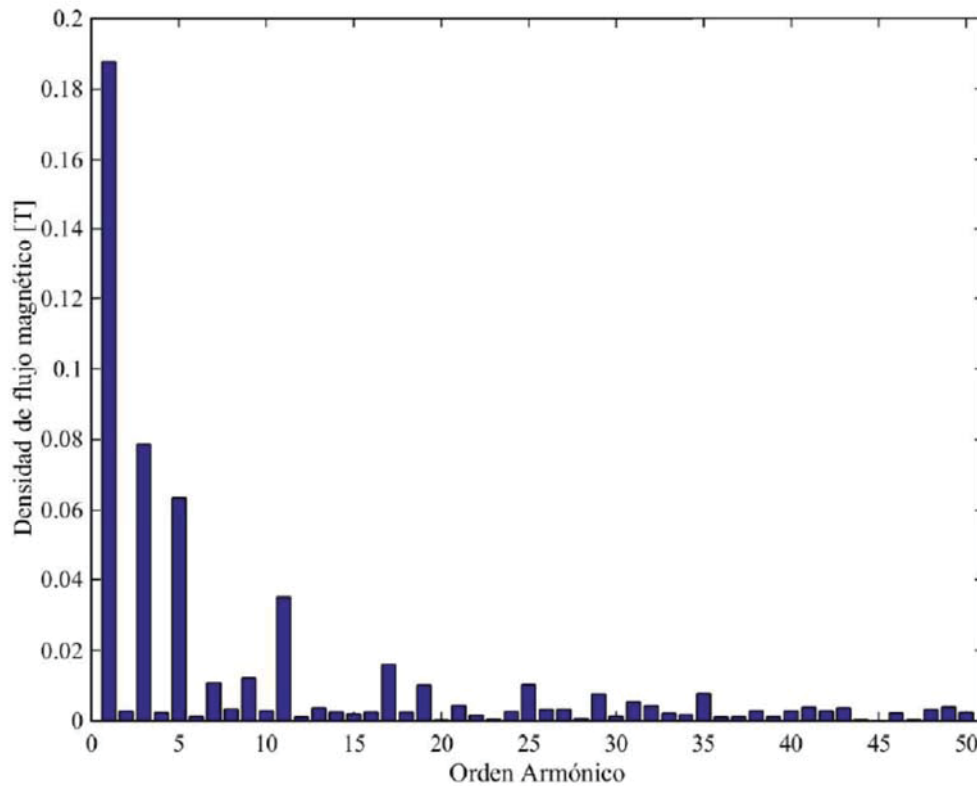


Figura 2-19: Magnitud del espectro de frecuencia de la densidad de flujo magnético.

En donde se puede observar que las componentes de frecuencia que mayor influencia tiene producto de la bobina en carga son las componentes impares y en especial la de orden 3° y 5° armónicas.

Por lo cual, si al existe variación en el torque electromagnético un aporte a esta variación es provocada por las componentes armónicas especialmente a la de orden 3° y 5°, Por ende, para mejorar esta topología se puede buscar un método de reducción de estas componentes armónicas.

## 2.6 Tensión inducida

Existen diversas maneras en las que un campo magnético afecta sus alrededores, una de las cuales es la tensión inducida. La tensión inducida es el fundamento de la ley de Faraday, la cual establece que, “si un flujo atraviesa una espira de alambre conductor, se inducirá en ésta un voltaje directamente proporcional a la tasa de cambio del flujo con respecto al tiempo”. La ley de Faraday establece la siguiente ecuación:

$$e_{ind} = -\frac{d\lambda}{dt} \quad (2-5)$$

$$e_{ind} = N_{eff} \frac{d\phi_{polo}}{dt} = -N \cdot K_w \cdot \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{4p} (D_o^2 - D_i^2) \cdot \hat{B}_g \cos \omega t \right) \quad (2-6)$$

$$e_{ind}(t) = \frac{2\pi f_s \cdot K_w \cdot N \cdot \hat{B}_g \cdot (D_o^2 - D_i^2)}{4p}$$

Donde:

$e_{ind}$  : Tensión inducida.

$N$  : Número de vuelta.

$K_w$  : Constante de bobinado.

$\omega$  : Frecuencia angulas.

$p$  : Pares de polos.

### Calculo de número de vuelta

Obtenido la ecuación de la tensión inducida se despeja la variable de número de vuelta, la cual se está buscando, llegando a la ecuación 2-8. En donde los valores utilizados son 0.726 [T] para la densidad de flujo en el entrehierro, 311 [V] para la tensión inducida (valor máximo), constante de bobinado 1 (Apéndice B) y la frecuencia de 50 [Hz].

$$N = \frac{4p \cdot \hat{e}_{ind}}{2\pi f_s \cdot K_w \cdot \hat{B}_g \cdot (D_o^2 - D_i^2)} \quad (2-7)$$

Obteniendo un valor de número de vueltas por ranura de 130 [vueltas]. Con este valor, ya se diseña completamente la máquina, para lo cual para verificar si este cálculo fue realizado exitosamente, se obtiene mediante simulación la tensión inducida y se comprueba el valor deseado de 220 [V<sub>rms</sub>]. Obtenido la siguiente forma de onda de tensión la cual se muestra en la figura 2-20.

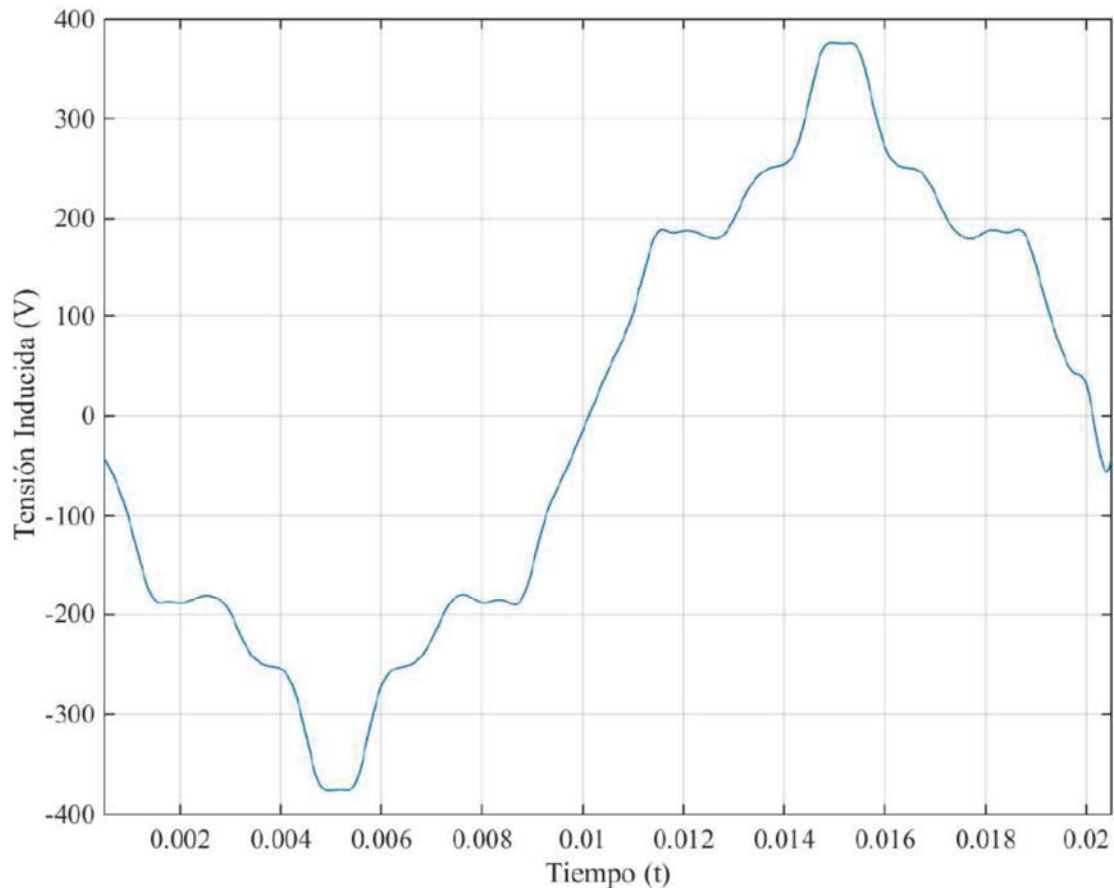


Figura 2-20: Tensión inducida.

Se puede observar que el valor máximo es de 376 [V], y se obtuvo que la tensión inducida tiene un valor rms de 221[V] en donde tiene un valor deseado. Por lo cual el número de vuelta por ranura a utilizar son de 42 [vuelta].

También se observa que la forma de onda de la tensión no es completamente sinusoidal por lo cual tiene componentes armónicas involucradas, por lo cual este suceso también afecta a la variación del torque electromagnético de la máquina.

## 2.7 Torque electromagnético

Para la obtención del torque electromagnético se utilizó la topología vista en el capítulo 2.4, el método que se obtiene mayor reducción del torque cogging, la cual ocurre con la rotación de los IPs en sentido opuestos. Para poder verificar la influencia que se produce

por el torque cogging y utilizando el método de reducción. Para lo cual, se simulo utilizando los datos obtenidos de numero de vuelta, para así poder obtener los datos del torque los cuales se muestra en las siguientes figuras.

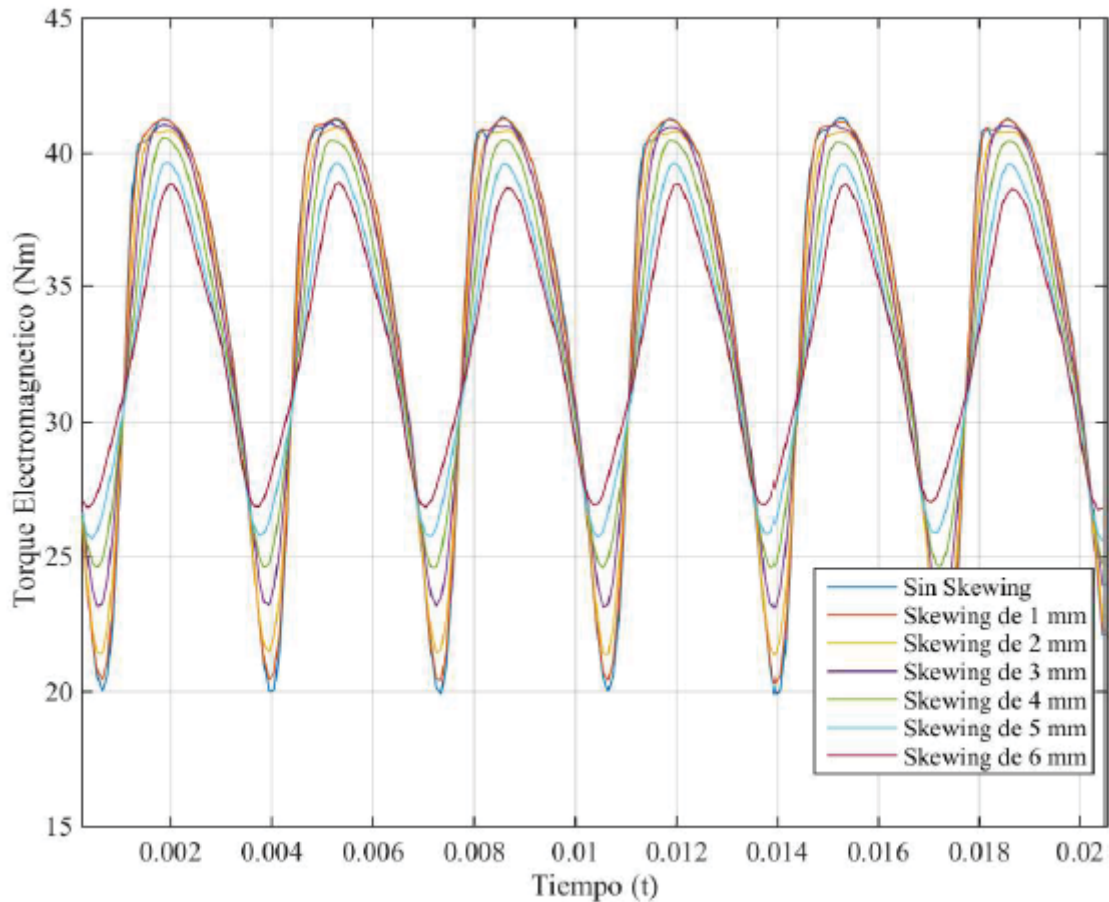


Figura 2-21: Torque electromagnético utilizando metodología skewing.

Con los resultados se puede obtener los valores medio del torque electromagnético el cual se muestra en la Tabla 2-2, ya sea como su valor máximo, mínimo y el rizado. Y en donde la figura se puede ver que el torque tiene una gran variación respecto al su valor medio, lo cual no es recomendado, especialmente para máquina de alto desempeño.

Tabla 2-2: Resultado.

Tipo	Torque <sub>med</sub> [Nm]	Rizado [%]	$T_{max}$ [Nm]	$T_{min}$ [Nm]
Sin Skewing	33.88	63.64	41.36	19.80
Skewing de 1 mm	33.92	61.99	41.32	20.30
Skewing de 2 mm	33.69	57.92	40.95	21.44
Skewing de 3 mm	33.90	52.73	41.05	23.18
Skewing de 4 mm	33.49	47.33	40.46	24.62
Skewing de 5 mm	33.04	42.04	39.66	25.77
Skewing de 6 mm	32.92	36.68	38.92	26.85

Debido que en el torque electromagnético se produce un gran rizado, se debe lograr saber el causante de este fenómeno. En donde un factor importante es el torque cogging pero en este capítulo se obtuvo una topología para la reducción de esta, la cual igual sigue produciéndose una variación importante del valor medio.

Por ende, se debe saber la causal de esto, para lo cual se obtuvo el espectro de frecuencia de la densidad de flujo en el entrehierro, para así saber que armónica tiene mayor influencia en esta variación, debido que el flujo es una componente importante del torque. Este rizado producido, en parte es producto de las armónicas de la densidad de flujo magnético en el entrehierro, la cual tiene solo tiene componentes de orden impares y las más importantes son la 3° y 5° armónica. Otra influencia importante es la tensión inducida, debido que la forma de onda de esta no es sinusoidal, por lo cual está también tiene componentes armónicas, debido que también hay gran influencia del flujo en el entrehierro. Esto es impórtate tenerlo en consideración debido se puede buscar una nueva topología que produzca la reducción de esta.

### 3 Estudio de la máquina con devanado concentrado

Este capítulo se enmarca en la busca de una nueva topología, debido que la anteriormente realizada, se obtuvo una gran variación del torque electromagnético con respecto a su valor medio, es decir, se obtuvo un gran rizado y utilizando técnicas para la disminución del torque cogging, igual se produce este fenómeno y no es despreciable. Debido que las máquinas de flujo axial con imanes permanentes sean muy favorables en aplicaciones de alto desempeño lo cual el rizado producido no es recomendable, por ende, se tuvo que realizar una nueva topología y debido que la máquina anterior fue realizada con devanado distribuido y con el método de reducción del torque cogging llamada skewing, pero existe influencia armónica en el flujo producido. Por lo cual esta nueva topología se cambiará el tipo de bobinado a devanado concentrado. Debido que esta tiene otras influencias armónicas y se puede producir que exista anulación de alguna componente armónica que tenga una gran participación en la variación.

Los devanados concentrados son aquellos en los que en cada una de las ranuras del estator se encuentran alojados las espiras de una misma fase y en todas las espiras de un polo están atravesadas por el mismo flujo magnético principal. Sin embargo, en el devanado distribuido las ranuras pueden estar ocupadas por espiras de distintas fases y esto da lugar a que las espiras de una fase correspondientes a un mismo polo no estén sometidas al mismo flujo magnético.

Las principales ventajas que presenta esta disposición de los conductores frente a la configuración distribuida son las siguientes: Las cabezas de bobinas no se solapan entre sí, ocupando menos espacio que las de los bobinados distribuidos. Esto implica ventajas tanto para la manufacturación como de coste de material. Además, presentan menor resistencia y menos inductancia, ya que la longitud ocupada por los conductores es menor. También presentan un valor superior del factor de relleno, ya que el proceso de insertado automático de las bobinas presenta menos dificultad que en los bobinados distribuidos. Los bobinados concentrados son muy utilizados en la actualidad debido principalmente a la reducción de espacio y ahorro de conductores. Pero la gran desventaja que se produce, es el bajo aprovechamiento del núcleo.

### 3.1 Topología de la máquina con devanado concentrado

Para poder realizar esta nueva topología con devanado concentrado, se debió rediseñar el estator de la máquina debido que con treinta ranuras no se puede realizar un devanado concentrado. En donde el número de ranuras posible y elegido para realizar la nueva topología es con doce ranuras. Por lo cual se debe rediseñar el estator y se calcula todos sus nuevos parámetros, en donde se muestran en la Tabla 3-1 y estos fueron calculados teniendo en consideración que para el diámetro medio el ancho de la ranura sea igual al ancho del diente del estator de la máquina.

Tabla 3-1: Medidas del estator.

Medidas	Valor	Unidad
Diámetro exterior	250	mm
Diámetro interior	150	mm
Altura de la ranura	25	mm
Ancho de la ranura	26	mm
Altura del estator	40	mm
Largo del estator	50	mm
Numero de ranuras	12	



Con las nuevas medidas obtenidas anteriormente se simula la máquina con devanado concentrado mediante el software de elemento finito Flux 3D, en donde se muestra en la Figura.

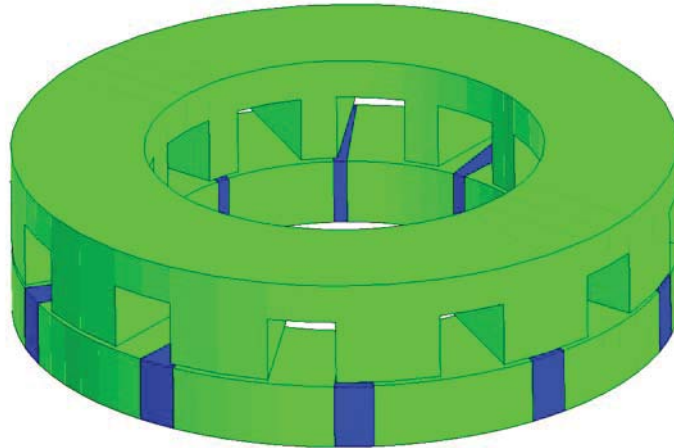


Figura 3-1: Máquina con devanado concentrado realizada mediante Flux 3D.

### **Simetría de la máquina**

Ya obtenido todas las nuevas medidas de esta topología se realiza la nueva simulación, en donde para simplificar y reducir los tiempos de simulación esta se modelará la mitad de la máquina, debido por la simetría de esta de  $180^\circ$ , como se muestra en la Figura 3-2. Obtenida por medio del paso de ranura ( $30^\circ$ ) y el paso polar ( $36^\circ$ ).

Para las simulaciones obtenidas se realiza una comparación de la máquina con devanado distribuido con uno concentrado, para lo cual ambas máquinas tienen una topología parecida en donde la primera tiene treinta ranuras con un ancho de 11 [mm] (Figura 3-3) y la segunda tiene doce ranuras con un ancho de 26 [mm] (Figura 3-2) y ambos se realiza si punta de los dientes de las ranuras.

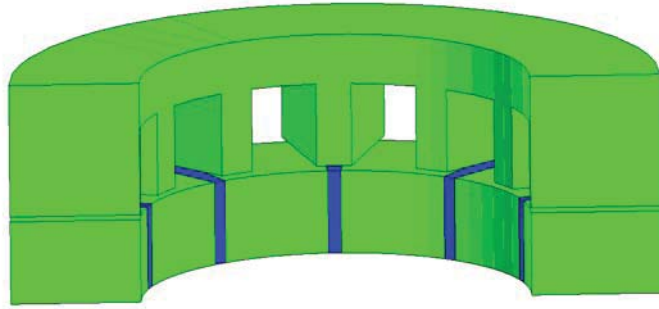


Figura 3-2: Máquina con devanado concentrado.

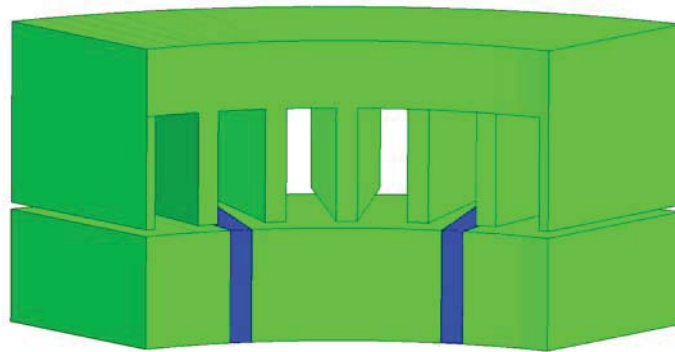


Figura 3-3: Máquina con devanado distribuido.

### 3.2 Flujo magnético

Una vez modelada la máquina, se verificó el flujo magnético producido en ella, la cual se muestra en la siguiente figura para verificar el camino producido en la máquina.

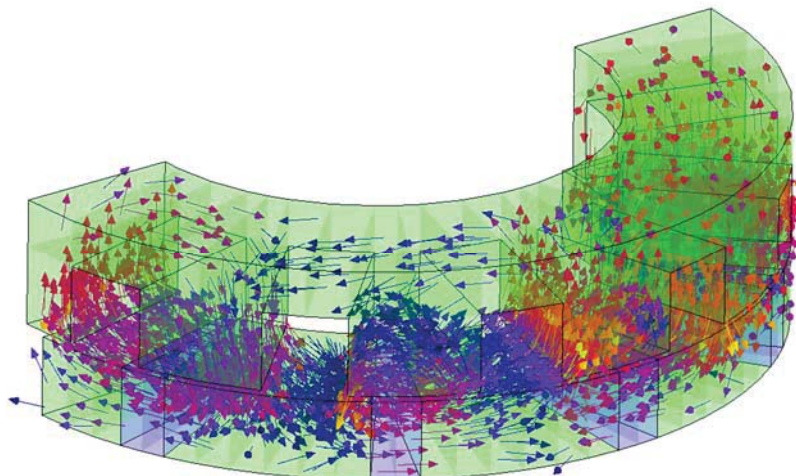


Figura 3-4: Flujo magnético de la máquina con devanado concentrado.

Se muestra en la figura 3-4 la densidad de flujo, en donde, se genera un fenómeno el cual produce que el flujo entregado por los imanes no alcanza a realizar todo su camino o encerrar la ranura completa, en donde, el flujo entregado se encierra en el mismo diente del estator de la máquina o el más cercano al imán permanente, la cual no es el camino correcto y no se va por el yugo del estator. Lo cual genera que en el diente por el cual se encierra el flujo se obtiene una mayor saturación en este.

### 3.3 Análisis magneto estático

El análisis magneto estático utilizado en el software Flux, permite obtener el fenómeno indeseado producto de los IPs llamado torque cogging.

#### 3.3.1 Torque Cogging

Producto en lo visto en el capítulo 2.2 y en la ecuación 2.3 permite obtener el periodo del torque cogging. Para lo cual la máquina con devanado distribuido se obtiene un  $N_{cogg} = 1$ , debido que tiene diez polos y treinta ranuras. Y para la máquina con devanado concentrado se obtiene un  $N_{cogg} = 5$ , debido que tiene diez polos y doce ranuras. Lo cual dice que, en un paso de ranura ( $12^\circ$ ) hay un periodo que torque cogging en el caso de la máquina con devanado distribuido y en el caso del devanado concentrado hay cinco periodos en un paso de ranura ( $30^\circ$ ). Por lo ende, para analizar ambas máquinas y

realizar una comparación y se muestra un periodo de torque cogging con devanado distribuido y dos con devanado concentrado, la cual se muestra en la Figura 3-5.

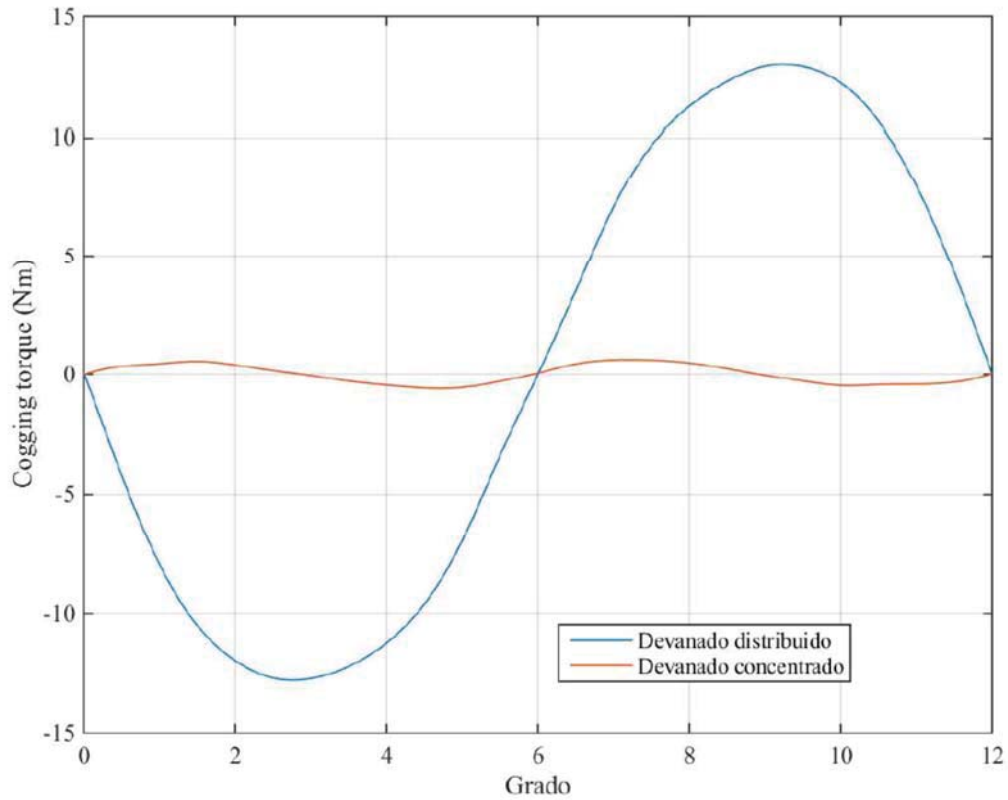


Figura 3-5: Comparación de torque cogging.

De la figura se puede observar que se produce un cambio importante del torque cogging de la máquina con devanado concentrado con respecto a la distribuido. En donde, el valor máximo en la máquina con devanado concentrado es de 0.61 [Nm] y la con devanado distribuido se obtiene un valor máximo de 12.93 [Nm]. Lo cual se puede dar a pensar, que la variación del torque electromagnético se producirá una menor variación, debido que el capítulo anterior no se pudo logra la disminución del torque cogging al valor que se produce con el devanado concentrado.

### 3.4 Simulación magnético transitorio

En la máquina de flujo axial con imanes permanentes en el interior con devanado concentrado, se obtuvo el torque electromagnético y los resultados fueron bajo, lo cual da

a pensar que la máquina no se encuentra enlazando todo el flujo en la posición inicial, para lo cual se analizó en distintas posiciones de inicio en donde en la Figura 3-6 se muestra en la posición inicial (ángulo  $0^\circ$ ) y la posición en la cual se obtuvo la mayor obtención el torque, para lo cual ocurrió a los  $13^\circ$ . (Revisar Apéndice A)

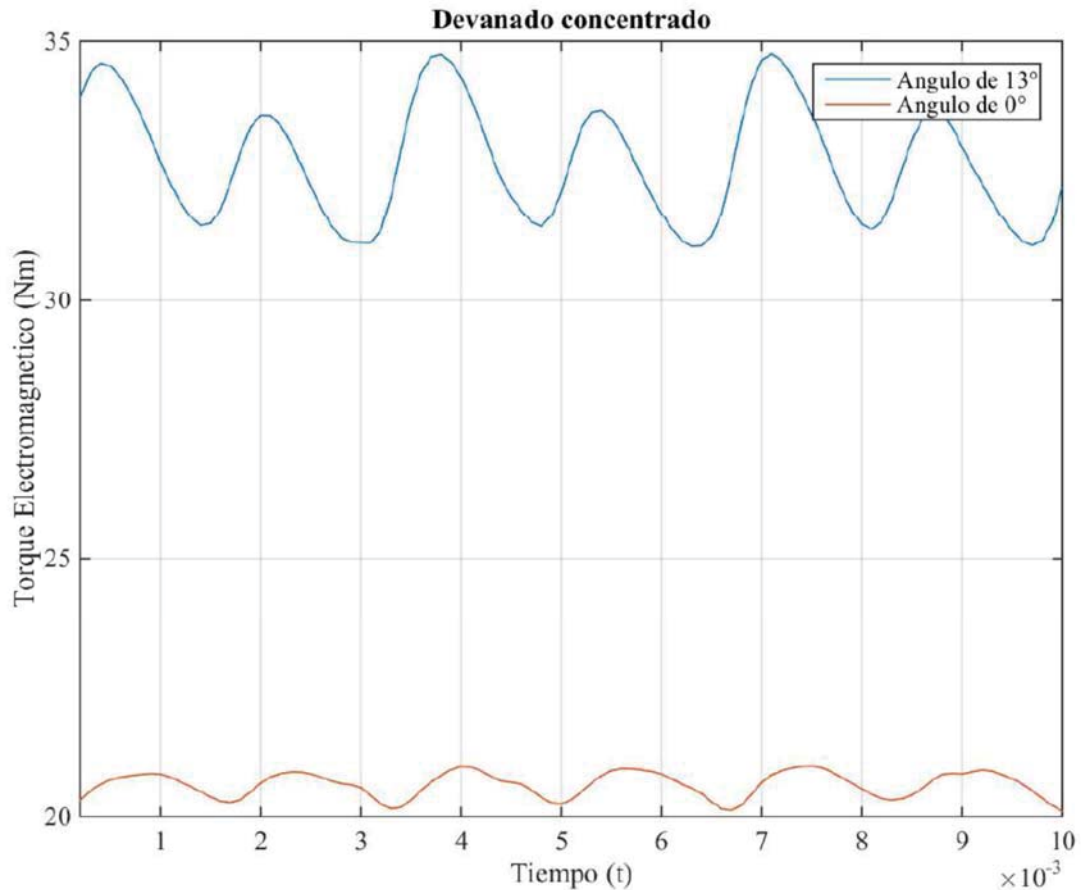


Figura 3-6: Variación de posición inicial para la máquina con devanado concentrado.

Se puede observar que existe un cambio importante del valor medio del torque electromagnético, para la máquina con un desfase de trece grados en comparación con la posición inicial, pero también ocurre un aumento del rizado de la máquina. Este suceso de la variación del torque ocurre debido que en esta posición encierra mayor flujo producido en el entrehierro.

### Parámetros comparativos de la simulación

Al igual que en el caso anterior, para realizar las simulaciones y obtener una forma óptima de realizar la comparación de la máquina con ambas formas de devanados. Se debió definir parámetros los cuales se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 3-2: Parámetros comparativos.

Parámetros	Valor	Unidad
$N_{\text{fase}}$	750	vuelta
$I$	4	A

Los tipos de bobinados que se estudiarán serán concentrado y distribuido. El devanado concentrado es aquel en los que en cada una de las ranuras del estator se encuentran alojados las espiras de una misma fase. Sin embargo, en los distribuidos las ranuras pueden estar ocupadas por espiras de distintas fases. En las figuras 3-7 y 3-8 se muestran los dos tipos respectivamente. En este informe se analizará el caso de un devanado concentrado con bobinas de doble capa, en la cual van dos lados de bobina en una ranura.

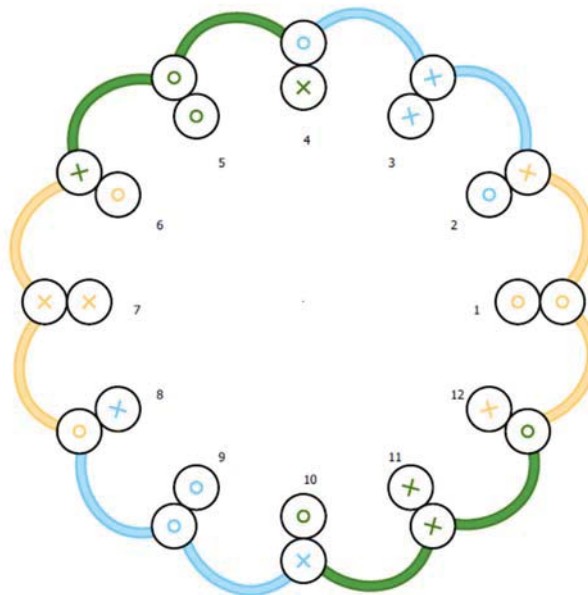


Figura 3-7: Devanado concentrado.

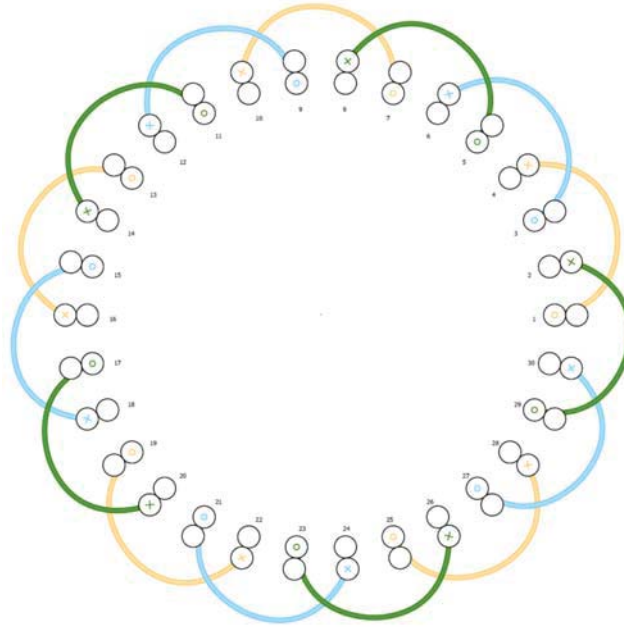


Figura 3-8: Devanado distribuido.

Debido que son formas distintas de realizar el bobinado se obtuvo un parámetro de comparación, de 750 vuelta por fase y con este dato se obtuvo el número de vuelta por ranuras, en donde en el devanado distribuido son 150 vueltas por ranuras y para el caso de devanado concentrado se obtuvo un valor cercano a 190 vueltas por ranuras por fase.

### 3.4.1 Densidad de corriente

Se obtiene la densidad de corriente de ambas máquinas, debido que es un parámetro importante debido que define cuanta corriente puede circular por el conductor y es una forma óptima de comparar.

Para obtener la densidad de corriente  $J$  se obtiene mediante la siguiente ecuación.

$$I = J \cdot A_{\phi} \quad (3-1)$$

En donde nos dice que la corriente  $I$  es igual a la densidad de corriente por el área de un conductor ( $A_{\phi}$ ). Para lo cual es necesario obtener el área de un conductor, en donde, se obtiene mediante el área del cobre ( $A_{cu}$ ) dividido en el número de vuelta por la ranura ( $N_{ranura}$ ),

$$A_{\phi} = \frac{A_{cu}}{N_{ranura}} \quad (3-2)$$

Para obtener el área del cobre se obtiene mediante el área de la ranura por el factor de relleno  $K_{cu}$ .

$$A_{cu} = A_{ranura} \cdot K_{cu} \quad (3-3)$$

Y el área de la ranura se calcula por el ancho de la ranura ( $B_s$ ) por el alto de la ranura ( $H_s$ ).

$$A_{ranura} = H_s \cdot B_s \quad (3-4)$$

Utilizando estas ecuaciones se obtiene la densidad de corriente que se obtiene para ambos tipos de devanados. Para lo cual se utilizó un factor de relleno de 0.5 para el devanado concentrado y 0.4 para el devanado distribuido, debido que, para el primer tipo de devanado, por la forma de realizarse se tiene un mejor valor de este factor.

Otra consideración que se debió tomar en cuenta es que el devanado concentrado con bobina de doble capa, en donde, se produce que en una ranura están envueltas por dos lados de bobinas, para lo cual se debe reducir el espacio de la ranura a la mitad o aumentar al doble el número de vueltas por ranuras, pero solo para el cálculo de la densidad de corriente. En donde los resultados obtenidos se encuentran en la Tabla 3-3.



Tabla 3-3: Parámetros para la densidad de corriente.

Variables	Devanado distribuido	Devanado concentrado	Unidad
Densidad de corriente ( $J$ )	5.45	4.62	[A/mm <sup>2</sup> ]
Corriente ( $I$ )	4	4	[A]
Numero de vuelta por fase ( $N_{\text{fase}}$ )	750	750	[vuelta]
Numero de vuelta por ranura ( $N_{\text{ranura}}$ )	150	190	[vuelta]
Altura de la ranura ( $H_s$ )	25	25	[mm]
Ancho de la ranura ( $B_s$ )	11	26	[mm]
Área de la ranura por bobina	275	325	[mm <sup>2</sup> ]
factor de relleno ( $K_{\text{cu}}$ )	0.4	0.5	[-]
Área del cobre	110	162.5	[mm <sup>2</sup> ]
Área del conductor	0.733	0.867	[mm <sup>2</sup> ]

De la tabla anterior se puede observar que, para esta máquina y utilizando el mismo número de vueltas y la misma corriente se obtiene una menor densidad de corriente utilizando devanado concentrado que el distribuido, en donde ambos se encuentran en valores óptimos de densidad de corriente según [8]. Para lo cual se puede esperar que en la máquina con devanado concentrado se pueda utilizar más corriente para obtener mayor torque y aumentar la saturación de la máquina, en caso que todavía se encuentre en valores óptimos.

### 3.4.2 Densidad de flujo en el entrehierro

En una máquina otro valor importante a analizar es el flujo producido en el entrehierro. Para lo cual se observará para ambos tipos de devanado, en donde, luego este se utilizará para obtener el cálculo de número de vuelta de la ranura y para analizar la componente armónica que influyen en la máquina.

La forma de la densidad de flujo producida en el entrehierro para la máquina con devanado concentrado se muestra en la Figura 3-9 y con devanado distribuido se muestra en la Figura 3-10.

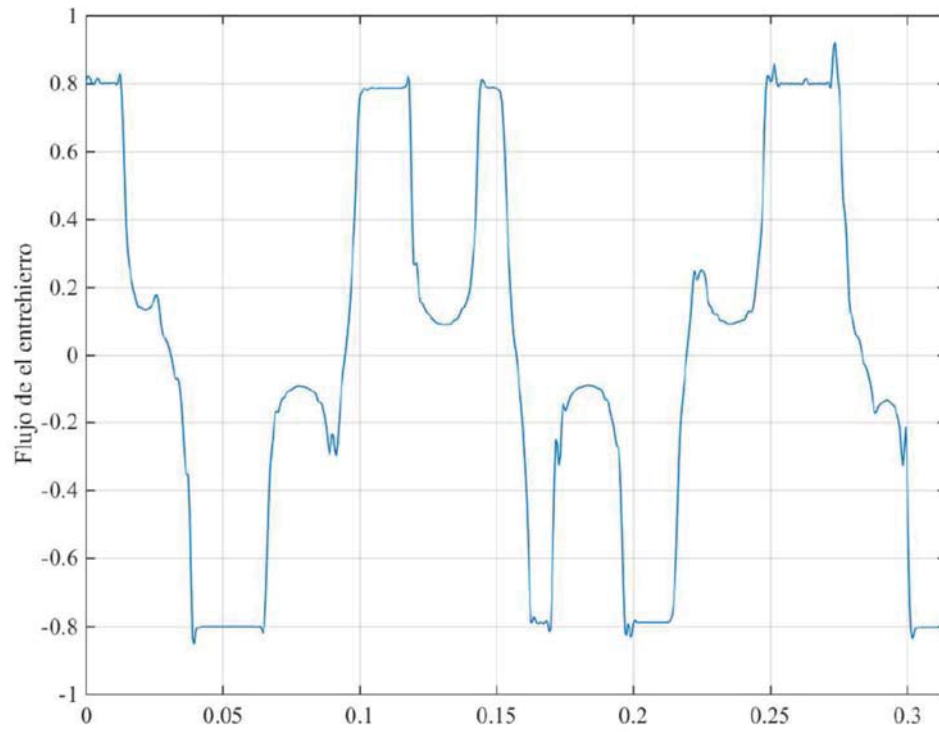


Figura 3-9: Densidad de flujo magnético en el entrehierro para máquina con devanado concentrado.

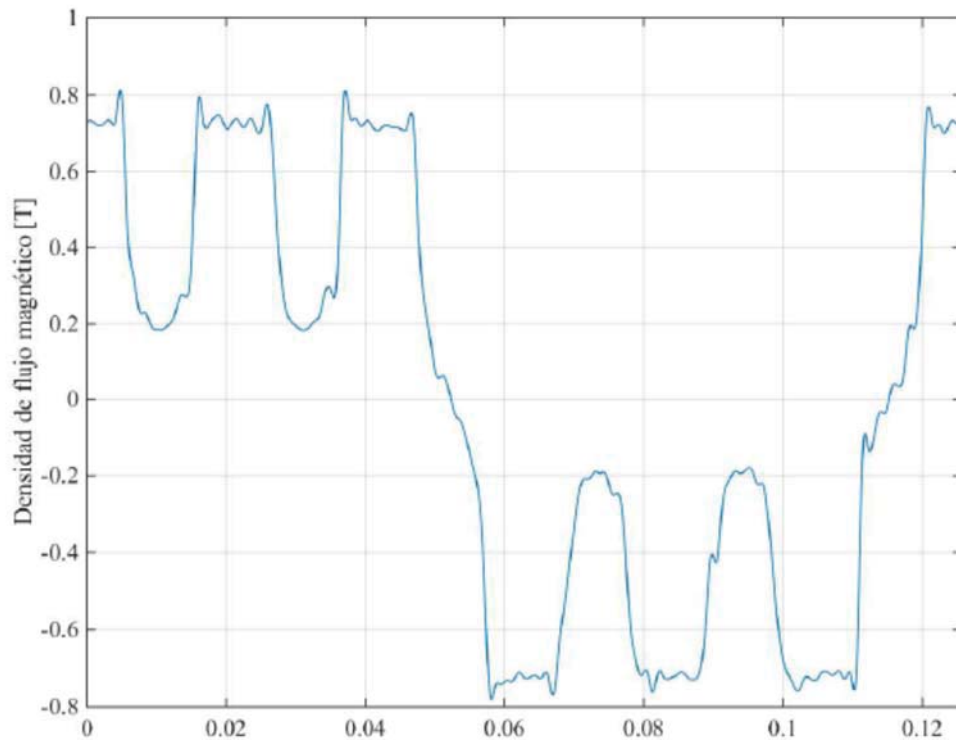


Figura 3-10: Densidad de flujo magnético en el entrehierro para máquina con devanado distribuido.

Como se puede observar en las figuras anteriores el flujo magnético en el entrehierro, en estas se observa una clara caída del flujo la cual es producida por la anisotropía del estator producto de las ranuras. También se concluye que estas contienen otras frecuencias armónicas a parte de la frecuencia fundamental. Por lo cual, se hace necesario saber el espectro de frecuencias involucradas para cada forma de devanado de la máquina, para poder saber el valor que la componente fundamental y el orden de las otras frecuencias interactúan junto con la que contiene mayor influencia. En donde el espectro de frecuencia se muestra en la figura 3-11.

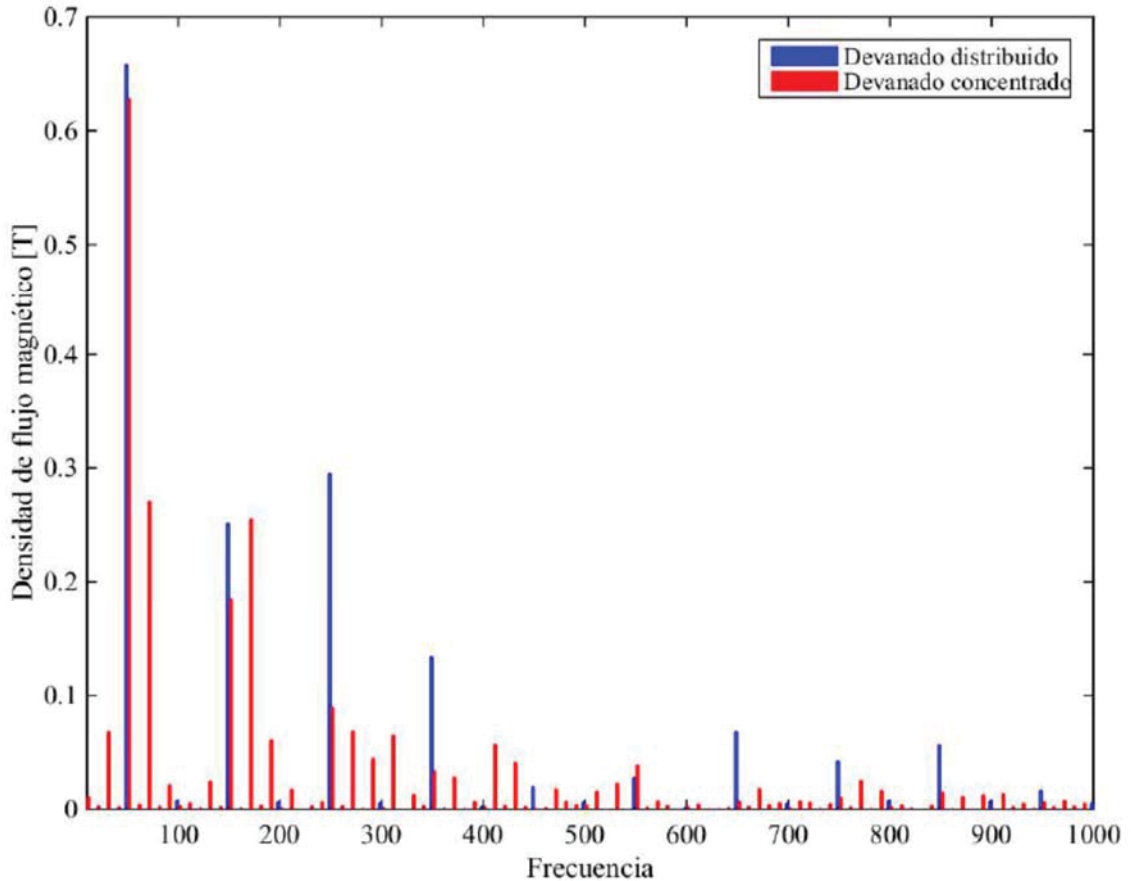


Figura 3-11: Espectro de frecuencia del flujo magnético en el entrehierro.

Se observa de la figura que, para la frecuencia fundamental se obtiene una mayor magnitud del valor del flujo en el entrehierro en la máquina, utilizando el devanado distribuido que el concentrado, pero la disminución de esta no es tan significativa la cual disminuye desde 0.658 [T] hasta 0.628 [T]. Pero también se observa otras frecuencias interactuando, en donde, en el devanado distribuido se encuentran otras frecuencias múltiplos de la fundamental pero solo impares las cuales se encuentran con mayor magnitud siendo así la 3ª y 5ª armónica. Y para el caso de devanado concentrado contiene en varios valores de frecuencia los cuales no todas se encuentran múltiplos de la fundamental, en donde, las que tienen mayores influencias son algunas inter armónicas y también existe influencia de los múltiplos impares, pero en menor porcentaje que en el otro tipo de devanado, como por ejemplo en la 5ª armónica con una gran reducción. Con lo que se puede esperar que existe una menor variación del torque electromagnético.

### 3.4.3 Tensión inducida

Los resultados obtenidos para la tensión inducida de la máquina para los dos tipos de bobinados se muestran en la figura 3-12, para poder realizar comparación entre ambos.

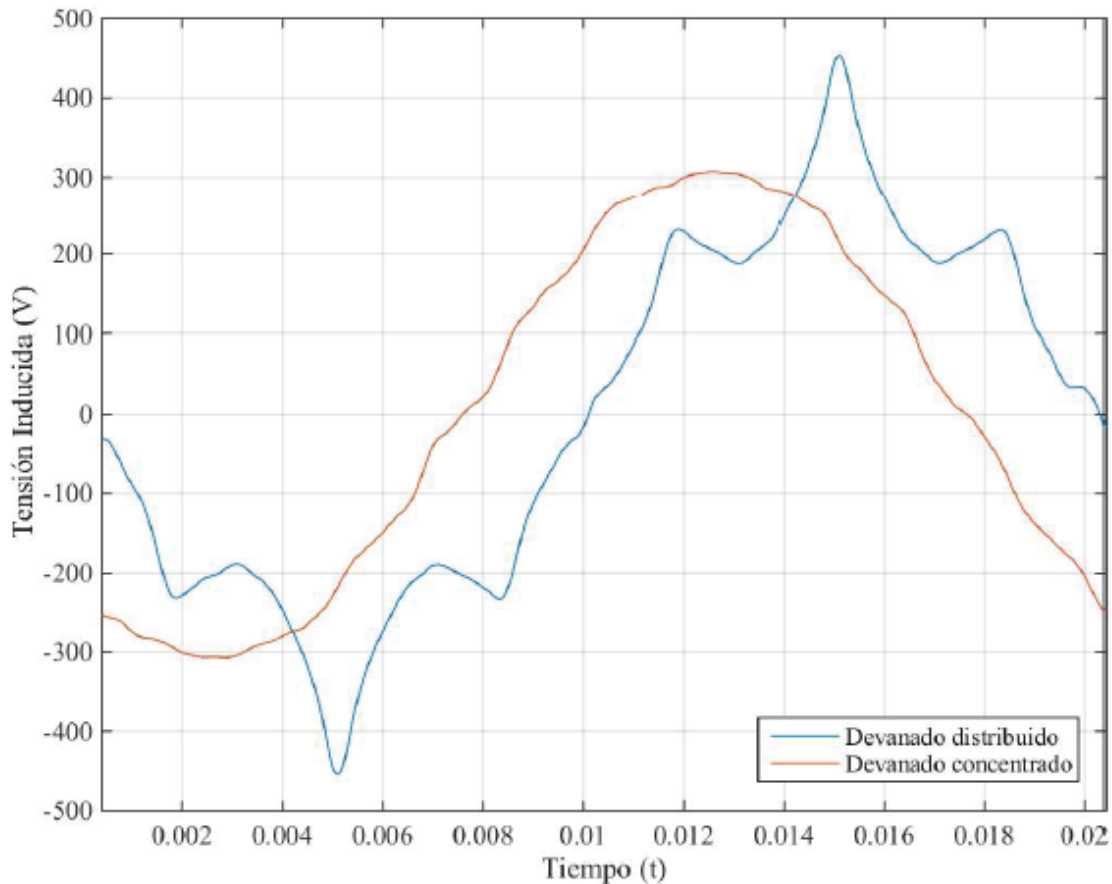


Figura 3-12: Comparación de tensión inducida.

Se observa que la forma de onda de la tensión inducida para la máquina de flujo axial con imanes permanente en el interior con distinto tipo de bobinado. Se produce que, para el caso de devanado concentrado se obtiene una forma más sinusoidal en comparación con devanado distribuido. Esto se debe que, para el caso de devanado distribuido, el flujo magnético producido en el entrehierro este contiene frecuencia múltiplos de la componente fundamental e impares. Y para el caso de devanado concentrado contiene otras componentes de frecuencias en la cuales algunas se pueden anular entre ellas y otras su influencia no es muy significativa.

A parte de la obtención de una forma de onda, se analiza los valores obtenidos los cuales se muestra en la tabla 3-4 la cual muestra el valor rms obtenido y el valor máximo de la tensión inducida.

Tabla 3-4: Resultado de la tensión inducida.

Tensión inducida	Devanado distribuido	Devanado concentrado	Unidad
$V_{rms}$	225.6	217.8	[V]
$V_{max}$	444.15	307.3	[V]

En la tabla se observa que con ambos tipos de devanado y con 750 vueltas por fase se obtiene el valor de la tensión inducida su valor rms cercano a lo deseado que es 220 [V], pero con devanado distribuido se obtiene un mayor valor máximo de tensión y con devanado concentrado se encuentra cercano al valor óptimo de los 311 [V].

#### 3.4.4 Torque electromagnético

El análisis del torque electromagnético se realizó mediante tres topologías, en dos de estas se utiliza devanado distribuido, una de estas es utilizando la técnica de reducción del torque cogging llamada skewing, para así poder analizar uno de los mejores casos que se puede obtener, la cual se analiza cuando se realiza la mejor reducción, la cual ocurre cuando el imán permanente cubre totalmente la ranura del estator, la cual ocurre en una rotación de 6 [mm]. Y la otra topología es utilizando devanado concentrado sin skewing. En donde los resultados se muestran en la siguiente figura.

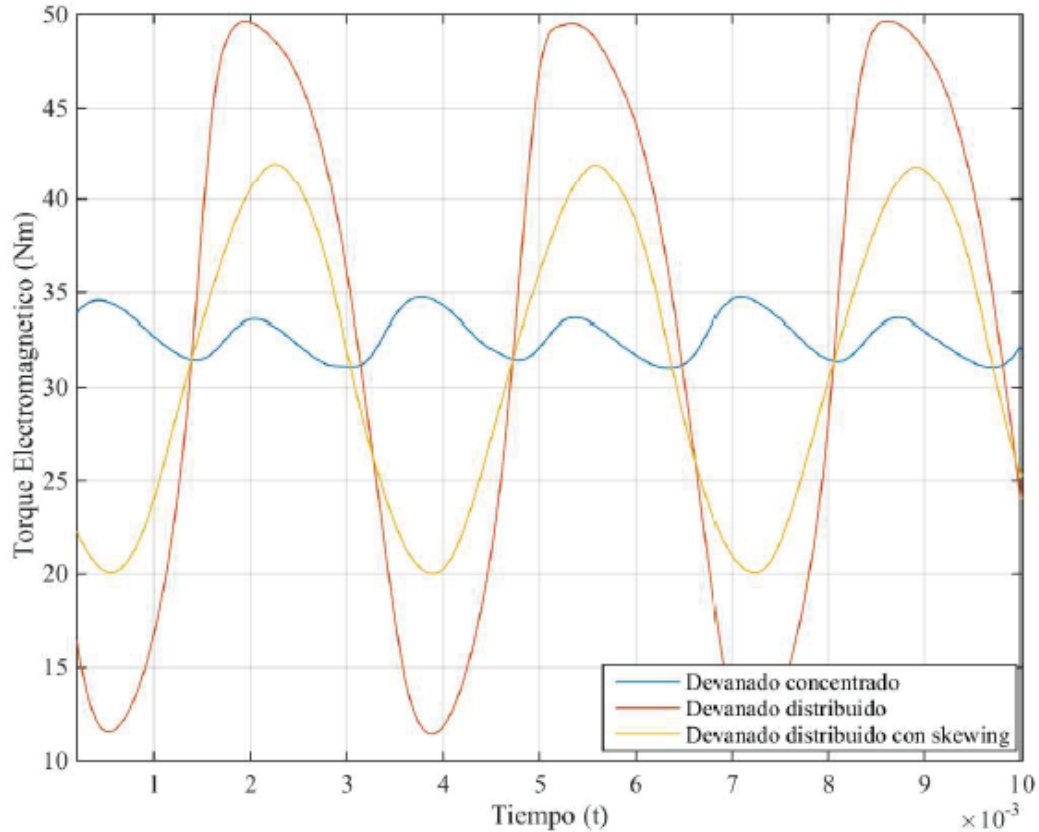


Figura 3-13: Comparación de torque electromagnético.

En la figura se observa al utilizar en la máquina con devanado distribuido existe una gran variación en el torque (curva roja), pero se puede reducir mediante la técnica llamada skewing (curva amarilla) y utilizando devanado concentrado (curva azul) se reduce en gran cantidad el rizado producido en el torque. Pero al utilizar la técnica de reducción del torque cogging, esta no produce en gran cantidad la reducción de la variación de torque electromagnético con respecto al su valor medio, en comparación al utilizar el tipo de devanado concentrado, la cual se produce una gran reducción del rizado de la máquina de esta como se muestra en la tabla 3-5.

Tabla 3-5: Resultado torque electromagnético.

Tipo	Torque <sub>med</sub> (Nm)	Rizado (%)	T <sub>max</sub> (Nm)	T <sub>min</sub> (Nm)
Devanado distribuido	31.9	119.12	49.6	11.6
Devanado distribuido con Skewing	31	70.32	41.9	20.1
Devanado concentrado	32.7	11.26	34.74	31.1

Utilizando la técnica de reducción del torque cogging llamada skewing se produce una reducción de un 50% en la variación de torque utilizando ambos un devanado distribuido. Pero al realizar otra forma de bobinar, con el devanado concentrado se logró obtener una reducción del rizado de la máquina a un 11% respecto a su valor medio. Y obteniendo un valor cercano del valor medio de torque.

Esto se debe que las interacciones de las armónicas en el entrehierro no son muy significativas, especialmente al de múltiplos impares de la fundamental y la influencia del torque cogging también es reducida para el caso de devanado concentrado.

### 3.5 Pérdidas de potencia

Debido a las características estructurales de las máquinas eléctricas, las pérdidas de potencia desempeñan un papel fundamental en el funcionamiento de la máquina. Las máquinas eléctricas generalmente se fabrican como configuraciones semiencerradas o totalmente cerradas para proteger el devanado, los cojinetes y otras partes de la máquina de factores ambientales, como la humedad, la abrasión y el daño mecánico. Estos factores afectan la capacidad de disipación de potencia de la máquina y, por lo tanto, se debe utilizar un sistema de enfriamiento complejo. Para evitar el problema de la disipación de energía, es necesario el modelado térmico de las máquinas eléctricas y se requiere un conocimiento detallado de las distribuciones de pérdidas. [3]

#### 3.5.1 Pérdidas de devanado

Desde el punto de vista del diseño, las pérdidas por devanado pueden estimarse por:



$$P_{cu} = 3R_{AC} \cdot I^2 \quad (3-5)$$

donde  $R_{AC}$  es la resistencia eléctrica del devanado de fase para una temperatura de trabajo dada, e  $I$  es la corriente de fase en RMS. La expresión de resistencia para una máquina de baja velocidad está dada por:

$$R_{AC} = \frac{\rho_{cu} \cdot l_C}{S_C} \quad (3-6)$$

donde  $\rho_{cu}$  es la resistividad del conductor a una temperatura dada [12],  $S_C$  es el área de la sección transversal del conductor y  $l_C$  es la longitud total del conductor, dada por:

$$l_C \approx N[2l_e + l_{ew,in} + l_{ew,out}] \quad (3-7)$$

Utilizando las ecuaciones anteriormente definidas se obtiene una comparación de las pérdidas de devanado, para ambos tipos forma de bobinado vista. Y en donde los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3-6.

Tabla 3-6: Pérdidas de devanado.

	Devanado distribuido	Devanado concentrado	Unidad
$P_{cu}$	193.87	152.8	[W]
$I$	4	4	[A]
$R_{ac}$	4.04	3.18	[Ω]
$\rho_{cu}$	$1.75 \cdot 10^{-8}$	$1.75 \cdot 10^{-8}$	[Ωm]
$l_C$	33.85	38.9	[m]
$S_C$	$7.33 \cdot 10^{-7}$	$8.55 \cdot 10^{-7}$	[m <sup>2</sup> ]
$r_C$	0.00048	0.00052	[m]
$N$	150	190	[vuelta]
$l_{ew,out}$	0.079	0.065	[m]
$l_{ew,in}$	0.047	0.039	[m]
$l_e$	0.05	0.05	[m]

De la tabla se puede observar que la pérdida de devanado, son menores utilizando devanado concentrado, logrando disminuir aproximadamente 40 [W]. Esto se debe, debido que utilizando devanado concentrado es menor la distancia de la bobina, ya que se encuentra enrollada a un propio diente.

### 3.5.2 Pérdidas de potencia del núcleo

Las pérdidas del núcleo producidas en los núcleos del rotor y del estator son obtenidas utilizando el software comercial (Flux by Cedrat). De acuerdo con el modelo utilizado por el software (basado en el método de Bertotti), las pérdidas de hierro por unidad de volumen pueden dividirse en pérdidas por histéresis ( $P'_h$ ), pérdidas por corrientes de Foucault ( $P'_c$ ) y pérdidas en exceso ( $P'_e$ ).

$$P'_{Fe} = P'_h + P'_c + P'_e \quad (3-8)$$

Escritura de la ecuación (3-8) en términos de potencia promedio durante un período eléctrico T resulta en:

$$P'_{Fe} = k_{Fe} \left\{ k_h B^2 f + \frac{1}{T} \int_0^T \left[ \sigma_{Fe} \frac{d^2}{dt^2} \left( \frac{dB(t)}{dt} \right)^2 + k_e \left( \frac{dB(t)}{dt} \right)^{1.5} \right] dt \right\} \quad (3-9)$$

donde  $k_{Fe}$  es el factor de apilamiento de laminación,  $k_h$  es el coeficiente de pérdida por histéresis y  $k_e$  es la pérdida en el coeficiente de exceso. Los coeficientes  $k_h$  y  $k_e$  se pueden determinar a partir de la curva de pérdida de medición de los datos del fabricante del acero magnético. Mediante la comparación de las pérdidas de hierro específicas para la medición del acero laminado M400-50A provistas por el fabricante con la predicción analítica considerando el coeficiente estimado  $k_h$  y  $k_e$ . Los valores utilizados son para la frecuencia nominal (50 Hz) para garantizar una buena estimación de las pérdidas de hierro en la máquina utilizando el método de Bertotti. En donde los valores utilizados son  $k_h$ : 125.85,  $k_e$ : 0.765 y  $k_f$ : 0.93. [3]

Los resultados obtenidos de las pérdidas del núcleo mediante el método Bertotti utilizando por el software, se muestran en las siguientes tablas, en donde en la Tabla 3-7 las pérdidas en el núcleo del estator y en la Tabla 2.3 las pérdidas en el rotor

Tabla 3-7: Pérdidas en el núcleo del estator.

	Devanado distribuido	Devanado concentrado	Unidad
Total	18.04	10.608	[W]
Histéresis	10.365	6.206	[W]
Corrientes de Foucault	4.53	2.43	[W]
Exceso	3.145	1.972	[W]

Tabla 3-8: Pérdidas en el núcleo del rotor.

	Devanado distribuido	Devanado concentrado	Unidad
Total	1.94	2.706	[W]
Histéresis	0.485	0.952	[W]
Corrientes de Foucault	0.815	0.918	[W]
Exceso	0.64	0.836	[W]

Los resultados obtenidos son relativamente bajos, debido que este diseño son realizado mediante chapas magnética, lo cual produce la reducción de esta misma. Y se producen una diferencia entre ambos forma de devanado, lo cual se produce debido que la máquina con devanado concentrado tiene mayor volumen de fierro, lo cual produce que en este la saturación no sea amplia. Estos resultados son comparados con los datos del fabricante para así poder validar los resultados (Apéndice B).

### 3.5.3 Pérdidas de los imanes permanentes

Cuando un material ferromagnético se ve sometido a la acción de un campo variable en el tiempo, en su interior se producen unos fenómenos físicos que conllevan un gasto de energía que finalmente se acaba convirtiendo en calor. La potencia correspondiente a dicha energía es lo que se denomina pérdidas magnéticas.

En las máquinas eléctricas es muy frecuente que la variación temporal de la excitación magnética no se deba a que el campo magnético que tiene la máquina sea variable, sino a que la pieza de material ferromagnético está girando y en su movimiento pasa sucesivamente frente polos magnéticos de signo contrario. Esto hace que la pieza ferromagnética en su movimiento se vea sometida a una excitación variable. En este caso la potencia que se va a disipar en forma de pérdidas magnéticas procede de la potencia mecánica introducida por el eje de la máquina, la cual hace girar a la pieza ferromagnética [13]. Es preciso insistir que las pérdidas magnéticas sólo existen cuando el material ferromagnético “ve” variar en el tiempo al campo que la afecta. Cuando la pieza está sometida a la acción de un campo magnético constante, dichas pérdidas no se producen.

Para estos casos las pérdidas de los imanes permanentes fueron obtenidas mediante el software de elementos finitos, en donde los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3-9: Pérdidas en los imanes permanentes.

Perdidas	Devanado distribuido	Devanado concentrado	Unidad
Total	2.18	2.7	[W]

Los resultados obtenidos para ambos tipos de bobinado las pérdidas de los imanes permanentes son bajas, esto se debe, debido que en el diseño de la máquina los IPs se encuentra en el interior del rotor, lo cual produce que los IPs vean menor variación de la reluctancia o solamente lo producido por el entrehierro y las ranuras. Esto fenómeno se muestra en la siguiente figura, en donde, se ve que las variaciones de la densidad de flujo en los IPs son bajas, por lo cual las pérdidas igual. La cuales se muestran en ambas posiciones más influyentes con es el eje directo como el eje de cuadratura.

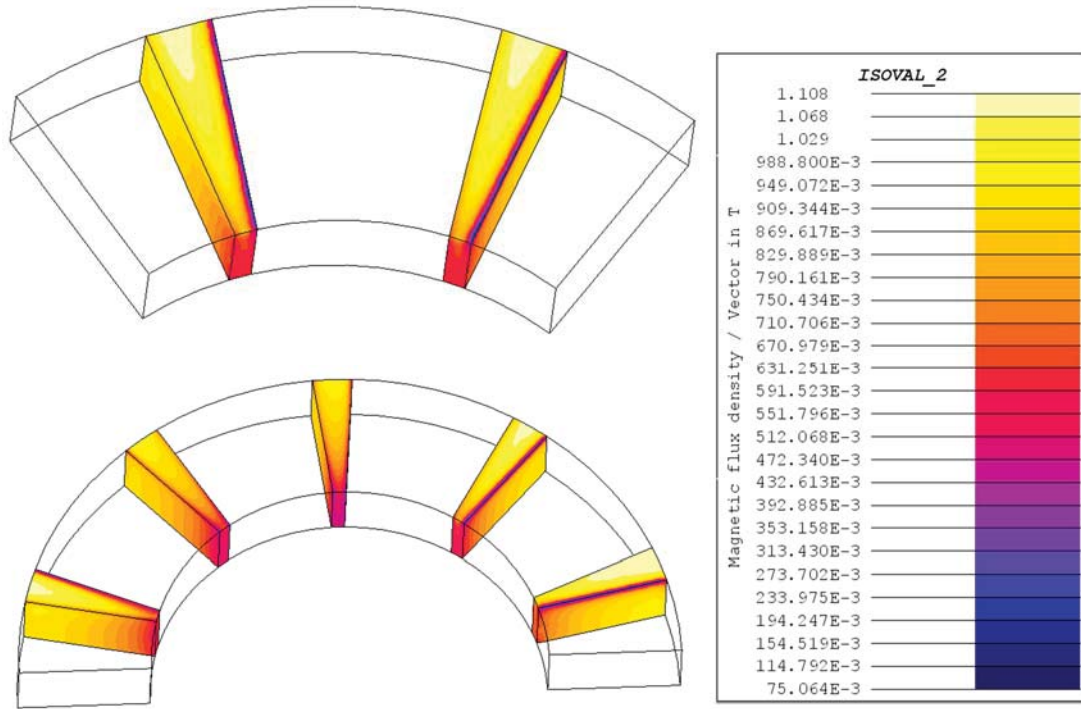


Figura 3-14: Densidad de flujo de los IPs eje cuadratura.

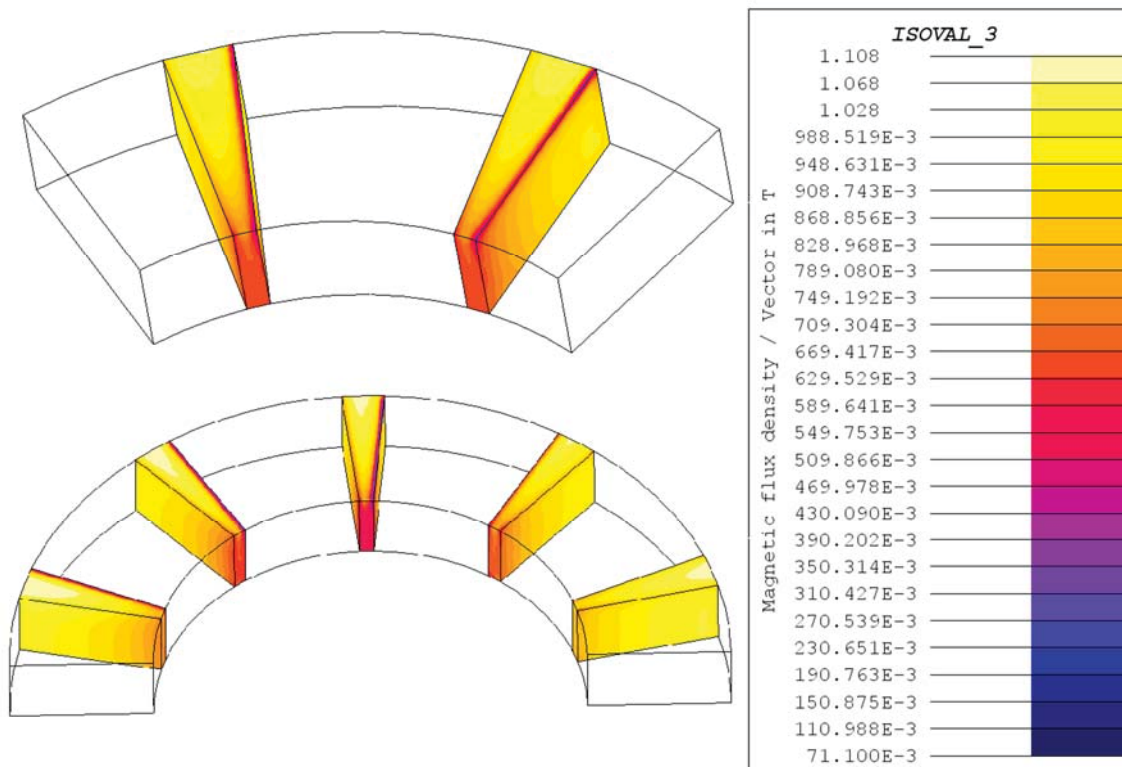


Figura 3-15: Densidad de flujo de IPs eje directo.

### 3.5.4 Resultados

Obtenidas las pérdidas se realiza la comparación de ambas formas de devanados, en donde los resultados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3-10: Pérdidas en la máquina.

Pérdidas	Devanado distribuido	Devanado concentrado	Unidad
Total	216.02	168.82	[W]
De devanado	193.87	152.81	[W]
En el núcleo del estator	18.04	10.608	[W]
En el núcleo del rotor	1.94	2.706	[W]
En los imanes permanentes	2.18	2.7	[W]

De la tabla se puede observar que las pérdidas en la máquina, se tiene una variación de esta en comparación del devanado concentrado con la distribuido. Siendo menores los valores de pérdidas utilizando devanado concentrado. En donde, las pérdidas de devanado si se encuentra una diferencia siendo mayor en el devanado distribuido, éstas se deben por la distancia que cubre la bobina. Y también son mayor las pérdidas en el núcleo del estator, debido que, contiene mayor saturación en los dientes de la máquina.

### 3.6 Tabla de comparación

Obtenido todos los parámetros anteriores, se realizó la siguiente tabla en forma de resumir los resultados obtenidos.

Tabla 3-11: Parámetros comparativos.

Parámetros	Devanado distribuido	Devanado concentrado	Unidad
Número de vuelta por fase ( $N_{\text{fase}}$ )	750	750	[vuelta]
Corriente (I)	4	4	[A]
Desfase	0	13	[grado]
Densidad de corriente (J)	5.45	4,62	[A/mm <sup>2</sup> ]
Densidad de flujo en el entrehierro	0,658	0,628	[T]
Tensión inducida rms ( $V_{\text{rms}}$ )	225,6	217,8	[V]
Pérdida	216.02	168.82	[W]
Torque medio	31,9	32,69	[Nm]
Rizado	119,12	11,26	[%]

Realizando una recopilación de lo realizado, se puede realizar una comparación para la máquina de flujo axial con imanes permanentes en el interior mediante dos tipos de bobinados. En donde realizando con el mismo número de vueltas por fase y la misma corriente impuesta, se puede concluir que para la máquina con devanado concentrado y utilizando el desfase para así poder utilizar el mayor flujo magnético de esta. Se obtuvieron mejores resultados debido que se obtiene un valor de torque medio cercano entre ambos,

pero se obtiene una mayor reducción de la variación de esta en comparación con la máquina con devanado distribuido. Otra observación que se puede apreciar es que, la densidad de corriente se obtiene menor para el tipo de bobinado de devanado concentrado, el cual se obtiene un mayor factor de relleno de esta y es posible aumentar su corriente para obtener mayor torque. También la forma de onda de la tensión inducida en el devanado concentrado se obtiene una forma más sinusoidal que en el devanado distribuido. Y la densidad de flujo magnético en el entrehierro disminuye, pero no en gran cantidad en el caso de devanado concentrado en comparación del devanado distribuido, pero existe una disminución en las armónicas de orden impares, lo que produce que la variación del torque como el de la tensión es producto de esta disminución de las componentes armónicas. Y las pérdidas no son muy considerables la diferencia que se produce.

### **3.7 Densidad de flujo magnético**

Se estudiará la densidad de flujo magnético producido en la máquina para ambos tipos de bobinados, para obtener los niveles de saturación en esta para así poder compararlas y verificar si se encuentra en los valores óptimos. Para lo cual, se analizará en los ejes de cuadratura como los ejes directo.



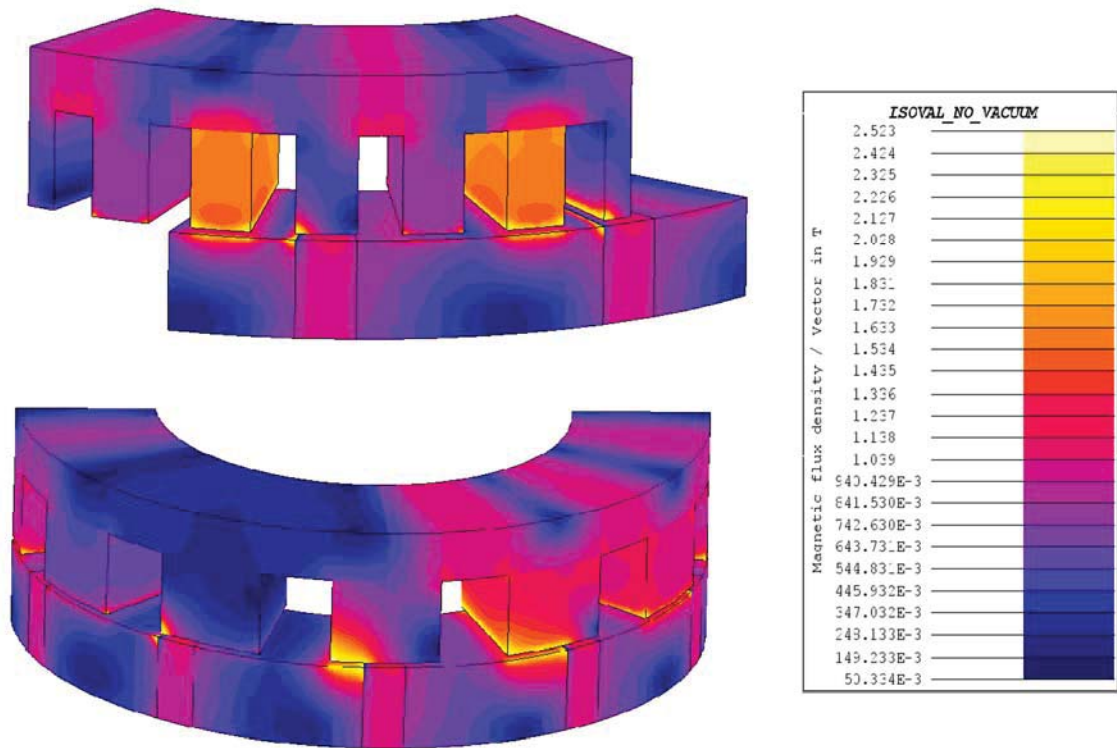


Figura 3-16: Densidad de flujo magnético eje de cuadratura.

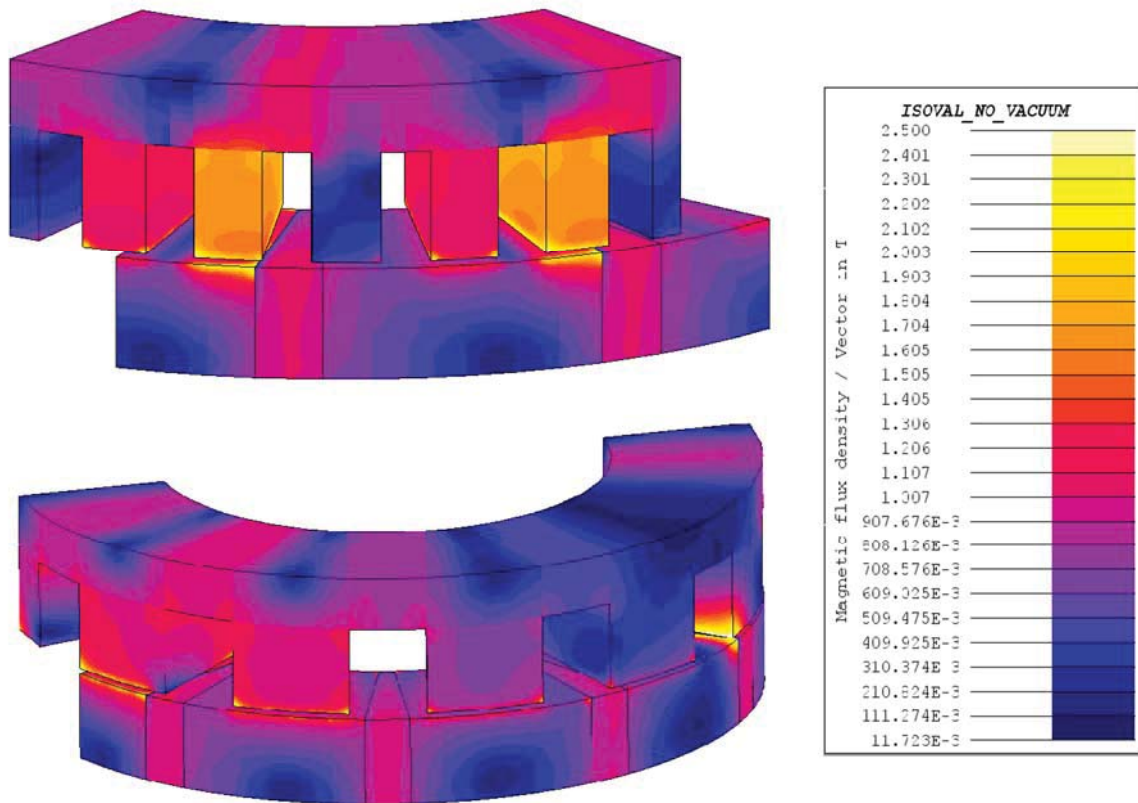


Figura 3-17: Densidad de flujo magnético eje directo.

De las figuras anteriores en donde se muestra la densidad de flujo magnético se obtiene la siguiente tabla, en la cual se realiza una comparación de un promedio de la densidad de flujo magnético de la máquina para ambos tipos de bobinado en las distintas partes de la máquina, ya sea devanado distribuido como concentrado.

Tabla 3-12: Densidad de flujo magnético.

Partes	Densidad de flujo magnético [T]		
	Valor obtenido		Valor optimo
	Devanado distribuido	Devanado concentrado	
Yugo del estator	1.327	1.07	1.0-1.5
Diente	1.811	1.503	1.6-2.0
Yugo del rotor	1.085	1.07	1.0-1.5
Núcleo del polo	1.327	1.33	1.3-1.7

De la tabla se puede concluir que ambas máquinas se encuentran en los valores óptimos [8], pero para el caso que la máquina con devanado concentrado se encuentra en los valores mínimos, por lo cual no se encuentra saturada. Y en para la máquina con devanado distribuido los valores se encuentran cercanos a los valores máximo de densidad de flujo magnético.

La máquina de flujo axial con imanes permanentes en el interior con devanado concentrado se encuentra pocamente saturado, en donde, se puede esperar que a esta se le pueda obtener mayor torque, una forma de poder realizar esto es aumentando la corriente, con un límite debido que la densidad de corriente de esta aumentaría lo cual se podrá salir de los valores deseados. Otra solución más óptima sería disminuir el ancho del diente del estator, es decir, aumentar el ancho de las ranuras de bobina, lo cual permite tener menor área de los dientes, lo cual permitirá que la saturación aumente en esta misma, debido que el flujo enlazado se encerrara por el mismo camino teniendo menor área. En donde, esto producirá que el área de la ranura aumente, con hecho se podrá aumentar el número de vuelta y la corriente. Y esto producirá que disminuya el flujo en el entrehierro y el torque electromagnético. En donde, una forma de aplacar este fenómeno o suceso, es realizar la máquina utilizando punta de dientes, lo cual permitirá que el flujo enlazado vea menor variación de reluctancia en esta misma.

### 3.8 Topología propuesta

La nueva topología propuesta luego de realizado este proyecto se diseña una máquina de flujo axial con imanes permanentes en el interior utilizando devanado concentrado, realizando la variación de las dimensiones de lo visto anteriormente, especialmente la de los dientes del estator, las cuales se muestran en las siguientes tablas todas las dimensiones utilizadas.

Tabla 3-13: Dimensiones del estator.

Medidas	Valor	Unidad
Diámetro exterior	250	mm
Diámetro interior	150	mm
Altura del estator	40	mm
Largo (axial) del estator	50	mm
Altura de la ranura	23	mm
Ancho de la ranura	32	mm
Altura de la cabeza del diente	1	mm
Ancho entre diente	6	mm
Entrehierro	1,5	mm
Numero de ranuras	12	
Numero de fase	3	

Tabla 3-14: Dimensiones del rotor.

Medidas	Valor	Unidad
Diámetro exterior	250	mm
Diámetro interior	150	mm
Altura	25	mm
Ancho interior IP	5	mm
Ancho exterior IP	15	mm
Largo del IP	50	mm
Numero de polos	10	

Utilizando las dimensiones anteriormente descritas se diseña esta nueva topología, utilizando devanado concentrado de doble capa. Para así poder realizar un modelo con elementos finitos el cual se muestra en la siguiente figura.

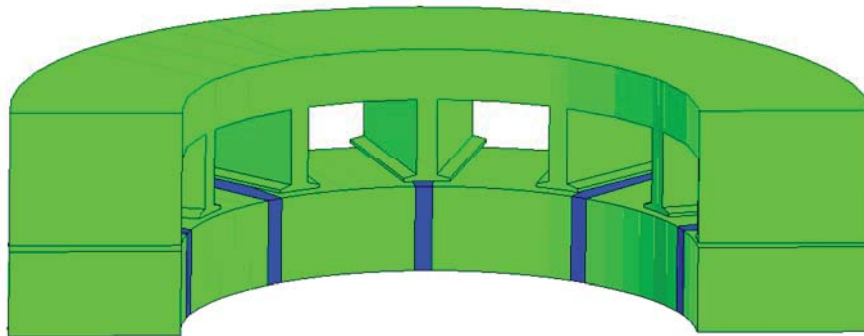


Figura 3-18: Máquina propuesta.

### 3.8.1 Resultado

Utilizando la metodología vista en el capítulo 3, se obtiene los parámetros necesarios para poder realizar las simulaciones correspondientes. Para así poder obtener los siguientes resultados los cuales se muestran en la tabla 3-15, en los cuales se obtiene la densidad de flujo magnético, tensión inducida y el torque electromagnético entre otros.

Tabla 3-15: Resultado.

Parámetros	Valor	Unidad
Numero de vuelta por fase	770	[vuelta]
Corriente	5,1	[A]
Desfase	12	[grado]
Densidad de corriente	5	[A/mm <sup>2</sup> ]
Densidad de flujo en el entrehierro	0,688	[T]
Tensión inducida rms	219	[V]
Torque medio	41,7	[Nm]
Rizado	4,4	[%]
Perdidas	258.8	[W]
Potencia	2600	[W]

De los resultados se observa que, se produce un aumento en el torque electromagnético esto se debe, ya que, existe un aumento en el área de la ranura por lo cual es posible aumentar el número de vuelta y la corriente impuesta en el bobinado. Así aumentando el torque producido, obteniendo una potencia de la máquina de 2600 [W], en donde, sus pérdidas son de 260 [W] aproximadamente. También se obtuvo un mejoramiento de la densidad flujo magnético en el entrehierro, esto se produce, debido a la realización de la máquina con punta de dientes, lo cual produce una menor variación de reluctancia del estator, esto también provoca que el torque cogging también exista una reducción y así una disminución del rizado del torque producido en la máquina a un 4.4%.

### 3.8.2 Densidad de flujo magnético

Otro parámetro que se debe tener en consideración al momento de diseñar una máquina es la densidad de flujo magnético producido en toda la máquina. Por hecho, se muestra los dos ejes importantes en esta, los cuales son el eje directo como el eje de cuadratura, los cuales se muestra en las siguientes figuras.

De la cual es la figura se puede observar que la densidad de flujo magnético en la máquina se encuentra en los valores óptimos, por lo visto en el libro de referencia [8].

Ya sea cómo en el yugo del estator como rotor, en el núcleo del polo y dientes de la máquina. Pero existe puntos en los cuales se encuentran altamente saturado, como la punta de los dientes del estator.

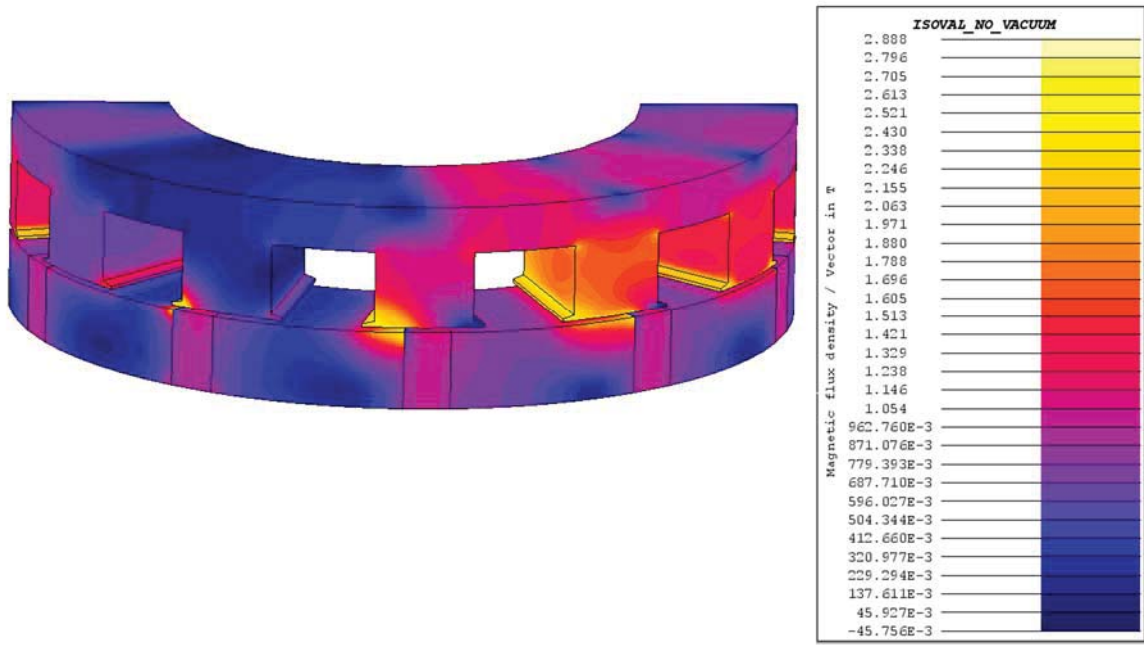


Figura 3-19: Eje de cuadratura.

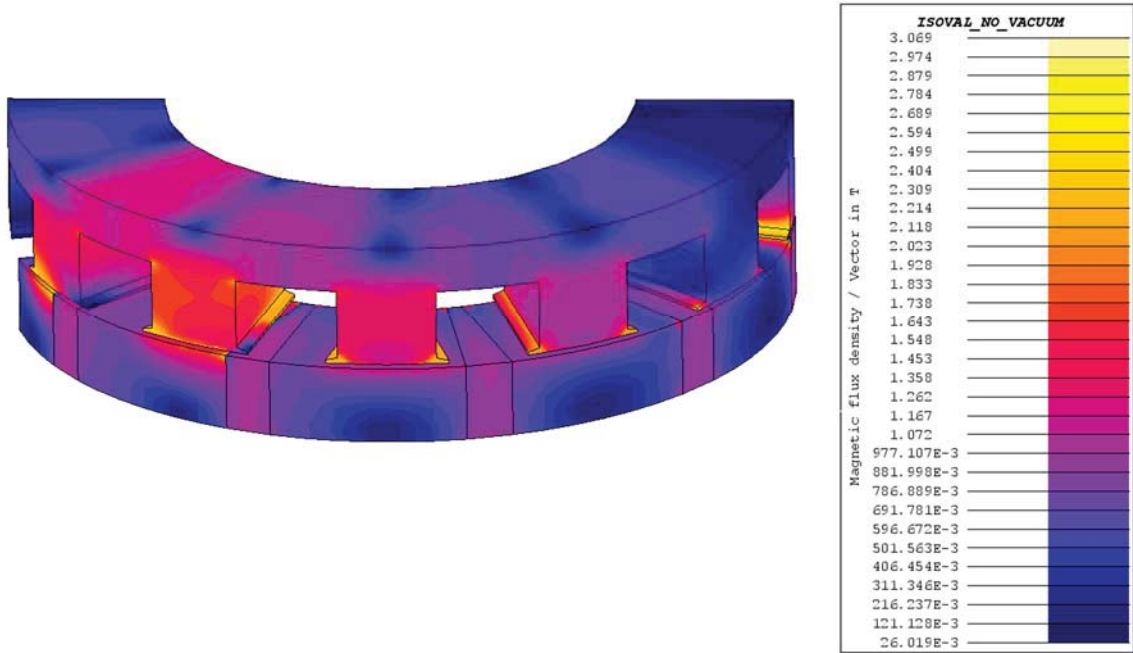


Figura 3-20: Eje directo.



## Discusión y conclusiones

En el presente informe de título para optar al grado de ingeniero eléctrico se enmarca en el estudio de la máquina de flujo axial con imanes permanentes en el interior, debido que la topología de este tipo de máquinas permite realizar una construcción más compacta. Y utilizando imanes permanentes junto con el avance en la tecnología permite realizar máquinas más confiables y eficientes. Debido que hoy en día los espacios son limitados y las máquinas deben ser más amigable con el medio ambiente mediante la eficiencia energética, es necesario realizar el estudio de este tipo de máquina. Para lo cual, en este estudio se tuvo como objetivo general evaluar electromagnéticamente las características de operación de una máquina de flujo axial e imanes permanentes insertos en el rotor a través del software en elementos finitos Flux 3D. Como objetivo específico se realiza un análisis de la geometría del rotor, basado en el modelo en elementos finitos, para determinar una organización que maximice el rendimiento de la máquina. Y el estudio del torque cogging desarrollado por la máquina y la obtención de una forma de reducción de este fenómeno.

En donde, en primer lugar, se realiza el diseño de una nueva topología la cual permite realizar la máquina mediante chapas magnéticas para luego analizar el torque cogging y realizar el estudio del método de reducción llamado skewing. Para luego se analiza una nueva topología la cual permite la construcción de la máquina mediante devanado concentrado.

Debido que las pérdidas de la máquina cumplen un fundamental en el diseño de esta, ya que ésta se encuentra normalmente totalmente cerradas es complicado poder disipar las pérdidas, una forma más fácil de disminuirla esta es utilizando chapas magnéticas.

Pero la geometría inicial de la máquina se produce muy complicado realizar este método, por lo cual se modifica la topología del rotor realizándola sin biselado, lo cual produjo que la densidad de flujo no sea pareja, en donde se tuvo que modificar los imanes, obteniendo una nueva geometría con un ancho de quince milímetros para el diámetro exterior y cinco milímetros para el diámetro interior, lo cual permitió que la densidad de flujo magnético sea pareja en las ranuras del estator.

Mediante las simulaciones se obtuvo el torque cogging, en donde, este fenómeno se produce por la anisotropía del estator de la máquina, la cual es una de los factores del torque ripple y para una máquina de baja velocidad y alto desempeño es un factor indeseado y se debe reducir. En esta tesis se analizó y realiza el estudio de reducción del torque cogging llamado skewing. Para lo cual este método se realizó rotando los imanes permanentes y se vio dos métodos. El primero es rotando los imanes todos en el mismo sentido. Y el segundo cada par de imanes se rotan en sentido opuesto. Los resultados obtenidos para el mejor caso de estas rotaciones son de un 62% y de 65% respectivamente. Por lo cual la mayor reducción utilizando el método de skewing se obtuvo rotando los pares de imanes permanentes en sentido opuestos. Y esta mayor reducción se obtuvo cuando los imanes al rotarlo alcanzado a cubrir la ranura del estator de la máquina y esto se produjo con una rotación de seis milímetros respecto a su eje.

Utilizando esta nueva topología con el método de reducción del torque cogging, se obtuvo el torque electromagnético, en donde la variación de este disminuye utilizando el método skewing, pero solo se logra disminuir está a un 37% lo cual para una máquina de alto rendimiento no es recomendable.

Por ende, se estudió el otro factor que produce el rizado de la máquina, que es el componente armónico de la corriente y tensión. Y ya que la corriente es impuesta esta no tiene contenido armónico, pero la tensión inducida no es completamente sinusoidal y posee armónicos. Esto se debe al flujo en el entrehierro el cual tiene una influencia importante de la tercera y quinta armónica. Una forma de variar este contenido armónico es cambiar el tipo de bobinado, debido que cada bobinado tiene distinta influencia armónica.

Luego se estudió la máquina utilizando devanado concentrado de doble capa, para lo cual se debió cambiar la topología de la máquina utilizando doce ranuras en el estator. En donde, los resultados se compararon con el devanado distribuido bajo las mismas condiciones utilizando 750 vueltas por fase y una corriente de 5 amperes. Para lo cual la máquina con devanado concentrado en la posición inicial no enlaza todo el flujo producido, por lo cual se realizó un estudio previo, en busca de la posición en la cual se obtenga el mayor provecho a la máquina y esto se produce a los trece grados.

Los resultados obtenidos para el torque cogging son favorables para el devanado concentrado debido que, para el devanado distribuido se obtuvo un valor de 12.9 Nm para el torque cogging y para el devanado concentrado de 0.6 Nm. En donde, es una gran disminución de este fenómeno si utilizar ningún método de reducción. Analizando el torque electromagnético, también se produce reducción de la variación del torque, debido que los resultados obtenidos del rizado son de un 120% para la máquina con devanado distribuido, de un 70% para la misma máquina, pero realizando el método skewing y de un 11% utilizando devanado concentrado. Por lo cual se produce una mayor reducción del rizado solo cambiando la topología de devanado. Ya que estos no solo son los parámetros de importancia, también se verifican otros como la densidad de corriente, la densidad de flujo en el entrehierro y la tensión inducida. En donde, todos estos parámetros se encuentran en valores óptimos. Esta reducción se debe ya que la tensión inducida tiene una forma más sinusoidal que la del devanado distribuido, esto se debe ya que, en el flujo en el entrehierro se produce una reducción de las armónicas de orden impares, pero se encuentra la influencia en algunas inter armónicas, también existe una disminución del flujo en el entrehierro en la componente fundamental para el devanado concentrado, pero esta no es muy significativa. Otro valor visto es la densidad de corriente, en donde para ambos caso de bobinado su valor es óptimo, pero utilizando devanado concentrado la corriente puede aumentar más lo cual permitiría obtener mayor torque.

Y ya que las pérdidas de una máquina son importantes para el diseño y desempeño de esta, se realizó esta comparación en donde los resultados obtenidos no se logra tener una diferencia muy comparativa, lo cual este valor no es muy importante al momento de realizar la elección del tipo de bobinado.

En donde si existe diferencia, es al momento de analizar la densidad de flujo magnético en la máquina debido que, utilizando el devanado distribuido y concentrado se encuentran en sus valores óptimos, pero la máquina con devanado distribuido se encuentra con mayor saturación que la otra, lo cual nos permite observar que la máquina con devanado concentrado no se encuentra enlazando todo el flujo y es posible obtener mayor torque. En donde, una forma de realizar esto es aumentando la corriente, pero puede ocurrir que los valores se ya no sea los óptimos. Otra forma de aumentar la saturación en la máquina es disminuyendo los dientes del estator, para lo cual se aumenta el área de las ranuras. Lo que produce que el camino que debe enlazar el flujo magnético tenga menor volumen de hierro. Pero esto produciría una disminución en el flujo en el entrehierro, pero utilizando punta de diente este fenómeno no sería tan considerable.

## Bibliografía

- [1] N. Bianchi y T. M. Jahns, Design, analysis, and control of interior pm synchronous machines, Tutorial course notes, 2006.
- [2] R. Quiroga Parra, «Análisis de una máquina de flujo axial con imanes permanentes con saliencia alta,» Memoria de Título para optar al Título de Ingeniero Civil Eléctrico, Universidad de Concepción, Marzo 2009.
- [3] W. E. Jara Montecinos, «Axial Flux Permanent Magnet Machines-Development of Optimal Design Strategies,» Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias de la Ingeniería Mención en Ingeniería Eléctrica, Concepción- Chile, 2016.
- [4] G. Pérez Alcázar, «Imanes permanentes: características, aplicaciones y futuro,» *Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, vol. 40, nº 155, 2016.
- [5] M. Simón Gómez, «Diseño de un Motor de Flujo Axial de Imanes Permanentes,» Trabajo Fin de Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales Intensificación Eléctrica, Universidad de Sevilla, 2017.
- [6] G. Jacek F., W. Rong-Jie y K. Maarten J., Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines, KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, 2004.

- 
- [7] E. Frias Valero, «Aportaciones al estudio de las máquinas eléctricas de flujo axial mediante la aplicación del método de los elementos finitos,» Tesis doctoral, Departamento Ingeniería Eléctrica Universitat Politècnica de Catalunya, 2004.
- [8] J. Pyrhönen, T. Jokinen y V. Hrabovcová, DESIGN OF ROTATING ELECTRICAL MACHINES, John Wiley & Son, 2008.
- [9] D. A. González, J. A. Tapia y A. L. Bettancourt, «Design Consideration to Reduce Cogging Torque in Axial Flux Permanent-Magnet Machines,» *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, vol. 43, nº 8, 2007.
- [10] A. B. Letelier, D. A. González y J. A. Tapia, «Cogging Torque Reduction in an Axial Flux PM Machine via Stator Slot Displacement and Skewing,» *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, vol. 43, nº 3, 2007.
- [11] M. Rodríguez Pozueta, «CONSTITUCIÓN DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS,» Universidad de Cantabria Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética.
- [12] W. Jara, P. Lindh, J. Tapia, I. Petrov, A.-K. Repo y J. Pyrhönen, «Rotor Eddy-Current Losses Reduction in an Axial Flux Permanent-Magnet Machine,» *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, vol. 63, nº 8, 2016.
- [13] M. Á. Rodríguez Pozueta, «MATERIALES Y CIRCUITOS MAGNÉTICOS,» Universidad de Cantabria, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética.
- [14] Cogent, «Electrical Steel Non Oriented Fully Processed,» Cogent, [En línea]. Available: <http://www.cogent-power.com>.
- [15] D. Hanselman, Brushless Permanent Magnet Motor Design, Second Edition, MAGNA PHYSICS PUBLISHING, Motorsoft Division of Fisher Electric Technology, 2006.
- [16] N. Bianchi y S. Bolognani, «Design Techniques for Reducing the Cogging Torque in Surface-Mounted PM Motors,» *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, vol. 38, nº 5, 2002.

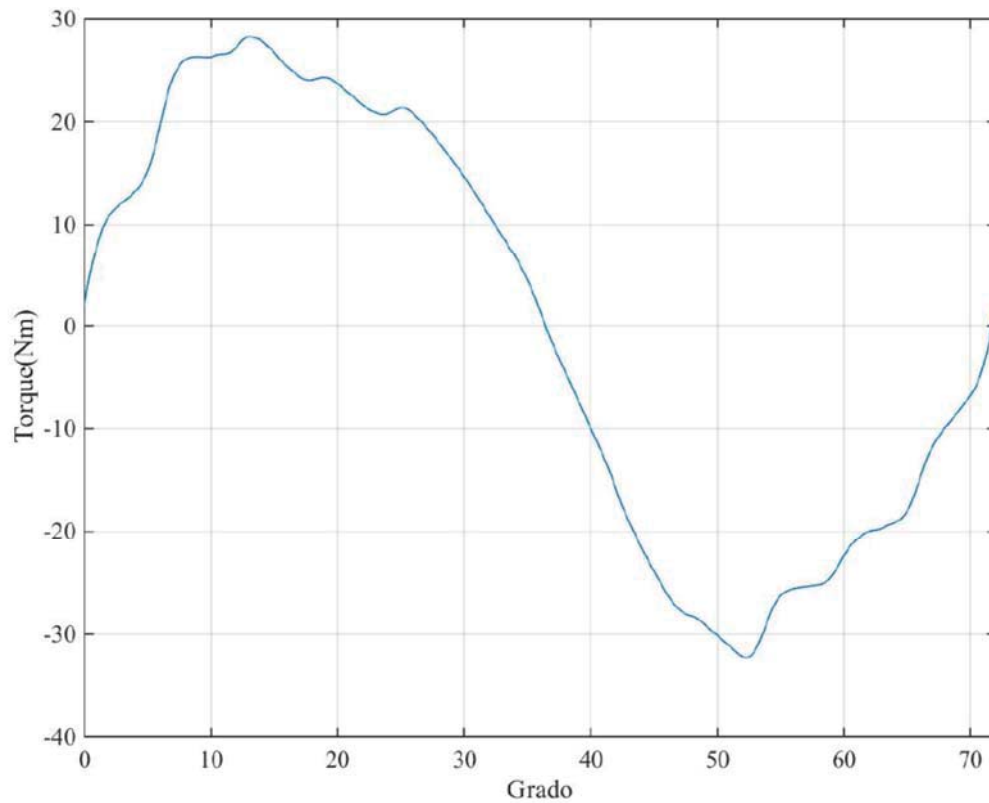
- 
- [17] B. Tekgun, T. Hussain, S. Das, Y. Sozer y M. Hamdan, «Design of a Novel Interior Permanent Magnet Axial Flux Machine,» ECE Department The University of Akron , Akron, USA, 2017.
- [18] A. Parviainen, M. Niemelä y J. Pyrhönen, «Modeling of Axial Flux Permanent-Magnet Machines,» *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, vol. 40, nº 5, 2004.
- [19] L. Dosiek y P. Pillay, «Cogging Torque Reduction in Permanent Magnet Machines,» *IEEE TRASACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, vol. 43, nº 6, 2007.
- [20] W. Fei y P.C.K. Luk, «A New Technique of Cogging Torque Suppression in Direct-Drive Permanent Magnet Brushless Machines,» *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 46, 2010.

## **A** Devanado concentrado

El estudio realizado para la obtención de la posición inicial, para la obtención del torque electromagnético máximo, con una máquina con devanado concentrado, debido que en cero grados la disminución del torque electromagnético es de una gran importancia y el flujo en el entrehierro no es tan significativo para provocar esto. Por lo cual se dio a pensar en la posición no logra enlazar todo el flujo posible, lo cual se da a conocer en el capítulo 3-2.

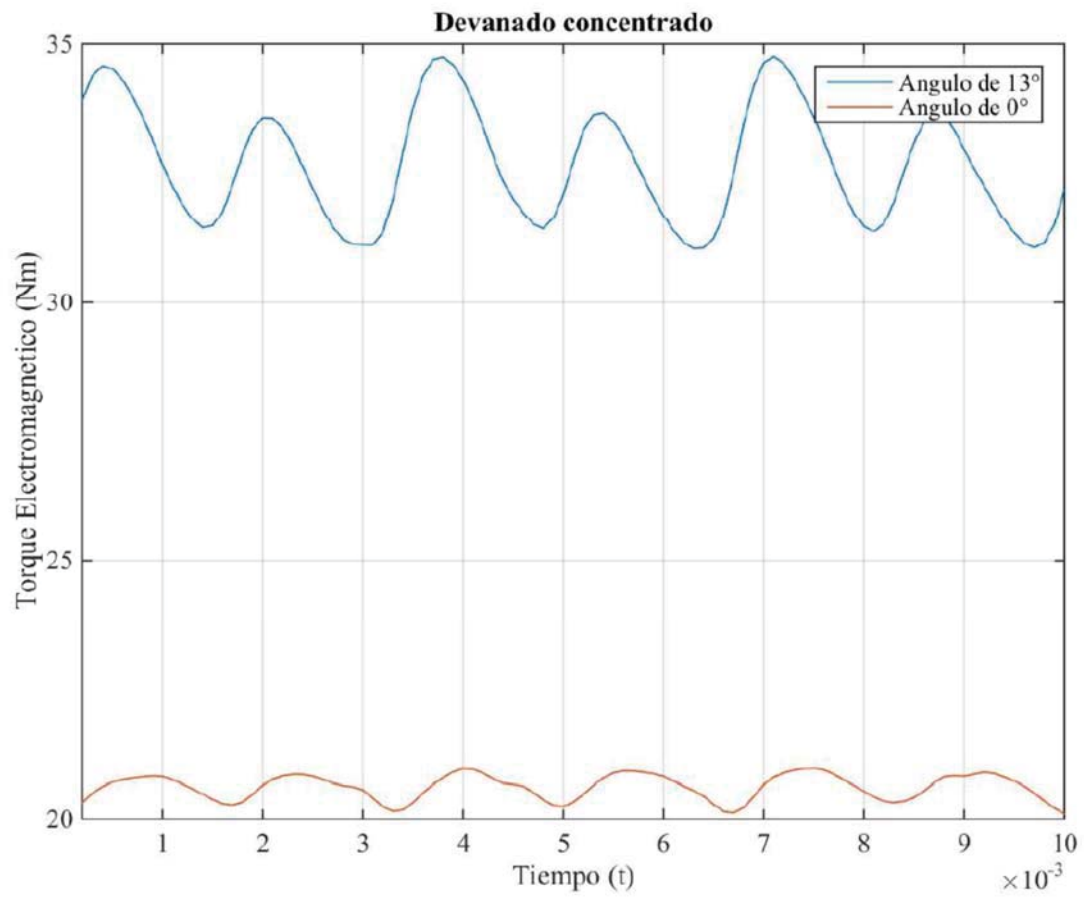
Para obtener la posición que enlaza el mayor flujo posible se realiza mediante una simulación magneto estática, en donde, se aplica una corriente constante del valor máximo, para así obtener la posición que logra mayor torque.





Figura\_ A-1: Resultado.

De la figura anterior se obtuvo la posición en la cual se obtiene mayor torque a una corriente constante, lo cual nos dice que a los trece grados la máquina enlaza la mayor cantidad de flujo magnético. Y en la siguiente figura se muestra la diferencia del torque electromagnético producido.



Figura\_ A-2: Variación de posición inicial para la máquina con devanado concentrado.

# B Tablas comparativas

## B.1 Densidad de flujo magnético

Utilizando el libro de estudio se obtiene la siguiente tabla la cual es utilizada para la obtención de valores óptimos de la máquina de flujo axial con imanes permanentes en el interior, en donde, esta máquina es comparada con una máquina sincrónicas de polos salientes debido a la estructura de esta misma y por lo especificado en el libro de estudio. [8]

Tabla\_ B-1: Densidades de flujo permitidas del circuito magnético para varias máquinas eléctricas estándar.

	Densidad de flujo B/T			
	Máquinas asíncronas	Máquinas sincrónicas de polos salientes	Máquinas sincrónicas de rotor lizo	Máquinas DC
Entrehierro	0.7 – 0.90	0.85 – 1.05	0.8 – 1.05	0.6 – 1.1
Yugo del estator	1.4 – 1.7	1.0 – 1.5	1.1 – 1.5	1.1 – 1.5
Diente (valor máximo aparente)	1.4 - 2.1 (Estator) 1.5 - 2.2 (rotor)	1.6 - 2.0	1.5 - 2.0	1.6 - 2.0 (bobinado de compensación) 1.8 - 2.2 (bobina de armadura)

Yugo del rotor	1 - 1.6	1.0 - 1.5	1.3 - 1.6	1.0 - 1.5
Núcleo del polo	-	1.3 - 1.8	1.1 - 1.7	1.2 - 1.7
Polos de conmutación	-	-	-	1.3

## B.2 Pérdidas de potencia del núcleo

Para verificar y realizar una comparación con lo visto en el capítulo 3.5.2, en donde, se ve las pérdidas de potencia del núcleo mediante el software de elementos finito utilizando el método de Bertotti, se realiza la comparación respecto a los datos entregado por el fabricante de la chapa magnética acero laminado M400-50A. [14]

Para esto se muestra los datos del fabricante a utilizar en la siguiente figura.

**Typical magnetic properties at 50 Hz**  
This data relates to products manufactured by Cogent at Surahammars Bruks AB

Grade EN 10106	Specific total loss at 50 Hz		Anisotropy of loss %	Magnetic polarization at 50 Hz			Coercivity (DC) A/m	Relative permeability at 1,5 T
	$\hat{J}= 1,5$ T W/kg	1,0 T W/kg		$\hat{H}= 2500$ T	5000 T	10000 A/m		
M235-35A	2,25	0,92	10	1,53	1,64	1,76	35	610
M250-35A	2,35	0,98	10	1,53	1,64	1,76	40	660
M270-35A	2,47	1,01	10	1,54	1,65	1,77	40	700
M300-35A	2,62	1,10	10	1,55	1,65	1,78	45	830
M330-35A	2,93	1,19	10	1,56	1,66	1,78	45	860
M700-35A*	5,50	2,53	7	1,63	1,71	1,83	100	1750
M250-50A	2,38	1,02	10	1,55	1,64	1,77	30	740
M270-50A	2,52	1,07	10	1,55	1,64	1,77	30	770
M290-50A	2,62	1,14	10	1,56	1,65	1,78	35	800
M310-50A	2,83	1,23	10	1,57	1,66	1,79	40	970
M330-50A	3,03	1,29	10	1,58	1,67	1,79	40	1000
M350-50A	3,14	1,33	9	1,58	1,67	1,79	45	1020
M400-50A	3,42	1,46	9	1,58	1,67	1,79	50	1070
M470-50A	4,05	1,79	6	1,58	1,67	1,79	60	1070
M530-50A	4,42	2,01	6	1,59	1,68	1,80	70	1100
M600-50A	5,17	2,34	6	1,63	1,72	1,83	85	1660
M700-50A	5,68	2,57	5	1,64	1,72	1,84	100	1730
M800-50A	6,60	3,05	5	1,65	1,74	1,85	100	1810
M940-50A	7,55	3,57	5	1,65	1,74	1,85	110	1850

Figura\_ B-1: Datos de fabricante.

Utilizando los datos entregado por el fabricante se realiza un estimado al valor de las pérdidas en el núcleo, para lo cual el factor marcado es multiplicado por la masa del núcleo de la máquina. En donde, los resultados se muestran en las siguientes tablas.

Tabla\_ B-2: Pérdidas en el núcleo del rotor.

	Devanado distribuido	Devanado concentrado	Unidad
Total de simulación	1.94	2.71	[W]
Total por fabricante	7.42	7.42	[W]
Masa	5.08	5.08	[Kg]

Tabla\_ B-3: Pérdidas en el núcleo del estator.

	Devanado distribuido	Devanado concentrado	Unidad
Total de simulación	18.04	10.61	[W]
Total por fabricante	22.23	9.782	[W]
Masa	6.5	6.7	[Kg]

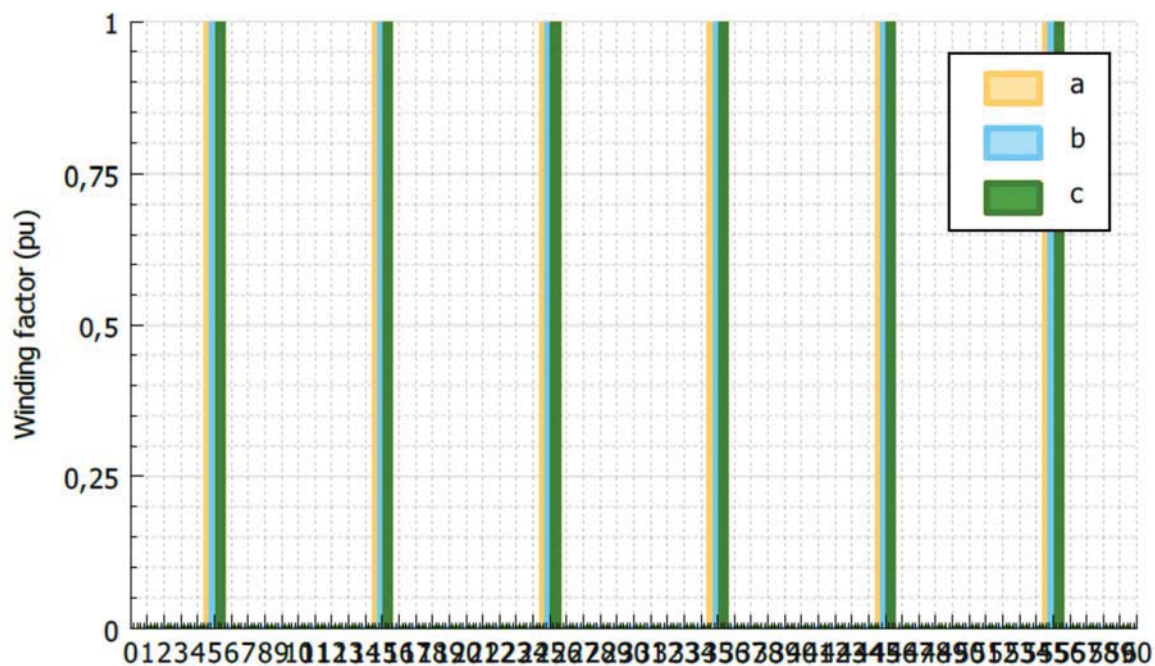
De las tablas mostradas, se observar ambos valores, obtenido mediante simulación como por los datos de fabricante, en donde, los resultados en encuentra en valores cercanos y esto nos da una forma de comparar y verificar estos resultados.

### B.3 Factor de bobinado

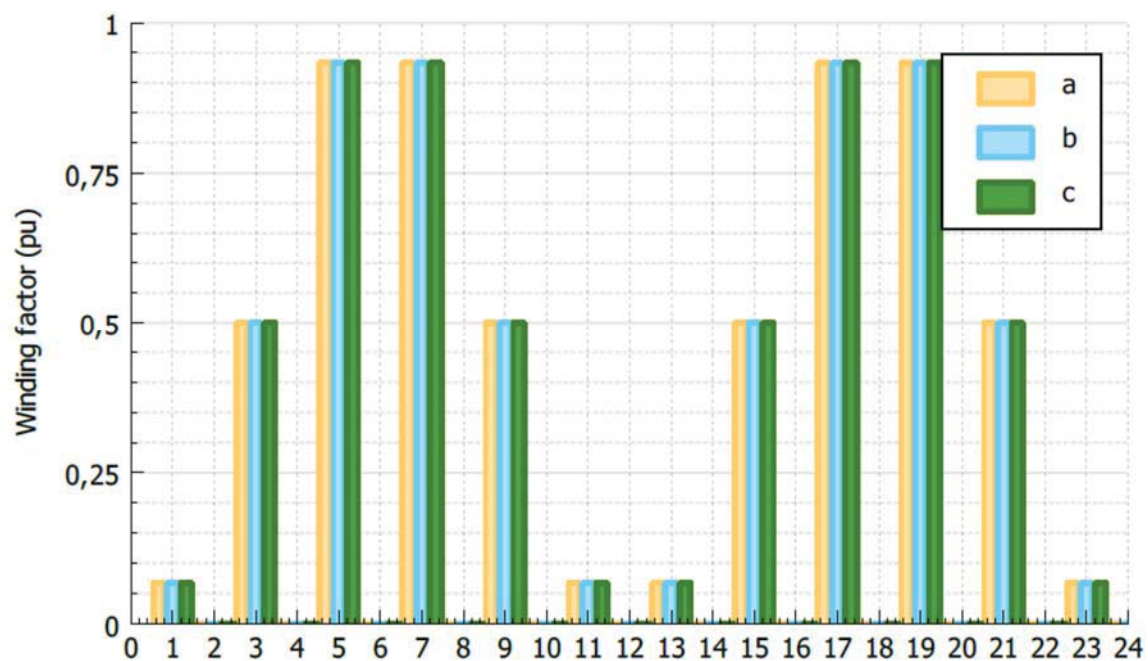
El factor de bobinado es un valor importante al momento de diseño de la máquina, debido que este valor es necesario para la obtención del cálculo de tensión inducida o en número de vueltas por fase, en donde es utilizado.

Para lo cual este parámetro es obtenido utilizando el software koil, es el cual nos permitió obtener el factor de bobinado para ambos casos de devanado distribuido y concentrado.

En donde, el valor necesario solo es el número de ranuras utilizadas y el de fases de la máquina. En los datos entregados por el koil se muestra en las siguientes figuras. Otro dato importante entregado, es orden armónico involucrado en la máquina, en conjunto al factor de bobinado en cada una de estas.



Figura\_ B-2: Factor de bobinado para máquina con devanado distribuido.



Figura\_ B-3: Factor de bobinado para máquina con devanado concentrado de doble capa.

# **C** Propiedades y características

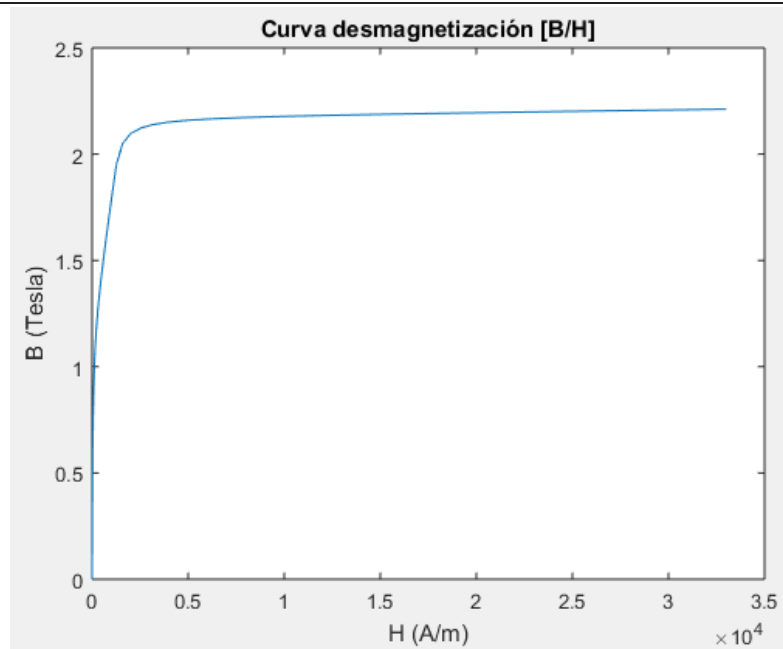
## **físicas**

En este capítulo se muestran las propiedades y características físicas de los materiales a utilizados. Para el estudio se crean dos materiales los cuales son: Fierro e Imán.

### **C.1 Fierro silicoso**

Para la construcción de la máquina se define la característica no lineal del fierro utilizando los valores de intensidad de campo magnético  $H$  y de densidad de flujo magnético  $B$ . Con dichos valores se crea la curva de desmagnetización del fierro fijando el nivel de saturación en (2.169 Teslas). Los valores de  $B$  y  $H$  se muestran en la tabla C-1 y la curva de desmagnetización en la figura C-1.





Figura\_ C-1: Curva de desmagnetización.

Tabla\_ C-1: Valor de la curva de desmagnetización.

C Propiedades y **características físicas**

---

$H$ [A/m]	$B$ [T]
0	0
16.35213	0.394269
32.70426	0.603436
55.41555	0.774804
83.80466	0.90447
119.291	1.008533
163.649	1.097297
219.0965	1.178043
288.4059	1.256441
375.426	1.33737
483.3384	1.425455
618.7083	1.525447
787.9205	1.642563
999.4359	1.78279
1263.83	1.951265
1594.323	2.050904
2007.439	2.096495
2523.834	2.122373
3169.327	2.13896
3976.195	2.150522
4984.778	2.159151
6245.508	2.166015
7821.42	2.171842
9791.311	2.177132
12253.67	2.182271
15331.63	2.187583
19179.07	2.193377
23988.37	2.199968
30000	2.207699
33000	2.211469

---

En donde el material utilizado es mediante chapas magnéticas acero laminado M400-50A.

## C.2 Imán permanente

Las características de los imanes permanentes utilizados son su densidad de flujo remanente [ $B_r$ ] de 1.14 [T] y su permeabilidad relativa [ $\mu_r$ ] es de 1.123. La magnetización tangencial se realiza definiendo la característica lineal del imán como un vector con coordenadas cilíndricas y la orientación se fija respecto del sistema de coordenadas del rotor Figura 1-5. En donde el tipo de imán permanente pertenece a Nd-Fe-B.

Name of the material \*  
N\_PM

Comment

B(H) \ Mass density \

Magnetic property

Magnetic property

Linear magnet described by cylindrical vector Br

Remanent flux density (T)	Expression
Br R axis	0
Br THETA axis	-1.14
Br Z axis	0

Relative permeability \*

1.123

**Magnetic property**

permanent magnet

vector magnetization described in a cylindrical coordinate system

linear approximation

$\vec{B}_r$  remanent flux density defined by the  $B_{r\theta}$ ,  $B_{r\phi}$ ,  $B_{rz}$  components of cylindrical coordinate system

Figura\_ C-2: Magnetización vectorial del imán permanente.