

Movimiento de un ferrofluido en un toroide de sección transversal cuadrada bajo la influencia de campos magnéticos rotatorios

Movement of a ferrofluid in a square cross-section toroid under the influence of rotating magnetic fields

Ludwing Gómez ⁽¹⁾, Hermann Vargas ⁽²⁾, Rodrigo Correa ^{(3)*}

Ing. Electricista (1), Doctor Ingeniería (2), Ph.D.(3)

Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica (GISEL-A2) (1), Grupo de Investigación (CEMOS-A1) (2), Bucaramanga, Colombia.

*crcorrea@saber.uis.edu.co

Recibido: 10/12/2019

Aceptado: 06/05/2020

Cite this article as: L. Gómez, H. Vargas, R. Correa, "Movement of a ferrofluid in a square cross-section toroid under the influence of rotating magnetic fields", *Prospectiva*, Vol 18, N° 2, 2020.

<http://doi.org/10.15665/rp.v18i2.2216>

RESUMEN

Este artículo incluye los principales resultados experimentales relacionados con el flujo axial de un ferrofluido debido a campos magnéticos rotatorios y confinado en un circuito toroidal de sección transversal cuadrada. El prototipo incluye cuatro pares de bobinas ortogonales que rodean sendas porciones del circuito toroidal equiespaciadas. Los campos magnéticos inducidos establecen una onda de campo espacial giratoria en el volumen configurado por cada par de bobinas ortogonales, alimentadas con corrientes desfasadas 90° eléctricos. Esta onda a su vez, desarrolla un par magnético sobre las nanopartículas de magnetita, y que se cree, es el responsable del movimiento axial-circular del nanofluido a lo largo del recipiente toroidal. Se realizaron experimentos con ferrofluidos a tres concentraciones de magnetita. Para cada caso se aplicaron diferentes densidades de campo magnético, pudiéndose conocer los valores de tensión y corriente para los cuales se presenta mayor movimiento longitudinal. También, se simuló este sistema utilizando software comercial para estimar las densidades de campo magnético, que fueron luego contrastadas frente a mediciones con sonda. Se observó que este movimiento se puede describir utilizando su analogía con un motor eléctrico de inducción monofásico. La diferencia básica con su análogo eléctrico radica en que el rotor en este caso, es un fluido con propiedades magnéticas y no un sólido compacto.

Palabras clave – : Momento electromagnético, densidad de campo magnético, campos magnéticos rotatorios, ferrofluidos, magnetita.

ABSTRACT

This article includes the main experimental results related to the axial flow of a ferrofluid due to

rotating magnetic fields and confined in a square cross-sectional toroidal circuit. The prototype includes four pairs of orthogonal coils that surround portions of the equispaced toroidal circuit. Induced magnetic fields establish a rotating spatial field wave at the volume configured by each pair of orthogonal coils, powered by offset currents 90° electric. This wave, in turn, develops a magnetic torque over the magnetite nanoparticles, and is believed to be responsible for the axial-circular movement of the nanofluid along the toroidal vessel. Ferrofluid experiments were conducted at three concentrations of magnetite. For each case, different magnetic field densities were applied. It was possible to know the voltage and current values for which there is a greater longitudinal movement. In addition, this system was simulated using commercial software to estimate the magnetic field densities, which were then tested against the measurements of a probe. It was observed that this movement can be described using its analogy with a single-phase induction electric motor. The basic difference with its electrical analogue is that the rotor in this case, is a fluid with magnetic properties and not a compact solid

Key words: Electromagnetic torque, magnetic field density, rotating magnetic fields, ferrofluids, magnetite.

1. Introducción

La literatura técnica reporta una gran cantidad de resultados experimentales y de simulaciones numéricas relacionados con fenómenos físicos inducidos por la presencia de campos magnéticos. De estas se mencionan la magnetorreología, la magnetohidrodinámica y la ferrohídrodinámica, entre otras. Aunque si bien la ferrohídrodinámica es la que menor desarrollo ha alcanzado, persiste aún el interés de desentrañar sus fundamentos. Para describir la respuesta del flujo de ferrofluidos ante la presencia de un campo magnético rotativo, se han planteado a través de los años varias hipótesis, entre las que se menciona: 1) La Teoría de Difusión de Momento Angular Interno (TDMAI), que atribuye la generación del flujo a la rotación de cada una de las partículas magnéticas, produciendo difusión de momento angular interno, lo que a su vez genera la rotación de la fase continua. 2) Los efectos de curvatura en la interfase fluido-aire. Esta hipótesis establece que el flujo del ferrofluido es generado por efectos de curvatura en la interfase, los cuales generan esfuerzos magnéticos tangenciales que actúan sobre estos puntos. A su vez, mediciones reportadas permitieron proponer, aunque no comprobar, que en la generación de flujo operan dos mecanismos de naturaleza diferente: 1) Esfuerzos tangenciales superficiales, para el fluido cerca de la interfase ferrofluido-aire, y 2) Efectos volumétricos, para las zonas del fluido lejos de la interfase. Estas mediciones sugieren que los campos de flujo obtenidos en la superficie son inadecuados para validar las teorías de flujo, que sólo aplican en puntos alejados de ella, como es la TDMAI. Paralelamente, implementaron la TDMAI para una muestra de ferrofluido, contenida en un canal rectangular infinitamente largo en la dirección axial, bajo el efecto de un campo magnético rotativo de baja amplitud y frecuencia, los cuales no permiten la validación de estos mismos resultados, ya que no son obtenidos para una geometría

físicamente realizable, [1-5]. De esta muy sucinta revisión, se puede apreciar que aunque existen trabajos que tratan de explicar los fundamentos básicos de este fenómeno, ellos no han podido hacerlo de manera clara, y que además de los pocos resultados experimentales que se reportan, no hay una clara y evidente concordancia de qué fenómeno origina ese movimiento asumiendo modelos hidrodinámicos. En este artículo se propone una interpretación experimental del origen del movimiento de un ferrofluido, como una analogía con un motor eléctrico de inducción monofásico. Los ferrofluidos tienen características súper-paramagnéticas, constituidos de nanopartículas de 8-15 nm de diámetro y suspendidas en una fase continua usualmente un líquido orgánico o inorgánico. Estas sustancias llaman la atención debido a su particular respuesta reológica, y la literatura redonda de potenciales aplicaciones de estos materiales. En esta investigación se construyó un prototipo compuesto de un toroide de sección transversal cuadrada en el que sobre su superficie externa y de manera equiespaciadas, se colocaron dos pares de bobinas de campo, dos pares de solenoides y un capacitor conectado en serie con estos últimos. Éstos con el objetivo de generar una onda de campo espacial rotacional que proporcione un momento magnético sobre las partículas de nano-ferrofluido y con ello provocar un movimiento continuo longitudinal del nanoferrofluido dentro del recipiente toroidal. En últimas, los cuatro pares de bobinas y el nanoferrofluido configuran cuatro motores de inducción monofásicos. Este documento se organiza de la siguiente manera: después de esta breve introducción, aparece una descripción sumaria de los fundamentos de motores de inducción monofásicos, modelo experimental que se utiliza para explicar la causa del movimiento circulatorio de nanopartículas magnéticas debido a la presencia de campos magnéticos externos y perpendiculares a la dirección de flujo. Continúa luego con una descripción de los componentes del prototipo experimental y de las mediciones y observaciones realizadas. Finaliza éste con algunas de las conclusiones más relevantes.

2. Teoría-Methodología

En esta sección se incluye una descripción básica de un motor de inducción monofásico acompañado con la descripción de las principales características y componentes de los ferrofluidos.

2.1 Motor de inducción monofásico

Un motor de inducción monofásico lo conforma un estator y un rotor. El movimiento del rotor se debe a que en el estator se configura un campo magnético rotativo originado, para nuestro caso, por la presencia de al menos dos bobinas que producen dos ondas de campo magnético pulsante desfasadas 90 grados tanto en el espacio como en el tiempo. Es decir, las bobinas se encuentran ortogonalmente ubicadas y se alimentan con corrientes desfasadas 90 grados en el tiempo. Este campo

magnético rotativo induce a su vez corrientes en el rotor que interactúan con la onda de campo magnético rotativo. Como consecuencia, se desarrolla en el rotor un par motor, cuyo propósito es vencer el par de carga aplicado a cierta velocidad y con características propias de cada motor de inducción, [6].

2.2 Partículas magnéticas

Estas son usualmente de tamaño micro y nano. Son materiales ferromagnéticos, como el hierro, o aleaciones de hierro-cobalto para lograr una alta saturación magnética. Sus geometrías son variadas, pero se prefieren las esféricas por su alto grado de empaquetamiento al momento de someter el fluido a la acción del campo magnético. Para el caso de las partículas de hierro, el intervalo de estas se encuentra en el rango 1-10 μm , [7].

2.3 Fase continua

La función que tiene la fase continua o fluido portador, es la de ser el medio donde la fase magnéticamente activa se suspende. 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 ferromagnético se debe conocer previamente su aplicación. Es importante que la fase continua no reaccione químicamente con la fase magnéticamente activa. Otro aspecto muy importante que depende de la selección del fluido portador, es el hecho de que la viscosidad de dicho fluido ayude a que el ferrofluido pueda tener una mejor estabilidad mecánica, [8].

2.4 Aditivos

En la preparación de los fluidos ferromagnéticos se requieren algunos aditivos que mejoran varias de sus propiedades. Estos comprenden, los estabilizadores y los surfactantes, así como los agentes de suspensión, modificadores de fricción y componentes anticorrosivos o anti-desgaste. Los materiales de alta viscosidad se usan para mejorar la estabilidad del ferrofluido. Los aditivos se requieren para controlar la viscosidad del líquido y la velocidad de sedimentación de las partículas metálicas, así como, para evitar la aglomeración de estas durante su uso, [7].

3. Metodología y desarrollo del modelo

A continuación, se describe el diseño del prototipo, así como algunas de las mediciones básicas realizadas.

3.1. Estimación de la densidad de campo magnético B

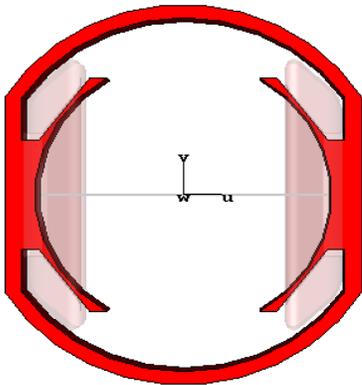
En esta investigación se tiene como trabajo fundamental el diseño y construcción de un prototipo equivalente a un motor eléctrico de inducción monofásico. Para tal fin se emplearon como bobinas de campo, cuatro estatores de motores universales y como solenoides, se diseñaron y construyeron cuatro bobinas. Para el diseño y estimación de propiedades magnéticas se realizaron varias simulaciones que permitieron predeterminar los valores de densidades de campo magnético en las bobinas de campo y solenoides. Esta tarea se hizo utilizando CST Studio Suite.

3.2. Densidad de campo magnético en la bobina de campo

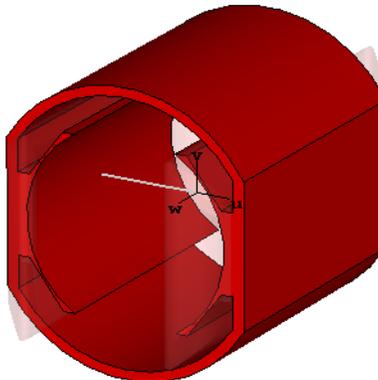
Previo al proceso de simulación se analizaron los aspectos constructivos de la bobina de campo, tales como el calibre del conductor, el número de vueltas por bobina, y el volumen del material del cual están construidas (chapa magnética). El modelado se realizó en dos etapas: la de modelado del núcleo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

a. Etapa de modelado del núcleo ferromagnético: Con el software CST se elaboró un esquema en dos dimensiones de la vista frontal del núcleo magnético de la bobina de campo, Figura 1a, para finalmente extruir este croquis hasta alcanzar la profundidad específica, Figura 1b.

Figura, Figure 1a. Vista frontal núcleo de la bobina de campo



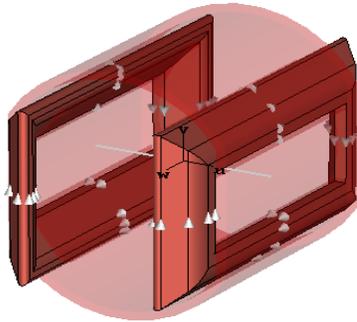
Figura, Figure 1b. Vista isométrica del núcleo de la bobina de campo



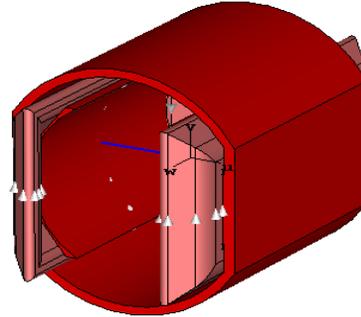
b. Modelado de los segmentos de bobina: Al igual que en la etapa anterior, se realizó un croquis y posteriormente una trayectoria cerrada, quedando el grupo de bobinas tal como aparece en la Figura

2a. La configuración de la bobina de campo quedó como se observa en la Figura 2b. Finalizado el modelado de la bobina de campo, se procedió a simularla, teniéndose como parámetros la corriente, el número de vueltas por bobina y la resistencia del conductor de la bobina.

Figura, Figure 2a. Par de bobinas de campo

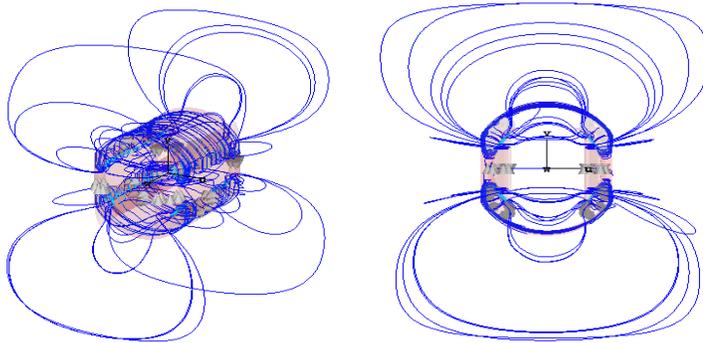


Figura, Figure 2b. Esquema final bobina de campo

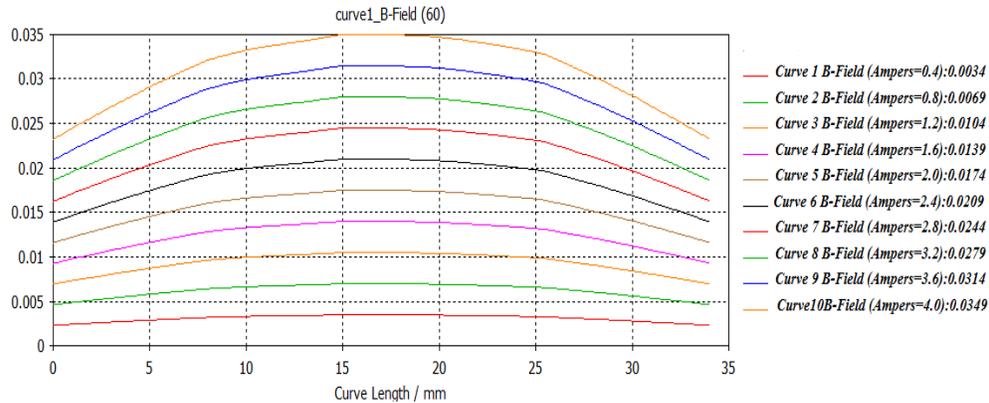


En la Figura 3 se observan las líneas de campo magnético producidas por la bobina de campo. Por otro lado, las curvas de densidades de campo magnético, para diferentes valores de intensidad de corriente que se generan en el entrehierro de la bobina de campo, se observan en la Figura 4. En ella, se pueden apreciar también los valores de densidades de campo magnético en el centro de ésta para cada valor de corriente. Las densidades de campo magnético están dadas en Teslas, [T].

Figura, Figure 3. Líneas de campo magnético de la bobina de campo



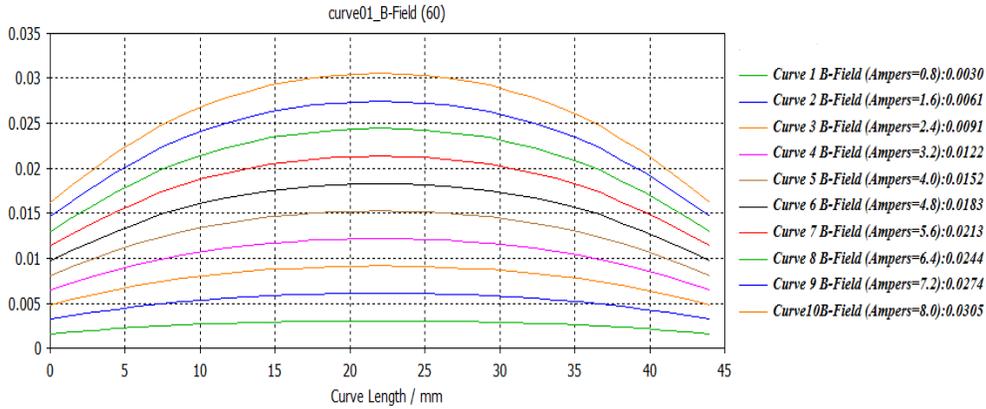
Figura, Figure 4. Densidad de campo magnético en el entrehierro de la bobina de campo. El eje y corresponde a la densidad del campo magnético a 60Hz.



Los valores de densidad de campo magnético de las curvas de la Figura 4, son de gran ayuda al momento de modelar los solenoides utilizados en el prototipo, ya que es necesario que estos produzcan densidades de campo magnético similares. Se observa que la densidad de campo tiende a ser mayor en el centro geométrico del entrehierro, y como se esperaba, a mayor amperaje mayor densidad de campo.

c. Densidad de campo magnético en el solenoide: Cabe aclarar que en el presente trabajo se define “solenoides”, a la bobina que físicamente está insertada dentro de la bobina de campo. Dada su simplicidad física, cada solenoide tiene la forma de un cilindro hueco y su eje coincide con el eje del núcleo de cada bobina de campo. Para el proceso de modelado del solenoide se tiene en cuenta el área limitada del entrehierro de la bobina de campo (44 mm×44 mm) y el área transversal exterior del recipiente (16mm×16mm). Por lo tanto, la longitud del radio exterior es $U_{min} = 17,5$ mm, la longitud del radio interior es $U_{max} = 14,5$ mm y la profundidad es $V_{max} = 44$ mm. Para la configuración empleada, la Figura 5 muestra la densidad de campo magnético en el interior del solenoide.

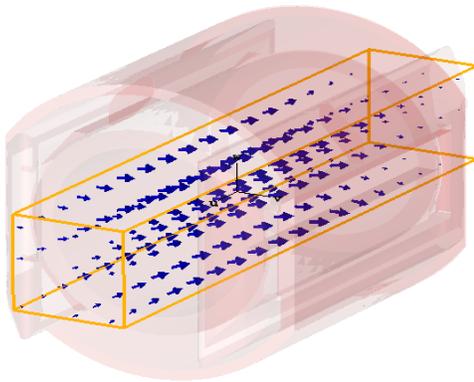
Figura, Figure 5. Densidad de campo magnético en el interior del solenoide. El eje y corresponde a la densidad del campo magnético a 60Hz.



Al igual que para el entrehierro, se observa que la densidad de campo es mayor en el centro geométrico del solenoide, y que, a mayor amperaje, mayor densidad de campo.

d. Generación de la onda de campo espacial rotativo. Teniendo ya modelados la bobina de campo y el solenoide, se crea un conjunto capaz de generar en su interior una onda de campo espacial rotativa, Figura 6, la cual corresponde a una instantánea tomada con el software CST.

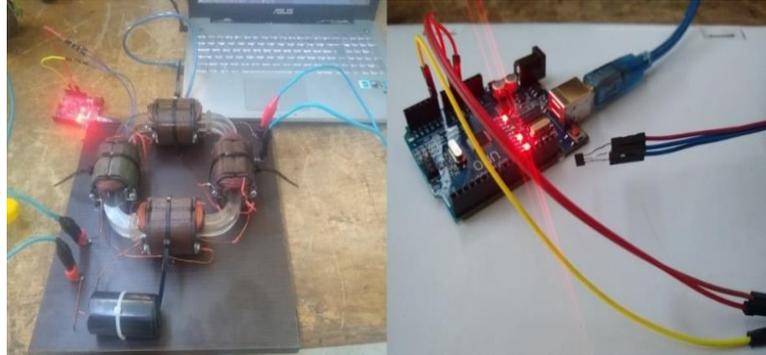
Figura, Figure 6. Instantánea de la densidad de campo magnético rotativo, simulada con CST



3.3. Validación de los resultados obtenidos en las simulaciones

Con el fin de validar los resultados obtenidos en las simulaciones, se empleó un sensor de densidades de campo magnético variables, Figura 7. En las Tablas 1 y 2 se presentan las densidades de campo magnéticos obtenidas en la simulación (datos de las Figuras 4 y 5) y las calculadas a partir de las curvas que arrojó el instrumento de medida. Se enfatiza que estos valores son eficaces, (rms).

Figura, Figure 7. Medición de densidades de campo magnético utilizando una sonda



Tabla, Table 1. Validación experimental de los resultados obtenidos en la bobina de campo

Corriente en bobina de campo, [A]	B_{si} simulado CST, [mT]	B_{so} con sonda, [mT]	Error, [%]
0,4	3,49	3,89	10,3
0,8	6,99	7,07	1,1
1,2	10,48	10,60	1,1
1,6	13,98	14,49	3,5
2,0	17,48	17,33	-0,9
2,4	20,97	19,80	-5,9
2,8	24,47	24,04	-1,8
3,2	27,96	27,93	-0,1
3,6	31,46	31,73	0,9
4,0	34,95	34,30	-1,9

Tabla, Table 2. Validación de los resultados obtenidos en el solenoide

I solenoide, [A]	B_{si} simulado con CST, [mT]	B_{so} con sonda, [mT]	Error [%]
0,8	3,05	3,18	4,1
1,6	6,11	6,22	1,8
2,4	9,16	9,19	0,3
3,2	12,21	12,37	1,3
4,0	15,27	15,20	-0,5
4,8	18,32	18,73	2,2
5,6	21,38	21,21	-0,8
6,4	24,43	24,39	-0,2
7,2	27,49	27,57	0,3
8,0	30,54	30,76	0,7

De estos datos podemos afirmar que están dentro de los errores experimentales tolerables. Por consiguiente, se puede concluir que hay una aceptable concordancia entre la simulación numérica y los datos medidos experimentalmente. El primer valor del error porcentual que aparece en la Tabla 1 creemos que fue debido a un error de lectura que, a un problema en el sistema de medición, pero se deja reportado pues no hay prueba de ello, ni se pudo repetir la medición.

3.4. Aspectos constructivos del prototipo

El toroide se fabricó con una lámina de acrílico transparente con espesor de 3 mm buscando tener una mejor visualización del comportamiento del ferrofluido ante la interacción de campos magnéticos. La Figura 8 muestra el diseño conceptual del prototipo y el final construido.

Figura, Figure 8. Prototipo diseñado conceptual (izq.) y el final (der.)



Las bobinas de campo se adquirieron del comercio, pero los solenoides se fabricaron especialmente para el prototipo. Para su construcción se tuvieron en cuenta los datos de densidad de campo magnético obtenidos en la simulación de las bobinas de campo, ya que es necesario que estos solenoides proporcionen densidades de campos magnéticos similares a los que proporcionan las bobinas de campo. Se utilizó alambre magneto calibre AWG # 18 en 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 mismos utilizados en la simulación del solenoide con CST.

4. Preparación de los ferrofluidos

Típicamente un ferrofluido está constituido de partículas magnéticas, de un fluido portador o fase continua, y en el caso de ser necesario, de aditivos estabilizadores.

4.1 Selección de las partículas magnéticas

Para fabricar las partículas magnéticas se requiere de un material con elevada permeabilidad magnética, por lo cual se seleccionó la magnetita. La magnetita de síntesis, se obtuvo mezclando 10 gr de cloruro férrico, con 10 gr de cloruro ferroso. A dicha mezcla se le agregaron 200 mL de agua destilada, homogenizándose la mezcla con un agitador de vidrio. Posteriormente se calentó a 80°C por 10 minutos. A la mezcla se le agregó hidróxido de sodio en exceso. Se formó una suspensión de partículas de color oscuro, indicativo de la formación de magnetita. Esta suspensión se dejó enfriar, y por decantación se recuperó el sólido.

4.2 Selección del fluido portador y aditivo

Existen varios aceites o fluidos de fácil adquisición comercial y que son utilizados para fabricar el ferrofluido. Considerando las propiedades que éstos deben tener, se seleccionó el ACPM. Este es un fluido de uso muy común, de baja viscosidad y transparente, lo cual lo hace adecuado para el presente propósito. Como aditivo, se utilizó el surfactante líquido TQ-Wash Is.

4.3 Elaboración de las muestras

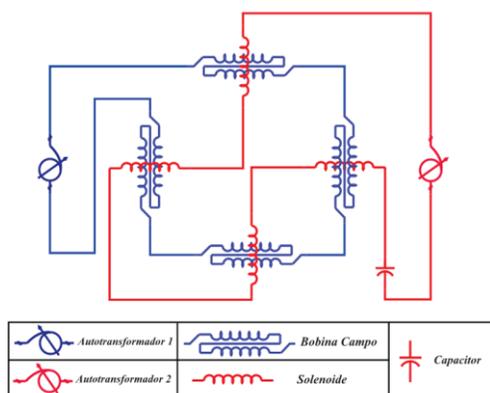
Para realizar las muestras con concentraciones del 25%, 50% y 75% de la magnetita sobre el volumen del fluido portador, se utilizaron dos probetas volumétricas. El volumen de referencia para la preparación de las mezclas corresponde a un valor aproximado de 50 mL (volumen del recipiente). Las muestras se clasificaron de la siguiente manera: *Muestra X*: 25% de magnetita (12,5 mL) y 75% de ACPM (37,5 mL). *Muestra Y*: 50% de magnetita (25,0 mL) y 50% de ACPM (25,0 mL). *Muestra Z*: 75% de magnetita (37,5 mL) y 25% de ACPM (12,5 mL). Las muestras del ferrofluido se almacenaron en recipientes plásticos.

5. Resultados y Discusión

5.1 Alimentación del prototipo

Para alimentar el prototipo se utilizó la conexión mostrada en la Figura 9, que consta de dos autotransformadores, teniendo cada uno la función de proporcionarle una tensión de alimentación adecuada 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 densidades de campo magnéticos similares entre las bobinas de campo y los solenoides. Se debe para estos últimos conectar un capacitor en serie, con el fin de lograr un desfase cercano a 90° eléctricos y así obtener una onda de campo magnético rotativo, requerido para observar el comportamiento de las partículas magnéticas en el recipiente. Se seleccionó un capacitor con una tensión de alimentación de 125 V, una capacitancia entre 270-340 μF y frecuencia de 60 Hz.

Figura, Figure 9. Esquema de conexión para alimentar el prototipo



5.2 Prueba para visualizar movimiento en el ferrofluido

Se realizaron pruebas al prototipo con las muestras *X*, *Y*, y *Z*. Para estas pruebas se tomaron como insumo 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 tiene 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 los valores escogidos, clasificándolos como tipos de alimentación. Se resalta que el primer valor de esa tabla esta fuera del valor esperado, pero ignoramos si fue una lectura equivocada o una medición inapropiada de cualquiera de esas corrientes. Este resultado no influye en las conclusiones de los experimentos, ya que no hubo movimiento efectivo del ferrofluido y se excluyó, como se describe seguidamente.

Tabla, Table 3. Alimentaciones propuestas para el circuito y que originan diferencias en **B**

Tipos de Alimentación	I bobina [A]	I solenoide [A]	B bobina [mT]	B solenoide [mT]	Error [%]
A	0,4	0,8	3,49	3,05	14,4
B	2,4	5,6	20,97	21,38	1,9
C	2,8	6,4	24,47	24,43	-0.2
D	3,2	7,2	27,96	27,49	-1,7

Una vez definidos los valores de corriente para alimentar el prototipo, se realizan las pruebas para cada concentración. Se observó que para la alimentación A (Tabla 5) no hubo un movimiento significativo del ferrofluido para los tres tipos de mezclas, por lo que este tipo de alimentación quedó descartada. Para la muestra *X* se observó que con la alimentación B (Tabla 5) hay movimiento dentro

del recipiente, en donde las partículas del ferrofluido recorren el toroide en su totalidad. Igualmente, se observó que en la parte central de las bobinas de campo y solenoide se crearon torbellinos. Estos mismos movimientos se presentaron para las alimentaciones *C* y *D* (Tabla 5), observándose mayor movimiento con la alimentación *C*. Teniendo en cuenta estos resultados, se decidió determinar para qué valores de corriente y tensión se observa un mayor movimiento del ferrofluido para las tres mezclas. Se tomaron cuatro datos de corriente y tensión tanto para las bobinas de campo, como para los solenoides. En la Tabla 6 y Tabla 7 se encuentran los resultados para las muestras *X* y *Y*, respectivamente.

Tabla, Table 4. Datos experimentales para la muestra *X*

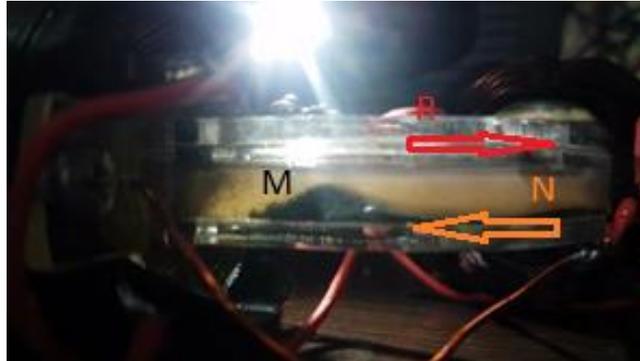
I bobinas [A]	I solenoides [A]	V bobinas [V]	V solenoides [V]
3,32	5,17	30,01	52,78
3,59	5,51	32,45	55,60
3,75	5,72	34,10	57,60
3,84	5,81	34,89	58,34

Tabla, Table 5. Datos experimentales para la muestra *Y*

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

Resulta claro de estas tablas que, a mayores corrientes tanto en las bobinas, como en los solenoides, se crea una tensión cada vez mayor para cada una de ellas. De igual forma, es notorio que a mayor concentración de partículas ferromagnéticas presentes en el ferrofluido (muestra *Y*) aparecen mayores tensiones tanto en las bobinas como en los solenoides, comparadas frente a la muestra *X*.

Figura, Figure 10. Descripción del movimiento del ferrofluido. *M* indica el montículo formado, *R* y *N* el sentido del movimiento longitudinal de las partículas livianas, y de las partículas más pesadas, respectivamente.



Siguiendo la Figura 10, válida para las concentraciones del 25% (X) y 50 % (Y) en volumen del ferrofluido empleado durante el experimento, se pudo observar: 1) El movimiento longitudinal de las partículas ferromagnéticas más livianas del ferrofluido a lo largo del toroide, parte superior del canal y mostrado por la flecha roja marcada con la letra R. 2) Que en el centro de cada conjunto magnético, conformado por la bobina de campo y solenoide, se crea un torbellino similar al movimiento de un rotor, es decir, un aparente rotor particulado y 3) La aparición de un montículo de partículas ferromagnéticas más pesadas, marcado con la letra M, en el fondo del toroide que corresponde a la salida del ferrofluido en la parte inferior del canal. Se observó que estas partículas pesadas seguían la dirección contraria a la que tomaban las partículas más livianas (ver Figura 10, flecha naranja-letra N). También se observó que el tiempo de formación del montículo, era menor para las suspensiones con mayor concentración de partículas ferromagnéticas.

Para la muestra Z se dificultó la observación del movimiento del ferrofluido. Para esa alta concentración de partículas magnéticas se requiere elevar la corriente por encima de 4,3 A, debido a su calibre (#21 AWG). Se dejó fijo el valor en 4,3 A en las bobinas de campo y se aumentaron los valores de corriente en los solenoides desde 5 A hasta 8 A, pero no se logró observar cambios significativos en el movimiento del fluido. Dado estas corrientes, y en general para todos los experimentos, ellos se limitaron a contados segundos pues el calentamiento de las bobinas estuvo entre 35-45°C como mínimo, que no solo alteraban la temperatura del ferrofluido, sino que creaba una situación riesgosa. El devanado auxiliar se utilizó solo para el instante del arranque desconectándose una vez cumplió su función. Finalmente, para los valores de corrientes mostrados

en la Tabla 6 y Tabla 7, se tomaron datos de densidades de campo magnético, como se discute seguidamente.

5.3 Densidades de campo magnético

En la Tabla 8 y Tabla 9 se observan los resultados obtenidos para cada combinación de corrientes y para las muestras X y Y, respectivamente. A partir de esta información se pueden estimar los valores de densidades de campo magnético que se generan dentro del recipiente.

Tabla, Table 6. Densidades de campo magnético en el centro de las bobinas para la muestra X

I bobina [A]	I solenoide [A]	B centro [mT]
3,32	5,17	24,04
3,59	5,51	26,87
3,75	5,72	29,34
3,84	5,81	29,70

Tabla, Table 7. Densidades de campo magnético en el centro de las bobinas para la muestra Y

I bobina [A]	I solenoide [A]	B centro [mT]
3,97	6,03	30,05
4,08	6,26	31,01
4,17	6,28	32,53
4,34	6,60	33,94

Para ambas muestras de ferrofluido se observó que al incrementarse tanto la corriente de la bobina, como la del solenoide, las densidades de campo magnético se incrementan. De igual forma, resulta evidente que para mayor concentración de partículas ferromagnéticas (muestra Y), mayor es la densidad de campo magnético presente, al compararse con la muestra X.

6. Conclusiones

En este artículo se describió el diseño y los resultados experimentales de un prototipo de operación equivalente a la de un motor eléctrico de inducción monofásico de fase partida, con la característica de que su rotor es un fluido ferromagnético.

El prototipo consiste de un toroide de sección transversal cuadrada, en el que hay un flujo longitudinal de un ferrofluido, inducido por un campo magnético externo rotativo con componentes ortogonales y de frecuencia fija. Las cuatro bobinas de campo presentaron un aumento de su temperatura (10-15°C, por encima de la temperatura ambiente) durante las pruebas, factor que limitó el tiempo de duración de éstas.

En las pruebas realizadas al prototipo se observó movimiento del fluido ferromagnético dentro del recipiente describiendo una trayectoria a través de este y caracterizada por seguir direcciones contrarias; el ferrofluido ubicado en la parte superior del canal se movió en un sentido mientras que la sección de ferrofluido ubicado en la parte inferior se movió en sentido contrario. En el centro del acople de las bobinas de campo y solenoides se crea un torbellino similar al movimiento de un rotor, que imprime el momento al ferrofluido de tal manera que hace que los flujos encima y debajo del canal sigan direcciones opuestas. De igual forma, las mediciones experimentales comparadas con las simulaciones estuvieron dentro de los rangos aceptables que incluye los errores de medición y demás presentes en un sistema experimental.

Finalmente, consideramos que este tipo de experimento puede explicar el movimiento del ferrofluido debido a la presencia de un campo magnético externo rotatorio, asumiendo válida su analogía con un motor eléctrico de inducción monofásico. La diferencia básica con su análogo eléctrico radica en que el rotor en este caso, es un fluido con propiedades magnéticas y no un sólido compacto. Esto es de por sí una interpretación diferente a la que se ha propuesto tradicionalmente utilizando la Teoría de Difusión de Momento Angular Interno (TDMAI).

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Industrial de Santander por el financiamiento de este trabajo de investigación.

7. Referencias

- [1] Victory, M, Pant, R., Phanjoubam, S. “Synthesis and characterization of oleic acid coated Fe–Mn ferrite based ferrofluid”, *Materials Chemistry and Physics*, Volume 240, 15, Article number 122210, January 2020
- [2] Boroun, S., Larachi, F., “Anomalous anisotropic transport of scalars in dilute ferrofluids under uniform rotating magnetic fields – Mixing time measurements and ferrohydrodynamic simulations”, *Chemical Engineering Journal*, Volume 380, 15, Article number 122504, January 2020
- [3] Solovyova, A. Y, Elfimova, E., “The initial magnetic susceptibility of high-concentrated, polydisperse ferrofluids: Universal theoretical expression”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Volume 495, 1, Article number 165846, February 2020
- [4] Xie, C., “Global strong solutions to the Shliomis system for ferrofluids in a bounded domain”, *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, Volume 42, Issue 18, 1, Pages 6021-6028, December 2019
- [5] Xuan, X., “Recent advances in continuous-flow particle manipulations using magnetic fluids”, *Micromachines*, Volume 10, Issue 11, 1, Article number 744, November 2019
- [6] L. M. Perkins, “The Single-Phase Induction Motor”, *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, XLIV , 40-52, 1925.
- [7] Arauz Solís, A. B. (2018). Desarrollo de Materiales Inteligentes con Propiedades Magnetoreológicas. Centro de Investigación en Química Aplicada CIQA <<https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/341/1/Adriana%20Berenice%20Arauz%20Solis.pdf>>, [Acceso 10 junio de 2018].
- [8] Bocarando Chacon, J. G. (2016). Síntesis y Caracterización de Fluidos Magnetorreológicos. Centro de Investigación en Materiales Avanzados CIMAV <<https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/374/1/Tesis%20Jacqueline%20Gualupe%20Bocarando%20Chacon.pdf>>, [Acceso 10 junio de 2018].