

**Prototipo de Motor Equivalente al de Fase Partida con Rotor Compuesto de Material
Magnetorreológico.**

Arthur Johan Rangel Bautista

Jonny Alejandro Robles Páez

Trabajo de Grado Para Optar al Título de Ingeniero Electricista

Director

Hermann Raúl Vargas Torres

Doctor Ingeniero Electricista

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Bucaramanga

2019

Dedicatoria

Dedico este trabajo de grado a mi familia quienes con su ayuda hicieron superar todos los obstáculos encontrados en el camino. Mis padres Arturo Rangel y Gloria Bautista, mi hermano Jesús Rangel, esto es para ustedes quienes con amor, paciencia, dedicación y esmero me acompañaron en todo momento, siendo mi gran inspiración para siempre seguir adelante sin importar la circunstancias, gracias por enseñarme lo bonito que es la vida, los amo. A Danna Ferreira por su amor infinito y, por último, a Dios, sin Él nada sería posible.

Arthur Johan Rangel Bautista

Dedico este trabajo de grado en primer lugar a Dios, que me ha dado la vida y la oportunidad de seguir viviendo, por las mil bendiciones que me da todos los días y por haber puesto mi vida en cada una de las personas que hicieron parte de este gran logro, a mis padres Adalberto Robles Amaya y Amanda Páez Rodríguez que siempre me han llenado de amor, apoyo y oportunidades, por ser lo más cercano al paraíso, mi razón de ser y las personas favoritas en mi vida y por sus sonrisas mágicas

Jonny Alejandro Robles Páez

Agradecimientos

A Dios principalmente, por haberme permitido culminar esta etapa importante en mi vida.

A mis padres, Gloria Bautista y Arturo Rangel, quienes con su esfuerzo, apoyo, dedicación y amor me han permitido tener un logro más en mi vida; a mi hermano Jesús Rangel, por estar conmigo, sacándome una bella sonrisa, los amo mucho.

A Danna Ferreira, por su apoyo y amor incondicional, gracias por ayudarme en todo este proceso.

A nuestro director Dr. Hermann Raúl Vargas Torres, por su apoyo.

A mi abuela Olga y a mis tías, por su amor, sus oraciones y estar siempre pendientes de mí.

A mi compañero Jonny, por su paciencia y espera a pesar de las dificultades.

Al señor Ludwing Gómez, por su colaboración.

Finalmente, a todos mis amigos y compañeros que me acompañaron en la obtención de este gran logro, Didier y los más hermosos.

Arthur Johan Rangel Bautista

Agradecimientos

En primer lugar a Dios, que me ha dado la vida y la oportunidad de seguir viviendo, por las mil bendiciones que me da todos los días y por haber puesto mi vida en cada una de las personas que hicieron parte de este gran logro.

A mis padres Adalberto Robles Amaya y Amanda Páez Rodríguez que siempre me han llenado de amor, apoyo y oportunidades, por ser lo más cercano al paraíso, mi razón de ser y las personas favoritas en mi vida y por sus sonrisas mágicas.

A mi abuelo Teodoro Robles por sus consejos, amor y por enseñarme el concepto más bonito de la vida.

A mí segunda madre Sandra Rocío Páez por su amor, paciencia, dedicación y su eterna compañía.

A mis hermanos, Cristian Bettony Robles Paez, Rodrigo José Robles Paez y Johan Sebastián Robles Paez quienes me brindaron su apoyo incondicional, su amor, su tiempo y sobretodo por su compañía infinita.

A mi compañero Arthur Rangel por su paciencia, dedicación y esfuerzo puesto en cada letra de este trabajo de grado.

A mis amigos por su compañía, paciencia, consejos y por demostrarme el verdadero significado de la amistad.

Jonny Alejandro Robles Páez

Contenido

	Pág.
Introducción	16
1. Motivación y justificación	16
2. Objetivos	17
2.1 Objetivo general	17
2.2 Objetivos específicos	17
3. Generalidades	18
3.1 Máquinas eléctricas	18
3.1.1 Breve reseña histórica.	18
3.1.2 Principios generales de las máquinas eléctricas	19
3.1.3 Tipos de motores de inducción	21
3.1.4 Arranque de los motores de inducción monofásicos.	22
3.1.5 Devanados trifásicos de la armadura.	23
3.1.6 Tipos de devanados	25
3.1.7 Parámetros de un devanado de corriente alterna.	26
3.1.8 Trazos de los diagramas de bobinado	28
3.2 Fluidos magnetorreológicos	29
3.2.1 Definición.	29
3.2.2 Características de un fluido magnetorreológico.	29

3.2.2.1 Partículas de metal.	30
3.2.2.2 Fluido base.	30
3.2.2.3 Aditivos.	30
3.2.3 Aplicaciones.	31
3.3 Bobina de Helmholtz	33
3.3.1 Fundamento teórico.	33
4. Aspectos constructivos del prototipo	36
4.1 Estator	36
4.2 Base interna, diseño y construcción.	40
4.3 Base externa, construcción.	45
4.4 Construcción de las bobinas de Helmholtz	47
4.4.1 Consideraciones.	48
4.4.2 Proceso constructivo	54
4.5 Preparación del fluido magnetorreológico.	55
4.5.1 Disposición final de las muestras.	56
5. Simulación	57
5.1 Procesos de Simulación para el devanado	58
5.1.1 Definición del sistema.	58
5.1.2 Formulación del modelo.	59
5.1.3 Implementación del modelo en la computadora.	60
5.1.4 Validación.	61
5.1.5 Interpretación.	63
5.2 Procesos de Simulación para las bobinas de Helmholtz.	64

5.2.1 Definición del sistema.....	64
5.2.2 Formulación del modelo.	65
5.2.3 Implementación del modelo en la computadora.	66
5.2.4 Validación.	67
5.2.5 Interpretación.	69
5.3 Ventajas de la simulación	70
6. Análisis de resultados	71
6.1 Prueba del 1% (0.05 ml) del material magnético.....	74
6.2 Prueba del 12% (0.6 ml) del material magnético.....	77
6.3 Prueba del 20% (1 ml) del material magnético.....	79
6.4 Prueba de rotor bloqueado y vacío.....	81
7. Conclusiones	82
8. Observaciones.....	83
Referencias Bibliográficas	84

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Cálculo de campo en un punto	34
Figura 2. Interpretación densidad de campo magnético	35
Figura 3. Ilustración de las bobinas de Helmholtz.....	36
Figura 4. Despiece de alternador 1	37
Figura 5. despiece de alternador 2	38
Figura 6. Corona original.....	38
Figura 7. Distribución del bobinado	39
Figura 8. Estator bobinado.....	40
Figura 9. Diseño de base interna.....	41
Figura 10. Vista superior.....	41
Figura 11. Vista frontal de la base interna	42
Figura 12. Diseño de rodamiento.....	43
Figura 13. Recipiente donde está inmerso el fluido magnetorreológico	44
Figura 14. Ensamble de base interna	44
Figura 15. Base interna	45
Figura 16. Base externa en Aluminio	46
Figura 17. Ensamble estructural en Solidworks	46
Figura 18. Ensamble físico	47

Figura 19. Detalle del estator y bobinas[8]	48
Figura 20. Valores instantáneos de las Corrientes de los bobinados	49
Figura 21. Detalle del devanado con sentido de las Corrientes para $t=90$	50
Figura 22. Disposición de las bobinas estatóricas	51
Figura 23. Diagrama vectorial para configuración trifásica	52
Figura 24. Conexión de las bobinas del devanado, para tener el campo en una sola dirección ...	53
Figura 25. Diagrama vectorial, conexión serie	53
Figura 26. Construcción de las bobinas de Helmholtz	54
Figura 27. Bobinas de Helmholtz	55
Figura 28. parámetros de equivalencia, para la construcción del estator.....	58
Figura 29. Ilustración en Solidworks	59
Figura 30. Ilustración del estator	61
Figura 31. Densidad de campo magnético en el estator, producido por su bobinado.....	62
Figura 32. Componente en tiempo real 2.....	63
Figura 33. Densidad de campo magnetico en el estator.....	64
Figura 34. Parámetros para la construcción de las bobinas de Helmholtz.....	65
Figura 35. bobinas de Helmholtz	66
Figura 36. Simulación de las bobinas de Helmholtz.....	67
Figura 37. Simulación de bobinas de Helmholtz, densidad magnética	68
Figura 38. Oscilación del campo magnético	68
Figura 39. Densidad de campo magnético en el estator 2.....	69
Figura 40. Densidad de campo magnético de las bobinas de Helmholtz.....	69
Figura 41. Esquema de conexión.....	71

Figura 42. Montaje para las pruebas	72
Figura 43 Ensamble	73
Figura 44. Concentración de 1%.....	74
Figura 45. Prueba al 1%.....	75
Figura 46. Concentración del 1%, tensión en el estator.....	76
Figura 47. Concentración del 1%, tensión en las bobinas de helmholtz.....	76
Figura 48. Concentración al 12%.....	77
Figura 49. Concentración del 20 %,tensión en el estator.....	78
Figura 50. Concentración al 12%, tensión en las bobinas de Helmholtz.....	78
Figura 51. Concentración al 20%.....	79
Figura 52. Concentración al 20%, tensión en el estator.....	80
Figura 53. Concentración al 20%, tensión en las bobinas de helmholtz.....	80
Figura 54. Rotor bloqueado	81

Resumen

TÍTULO: Prototipo de un motor equivalente al de fase partida con rotor compuesto de material magnetorreológico*.

AUTORES: Arthur Johan Rangel Bautista, Jonny Alejandro Robles Páez**

PALABRAS CLAVE: Prototipo, alternador, estator, fluido magnetorreológico, bobinas de Helmholtz, magnetita.

DESCRIPCION:

En este trabajo de grado se presenta de manera detallada el diseño y construcción de un prototipo de motor equivalente al de fase partida con rotor compuesto de material magnetorreológico, implementando el software SolidWorks para el diseño de cada una de sus piezas, el cual tiene como característica principal el uso de bobinas de Helmholtz como devanado adicional al del estator, con el propósito de analizar el comportamiento angular de las partículas al romper su inercia.

Para lograrlo, se elaboraron muestras de fluido magnetorreológico para tres concentraciones diferentes de material magnético las cuales se obtuvieron de magnetita diluidas en aceite combustible para motor (ACPM) como fluido portador por su baja viscosidad y su tonalidad, con el fin de mejorar las propiedades de control y observar el comportamiento de las partículas al ser sometidas a campos magnéticos externos. Luego, se realizó una simulación en el software CST STUDIO SUITE con el fin de estudiar el comportamiento dinámico de las líneas de campo y encontrar la densidad de campo producida por el devanado del estator para encontrar el número de vueltas necesarias que proporcionen la misma densidad de campo. Finalmente, se realizaron pruebas en el prototipo de motor para las tres concentraciones diferentes de material magnético, logrando así obtener los valores de tensiones y corrientes en el diseño realizado para los cuales se analizó su comportamiento.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones
Director Hermann Raúl Vargas Torres Doctor Ingeniero Electricista

Abstract

TITLE: PROTOTYPE OF AN ENGINE EQUIVALENT TO THE SPLIT PHASE WITH A ROTOR COMPOSED OF MAGNETORHEOLOGICAL MATERIAL *

AUTHORS: Arthur Johan Rangel Bautista; Jonny Alejandro Robles Páez **

KEY WORDS: prototype, alternator, stator, magnetorheological fluid, helmholtz coils, magnetite.

DESCRIPTION:

This project presents in a detailed way the design and construction of a motor prototype equivalent to the split phase with rotor integrated of magnetorheological material, implementing the SolidWorks software for the design of each of its pieces, which has as main characteristic the use of Helmholtz coils as additional winding to the stator, in order to analyze the angular behavior of the particles when breaking their inertia.

To this end, samples were prepared for three different concentrations of the magnetic material, which were obtained from magnetite diluted in diesel fuel, as a carrier fluid due to its low viscosity and its tonality, in order to improve the control properties and observe the behavior of the particles when subjected to external magnetic fields. Then, a simulation was performed in the CST STUDIO SUITE software to study the dynamic behavior of the field lines and find the magnetic field density provided by the stator winding and thus find the number of turns needed to provide the same field density, using a capacitor to increase the torque and in turn establishing a direction of rotation, and finally, tests were carried out on the exemplar of the motor for the same magnet, obtaining values of voltages and currents in the prototype for which its behavior is analyzed.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones
Director Hermann Raúl Vargas Torres Doctor Ingeniero Electricista

Introducción

En este trabajo de grado se propone el diseño y la construcción de un motor equivalente al de fase partida, con rotor compuesto de material magnetorreológico. Para tal fin.

- a) Se empleará el estator de un alternador de automóvil el cual será rebobinado con el fin de que esté constituido solamente por dos polos.
- b) Se construirá un devanado adicional al del estator, el cual proporcionará un campo magnético perpendicular al campo magnético del estator del alternador de automóvil.
- c) Se implementará un rotor compuesto de material magnetorreológico, se le harán las pruebas de vacío y rotor bloqueado para tres concentraciones diferentes.
- d) Lo realizado quedará consignado en una memoria técnica.

1. Motivación y justificación

Este trabajo de grado forma parte de una de las líneas de investigación que se estudia en el Grupo de investigación en Sistemas de Energía Eléctrica GISEL

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Diseñar y construir un prototipo de motor equivalente al de fase partida con rotor compuesto de fluidos magnéticos

2.2 Objetivos específicos

1. Emplear el estator de un alternador de automóvil.
2. Rebobinar el estator del alternador con el fin de que esté constituido solamente por dos polos.
3. Construir un devanado adicional al del estator, el cual proporcionará un campo magnético perpendicular al campo magnético del estator del alternador de automóvil.
4. Implementar un rotor compuesto de material magnetorreológico para tres concentraciones diferentes.
5. Realizar pruebas de vacío y rotor bloqueado para obtener el circuito equivalente del motor propuesto.
6. Elaborar la memoria técnica en donde quede consignado lo realizado en el trabajo de grado.

3. Generalidades

3.1 Máquinas eléctricas

3.1.1 Breve reseña histórica. En 1819 Hans Christian Oersted (1777-1851), físico danés, quién, durante una demostración en clase, al conectar la corriente en un circuito observó que la aguja de una brújula cercana se desviaba. Tras numerosas pruebas y experimentos llegó a la conclusión que el movimiento de cargas, a lo que llamamos corriente eléctrica, genera un fenómeno magnético alrededor del cable, indicando de que eran fenómenos realmente conectados. A partir de 1820, comienza a gestarse el descubrimiento de la relación entre electricidad y magnetismo. El primero en dar seguimiento al hallazgo de Oersted fue André-Marie Ampere (1775-1836), físico y matemático francés, quien desarrolló completamente las bases matemáticas de esta teoría demostrando que un cable enrollado por el que pasa una corriente eléctrica se comporta de igual forma que un imán creando magnetismo.

Poco después del descubrimiento del fenómeno electromagnético por parte de Hans Christian Oersted, Humphry Davy (1778-1829) y William Hyde Wollaston (1766-1828), comenzaron en el instituto real de Londres a replicar el experimento con la intención de utilizar estos nuevos principios para producir un movimiento continuo a partir de electricidad. Michael Faraday (1791-1867), físico y químico británico, asistente de Davy oyó de estos nuevos desarrollos y decide inmediatamente empezar a elaborar su experimento, consiguiendo transferir energía eléctrica en

movimiento circular, este experimento convertía la corriente eléctrica en movimiento mecánico continuo, proporcionando el principio básico de los motores eléctricos.

En 1831 Faraday realiza otro de sus grandes descubrimientos, consiguió producir una corriente eléctrica a partir de una acción magnética, fenómeno conocido como inducción electromagnética. Comprobó que cuando se hacía pasar una corriente eléctrica por una bobina, se generaba otra corriente de muy corta duración en otra bobina cercana. Poco tiempo después Faraday realizó otro experimento el cual producía una corriente continua a partir del magnetismo, describió que no es la presencia de un imán en el conductor lo que consigue generar una corriente eléctrica sino su movimiento, es la variación del magnetismo lo que crea la electricidad, con el que resultó en el prototipo del generador eléctrico.

El descubrimiento de la inducción electromagnética marcó un hito decisivo en el progreso no solo de la ciencia sino de la sociedad, además de estos grandes aportes, Faraday es el responsable de introducir el concepto de campo para describir las interacciones electromagnéticas.

En 1865 James Clerk Maxwell (1831-1879), físico británico, vio en el concepto de campo una herramienta fundamental para llevar más allá la idea de electricidad y magnetismo, apoyado en la simetría de estos fenómenos y con la ayuda de los desarrollos teóricos por las leyes de Ampere, Gauss y Faraday junto con el concepto de campo Maxwell da con un desarrollo unificado, el electromagnetismo.

3.1.2 Principios generales de las máquinas eléctricas. Introducción. Las máquinas eléctricas son el resultado de una aplicación inteligente de los principios del electromagnetismo y en particular de la ley de inducción de Faraday. Durante todo el proceso histórico de su desarrollo desempeñaron un papel rector, que determinaba el movimiento de toda la ingeniería eléctrica,

merced a su aplicación en los campos de la generación, transporte, distribución y utilización de la energía eléctrica. En base a este punto de vista, estrictamente energético, es posible clasificarlas en tres tipos fundamentales:

1. **Generador:** transforma la energía mecánica en eléctrica. La acción se desarrolla por el movimiento de una bobina en un campo magnético, resultando una f.e.m. inducida que al aplicarla a un circuito externo produce una corriente que interacciona con el campo y desarrolla una fuerza mecánica que se opone al movimiento.

2. **Motor:** Transforma la energía mecánica en eléctrica. La acción se desarrolla introduciendo una corriente en la máquina por medio de una fuente externa, que interacciona con el campo produciendo movimiento de la máquina; aparece entonces una f.e.m. inducida que se opone a la corriente y que por ello se denomina fuerza contraelectromotriz.

3. **Transformador:** máquina eléctrica en el cual permite por medio de transferencia de energía reducir o elevar voltaje y corriente a magnitudes esperadas.

Los generadores y motores tienen un acceso mecánico y por ello son máquinas dotadas de movimiento; por el contrario, los transformadores son máquinas eléctricas que tienen únicamente accesos eléctricos y son máquinas estáticas.

Cada máquina en particular cumple el principio de reciprocidad electromagnética, lo cual quiere decir que son reversibles. (Fraile, J. 2003.)

3.1.3 Tipos de motores de inducción

Motor de inducción trifásico.

“Es un motor que emplea un esquema ingenioso de colocación de tres devanados de fase idénticos en el estator, espaciados 120° eléctricos entre sí. Cuando estos devanados se excitan por medio de un suministro trifásico equilibrado, establecen un campo magnético uniforme que gira alrededor de la periferia del rotor a velocidad síncrona. La acción de corte del flujo induce una fuerza electromotriz (fem) y con ello una corriente en los conductores del rotor. La interacción de la corriente del rotor y el campo magnético rotatorio hace que el rotor gire a una velocidad algo menor que la velocidad síncrona del motor.” Guru, B. 2003).

Motor de inducción monofásico.

Un motor de inducción monofásico está formado por un rotor en jaula de ardilla análogo al de los motores trifásicos y un estator en el que se dispone un devanado alimentado con corriente alterna monofásica. Al introducir una corriente alterna en el devanado del estator se produce una fuerza magnetomotriz en el entre hierro, distribuida senoidalmente en el espacio y de carácter pulsatorio. La fuerza magnetomotriz produce un campo magnético proporcional en el entrehierro, el cual induce a su vez corriente en el rotor, como si fuera un circuito secundario de un transformador, de tal forma que los pares de rotación originados por la acción recíproca de las intensidades de las dos mitades del arrollamiento del rotor con el campo inductor del estator son opuestos entre sí, y en consecuencia, el par resultante que actúa sobre el rotor en reposo es nulo. La ausencia de par inicial de arranque representa la particularidad característica del motor de inducción monofásico y por ello esta máquina no puede arrancar por sí misma. [1]

3.1.4Arranque de los motores de inducción monofásicos.

Motor de fase partida.

“Es un motor de inducción monofásico con dos devanados en el estator. Estos dos devanados están a una distancia de 90° eléctricos entre ellos sobre el estator del motor, y el devanado auxiliar está diseñado para que un interruptor centrífugo lo retire del circuito a cierta velocidad. El devanado auxiliar se diseña para que tenga una relación resistencia/reactancia más alta que el devanado principal, por lo que la corriente en el devanado auxiliar está adelantada a la corriente del devanado principal. En general, esta relación R/X más alta se logra por medio de un alambre más delgado en el devanado auxiliar. Se puede utilizar un alambre de diámetro más pequeño debido a que se usa solo para el arranque y no tiene que tomar toda la corriente en forma continua.” (Chapman, S., 2012)

Motores de arranque por condensador.

“En un motor de arranque por condensador se incluye un condensador en serie con el devanado auxiliar. Si el valor del condensador se elige apropiadamente es posible diseñar un motor de arranque por condensador de manera que la corriente en el devanado principal se encuentre en atraso respecto de la corriente en el devanado auxiliar exactamente en 90° . Por tanto, el par de arranque desarrollado por un motor puede ser tan alto como el de un motor polifásico.”(Guru, B., 2003).

Motores de polos sombreados.

Un motor de inducción de polos sombreados es un motor que solo tiene devanado principal. En lugar de tener un devanado auxiliar, tiene polos salientes, una parte de los cuales está rodeada por una bobina en cortocircuito llamada bobina de sombreado. El devanado principal induce un flujo

que varía con el tiempo en los polos. Cuando varía el flujo en los polos, induce un voltaje y una corriente en la bobina de sombreo en sentido opuesto al cambio de flujo original. Esta oposición retarda los cambios de flujo bajo las porciones sombreadas de las bobinas y por lo tanto produce un pequeño desequilibrio entre los dos campos magnéticos del estator que giran en direcciones contrarias. (Chapman, S., 2012)

3.1.5 Devanados trifásicos de la armadura. El devanado del estator está constituido por tres arrollamientos desfasados 120° ; al introducir por ellos corrientes de una red trifásica de frecuencia f_1 , se produce una onda rotativa de f.m.m. distribuida senoidalmente por la periferia del entrehierro, que produce un flujo giratorio cuya velocidad viene expresada, por:

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p} \quad (1)$$

Que recibe el nombre de velocidad de sincronismo. Este flujo giratorio inducirá f.e.m.s. en los conductores del rotor, y si está su circuito eléctrico cerrado, aparecerán corrientes que reaccionarán con el flujo del estator. (Fraile, J., 2003).

Paso polar.

Es la distancia angular entre dos polos adyacentes en una máquina. El paso polar de una máquina en grados eléctrico es

$$\rho = \frac{360^\circ}{P} \quad (2)$$

Donde ρ es el paso polar en grados mecánicos y P es el número de polos en la máquina. Sin importar el número de polos en la máquina, el paso polar siempre es de 180 grados eléctricos. [3]
Según como esté medido, el paso polar se designará por:

tp: Medido en longitud de arco (metros) de la circunferencia del entrehierro.

τp : Medido en radianes eléctricos

$y p$: Medido en número de ranuras

En un núcleo magnético con S ranuras, P pares de polos y d diámetro de entrehierro se verifica que:

$$\tau p = \frac{\pi d}{2 P} \quad (3)$$

$$\tau p = \pi \quad (4)$$

$$y p = \frac{S}{2 P} \quad (5)$$

Grupo polar.

Es un conjunto de bobinas de la misma fase conectadas en serie, alojadas en ranuras contiguas y arrolladas alrededor de un mismo polo. Los grupos polares se conectan entre sí, en serie o formando varias ramas en paralelo idénticas para así constituir una fase del devanado.

Según como se dispongan los grupos polares de una fase existen devanados por polos y por polos consecuentes.

En los devanados por polos existen tantos grupos polares por fase como polos tiene la máquina eléctrica.

En los devanados por polos consecuentes el número de grupos polares por fase es igual al número de pares de polos de la máquina. [6]

3.1.6 Tipos de devanados

Devanado concéntrico.

En los devanados concéntricos las bobinas de un grupo polar son de diferentes tamaños y se van situando sucesivamente unas dentro de las otras.

En este tipo de bobinado los pasos de bobina son diferentes de unas bobinas a otras. Cuando se usa la conexión por polos consecuentes el valor medio de los pasos de las bobinas de un grupo polar es igual al paso polar.

En la práctica, los devanados concéntricos trifásicos de más de dos polos se ejecutan por polos consecuentes. En los demás casos se realizan por polos. Estos bobinados se fabrican siempre de una capa. (Rodriguez, A., (2010).

Devanado imbricado.

Están realizados con bobinas de igual tamaño y forma. En los devanados imbricados un grupo polar se obtiene conectando en serie varias bobinas de una misma fase, todas ellas correspondientes al mismo polo. Por esta razón, en estos devanados hay que retroceder para conectar el final de una bobina con el principio de la siguiente (pues el final de la una bobina está por delante del principio de la siguiente con la que se conecta). (Rodriguez, A., (2010).

Devanados ondulados.

También están realizados con bobinas de igual tamaño. A diferencia de lo que sucede en los bobinados imbricados, en los devanados ondulados una bobina se conecta con otra de la misma fase que está situada bajo el siguiente par de polos. Por esta razón, en estos devanados hay que avanzar para conectar el final de una bobina con el principio de la siguiente (pues el final de la una

bobina está detrás del principio de la siguiente con la que se conecta). Esto hace que estos arrollamientos tengan forma de onda, lo que da origen a su denominación. (Rodriguez, A., (2010).

3.1.7 Parámetros de un devanado de corriente alterna. Cada fase se encuentra constituida de una o más bobinas y a su vez estas están formadas de secciones. En cada sección se distinguen los siguientes elementos:

Las caras activas, o sea las dos partes contenidas en la longitud de las ranuras.

Las conexiones frontales o cabezales, destinadas a conectar entre sí los lados activos. (Harper, G. 2004)

Por otra parte, un devanado se caracteriza principalmente por los siguientes parámetros:

Alcance de ranura

Es el ángulo eléctrico desde el centro de una ranura al centro de otra ranura adyacente.

Si S es el número total de ranuras en el estator y P el número de polos del motor, se tiene que el alcance de ranura es

$$\sigma = \frac{P 360^\circ}{2 S} \quad (6)$$

Número de ranuras por fase

La cantidad de bobina por fase debe ser un número entero.

Si S es el número total de ranuras en el estator y q el de fase del motor, se tiene que el número de ranuras por fase es

$$k = \frac{S}{q} \quad (7)$$

Numero de ranuras por polo y por fase

Si S es el número total de ranuras en el estator, P el número de polos y q el de fase del motor, se tiene que el número de bobinas por polo y por fase es

$$n = \frac{S}{P q} \quad (8)$$

Donde n debe ser un número entero. La cantidad de bobina por polo y por fase suele conocerse como grupo de fase o cinturón de fase. [2]

Paso de bobina

El alcance de bobina o paso de bobina, es el número de ranuras que abarca cada bobina puede expresarse en términos de grados eléctricos o del número de ranuras.

Si S es el número total de ranuras en el estator y P el número de polos del motor, se tiene que el paso de bobina en término del número de ranuras es

$$k = \frac{S}{P} \quad (9)$$

Factor de distribución

Representa la relación entre el voltaje inducido por un devanado en cada ranura a la cantidad de volts por fase y se calcula como la fórmula:

$$kd = \frac{\text{sen}(\frac{n \sigma}{2})}{n \text{sen}(\frac{\sigma}{2})} \quad (10)$$

Donde:

σ = alcance de ranura

n = número de bobinas por polo y por fase

Factor de paso.

El factor de paso se relaciona con el ángulo eléctrico que abarca las bobinas y se calcula como:

$$kp = \text{sen}\left(\frac{k\gamma}{2}\right) \quad (11)$$

Donde:

k = paso de bobina

γ = extensión de la ranura en grados eléctricos

3.1.8 Trazos de los diagramas de bobinado

Diagramas desarrollados en un plano.

En esta representación se supone que se desarrolla el devanado como si la superficie cilíndrica interna del estator fuera, por así decirlo “desarrollada” en un plano. Los lados o caras activas, cualquiera que sea de partes activas que lo constituyan están representadas por un solo segmento: se puede emplear colores distinto o líneas de distinto tipo para poder distinguir las tres fases entre sí. [4]

Diagrama con desarrollo circular o frontal.

En este diagrama, se supone que el devanado es visto por un observador situado al frente del motor como si se le estuviera quitando la tapa y no se observaran los cabezales de las bobinas. En este diagrama cada haz o grupo activo se representa por pequeños círculos y las conexiones frontales de las líneas que los unen según el paso de bobina establecido. También en estos diagramas se diferencia las tres fases con colores diferentes o bien con distintos tipos de líneas y pequeños círculos. (Harper, G. 2004)

3.2 Fluido magnetorreológicos

3.2.1 Definición. Los fluidos magnetorreológicos o fluidos sensibles al campo magnético son parte de un conjunto de parientes que se conocen como fluidos inteligentes o controlables activamente, dichos materiales tienen la capacidad de pasar de una forma líquida a una forma semisólida en presencia de campos magnéticos aplicados externamente. Los fluidos magnetorreológicos tienen partículas de tamaño micrométrico polarizadas magnéticamente dispersas en un medio portador.

En presencia de un campo magnético aplicado, las partículas suspendidas parecen organizarse o agruparse lo que hace que el fluido se espese o gelifique drásticamente, las partículas vuelven a su estado original una vez que se libera el campo magnético lo que disminuye la viscosidad del fluido. Por lo tanto, la estructura del fluido es sensible a varios factores, como la fracción de volumen, la intensidad del campo magnético y el líquido portador. El cambio del estado sólido-líquido de los fluidos magnetorreológicos se puede controlar de manera precisa y proporcional cambiando la intensidad del campo magnético aplicado (Hajalilou, A., Amri Mazlan, S., Lavvafi, H., Shameli, K. 2016).).

3.2.2 Características de un fluido magnetorreológico. El comportamiento del fluido magnetorreológico está determinado por tres componentes, la variación de cualquier componente dará como resultado una variación de las propiedades de control y del fluido magnetorreológico, es necesaria una combinación adecuada de la cantidad de estos componentes para definir las propiedades del fluido.

A continuación, se mencionan los componentes que determinan este tipo de fluidos. (Hajalilou, A., Amri Mazlan, S., Lavvafi, H., Shameli, K. 2016).).

3.2.2.1 Partículas de metal. Para que esta tecnología sea útil, las partículas suspendidas deben verse afectadas por el campo magnético rápidamente. Para ello, se utilizan partículas metálicas magnetizables. Las partículas metálicas utilizadas en la tecnología magnetorreológico son muy pequeñas, aproximadamente del orden de 1 a 7 μm . Por lo general, las partículas metálicas utilizadas son hierro carbonilo, hierro en polvo y aleaciones de hierro cobalto, las partículas ferrosas de estos materiales poseen la capacidad de saturación de alto magnetismo que conduce a formar una cadena magnética sólida, por lo tanto, estas partículas pueden estar hasta un 50% en el fluido base. (Hajalilou, A., Amri Mazlan, S., Lavvafi, H., Shameli, K. 2016).

3.2.2.2 Fluido base. El fluido base es un fluido portador no magnético en el cual las partículas de metal están suspendidas, es lubricante natural y tiene propiedades amortiguadoras, para aprovechar al máximo la tecnología, el fluido base debe tener una baja viscosidad y debe ser constante con la temperatura, esto es necesario para que la variación debida al campo magnético aplicado sea más efectiva que la viscosidad natural. (Hajalilou, A., Amri Mazlan, S., Lavvafi, H., Shameli, K. 2016).

Los fluidos de base de uso común son aceites minerales, aceites de hidrocarburos y aceites de silicona.

3.2.2.3 Aditivos. Ciertos aditivos se agregan al fluido magnetorreológico para controlar sus propiedades, estos incluyen surfactantes y estabilizantes, los surfactantes disminuyen la velocidad

de sedimentación de las partículas metálicas. Las funciones de los aditivos son mantener la fricción entre las partículas metálicas, mantener bajo control la viscosidad del fluido y reducir la velocidad de sedimentación de las partículas que hacen que el fluido sea espeso debido al uso a largo plazo del fluido. De este modo, los aditivos también aumentan los ciclos de trabajo del fluido magnetorreológico.

Los aditivos de uso común son el estearato de litio y el oleato ferroso. (Hajalilou, A., Amri Mazlan, S., Lavvafi, H., Shameli, K. 2016).

3.2.3 Aplicaciones. Los amortiguadores de fluidos magnetorreológico ofrecen una nueva ventana al problema de la absorción de energía en varios sistemas y estructuras, por lo que se consideran dispositivos a prueba de fallas. Los amortiguadores de fluidos magnetorreológico se pueden utilizar para varios propósitos. (Hajalilou, A., Amri Mazlan, S., Lavvafi, H., Shameli, K. 2016).

Los diferentes lugares donde los amortiguadores encuentran sus aplicaciones son:

- Suspensión del automóvil

La industria aprovecha las ventajas de los amortiguadores de fluidos magnetorreológico como elementos de amortiguación semi-activos en tiempo real. Este sistema funciona de manera diferente al sistema de suspensión convencional puesto que el campo magnético se aplica con la ayuda de un electroimán.

Un conjunto de algoritmo controlado mejora la capacidad de absorción de los impactos de la suspensión al variar la viscosidad del fluido magnetorreológico.

- Protección sísmica de edificios.

Los amortiguadores de fluido magnetorreológico se pueden usar como amortiguadores sísmicos que funcionarán bajo la frecuencia de resonancia del edificio al absorber las ondas de choque y las oscilaciones que pueden causar daño dentro de la estructura. Esto hace que los amortiguadores puedan hacer que cualquier edificio sea a prueba de terremotos.

- Puentes atirantados.

Los amortiguadores de fluido magnetorreológico se utilizan para controlar las vibraciones inducidas por los vientos de cuerda. También se utilizan para evitar la acción sísmica.

- Prótesis de rodilla

Los amortiguadores de fluido magnetorreológico se pueden utilizar en prótesis de rodilla para proporcionar una rápida absorción de los golpes. Esto se hace usando un pequeño amortiguador de fluido magnetorreológico, para absorber los golpes debido al movimiento de una rodilla protésica.

- Válvulas hidráulicas.

Bajo el control de las válvulas magnetorreológico, los actuadores que funcionan mediante el sistema hidráulico pueden utilizar el fluido magnetorreológico como medio de trabajo. Este sistema consta de una válvula magnetorreológico, que es una válvula de mariposa proporcional con partes estacionarias. La válvula puede comprender un cuerpo metálico con un núcleo magnético en el que hay un canal hidráulico y un devanado de bobina de inducción que se encuentra entre el interior del cuerpo y el núcleo exterior.

3.3 Bobina de Helmholtz

Las bobinas de Helmholtz son la configuración más simple para producir un campo magnético relativamente constante, son dos bobinas circulares coaxiales con el mismo radio que es igual a la distancia entre los planos de las bobinas ([. Jonathan E. Williams., (2014)

Cuando las corrientes circulan en sentidos opuestos la configuración se denomina bobinas anti-Helmholtz, y es importante en varias aplicaciones como mediciones, investigaciones biomédicas, calibración de puntas y sensores, etc. Ampliar el área de homogeneidad y reducir la variación del campo en los ejes son las tareas de interés basadas en el estudio de un sistema de dos bobinas.

3.3.1 Fundamento teórico. En la figura se muestra una espira circular de radio a , recorrida por una corriente de intensidad i . El punto P está sobre el eje de la espira a una distancia z de su centro (figura1).

Sea r la distancia entre el elemento de corriente y el punto P. La ley de Biot permite calcular el campo magnético creado por dicho elemento de corriente.

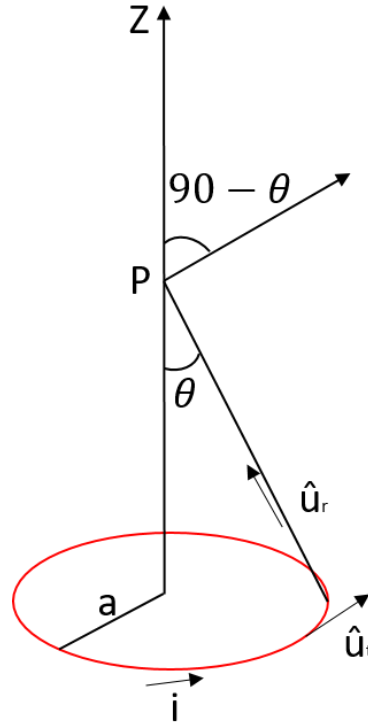


Figura 1. Cálculo de campo en un punto

$$\overrightarrow{dB} = \frac{\mu_0 i}{4\pi} * \frac{\hat{u}_t * \hat{u}_r}{r^2} dl \quad (12)$$

$$dB = \frac{\mu_0 i}{4\pi} * \frac{dl}{r^2} \quad (13)$$

Los vectores unitarios $\hat{u}_t$ y $\hat{u}_r$ forman 90° , el vector campo magnético $\overrightarrow{dB}$ tiene dos componentes

A lo largo del eje de la espira $dB \cdot \cos(90-\theta)$

perpendicular al eje de la espira $dB \cdot \sin(90-\theta)$

Por razón de simetría, los componentes perpendiculares al eje creadas por elementos diametralmente opuestos se anulan entre sí. Por tanto, el campo magnético resultante está dirigido a lo largo del eje y puede calcularse mediante una integración sencilla ya que r y θ son constantes.

$$B = \int dB * \cos(90 - \theta) = \frac{\mu_0 i}{4\pi r^2} \sin(\theta) \oint dl = \frac{\mu_0 i}{4\pi r^2} 2\pi a \sin(\theta) = \frac{\mu_0 i a^2}{2(\sqrt{z^2 + a^2})^3} \quad (14)$$

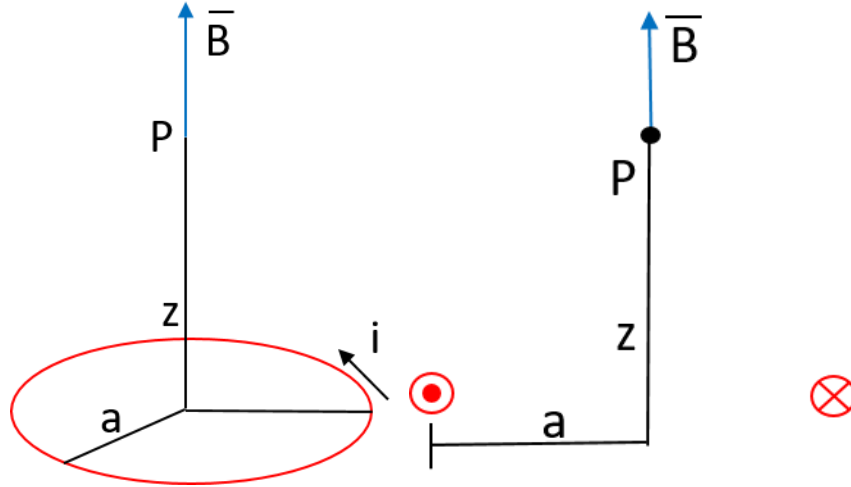


Figura 2. Interpretación densidad de campo magnético

En el centro de la espira $z=0$, tenemos

$$B = \frac{\mu_0 i}{2a} \quad (15)$$

El sentido del campo magnético viene determinado por la regla de la mano derecha.

Entendiendo los conocimientos básicos anteriores, podemos calcular las bobinas de Helmholtz

Consideremos el campo producido por dos bobinas iguales de radio a de N espiras apretadas por donde circula recorridas por una corriente eléctrica de intensidad i y separadas una distancia d , tal como se aprecia en la figura.

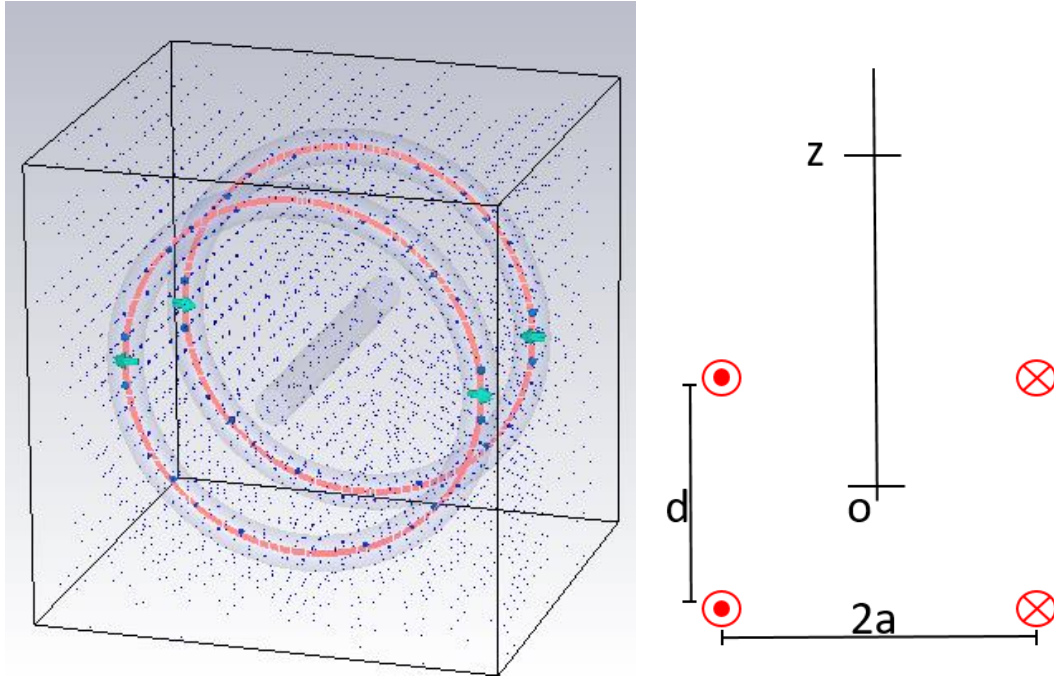


Figura 3. Ilustración de las bobinas de Helmholtz

Situamos el origen en el punto medio O como se ve en la figura 3 entre las dos bobinas y calculamos el campo magnético en un punto z del eje común de las dos bobinas

$$B = B1 + B2 = \frac{\mu_0 i a^2}{2(\sqrt{z^2 + a^2})^3} + \frac{\mu_0 i a^2}{2(\sqrt{z^2 + a^2})^3} \quad (16)$$

4. Aspectos constructivos del prototipo

4.1 Estator

El estator constituye la parte fija del prototipo, mecánicamente es el componente estático, en él se encuentran las bobinas encargadas de inducir el campo magnético. La adecuación del estator del

prototipo comenzó con el despiece del alternador, luego se procedió a extraer el núcleo del alternador (Figura 4, figura 5) y se retiró el devanado, con el propósito de ser reemplazado por un devanado trifásico constituido por dos polos.

Para el proceso de construcción del devanado del prototipo se determinó el alcance de ranura, bobina, el número de bobinas en un grupo de fase y el número de ranura por polo y por fase para luego realizar un diagrama desarrollado en un plano del devanado, el número de vueltas de cada bobina se determinó a ranura llena y el alambre usado es del tipo esmaltado de cobre calibre AWG 21.

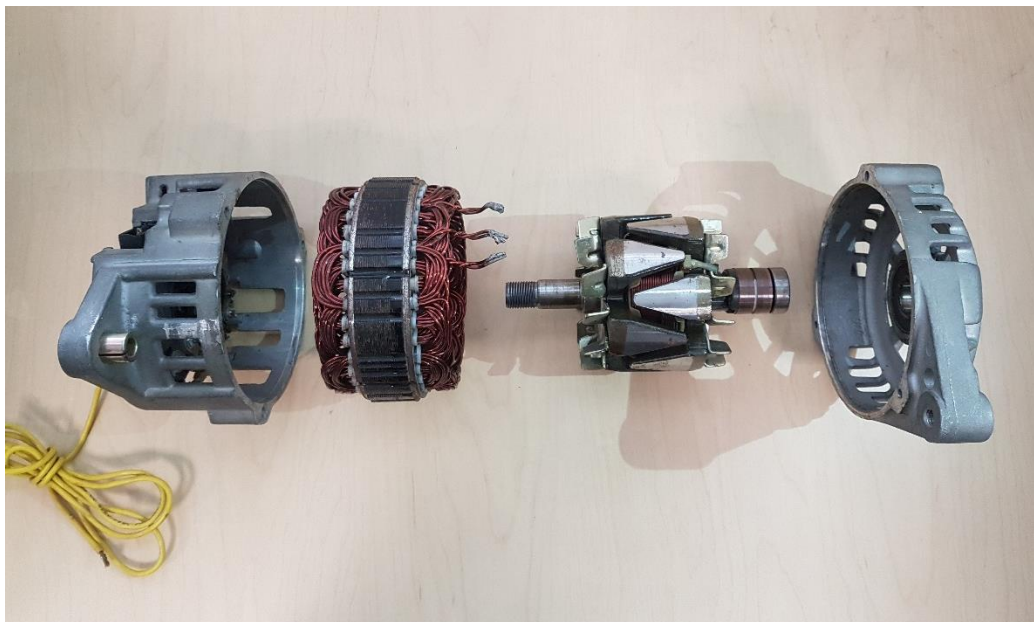


Figura 4. Despiece de alternador 1

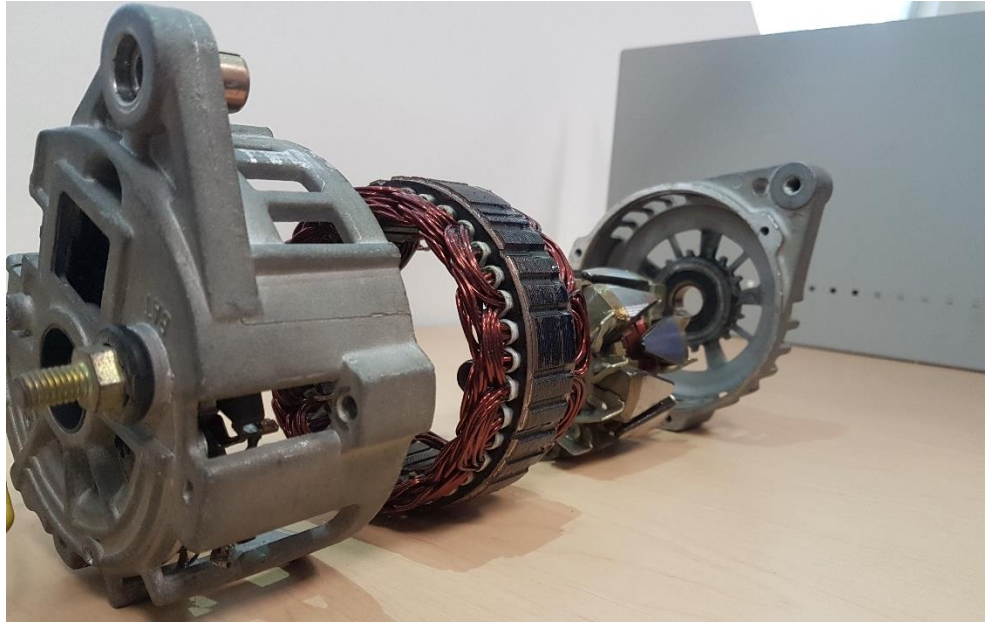


Figura 5. despiece de alternador 2

En la figura 6 se muestra el estator original del alternador.



Figura 6. Corona original

La figura 7 representa el diagrama desarrollado en un plano del devanado del prototipo, tipo imbricado, 3 fases, 2 polos y distribuido en 36 ranuras del estator, cada bobina formada por 30 espiras, con un paso de bobina de 1:19.

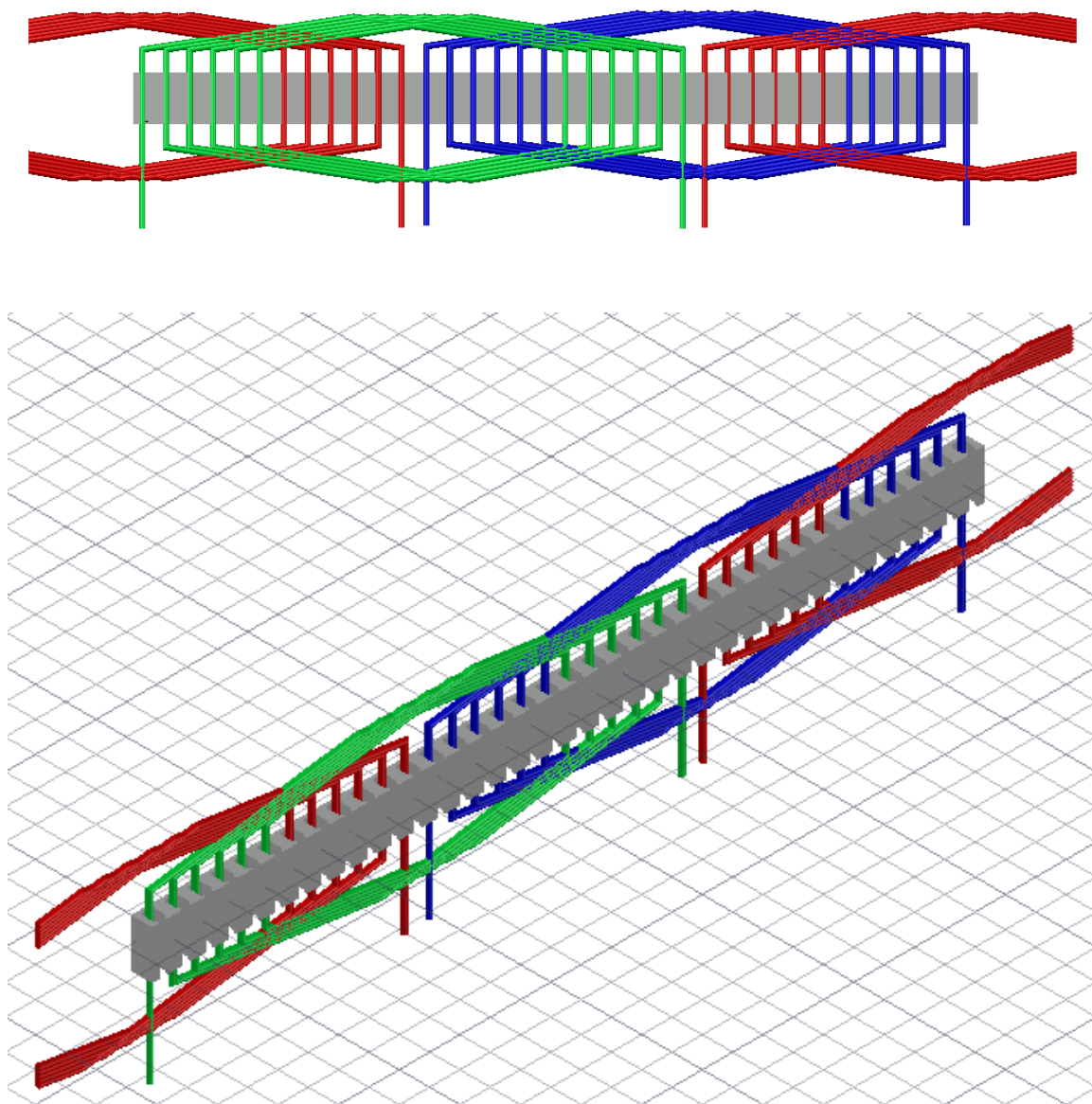


Figura 7. Distribución del bobinado

En la figura 8 se puede ver el estator construido a partir del diseño mostrado en la figura 7

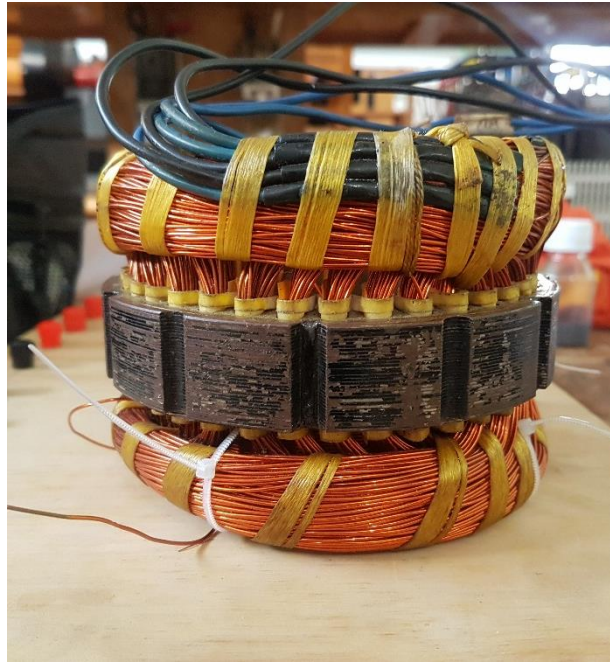


Figura 8. Estator bobinado

El propósito de este diagrama desarrollado en un plano es servir de pieza clave al momento de rebobinar el devanado del estator del alternador.

4.2 Base interna, diseño y construcción.

Para el diseño de la base interna se aprovechó la geometría y las medidas internas del núcleo del estator, de manera que el recipiente se encuentre ubicado en el centro del prototipo. Con la ayuda del software SolidWorks se elaboró el diseño mostrado en la figura 9, utilizando como material para la construcción lámina de acrílico transparente con espesor de 3mm, con el propósito de no

inferir en el comportamiento del fluido magnetorreológico bajo la presencia de campos magnéticos.

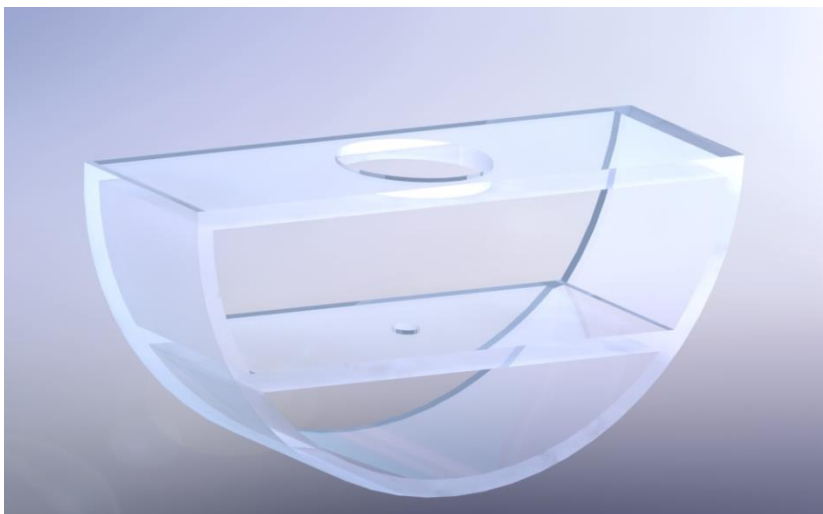


Figura 9. Diseño de base interna

En la figura 10 se puede apreciar la vista superior y en la figura 11 la vista frontal de la base.

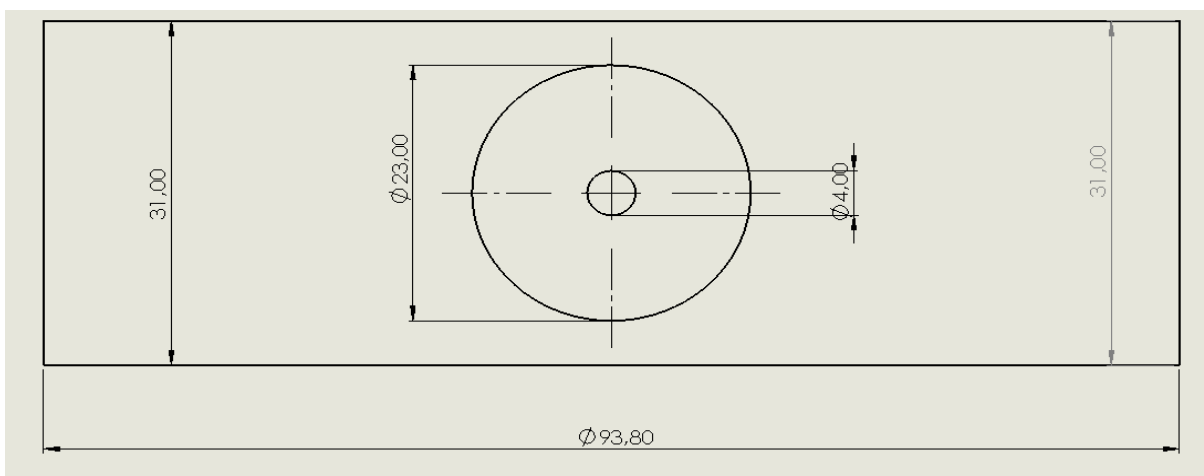


Figura 10. Vista superior

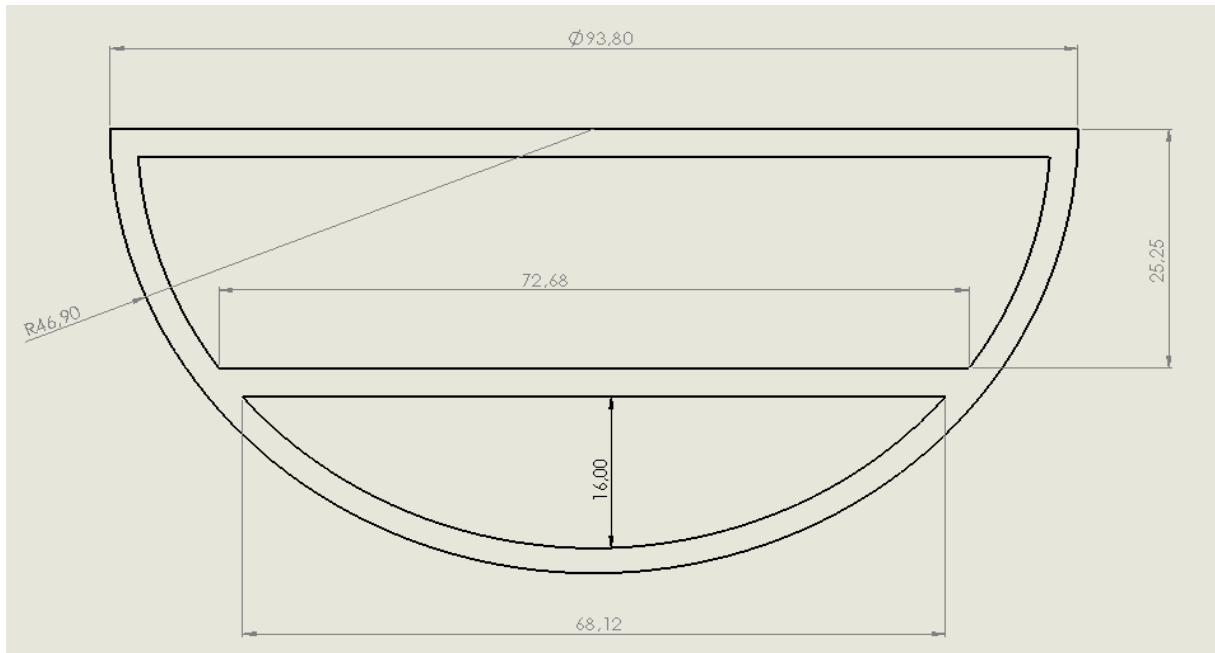


Figura 11. Vista frontal de la base interna

Al tener la base construida, se implementa un rodamiento empleando llantas de carros de juguetes debido a que no fue posible encontrar un rodamiento de pasta convencional que no interfiriera en el comportamiento del fluido magnetorreológico bajo la presencia de campo magnético, esto con el fin de reducir la fricción que se da a la posible generación de movimiento.

En la figura 12 se puede apreciar el diseño del rodamiento construido en SolidWorks, que soportará el recipiente del fluido magnetorreológico



Figura 12. Diseño de rodamiento

Para encontrar un recipiente con las dimensiones apropiadas, se tenían unos parámetros máximos denotados por las dimensiones internas de la corona, el punto crítico para encontrar el recipiente fue el diámetro del mismo, puesto que se debía asegurar que las bobinas de Helmholtz estuvieran espaciadas al radio interno de la corona.

Se utilizó un recipiente en vidrio de 5ml ilustrado en la figura 13.



Figura 13. Recipiente donde está inmerso el fluido magnetorreológico

Teniendo cada una de las piezas se procede a ensamblar cada una de ellas como se puede ver en la figura 14 e figura 15.

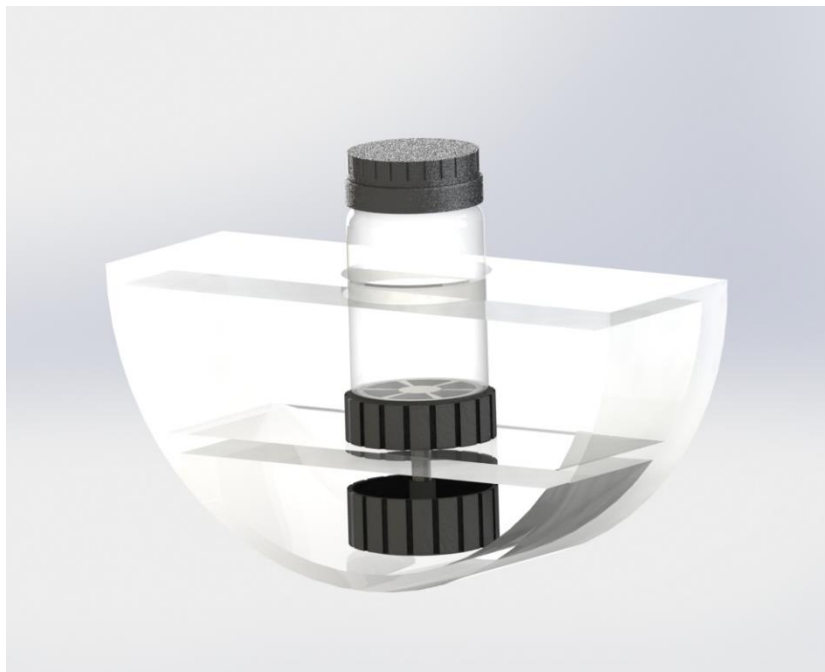


Figura 14. Ensamble de base interna



Figura 15. Base interna

4.3 Base externa, construcción.

Debido a las vibraciones ocasionadas al momento de energizar el prototipo, se hace necesario sujetar el prototipo de tal forma que se garantice la estabilidad del mismo y así poder llevar a cabo las pruebas adecuadamente. Por otra parte, se debe tener en cuenta que la base, que cumplirá esta labor, debe ser de un material no ferromagnético

Para tal fin, se utilizó una platina de aluminio (Al), la cual fue moldeada manualmente como se muestra en la figura 16 con la ayuda de unas prensas hidráulicas y así poder ajustar el prototipo.

Para ensamblar la base a la tabla de madera, es necesario contar con tornillos de material no ferromagnético para no inferir en el comportamiento del campo producido por el prototipo, con base lo anterior fue viable conseguir tornillos de cobre.



Figura 16. Base externa en Aluminio

La base mostrada en la figura 17 se ajusta por medio de tornillos a una base de madera mostrada en la figura 18.



Figura 17. Ensamble estructural en Solidworks



Figura 18. Ensamble físico

4.4 Construcción de las bobinas de Helmholtz

Con base a la simulación de las bobinas de Helmholtz mostrada en el capítulo 4, se obtuvo que el número de vueltas necesarias por cada bobina es de 73, dato arrojado al utilizar parámetros concentrados a una sola fase. Al estar trabajando con un devanado trifásico, se hace necesario emplear un factor de corrección que permita tomar en consideración las tres fases.

4.4.1 Consideraciones. Si se alimentan las tres bobinas mediante un sistema trifásico de tensiones, por las mismas circularán corrientes de igual módulo, pero desfasadas eléctricamente en 120° , tal como se muestra en la figura 19. Las corrientes que circulan dan origen a fuerzas magnetomotrices en cada una de las bobinas, cuya magnitud depende del número de espiras y del valor de la corriente instantánea (Álvarez. J 2009).

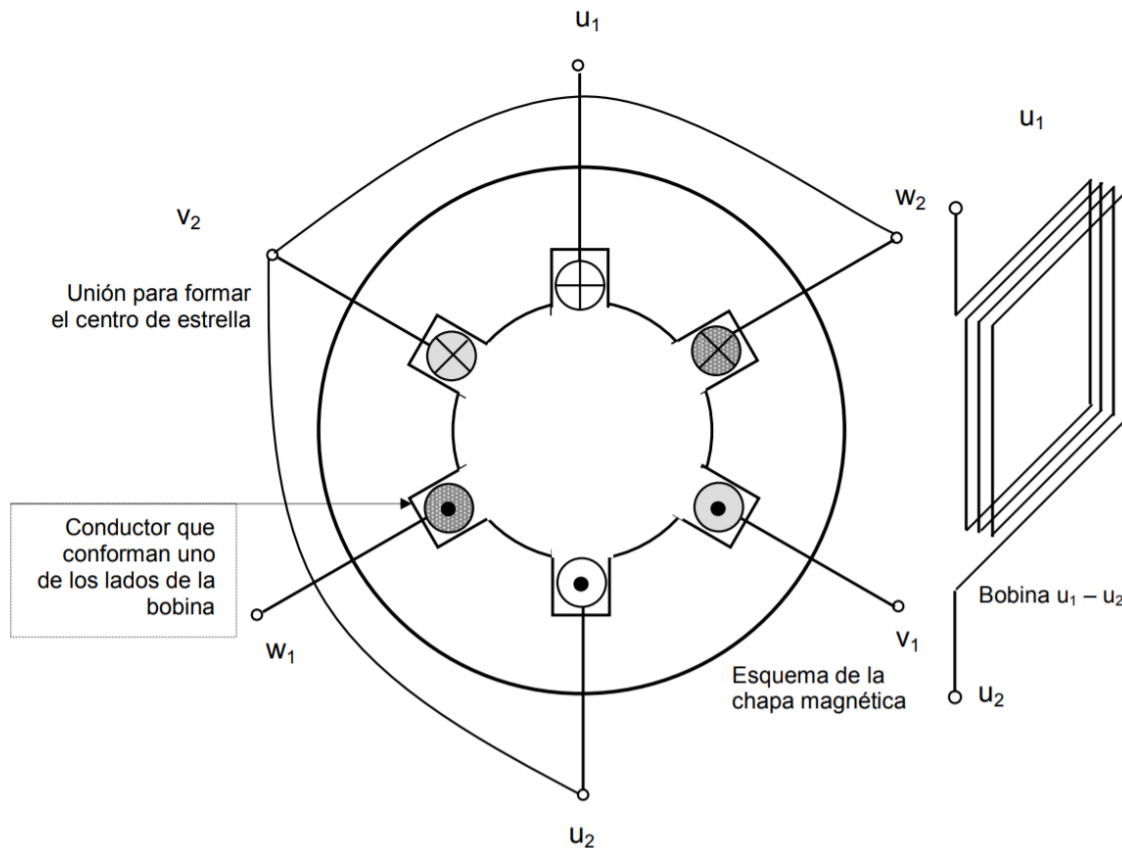


Figura 19. Detalle del estator y bobinas[8]

Para analizar la configuración trifásica, se evalúan dos instantes, la corriente para un ángulo eléctrico de 90° y la corriente para un ángulo eléctrico de 150° , como se muestra en la figura 20.

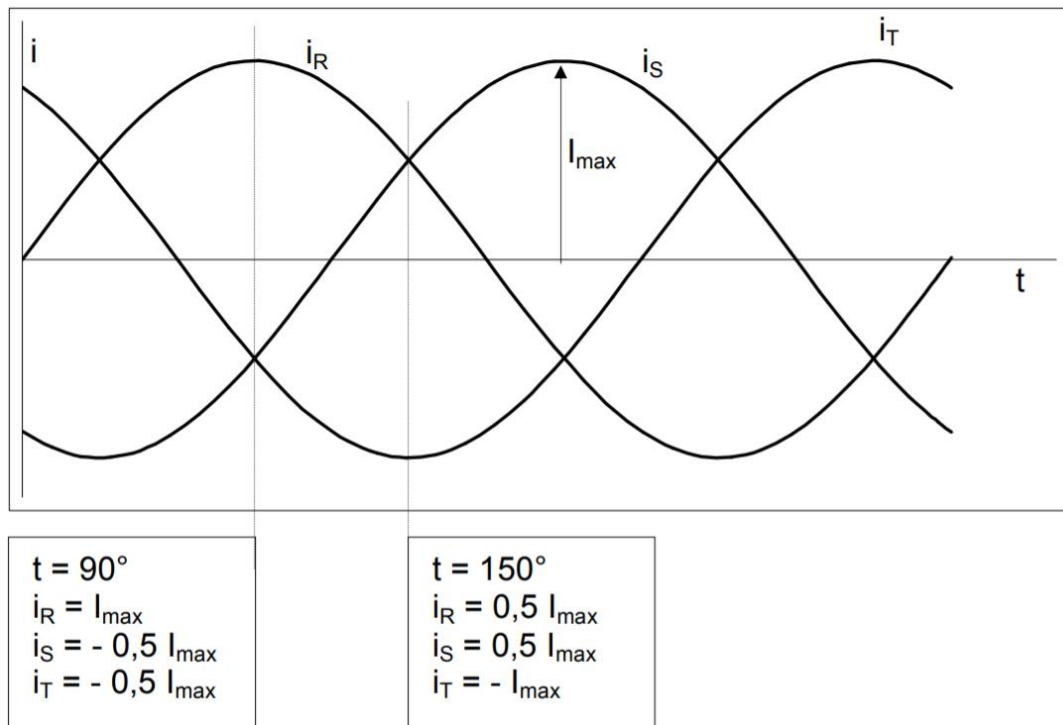


Figura 20. Valores instantáneos de las Corrientes de los bobinados

Se adoptan corrientes positivas si su borne es u_1, v_1 o w_1 y negativas si son salientes.

En el esquema de la máquina las corrientes entrantes se representan con una cruz (+) y las salientes con un punto (·).

En el instante en el cual el ángulo es 90° , la corriente i_R es positiva (entra por u_1) y las otras dos son negativas (salen por v_1 y w_1), como se puede ver en la figura 21.

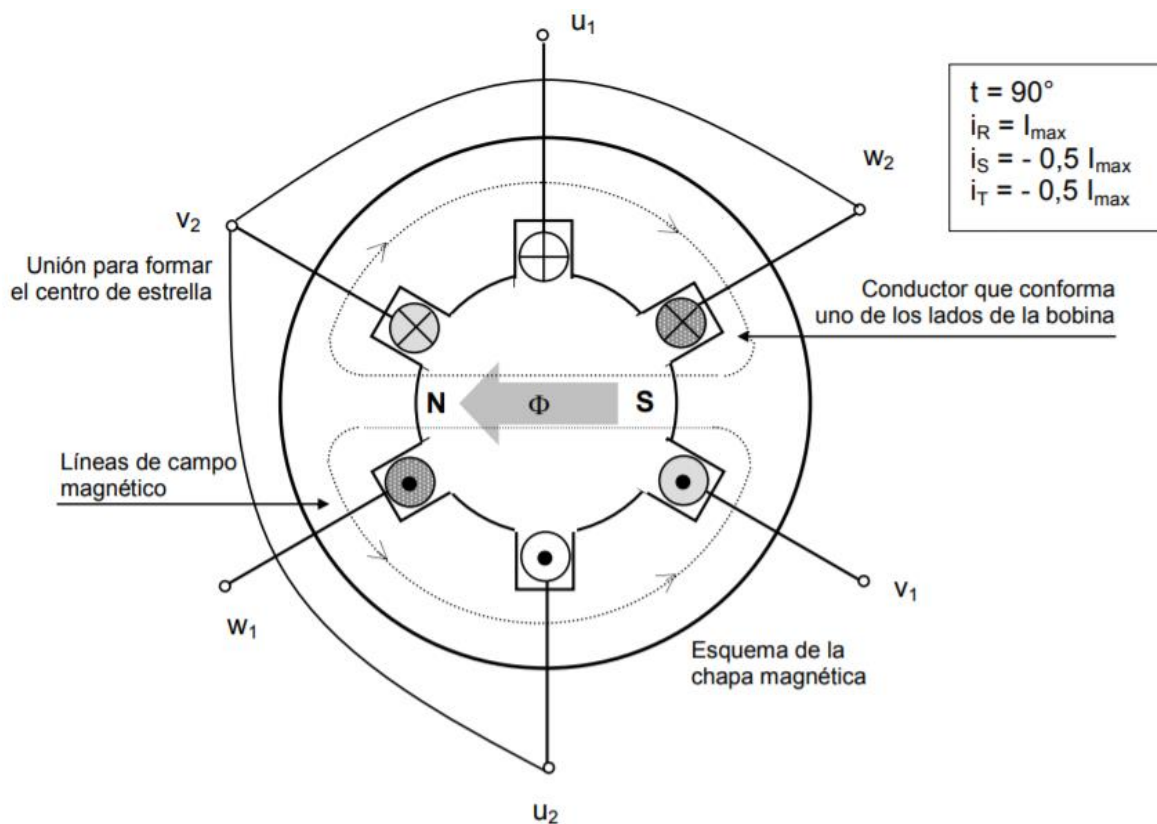


Figura 21. Detalle del devanado con sentido de las Corrientes para $t=90^\circ$ Adaptado de: Álvarez. J (2009). Motores de inducción

Las corrientes en las bobinas originan fuerzas magnetomotrices cuyas magnitudes y sentidos son los indicados en el esquema de la figura 22 y figura 23, en las cuales se ha dibujado la resultante de las mismas. También se observa que se obtiene un campo magnético de dos polos

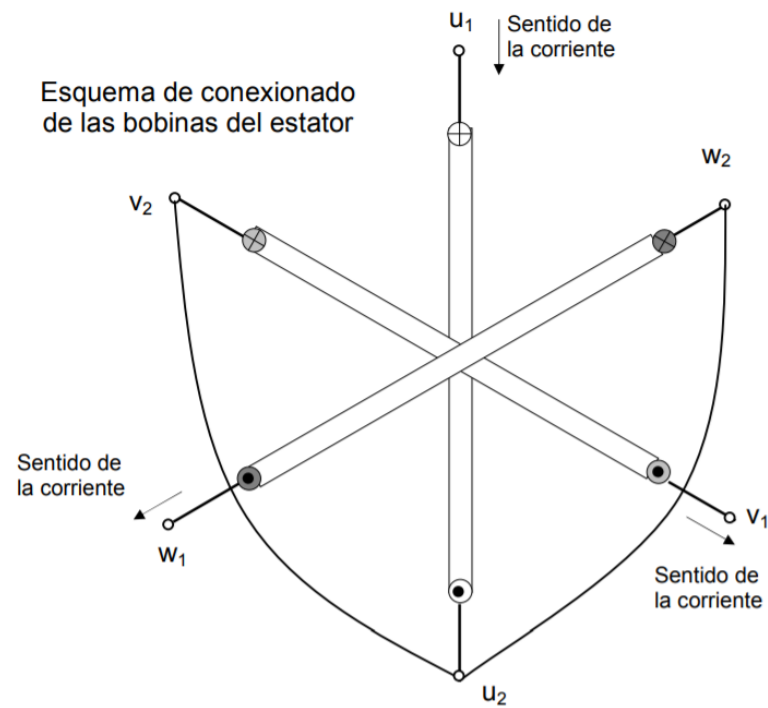


Figura 22. Disposición de las bobinas estatóricas Adaptado de: Álvarez. J (2009). Motores de inducción

Por último, se analiza el diagrama de fuerzas magnetomotrices originadas por las bobinas

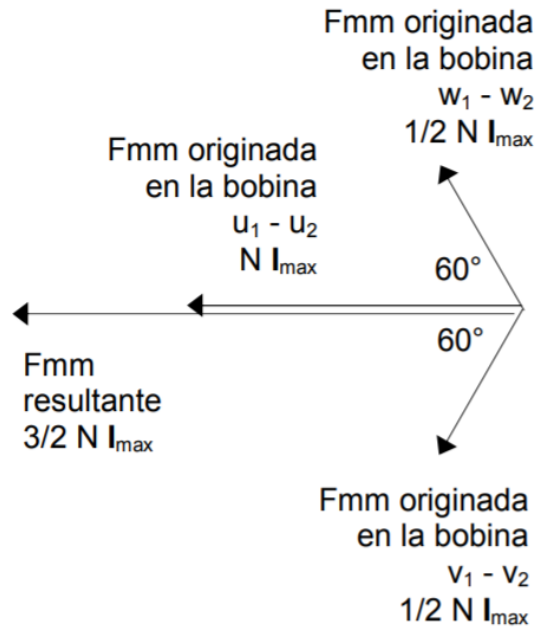


Figura 23. Diagrama vectorial para configuración trifásica

El análisis indica que el factor de corrección equivale a $3/2$. Dicho factor debe multiplicar el número de vueltas obtenido en la simulación para determinar una equivalencia entre el campo magnético del estator y las bobinas de Helmholtz, lo anterior corresponde a que cada bobina tenga 110 vueltas aproximadamente.

Como se había descrito anteriormente, con el fin de asegurar que el campo magnético vaya en una sola dirección, se deben conectar las bobinas del devanado de tal forma que las líneas de campo vayan de sur a norte y de norte a sur. En la figura 24 se muestra la conexión de las bobinas, y en la figura 25 se puede observar el diagrama fasorial donde da como vector resultante una fuerza magnetomotriz de magnitud 2.

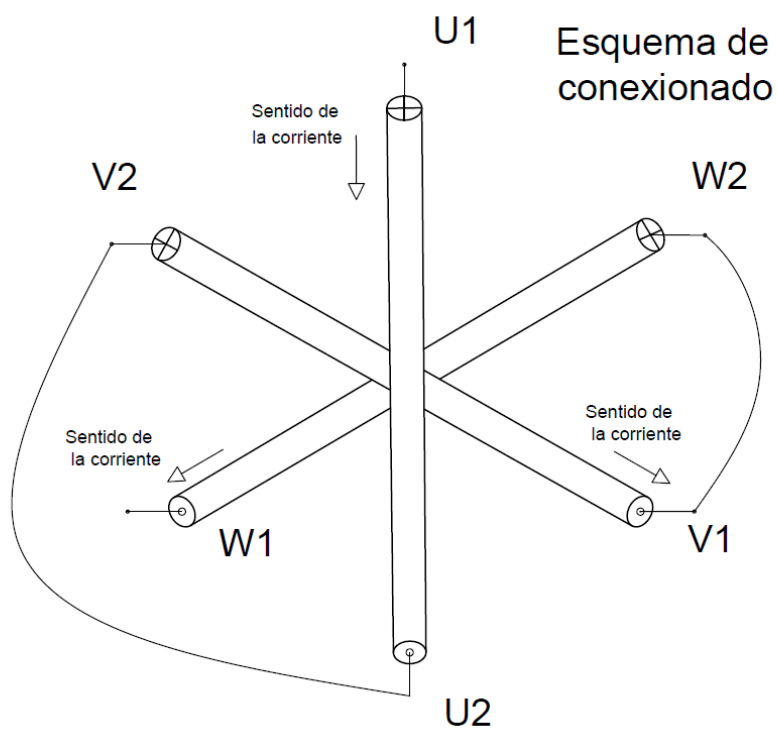


Figura 24. Conexión de las bobinas del devanado, para tener el campo en una sola dirección

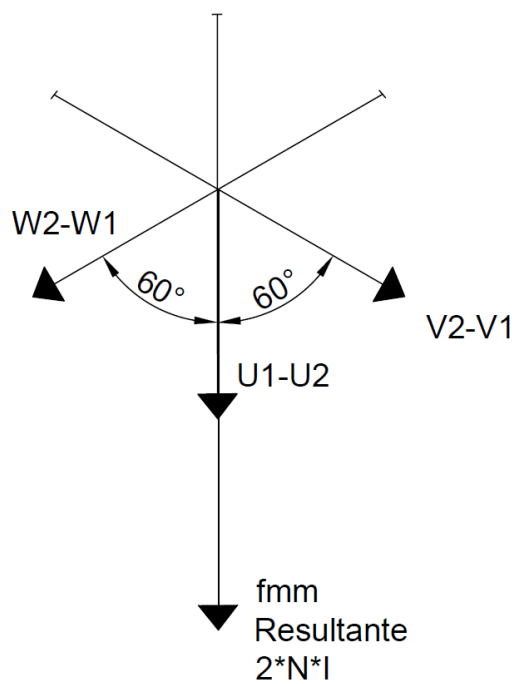


Figura 25. Diagrama vectorial, conexión serie

Con la configuración anterior se obtienen consideraciones diferentes para la construcción de las bobinas de Helmholtz, dando como resultado un total de 143 vueltas por bobina.

4.4.2 Proceso constructivo Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, se procede a construir las bobinas de Helmholtz. Como se puede ver en la figura 26 se utilizó un carrete como medio de base para la bobina y se coloca un tornillo empotrado con un cáncamo en el soporte de madera para dar grados de libertad al carrete y así permitir el movimiento para enrollar el alambre hasta una distancia específica. Por otra parte, se aplicó barniz dieléctrico en cada capa para mayor seguridad aislante y ayudar a pegar el alambre, se repite este proceso hasta tener 146 vueltas.

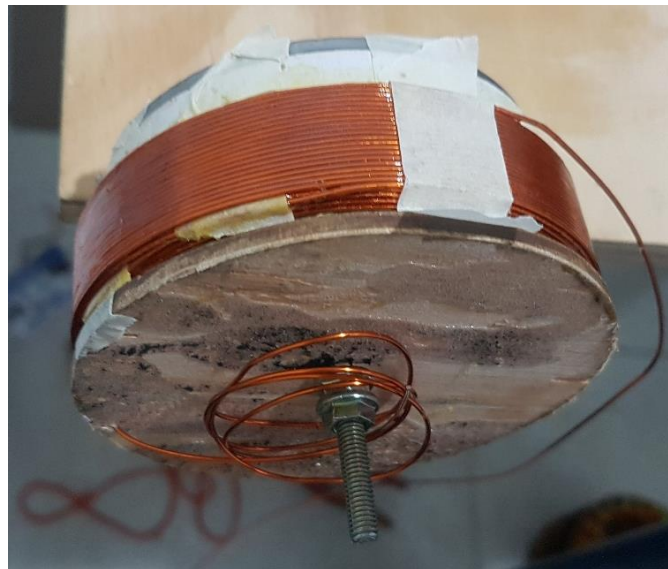


Figura 26. Construcción de las bobinas de Helmholtz

En la figura 27 se muestra las bobinas de Helmholtz, espaciadas por la base interna del prototipo

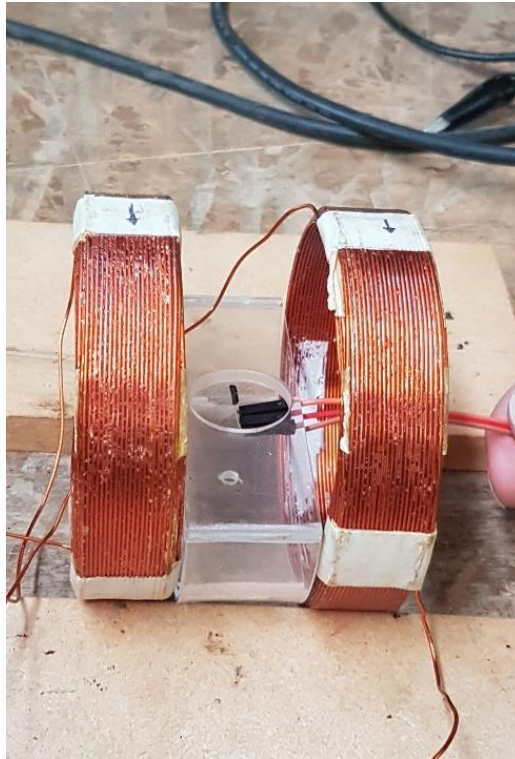


Figura 27. Bobinas de Helmholtz

4.5 Preparación del fluido magnetorreológico.

Para la preparación del fluido magnetorreológico en este caso en particular, se utilizó como fluido portador aceite combustible para motor (ACPM) y como material magnético magnetita, las cuales fueron proporcionada por el estudiante de doctorado en metalúrgica de la universidad industrial de Santander, Manuel Roa Ardila, quién facilitó también el procedimiento síntesis de la magnetita, descrito a continuación.

El procedimiento de síntesis de la magnetita se debe llevar a cabo en una cabina extractora y utilizando tanto protección visual y cutánea. (Gafas de protección, bata y guantes de nitrilo).

La magnetita de síntesis, se obtuvo mezclando 10 gr de cloruro férrico + 10 gr de cloruro ferroso, a dicha mezcla se le agregaron 200 mL de agua destilada, se homogeniza la mezcla con un agitador de vidrio, posteriormente se somete a calentamiento de 80°C por 10 minutos, a la mezcla se le agrega hidróxido de sodio en exceso, presentándose un color oscuro característico de la formación de la magnetita, se deja enfriar la mezcla y por decantación se separa el líquido recuperando el sólido.

4.5.1 Disposición final de las muestras. Para llevar a cabo las pruebas experimentales, se dispuso de tres concentraciones diferentes, correspondiente al 1, 12 y 20% del volumen del material magnético. El volumen base para la preparación de las mezclas corresponde a 5ml.

La muestra A constó del 1% (0.05 ml) del material magnético y 99% (4.95 ml) de aceite combustible para motor (ACPM)

La muestra B constó del 12% (0.6 ml) del material magnético y 88% (4.4 ml) de aceite combustible para motor (ACPM).

La muestra C constó del 20% (1 ml) del material magnético y 80% (4 ml) de aceite combustible para motor (ACPM).

Se emplearon recipientes de vidrio para almacenar cada una de las concentraciones descritas anteriormente.

5. Simulación

En los últimos años la simulación se ha tomado un papel importante en la toma de decisiones, gracias a ella fue posible comprobar cálculos necesarios para el diseño y construcción del prototipo del presente trabajo de grado.

La simulación se construye en una herramienta para dar una representación real del modelo, en el cual es posible ajustar cambios eventuales y así aprovechar mejor los recursos.

Rivero y Piedrahita (2003) afirma que la simulación ayuda a analizar la totalidad del sistema.

Desde otra perspectiva, Carson (2003) afirma que un Modelo de Simulación es un modelo descriptivo de un proceso o sistema, que usualmente incluye parámetros para representar diferentes configuraciones del sistema o proceso y expone que el Modelo de Simulación se puede usar para experimentar, evaluar y comparar muchos sistemas alternativos. Estas afirmaciones son las razones claves para hacer simulación, y sus principales resultados son la predicción del rendimiento y la identificación de los problemas del sistema.

En el proyecto se propone una simulación de un modelo logístico, con el fin de identificar los procesos, con el fin de identificar y describir los procesos para una representación real

De igual modo, se puede identificar la simulación como el proceso de diseñar y desarrollar un modelo computarizado de un sistema o proceso y conducir experimentos con este modelo con el propósito de entender el comportamiento del sistema o evaluar varias estrategias con las cuáles se puede operar el sistema.

5.1 Procesos de Simulación para el devanado

Para llevar a cabo un modelo de simulación se plantean diferentes pasos según Coss (2003)

5.1.1 Definición del sistema. Para tener una definición exacta del sistema que se desea simular, es necesario hacer primeramente un análisis preliminar del mismo, con el fin de determinar la interacción del sistema con otros sistemas, las restricciones del sistema, las variables que interactúan dentro del sistema y sus interrelaciones, las medidas de efectividad que se van a utilizar para definir y estudiar el sistema y los resultados esperados del estudio.

Son necesarias las siguientes características del devanado y su bobinado mostradas en la figura 28 para llevar a cabo la definición del sistema.

Parameter List					
	Name	Expression	Value	Descri	Type
	R	= 0.019588	0.019588	resist...	Length
	e	= 0.5	0.5	radio...	Length
	d	= 0.6	0.6	radio...	Length
	c	= 2.5	2.5	altura	Length
	b	= 4.725352	4.725352	radio...	Length
	l	= 5.1	5.1	corri...	Current
	a	= 6.525352	6.525352	radio...	Length
	f	= 180	180	vuelas	Length
	<new parameter>				

Figura 28. parámetros de equivalencia, para la construcción del estator

Parámetros que se introducen en el programa

R=resistencia de una vuelta

e= radio de la bobina (se refiere al espacio de la ranura, por donde van los alambres del enrollamiento, sin que ellos hagan contacto con el estator)

d=radio de la ranura

c =altura del estator

b =radio interno del estator

I =corriente aplicada a la bobina

a =radio exterior

f =número de vueltas por fase

5.1.2 Formulación del modelo. Una vez que están definidos con exactitud los resultados esperados del estudio, se procede a definir y construir el modelo con el cual se obtendrán los resultados deseados.

Con los parámetros anteriores es posible tener la estructura del estator, mostrada en la siguiente figura 29.

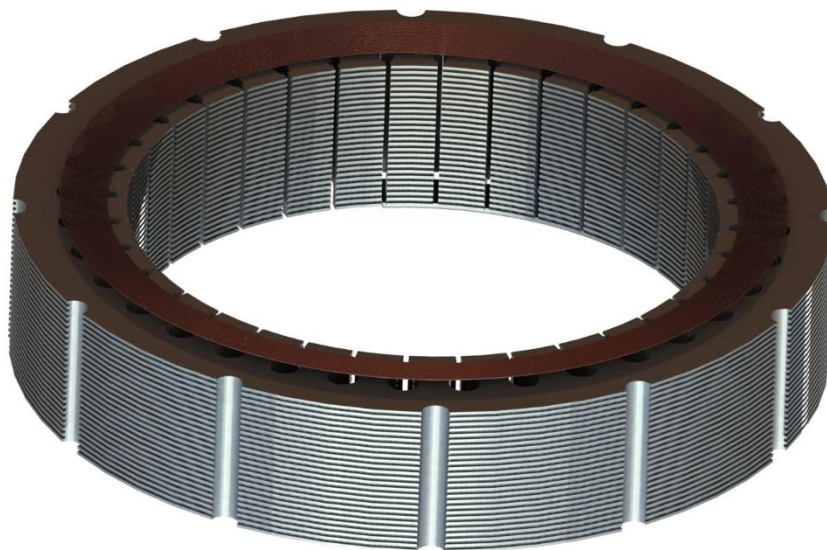


Figura 29. Ilustración en Solidworks

Como se puede ver en la figura 22, es un devanado de 6 polos, por lo tanto, se modifica de tal manera que su configuración sea de dos polos con 36 ranuras

5.1.3 Implementación del modelo en la computadora. Con el modelo definido, se decide utilizar el software CST STUDIO SUITE, para ilustrar el devanado, procesarlo en la computadora y obtener los resultados deseados.

Esta simulación lleva como propósito medir el campo magnético en un punto específico, de un devanado ya construido a criterio propio, con el fin de tener campos que vayan en una sola dirección y así determinar el campo de las bobinas de Helmholtz.

Con los parámetros anteriormente descritos en el inciso 1, se tienen las características principales para la construcción en el programa, y así tener una apreciación gráfica en la figura 30 del devanado.

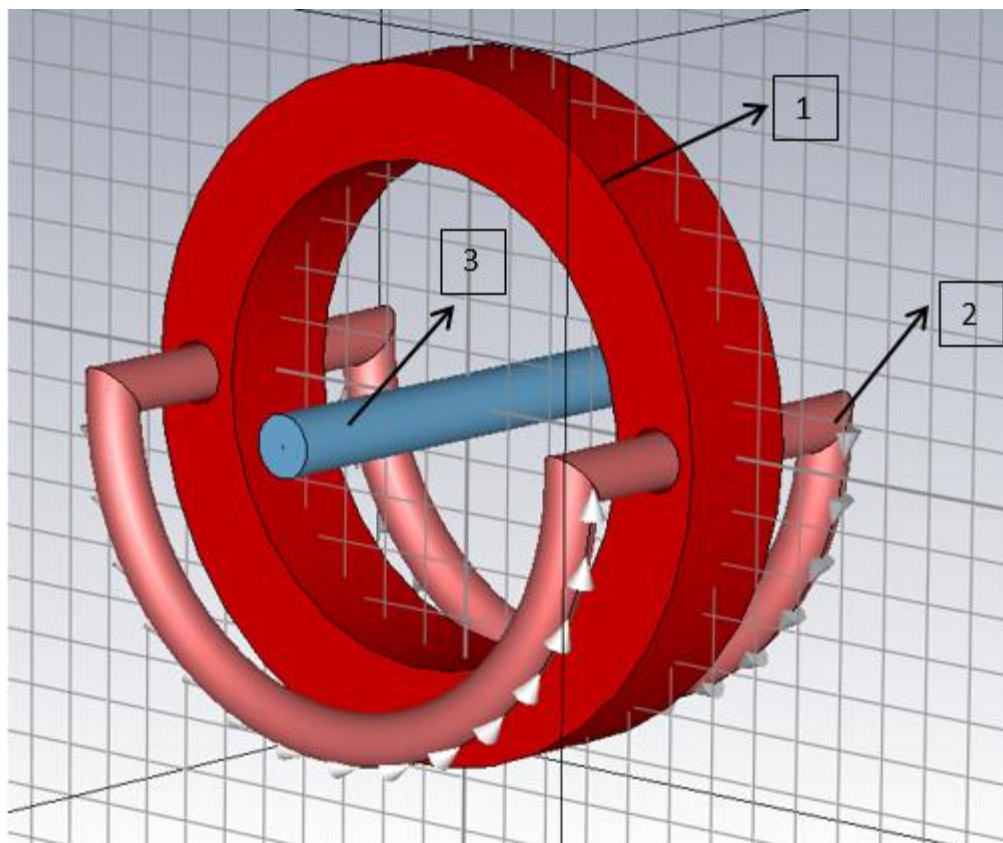


Figura 30. Ilustración del estator

1. Estator (Hierro)
2. Bobinado
3. Medidor de densidad de campo magnético

Para el bobinado del estator se simula una sola fase en un parámetro concentrado, donde se evalúa la densidad de campo en una sola dirección.

5.1.4 Validación. Una de las principales etapas de un estudio de simulación es la validación. A través de esta etapa es posible detallar deficiencias en la formulación del modelo o en los datos alimentados al modelo.

La figura 31 muestra la densidad de campo evaluada por el software

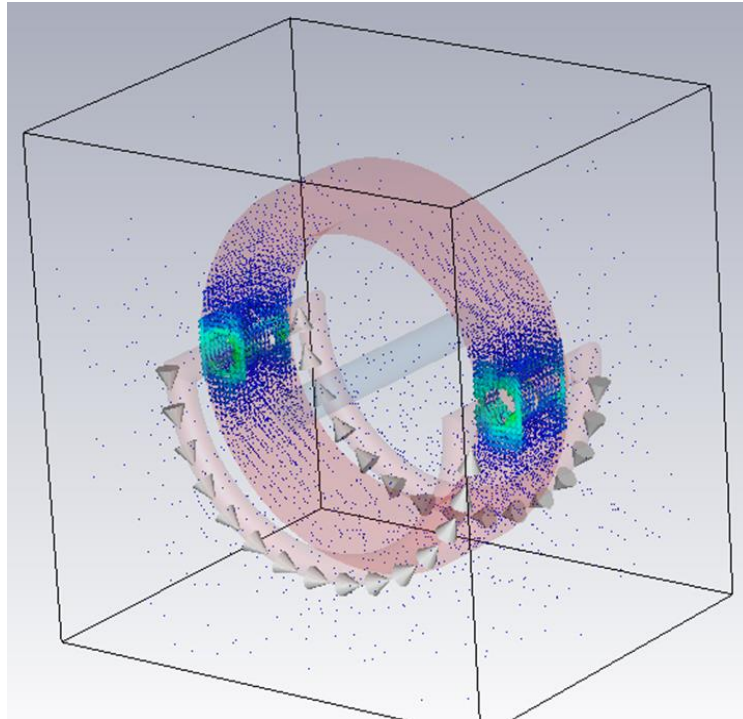


Figura 31. Densidad de campo magnético en el estator, producido por su bobinado

En la figura 32 muestra un instante de la simulación a 60 Hz , observando el comportamiento dinámico de las líneas de campo magnético

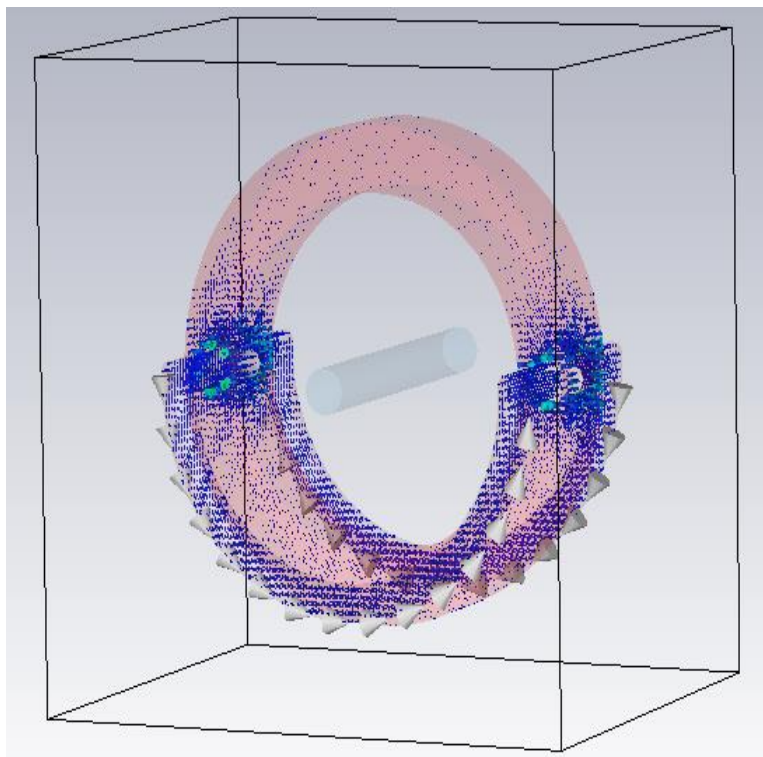


Figura 32. Componente en tiempo real 2

5.1.5 Interpretación. Los resultados que se obtienen de un estudio de simulación ayudan a soportar decisiones del tipo semi-estructurado, es decir, la computadora en sí no toma la decisión, sino que la información que proporciona ayuda a tomar mejores decisiones y por consiguiente a obtener mejores resultados de forma sistemática.

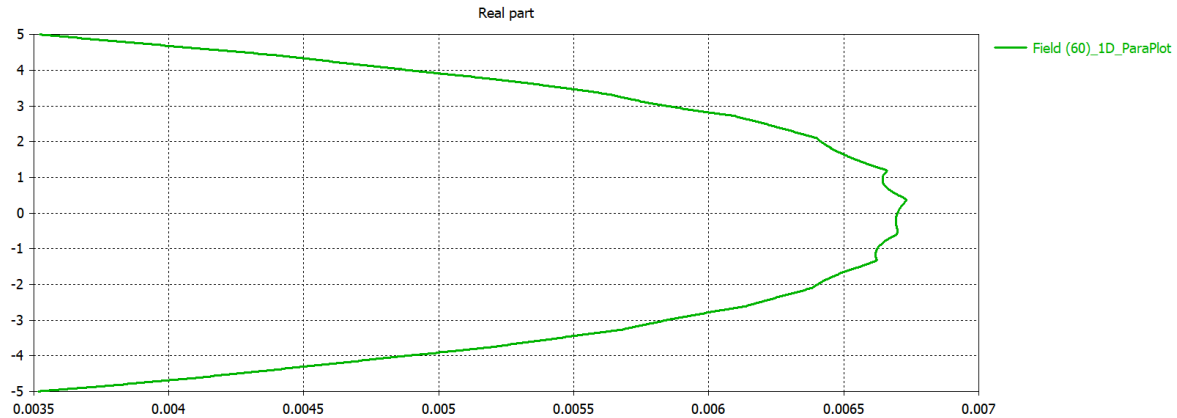


Figura 33. Densidad de campo magnetico en el estator

Con base a estos resultados vistos en figura 33 se pudo interpretar que la máxima intensidad de campo se da en el punto medio del estator, dando 0.0068 teslas aproximadamente.

5.2 Procesos de Simulación para las bobinas de Helmholtz.

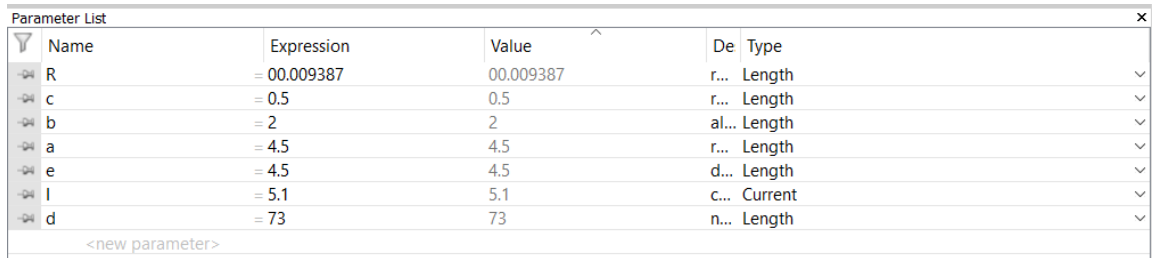
Teniendo la densidad de campo magnético generado por el bobinado en la corona, encontrada en la simulación anterior, se comienza a simular las bobinas de Helmholtz.

Para esta simulación se debe tener en cuenta que la distancia entre centro de las bobinas debe ser igual a el radio de la bobina y así garantizar un campo homogéneo en el punto medio entre ellas; también, para la simulación se lleva a cabo el mismo procedimiento que se plantea en la simulación anterior, según Coss (2003).

5.2.1 Definición del sistema. Para tener una definición exacta del sistema que se desea simular, es necesario hacer primeramente un análisis preliminar del mismo, con el fin de determinar la interacción del sistema con otros sistemas, las restricciones del sistema, las variables

que interactúan dentro del sistema y sus interrelaciones, las medidas de efectividad que se van a utilizar para definir y estudiar el sistema y los resultados esperados del estudio.

Son necesarias las siguientes características mostradas en la figura 34 para modelar y simular las bobinas de Helmholtz.



Name	Expression	Value	De	Type
R	= 00.009387	00.009387	r...	Length
c	= 0.5	0.5	r...	Length
b	= 2	2	al...	Length
a	= 4.5	4.5	r...	Length
e	= 4.5	4.5	d...	Length
I	= 5.1	5.1	c...	Current
d	= 73	73	n...	Length
<new parameter>				

Figura 34. Parámetros para la construcción de las bobinas de Helmholtz

Parámetros que se introducen en el programa

R=resistencia de una vuelta

c= radio del alambre

b=altura de la bobina

a= radio

e= distancia entre centros

I=corriente

d= número de vueltas

5.2.2 Formulación del modelo. Una vez que están definidos con exactitud los resultados esperados del estudio, se procede a definir y construir el modelo con el cual se obtendrán los resultados deseados.

Con los parámetros anteriores es posible modelar las bobinas de Helmholtz, mostrada en la siguiente figura 35.



Figura 35. bobinas de Helmholtz

5.2.3 Implementación del modelo en la computadora. Con el modelo definido, se decide utilizar para ilustrar el devanado en CST STUDIO SUITE, procesarlo en la computadora y obtener los resultados deseados.

Esta simulación lleva como propósito hallar el número de vueltas necesarias para tener el mismo campo que el devanado, a partir de la densidad de campo magnético encontrada en la simulación anterior.

Con los parámetros anteriormente descritos en el inciso 1, se tienen las características principales para la construcción en el programa, y así tener una apreciación gráfica en la figura 36 de las bobinas de Helmholtz.

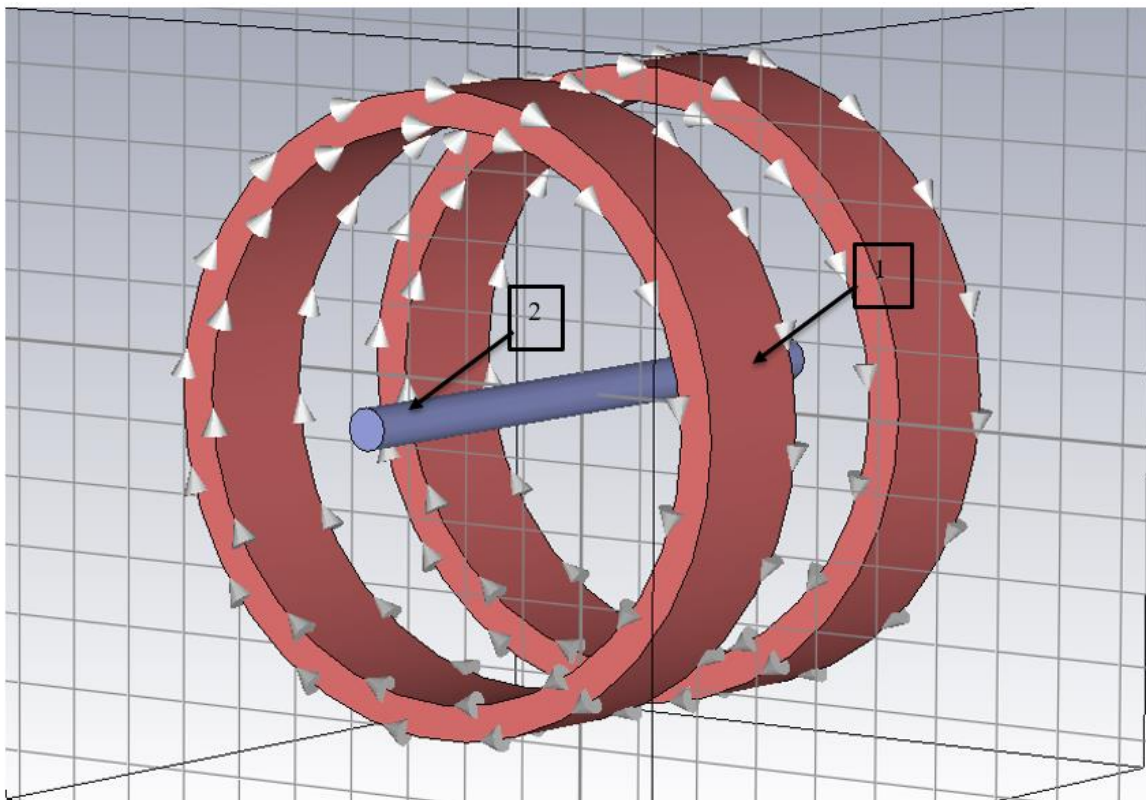


Figura 36. Simulación de las bobinas de Helmholtz

1. Bobinas de Helmholtz
2. Medidor de densidad de campo magnético

5.2.4 Validación. Una de las principales etapas de un estudio de simulación es la validación. A través de esta etapa es posible detallar deficiencias en la formulación del modelo o en los datos alimentados al modelo.

Para la validación se tomó como fuente el ejemplo Helmholtz Bobina, puesto por CST como referencia para hacer una adecuada simulación.

La figura 37 y figura 38 muestran en un instante de tiempo la densidad magnética y oscilación de campo magnético respectivamente.

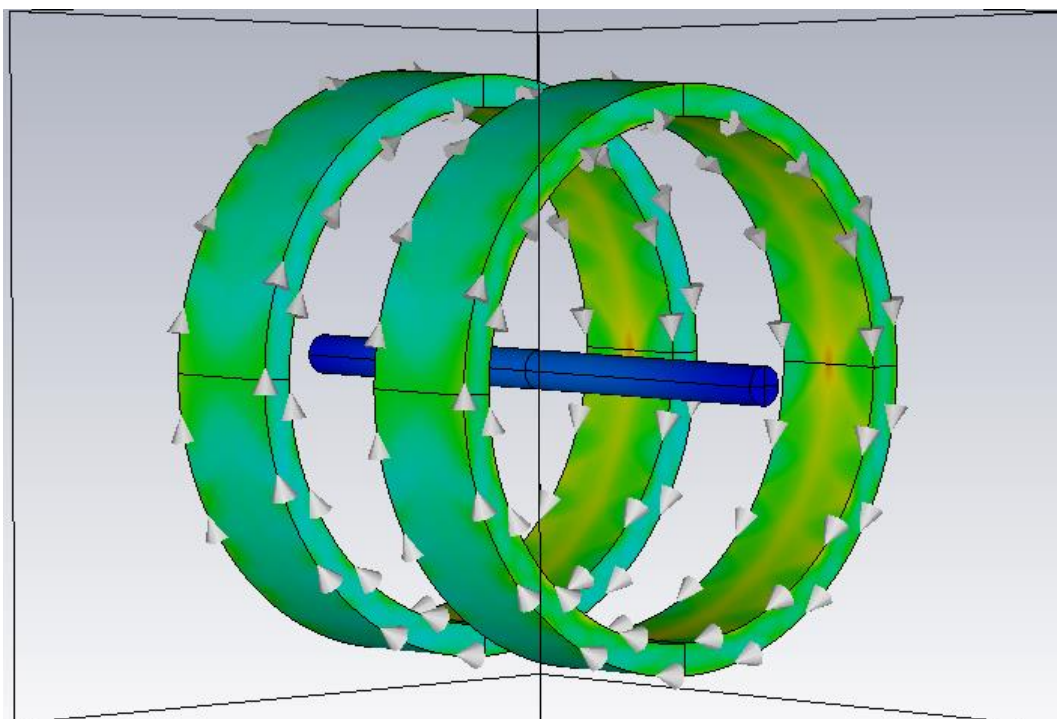


Figura 37. Simulación de bobinas de Helmholtz, densidad magnética

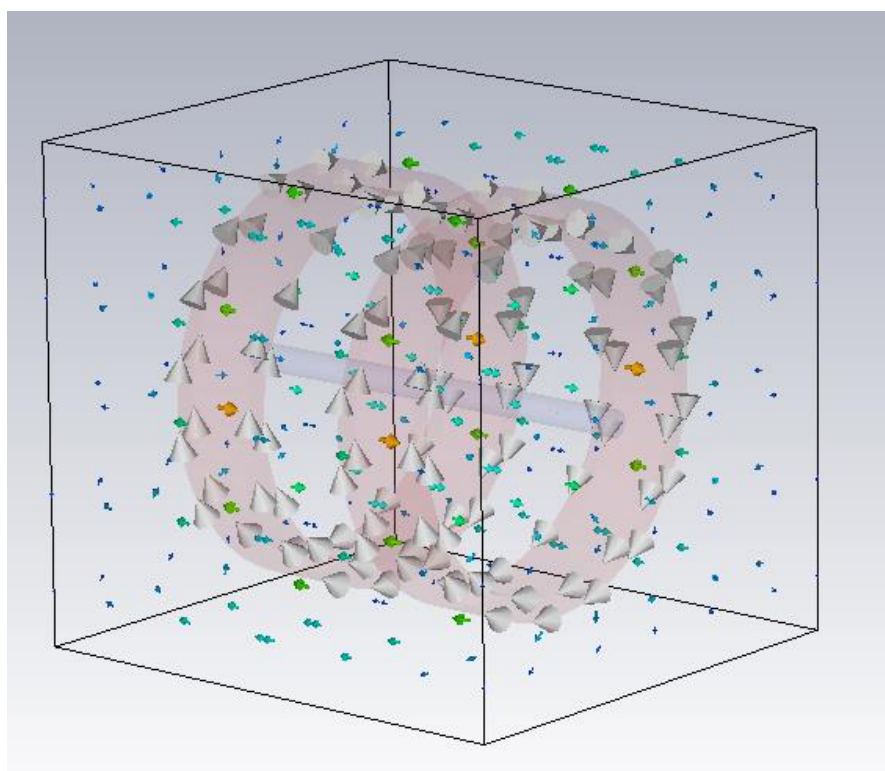


Figura 38. Oscilación del campo magnético

5.2.5 Interpretación. Los resultados que se obtienen de un estudio de simulación ayudan a soportar decisiones del tipo semi-estructurado, es decir, la computadora en sí no determina, sino, que la información que proporciona ayuda a tomar mejores opciones y por consiguiente a obtener mejores resultados de forma sistemática.

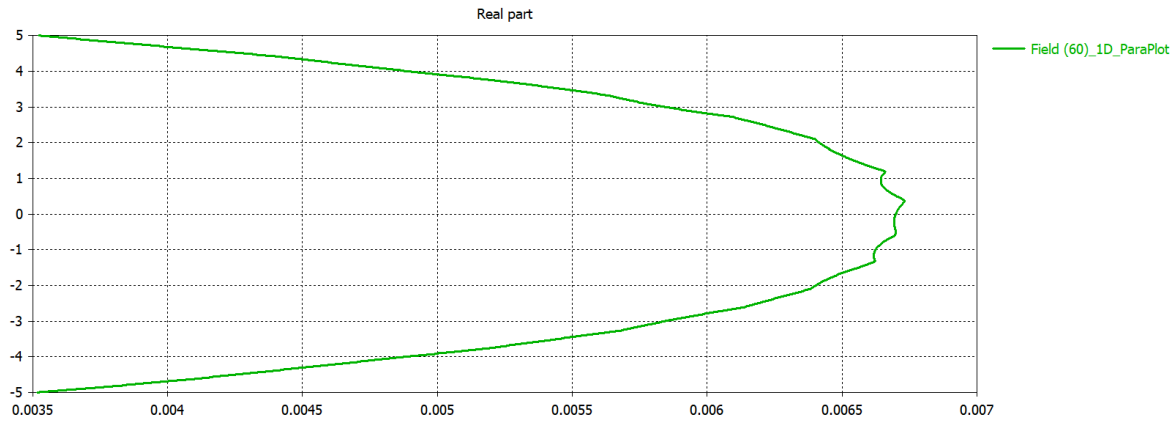


Figura 39. Densidad de campo magnético en el estator 2

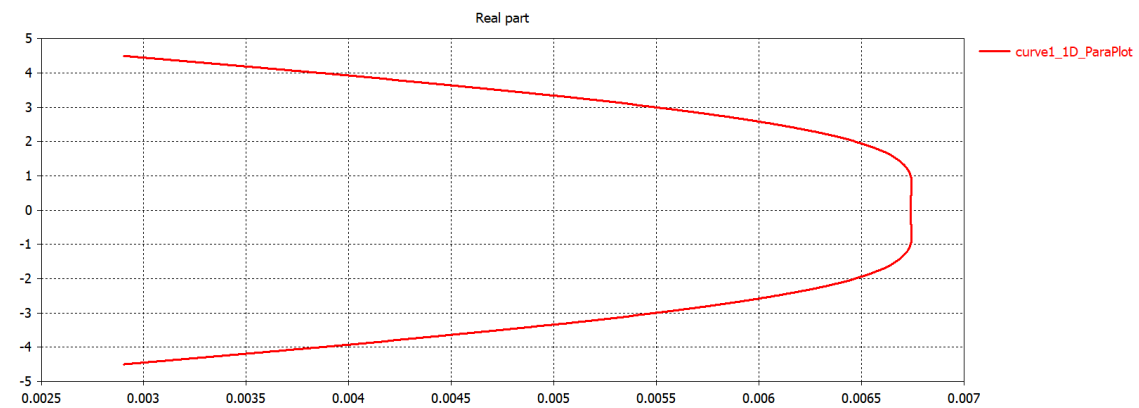


Figura 40. Densidad de campo magnético de las bobinas de Helmholtz

Al comparar las gráficas de las figuras 39 y 40 se puede notar una gran similitud en su forma y magnitud, por tanto, es el número de vuelta adecuado con una densidad de campo apropiada para las bobinas de Helmholtz.

El número de vueltas que cumple con la densidad de campo establecida por el bobinado del estator es 76 vueltas por bobina, cabe aclarar que se debe tener en cuenta un factor de corrección; debido a que la simulación anterior se concentra en una sola fase; entonces para la construcción se deben tener en cuenta las tres fases.

5.3 Ventajas de la simulación

La Técnica de la simulación es una de las herramientas más ampliamente usadas en el análisis de sistemas. Algunas de las ventajas según Coss (2003) son:

Mediante de un estudio de simulación se puede estudiar el efecto de cambios internos y externos del sistema, al hacer alteraciones en el modelo y observando los efectos de esas alteraciones.

Una observación detallada del sistema que se esté simulando, puede conducir a un mejor entendimiento del sistema y por consiguiente a sugerir estrategias que mejoren la operación y eficiencia del sistema

. La simulación de sistemas complejos puede ayudar a entender mejor la operación del sistema, detectando las variables más importantes que interactúan en el sistema, entendiendo las interrelaciones entre dichas variables.

Como punto de partida en la simulación, fue necesario profundizar acerca del programa CST STUDIO SUITE para lograr comprender su funcionamiento.

6. Análisis de resultados

Para determinar el cumplimiento de los objetivos propuestos en este proyecto, se han analizados los resultados mediante observaciones en el comportamiento del fluido, al ser sometido por ondas de campo magnético.

Se establece una conexión mostrada en la figura 41 vista como montaje en la imagen 8.

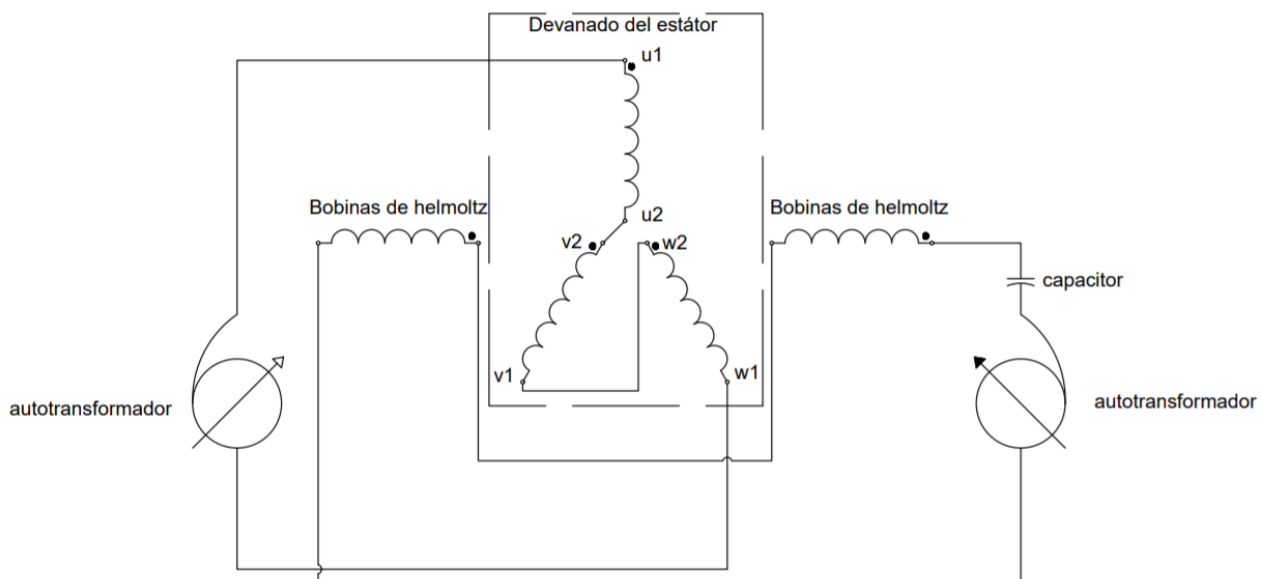


Figura 41. Esquema de conexión

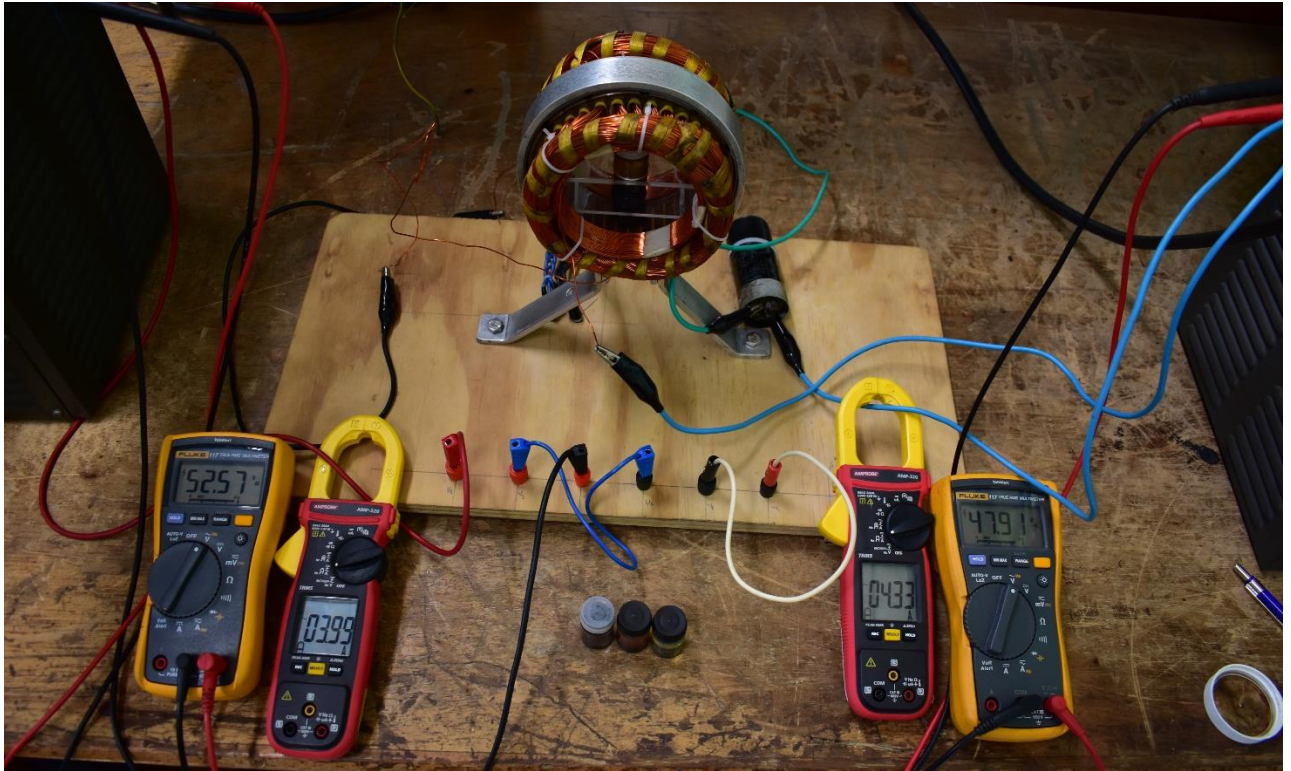


Figura 42. Montaje para las pruebas

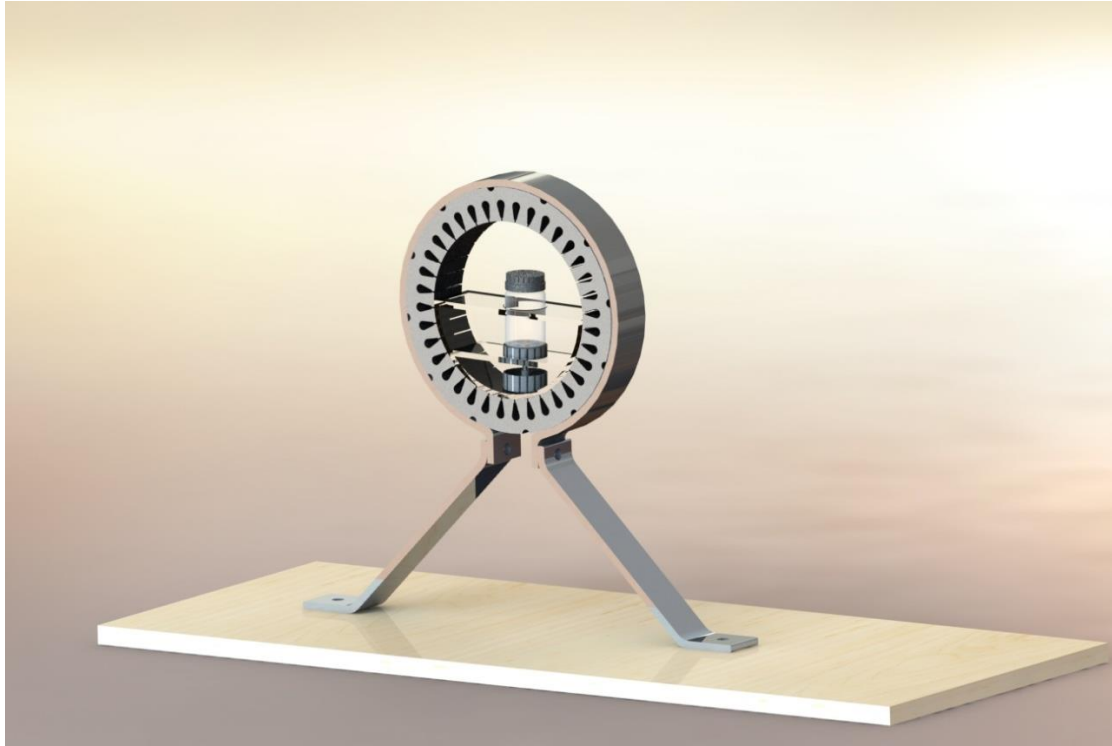


Figura 43 Ensamble

Las muestras fueron sometidas a dos campos magnéticos, causados por el desfase en adelanto generado por las bobinas de Helmholtz al conectarse un capacitor en serie con las mencionadas bobinas, con la ayuda de autotransformadores como fuentes de alimentación se ajustó tensión y corriente, con el fin de ejercer control e igualar ambas densidades de campo magnético.

Una vez ubicados los recipientes de manera individual en el centro del prototipo y determinada la polaridad de cada arrollamiento, se procede a energizar el prototipo de tal manera que las perillas de los autotransformadores se fueron variando gradualmente y ajustando, con la intención de obtener lecturas en las pinzas amperimétricas en intervalos de 0.5 [A] hasta llegar al valor límite de corriente eléctrica proporcionada por la capacidad del alambre de tipo esmaltado de cobre calibre AWG 21; del mismo modo, se limitó la duración de las pruebas a 2 minutos y cada prueba

se realizó en intervalos de 10 minutos con el fin de evitar llegar a la pérdida de aislamiento a raíz del sobrecalentamiento, ya que no se contó con un sistema de ventilación de aire forzado.

6.1 Prueba del 1% (0.05 ml) del material magnético



Figura 44. Concentración de 1%

En la concentración observada en la figura 44 Se observó que, cuando ambas pinzas amperimétricas marcaban valor de 1 [A], el material magnético empezó a tener un sutil giro en el sentido a las manecillas del reloj. La corriente se fue aumentando de acuerdo al procedimiento mencionado anteriormente hasta llegar al valor máximo de 4.5[A], durante dicho aumento el giro fue totalmente evidente, el material magnético giraba a mayor velocidad comparada con la primera apreciación y su sentido de giro se mantuvo.



Figura 45. Prueba al 1%

Al tomar lectura de los instrumentos de medida, se tiene un comportamiento casi lineal para ambos valores de tensión, como se muestra en la gráfica 1 para tensión en el estator, y gráfica 2 para tensión en las bobinas de Helmholtz.

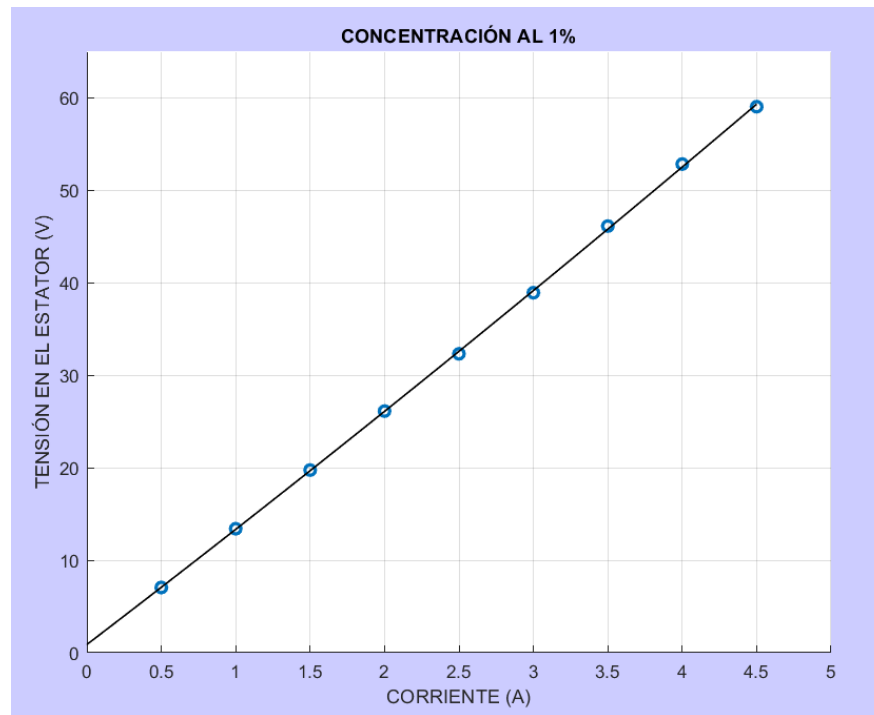


Figura 46. Concentración del 1%, tensión en el estator

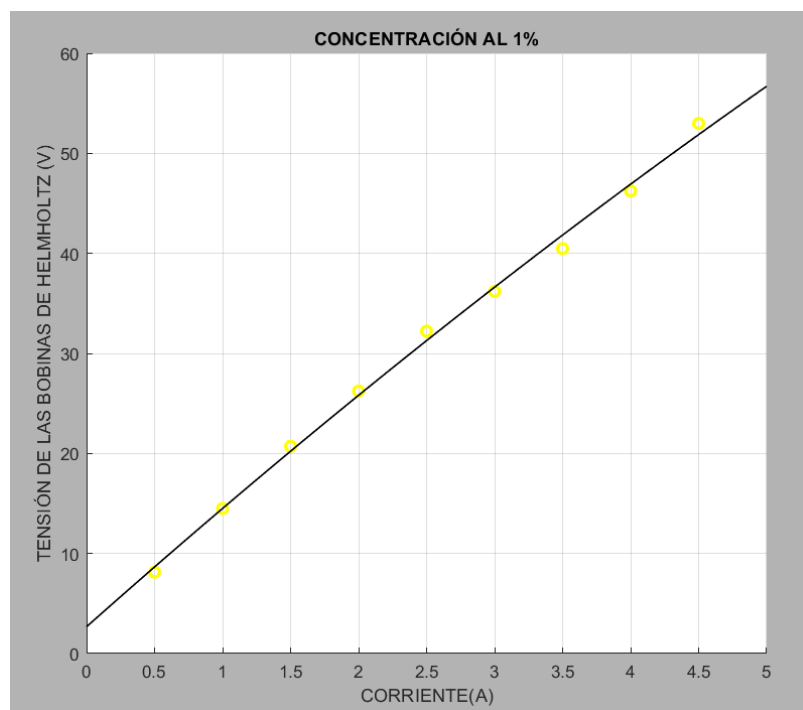


Figura 47. Concentración del 1%, tensión en las bobinas de helmholtz

6.2 Prueba del 12% (0.6 ml) del material magnético



Figura 48. Concentración al 12%

En la concentración observada en la figura 46 se observó que, cuando ambas pinzas amperimétricas marcaban valor de 1.5 [A], el material magnético situado en la superficie de la mezcla empezó a tener un sutil giro en el sentido a las manecillas del reloj. La intensidad de corriente se fue aumentando de acuerdo al procedimiento mencionado anteriormente hasta llegar al valor máximo de 4.5[A], gran parte del material magnético giraban en el mismo sentido a la primera apreciación.

Simultáneamente se observó que algunas partículas se situaban en la parte alta del recipiente y giraban en dirección contraria a la mayoría, también fue evidente que la velocidad fue aumentado una vez aumentada la corriente.

De igual manera se puede apreciar la caracterización de esta concentración, donde se puede observar el comportamiento lineal para la tensión en el estator y las bobinas de Helmholtz vistas en las gráficas 3 y 4 respectivamente.

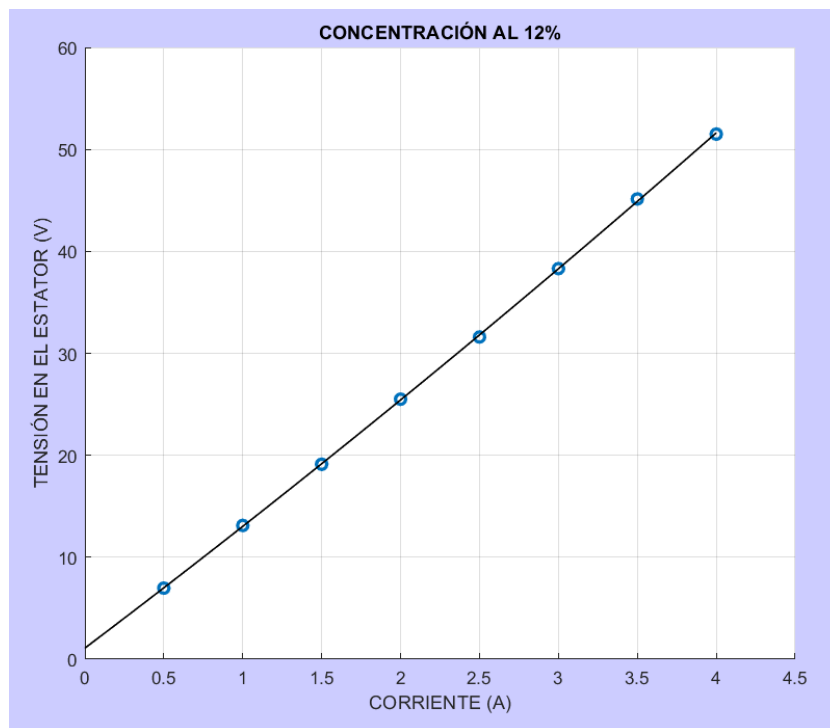


Figura 49. Concentración del 20 %, tensión en el estator

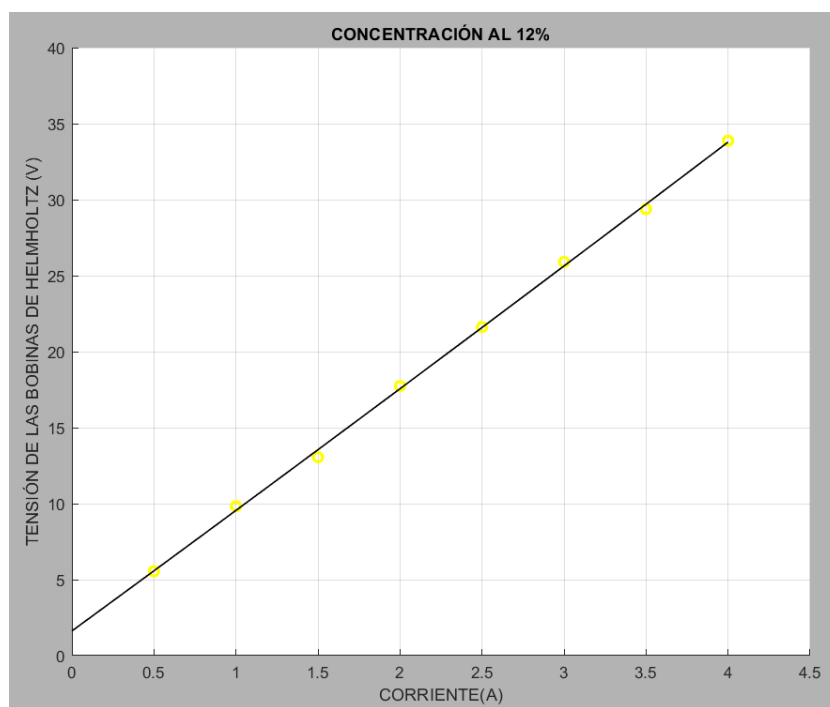


Figura 50. Concentración al 12%, tensión en las bobinas de Helmholtz

6.3 Prueba del 20% (1 ml) del material magnético



Figura 51. Concentración al 20%

En la concentración observada en la figura 47 se observó que, cuando ambas pinzas amperimétricas marcaban valor de 2 [A], el material magnético situado en la superficie de la mezcla empezó a tener un sutil giro en el sentido a las manecillas del reloj. La corriente se fue aumentando de acuerdo al procedimiento mencionado anteriormente hasta llegar al valor máximo de 4.5[A], gran parte del material magnético giraban en el mismo sentido a la primera apreciación.

Simultáneamente se observó que algunas partículas se situaban en la parte alta del recipiente y giraban en dirección contraria a la mayoría, también fue evidente que la velocidad fue aumentado una vez aumentada la corriente.

El comportamiento que se describe en las gráficas 5 y 6 conduce a ser lineal.

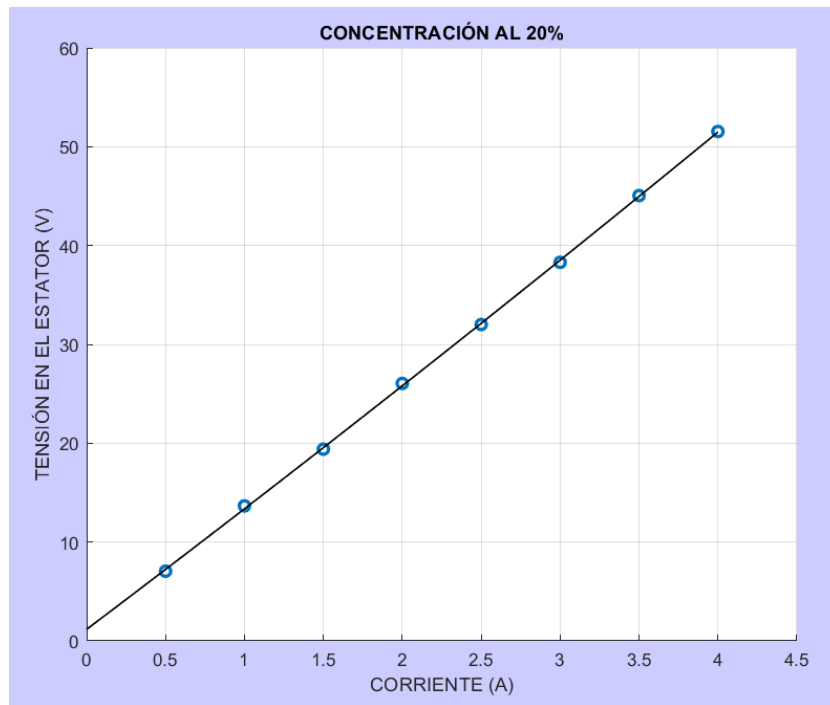


Figura 52. Concentración al 20%, tensión en el estator

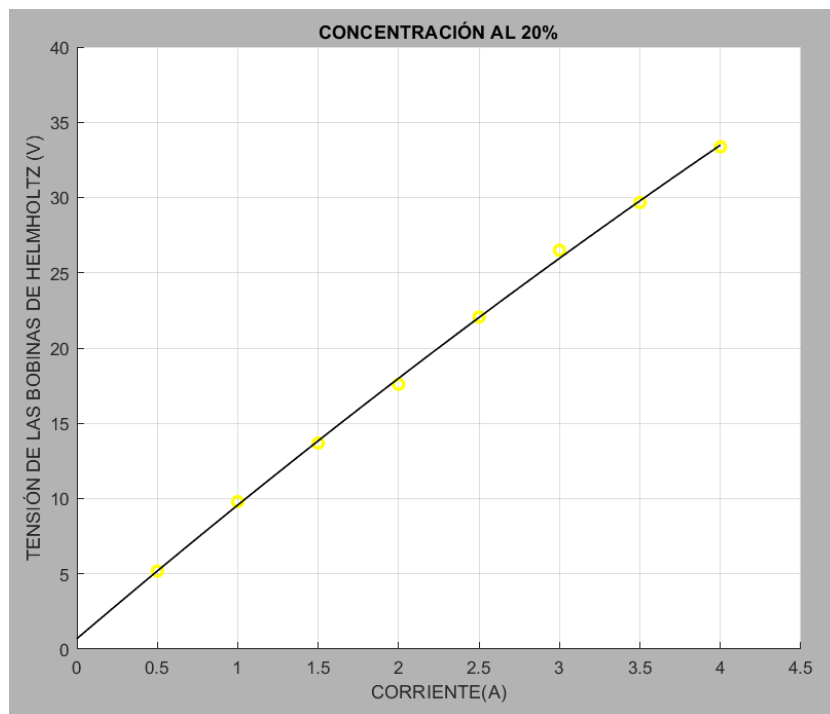


Figura 53. Concentración al 20%, tensión en las bobinas de helmholtz

6.4 Prueba de rotor bloqueado y vacío



Figura 54. Rotor bloqueado

Para las pruebas de rotor bloqueado y vacío mostrado en la figura 48, se tiene que para rotor bloqueado la obstrucción del movimiento de las partículas de tal forma que necesite muchísima más corriente de alimentación para generar un campo magnético capaz de moverlas, lo anterior conlleva a que los parámetros eléctricos visibles en los instrumentos de medidas no incidan ni sean afectados puesto estas variables son independientes del comportamiento del rotor.

Para las pruebas se tomó como base el procedimiento descrito en la práctica 19 del manual de laboratorio de máquinas eléctricas del ingeniero Luis Alfonso Diaz.

7. Conclusiones

Con los objetivos cumplidos del trabajo de grado y con los resultados obtenidos en las pruebas se puede concluir lo siguiente:

Al determinar pruebas de vacío y rotor bloqueado no se logra ninguna apreciación, debido a que no se tiene ninguna alteración sobre las variables eléctricas, puesto el fluido que actúa como rotor no convencional tiene cierto grado de independencia, ya que se tiene un entrehierro considerable en comparación del estator y la muestra del fluido es considerablemente pequeña para acumular la suficiente energía para alterar visiblemente los parámetros eléctricos, por ende, como se puede observar en todas la gráficas, se tienen valores de tensiones muy parecidos para una corriente específica , esto entrega como tercera conclusión que la única variable visible es el comportamiento del fluido magnetorreológico, declarando que entre más concentración se tenga, más campo magnético se necesita para romper la inercia de las partículas.

Se implementó como devanado adicional al del estator bobinas de Helmholtz las cuales proporcionaron un campo magnético perpendicular al campo del estator. Haciendo uso de un capacitor conectado en serie se desfase en adelante el campo con el propósito de crear ondas de campo espacial rotativa al momento de interactuar con el campo magnético del estator, viendo esto reflejado en el comportamiento del fluido magnetorreológico al interior del recipiente.

Mediante una correcta elección del fluido portador a partir de su viscosidad repercute en menor gasto de energía para genera campo magnético.

La elección de aceites de baja viscosidad y la intensidad del campo magnético influye notablemente sobre el comportamiento y los resultados de las pruebas realizadas.

8. Observaciones

- Un factor determinante para el desarrollo adecuado ha sido la correcta elección del software CST STUDIO SUITE ya que permitió la comprobación de cálculos de una forma práctica y sencilla.
- La simulación se construye en una herramienta para dar una representación real del modelo, en el cual fue posible ajustar cambios eventuales y así aprovechar mejor los recursos.
- Al momento de utilizar aceite mineral y aceite dieléctrico como fluido portador, fue imposible poder apreciar movimiento debido a su alta viscosidad. Las densidades de campo magnéticos proporcionadas por los arrollamientos del prototipo no fueron suficientes para romper la inercia del material magnético, por ende, se buscó otras alternativas para el fluido portador, las cuales condujo como mejor opción para nuestro uso el aceite combustible para motor (ACPM) por su fácil adquisición, su apariencia incolora y su baja viscosidad en comparación con los aceites ya mencionado.

Referencias Bibliográficas

Álvarez. J (2009). Motores de inducción

Chapman, S.2012. Máquinas eléctricas, quinta edición. BAE systems Australia:

Fraile, J. (2003). Máquinas eléctricas, quinta edición. Aravaca Madrid, España: concepción Fernández Madrid.

Guru, B. (2003). Máquinas eléctricas y transformadores, tercera edición, New York, U.S.A: OXFORD University Press, traducido en México.

Hajalilou, A., Amri Mazlan, S., Lavvafi, H., Shameli, K.(2016). Field Responsive Fluids as Smart Materials ,SPRINGER

Harper, G. 2004. EL ABC DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS, México D.F: editorial limusa, S.A de C.V grupo noriega editores.

Jonathan E. Williams. (2014). Measuring *Earth's Local Magnetic Field Using a Helmholtz Coil*. The Physics Teacher.

McGrawHill interamericana editores S.A.

Rodriguez, A. (2010). Construcción de las Máquinas eléctricas, departamento de ingeniería eléctrica y energía , España: Universidad de Cantabria.