

Prototipo toroidal con fluido magnetorreológico sometido a campos magnéticos

Yilmar Pedrozo Argüello

Ludwing Gómez Barrera

Trabajo presentado como requisito para optar el título de Ingeniero Electricista

Director:

Hermann Raúl Vargas Torres

Doctor Ingeniero Electricista

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Bucaramanga

2019

Dedicatoria

Este trabajo de grado se lo dedico en primer lugar a Dios, el cual me lleno de Fe, esperanza y fuerza para seguir adelante en este proceso.

A mis padres Juvenal Pedrozo y Josefina Arguello que siempre me han apoyado y guiado incondicionalmente llenándome de oportunidades.

Mis hermanos, especialmente Tania y Yeraldo quienes me brindaron su ayuda y apoyo en todo momento. Gracias familia por su paciencia y nunca dejarme solo en este camino.

A mis compañeros y amigos que siempre me brindaron una voz de aliento, de fuerza y esperanza para seguir, se culmina una etapa más, pero la vida continúa y estaré siempre agradecido por la oportunidad de conocer a cada uno de ellos

Yilmar Pedrozo Argüello

Este trabajo de grado lo dedico a mis padres, María I. Barrera Hernández y Ludwing Gómez Forero quienes fueron mi motor y apoyo incondicional para nunca decaer y siempre salir adelante pese a las dificultades que día a día se me presentaron.

A mis hermanas, Natalia Esperanza y María Camila porque su ayuda fue fundamental durante toda la carrera, sin ustedes nada de esto hubiese sido posible.

Ludwing Gómez Barrera

Agradecimientos

A Dios por guiarme y ayudarme durante toda mi vida y en especial durante mi desarrollo como ingeniero.

Al Dr Hermann Raúl Vargas Torres, director del trabajo de grado, por su dirección y asesoría las cuales hicieron posible la realización de este proyecto de grado

Al Phd Carlos Rodrigo Correa Cely, y al estudiante de doctorado en metalurgia Manuel Roa Ardila, por la ayuda brindada en el desarrollo del proyecto de grado.

A compañeros de estudio que me brindaron su apoyo y conocimiento durante toda la carrera haciendo lograr las metas cada semestre.

Yilmar Pedrozo Argüello

Quiero agradecer a Dios y a mis padres María I. Barrera y Ludwing Gómez por su gran amor y confianza en mí.

Al Dr. Hermann Raúl Vargas Torres por su apoyo y conocimientos en la realización de este trabajo de grado.

Al Phd Carlos Rodrigo Correa Cely, y al estudiante de doctorado en metalurgia Manuel Roa Ardila, por el apoyo y conocimiento brindados en el desarrollo del proyecto de grado.

A mi tío Luis Arturo Gómez Forero y su Sra. Lilian E. Montagut quienes muy amablemente me brindaron la hospitalidad durante la trayectoria de mi carrera.

Ludwing Gómez Barrera

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	17
1. Objetivos	17
1.1 Objetivo general	17
1.2 Objetivos específicos	18
2. Motor de inducción monofásico.....	18
2.1 Arranque de motores monofásicos por capacitor	20
3. Fluido magnetorreológico	21
3.1 Definición.....	21
3.2 Características de un fluido magnetorreológico	22
3.2.1 Partículas magnéticas.	22
3.2.2 Fluido portador.	23
3.2.3 Aditivos.	24
3.3 Propiedades magnéticas	24
3.4 Aplicaciones	25
4. Estimación de las densidades de campo magnético con el software CST Studio Suite	26
4.1 Densidad de campo magnético en la bobina de campo.....	27
4.1.1 Etapa de modelado del núcleo ferromagnético.	27
4.1.2 Etapa de modelado de los segmentos de bobina.	28

4.2 Densidad de campo magnético en el solenoide.....	30
4.3 Generación de una onda de campo espacial rotacional.....	32
4.4 Validación de los resultados obtenidos en las simulaciones	33
5. Aspectos constructivos del prototipo	35
5.1 Elaboración del recipiente.....	35
5.2 Bobinas de campo	38
5.3 Soportes para la bobina de campo.....	38
5.4 Construcción de solenoides.....	39
5.5 Selección del capacitor.....	40
5.6 Ensamble final.....	40
6. Preparación de los fluidos magnetorreológicos.....	42
6.1 Selección de las partículas magnéticas	42
6.2 Selección del fluido portador y aditivo	43
6.3 Elaboración de las muestras	44
7. Pruebas realizadas al prototipo.....	45
7.1 Alimentación del prototipo	45
7.2 Prueba para visualizar movimiento del fluido magnetorreológico	47
8. Observaciones y conclusiones.....	51
Referencias Bibliográficas	53
Anexos.....	55

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Validación de los resultados obtenidos en la bobina de campo	34
Tabla 2 Validación de los resultados obtenidos en el solenoide	35
Tabla 3 Características del capacitor seleccionado	40
Tabla 4 Elementos de medición usados en las pruebas.....	46
Tabla 5 Tipos de Alimentación Para el Prototipo	47
Tabla 6 Datos experimentales para la muestra X.....	48
Tabla 7 Datos experimentales para la muestra Y	49
Tabla 8 Densidades de campo magnético en el centro de cada conjunto de bobinas para la muestra X	50
Tabla 9 Densidades de campo magnético en el centro de cada conjunto de bobinas para la muestra Y	50

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Motor asíncrono monofásico	19
Figura 2 Motor de inducción con capacitor	20
Figura 3 Característica par-velocidad del motor	21
Figura 4 Propiedades magnéticas del fluido MRF-132DG	25
Figura 5 Bobina de campo	26
Figura 6 Croquis de la vista frontal de la bobina de campo	27
Figura 7 Croquis de la bobina de campo extruida.....	27
Figura 8 Grupo de bobinas de la bobina de campo	28
Figura 9 Modelado total de la bobina de campo	28
Figura 10 Líneas de campo magnético de la bobina de campo.....	29
Figura 11 Densidad de campo magnético en el entrehierro de la bobina de campo	29
Figura 12 Dimensionamiento del solenoide en CST Studio Suite	30
Figura 13 Vista isométrica del solenoide en CST Studio Suite	30
Figura 14 Líneas de campo magnético en el solenoide.....	31
Figura 15 Densidad de campo magnético en el interior del solenoide	32
Figura 16 Bobina de campo con solenoide en el entrehierro	32
Figura 17 Onda de campo espacial rotacional	33
Figura 18 Medición de densidades de campo magnético al prototipo	34
Figura 19 Diseño del recipiente en SolidWorks	36
Figura 20 Proceso de termoformado en las piezas de acrílico	36

Figura 21 Proceso de unión de las piezas del recipiente	37
Figura 22 Recipiente del prototipo.....	37
Figura 23 Soportes para las bobinas de campo	38
Figura 24 Proceso de construcción del solenoide	39
Figura 25 Solenoides ya contruidos.....	39
Figura 26 Capacitor para desfasar corriente entre devanados.....	40
Figura 27 Prototipo ensamblado	41
Figura 28 Ensamble del prototipo hecho en SolidWorks.....	41
Figura 29 Magnetita	42
Figura 30 Muestra de ACPM	43
Figura 31 Surfactante liquido	43
Figura 32 Probetas volumétricas utilizadas en la elaboración del fluido magnetorreológico..	44
Figura 33 Muestras del fluido magnetorreológico	45
Figura 34 Esquema de conexión para alimentar el prototipo.....	46
Figura 35 Señal generada para una corriente de 3,2 A en la bobina de campo.....	55
Figura 36 Señal generada para una corriente de 4 A en la bobina de campo.....	56
Figura 37 Señal generada para una corriente de 2,4 A en el solenoide.....	58
Figura 38 Señal generada para una corriente de 8 A en el solenoide.....	59

Lista de Anexos

	Pág.
Anexo A: Calculo del valor rms para la medida realizada en la bobina de campo	55
Anexo B: Calculo del valor rms para la medida realizada en el solenoide	58

Resumen

TÍTULO: Prototipo toroidal con fluido magnetorreológico sometido a campos magnéticos*.

AUTORES: Yilmar Pedrozo Argüello, Ludwing Gómez Barrera**

PALABRAS CLAVE: Fuerza magnetomotriz, densidad de campo magnético, par de arranque, viscosidad, sedimentación.

DESCRIPCION:

En este documento se presenta el desarrollo de un prototipo toroidal con un núcleo que emplea fluidos magnetorreológicos con el fin de observar el comportamiento de estos fluidos al ser sometidos a campos magnéticos externos. El prototipo contempla el diseño y construcción de un recipiente fabricado en lámina de acrílico transparente en donde se pueda almacenar el fluido magnetorreológico, así como también la implementación de cuatro pares de bobinas externas al recipiente en el que cada par induce campos magnéticos ortogonales entre sí, generando una onda de campo espacial giratoria en el interior del recipiente que provoque un torque magnético en las partículas que componen el fluido magnetorreológico, ocasionando esto el movimiento del fluido a través del recipiente. Haciendo uso del software CST Studio Suite, se simuló las bobinas implementadas, caracterizando las bobinas para que logren generar densidades de campo magnético similares.

Se realizan pruebas de laboratorio al prototipo para observar el comportamiento de tres concentraciones distintas de fluido magnetorreológico ante la aplicación de diferentes densidades de campos magnéticos, y así determinar los valores de tensión y de intensidades de corriente a los cuales el fluido presenta un mayor movimiento en el interior del recipiente. Los fluidos magnetorreológicos fueron obtenidos de magnetita diluida en aceite combustible para motores y con la utilización de un surfactante líquido para prevenir la sedimentación del fluido.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones
Director Hermann Raúl Vargas Torres

Abstract

TITLE: Toroidal prototype with magnetorheological fluid subjected to magnetic fields *.

AUTHORS: Yilmar Pedrozo Argüello, Ludwing Gómez Barrera. **

KEY WORDS: Magnetizing strength, magnetic field density, starting torque, viscosity, sedimentation.

DESCRIPTION:

This document presents the development of a toroidal prototype with a nucleus that uses magnetorheological fluids in order to observe the behavior of these fluids when subjected to external magnetic fields. The prototype contemplates the design and construction of a container made of transparent acrylic sheet where the magnetorheological fluid can be stored, as well as the implementation of four pairs of coils outside the container in which each pair induces orthogonal magnetic fields to each other, generating a rotating spatial field wave inside the vessel that provokes a magnetic torque in the particles that compose the magnetorheological fluid, causing this movement of the fluid darts of the container. Using the CST Studio Suite software, the implemented coils were simulated, characterizing the coils so that they could generate similar magnetic field densities.

Laboratory tests are carried out to the prototype to observe the behavior of three different concentrations of magnetorheological fluid before the application of different densities of magnetic fields, and thus determine the values of voltage and intensities of current to which the fluid has a greater movement inside the container. Magnetorheological fluids were obtained from magnetite diluted in engine fuel oil and with the use of a liquid surfactant to prevent fluid sedimentation.

* Project of grade

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering School of Electrical, electronics and telecommunications
Director Hermann Raúl Vargas Torres

Introducción

En la actualidad se está presentando un gran desarrollo de los denominados materiales inteligentes. Estos materiales se caracterizan porque algunas de sus propiedades experimentan un cambio en función de un estímulo externo, por lo anterior, se propone como trabajo de grado, desarrollar un prototipo toroidal con un núcleo que emplee fluidos magnetorreológicos y así observar el comportamiento de estos fluidos al ser sometidos a campos magnéticos.

Para la construcción del prototipo se busca crear un recipiente en el que se le pueda alojar 2 pares de bobinas de campo, 2 pares de solenoides y un capacitor conectado en serie con estos últimos, para generar una onda de campo espacial rotacional que proporcione un torque magnético a las partículas que componen el fluido magnetorreológico y esto provoque un movimiento a través del recipiente.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Diseñar y construir un prototipo con núcleo dispuesto a la observación del efecto de un campo magnético giratorio en un fluido magnetorreológico

1.2 Objetivos específicos

- Diseñar un recipiente transparente en donde se pueda almacenar el fluido magnetorreológico. (Ver pag.36)
- Construir un recipiente transparente en donde se pueda almacenar el fluido magnetorreológico. (Ver pag.37)
- Elaborar fluidos magnetorreológicos obtenidos a partir de elementos de uso comercial. (Ver pag.45)
- Implementar cuatro pares de bobinas externas que induzcan campos magnéticos ortogonales entre sí. (Ver pag.41)
- Someter el prototipo a pruebas de laboratorio donde se analizará su comportamiento, usando diferentes concentraciones de fluidos magnetorreológicos. (Ver pag.4545)

2. Motor de inducción monofásico

Básicamente, un motor de inducción monofásico está formado por un rotor en jaula de ardilla análogo a los motores trifásicos y un estator en el que se dispone un devanado alimentado por corriente alterna monofásica. Normalmente se construyen con potencias inferiores a 1 CV y por

ello reciben también el nombre de motores fraccionarios. El campo de aplicación está muy restringido y se limita en su mayoría a las instalaciones domésticas: lavadoras, ventiladores, tocadiscos, etc. En la Figura 1 se muestra el esquema de conexión básico. Al introducir una corriente alterna en el devanado del estator se produce una fuerza magnetomotriz en el entrehierro, distribuida senoidalmente en el espacio y de carácter pulsatorio. (Fraile Mora)

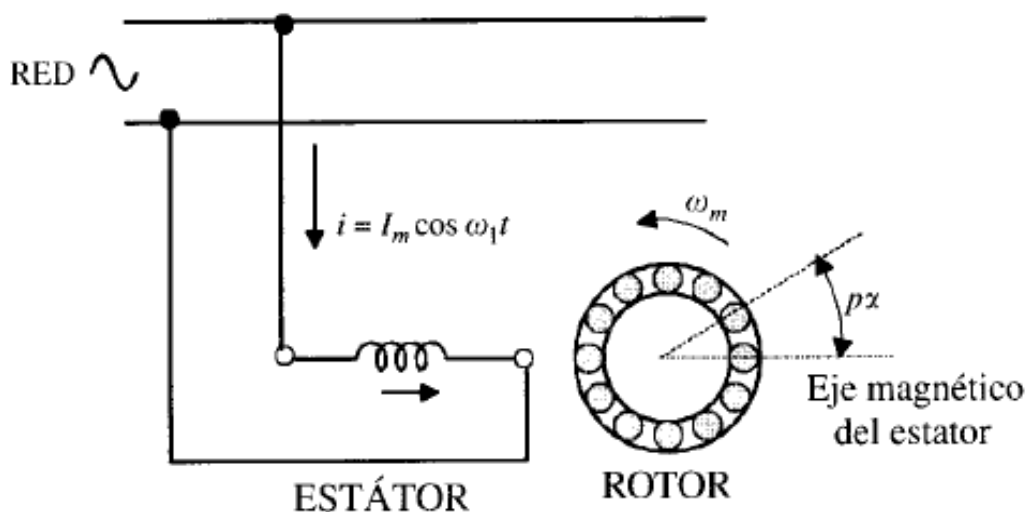


Figura 1 Motor asíncrono monofásico

Adaptado de Fraile Mora, J. (s.f.). *Máquinas Eléctricas*. España: Mc Graw Hill.

La fuerza magnetomotriz anterior produce un campo magnético proporcional en el entrehierro, el cual induce a su vez corrientes en el rotor, como si fuera el 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 opuestas 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 monofásico y por ello esta máquina no puede arrancar por sí misma. (Fraile Mora)

2.1 Arranque de motores monofásicos por capacitor

Como ya se explicó, un motor de inducción monofásico no tiene un par de arranque intrínseco. Hay tres técnicas que se usan comúnmente para hacer arrancar estos motores, los cuales se clasifican de acuerdo con los métodos que se utilizan para producir su par de arranque. Estas técnicas de arranque difieren entre sí en costo y en la cantidad de par de arranque que producen. Por lo regular, un ingeniero emplea la técnica menos cara que cumpla con los requerimientos de par de una aplicación dada. Estas tres técnicas de arranque principales son devanados de fase partida, devanados tipo capacitor, polos de estator sombreados. (Chapman)

En un motor de arranque por condensador se incluye un condensador en serie con el devanado auxiliar (Figura 2). 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 con respecto de la corriente en el devanado auxiliar exactamente en 90° . Por tanto, el par de arranque desarrollado por un motor con condensador puede ser tan alto como el de un motor polifásico (Figura 3). (Guru & Hiziroglu)

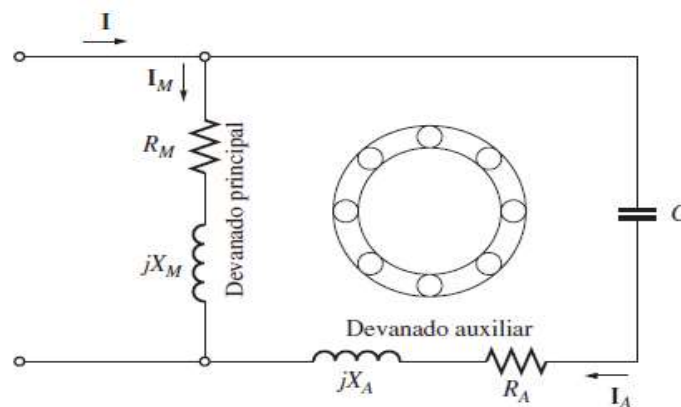


Figura 2 Motor de inducción con capacitor

Adaptado de Chapman, S. J. (s.f.). *Máquinas Eléctricas*. México: Mc Graw Hill

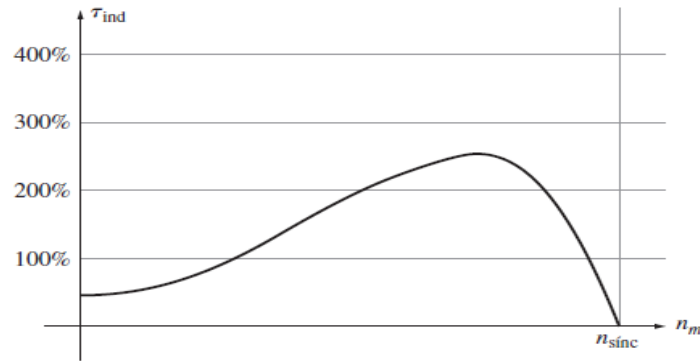


Figura 3 Característica par-velocidad del motor

Adaptado de Chapman, S. J. (s.f.). *Máquinas Eléctricas*. México: Mc Graw Hill.

Los motores de arranque por capacitor son más caros que los motores de fase partida y se utilizan en aplicaciones donde es indispensable un alto par de arranque. Las aplicaciones típicas de este tipo de motores son compresores, bombas, equipos de aire acondicionado y otras piezas de equipo que deben arrancar con una carga. (Chapman)

3. Fluido magnetorreológico

3.1 Definición

Los fluidos magnetorreológicos son un tipo de material inteligente cuyas características cambian rápidamente y se puede controlar fácilmente mediante la aplicación de un campo magnético externo. El cambio es proporcional a la intensidad del campo magnético aplicado, que puede ser controlado con alto grado de precisión mediante la variación de dicha intensidad y es inmediatamente reversible después de remover el campo. Los cambios físicos pueden ser bastante

sustanciales, convirtiendo un fluido de baja viscosidad en una sustancia mucho más viscosa, casi sólida (Arteaga López, 2017). “A diferencia de los fluidos magnéticos, los materiales magnetorreológicos consisten en partículas magnéticas de tamaño micrométrico entre 3 y 5 micras e igualmente suspendidas en un medio no magnético” (Cadena Pérez, 2010) y en su preparación se han descrito distintos tipos de materiales, desde cerámicas a metales y sus aleaciones. El material más comúnmente empleado en la preparación de los fluidos magnetorreológicos es el hierro puro derivado de la descomposición de compuestos de hierro carbolino (López-Viota Gallardo , 2006).

3.2 Características de un fluido magnetorreológico

Las variables responsables de las características de los fluidos magnetorreológicos son varias y muy diferentes debido a los siguientes factores:

- Tipo de partícula magnética, así como el tamaño, geometría, distribución de tamaños y la cantidad utilizada.
- Fluido portador, que tiene una influencia importante en la viscosidad del fluido, comportamiento térmico, químico y en la sedimentación de las partículas.
- Aditivos añadidos para el control de variables tales como sedimentación, viscosidad, tixotropía y estabilización del fluido (Nieto Toledo, 2015).

3.2.1 Partículas magnéticas. Las partículas magnéticas son usualmente de hierro carbolino, polvos de hierro o aleaciones de hierro/cobalto para lograr una alta saturación

magnética. La cantidad de polvos metálicos en el fluido magnetorreológico pueden ser de hasta un 50% en volumen. El tamaño de partícula se encuentra, normalmente, en el intervalo de micrómetros y varía dependiendo del proceso de elaboración (Arauz Solís, 2018).

Una de las características de estas partículas magnetizables es que pueden ser de forma irregular; esféricas, aciculares, en forma de agujas o combinación entre ellas. Se prefieren las esféricas ya que se busca un alto grado de acomodo al momento de someter el fluido magnetorreológico a la acción del campo magnético. Por otra parte, una combinación de partículas en forma de agujas con tamaño relativamente mayor mejora notablemente la estabilidad del fluido e incrementa la viscosidad bajo la acción de un campo. El tamaño de estas partículas metálicas puede seleccionarse según la aplicación que se pretenda, para el caso de las partículas de hierro el intervalo de estas se encuentra entre 1 - 10 μm (Arauz Solís, 2018).

3.2.2 Fluido portador. La función que tiene el fluido portador es ser el medio donde la fase magnéticamente activa se suspenda. Se pueden utilizar líquidos orgánicos polares (aceite mineral, hidrocarburos, etc.) y agua. Para la selección del líquido portador adecuado para la síntesis de un fluido magnetorreológico se debe conocer previamente la aplicación de dicho fluido. Para fenómenos térmicos se debe tener presente el intervalo de temperatura a la que será sometido, por lo tanto, se decide seleccionar un líquido portador con un punto de ebullición que no sobrepase el límite superior de ese intervalo de operación. Es importante que el fluido magnetorreológico no reaccione ni con la fase magnéticamente activa ni con el material que compone el dispositivo que lo contendrá. Otro aspecto muy importante que depende de la selección del fluido portador es el hecho de que la viscosidad de dicho fluido ayuda a que el fluido magnetorreológico pueda tener una mejor estabilidad (Bocarando Chacon, 2016).

3.2.3 Aditivos. Los aditivos pueden ser estabilizadores y surfactantes; así como, agentes de suspensión, modificadores de fricción (lubricantes) y componentes anticorrosivos o antidesgaste. Los materiales de alta viscosidad como, por ejemplo, los lubricantes son usados para mejorar la estabilidad del fluido. Los aditivos se requieren para controlar la viscosidad del líquido y la velocidad de sedimentación o precipitación de las partículas metálicas; así como, para evitar la aglomeración de estas partículas durante su uso (Arauz Solís, 2018).

3.3 Propiedades magnéticas

La comprensión de las propiedades magnéticas de los fluidos magnetorreológicos es importante para el diseño de dispositivos basados en estos fluidos. En muchos de tales dispositivos el fluido representa la mayor reluctancia magnética dentro del circuito magnético. Estas propiedades magnéticas pueden probar también ser útiles al proveer penetración dentro del carácter y formación de las estructuras de las partículas dentro del fluido (Cupich Rodríguez & Elizondo Garza, 2002). “Las propiedades magnéticas normalmente se caracterizan mediante gráficas de $M-H$ o $B-H$ donde H es el campo aplicado, M es la magnetización y B es la densidad de campo magnético” (Arauz Solís, 2018).

La Figura 4 es un ejemplo de la curva que describe el comportamiento del fluido magnetorreológico ante la presencia de campos magnéticos y fue obtenida del fabricante estadounidense LORD. El fluido magnetorreológico escogido es el modelo MRF-132DG. En la Figura 3 se tiene que partir de la curva de inducción magnética, curva B vs. H , se puede observar que el líquido presenta una propiedad magnética de comportamiento aproximadamente lineal cuando el campo magnético es pequeño.

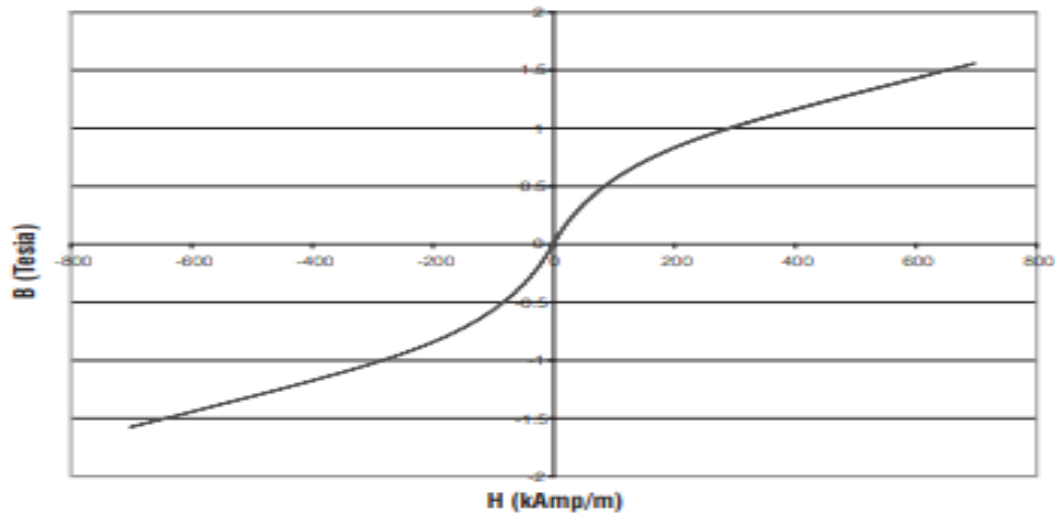


Figura 4 Propiedades magnéticas del fluido MRF-132DG

Fuente: (Lord, 2011). Lord. (18 de 11 de 2011). MRF-132DG Magneto-Rheological Fluid.

Adaptado de Lord:

https://www.lord.com/sites/default/files/Documents/TechnicalDataSheet/DS7015_MRF-132DGMRFfluid.pdf

3.4 Aplicaciones

Actualmente, se utilizan dispositivos magnetorreológicos en:

- Industria Automovilística: Para el control de la vibración, transmisión de torque variable, desarrollo de sistemas de amortiguación, frenos rotatorios y embragues.
- Industria de la Construcción: Para neutralizar las vibraciones causadas por movimientos telúricos y vientos.
- Industria Mecánica: Válvulas

En un futuro cercano, se presume que entre los potenciales usos de estos fluidos estarán:

- Telescopios con espejos magneto-líquidos.

- Miembros protéticos para humanos.
- Soportes activos para motores.
- Amortiguadores de carga para ser usados en el espacio.
- Cinturones de seguridad ajustables y bolsas de aire en automóviles.
- Robots con movimientos semejantes a los humanos (Sánchez Zurita, 2016).

4. Estimación de las densidades de campo magnético con el software CST Studio Suite

En este trabajo de grado se tiene como piezas fundamentales para la construcción del prototipo unas bobinas de campo extraída de un motor universal (Figura 5) y solenoides. Con el fin de generar campos magnéticos giratorios (ver Capítulo 2), para conocer los valores de densidades de campo magnético en las bobinas de campo y solenoides, se presentan simulaciones de estas haciendo uso del software CST Studio Suite.

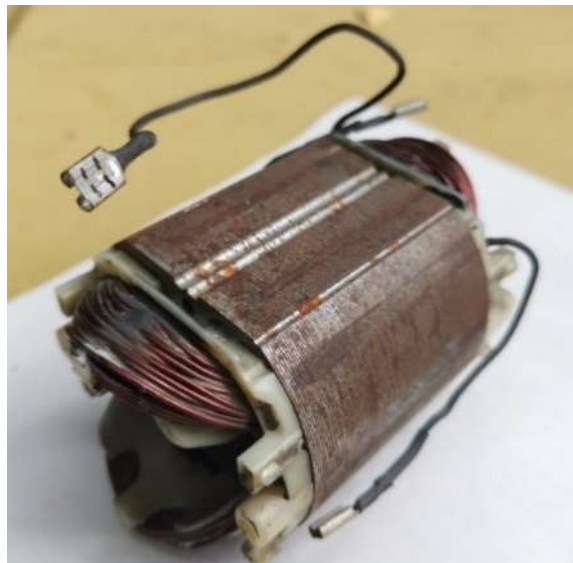


Figura 5 Bobina de campo

4.1 Densidad de campo magnético en la bobina de campo

Previo al proceso de simulación se analizaron los aspectos constructivos de la bobina de campo, tales como calibre del conductor, numero de vueltas por bobina, volumen del material del cual están construidas (chapa magnética) y se decidió realizar el modelado de esta en dos etapas: etapa de modelado del núcleo ferromagnético y etapa de modelado de los segmentos de bobinas.

4.1.1 Etapa de modelado del núcleo ferromagnético. En esta etapa se realizó en el software un croquis en dos dimensiones de la vista frontal de la bobina de campo, como se puede apreciar en la Figura 6.

Una vez concluido este proceso, se procedió a extruir el croquis hasta alcanzar la profundidad específica de la bobina de campo (Figura 7).

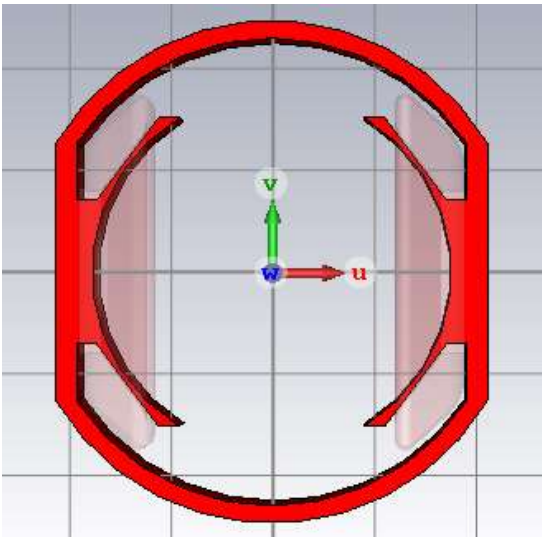


Figura 6 Croquis de la vista frontal de la bobina de campo

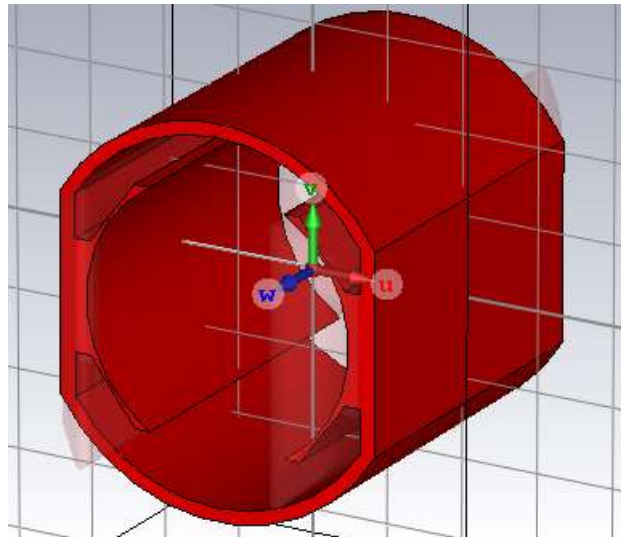


Figura 7 Croquis de la bobina de campo extruida

4.1.2 Etapa de modelado de los segmentos de bobina. Al igual que en la etapa anterior, se realizó un croquis y posteriormente una trayectoria cerrada, la cual, comprende la longitud aproxima del segmento de bobina real.

Haciendo uso de la herramienta *Coil* en el software se creó el grupo de bobinas (Figura 8) necesario para la simulación, quedando el modelado total de la bobina campo como se observan en la Figura 9.

Finalizado el modelado de la bobina de campo, se obtienen los resultados de la simulación teniendo como parámetros la corriente, numero de vueltas por bobina y la resistencia del conductor de la bobina.

En la Figura 10 se observan las líneas de campo magnético producidas por la bobina de campo. Las curvas de densidades de campo magnético para diferentes valores de intensidad de corriente que se generan en el entrehierro de la bobina de campo se observan en la Figura 11, en donde también se pueden apreciar los valores de densidades campo magnético en el centro de esta para cada valor de corriente. Las densidades de campo magnético son dadas en Teslas [T].

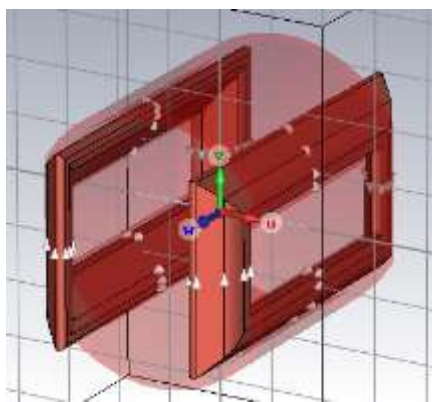


Figura 8 Grupo de bobinas de la bobina de campo

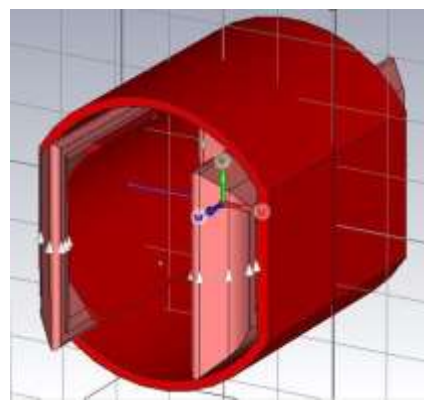


Figura 9 Modelado total de la bobina de campo

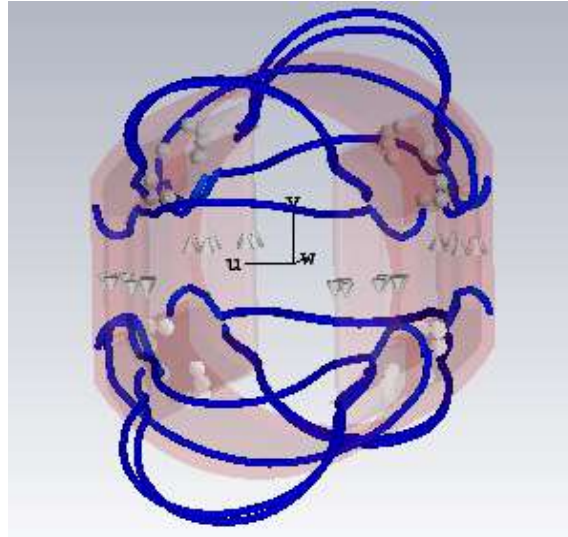


Figura 10 Líneas de campo magnético de la bobina de campo

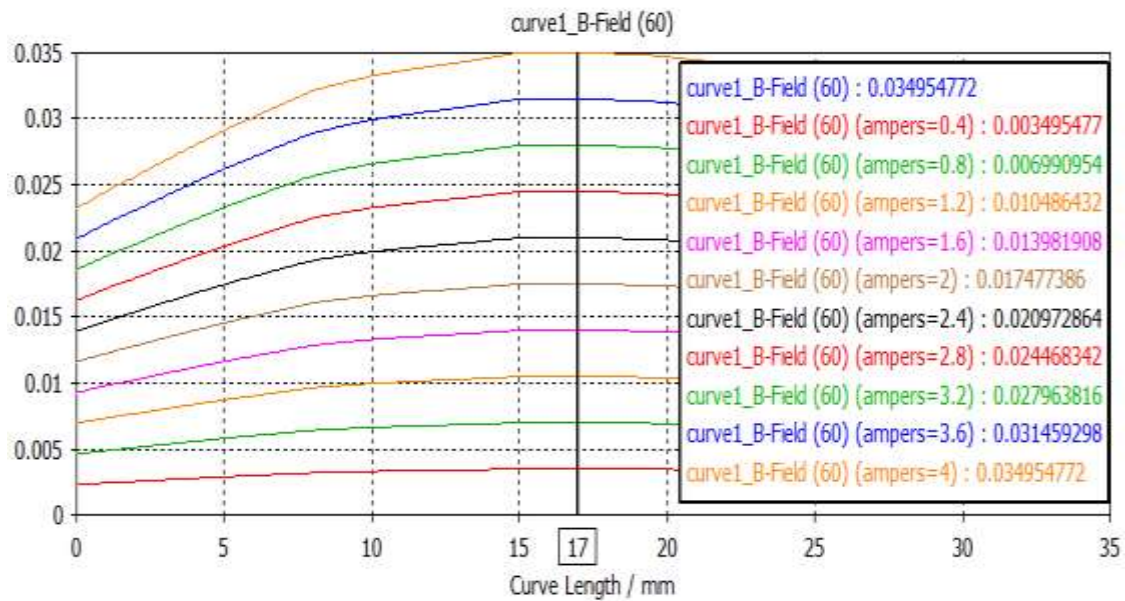


Figura 11 Densidad de campo magnético en el entrehierro de la bobina de campo

Los valores de densidad de campo magnético de las curvas de la Figura 10, son de gran ayuda al momento de modelar los solenoides utilizados en el prototipo, ya que es necesario que estos creen densidades de campo magnético similares.

4.2 Densidad de campo magnético en el solenoide

Para el proceso de modelado del solenoide se tiene en cuenta el área limitada del entrehierro de la bobina de campo (44 mm x 44 mm) y el área transversal exterior del recipiente (16 mm x 16 mm). Una vez teniendo esto se procede a asignar los valores para el radio interior, radio exterior y la profundidad del solenoide, en la Figura 12 se observa dichos valores, siendo Umin la longitud del radio exterior (17,5 mm), Umax la longitud del radio interior (14,5 mm) y Vmax la profundidad (44 mm).

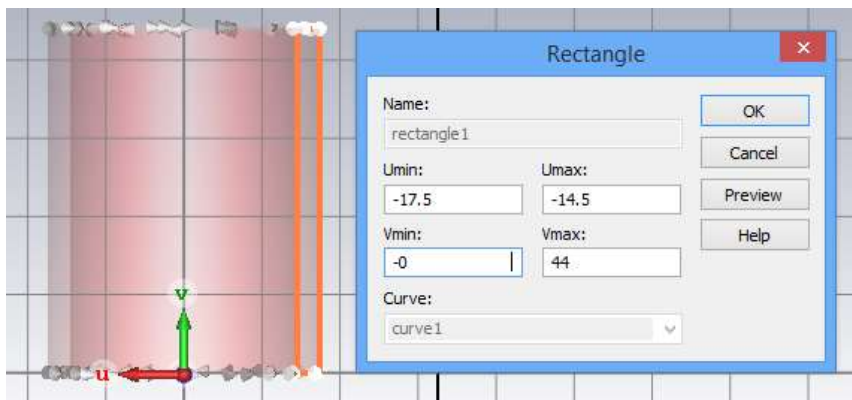


Figura 12 Dimensionamiento del solenoide en CST Studio Suite

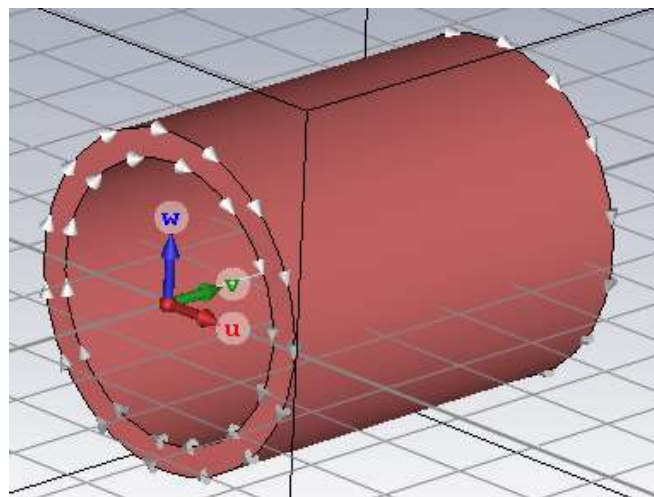


Figura 13 Vista isométrica del solenoide en CST Studio Suite

En la Figura 13 se tiene la vista isométrica del solenoide, y para su respectiva simulación se le asignaron valores de calibre del conductor, numero de vueltas por bobina e intensidades de corriente, los cuales se fueron variando hasta llegar a obtener valores de densidades de campo magnético similares a los obtenidos en la simulación de la bobina de campo, dichos valores pueden ser observados en las curvas de la Figura 15, en donde también se puede apreciar el valor de la densidad de campo magnético en el centro del solenoide. Las densidades de campo magnético son dadas en Teslas [T].

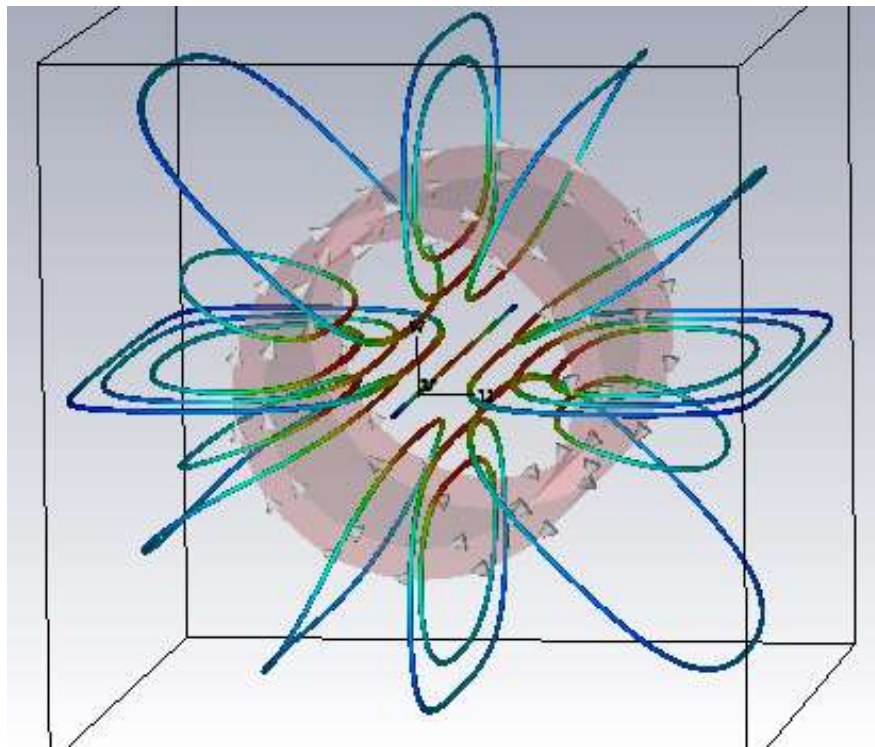


Figura 14 Líneas de campo magnético en el solenoide

En la Figura 13 se tiene que dentro del solenoide las líneas son aproximadamente paralelas al eje y están espaciadas estrecha y uniformemente, indicando la existencia de un campo uniforme e intenso.

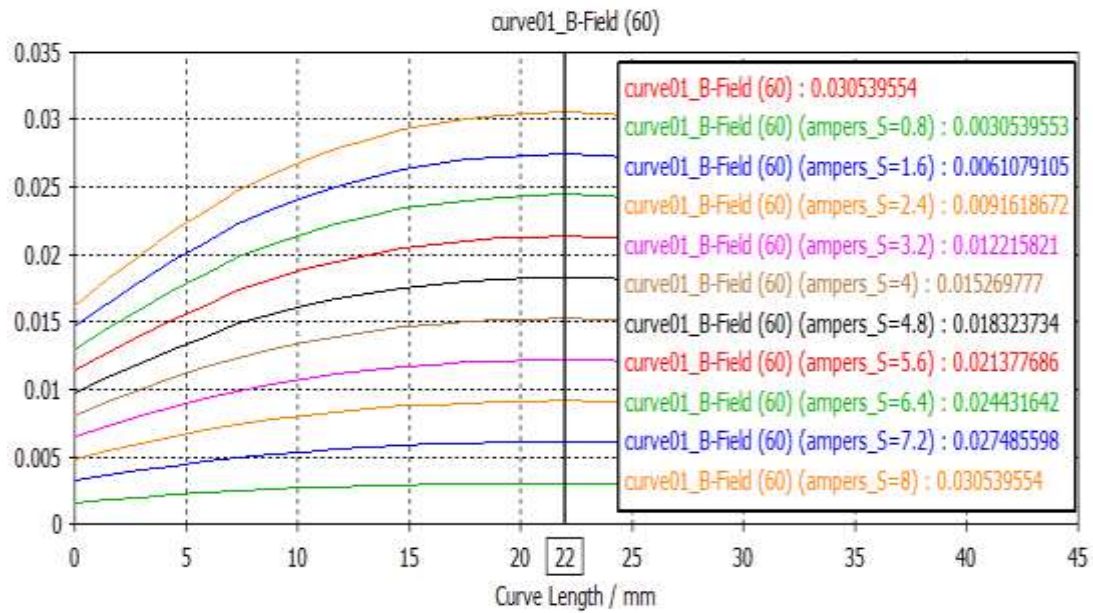


Figura 15 Densidad de campo magnético en el interior del solenoide

4.3 Generación de una onda de campo espacial rotacional

Teniendo ya modelados la bobina de campo y solenoide, se crea un conjunto (Figura 16) capaz de generar en su centro una onda de campo espacial giratoria (Figura 17).

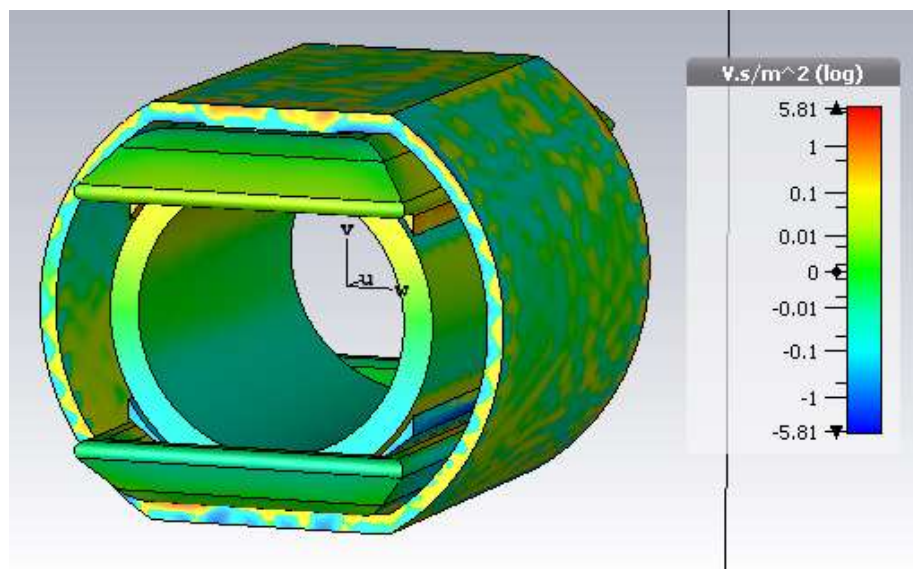


Figura 16 Bobina de campo con solenoide en el entrehierro

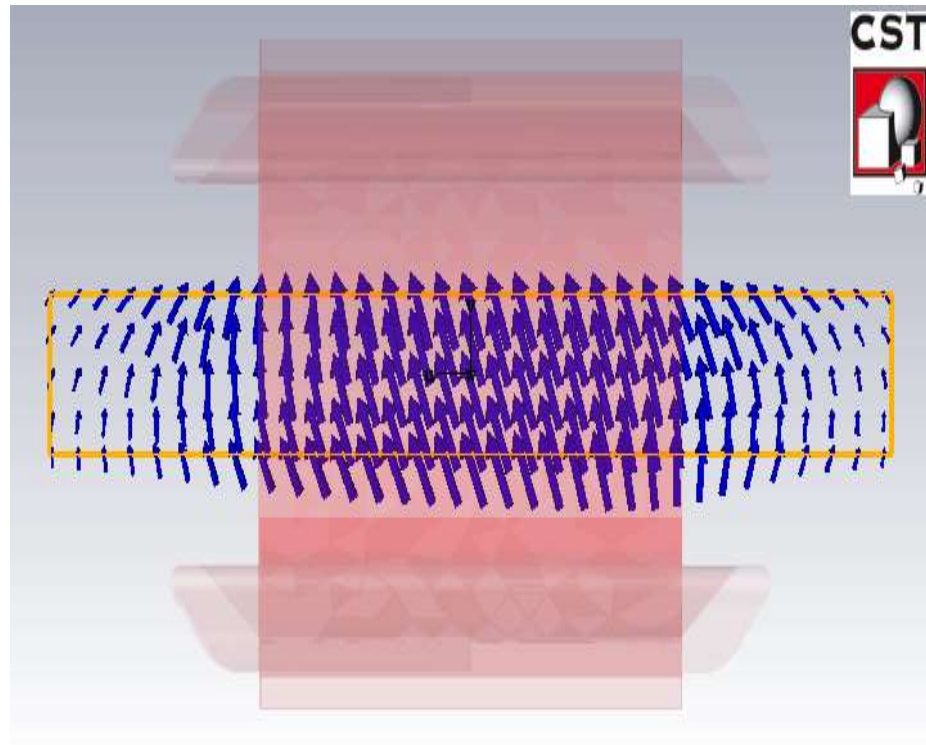


Figura 17 Onda de campo espacial rotacional

4.4 Validación de los resultados obtenidos en las simulaciones

Con el fin de conseguir la validación de los resultados obtenidos en las simulaciones, las bobinas de campo y solenoides fueron expuestos a un sensor de densidades de campo magnético variables (Figura 18), en la Tabla 1 y Tabla2 se observan la comparación de las densidades de campo magnéticos generadas en la simulación (datos sacados de la Figura 11 y la Figura 15) y las densidades de campo magnético calculadas a partir de las curvas que arrojó el instrumento de medida, cabe resaltar que estos valores son eficaces o rms.

En el Anexo A y Anexo B se observa el cálculo de los valores rms para 4 medidas realizadas con el instrumento.

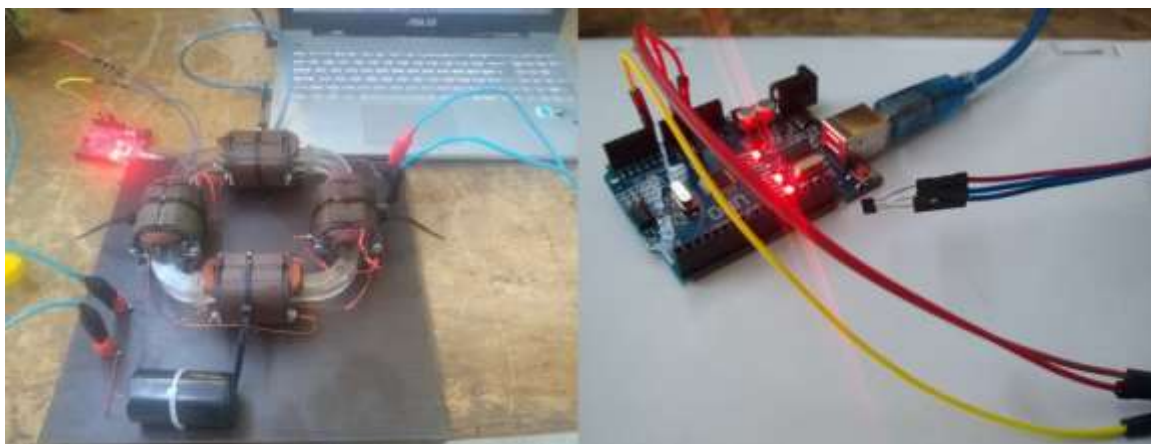


Figura 18 Medición de densidades de campo magnético al prototipo

Tabla 1.

Validación de los resultados obtenidos en la bobina de campo

Corriente de la bobina de campo [A]	Densidad de campo magnetico con CST [mT]	Densidad de campo magnetico con instrumento de medida [mT]
0,4	3,49	3,89
0,8	6,99	7,07
1,2	10,48	10,60
1,6	13,98	14,49
2,0	17,48	17,33
2,4	20,97	19,80
2,8	24,47	24,04
3,2	27,96	27,93
3,6	31,46	31,73
4,0	34,95	34,30

Tabla 2

Validación de los resultados obtenidos en el solenoide

Corriente del solenoide [A]	Densidad de campo magnetico con CST [mT]	Densidad de campo magnetico con instrumento de medida [mT]
0,8	3,05	3,18
1,6	6,11	6,22
2,4	9,16	9,19
3,2	12,21	12,37
4,0	15,27	15,20
4,8	18,32	18,73
5,6	21,38	21,21
6,4	24,43	24,39
7,2	27,49	27,57
8	30,54	30,76

5. Aspectos constructivos del prototipo

5.1 Elaboración del recipiente

Para la construcción del recipiente, se tuvo en cuenta el diseño elaborado en SolidWorks (Figura 19). El material utilizado fue lámina de acrílico transparente de un espesor de 3 mm con el propósito de tener una mejor visualización del comportamiento del fluido magnetorreológico ante la interacción de campos magnéticos.



Figura 19 Diseño del recipiente en SolidWorks

- . El proceso de elaboración del recipiente comprende los siguientes pasos:
 - Diseño de los cortes para dar forma al recipiente, los cuales se llevaron a cabo en una impresora láser.
 - Una vez obtenidas las piezas de acrílico cortadas, estas se llevaron a un proceso de termoformado en el cual utilizando una resistencia se le logra doblar la lámina para que esta vaya adquiriendo una forma toroidal (Figura 20).



Figura 20 Proceso de termoformado en las piezas de acrílico

- Ya con las piezas termoformadas y haciendo uso de Cloruro de metileno como pegante, se procedió a unir las piezas haciendo uso de una jeringa para aplicar el pegante en estas (Figura 21).



Figura 21 Proceso de unión de las piezas del recipiente

- Para facilitar la implementación de las bobinas de campo y solenoides, el recipiente se construyó en dos partes que se pueden acoplar mediante una unión como se muestra en la Figura 22, en la cual también se puede apreciar que una de las partes del recipiente cuenta con un orificio para poder agregar el fluido magnetorreológico y su respectivo tapón de caucho para evitar el derrame del fluido magnetorreológico.



Figura 22 Recipiente del prototipo

5.2 Bobinas de campo

Las bobinas de campo implementadas (Figura 5) se extrajeron de motores universales. Estas bobinas de campo cumplirán la función de ser el arrollamiento principal, pieza clave para generar un campo magnético giratorio, según lo visto en el Capítulo 2.

5.3 Soportes para la bobina de campo

Para fijar las bobinas de campo al recipiente, fue necesario la fabricación de unos soportes en acrílico (Figura 23).



Figura 23 Soportes para las bobinas de campo

Estos soportes tienen como función principal el mantener el recipiente en el centro de las bobinas de campo y prevenir que movimientos bruscos afecten el correcto funcionamiento de estas.

5.4 Construcción de solenoides

Los solenoides cumplen la función de ser el devanado auxiliar del prototipo y en la construcción estos se tienen en cuenta los datos de densidad de campo magnético obtenidos en la simulación de las bobinas de campo, ya que, como se mencionó en el anterior capítulo es necesario que estos solenoides proporcionen densidades de campos magnéticos similares a los que proporcionan las bobinas de campo.

Para la construcción de los solenoides se utilizó una máquina que cuenta con un cilindro como molde, el cual se recubrió con un papel aislante con el propósito darle soporte y facilitar la extracción. Posteriormente se empieza con el arrollamiento del alambre magneto calibre AWG # 18 hasta completar tres capas, donde cada capa cuenta con 44 vueltas para un total de 132 vueltas por solenoide, los datos de calibre del alambre y el número de vueltas de la bobina son los utilizados en la simulación del solenoide con CST Studio Suite. En la Figura 24 se puede apreciar una parte del proceso y en la Figura 25 los solenoides ya contruidos.



Figura 24 Proceso de construcción del solenoide



Figura 25 Solenoides ya contruidos

5.5 Selección del capacitor

Como se mencionó anteriormente para que se produzca un campo magnético giratorio tienen que haber por lo menos un desfase entre el devanado principal (bobina de campo) y devanado auxiliar (solenoides) de 90° entre sí. Se agrega un capacitor al devanado auxiliar para producir una relación casi real de 90° entre las corrientes de estos. El capacitor seleccionado (Figura 26) cuenta con las siguientes características descritas en la Tabla 3.

Tabla 3

Características del capacitor seleccionado

<i>Marca: NGM</i>	<i>Tensión de alimentación: 125 V</i>
<i>Frecuencia: 60 Hz</i>	<i>Capacitancia: 270-340 μF</i>



Figura 26 Capacitor para desfase corriente entre devanados

5.6 Ensamble final

Con todos los elementos del prototipo ya obtenidos, se procede a hacer el ensamble de estos, quedando el prototipo construido como se muestra en la Figura 27.

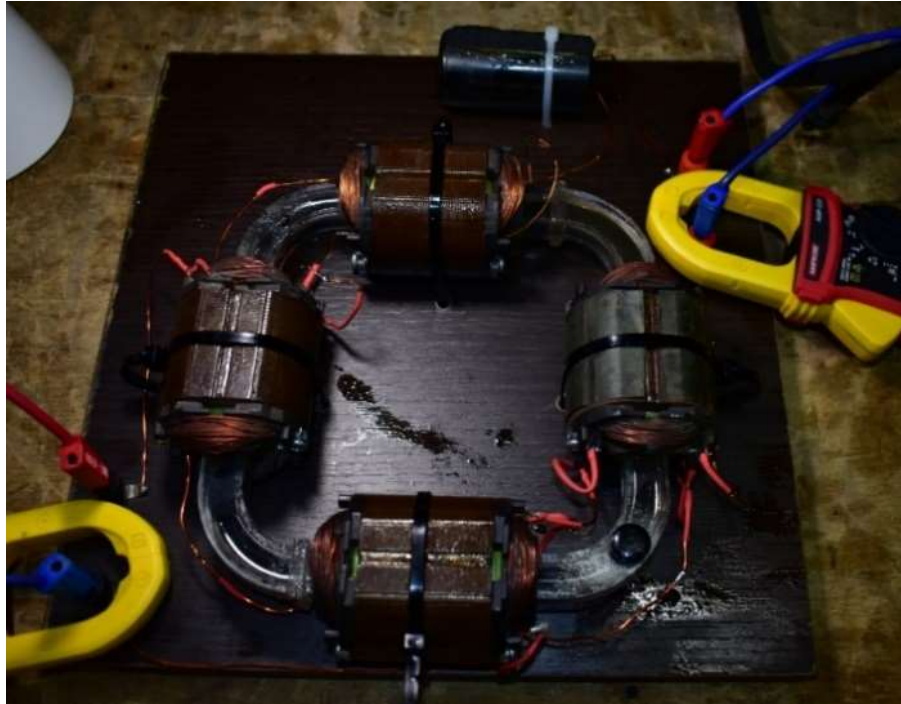


Figura 27 Prototipo ensamblado

En la Figura 28 se tiene un diseño en SolidWorks en donde se tiene una mejor apreciación del ensamble de las bobinas de campo, soportes y solenoides en el recipiente.

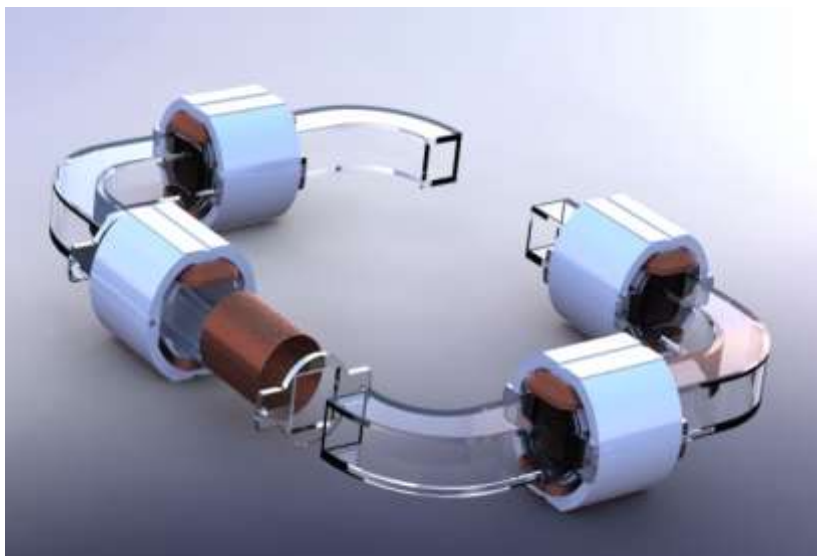


Figura 28 Ensamble del prototipo hecho en SolidWorks

6. Preparación de los fluidos magnetorreológicos

Como se dijo anteriormente, un fluido magnetorreológico básico debe tener algunas características: partículas magnéticas, un fluido portador y en el caso de ser necesario, el uso de aditivos estabilizadores.

6.1 Selección de las partículas magnéticas

Se selecciona para generar las partículas un material con gran inducción magnética, para lo cual se determinó utilizar magnetita (Figura 29), que fue proporcionada por el estudiante de doctorado en metalurgia de la Universidad Industrial de Santander, Manuel Roa Ardila, quien facilitó también el procedimiento síntesis de la magnetita, descrito a continuación.



Figura 29 Magnetita

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.

El tamaño de la magnetita se ajusta a las necesidades de este trabajo de grado como se muestras se puede obtener fácilmente.

6.2 Selección del fluido portador y aditivo

Existen diferentes aceites o fluidos de fácil adquisición comercial y que son utilizados para fabricar fluido magnetorreológico, considerando los parámetros que estos tienen se decidió utilizar ACPM (Figura 30). Este es un fluido de uso muy común y tiene una viscosidad baja y de un color transparente, lo cual lo hace adecuado para nuestro uso.



Figura 30 Muestra de ACPM



Figura 31 Surfactante liquido

Como aditivo se utilizó un surfactante líquido (Figura 31)

6.3 Elaboración de las muestras

Para realizar las muestras con concentraciones en volumen del 25%,50% y 75% de la magnetita sobre el volumen del fluido portador, se utilizaron 2 probetas volumétricas (Figura 32) para poder tener una mejor proporción de los elementos utilizados en la elaboración del fluido magnetorreológico. El volumen de referencia para la preparación de las mezclas corresponde a 50 mL (volumen del recipiente) y quedaron clasificadas de la siguiente manera:

- Muestra X: 25% de magnetita (12,5 mL) y 75% de ACPM (37,5 mL)
- Muestra Y: 50% de magnetita (25 mL) y 50% de ACPM (25 mL)
- Muestra Z: 75% de magnetita (37,5 mL) y 25% de ACPM (12,5 mL)



Figura 32 Probetas volumétricas utilizadas en la elaboración del fluido magnetorreológico

Se almacenaron las muestras del fluido magnetorreológico en recipientes de plástico para su posterior uso en las pruebas realizadas al prototipo.



Figura 33 Muestras del fluido magnetorreológico

En la Figura 33 se observan de derecha a izquierda las muestras Z, Y y X respectivamente.

7. Pruebas realizadas al prototipo

7.1 Alimentación del prototipo

Para alimentar el prototipo se utilizó la conexión mostrada en la Figura 34, que consta de dos autotransformadores, teniendo cada uno la función de proporcionarle una tensión de alimentación al conjunto de bobinas de campo en serie y al conjunto de solenoides en serie. Estas tensiones

permiten la circulación de corrientes necesarias para crear unas densidades de campo magnéticos similares entre las bobinas de campo y los solenoides, siendo necesario en estos últimos la implementación de un capacitor conectado en serie para lograr un desfase de 90° eléctricos y así obtener un campo magnético giratorio, necesario para observar el comportamiento de las partículas magnéticas en el recipiente.

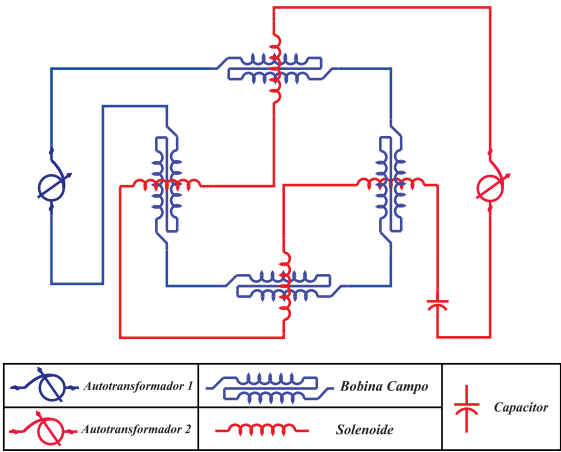


Figura 34 Esquema de conexión para alimentar el prototipo

Los equipos utilizados en el proceso de medición y toma de datos están descritos en la Tabla 4.

Tabla 4
 Elementos de medición usados en las pruebas

Equipo	Medida	Rango	Resolución	Incertidumbre
Multímetro Fluke 117	Tensión AC	600 [V]	0,01 [V]	±1,0 % +3
Pinza amperimétrica Amprobe AMP-320	Corriente AC	60 [A]		± 1,8 % + 5

7.2 Prueba para visualizar movimiento del fluido magnetorreológico

Se realizaron pruebas al prototipo con las muestras X, Y y Z. En estas pruebas se toman como base los resultados obtenidos en la simulación con CST Studio Suite para poder alimentar el conjunto de bobinas de campo y solenoides. Los valores de intensidades de corriente escogidos de la simulación son aquellos en donde se tienen que la diferencia entre las densidades de campo magnético de las bobinas de campo y las densidades de campo magnético en los solenoides no superen 0.5 mT. En la Tabla 5 se pueden ver cuáles son los valores escogidos, clasificándolos en tipos de alimentación.

Tabla 5

Tipos de Alimentación Para el Prototipo

Tipo de alimentación	Ibobina [A]	Isolenoide [A]	Bbobina [mT]	Bsolenoides [mT]	Diferencia de B [mT]
A	0,4	0,8	3,49	3,05	0,44
B	2,4	5,6	20,97	21,38	0,41
C	2,8	6,4	24,47	24,43	0,04
D	3,2	7,2	27,96	27,49	0,47

Una vez teniendo claro los valores de corriente con los cuales será alimentado el prototipo, se realiza las pruebas para cada tipo de concentración. En donde se observó, que para el tipo de alimentación A (Tabla 5) no hubo un movimiento significativo del fluido magnetorreológico en sus 3 tipos de mezclas, por lo tanto, este tipo de alimentación queda descartada.

Con la muestra X, se observó que con el tipo de alimentación B (Tabla 5) presentó unos fenómenos dentro del recipiente, en donde las partículas del fluido magnetorreológico recorrían el

prototipo en sentido contrario de las manecillas del reloj y en la parte central de las bobinas de campo y solenoide se crearon unos torbellinos, los mismos fenómenos se presentaron para los tipos de alimentación *C* y *D* (Tabla 5), observándose mayor movimiento con *C*. Teniendo en cuenta lo sucedido, se decide encontrar para que valores de corriente y tensión se observa un mayor movimiento del fluido magnetorreológico con las diferentes mezclas variando los valores de los tipos de alimentación ya establecidos.

Se tomaron 4 datos de corriente y tensión tanto para las bobinas de campo como para los solenoides. En la Tabla 6 y Tabla 7 se encuentran descritos los resultados para las muestras *X* y *Y* respectivamente

Tabla 6

Datos experimentales para la muestra X

Ibobinas	Isolenoides	Vbobinas	Vsolenoides
[A]	[A]	[V]	[V]
3,84	5,81	34,89	58,34
3,32	5,17	30,01	52,78
3,75	5,72	34,10	57,60
3,59	5,51	32,45	55,60

Tabla 7

Datos experimentales para la muestra Y

Ibobinas	Isolenoides	Vbobinas	Vsolenoides
[A]	[A]	[V]	[V]
4,17	6,28	38,40	62,24
4,34	6,60	39,90	64,30
4,08	6,26	37,50	62,04
3,97	6,03	36,37	60,35

Para la muestra Z se hace difícil la observación del máximo movimiento del fluido magnetorreológico, la gran concentración de partículas magnéticas hace que se requiera elevar más los valores de corriente, pero existe una restricción de corriente en las bobinas de campo, las cuales soportan valores de corriente máximos de 4,3 A, debido a que los devanados de las bobinas están hechos con alambre magneto calibre #21 AWG, por lo que si se deja fijo el valor de 4,3 A en las bobinas de campo y se empiezan a variar los valores de corriente en los solenoides desde 5 A hasta 8 A no se logra observar cambios significativos en el movimiento del fluido magnetorreológico.

Teniendo el conjunto formado por las bobinas de campo y solenoides, y los valores de corrientes presentes en la Tabla 6 y Tabla 7, se tomaron datos de densidades de campo magnético

con el instrumento de medida visto en la Figura 17, en la Tabla 8 y Tabla 9 se puede observar los resultados obtenidos para cada combinación de corrientes respectivamente, y así poder estimar que valores de densidades de campo magnético se puede producir dentro le recipiente.

Tabla 8

Densidades de campo magnético en el centro de cada conjunto de bobinas para la muestra X

Ibobina [A]	Isolenoide [A]	Bcentro [mT]
3,84	5,81	29,70
3,32	5,17	26,87
3,75	5,72	29,34
3,59	5,51	24,04

Tabla 9

Densidades de campo magnético en el centro de cada conjunto de bobinas para la muestra Y

Ibobina [A]	Isolenoide [A]	Bcentro [mT]
4,17	6,28	32,53
4,34	6,60	33,94
4,08	6,26	31,01
3,97	6,03	30,05

8. Observaciones y conclusiones

Los objetivos de este proyecto de grado se cumplieron satisfactoriamente y de los correspondientes resultados obtenidos se desprenden las siguientes conclusiones:

Se diseñó y se construyó un recipiente transparente en el cual se pudo observar satisfactoriamente el comportamiento del fluido magnetorreológico cuando es sometido a una onda de campo espacial rotativa. Este recipiente presentó algunos desafíos al momento de situar las bobinas de campo y solenoides en él, esto se solucionó dividiendo el recipiente en dos partes acoplables.

Haciendo uso del software CST Studio Suite, se realizaron simulaciones de una bobina de campo extraída de un motor universal, con el objetivo de estimar los valores de las densidades de flujo magnético en el entrehierro de esta, y posteriormente con estos valores se modeló un solenoide en el mismo software, ajustando parámetros propios del solenoide como corriente, número de vueltas y resistencia del conductor, verificando que se genere en su centro densidades de flujo magnético similares al de las bobinas de campo y así, con estos parámetros se construyen los solenoides implementados en el prototipo.

Las 4 de bobinas de campo, extraídas de motores universales, presentaron aumento de su temperatura al momento de la realización de las pruebas, debido a que no se contó con un sistema de refrigeración de aire forzado.

En las pruebas realizadas al prototipo con las muestras X, Y y Z, hubo movimiento del fluido magnetorreológico dentro del recipiente describiendo una trayectoria a través de este en sentido

contrario de las manecillas del reloj y en el centro del acople de las bobinas de campo y solenoides se crea un torbellino similar al movimiento de un rotor.

A medida de que se aumenta el porcentaje de concentración de la magnetita el prototipo presenta una dificultad al momento de proporcionarle movimiento al fluido magnetorreológico

La presencia del rotor particulado en el interior del recipiente es causada por una onda de campo espacial rotacional, cuyas densidades de campo se encuentran en el rango de 24,04 mT hasta 29,70 mT para la muestra X y 30,05 mT hasta 33,94 mT para la muestra Y, teniendo en cuenta la Tabla 8 y Tabla 9 respectivamente.

Para posteriores pruebas al prototipo se recomienda sustituir el fluido magnetorreológico por ferrofluido con bajas concentraciones de partículas magnéticas y variar la frecuencia de la fuente de alimentación con el fin de observar el comportamiento de estas.

Referencias Bibliográficas

Arauz Solís, A. B. (12 de 4 de 2018). *Desarrollo de Materiales Inteligentes con Propiedades Magnetoreológicas*. Obtenido de Ciqa Repositorio: <https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/341/1/Adriana%20Berenice%20Arauz%20Solis.pdf>

Arteaga López, B. O. (05 de 12 de 2017). *Estudio de las Propiedades Mecánicas de los Fluidos Magnetoreológicos MRF-140CG Para Determinar su Resistencia al Flujo Bajo la Aplicación de Campos Magnéticos de Intensidad Variable*. Obtenido de Universidad Técnica de Ambato: <http://repo.uta.edu.ec/bitstream/123456789/26967/1/Maestr%C3%ADa%20D.M.%2027%20-%20Arteaga%20L%C3%B3pez%20Oscar%20Bladimir.pdf>

Bocarando Chacon, J. G. (10 de 4 de 2016). *Síntesis y Caracterización de Fluidos Magnetorreológicos*. Obtenido de Cimav Repositorio: <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/374/1/Tesis%20Jacqueline%20Guadalupe%20Bocarando%20Chacon.pdf>

Cadena Pérez, A. M. (29 de 9 de 2010). *Obtención de Fluidos Magnéticos a Partir de CoFe₂O₄*. Obtenido de Repositorio Dspace: <https://tesis.ipn.mx/xmlui/bitstream/handle/123456789/7339/CADENA%20PEREZ.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Chapman, S. J. (s.f.). *Máquinas Eléctricas*. México: Mc Graw Hill.

Cupich Rodríguez, M., & Elizondo Garza, F. J. (26 de 2 de 2002). *Amortiguadores Magnetoreológicos*. Obtenido de Universidad Autónoma de Nuevo León: http://ingenierias.uanl.mx/2/pdf/2_Miguel_Cupich_et_al_Amortiguadores.pdf

Fraile Mora, J. (s.f.). *Máquinas Eléctricas*. España: Mc Graw Hill.

Guru, B. S., & Hiziroglu, H. R. (s.f.). *Máquinas Eléctricas y Transformadores*. México: Alfa Omega Grupo Editor.

López-Viota Gallardo , J. (21 de 4 de 2006). *Fluidos Magnetorreológicos en Medio Acuoso*. Obtenido de Universidad de Granada.

Lord. (18 de 11 de 2011). *MRF-132DG Magneto-Rheological Fluid*. Obtenido de Lord: https://www.lord.com/sites/default/files/Documents/TechnicalDataSheet/DS7015_MRF-132DGMRFfluid.pdf

Nieto Toledo, A. (27 de 2 de 2015). *Mejoras de Diseño de un Embrague Magnetorreológico*. Obtenido de Universidad Carlos III de Madrid: https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/27541/PFC_Alberto%20Nieto%20Toledo.pdf

Sánchez Zurita, C. T. (24 de 8 de 2016). *Montaje y Prueba de Resistencia de un Actuador Cilíndrico Trabajando con un Fluido Magnetorreológico Casero*. Obtenido de Repositorio de Espol: <https://www.dspace.espol.edu.ec/retrieve/94650/D-65383.pdf>

Anexos

Anexo A: Calculo del valor rms para la medida realizada en la bobina de campo

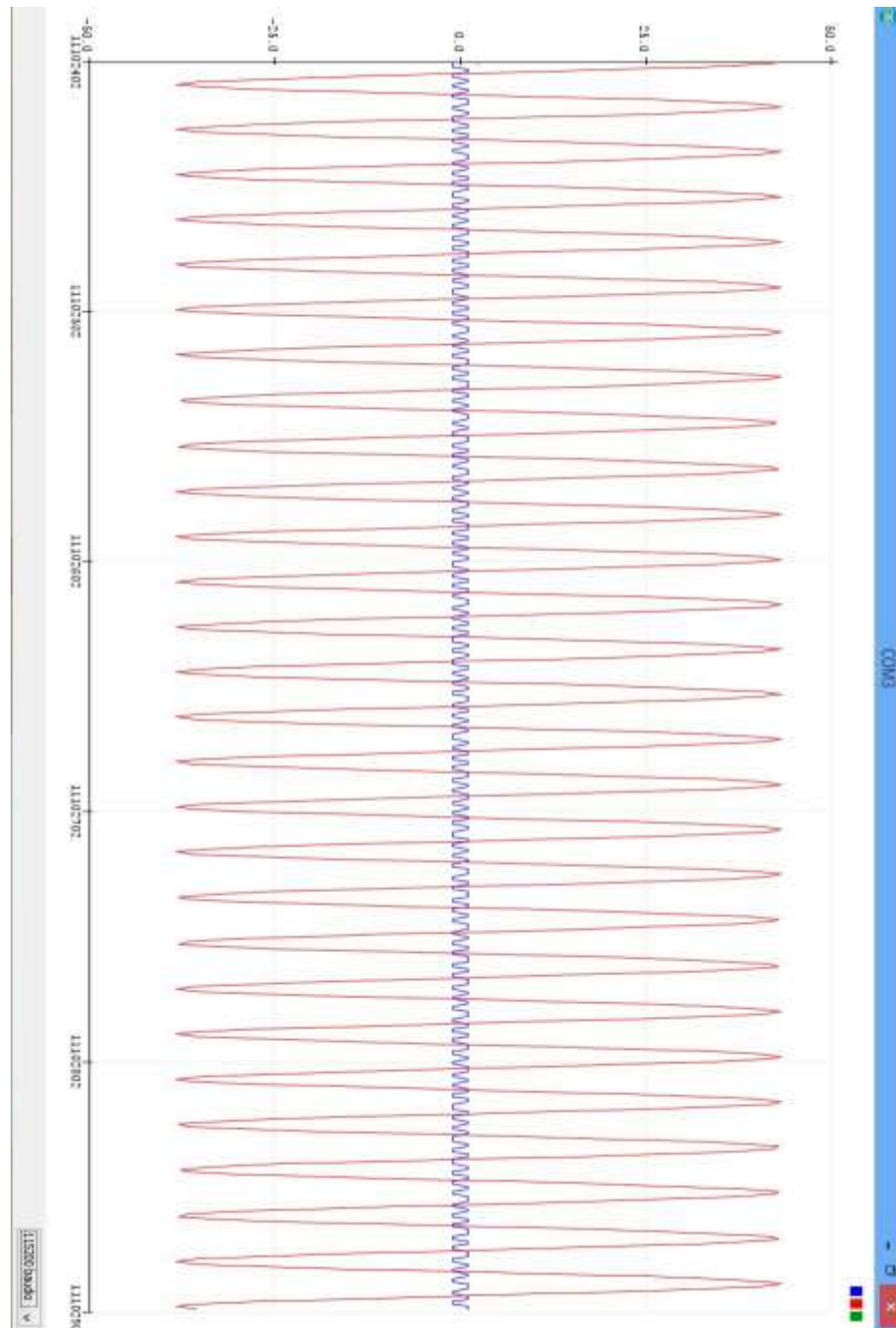


Figura 35 Señal generada para una corriente de 3,2 A en la bobina de campo

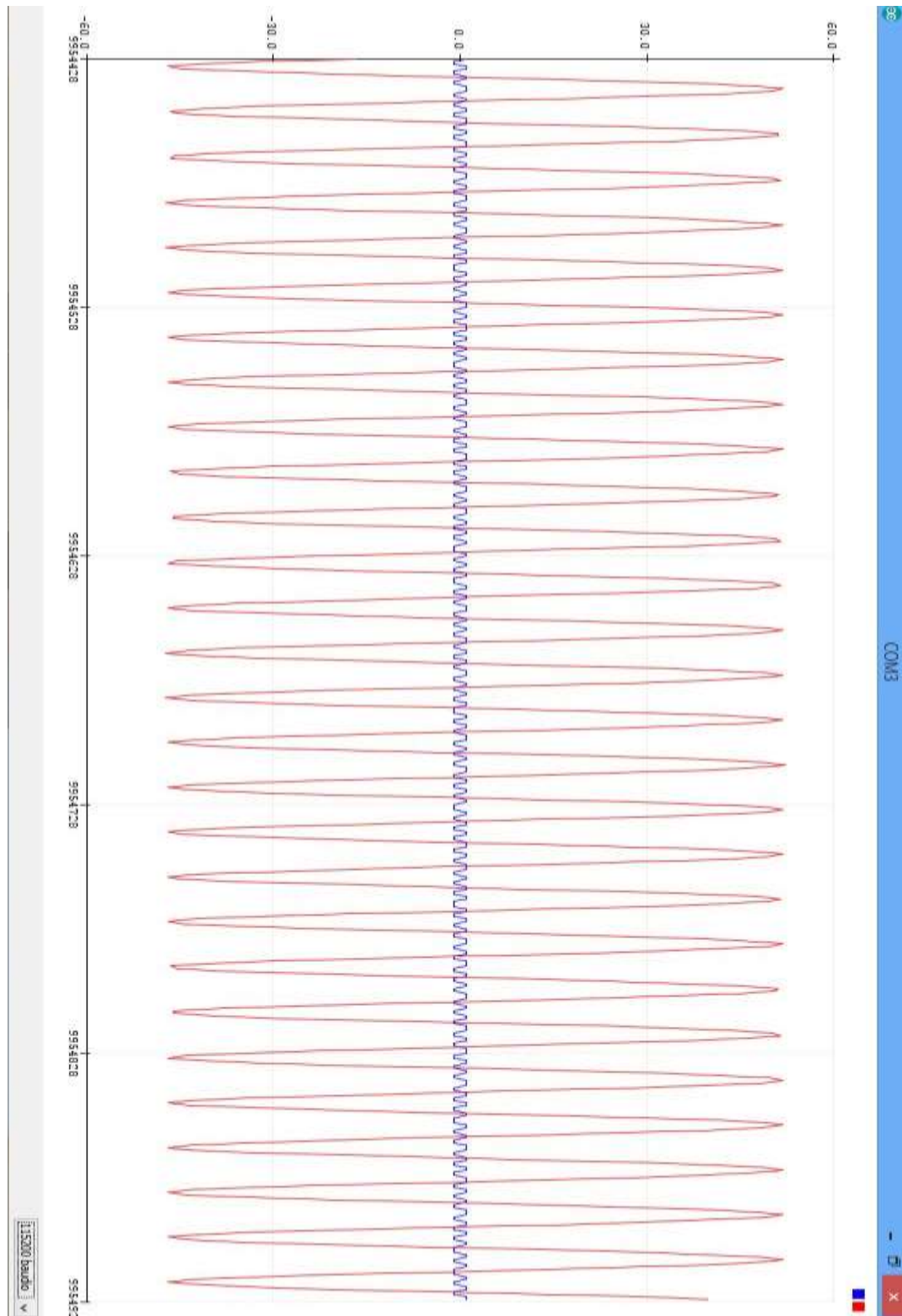


Figura 36 Señal generada para una corriente de 4 A en la bobina de campo

En la Figura 35 y Figura 36 se observa las señales generadas por el instrumento de medida en la medición de densidad de campo magnético de 3,2 A y 4 A en la bobina de campo.

Teniendo en cuenta que las señales son sinusoidales, se puede calcular el valor rms o eficaz de estas, dividiendo su amplitud sobre raíz de 2.

A continuación se calcula el valor rms (B_{rms}) para las señales de la Figura 35 y Figura 36

$$B_{rms1,2 A} = \frac{A_{3,2 A}}{\sqrt{2}} = \frac{39,5}{\sqrt{2}} = 27,93 A$$

$$B_{rms4 A} = \frac{A_{4 A}}{\sqrt{2}} = \frac{48,5}{\sqrt{2}} = 34,30 A$$

Los valores $A_{3,2 A}$ y $A_{4 A}$ son aproximadamente la amplitud máxima de las señales de la Figura 35 y Figura 36 respectivamente.

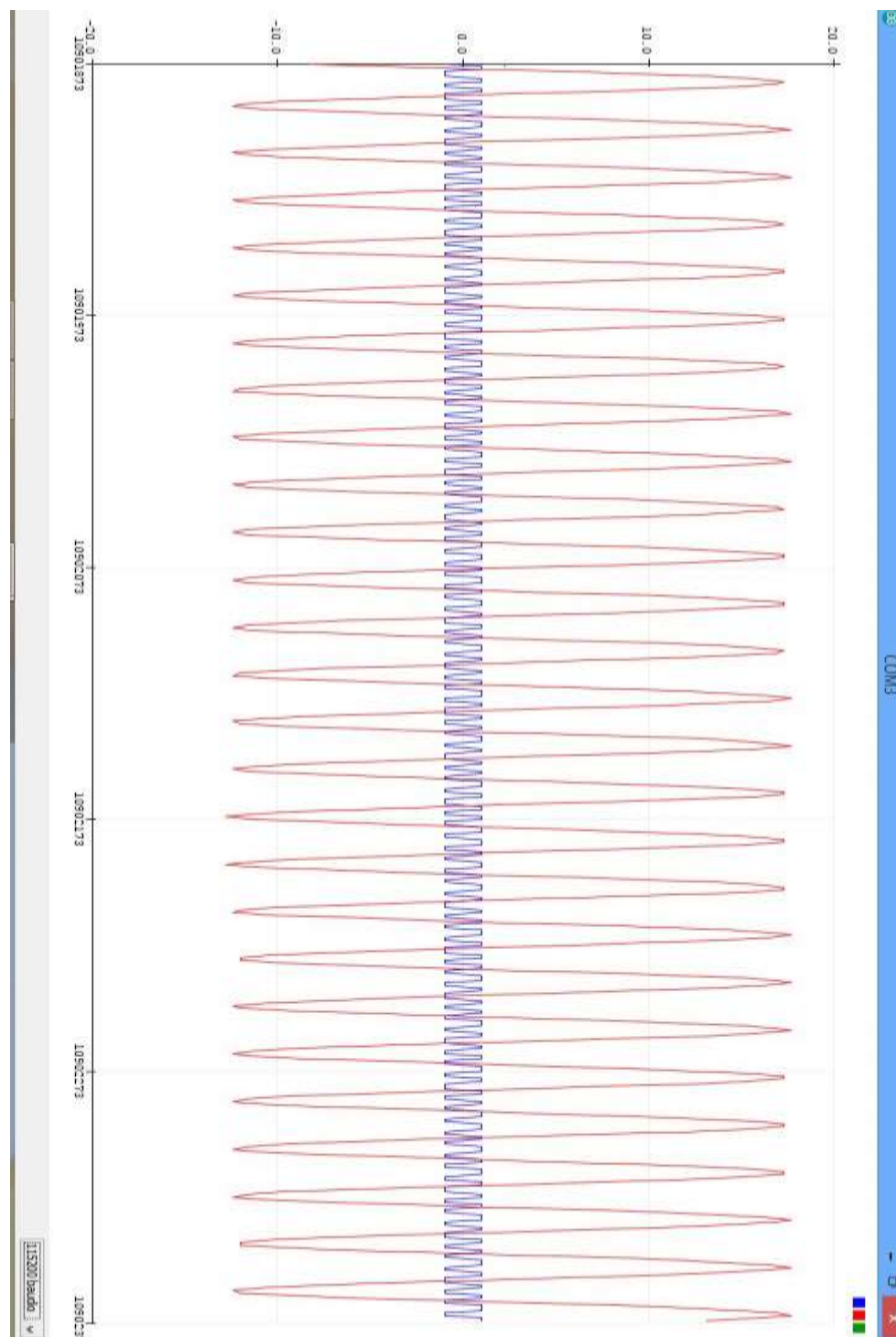
Anexo B: Calculo del valor rms para la medida realizada en el solenoide


Figura 37 Señal generada para una corriente de 2,4 A en el solenoide

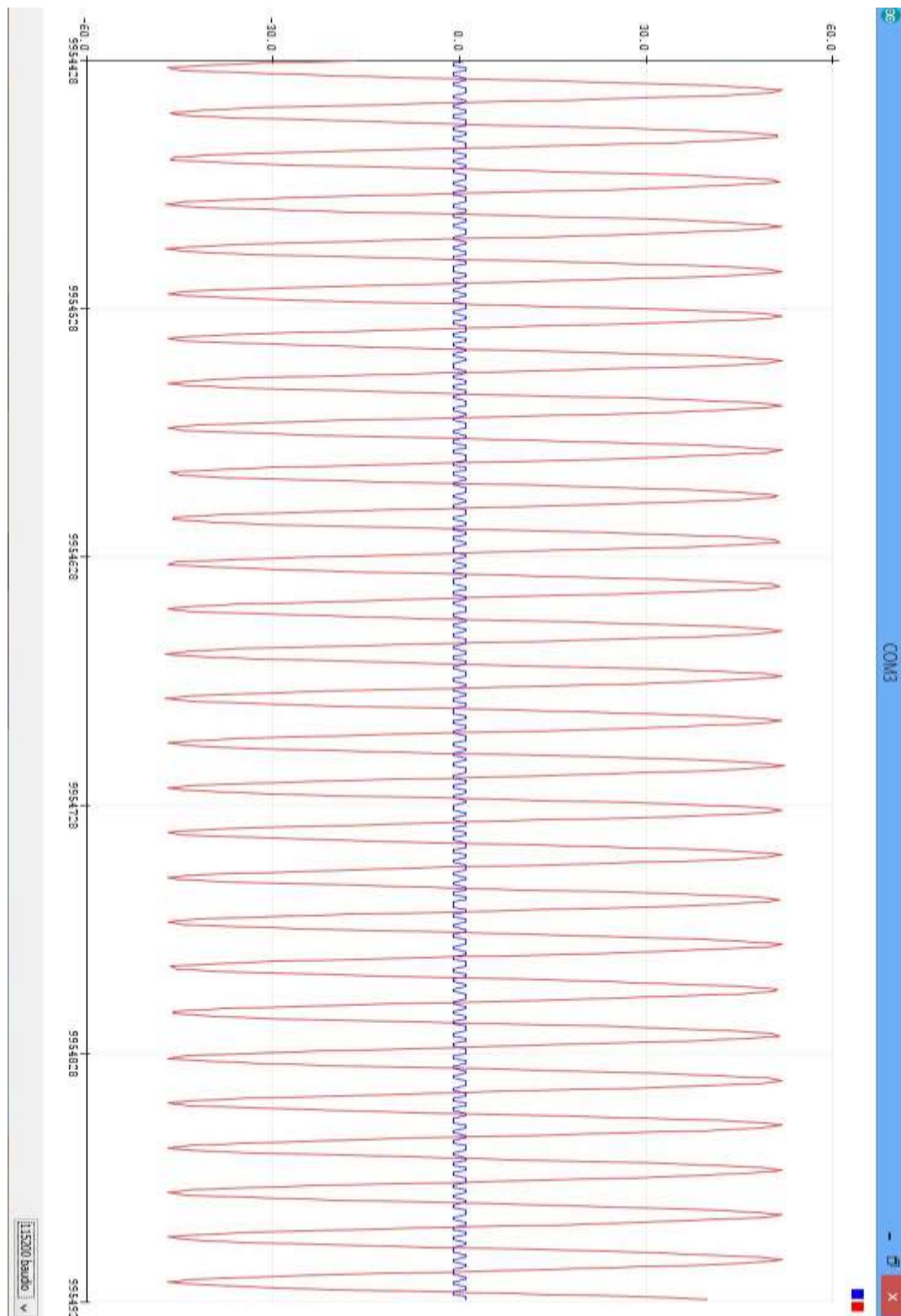


Figura 38 Señal generada para una corriente de 8 A en el solenoide

En la Figura 37 y Figura 38 se observa las señales generadas por el instrumento de medida en la medición de densidad de campo magnético de 2,4 A y 8 A en la bobina de campo.

Teniendo en cuenta que las señales son sinusoidales, se puede calcular el valor rms o eficaz de estas, dividiendo su amplitud sobre raíz de 2.

A continuación se calcula el valor rms (B_{rms}) para las señales de la Figura 37 y Figura 38

$$B_{rms\,2,4\,A} = \frac{A_{2,4\,A}}{\sqrt{2}} = \frac{13}{\sqrt{2}} = 9,19\,A$$

$$B_{rms\,8\,A} = \frac{A_{8\,A}}{\sqrt{2}} = \frac{43,5}{\sqrt{2}} = 30,76\,A$$

Los valores $A_{2,4\,A}$ y $A_{8\,A}$ son aproximadamente la amplitud máxima de las señales de la Figura 37 y Figura 38 respectivamente.