

Motor de inducción Trifásico de flujo axial con fluido magnetorreológico como rotor

Cristian Fernando Sandoval Parra, Johan Sebastián Pinto Quintero y Luis Albeiro Gómez Vesga

Trabajo de grado para optar el título de Ingenieros Electricistas

Director:

Hermann Raúl Vargas Torres

Doctor en Ingeniería Eléctrica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Ingeniería Eléctrica

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

A mis padres Jaime Pinto, María Cecilia Quintero Amado y a mi amado Dios. Quienes fueron mi mayor apoyo durante mi carrera universitaria, junto con su amor, paciencia y consejos me dieron la suficiente fortaleza para poder llegar a ser un ingeniero electricista de esta prestigiosa universidad de excelencia académica. Me llena de orgullo ser un egresado.

A mi hermana Yudy Viviana González Quintero quien me apoyo en más de una ocasión económicamente para mis gastos estudiantiles y consejos para no desfallecer en mi meta universitaria.

Gracias a mi novia Yolanda Pérez Pérez quien me apoyó incondicionalmente en todo momento de adversidades. Me dio fortaleza, ánimo y consejos para seguir mejorando cada día como persona y poder alcanzar mis sueños de ser un ingeniero.

Johan Sebastian Pinto Quintero

Este trabajo de grado está dedicado a aquellos que han sido la fuente inagotable de inspiración y apoyo a lo largo de esta travesía académica

A mi madre Lucelly Parra Bustamante y mi hermano Johan Sebastian Sandoval Parra quienes me inculcaron el amor por el conocimiento y siempre creyeron en mis capacidades. Su sacrificio y dedicación han sido la luz que ha guiado cada paso de mi camino.

A mi novia Marelin Amaya por su cariño y apoyo incondicional en los momentos difíciles, con quien he compartido risas, lágrimas y momentos inolvidables a lo largo de esta

travesía. Su presencia ha convertido los obstáculos en oportunidades y ha hecho que cada logro sea más significativo.

Este trabajo es el resultado de la contribución de cada uno de ustedes, y lo dedico con profundo agradecimiento y afecto. Sus valores y enseñanzas han sido los cimientos sobre los cuales construí este logro. A todos ustedes, dedico este trabajo con gratitud y amor.

Cristian Fernando Sandoval Parra

A Dios que con su infinita misericordia da luz y acierto a cada uno de sus siervos. A mi madre Josefina Vesga Rodríguez que con su apoyo incondicional me ha mantenido constante en medio de tantos momentos de turbulencia y desasosiego.

Luis Albeiro Gómez Vesga

Agradecimientos

A Dios primero que todo porque en esta vida no se mueve una hoja si no es por su voluntad, al haberme dado la fortaleza, sabiduría que junto con su amor pude pasar todos los obstáculos presentados en mi carrera universitaria.

Gracias a mis amados padres Jaime Pinto y María Cecilia Quintero Amado junto a su amor, consejos, apoyo incondicional hoy soy una persona conformada por excelentes principios éticos y valores morales. Me permitieron llegar a mis más anhelados sueños de ser un ingeniero electricista perteneciente a esta alma mater de excelencia académica.

Agradezco al Dr. Hermann Raúl Vargas Torres, quien fue un excelente director de tesis por habernos tenido paciencia, disponibilidad de tiempo cada vez que lo requeríamos, y sobre todo su gran experiencia como docente e ingeniero electricista nos permitieron culminar este proyecto de grado.

Johan Sebastian Pinto Quintero.

Quisiera expresar mi profundo agradecimiento a todas las personas que contribuyeron de manera significativa a la realización de este trabajo de grado.

Agradezco a mis amigos y familiares por su constante apoyo emocional y palabras de aliento durante los momentos desafiantes de este proceso.

Este trabajo no habría sido posible sin la contribución de cada una de estas personas, y estoy sinceramente agradecido por el impacto positivo que han tenido en mi desarrollo académico y profesional.

Cristian Fernando Sandoval Parra

Luego de pedalear incansablemente y estando cerca de coronar los Alpes suizos quiero expresar mi agradecimiento a mis compañeros de ruta Johan Sebastian Pinto Quintero y Cristian Fernando Sandoval Parra por pedalear a mi lado y estar comprometidos con solucionar los incalculables imprevistos que se presentaron en la ruta. Mi gratitud al Dr. Hermann Raúl Vargas Torres quien como director de nuestra tesis con su conocimiento y acertadas acotaciones nos permitió la terminación de este proyecto.

Luis Albeiro Gómez Vesga

Tabla de contenido

Introducción	14
1. Objetivos.....	16
1.1 Objetivo general.....	16
1.2 Objetivos específicos	16
2. Marco teórico	17
2.1 Flujo y campo magnético.....	17
2.2 Motor de inducción.....	18
2.3 Motor trifásico	19
2.4 ¿Por qué motores de flujo axial?.....	20
2.5. Fluido magnetorreológico.....	22
3. Metodología	23
3.1 Diseño y modelado del estator.....	23
3.2. Diseño y Modelado De Las Bobinas Trifásicas Del Estator.....	24
3.3. Modelado y diseño de la bobina de 60 grados.....	25
3.3.1 Modelado y diseño de la bobina de 120 grados.....	26
3.3.2. Modelado y diseño de la bobina de 180 grados.....	27
3.4. Cálculos.....	28
3.4.1. Cálculos Magnéticos.....	30
3.4.3. Cálculo del número de vueltas asumiendo $B = 0,1 \text{ T}$	36
3.5. Elaboración de las bobinas de campo	40
3.6. Rotor	42
3.6.1 Diseño y elaboración del bucle de material acrílico	42

3.7. Preparación del fluido magnetorreológico.....	44
3.7.1. Selección del fluido portador y las partículas ferromagnéticas	44
3.8. Preparación de las muestras	45
3.8.1. Muestra 1:	45
3.8.2. Muestra 2:	46
3.8.3 Muestra 3:	46
3.8.4. Muestra 4:	46
3.8.5. Muestra 5:	46
3.9. Diseño del eje del motor trifásico de flujo axial	47
3.10. Diseño de las arandelas del motor trifásico de flujo axial	48
3.11. Ensamble final	50
3.12. Pruebas al motor de flujo axial	51
3.12.1. Conexión y alimentación del motor	51
3.12.2. Medidas de seguridad para las pruebas eléctricas.....	53
4. Observaciones y conclusiones	58
Referencias Bibliográficas	60
Apéndices.....	61

Lista de tablas

Tabla 1 Especificaciones técnicas calibre 20 AWG	34
Tabla 2 Especificaciones técnicas calibre 22 AWG.....	35
Tabla 3 Elementos usados en las pruebas eléctricas.....	54
Tabla 4 Pruebas eléctricas con 10 V	54
Tabla 5 Pruebas eléctricas con 20 V	55
Tabla 6 Pruebas eléctricas con 30 V	55
Tabla 7 Pruebas eléctricas con 40 V	56
Tabla 8 Medidas de flujo magnetico con la muestra 3	56

Lista de figuras

Figura 1	<i>Líneas de campo magnético atravesando una determinada área</i>	17
Figura 2	<i>Flujo radial vs flujo axial</i>	18
Figura 3	<i>Forma de onda de tensión en un motor trifásico</i>	19
Figura 4	<i>Cuatro tipos típicos de estructuras topológicas de motores de flujo axial</i>	21
Figura 5	<i>Plano del estator en SolidWorks</i>	23
Figura 6	<i>Núcleo de los estatores ferromagnéticos</i>	24
Figura 7	<i>Onda de flujo axial con tres bobinas</i>	25
Figura 8	<i>Devanado de la bobina con ancho de 60°</i>	26
Figura 9	<i>Devanado de la bobina con ancho de 120°</i>	27
Figura 10	<i>Devanado de la bobina con ancho de 180°</i>	28
Figura 11	<i>Gráfica permeabilidad relativa vs densidad de flujo magnético del acero fundido</i> ...	32
Figura 12	<i>Gráfica de magnetización del acero fundido</i>	32
Figura 13	<i>Modelo horizontal del motor de flujo axial acoplado</i>	39
Figura 14	<i>Modelo completo de los dos estatores acoplados</i>	40
Figura 15	<i>Medio núcleo de estator embobinado</i>	41
Figura 16	<i>Plano de la dona en SolidWorks</i>	42
Figura 17	<i>Dona en acrílico</i>	42
Figura 18	<i>Tapones de caucho para la dona en acrílico</i>	43
Figura 19	<i>Limadura de hierro</i>	44
Figura 20	<i>Muestra de ACPM</i>	44
Figura 21	<i>Muestra 1, 2 y 3 de fluido magnetorreológico</i>	46
Figura 22	<i>Isométrica del eje en SolidWorks y vista lateral unidades en cm</i>	47

Figura 23 <i>Eje cilíndrico en hierro</i>	48
Figura 24 <i>Isométrica de la arandela en SolidWorks</i>	48
Figura 25 <i>Vista frontal y lateral de la arandela, unidades en cm</i>	49
Figura 26 <i>Imagen explosionada del motor de flujo axial empleando SolidWorks</i>	50
Figura 27 <i>Motor trifásico de flujo axial construido</i>	51
Figura 28 <i>Esquema de conexión de los devanados del motor</i>	52
Figura 29 <i>Motor de flujo axial conectado al variador de tensión</i>	53

Lista de Apéndices

Apéndice A: Evidencia 1 del funcionamiento del motor de flujo axial.....61

Apéndice B: Evidencia 2 del funcionamiento del motor de flujo axial.....61

Resumen

Título: Motor de inducción trifásico de flujo axial con fluido magnetorreológico como rotor*.

Autores: Johan Sebastián Pinto Quintero, Cristian Fernando Sandoval Parra y Luis Albeiro Gómez Vesga. **

Palabras clave: Fluido magnetorreológico, estator, rotor, máquinas eléctricas de inducción, flujo axial.

Descripción:

En el presente trabajo de investigación, se abordaron diferentes lineamientos de diseño y construcción de los motores eléctricos trifásicos. El prototipo planteado busca generar un flujo magnético de tipo axial, diferente al flujo que se genera en la mayoría de motores convencionales que son de tipo radial. De acuerdo con el diseño planteado, el motor trifásico es de 6 polos, los estatores constan de 12 ranuras uniformemente distribuidas entre ellas, está compuesto también por un eje cilíndrico de material metálico cuya función es mantener unidos los componentes de dicho motor, garantizando estabilidad en el movimiento y seguridad en el ensamblaje de todas sus partes.

Para la visualización del fenómeno electromagnético se construyó un bucle de material acrílico de sección redonda transparente, que cumplirá la función de rotor y a su vez se usará para almacenar el fluido magnetorreológico (ferrofluido). Se realizaron pruebas con diferentes cantidades del fluido presente, para determinar la mejor concentración que genera mayor flujo magnético de acuerdo a la variación de tensión y corriente con que se alimente el motor, obteniendo así los mejores valores de corrientes y tensión a los cuales las concentraciones de fluido magnetorreológico mostraron resultados óptimos. Cabe resaltar que para el diseño de cada parte del motor se utilizó los softwares AutoCAD y Solid Works.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones.

Abstract

Title: Toroidal prototype with magnetorheological fluid subjected to magnetic fields *

Authors: Johan Sebastian Pinto Quintero, Cristian Fernando Sandoval Parra, Luis Albeiro Gómez Vesga. **

Key words: Magnetoreological fluid, stator, induction electrical machines, axial flow.

Description:

In the present research work, different design and construction guidelines for three-phase electric motors were addressed. The proposed prototype aims to generate an axial magnetic flux, unlike the flux generated in most conventional motors, which are of radial type. According to the proposed design, the six-pole three-phase motor consists of stators with 12 slots evenly distributed among them. It also includes a cylindrical shaft made of metallic material whose function is to hold together the components of the motor, ensuring stability in movement and safety in the assembly of all its parts.

To visualize the electromagnetic phenomenon, a loop made of transparent round-section acrylic material was constructed, which will serve as the rotor and will also be used to store the magnetorheological fluid (ferrofluid). Tests were conducted with different amounts of the fluid present to determine the optimal concentration that generates greater magnetic flux according to the variation in voltage and current supplied to the motor. This helped obtain the best values of currents and voltage at which concentrations of magnetorheological fluid showed optimal results. It is noteworthy that AutoCAD and Solid Works software were used for the design of each part of the motor.

* Project of grade

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering School of Electrical, electronics and telecommunications director

Introducción

El objeto de este trabajo de grado es el diseño y construcción de un motor trifásico de flujo axial con fluido magnetorreológico como rotor, que opera a partir de un campo magnético paralelo al eje de rotación del rotor. Este flujo magnético induce una corriente eléctrica en el rotor, que no es una pieza mecánica convencional, sino que está compuesta de fluido magnetorreológico. El rotor, a su vez, interactúa con las ondas de flujo magnético axial en rotación, lo que hace que el rotor tienda a seguir las ondas de flujo que están en rotación.

Actualmente las máquinas eléctricas rotativas se pueden dividir principalmente en dos categorías según su tipo de construcción; flujo radial, predominante en aplicaciones industriales y de flujo axial (Parada, 2009). Los motores de flujo axial tienen ciertas ventajas relativamente inexploradas sobre los motores de flujo radial. En los últimos años, se han utilizado tradicionalmente en aplicaciones de conversión de energía, pero en algunas aplicaciones las características de flujo axial los hacen particularmente atractivos. Una gran diferencia entre estos dos tipos de flujo es que si se comparan los patrones de flujo de ambos motores, se puede observar que la trayectoria del flujo del motor axial es más densa y corta en comparación con el motor de flujo radial porque algunos bucles de campo magnético nunca interactúan con el rotor, en cambio, en un motor axial, la mayoría de las líneas de flujo están en un área útil que puede usarse para generar torque, Por lo tanto, los motores de flujo axial pueden lograr una mayor densidad de flujo, lo que resulta en una mayor salida de par con un motor del mismo tamaño. (Basanta, 2011).

Otro aspecto que es necesario enfatizar, es que si es necesario aumentar el diámetro de un motor de inducción la inercia del motor aumentará significativamente, lo que puede causar que el motor consuma gran cantidad de corriente durante el arranque, acá es donde los motores

de flujo axial juegan un papel importante ya que estos si logran mantener este problema bajo control, requieren menos inercia que los motores radiales. En general estos motores ofrecen una alternativa más potente, ligera y eficiente que los motores convencionales. Esto significa que se puede adaptar a diferentes aplicaciones industriales, como: la aviación, aerogeneradores, coches eléctricos, micromotores entre otros, además de ser amigables con el medio ambiente, suponen una evolución respecto a los tradicionales motores de flujo radial.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Diseñar y construir un motor de inducción trifásico de flujo axial con fluido magnetorreológico como rotor.

1.2 Objetivos específicos

- Diseñar e implementar el estator trifásico apto para el motor trifásico, utilizando materiales y técnicas adecuados para garantizar un funcionamiento eficiente y confiable del motor.
- Implementar una solución apropiada para resolver el problema de almacenamiento del fluido magnetorreológico, considerando factores como viscosidad, estabilidad, y compatibilidad con los materiales utilizados, para determinar la mejor concentración del fluido magnetorreológico, que dé lugar a un óptimo funcionamiento del motor, realizando pruebas experimentales y ajustando la concentración según sea necesario.
- Realizar el ensamblaje de las partes implementadas junto con los complementos necesarios para lograr el funcionamiento adecuado del motor, asegurándose de que todas las piezas estén correctamente instaladas y ajustadas.
- Realizar pruebas de laboratorio con diferentes concentraciones del fluido magnetorreológico para identificar oportunidades de mejora, evaluando el rendimiento del motor en términos de eficiencia, torque y estabilidad, y optimizando la concentración del fluido para obtener el mejor rendimiento posible.

2. Marco teórico

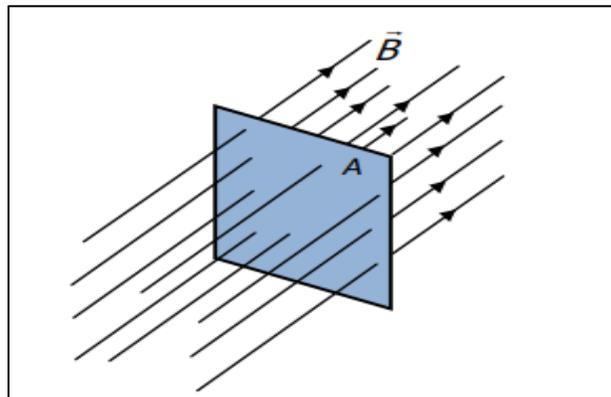
2.1 Flujo y campo magnético

Para este trabajo es de suma importancia entender conocimientos básicos sobre teoría electromagnética y máquinas eléctricas, Cuando hablamos de fenómenos magnéticos, es importante entender que los campos existen en todo el espacio; a diferencia de las fuerzas que utilizamos en problemas simples de física, donde solo actúan sobre objetos específicos. Al considerar campos en áreas grandes, la física con la que podemos lidiar es más compleja, pero también más realista, y nos permite describir situaciones que no se pueden describir usando fuerzas puntuales.

Cuando nos referimos a los campos eléctricos y magnéticos, es provechoso considerar concepto de flujo, que representa la cantidad de campo que atraviesa una superficie dada. Esta medida, comúnmente denotada por la letra Φ , nos proporciona una herramienta crucial para comprender la interacción entre el campo y su entorno. Por otro lado, el campo magnético puede ser definido como un campo vectorial generado por el movimiento de cargas eléctricas y materiales magnéticos, como los imanes, y se representa típicamente con la letra B .

Figura 1

Líneas de campo magnético atravesando una determinada área.



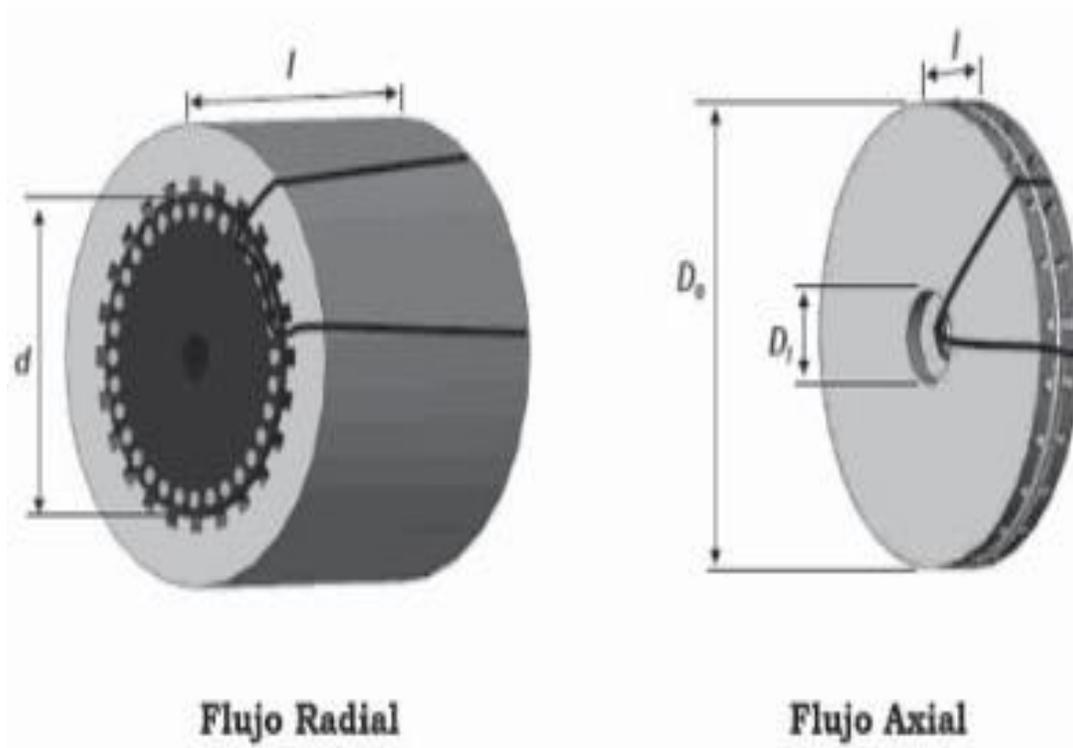
Fuente: Elaboración propia (2024).

2.2 Motor de inducción

En términos generales, los motores eléctricos, ya sean en configuración radial o axial, consisten en un núcleo ferromagnético en el rotor, el cual gira dentro de otro núcleo de hierro que contiene devanados de cobre encargados de generar el campo magnético. Para una máquina eléctrica convencional, los parámetros clave son el diámetro del entrehierro d y la longitud efectiva l . Por otro lado, para un motor de flujo axial, los aspectos más relevantes son el diámetro interno D_i y su diámetro externo D_o . Como caso de estudio para este trabajo de grado nos centramos en el motor de flujo axial

Figura 2

Flujo radial vs flujo axial.



Fuente: Parada et al. (2019).

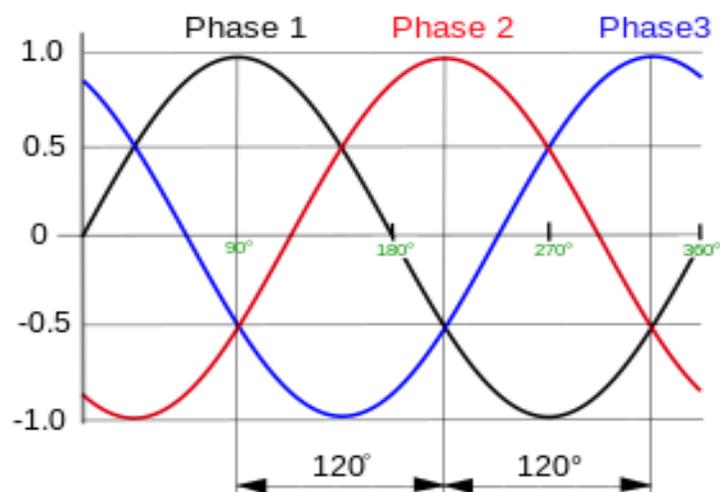
2.3 Motor trifásico

Un motor trifásico de inducción (MTI) es un dispositivo electromagnético versátil que puede transformar de manera eficiente energía eléctrica en energía mecánica, generando así movimiento rotativo, o convertir energía mecánica en energía eléctrica, actuando como un generador. Sin embargo, presenta ciertas limitaciones como generador, por lo que pocas veces se suele usarse como tal. Por este motivo, comúnmente se hace referencia a estos dispositivos como motores de inducción. Este tipo de motor eléctrico es también denominado motor asincrónico trifásico debido a que, en condiciones de funcionamiento estable, la velocidad de su campo magnético rotatorio nunca coincide con la velocidad mecánica del eje del motor. El MTI es el tipo de motor más utilizado hoy en día en la industria. Esta preferencia se debe a su sólida construcción y su diseño simple, que los hace altamente confiables y fáciles de mantener.

El devanado trifásico consiste en tres devanados separados, ubicados a 120 grados entre si alrededor de la superficie de la máquina.

Figura 3

Forma de onda de tensión en un motor trifásico.



Fuente: Elaboración propia (2024).

2.4 ¿Por qué motores de flujo axial?

En la actualidad, el motor de inducción jaula de ardilla (o de rotor en "cortocircuito") es el más utilizado en la mayoría de las industrias, Esta variante, considerada la versión convencional o tradicional, se clasifica como motor de flujo radial de inducción (MFRI). Estos motores no solo se utilizan en sistemas eléctricos de velocidad constante, si no que han desplazado ampliamente a los motores de corriente directa de velocidad variable, gracias al uso de convertidores de frecuencia variable, Estos convertidores, cada vez más compactos, ligeros y eficientes, han sido posibles gracias al rápido avance de la electrónica.

Para aplicaciones que requieren motores de pequeña y mediana potencia, los de flujo axial (MFA), ofrecen un rendimiento sobresaliente. Al ser alimentados por convertidores de frecuencia variable, se logra un conjunto compacto, fiable y eficiente de convertidor-motor.

Para comprender el funcionamiento de cada tipo de motor, es crucial entender la orientación del campo magnético. En el caso de los motores de flujo radial, este campo magnético rota como múltiples agujas de reloj superpuestas a lo largo del eje, es decir, de manera perpendicular al mismo.

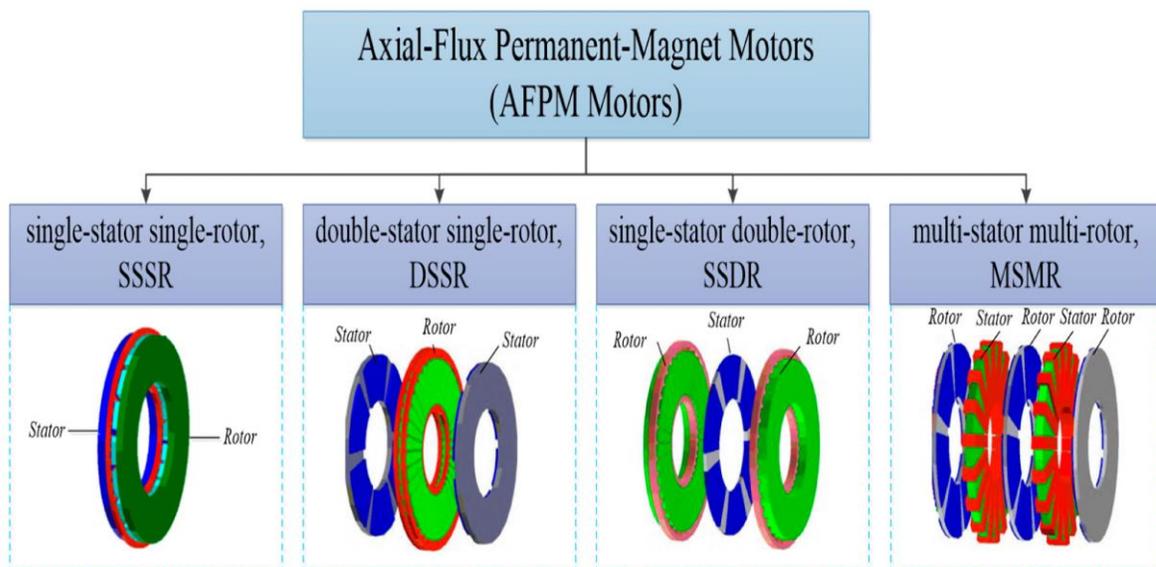
Por otro lado, en los motores de flujo axial, el campo magnético rota paralelo al eje de rotación del motor. El arreglo geométrico del MFR entre el estator y el rotor es concéntrico, asegurando así la existencia de un espacio entre ambos (llamado entrehierro). En cambio, en los MFA, el estator tiene forma de anillo y el rotor (o los rotores) son de forma de disco, con sus superficies activas dispuestas axialmente. Los motores de flujo axial (MFA) son ahora una solución atractiva para diversas aplicaciones, como los vehículos de nueva energía, aeroespaciales, marinas y otras aplicaciones industriales. La razón es que los motores (MFA) tienen ciertas ventajas como son; una estructura compacta, alta densidad de par y alta densidad

de potencia. En comparación con los motores tradicionales de flujo radial (MFR), los motores AFPM se pueden fabricar en un volumen menor bajo la misma demanda de energía, que es más adecuado para aplicaciones compactas. Además, los motores (MFA) pueden lograr un mejor rendimiento de respuesta dinámica. En vista de las muchas ventajas de los motores (MFA), estudiar el progreso de los motores AFPM es de gran importancia.

Los motores de flujo axial tienen principalmente cuatro tipos de estructuras topológicas que son: un solo estator / un solo rotor (SSSR), doble estator / un solo rotor (DSSR), un solo estator / doble rotor (SSDR) y multi-estator / multi-rotor, cada una de esta topología se usa dependiendo el tipo de aplicación que se requiera, para el objeto de este trabajo de grado se usó la topología doble estator / un solo rotor (DSSR).

Figura 4

Cuatro tipos típicos de estructuras topológicas de motores de flujo axial.



Fuente: Hao et al (2022).

2.5. Fluido magnetorreológico

Los fluidos magnetorreológicos pueden considerarse materiales inteligentes, que exhiben propiedades reológicas alteradas por la influencia de un campo magnético. Cuando se aplica un campo magnético, su viscosidad se puede modificar desde una consistencia similar a la de un líquido convencional hasta una textura similar a una masa o lodo espeso, sin modificar su forma o volumen. Esta capacidad de respuesta activa ante la presencia de un campo magnético se atribuye a la presencia de partículas magnéticas suspendidas en el fluido portador, para objeto de este trabajo de grado se aprovechó las propiedades de estos materiales. El objetivo es por medio de un campo magnético rotativo hacer que estas partículas entren en función con dicho campo, se logren magnetizar y logren alinearse para formar cadenas y estas misma logren seguir el campo magnético rotativo, generando la onda del flujo axial.

Para la elaboración del fluido magnetorreológico se empleó limadura de hierro fina, el cual se obtuvo de restos sobrantes de materiales ferromagnéticos. Los factores a considerar para lograr una mezcla ampliamente aceptable de este fluido son: tamaño, densidad y cantidad a utilizar.

Como fluido portador se empleó aceite combustible para motores (ACPM) debido a que presenta una baja viscosidad.

3. Metodología

De acuerdo con los estándares de diseño el proceso metodológico aplicado a este trabajo de grado fue el siguiente.

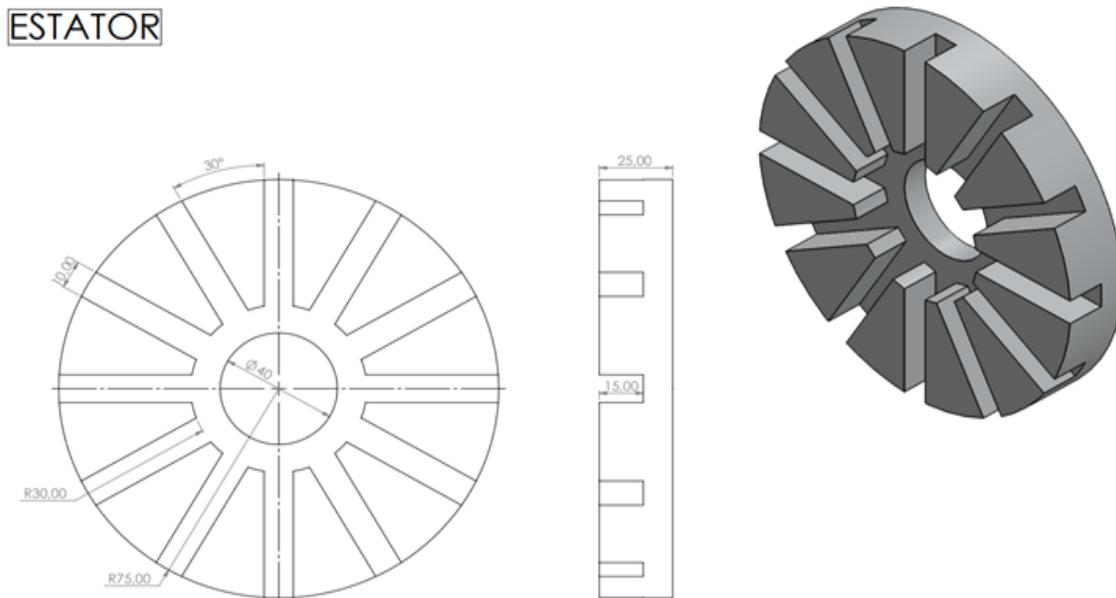
3.1 Diseño y modelado del estator

Para el diseño de los estatores ferromagnéticos se utilizó los softwares de diseño AutoCAD y SolidWorks (Ver figura 5). Los estatores son componentes fijos del sistema, es la parte estática del motor que alberga los embobinados donde se llevará cabo todo el proceso electromagnético para generar el flujo axial por medio de inducción de campo magnético. Como primer paso se determinó los diámetros externos e internos de los estatores, el espesor de cada estator y el número de dientes.

Se decidió que cada estator tendría 12 dientes espaciados uniformemente entre sí. En el cálculo de los estatores se tuvieron en cuenta diferentes consideraciones.

Figura 5

Plano del estator en SolidWorks.



Fuente: Elaboración propia (2024).

Figura 6

Núcleo de los estatores ferromagnéticos.



Fuente: Elaboración propia (2024).

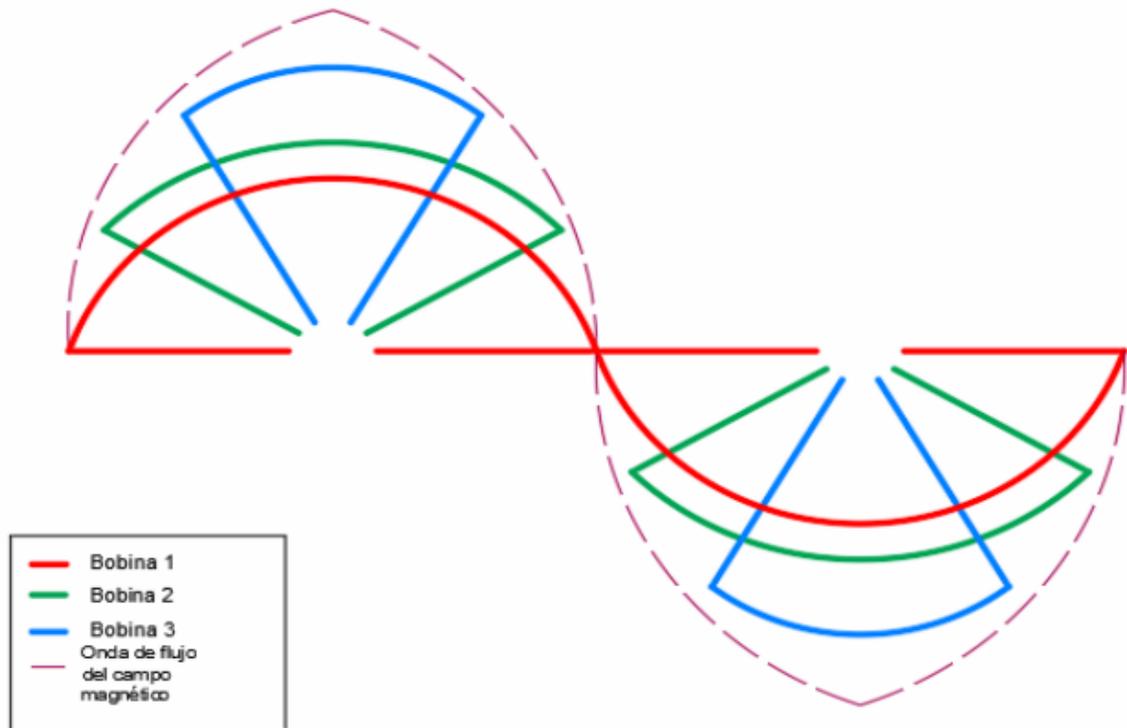
3.2. Diseño y Modelado De Las Bobinas Trifásicas Del Estator.

De acuerdo con la estructura del motor, el embobinado requería de tres tipos de bobinas, cada una con diferentes trayectorias cerradas para formar la onda de flujo axial. En el diseño de las bobinas se tuvo en cuenta diferentes parámetros, como: ancho de ranura, calibre del conductor, número de vueltas, diámetros internos y externos del estator.

La onda de flujo axial requiere tres tipos de bobinas, una de 60° , 120° y 180° respectivamente. En la siguiente imagen se puede visualizar el flujo creado por las espiras que se encuentran embobinadas concéntricamente para dar forma a una onda sinusoidal de campo magnético. Cabe resaltar que como es un motor trifásico requirió desfazar 120° y -120° los devanados de cada fase.

Figura 7

Onda de flujo axial con tres bobinas.



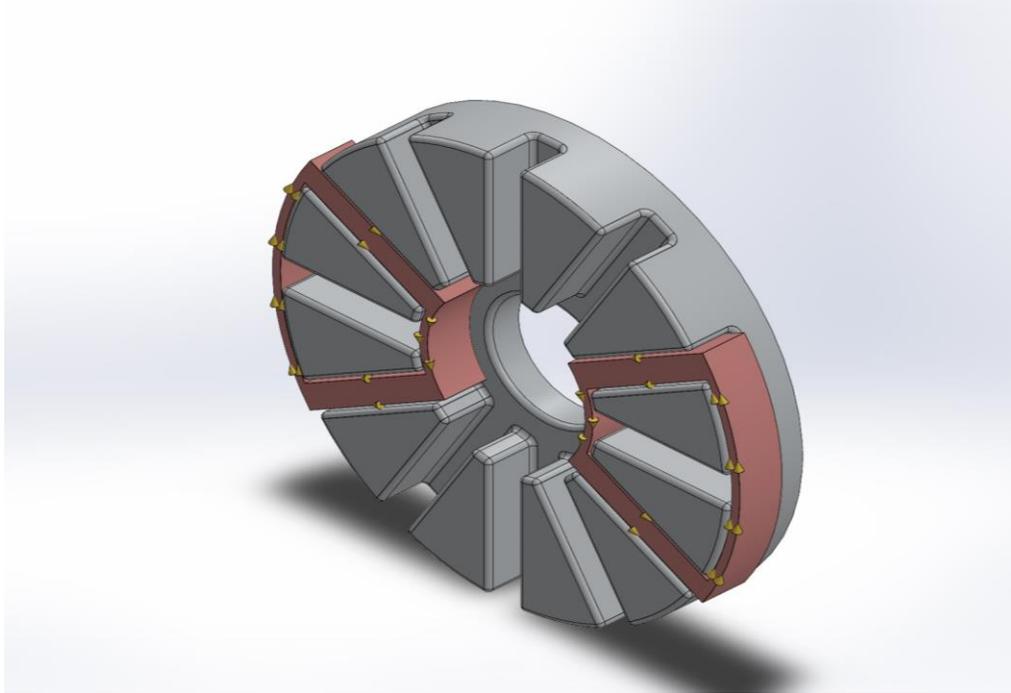
Fuente: Cepeda et al (sf).

3.3. Modelado y diseño de la bobina de 60 grados

Para dicho diseño se tuvieron en cuenta diversos parámetros como el diámetro interno de cada estator, el calibre del conductor, el número de vueltas, y ancho de ranura de tal forma que la trayectoria cerrada del grupo de bobinas quede de la misma forma que el diseñado previamente realizado en SolidWorks (Ver figura 8), en la siguiente imagen se visualiza el modelado de la bobina de 60 grados. Cabe resaltar que para cada estator se construyeron 6 bobinas las cuales se encuentran enfrentadas y desfasadas 120 grados.

Figura 8

Devanado de la bobina con un ancho 60°



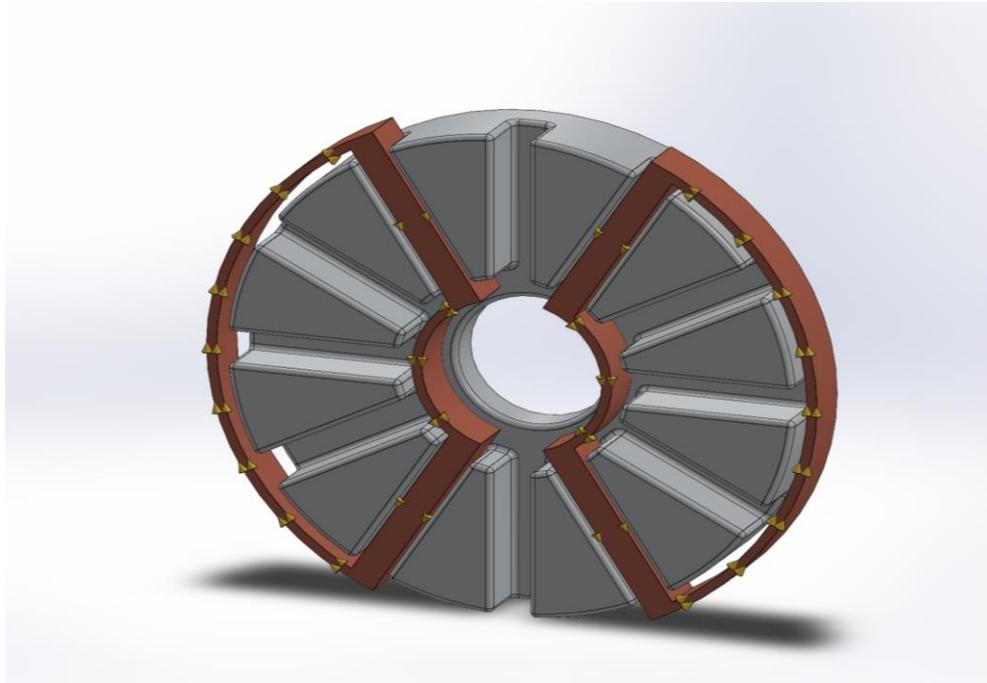
Fuente: Elaboración propia (2024).

3.3.1 Modelado y diseño de la bobina de 120 grados

Para el diseño de esta bobina se tuvieron en cuenta los cálculos realizados para el devanado de 60 grados en cuanto al número de vueltas y calibre del conductor, aumentando proporcionalmente la distancia del mismo ya que este abarca dos dientes más, respecto al desfasamiento y enfrentamiento se sigue el mismo procedimiento. (Ver figura 9)

Figura 9

Devanado de la bobina con ancho de 120°.



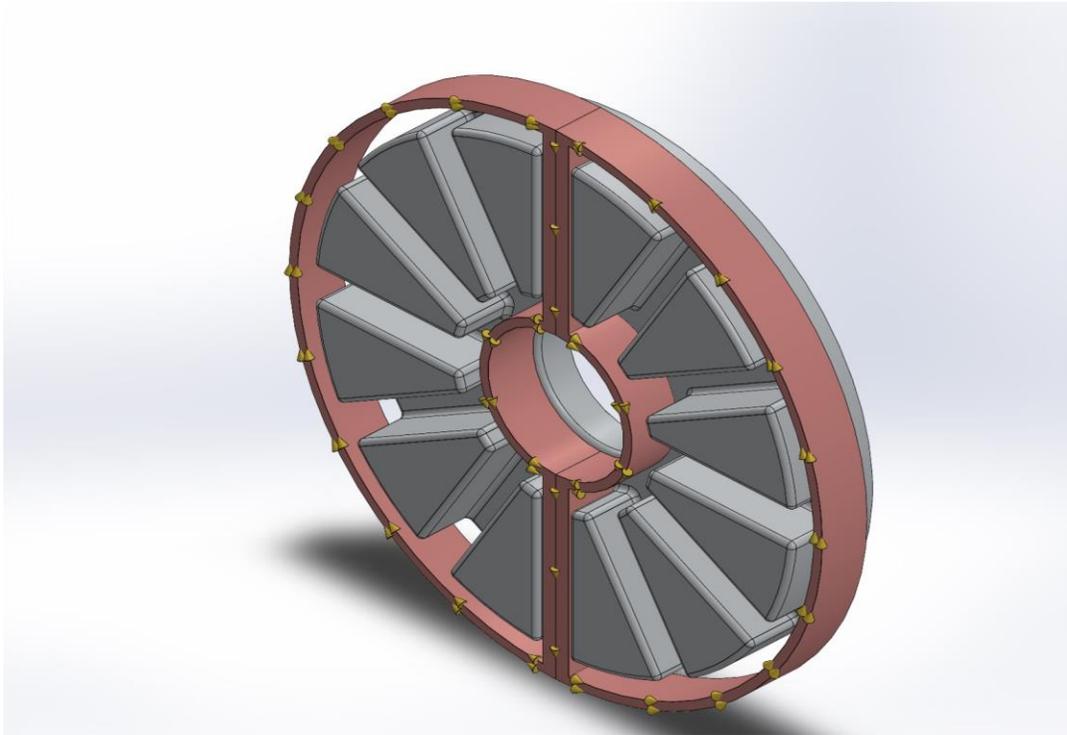
Fuente: Elaboración propia (2024).

3.3.2. Modelado y diseño de la bobina de 180 grados

La bobina de 180 grados abarca 6 dientes que corresponden a la mitad de los dientes del estator y es la tercera bobina en orden de arrollamiento, luego de haber construido y enfrentado las bobinas de 60 y 120 grados respectivamente y justo antes de empezar a desfasar y realizar el mismo proceso. (Ver figura 10)

Figura 10

Devanado de la bobina con ancho de 180°.

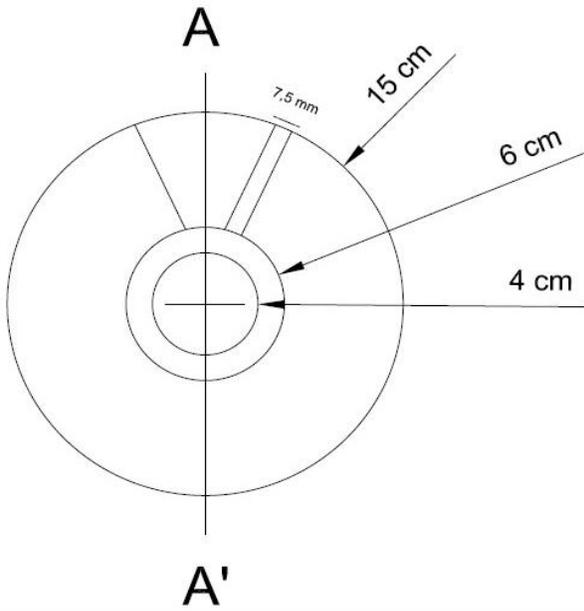


Fuente: Elaboración propia (2024).

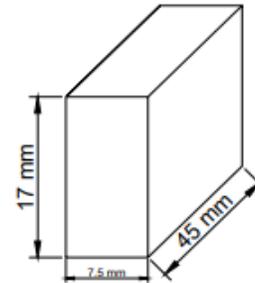
3.4. Cálculos

- Ranuras y dientes

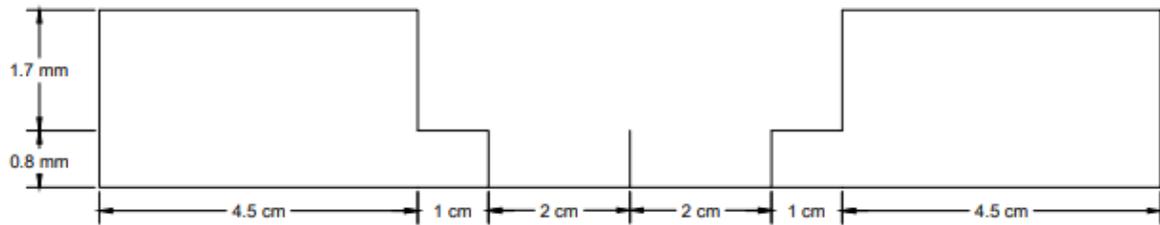
- Circunferencia de 15 cm de diámetro externo.
- Se planteó un hueco interno en su centro de 4 cm de diámetro
- Dar forma a 12 dientes en forma de trapecio y sus 12 ranuras correspondientes, el devanado de las ranuras se hace a 20 mm.
- El ancho de las ranuras es uniforme en toda la placa y es de 7,5 mm



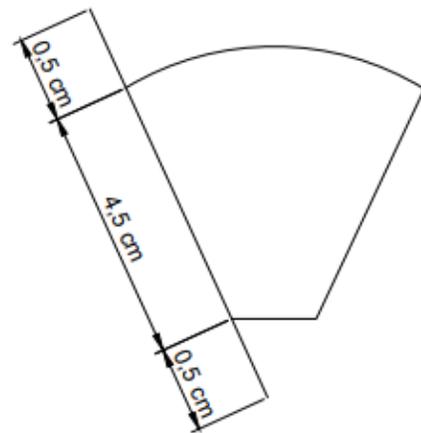
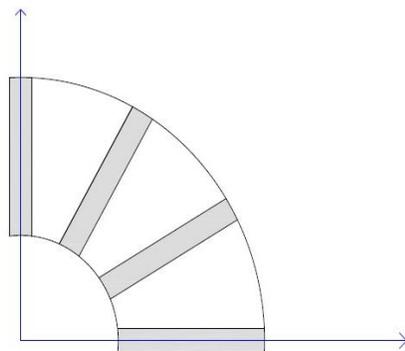
Tamaño de la ranura



CORTE A-A'



Distancia media de cada bobina



- ❖ Se tiene en cuenta la distancia máxima y mínima y luego se divide entre 2 para la longitud media

$$l_{med} = (8,5+7,5)\frac{\pi}{4} + (3,5+3)\frac{\pi}{4} + 2(0,5+4,5+0,5) = 28,67 \text{ cm}$$

$$l_{med} = 28,67 * 2/3 = 19.11 \text{ cm distancia media para la bobina de } 60^\circ$$

$$l_{med} = 28,67 * 4/3 = 38.22 \text{ cm distancia media para la bobina de } 120^\circ$$

$$l_{med} = 28,67 * 2 = 57.34 \text{ cm distancia media para la bobina de } 180^\circ$$

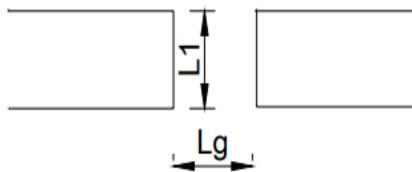
NOTA = La distancia media de cada bobina equivale a la cantidad de cobre en centímetros que usa para una vuelta.

3.4.1. Cálculos Magnéticos

- **Consideraciones**

Se asume un núcleo magnético con un entrehierro, esto se cumple solo si, la longitud menor de una de las caras del entrehierro es al menos 5 veces mayor que la longitud del entrehierro [lg].

Para el caso en cuestión



l = Longitud de unas de las caras

$$l = 15 \text{ cm}$$

l_g = Longitud del entrehierro o distancia entre los estatores

$$l_g = 2 \text{ cm}$$

$$l > 5l_g$$

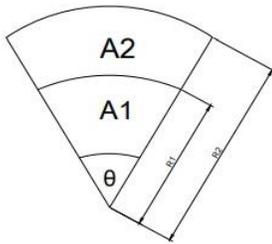
- Las dos caras del entrehierro tienen la misma longitud $l_g = 0.02$ [m]
- Se desea al menos una densidad de flujo $B = 0.02$ [T]
- La corriente máxima se establece en $I = 4.5$ [A]

La fuerza magnetomotriz, $F = H_a I_a + H_g I_g$

l_a es la longitud del núcleo de hierro que abre la bobina, $l_a = 17 \times 10^{-3}$ [m]

- Reluctancia del aire $R_g = \frac{l_g}{\mu_0 A_g}$

A_g es el área del entre hierro, que para el caso es la misma del núcleo



$$A_2 = A - A_1$$

$$A = \theta R_2^2$$

$$A_1 = \frac{\theta R_1^2}{2}$$

Se reemplaza A_1 en A_2

$$A_2 = \frac{\theta R_2^2}{2} - \frac{\theta R_1^2}{2}$$

$$A_2 = \frac{\theta}{2} (R_2^2 - R_1^2)$$

Para este caso

$$R_2 = 7,5 \text{ cm}$$

$$R_1 = 3 \text{ cm} \quad \theta = \frac{\pi}{6} \text{ [rad]}$$

$$A=1,237*10^{-3} [m^2]$$

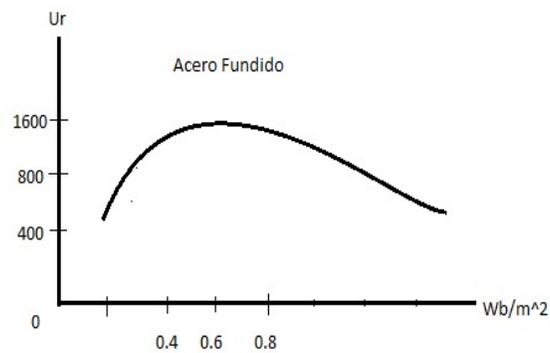
Calculando la reluctancia del entrehierro

$$R_g = \frac{0,02}{(4\pi*10^{-7})(1.237*10^{-3})}$$

$$R_g = 12,87*10^6$$

Figura 11

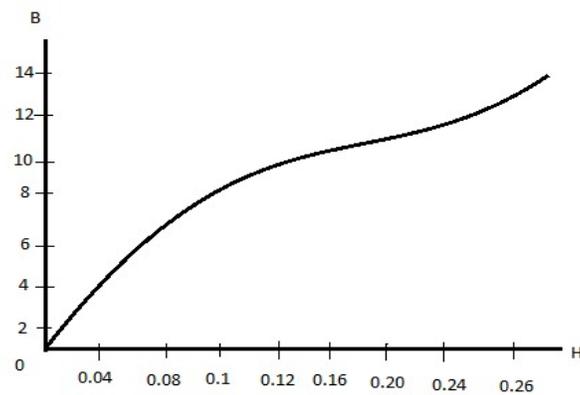
Gráfica permeabilidad relativa vs densidad de flujo magnético del acero fundido.



Fuente: Elaboración propia (2024).

Figura 12

Gráfica de magnetización del acero fundido.



Fuente: Elaboración propia (2024).

Cálculo de la reluctancia del Acero fundido; se toma la curva 2

$$Ra = \frac{I_a}{U_a * Ur * A_a}$$

- Se toma para este material

$$B = 0.6 \text{ [T]}$$

$$H = 0,02 \text{ [Av/m]}$$

$$Ur = 1600$$

$$Ra = \frac{0,017}{(4\pi * 10^{-7})(1600)(1,237 * 10^{-3})}$$

$$Ra = 6,84 * 10^3$$

$$R = Ra + Rg$$

$$\mathbf{R = 12,88 * 10^6}$$

- Ahora Se Tiene que $F = N * I = \phi * R$

Despejando el número de vueltas requerido

$$N = \frac{\phi * R}{I} ;$$

$$\phi = B * A$$

$$N = \frac{B * A * R}{I}$$

$$F = N * I = B * A * R$$

$$NI = (0,02) (1,237 * 10^{-3}) (12,88 * 10^6) \text{ Av}$$

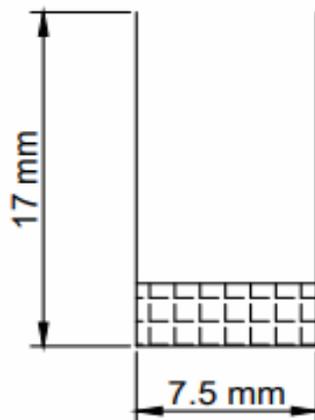
$$\mathbf{NI = 318,65 \text{ [Av]}}$$

3.4.2. Cálculos del conductor y las vueltas de ranura

- Se retoman las medidas de las ranuras, se busca hallar N1.
- Viendo la tabla de conductores barnizados o alambres.

Opción A**Tabla 1***especificaciones técnicas calibre 20 AWG*

Calibre	θ Doble capa	Resistencia [dc]	Capacidad de corriente
20 AWG	0.892 [mm]	33.21 [Ω /km]	5.1 [A]

Vista del apilamiento de los conductores en la ranura del estator

- ❖ Se debe aplicar un factor de bobinado de 0,75.
- ❖ la distancia de ranura se divide entre el diámetro máximo del conductor

$$\frac{7.5}{0.892} = 8.4 \approx 8 \text{ cantidad de conductores por capa}$$

- ❖ Caben aproximadamente 8 conductores por capa y permite 17 capas

$$N_1 = 8 * 17 * 0,75 \approx 102 \text{ vueltas}$$

Nota: el número de vueltas calculado equivale a la cantidad de espacio que ocupa el conductor en toda la ranura, pero se debe tener en cuenta, que en una misma ranura se comparten dos embobinados diferentes por tal motivo este número de vueltas se divide en dos.

$$\frac{N}{2} = 51 \text{ vueltas para cada embobinado en una ranura.}$$

$$N_1 I_1 = 102 * 5.1 = 520 \text{ Av. Para corriente máxima}$$

$$\frac{F}{N} = I$$

$$\frac{318,65}{102} = 3,12 \text{ [A] corriente necesaria para establecer la fuerza magnetomotriz en el circuito}$$

Opción B

Tabla 2

Especificaciones técnicas calibre 22 AWG

Calibre	θ Doble capa	Resistencia [dc]	Capacidad de corriente
22 AWG	0.714 [mm]	53.09 [Ω /km]	3,2 [A]

- ❖ Para este caso el diámetro máximo del conductor no se aproxima a 1mm, por lo tanto, se divide la altura de la ranura sobre la distancia doble capa del conductor para determinar la cantidad de capas.

$$\frac{17}{0.714} = 23,8 \text{ capas}$$

$$N_2 = 10 * 23 * 075 \quad N_2 \approx 172 \text{ vueltas}$$

$$N_2 I_2 = 172 * 3,2 = 550 \text{ Av. Para corriente máxima}$$

$$\frac{F}{N} = I$$

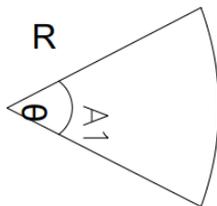
$$\frac{318,65}{172} = 1,85 \text{ [A] corriente necesaria para establecer la fuerza magnetomotriz}$$

en el circuito

- ❖ Se recomienda la opción B calibre 20 AWG, porque permite mayor número de vueltas para generar una cantidad mayor de flujo magnético, exige una menor corriente, lo que conlleva a un menor calentamiento del motor.

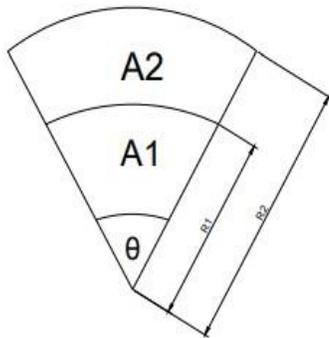
3.4.3. Cálculo del número de vueltas asumiendo $B = 0,1 \text{ T}$

Área de un segmento de arco



$$A = \frac{\theta R^2}{2} \quad * \theta \text{ en radianes}$$

Área para un segmento de arco truncado



$$A_2 = A - A_1$$

$$A = \theta R_2^2$$

$$A_1 = \frac{\theta R_1^2}{2}$$

Se reemplaza A_1 en A_2

$$A_2 = \frac{\theta R_2^2}{2} - \frac{\theta R_1^2}{2}$$

$$A_2 = \frac{\theta}{2} (R_2^2 - R_1^2)$$

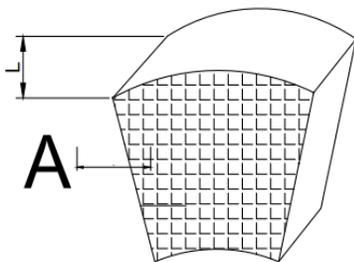
Para este caso

$$R_2 = 7,5 \text{ cm}$$

$$R_1 = 3 \text{ cm} \quad \theta = \frac{\pi}{3} [\text{rad}]$$

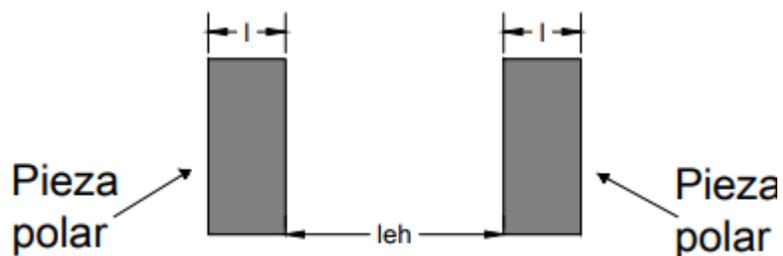
$$A = 2.474 * 10^{-3} [\text{m}^2]$$

Reluctancia



- ❖ El entrehierro entre las dos piezas polares es grande, se asume de 10 cm, se denota como *leh*.

Vista de costado



- $l_{eh} = 10 \text{ cm}$

$$R = \frac{l * l_{eh}}{u_0 A} [\text{Av/Wb}]$$

$$R = 643.310 * 10^3 [\text{Av/Wb}]$$

- Se definen los siguientes parámetros:

R Es la resistencia que ofrece el núcleo o circuito ante el paso de un flujo magnético.

N Número de vueltas de la bobina.

L Se define como la capacidad de una bobina para almacenar energía en forma de campo magnético causado por el flujo de corriente.

Φ Es la medida de campo magnético.

B Se define como la intensidad de campo magnético que atraviesa al núcleo de motor de forma perpendicular a la dirección del flujo magnético.

I Se define como el flujo de carga eléctrica que recorre el embobinado.

$$R = \frac{N}{L}$$

$$L = \frac{\phi}{I}$$

$$\Phi = BA$$

Así que:

$$R = \frac{NI}{BA} [\text{Av/Wb}]$$

Como siguiente paso se despeja el número de vueltas

$$N = \frac{B * A * R}{I} [\text{v}]$$

Observación: Previamente se debe haber definido la densidad de flujo magnético

necesario (B), así como la corriente eficaz máxima que puede permitir el calibre de los devanados del estator para trabajar durante un tiempo determinado con un calentamiento inferior a la temperatura del esmalte del alambre.

Para este caso se establecieron los siguientes parámetros:

$$B = 0.1 \text{ [T]}$$

$$I = 3.2 \text{ [A]} \quad \text{Capacidad amperimétrica del calibre AWG 22}$$

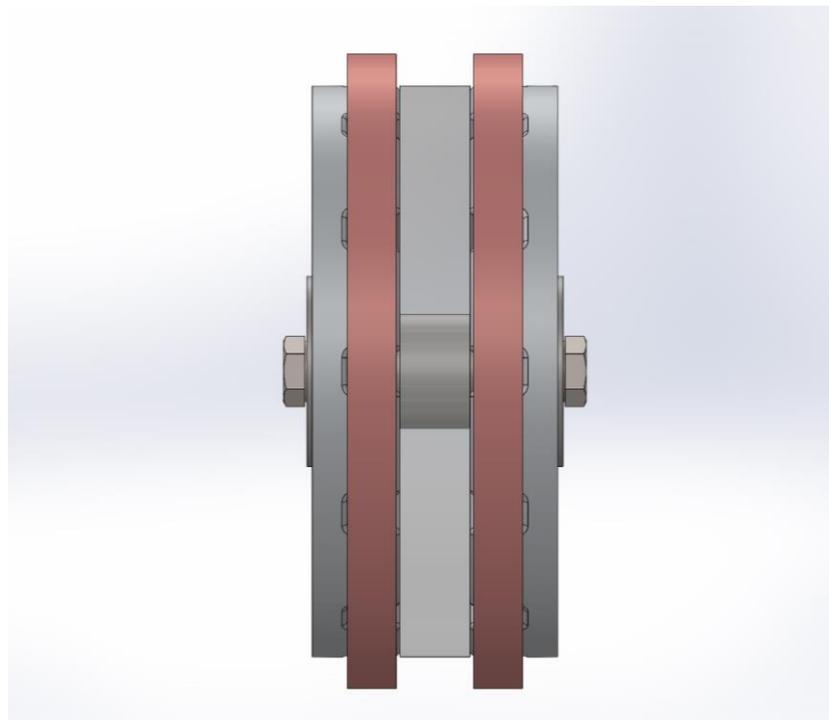
$$N = \frac{(0.1)(2.474 \times 10^{-3})(643.310 \times 10^3)}{(3.2)}$$

$$N = 49.01 \text{ vueltas}$$

- Se aproxima a 50 vueltas. Esta cantidad de vueltas se multiplica por 2, debido a que una misma ranura se comparten dos embobinado diferentes.

Figura 13

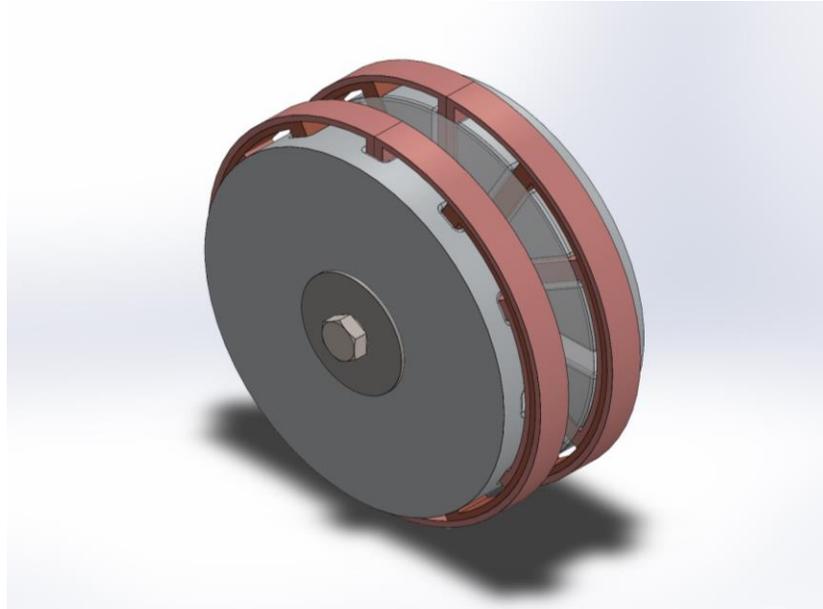
Modelo horizontal del motor de flujo axial acoplado.



Fuente: Elaboración propia (2024).

Figura 14

Modelo completo de los dos estatores acoplados.



Fuente: Elaboración propia (2024).

3.5. Elaboración de las bobinas de campo

En la construcción de los bobinados, se utilizó la configuración de tipo distribuida con devanado concéntrico (Ver figura 7), para dicho proceso se empleó material aislante en las ranuras de cada estator, con la finalidad de que el material conductor (alambre) no tenga contacto directo con el hierro, evitando una puesta a tierra del sistema.

Se utilizaron moldes hechos en madera de acuerdo con el tamaño de cada bobina, luego se acopló cada molde embobinado directo a los estatores que están debidamente aislados, se procede a ubicar las bobinas en orden de menor a mayor ángulo, para este caso 60° , 120° y 180° respectivamente evitando el contacto entre cada devanado, para prevenir un corte en el flujo magnético que circula en el núcleo.

Cabe recalcar que cada bobina está formado por la unión de tres devanados de 60° , 120°

y 180° , además está enfrentada con su contraparte de similares características (ver figura 9) y conectadas en serie, con el objetivo de que en una cara polar el flujo magnético entre y en la otra salga, como se trata de un devanado trifásico, este juego de bobinas se debe repetir para cada una de las tres fases, teniendo en cuenta que por cada fase se realizaron 6 devanados, al sumarse da un total de 18 devanados por cada estator.

Debido a la gran cantidad de cobre utilizado para cada cara polar se utilizaron amarres de fibra sintética con características aislantes para fijar de manera segura las espiras en el exterior del estator, garantizando una fijación estática y segura al momento de sus respectivas pruebas. Por otra parte, se realizó la marcación de cada principio y final de bobina, para asegurar que el flujo entre y salga en la misma dirección, esto a su vez tendrá como objetivo evitar errores de polaridad cuando se realice la conexión y empalme de los cables.

Figura 15

Medio núcleo de estator embobinado.



Fuente: Elaboración propia (2024).

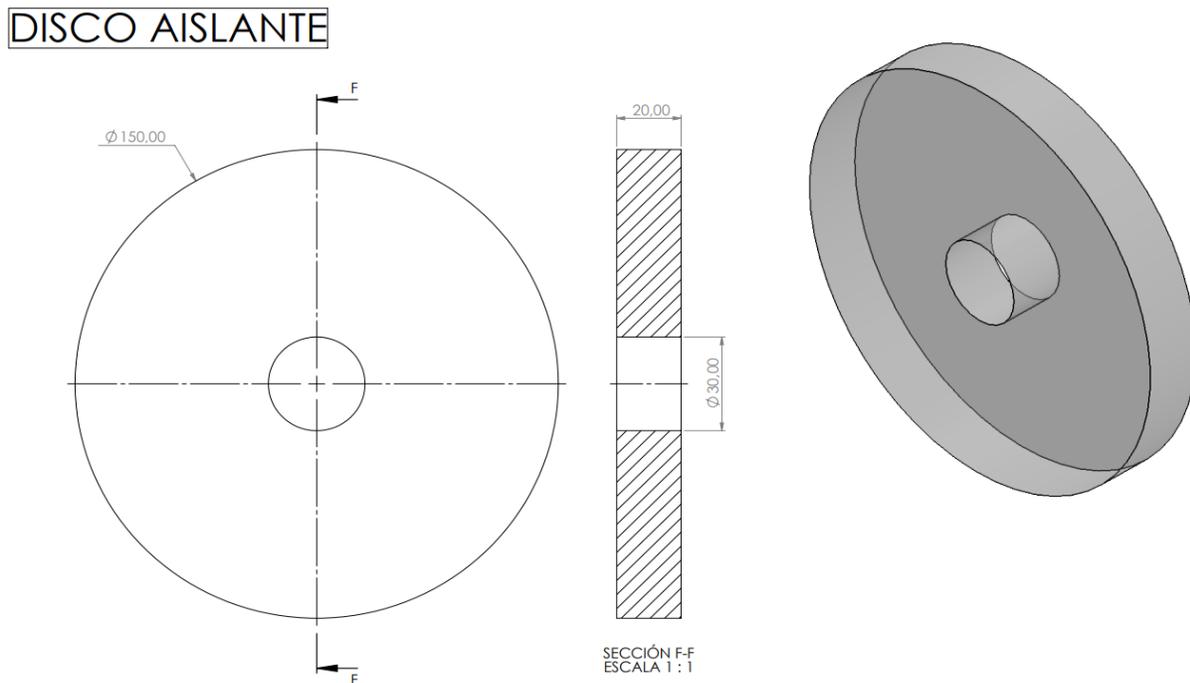
3.6. Rotor

3.6.1 Diseño y elaboración del bucle de material acrílico

El diseño del rotor al igual que las dos coronas del estator es de forma circular con el mismo diámetro externo, este se elaboró mediante el software SolidWorks (Ver figura 16). El elemento situado entre los dos estatores del motor es la parte que genera el movimiento comúnmente llamado rotor, principalmente consiste en un electroimán que puede girar libremente en torno a un eje, para el caso de este trabajo de grado, se utilizó como rotor una dona de material acrílico transparente (Ver figura 17), que sirve de recipiente para almacenar el fluido magnetorreológico, el cual a su vez hará la función de girar ante la influencia de un campo magnético en el interior del rotor, esta dona acrílica tiene un diámetro exterior de 15 cm y un diámetro interior de 3 cm para poder encajar con el eje perfectamente.

Figura 16

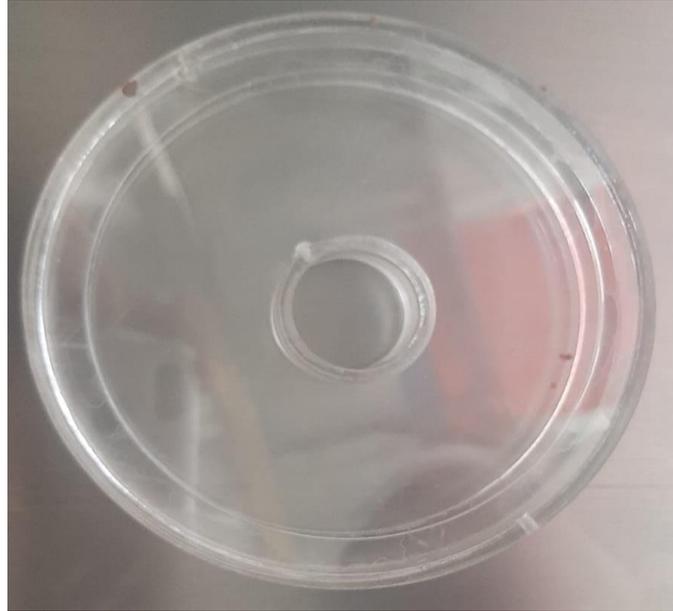
Plano de la dona en SolidWorks



Fuente: Elaboración propia (2024).

Figura 17

Dona en acrílico.



Fuente: Elaboración propia (2024).

Figura 18

Tapones de caucho para la dona en acrílico.



Fuente: Homecenter (2023).

3.7. Preparación del fluido magnetorreológico

Como se enunció anteriormente los fluidos magnetorreológicos se pueden considerar materiales inteligentes, son fluidos cuyas propiedades reológicas se ven alteradas por la presencia de un campo magnético.

3.7.1. Selección del fluido portador y las partículas ferromagnéticas

Para la obtención del fluido magnetorreológico es necesario la unión de dos sustancias, el fluido portador, que para este caso se usó aceite combustible para motores (ACPM), ya que es un hidrocarburo con baja viscosidad el cual no representa problema ante los aumentos de temperatura, y su color a diferencia de la gasolina permite apreciar mejor el fenómeno electromagnético.

Como partículas magnéticas, se usó limadura o ripio de hierro, el cual se obtuvo como desechos a la hora de realizar los cortes de las placas de hierro en torno.

Figura 19

Limadura de hierro.



Fuente: Elaboración propia (2024).

Figura 20

Muestra de ACPM.



Fuente: Elaboración propia (2024).

3.8. Preparación de las muestras

Se prepararon diferentes muestras de fluido para ser sometidas a diferentes pruebas experimentales de laboratorio, cada muestra tiene diferente cantidad de limadura de hierro y ACPM, todas las muestras serán sometidas a diferentes tensiones con el fin de observar que determinada cantidad, arroja mejores resultados.

Se prepararon las siguientes muestras:

3.8.1. Muestra 1:

30 ml de ACPM

4 gr de limadura de hierro

3.8.2. Muestra 2:

60 ml de ACPM

7 gr de limadura de hierro

3.8.3 Muestra 3:

100 ml de ACPM

13 gr de limadura de hierro

3.8.4. Muestra 4:

112 ml de ACPM

18 gr de limadura de hierro

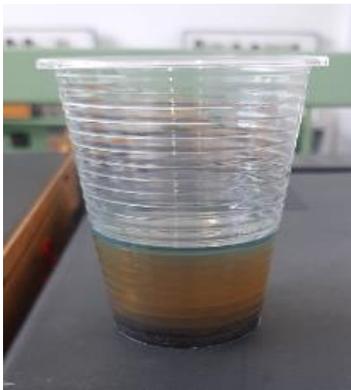
3.8.5. Muestra 5:

130 ml de ACPM

27 gr de limadura de hierro

Figura 21

Muestra 1, 2 y 3 de fluido magnetorreológico.



Fuente: Elaboración propia (2024).

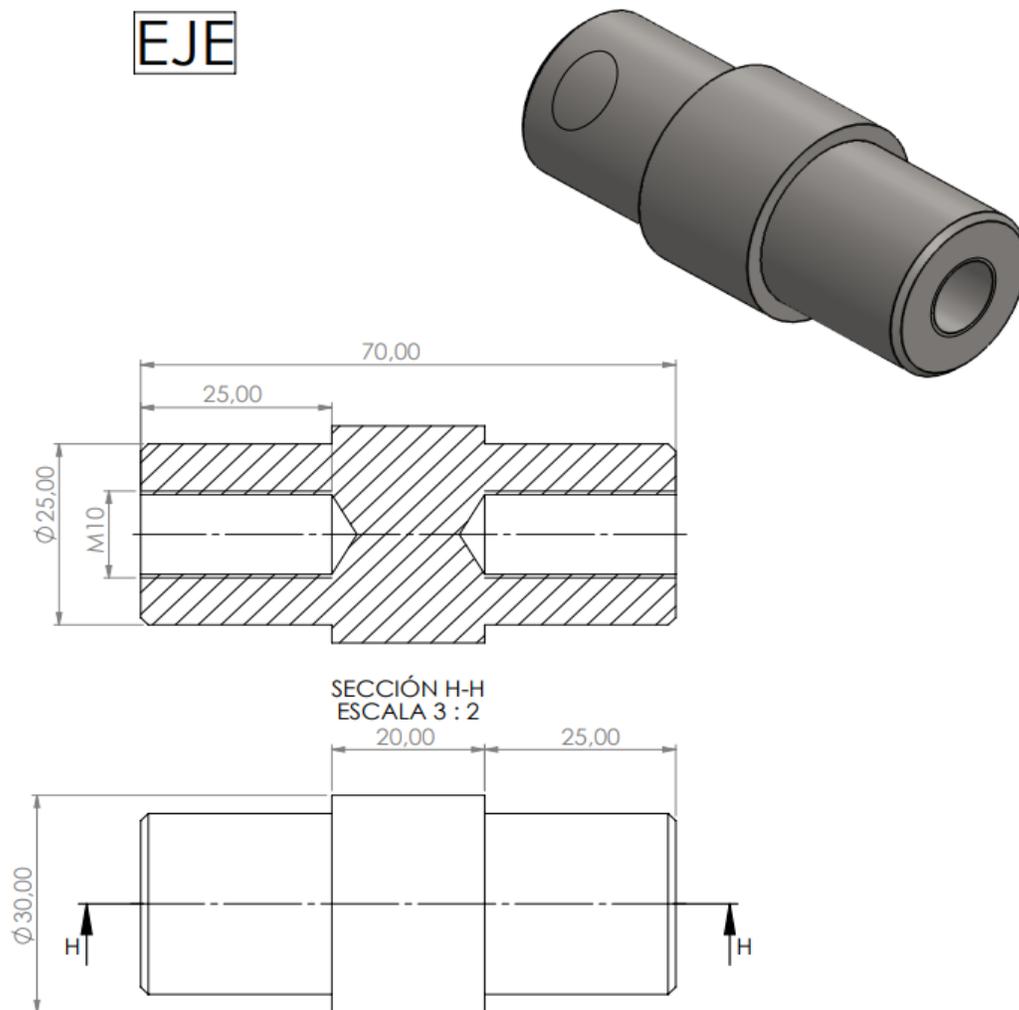
3.9. Diseño del eje del motor trifásico de flujo axial

El diseño del eje se realizó por medio del software de dibujo SolidWorks (Ver figura 21), consta de un eje cilíndrico con diámetro externo de 2,5 cm y un hueco interior de 1 cm de diámetro lugar en el cual se enroscan los tornillos que sujetan el motor.

Esta pieza tiene la función de dar estabilidad a los estatores y la dona acrílica que componen el motor. (Ver figura 22)

Figura 22

Isométrica del eje en SolidWorks y vista lateral unidades en cm.



Fuente: Elaboración propia (2024).

Figura 23

Eje cilíndrico en hierro.



Fuente: Elaboración propia (2024).

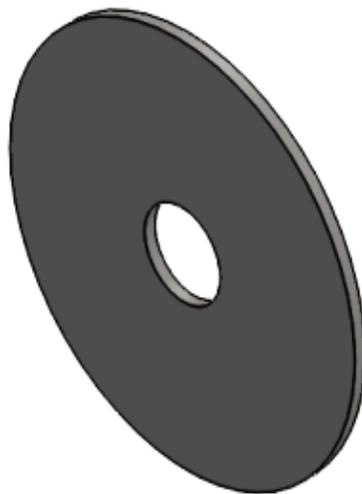
3.10. Diseño de las arandelas del motor trifásico de flujo axial

Como última pieza del motor se realizó el diseño de las arandelas y tornillos en SolidWorks para sujetar externamente los estatores, junto con el rotor.

Figura 24

Isométrica de la arandela en SolidWorks.

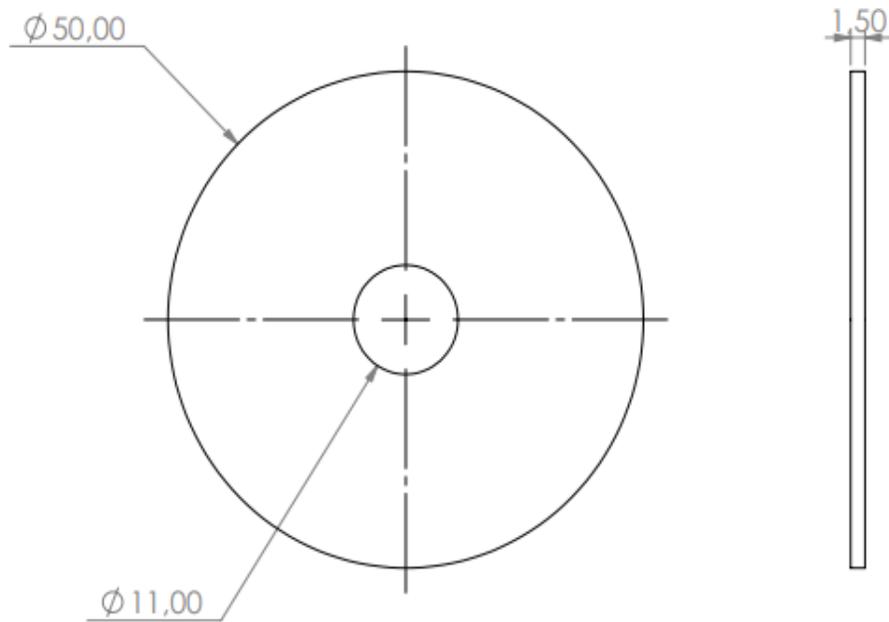
ARANDELA



Fuente: Elaboración propia (2024).

Figura 25

Vista frontal y lateral de la arandela, unidades en cm.



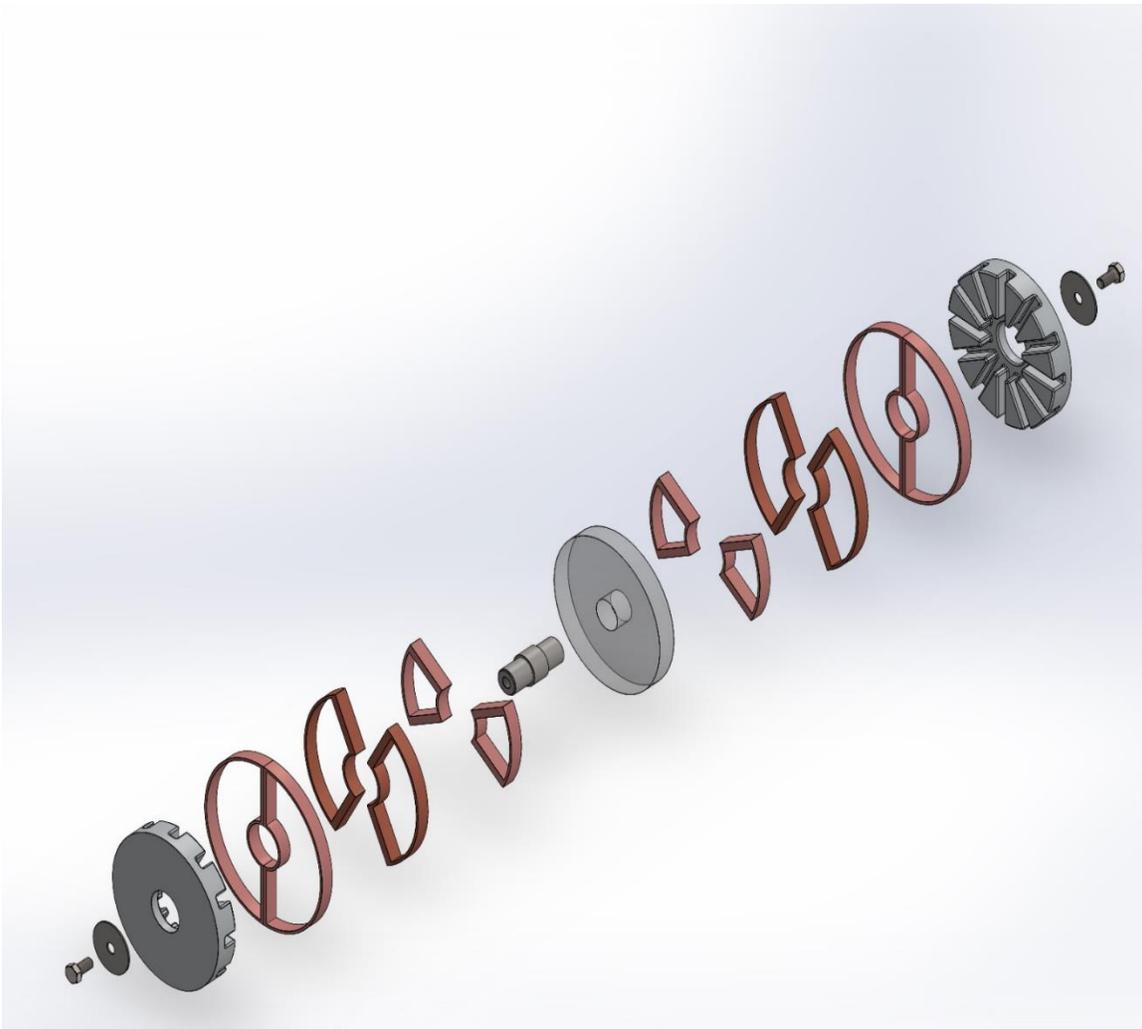
Fuente: Elaboración propia (2024).

3.11. Ensamble final

Como parte final se realiza el ensamble del motor de tal manera que cada una de las partes queden perfectamente ajustadas para garantizar un óptimo funcionamiento del motor, y a su vez se realiza el empalme de los cables para la conexión a la hora de realizar las pruebas eléctricas. (Ver figura 26)

Figura 26

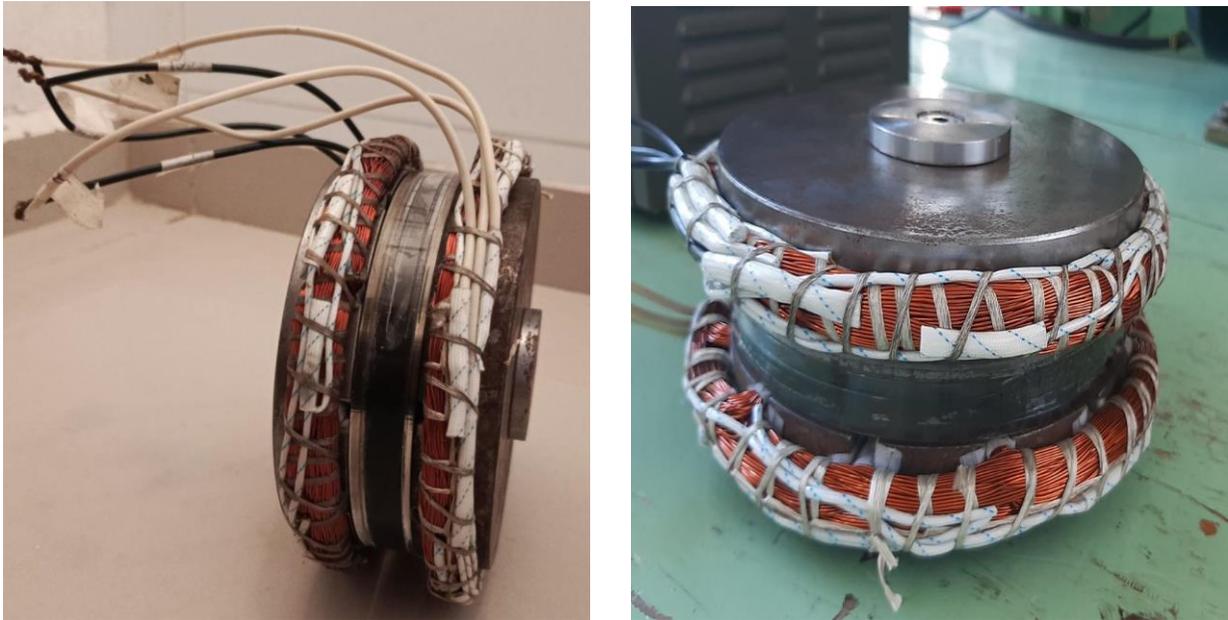
Imagen explosionada del motor de flujo axial empleando SolidWorks.



Fuente: Elaboración propia (2024).

Figura 27

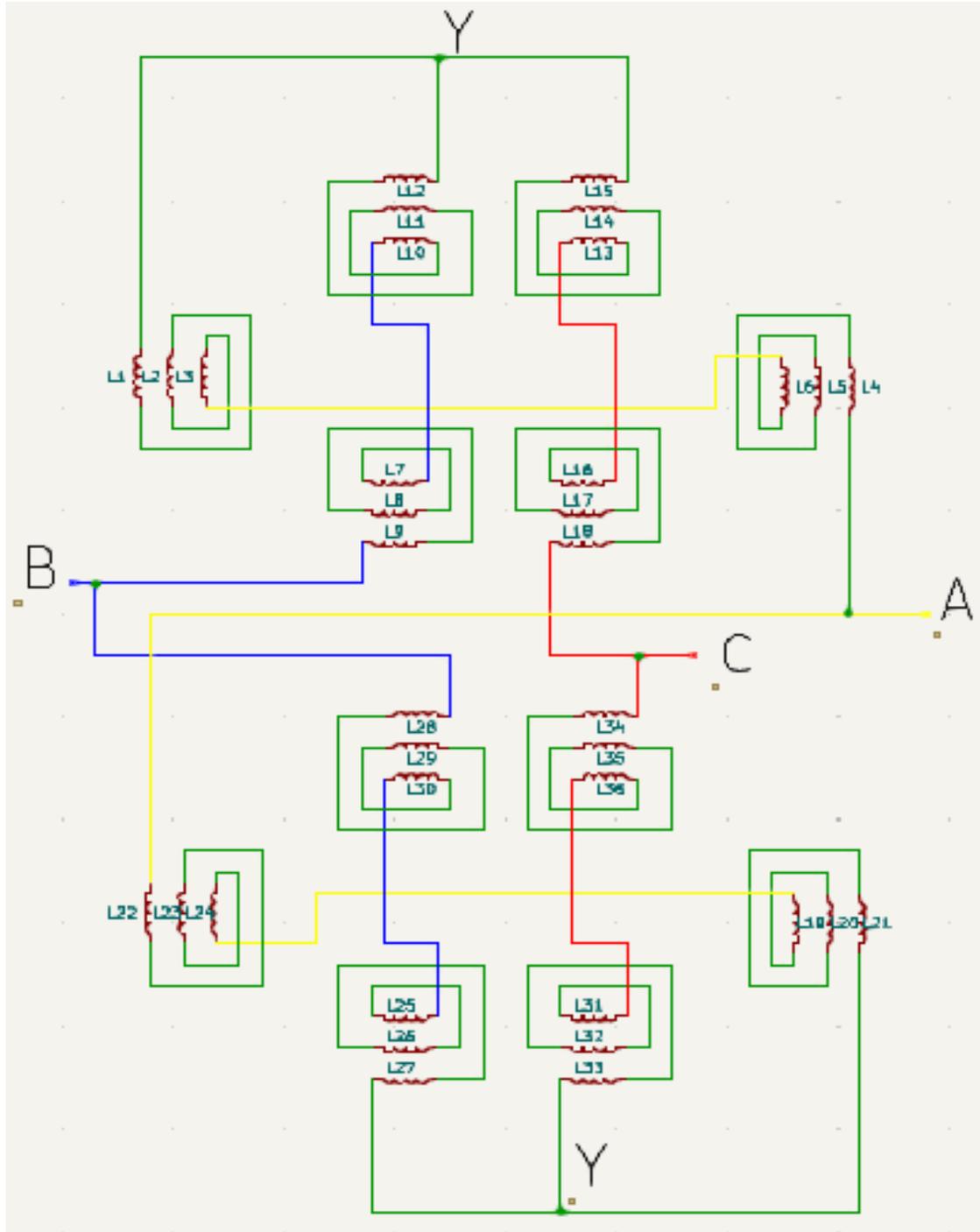
Motor trifásico de flujo axial construido.



Fuente: Elaboración propia (2024).

3.12. Pruebas al motor de flujo axial**3.12.1. Conexión y alimentación del motor**

Las pruebas se realizaron en el laboratorio de máquinas eléctricas de la universidad industrial de Santander, en donde se dispuso de un autotransformador para alimentar de forma variable el motor. Todas las bobinas de cada estator se conectan en serie, reduciéndose a tres terminales los cuales se puentean para obtener las tres fases del motor trifásico, al energizar se generó el campo magnético de forma rotativa, los dispositivos de medida (multímetro y amperímetro), tomaron los datos respectivos, se suministró tensión por cortos lapsos de tiempo evitando el sobrecalentamiento del núcleo teniendo en cuenta la capacidad máxima de corriente del conductor.

Figura 28*Esquema de conexión de los devanados del motor.*

Fuente: Elaboración propia (2024).

3.12.2. Medidas de seguridad para las pruebas eléctricas

Como en toda prueba que involucre electricidad es de suma importancia garantizar la integridad física de los integrantes. Se tuvieron en cuenta diferentes consideraciones:

1. Se verificó el buen de cada equipo usado en el laboratorio.
2. Antes de conectar los equipos de medida se realizó una prueba de continuidad para garantizar su buen estado. Se inspeccionó que los cables de conexión contaran con su respectivo aislamiento, a su vez se le practicó prueba de continuidad.
3. Se llevaron a cabo pruebas preliminares en el recipiente que contenía el ACPM. Se verificó que la dona estuviera en buen estado, sin desgastes en el material, se revisó con agua que no se presentara filtraciones. Una vez vertido el ACPM en la dona, se selló adecuadamente. Finalmente, se energizó brevemente, considerando la velocidad de evaporación del fluido.
4. Se mantuvo una distancia moderada cuando se energizó el motor.
5. Se contó con el acompañamiento del laboratorista durante el tiempo de las pruebas.

Figura 29

Motor de flujo axial conectado al variador de tensión.



Fuente: Elaboración propia (2024).

Los elementos utilizados para realizar las pruebas eléctricas están registrados en la siguiente tabla:

Tabla 3

Elementos usados en las pruebas eléctricas

Equipo	Medida	Rango	Resolución
Autotransformador	Voltios	300 V	0
Pinza amperimétrica	Corriente AC	60 A	0,01 V
Multímetro	Tensión [V]	1000 V	0.001 V
Cables de conexión	Resistencia	20	0

Tabla 4

Pruebas eléctricas con 10 V

Muestras	Tensión [V]	Corriente [A]	Corriente [A]	Corriente [A]	Corriente [A]
		fase A	fase B	fase C	promedio
Muestra 1	10	0.89	1.12	1.05	1.02
Muestra 2	10	0.95	1.2	1.26	1.14
Muestra 3	10	1.2	1.15	1.27	1.18
Muestra 4	10	1.5	1.59	1.52	1.54
Muestra 5	10	1.33	1.4	1.39	1.37

Tabla 5*Pruebas eléctricas con 20 V*

Muestras	Tensión [V]	Corriente [A]	Corriente [A]	Corriente [A]	Corriente [A]
		fase A	fase B	fase C	promedio
Muestra 1	20	1.7	1.73	1.78	1.74
Muestra 2	20	1.9	2.01	1.92	1.94
Muestra 3	20	1.89	1.82	1.86	1.86
Muestra 4	20	2.1	2.09	2.11	2.1
Muestra 5	20	2.3	2.39	2.27	2.32

Tabla 6*Pruebas eléctricas con 30 V*

Muestras	Tensión [V]	Corriente [A]	Corriente [A]	Corriente [A]	Corriente [A]
		fase A	fase B	fase C	promedio
Muestra 1	30	3.69	3.62	3.7	3.67
Muestra 2	30	3.75	3.79	3.84	3.79
Muestra 3	30	3.9	3.88	3.81	3.86
Muestra 4	30	3.95	3.99	4.01	3.98
Muestra 5	30	4.1	4.07	4.09	4.09

Tabla 7*Pruebas eléctricas con 40 V*

Muestras	Tensión [V]	Corriente [A]	Corriente [A]	Corriente [A]	Corriente [A]
		fase A	fase B	fase C	promedio
Muestra 1	40	4.6	4.67	4.71	4.66
Muestra 2	40	4.8	4.79	4.76	4.78
Muestra 3	40	4.91	4.95	4.96	4.88
Muestra 4	40	4.87	4.88	4.91	4.89
Muestra 5	40	5.01	5.07	5.15	5.07

Tabla 8*Medidas de flujo magnético con la muestra 3*

Muestras	Tensión [V]	Corriente [A] promedio	Flujo magnético [B]
Muestra 3	10	1.18	0.037
Muestra 3	20	1.86	0.059
Muestra 3	30	3.86	0.12
Muestra 3	40	4.88	0.15

Realizadas las pruebas experimentales de las diferentes muestras que se prepararon, se determinó que la muestra 3 presentó los mejores resultados, ya que al energizar con diferentes tensiones se observó con mejor claridad el movimiento giratorio y constante de las partículas magnéticas en dirección hacia el sentido del flujo magnético, otro aspecto importante a mencionar, fue el menor calentamiento que se produjo en el motor, en comparación con las demás muestras realizadas, también la relación en cantidad de material magnético y fluido portador fue la más equilibrada.

4. Observaciones y conclusiones

El presente trabajo de grado, se abordaron inicialmente diversas incógnitas que se fueron resolviendo a medida que avanzaba el proceso; Se inició con una etapa investigativa, la cual requirió información concreta y concisa acerca de los motores de flujo axial. Posteriormente, se transitó a la fase de diseño, que proporcionó una visión general de cómo se llevaría a cabo el proyecto. Finalmente, culminó en la etapa constructiva, considerada la más importante, ya que en este punto se pudo observar el fenómeno objeto de investigación.

Se presentaron limitaciones económicas, derivadas del alto costo de los materiales, razón por la cual se diseñó un motor acorde al presupuesto establecido.

Se realizó con éxito las pruebas experimentales eléctricas, el motor respondió de la forma esperada, se pudo evidenciar el principio de funcionamiento de los motores de flujo axial, se tuvo acceso al laboratorio de máquinas eléctricas de Universidad Industrial de Santander.

El diseño del motor trifásico se llevó a cabo considerando un flujo magnético de 0.1 Teslas que circularía a través del núcleo. Para lograr esto, se tuvo en cuenta el número de espiras en cada bobina, de manera que, al variar la tensión, fuera posible controlar la corriente y, por consiguiente, el calentamiento del motor, todo esto en función de la capacidad del conductor seleccionado.

Tras llevar a cabo pruebas con las diferentes concentraciones, se determinó que la muestra 3 exhibió el movimiento giratorio esperado previsto de las partículas magnéticas en el interior del rotor. Este comportamiento fue claramente visible gracias al material acrílico y transparente utilizado para construir el bucle, así como el equilibrio entre el fluido portador y la limadura de hierro.

A medida que aumenta la concentración de limadura de hierro en el fluido, la fuerza del campo magnético generado por el motor no logra hacer girar estas partículas. Para obtener una observación más precisa del comportamiento del fluido, se sugiere utilizar concentraciones bajas de partículas magnéticas. Este tiene como objetivo evitar la necesidad de aplicar un campo magnético excesivamente grande.

Referencias Bibliográficas

- Parada, A. G., Cabrera, R. G., Martínez, M. Á. G., Ibarra-Manzano, O. G., & Sosa, J. A. G. (2009). *Optimización de Estatores para Motores Superconductores de Flujo Axial*. *Acta Universitaria*, 19(2), 93-97.
- Basanta, A. (2011). *Ventaja de Los Motores de Flujo Axial*. *Ingeniería energética* 23.1
- Campbell, P. (1974). *Principle of a Permanent Magnet Axial Field DC Machine*. *Proceedings Of The Institution Of Electrical Engineers*, 121(12). <https://doi.org/10.1049/piee.1974.0311>
- Chapman, S. J. (2002). *Máquinas Eléctricas*. Mc Graw-Hill.
- Fraile Mora, J. (2003). *Máquinas Eléctricas*. Mc Graw-Hill.
- Gieras, Jacek F., Rong-Jie. Wang, and Maarten J. Kamper. *Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines*. 2nd ed. 2008. Dordrecht: Springer Netherlands, 2008. Web.
- Guru, B. S., & Hiziroglu, H. R. (2002). *Máquinas Eléctricas y Transformadores*. New York: Oxford University: Alfa Omega Grupo Editor.
- Sadiku M, N. (Ed). (2003). *Elementos de electromagnetismo*. Oxford University.
- Hao, Z., Ma, Y., Wang, P., Luo, G., & Chen, Y. (2022). *A Review of Axial-Flux Permanent-Magnet Motors: Topological Structures, Design, Optimization and Control Techniques*. *Machines*, 10(12), 1178. <https://www.mdpi.com/2075-1702/10/12/1178>
- .

Apéndices

Apéndice A: Evidencia 1 del funcionamiento del motor de flujo axial.

<https://youtube.com/shorts/pURJhP8OXR?feature=share>

Apéndice B: Evidencia 2 del funcionamiento del motor de flujo axial.

https://youtube.com/shorts/Y4VklF_G1DM?feature=share