

**Evaluación experimental del flujo de un ferrofluido bajo un campo magnético creciente en
la dirección axial**

Daniel Santiago Saavedra Niño y Robert Andrés Gelvis Rodríguez

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Químico**

Director

Ph.D. Arlex Chaves Guerrero

Codirectores

M.Sc. María Daniela Contreras Mateus

Ph.D. Ronald Alfonso Mercado Ojeda

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2023

Dedicatorias

A Dios por brindarme la sabiduría e inteligencia que me han permitido llegar hasta aquí. A mi madre Nancy y mi padre Gerardo quienes han sido siempre el motor que impulsa mis sueños y esperanzas, quienes me enseñaron a nunca rendirme y pase lo que pase siempre dar lo mejor de mí para ser un gran profesional, pero sobre todo tener humildad en mi corazón y ser una gran persona. A mi tía Miriam por siempre brindarme su carisma y cariño. A mis primas Angie y Liz por ser como mis hermanas mayores, aconsejarme y apoyarme en los momentos difíciles. Al resto de mi familia por aportar un granito de arena durante todo el proceso de este gran logro. A aquellas maravillosas personas que Dios puso en mi camino y hoy en día puedo llamar amigos Sebastián, Ana, Valeria valentina, Laura y Robert por animarme en todo momento y por cada una de las aventuras vividas durante todo este tiempo. Por último, pero no menos importante, a mi compañera de vida Daniela por confiar en mí, apoyarme en todos y cada uno de los pasos que doy en la vida, espero compartir contigo este y muchos otros momentos más importantes de mi vida.

Desde el fondo de mi corazón, gracias.

Daniel Santiago Saavedra Niño

A Dios gracias por la vida, salud e inteligencia. Para ti madre este logro, por todo tu tiempo, apoyo y amor. Gracias por todos los valores que me enseñaste con los cuales pude lograr a llegar a ser un gran ser humano. Por enseñarme a nunca rendirme y hacerle frente a todo y por no solo ser una madre si no mi mejor amiga y confidente. A ti padre por tu apoyo y amor. A ti Andrés Rojas gracias, por ser al igual que mi madre mi motor y por estar ahí en los días difíciles. Gracias por todo tu amor, cariño y paciencia...te amo. Al resto de mi familia, infinitas gracias por todo su apoyo el cual fue demasiado importante para este gran logro. No puedo dejar de agradecer a esas personas que hoy en día tengo el honor de decirles amigos (Daniel, Valentina, Laura, Valeria, Sebastián, Ana, Cristian, Edward, Camila y Víctor). A Sergio, que no es solo uno de mis mejores amigos si no a quien considero como un hermano...muchas gracias por todo su apoyo y por su valiosa amistad. Así mismo, a todas las demás personas que de alguna u otra forma aportaron a este gran logro.

Los quiero, gracias.

Robert Andrés Gelvis Rodríguez

Agradecimientos

A nuestra alma mater, la Universidad Industrial de Santander, a la Escuela de Ingeniería Química y todos aquellos profesores que nos acompañaron a lo largo de todo este proceso académico .

Al grupo de investigación FIRST por motivarnos a investigar sobre temas tan interesantes y siempre tener curiosidad de todo lo que sucede en el mundo que nos rodea

A nuestro Director Arlex Chaves Guerrero y Codirector Ronald Alfonso Mercado Ojeda por su dirección, paciencia, entrega y valiosos consejos que nos permitieron alcanzar los objetivos de esta tesis.

A nuestra Codirectora María Daniela Contreras Mateus por su dedicación y paciencia, sin sus palabras y correcciones precisas no se hubiese podido llegar a esta instancia tan anhelada. Gracias por su guía y todos sus consejos, los llevaremos grabados para siempre en la memoria en nuestro futuro profesional.

Tabla de contenido

	Pág.
Introducción	11
1. Objetivos.....	16
1.1. Objetivo general	16
1.2. Objetivos específicos.....	16
2. Marco conceptual	16
2.1. Estructura básica y estabilidad de un ferrofluido	16
2.2. Mecanismos de relajación magnética.....	17
2.3. Viscosidad negativa.....	19
3. Estado del arte	21
4. Metodología experimental.....	24
4.1. Materiales	25
4.2. Descripción de la metodología.....	25
4.3. Desarrollo experimental	26
4.3.1. <i>Etapa 1: Formulación y evaluación de las propiedades magnetoreológicas del FF</i>	26
4.3.2. <i>Etapa 2: Caracterización del sistema de flujo.....</i>	28
4.3.3. <i>Etapa 3: Determinación de variaciones en el flujo volumétrico del FF en función del tiempo de exposición, configuración y densidad al CM.....</i>	29
5. Resultados y discusión.....	30
5.1. Curva de magnetización	30

5.2. Propiedades reológicas	32
5.3. Mediciones del efecto magneto-viscoso con un reómetro MCR 302	33
5.3.1. <i>Comportamiento inducido por el CM</i>	33
5.3.2. <i>Efecto del CM en la viscosidad del FF para distintas velocidades de cizalla</i>	34
5.4. Reproducibilidad en el sistema de flujo	35
5.5. Determinación de las zonas linealmente crecientes	37
5.6. Efectos en el flujo volumétrico del FF variando la presión de entrada en ausencia de CM	39
5.7. Efectos del CM en el flujo volumétrico del FF a diferentes configuraciones y densidades de flujo magnético	39
5.7.1. <i>Efectos de un CM creciente en el flujo volumétrico de un FF al aplicar una DC</i> .	40
5.7.2. <i>Efectos de un CM creciente en el flujo volumétrico de un FF al aplicar una AC</i> ..	41
5.8. Variaciones en el flujo volumétrico del FF en presencia de CM a diferentes valores de presión de entrada.....	43
5.8.1 Variaciones en el flujo volumétrico del FF en presencia de CM a 1,5 bar	43
5.8.2 Variaciones en el flujo volumétrico del FF en presencia de CM a 2,0 bar	45
6. Conclusiones.....	46
Referencias bibliográficas.....	48
Apéndices.....	53

Lista de figuras

Figura 1. Ilustración del efecto magneto- viscoso.	12
Figura 2. Representación esquemática del estado de dominio único de una nanopartícula en un ferrofluido	17
Figura 3. Dependencia de los cambios de viscosidad relativa de un FF en un CM alterno	20
Figura 4. Dibujo técnico en 3D del viscosímetro capilar diseñado para la investigación de ferrofluidos de Co altamente concentrados.....	23
Figura 5. Diagrama metodología adoptada para el desarrollo del proyecto de investigación	24
Figura 6. Configuración del CM.....	30
Figura 7. Curva de magnetización de NPs	31
Figura 8. Curva de flujo y viscosidad en función de la velocidad de cizalla.....	32
Figura 9. Curva de flujo transitorio	33
Figura 10. Efecto magneto-viscoso del FF para tasa de cizallamiento de 10, 25 y 50 s ⁻¹	35
Figura 11. Comportamiento del keroseno.....	35
Figura 12. Comportamiento del FF.....	36
Figura 13. Distribución de la densidad de flux magnético proporcionado por 6 bobinas	38
Figura 14. Distribución de la densidad de flux magnético proporcionado por 3 bobinas al aplicar una AC	38
Figura 15. Variaciones del volumen de FF total en el tiempo a presiones de 1,0, 1,5 y 2,0 bar en ausencia de un CM.....	39
Figura 16. Efecto de un CM generado por una DC a 1,0 bar	41
Figura 17. Efecto de un CM generado por una AC a 1,0 bar	42

Figura 18. Efecto de un CM generado por una AC a 1,0 bar, con una configuración de 6 y 3 bobinas	43
Figura 19. Efecto de un CM generado por una AC a 1,5 bar.	43
Figura 20. Efecto de un CM generado por una DC a 1,5 bar.	44
Figura 21. Efecto de un CM a 2,0 bar.....	45

Lista de apéndices

Apéndice A. Propiedades de los materiales	53
Apéndice B. Características y funcionamiento del sistema de flujo	54
Apéndice C. Sistema de medición del campo magnético (CM)	57
Apéndice D. Calculo detallado de la magnetización de saturación, la susceptibilidad magnética y el campo coercitivo de las NPs	58
Apéndice E. Comportamiento del flujo volumétrico del FF a diferentes configuraciones, frecuencia e intensidad de CM.....	69

Resumen

Título: Evaluación experimental del flujo de un ferrofluido bajo un campo magnético creciente en la dirección axial *.

Autores: Daniel Santiago Saavedra Niño, Robert Andrés Gelvis Rodríguez**.

Palabras Claves: ferrofluido, mecanismos de relajación, viscosidad rotacional, efecto magneto-viscoso, fuerza de Kelvin, viscosidad ‘negativa’, flujo volumétrico.

Descripción: Experimentos realizados en un sistema de flujo diseñado para el estudio de variaciones en el flujo volumétrico de un ferrofluido en presencia de campos magnéticos crecientes en la dirección axial, mostraron una aceleración, independientemente del tipo de corriente suministrada (directa o alternante). Se formuló un ferrofluido de base oleosa con nanopartículas de Fe_3O_4 a una concentración de 0,87 %v/v. Asimismo, se empleó un sistema de embobinado conformado por seis bobinas de diferentes diámetros conectadas en serie, que generan un CM no uniforme en dirección axial. La mayor aceleración se obtuvo con una corriente alternante de 0,117 A y una frecuencia de 400 Hz. Esto probablemente se deba a que, en presencia de un campo magnético oscilante, pueden inducirse efectos de viscosidad “negativa”, así como la acción de fuerzas de cuerpo magnético tipo Kelvin. Los resultados mostraron además que, el ferrofluido tiende a desacelerar al final de cada experimento y probablemente se debe a la formación de agregados de nanopartículas que obstruyen el paso del flujo.

* Trabajo de grado

** Facultad de ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director Ph.D. Arlex Chaves Guerrero. Codirectores Ph.D. Ronald Alfonso Mercado Ojeda y M.Sc. María Daniela Contreras Mateus.

Abstract

Title: Experimental evaluation of the flow of a ferrofluid under the influence of an increasing magnetic field in the axial direction*.

Authors: Daniel Santiago Saavedra Niño, Robert Andrés Gelvis Rodríguez**.

Keywords: ferrofluid, single domain, relaxation mechanisms, rotational viscosity, increasing magnetic field, direct current, alternating current, flow system, magneto-viscous effect, Kelvin force, 'negative' viscosity, volumetric flow.

Description: Experiments carried out in a flow system designed for the study of variations in the volumetric flow of a ferrofluid in the presence of increasing magnetic fields in the axial direction, showed an acceleration, regardless of the type of current supplied (direct or alternating). An oil-based ferrofluid with Fe_3O_4 nanoparticles at a concentration of 0,87 %v/v was formulated. Furthermore, it was used a winding system consisting of six coils of different diameters connected in series, generating a non-uniform magnetic field in the axial direction. The highest acceleration was obtained with an alternating current of 0,117 A and a frequency of 400 Hz. The observed phenomenon may be attributed to the influence of an increasing oscillating magnetic field, which can induce 'negative' viscosity effects and Kelvin-type magnetic body forces. Additionally, the experiment revealed that the ferrofluid exhibited a deceleration tendency towards the end, possibly because of the formation of nanoparticle aggregates that obstructed the flow path.

* Bachelor thesis

** Physical-Chemical Engineering Faculty. Chemical Engineering School. Director Ph.D. Arlex Chaves Guerrero. Co-directors Ph.D. Ronald Alfonso Mercado Ojeda and M.Sc. Maria Daniela Contreras Mateus.

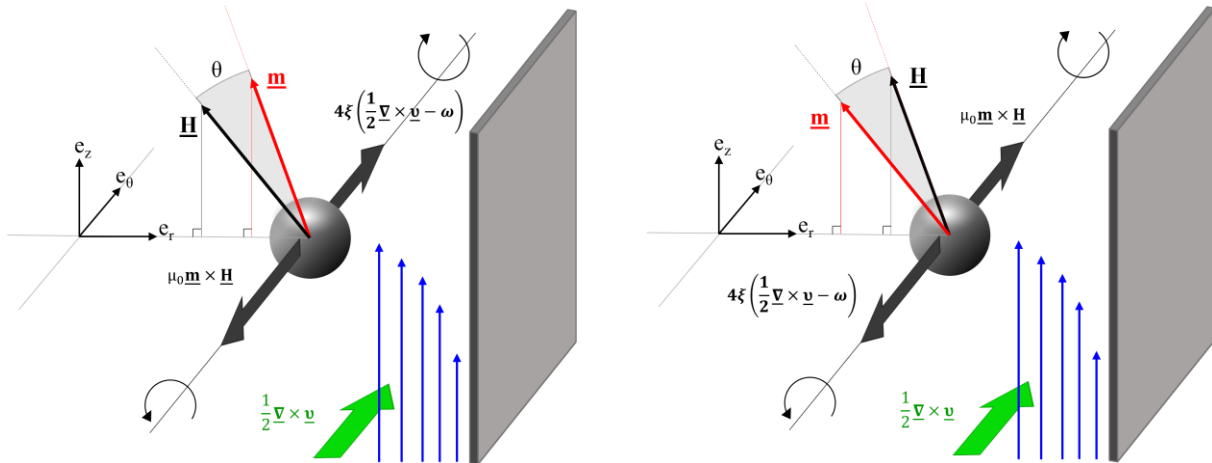
Introducción

Un ferrofluido (FF) es una suspensión coloidal de nanopartículas (NPs) magnéticas (diámetro ~ 10 nm) dispersas en un líquido portador (acuoso u orgánico) no magnético (Mao et al., 2011; Odenbach, 2000; Rosensweig 1997). En presencia de un campo magnético (CM) este tipo de fluidos experimentan cambios en algunas de sus propiedades físicas que dependen principalmente de la intensidad del CM, de la concentración y tamaño de las NPs (Odenbach, 2000). Estas partículas tienen un único dominio magnético (superparamagnetismo) por lo que su magnetización apunta en la dirección del campo aplicado (Kötitz et al., 1999). Hay dos mecanismos que rigen la relajación de magnetización de las NPs: (i) la relajación de Néel que se produce por la reorientación del vector de magnetización (\mathbf{m}) dentro del núcleo magnético y (ii) la relajación browniana donde el momento magnético de la partícula rota con la partícula misma suspendida en un líquido portador (Bedanta et al., 2013; Ilg & Kröger, 2020).

Por otro lado, cuando una NP se encuentra en flujo cortante, la velocidad angular de la particular (ω) es igual a la velocidad angular local del fluido y el ferrofluido se comporta como un fluido Newtoniano. No obstante, cuando el FF bajo un esfuerzo cortante se expone a un CM estático externo, este CM ejerce un torque magnético ($\mathbf{m} \times \mathbf{H}$) sobre el momento magnético de las NPs lo que induce un giro asincrónico con respecto a la vorticidad local del fluido ($\omega \neq \frac{1}{2} \nabla \times \mathbf{v}$) (Larachi & Desvigne, 2006) generando una resistencia adicional (torque mecánico) entre las NPs y el fluido, que se traduce en un incremento de la viscosidad del ferrofluido. Este fenómeno que depende de la velocidad angular de las partículas y la velocidad local de rotación del fluido se ha tenido en cuenta a través de un tensor de esfuerzos antisimétrico el cual es proporcional al coeficiente fenomenológico de “*vortex viscosity*”, **Figura 1**.

Figura 1.

Ilustración del efecto magneto-viscoso. (a) Aumento de la viscosidad del FF debido al efecto retardado de la velocidad de espín de las NPs, (b) Disminución de la viscosidad del FF que se debe a que parte del momento angular interno de las NPs se transmite al fluido



Nota. Imagen adaptada de (Larachi & Desvigne, 2006; Odenbach, 2000).

Como consecuencia, se pueden observar dos diferentes comportamientos en la viscosidad del FF (ver **Figura 1**). Cuando la velocidad angular local del fluido y el espín de las NPs magnetizadas están en contra rotación o están en corotación con una vorticidad del fluido más rápida que la velocidad de espín de las NPs, se produce alrededor de las NPs un aumento en la disipación de la energía hidrodinámica debido al efecto retardado de la velocidad de rotación de las NPs y, por tanto, da lugar a un aumento de la viscosidad del fluido (ver **Figura 1a**) (Hajiani & Larachi, 2013; Larachi & Desvigne, 2006; Odenbach, 2000). Del mismo modo, cuando la vorticidad del fluido y el espín de las NPs magnetizadas están en corotación con una velocidad de rotación de las NPs más rápida que la vorticidad del fluido, se observa una disminución en la viscosidad del FF (ver **Figura 1b**) (Larachi & Desvigne, 2006; Odenbach, 2000). Esto se debe a que parte del momento angular interno de las NPs se transmite al fluido evitando así la disipación de la energía hidrodinámica alrededor de las NPs que se encuentran en el FF (Odenbach, 2000).

Este comportamiento, conocido como **viscosidad rotacional**, fue observado primero por McTague quien en 1969 publicó un artículo sobre los cambios de viscosidad en una suspensión diluida de partículas de cobalto de 6 nm (Hajiani & Larachi, 2013; Larachi & Desvigne, 2006; Odenbach, 2000). Haciendo uso de un viscosímetro capilar, Mc Tague comprobó que la viscosidad de esta suspensión diluida aumentaba al aumentar la intensidad del CM. Asimismo, variando solo la dirección del CM que inicialmente estaba paralelo al flujo y que luego pasó a estar perpendicular, observó un aumento de hasta dos veces en el valor de la viscosidad (Odenbach, 2000), este aumento se debe a que cuando el campo es perpendicular al flujo, hay una desalineación entre el momento magnético y la dirección del campo que impide la libre rotación de las partículas. En contraste, a cuando el campo es paralelo al flujo donde las partículas están alineadas al CM y rotan alrededor de la dirección de este mismo. A este artículo le siguió una primera explicación teórica de Hall y Busenberg (Hall et al., 1969) en el mismo número del *Journal of Chemical Physics*. La explicación teórica final de Shliomis (Shliomis, 1972), publicada dos años después, no sólo fue la explicación de la viscosidad rotacional en fluidos magnéticos diluidos, sino también la base para el desarrollo de la ferrohodinámica (Odenbach, 2000). Desde entonces, la viscosidad rotacional se ha estudiado no solo bajo efectos de campos magnéticos estáticos (SMF), también, bajo efectos de campos magnéticos oscilantes (OMF) y campos magnéticos rotativos (RMF) (Krekhov et al., 2005; Odenbach, 2000; Rhodes et al., 2006). Los primeros experimentos con FFs bajo OMF fueron realizados por Bacri et al. quienes demostraron que, a altas frecuencias el CM oscilante incrementa el espín de las NPs (Larachi & Desvigne, 2006). En consecuencia, la energía electromagnética se transfiere al flujo del fluido como energía cinética, disminuyendo así, la energía disipada alrededor de las NPs y por consiguiente una disminución en la viscosidad del FF (Shliomis, 1972). Adicionalmente, otros estudios realizados por Gauzeau et al. en los cuales se

hizo uso de un FF concentrado y un CM oscilante demostraron que la viscosidad rotacional depende también de la vorticidad del flujo ya que un campo alterno ayuda a la vorticidad y favorece la rotación de partículas magnéticas individuales (Shliomis & Morozov, 1994). Ahora bien, aunque se han realizado diversos estudios teóricos y experimentales sobre la reología e hidrodinámica de los fluidos magnéticos en presencia de un CM, son pocos los estudios experimentales detallados sobre el flujo de un FF en presencia de un campo no uniforme (Kamiyama et al., 1983, 1992).

Con base en lo anterior, una posible aplicación consiste en inducir fuerzas magnéticas que actúen sobre la superficie de una capa de FF, con el fin de bombear un líquido secundario, inmisible no magnético (Mao et al., 2011). Este sistema de bombeo se basa en las fuerzas de tensión interfacial que mantienen intacta la capa de FF y sólo funciona en canales de flujo de escala micro- o milimétrica, por lo que, los caudales logrados hasta ahora son pequeños ($\sim 1 \mu\text{L}/\text{min}$) y las aplicaciones del sistema en cuestión, tales como el diseño de pipetas y micro-bombas magnéticas, son limitadas (Greivell & Hannaford, 1997; Hartshorne et al., 2004; Mao et al., 2011). Uno de los inconvenientes con este sistema de bombeo es que las NPs magnéticas del FF se difunden en el líquido secundario, lo que provoca un rápido deterioro del rendimiento y una corta vida útil de estos dispositivos (Mao et al., 2011). Además, para poder arrastrar una capa de FF a través de un líquido secundario con un deslizamiento mínimo, se necesitan altas densidades de flujo magnético ($\sim 1 \text{ T}$) y adicionalmente se requiere de fuertes gradientes de campo creados con imanes permanentes de alta potencia, lo que dificulta llevar un sistema de este tipo a gran escala (Hatch et al., 2001; Mao et al., 2011). Por último, los elevados gradientes de CM causan la aglomeración irreversible de las NPs que se encuentran dentro del FF, lo que hace que el rendimiento del bombeo sea mucho menor (Mao et al., 2011a). Ahora, los fluidos utilizados para aplicaciones técnicas en los últimos 50 años tienen una concentración volumétrica $\sim 10 \text{ vol.}\%$

(Odenbach, 2000). A estas altas concentraciones es impreciso excluir las interacciones dipolares entre NPs, por lo que, estudiar los efectos magnetoviscosos resultantes es importante para el diseño de estas aplicaciones. En este trabajo se evaluará el comportamiento de flujo de FFs bajo efecto de CMs estáticos y oscilantes, empleando un sistema de flujo a escala de laboratorio. Este es un sistema que opera a presión constante, mediante el uso de una bomba de desplazamiento positivo que mueve el eje de un cilindro-pistón en el que se encuentra almacenado el FF. La variable de respuesta es, entonces, *“modificaciones en el flujo volumétrico por cambios graduales en la frecuencia y densidad de flujo magnético”*, empleando CMs estáticos/oscilantes linealmente crecientes. Los resultados que se obtengan podrían ser utilizados para investigar el efecto de la inclusión de FFs en el comportamiento de otros fluidos reológicamente complejos.

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Evaluar de forma experimental el flujo de un ferrofluido bajo un campo magnético creciente en la dirección axial.

1.2. Objetivos específicos

Evaluar las propiedades magneto-reológicas de un ferrofluido de base oleosa.

Determinar modificaciones en el flujo volumétrico del ferrofluido en función de la intensidad del campo magnético.

Determinar modificaciones en el flujo volumétrico del ferrofluido en función de la presión de entrada (tiempo de exposición del fluido al campo magnético).

2. Marco conceptual

2.1. Estructura básica y estabilidad de un ferrofluido

Los ferrofluidos (FFs) o nanofluidos magnéticos (NFMs) son suspensiones estables de NPs superparamagnéticas ultrafinas suspendidas en un medio portador líquido que exhiben características únicas en presencia de un CM (Odenbach, 2002; Odenbach, 2000; Rosensweig, 1997). Ahora bien, la estabilidad de este tipo de suspensiones es de gran importancia en diversas aplicaciones técnicas. En primer lugar, se debe tener en cuenta la estabilidad frente a la sedimentación que puede deberse a fuerzas gravitatorias o magnéticas(Odenbach, 2000). Para garantizar que las NPs no se sedimenten y se mantengan bien dispersas, la energía térmica $E_T = k_B T$ (k_B : constante de Boltzmann's, T: temperatura absoluta) debe ser mucho mayor a la energía

de estas en el campo gravitatorio o en un CM, respectivamente (Larachi & Desvigne, 2006; Odenbach, 2000). La energía de las partículas en un CM está dada por:

$$|E_H| = \mu_0 mH \quad (\text{Ec.1})$$

donde m es el momento magnético de la partícula (Landau, 1985). Por lo tanto, la estabilidad de la sedimentación en un gradiente de CM está dada por $E_H < E_T$ (Hatch et al., 2001; Landau, 1985). No obstante, la energía térmica no puede protegerlas de las interacciones magnéticas dipolo-dipolo (o interacciones de Van der Waals) que causan la agregación irreversible de estas, por lo que, el contacto entre dichas partículas debe evitarse para garantizar la estabilidad coloidal del sistema (Odenbach, 2000; Rayment, 2003). Así pues, la estabilización de una suspensión de NPs se basa en la repulsión estérica proporcionada por un tensioactivo con moléculas de cadena larga (Rosensweig, 1997). El tensioactivo proporciona una barrera energética que es suficiente para evitar su contacto y, por tanto, su agregación debido a las interacciones dipolo-dipolo (Odenbach, 2000).

2.2. Mecanismos de relajación magnética

Para entender las propiedades magnéticas un ferrofluido, hay que echar un vistazo a la estructura magnética de las NPs que se encuentran suspendidas en este tipo de fluidos. Cuando las NPs magnéticas son lo suficientemente pequeñas (diámetros menores a 50 nm para óxidos de hierro) (Telling, 2019), existen en un estado de dominio único, en otras palabras, todos los espines magnéticos de la partícula apuntan en la misma dirección como se muestra en la **Figura 2**. El tamaño de partícula al cual se produce este estado depende del material del cual están hechas las NPs (Mørup et al., 2019).

Figura 2.

*Representación esquemática del estado de dominio único de una nanopartícula en un ferrofluido.
Adaptada de (de Sousa et al.)*



El tiempo que tardan las NPs en perder su magnetización se denomina tiempo de relajación magnética (Telling, 2019). En términos generales, existen dos tipos de mecanismos por los que puede producirse la relajación magnética. El primero se da cuando la energía térmica del entorno es lo suficientemente alta como para superar la barrera energética que proporciona la anisotropía cristalográfica del material magnético y se le conoce como mecanismo de relajación de Néel (Odenbach, 2000). Este tipo de mecanismo se produce por la reorientación del vector de magnetización al interior del núcleo magnético y depende además del volumen del núcleo magnético de la partícula (Telling, 2019). Por otro lado, se tiene el mecanismo de relajación Browniana, este tipo de mecanismo se debe a la difusión rotacional de toda la partícula en el líquido portador y depende del tamaño hidrodinámico de esta (Bacri et al., 1995; Odenbach, 2000). Ambos mecanismos se caracterizan por un tiempo de relajación respectivo. El primero, es el tiempo de Relajación de Néel y está dado por:

$$\tau_N = f_0^{-1} \exp\left(\frac{KV}{k_B T}\right) \quad (\text{Ec.2})$$

donde K es la constante de anisotropía de las partículas y f_0 es la frecuencia de Larmour del vector de magnetización en el campo de anisotropía de la partícula, siendo este del orden de $f_0 \approx 10^9 \text{s}^{-1}$ (Odenbach, 2000). El mecanismo de relajación Browniana tiene otro tiempo de relajación característico que está dado por:

$$\tau_B = \frac{3\tilde{V}\eta}{k_B T} \quad (\text{Ec.3})$$

donde \tilde{V} denota el volumen hidrodinámico de la partícula, es decir, incluida la capa de tensioactivo y η es la viscosidad dinámica del líquido (Larachi & Desvigne, 2006; Odenbach, 2000). De las ecuaciones (2) y (3) se puede observar que ambos tiempos de relajación aumentan con el tamaño de partícula. Adicionalmente, se puede ver que mientras τ_N aumenta exponencialmente con el tamaño de la partícula, τ_B sólo lo hace de forma lineal, por lo que, para partículas pequeñas τ_N será menor que τ_B . El mecanismo con el tiempo de relajación más corto es el que regirá la relajación global, en una suspensión mono-dispersa con partículas pequeñas (~ 10 nm), la relajación se producirá por rotación del momento en el interior de la partícula (Bacri et al., 1995; Odenbach, 2002). En un ferrofluido real la situación se complica debido a la distribución de tamaños relativamente amplia que da lugar a una situación en la que una parte de las partículas se relaja principalmente por el proceso de Néel, mientras que otra parte sigue el proceso Browniano (Larachi & Desvigne, 2006; Odenbach, 2000).

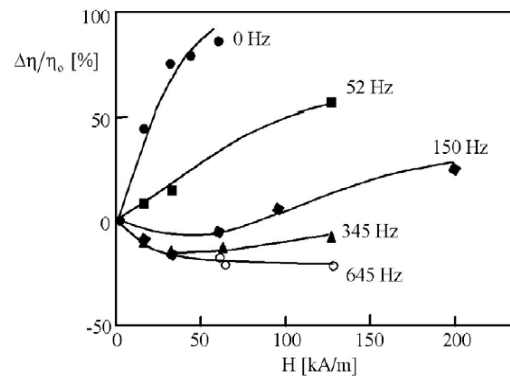
2.3. Viscosidad negativa

En presencia de un CM estático, los momentos magnéticos de las NPs se orientan parcialmente en dirección al CM lo que impide la libre rotación de las partículas magnéticas y conduce a un aumento de la viscosidad del fluido (Shliomis & Morozov, 1994) . No obstante, cuando se aplica un CM oscilante se produce un desequilibrio que resulta de la reorientación las NPs en respuesta al cambio continuo de la orientación del CM aplicado (Rosensweig et al., 1990). Debido a que el intervalo de respuesta es tan corto las NPs no tienen el tiempo suficiente para relajarse, por lo que, la energía magnética se transforma parcialmente en el momento angular de las NPs, que a su vez se convierte en un movimiento hidrodinámico del líquido (Rosensweig, 1996) . Lo anterior, se ve reflejado en la disminución de la viscosidad total del FF (ver **Figura 3**)

bajo ciertos valores de la frecuencia de oscilación del campo. El efecto de un CM alterno sobre la viscosidad de un FF fue introducido por primera vez por Shiliomis y Morozov, dicho efecto se denominó “viscosidad negativa” (Odenbach, 2000).

Figura 3.

Dependencia de los cambios de viscosidad relativa de un FF en un CM alterno (según Bacri et al., 1995)



Nota: Tomado de (Odenbach, 2000)

2.4. Fuerza de cuerpo magnética o fuerza de Kelvin

En presencia de un CM creciente (no uniforme) el FF experimenta la acción de la fuerza de cuerpo magnético (fuerza de Kelvin) f_m y está dada por:

$$f_m = \mu_0 \int M \nabla H dV \quad (\text{Ec.4})$$

Donde M denota la magnetización del fluido, ∇H el gradiente de campo magnético, μ_0 la permeabilidad al vacío ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$) y la integración se realiza sobre el volumen de la muestra V (Kamiyama et al., 1992; Odenbach, 2000). La fuerza de cuerpo magnético se debe a la interacción del CM con el momento dipolar de cada partícula (Rosensweig, 1982). Además, la magnetización tiene en cuenta las interacciones dipolo-dipolo entre las partículas magnéticas, el tamaño de partícula, las oscilaciones aleatorias de la magnetización, debidas a la temperatura finita del coloide y los efectos magneto-difusivos (Cecchini & Chiolerio, 2021).

3. Estado del arte

Los ferrofluidos se descubrieron en un centro de investigación de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) de Estados Unidos en la década de 1960 mientras los científicos de la NASA estaban investigando métodos para controlar los líquidos en el espacio (Mørup et al., 2019). La publicación de la primera patente que trataba de la síntesis de suspensiones estables de nanopartículas magnéticas despertó un gran interés en científicos. Durante los últimos 50 años no sólo se han publicado textos originales en revistas o conferencias, también se han publicado libros dando una visión general de las investigaciones que se han hecho en determinadas áreas en cuanto a FFs y lo que condujo al desarrollo de una base teórica - la teoría de la ferrohodinámica. El cambio del comportamiento viscoso de un FF debido a la acción de un CM sigue siendo uno de los temas más desafiantes en la investigación de FFs. El primer artículo sobre cambios de viscosidad en ferrofluidos en presencia de CM fue publicado por Rosensweig (Rosenweig et al., 1969). En este artículo, se da un reporte de unos ensayos que se realizaron, en los cuales se observó un aumento de la viscosidad en FFs en presencia de un CM. Las investigaciones se llevaron a cabo en un viscosímetro de placa cónica con un CM perpendicular a los planos de corte. Otros textos que han sido referencias fundamentales son los primeros trabajos de M. Shliomis (Zaitsev y Shliomis, 1969; Shliomis, 1972), en los cuales se basa la teoría de la ferrohodinámica, y el libro *Ferrohydrodynamics* (1985) de Ronald Rosensweig. El libro de Rosensweig lleva al lector a través de todas las áreas del campo de investigación, desde la síntesis y las propiedades de los fluidos magnéticos, fundamentación teórica de la ferrohodinámica, hasta problemas de hidrodinámica experimental en ferrofluidos; así como la descripción de diversas aplicaciones. En el segundo libro sobre "Magnetic Fluids" de Blums, Cebers y Maiorov (Blums et al., 1997) se ofrece un tratamiento algo más detallado de la reología de los ferrofluidos

bajo el efecto de un CM. En este, se incluye un amplio debate teórico sobre la viscosidad rotacional y se abordan cuestiones sobre la dependencia de los efectos magnetoviscosos de la forma de las NPs. Además, este libro también ofrece una visión general de la investigación sobre ferrofluidos desde un punto de vista más teórico.

Experimentos con ferrofluidos en diferentes regímenes de concentración de NPs han demostrado que un aumento en la intensidad del CM produce un aumento de la viscosidad del fluido, mientras que un aumento en la velocidad de cizallamiento disminuye su viscosidad (Mao et al., 2011; Mørup et al., 2019; Odenbach, 2000). Además, se ha demostrado que, bajo la acción de un CM, las NPs que se encuentran dentro del FF pueden formar cadenas que contribuyen al aumento de la viscosidad del fluido (i.e. conocido como efecto magneto viscoso)(Mørup et al., 2019; Rosensweig et al., 1990). Particularmente el comportamiento de sistemas muy diluidos puede ser descrito por la teoría de viscosidad rotacional de Shliomis, que se basa en la suposición de que la libre rotación de las partículas magnéticas suspendidas en un flujo cortante se ve obstaculizada por la acción de los campos magnéticos (Odenbach, 2000). Para el caso de los fluidos comerciales concentrados (~7.2 vol. %), se debe tener en cuenta la interacción entre partículas que provoca la formación de estructuras en forma de cadena, lo que hace difícil la predicción teórica y la medición del comportamiento viscoso, en presencia de un CM (Odenbach, 2000; Pop & Odenbach, 2008). Debido a esto, se ha desarrollado un viscosímetro capilar que es compatible con ferrofluidos (ver **Figura 4**).

El viscosímetro funciona sobre la base de un pistón de velocidad constante que impulsa el ferrofluido desde el depósito a través del capilar (Pop & Odenbach, 2008). Empleando un transmisor de presión diferencial, se mide la caída de presión a lo largo del capilar. Para un caudal

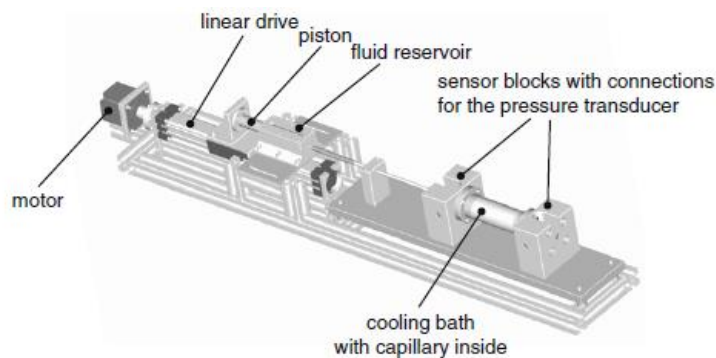
constante, y considerando los parámetros geométricos del capilar, la viscosidad del fluido se puede calcular utilizando la ley de Hagen-Poiseuille:

$$\dot{V} = \frac{\pi \Delta p R^4}{8 \eta L} \Leftrightarrow \eta = \frac{\pi \Delta p R^4}{8 \dot{V} L} \quad (\text{Ec.5})$$

Donde \dot{V} denota el caudal, Δp la caída de presión, R y L son el radio y la longitud del capilar respectivamente. El pistón está conectado a un motor de pasos mediante un sistema de accionamiento lineal que garantiza un movimiento preciso del pistón. Los campos magnéticos homogéneos de hasta aproximadamente 25 kA m^{-1} son creados por un sistema de cuatro bobinas tipo Fanselau (Pop & Odenbach, 2008). El campo magnético se puede orientar tanto paralelo como perpendicular al flujo. Al medir la caída de presión a lo largo del capilar con y sin CM aplicado, se obtiene información sobre los cambios de viscosidad inducidos por el CM. Los resultados experimentales demostraron que el viscosímetro capilar se puede utilizar con éxito para la investigación del efecto magneto viscoso en ferrofluidos a base de cobalto tanto diluidos como concentrados (Odenbach, 2000; Pop & Odenbach, 2008).

Figura 4.

Dibujo técnico en 3D del viscosímetro capilar diseñado para la investigación de ferrofluidos de Co altamente concentrados



Nota. Ilustración de un viscosímetro capilar. Tomado de (Pop & Odenbach, 2008).

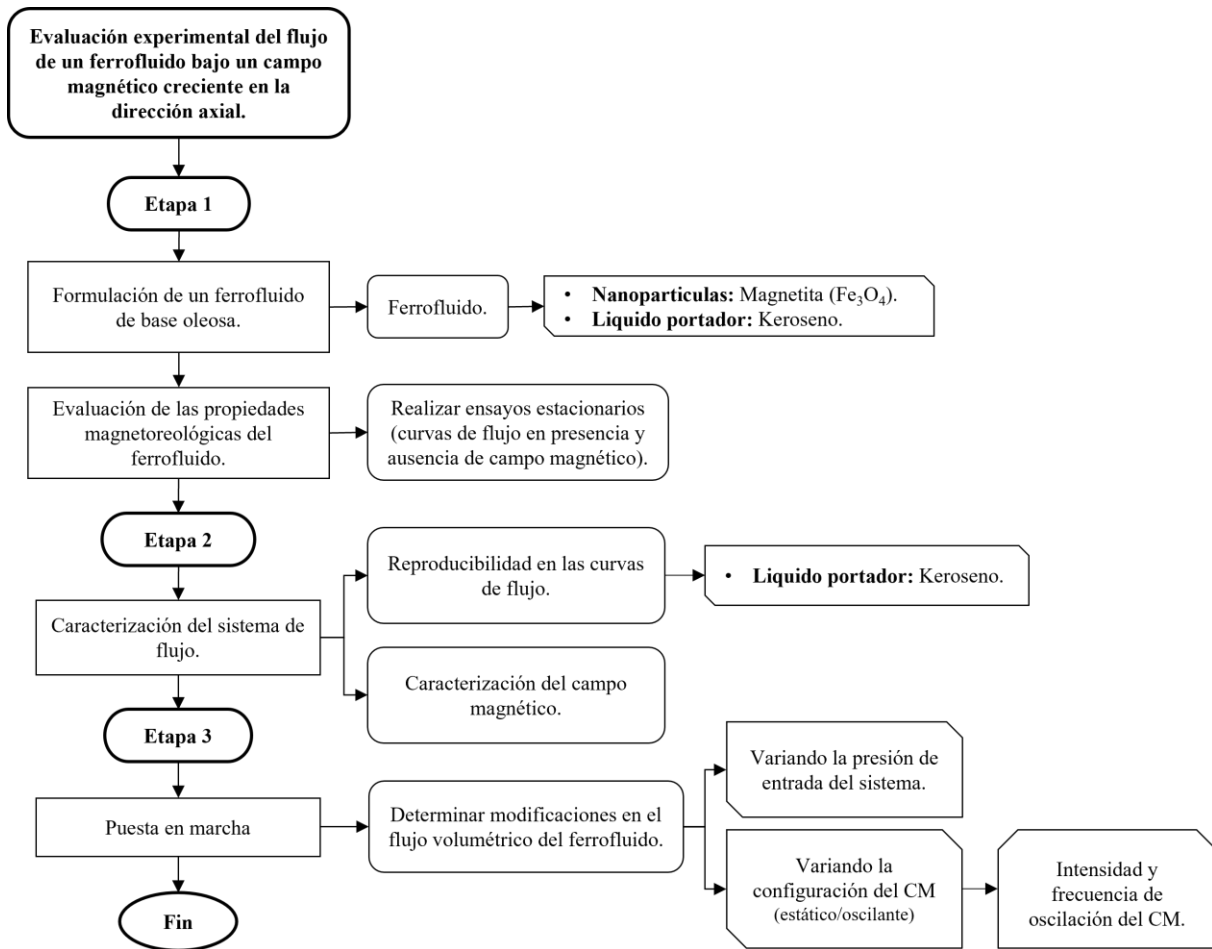
Por otro lado, las ecuaciones básicas que describen la dinámica de flujo para fluidos magnéticos dependen en muchos casos del tipo de flujo y de la característica del campo magnético (Gogosov, 1987). Estudios experimentales básicos que se realizaron en la Universidad de Tohoku (Japón) muestran los efectos de un CM no uniforme, sobre la resistencia al flujo en tuberías de un fluido magnético a base de keroseno (Kamiyama et al., 1983, 1992). Los resultados que se obtuvieron de estos experimentos mostraron que el coeficiente de resistencia de la tubería (λ) aumenta con la intensidad de campo en el régimen de flujo laminar. Además, se observó que en el régimen de flujo turbulento el coeficiente de resistencia no se ve influido por el campo aplicado. Los resultados sugieren que en un régimen laminar se forman agregados de NPs en forma de cadenas que causan un aumento en el coeficiente de resistencia (es decir, un aumento en la viscosidad del fluido) en presencia de un CM creciente no uniforme.

4. Metodología experimental

En este capítulo se describen los materiales, equipos y metodología implementada para el desarrollo de este proyecto de grado. La **Figura 5**, representa la secuencia y relación de las técnicas empleadas a lo largo del proyecto.

Figura 5.

Diagrama metodología adoptada para el desarrollo del proyecto de investigación



4.1. Materiales

Para la presente investigación se usó un ferrofluido (FF) de base oleosa, en el cual se empleó keroseno como líquido portador y nanopartículas (NPs) de magnetita (Fe_3O_4) fabricadas por la compañía Ferrotec Corporation. Éstas poseen un recubrimiento de surfactante polimérico, tienen un contenido de óxido de hierro (60-80) %p/p y diámetro nominal de partícula (10 nm). Para más información sobre las propiedades de los materiales dirigirse al **Apéndice A**

4.2. Descripción de la metodología

La metodología de este estudio fue distribuida en 3 etapas como se ilustra en la **Figura 5**. En la primera etapa se formuló un FF de base oleosa, el cual se utilizó a lo largo de toda la fase experimental del proyecto. Una vez obtenido el FF, se evaluaron sus propiedades

magnetoreológicas. Durante la segunda etapa, se llevó a cabo la caracterización del sistema de flujo y el CM, con el objetivo de conocer a detalle el comportamiento del sistema en el que se realizaron las pruebas a lo largo del proyecto. En la última etapa se determinaron las modificaciones en el flujo volumétrico del FF en función de la presión de entrada del sistema, a su vez, se determinaron las modificaciones en el flujo volumétrico del FF en función de la configuración (estático/oscilante), intensidad y frecuencia de oscilación del CM.

4.3. Desarrollo experimental

4.3.1. Etapa 1: Formulación y evaluación de las propiedades magnetoreológicas del FF

4.3.1.1. Formulación del FF. Inicialmente se formuló el FF de base oleosa, compuesto por NPs de Fe_3O_4 y un líquido portador magnéticamente inerte (keroseno), a una concentración de 0,87 %v/v. Para la formulación del FF, se añadieron las NPs al kerosene y luego se sonicaron empleando un baño ultrasónico digital Bransonic CPX 5800 Branson durante 2 horas, con el fin de dispersar las NPs en el keroseno. Posteriormente, se agitó durante 12 horas aproximadamente a 350 rpm para lograr la suspensión estable de las NPs en el keroseno.

4.3.1.2. Caracterización reológica. La caracterización reológica se realizó por medio del reómetro MCR 302 y el software RheoCompass de Anton Paar. Se utilizó una geometría cono-plato (50 mm) a una distancia de 0,1 mm. Para todas las mediciones realizadas, la temperatura se mantuvo a 25°C mediante el uso de un sistema tipo Peltier acoplado a un baño térmico (Julabo F32). A continuación, se describen el ensayo realizado, para la caracterización reológica del FF.

4.3.1.2.1. Viscosidad en función de la velocidad de cizalla. Se realizó un pre-shear de 10 s^{-1} durante 2 minutos, esto con el fin de homogeneizar y dispersar los agregados de NPs formados en la muestra, posteriormente se dio un tiempo de espera de 3 minutos, con el fin de

lograr la recuperación del sistema. Finalmente, se realizó un barrido logarítmico con un rango de velocidad de cizallamiento desde 0,01 a 100 s⁻¹.

4.3.1.3. Caracterización magneto-reológica. Se realizaron ensayos rotacionales, empleando una celda magneto-reológica (MRD 170/1T) de platos paralelos con 20 mm de diámetro, equipada con una fuente de alimentación de corriente que genera una densidad de flujo de campo magnético (hasta 1T) uniforme y perpendicular al flujo. El rango de corriente operable de la celda magneto-reológica es de 0 a 5 A. Para todas las pruebas, se fijó una temperatura de 15 °C, regulada mediante un sensor de temperatura (Termopar PT-100) acoplado al baño térmico (Julabo F32). A continuación, se describen los ensayos realizados durante la caracterización magneto-reológica del FF, cabe destacar que para cada uno de estos ensayos se estableció un tiempo de espera de 10 min, con el fin de alcanzar un equilibrio termodinámico, justo después se realizó un pre-shear a 10 s⁻¹ durante 3 minutos.

4.3.1.3.1. Efecto magneto-viscoso a diferentes velocidades de deformación. En este ensayo se evaluó el efecto magneto-viscoso del FF utilizando diferentes velocidades de cizallamiento. En principio, se realizaron pruebas preliminares con la finalidad de seleccionar las condiciones de velocidad de cizalla ($\dot{\gamma}$) y densidad de flujo magnético a las cuales se observaron una respuesta magneto-viscosa considerable. Realizadas las anteriores pruebas, se emplearon tres valores de tasa de cizallamiento (10, 25 y 50) s⁻¹ y una rampa de densidad de flujo magnético entre 0 y 328,03 mT.

4.3.1.3.2. Efecto magneto-viscoso en presencia de un CM estático uniforme. Este ensayo se seccionó en tres periodos, el primero consistió en la medición de la viscosidad en ausencia de campo a una razón de deformación constante de 10 s⁻¹ (se mantuvo durante todo el experimento) durante los primeros 10 minutos, en el segundo se indujo un CM de 328,03 mT

durante 5 minutos, por último, se retiró el campo magnético y se dejó transcurrir 10 minutos, para observar el comportamiento del sistema luego de la perturbación generada por la exposición al CM.

4.3.2. Etapa 2: Caracterización del sistema de flujo

En esta etapa se realizaron pruebas preliminares en el sistema de flujo y se caracterizó CM, con la finalidad de tener una base experimental rigurosa, que se tomó como referencia para el análisis de resultados.

El principio de operación del “sistema de flujo” se basa en introducir el FF en una de las cámaras de un cilindro-pistón acoplado a una tubería, que atraviesa el interior de un sistema de embobinados y finalmente se conecta con una válvula de salida en el otro extremo. El movimiento del FF es generado por el desplazamiento del pistón que, a su vez, es provocado por la alimentación de etanol analítico en la otra cámara, empleando una bomba de desplazamiento positivo. Para información detallada sobre las características y funcionamiento del sistema de flujo ver **Apéndice B**.

4.3.2.1. Reproducibilidad del sistema de flujo. Se realizaron pruebas preliminares utilizando el líquido portador del FF a una presión de 2,0 bar, esto con el objetivo de conocer el comportamiento detallado del sistema de flujo. Por otra parte, se realizó una segunda prueba a las mismas condiciones (replica), para descartar que los cambios provocados en el flujo volumétrico, sean ocasionados por efecto del CM externo y no por alguna perturbación en el sistema de flujo.

4.3.2.2. Caracterización del campo magnético (CM) del sistema de flujo. Se realizó la caracterización del CM con el fin de establecer las zonas de densidad de flujo linealmente crecientes, así como la intensidad del campo en el centro del eje axial en función de la corriente aplicada. Con ayuda del sistema de medición se cuantificó la intensidad del CM centímetro a

centímetro al interior del embobinado, el cual está conformado por 6 bobinas de distintos diámetros, conectadas en serie a dos amplificadores de corriente, que a su vez están acoplados a un generador de señales.

La caracterización se hizo a dos diferentes configuraciones de campo. En primer lugar, se caracterizó un CM generado por una corriente directa (DC) variando el amperaje. Por otra parte, se midió la intensidad del CM generado por una corriente alterna (AC) a diferentes frecuencias y amperajes. Por último, con el fin de generar intensidades de CM más altas, se caracterizó el CM generado por una AC utilizando las 3 bobinas de menor diámetro. Finalmente, se construyeron curvas de CM en función de la distancia (Z) y se determinó la zona linealmente creciente, la cual se ajustó matemáticamente a una función lineal. Para más información sobre el sistema de medición ver **Apéndice C**.

4.3.3. Etapa 3: Determinación de variaciones en el flujo volumétrico del FF en función del tiempo de exposición, configuración y densidad al CM.

Con el fin de evaluar modificaciones en el flujo volumétrico por efecto del tiempo de exposición del FF al CM, se realizaron pruebas en el sistema de flujo a diversos valores de presión. Así mismo, se estudiaron los efectos en el flujo, empleando diferentes configuraciones de CM (estático/oscilante) y densidad de este.

4.3.3.1. Medidas de flujo volumétrico del FF variando el tiempo de exposición al CM.

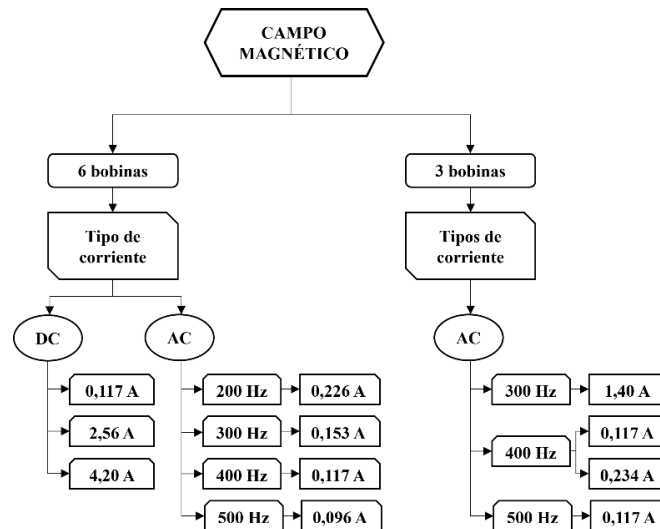
Se realizaron pruebas variando el tiempo de exposición del FF al CM, esto se logró utilizando distintas presiones de entrada del sistema de flujo (1,0, 1,5 y 2,0) bar. El flujo volumétrico se determinó con ayuda de un cronómetro, el cual registraba el tiempo que tardaba en llenarse cada 5 ml de una probeta de 25 ml, a medida que la probeta llegaba a su máxima capacidad, se

intercambiaba rápidamente por otra probeta de igual capacidad, de esta manera se tomaron los datos de forma consecutiva durante todo el transcurso de cada prueba.

4.3.3.2. Medidas del flujo volumétrico de los FFs en función de la configuración y densidad de flujo magnético. Se evaluaron las modificaciones en el flujo volumétrico por efector del CM, en la **Figura 6** se observa un diagrama de flujo que detalla las configuraciones usadas al momento de implementar el CM. Inicialmente se seleccionó la configuración del embobinado que se utilizó en la prueba, posteriormente se seleccionó uno de los dos tipos de corriente operable (DC o AC). Una vez definidas estas condiciones, en caso de ser DC se fijó únicamente el valor de intensidad, en AC se fijó de forma simultánea la frecuencia e intensidad.

Figura 6.

Configuración del CM



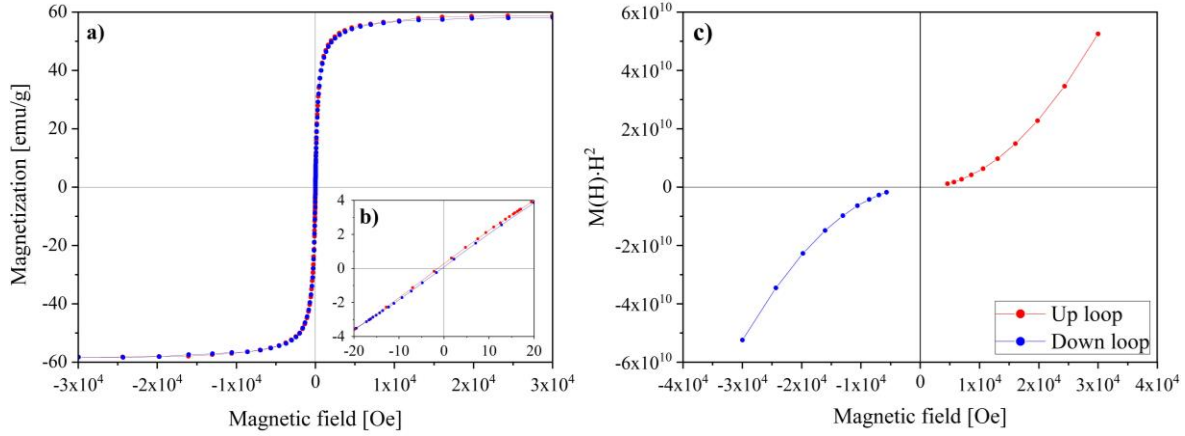
5. Resultados y discusión

5.1. Curva de magnetización

Las propiedades magnéticas de las NPs de Fe_3O_4 utilizadas en la formulación del FF, se evaluaron mediante un magnetómetro de muestra vibrante (VSM). La **Figura 7** muestra la curva de magnetización (M-H) a una temperatura de 25°C .

Figura 7.

Curva de magnetización de NPs. (a) Escala de -3×10^4 Oe a 3×10^4 Oe, (b) Escala de -20 Oe a 20 Oe, (c) Ramas a intensidades altas de CM



La curva M-H muestra que las NPs de Fe_3O_4 presentan un comportamiento superparamagnético típico, ya que la curva pasa por el origen (ver **Figura 7a**), además de presentar valores de histéresis y coercitividad casi nulos (Karade et al., 2021; Sahoo et al., 2019). Con el fin de dar constancia a lo anteriormente descrito, se realizó la estimación de la magnetización de saturación (M_s), la susceptibilidad magnética (X_m) y el campo coercitivo (H_c) de las NPs. En primer lugar, se estimaron los valores de X_m y H_c , para ello se graficó la magnetización (M) a intensidades bajas de CM (ver **Figura 7b**) y se ajustó a la ecuación de una recta:

$$M(H) = X_m \cdot H + b \quad (\text{Ec.6})$$

De lo anterior se obtuvo que $X_m \approx 0,1902 \text{ emu} \cdot (\text{g} \cdot \text{Oe})^{-1}$. Para conocer el valor del H_c se iguala $M(H) = 0$ y se despeja H , como se muestra en la siguiente ecuación:

$$H_c = -\frac{b}{X_m} \quad (\text{Ec.7})$$

De la cual se estimó que $H_c \approx 0,9380$ Oe; sin embargo, estos valores tienen presente la susceptibilidad del diamagneto (X_d). Para corregir, se ajustó el comportamiento de las ramas a intensidades altas de CM (ver **Figura 7c**) a una ecuación polinómica de grado 3:

$$y(H) = X_d \cdot H^3 + M_s(H^2 - \alpha H - \beta) \quad (\text{Ec.8})$$

Donde se determinó que el valor de susceptibilidad del diamagneto ($X_d \approx -5,88 \times 10^{-5} \text{ emu} \cdot (\text{g} \cdot \text{Oe})^{-1}$) y el valor de la magnetización de saturación ($M_s \approx 61,9546 \text{ emu} \cdot \text{g}^{-1}$). Una vez obtenido el valor de X_d , se realiza la corrección y la estimación de los nuevos valores de X_m y H_c mediante de las siguientes ecuaciones:

$$X_{m2} = X_{m1} - X_d \quad (\text{Ec.9})$$

$$H_{c2} = \frac{b}{X_{m2}} \quad (\text{Ec.10})$$

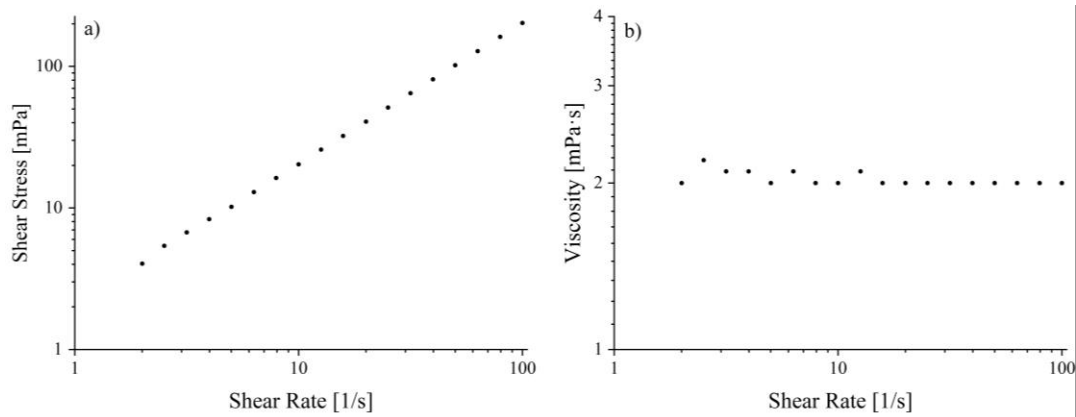
Dando como resultado que $X_{m2} \approx 0,1903 \text{ emu} \cdot (\text{g} \cdot \text{Oe})^{-1}$ y $H_{c2} \approx 0,9408 \text{ Oe}$. Para más información sobre la estimación de X_m y H_c ver el **Apéndice D**.

5.2. Propiedades reológicas

La curva de flujo y de viscosidad de la muestra de FF para velocidades de cizallamiento en el intervalo de 0,01 a 100 s^{-1} (ver **Figura 8**), demuestra que el FF formulado es un sistema que se comporta como un fluido newtoniano, en otras palabras, se observa que la curva de flujo es linealmente creciente y parte desde el origen. Por otra parte, se puede ver que la viscosidad del FF tiene un valor aproximadamente constante ($\eta \approx 2,057 \text{ mPa} \cdot \text{s}$). Por consiguiente, indica la ausencia de aglomerados de NPs de Fe_3O_4 en la muestra, además de interacciones depreciables entre estas, comportamiento que ya ha sido reportado por otros investigadores (Borin et al., 2016; Susan-Resiga et al., 2020).

Figura 8.

Curva de flujo y viscosidad en función de la velocidad de cizalla. (a) Curva de flujo, (b) Curva de viscosidad



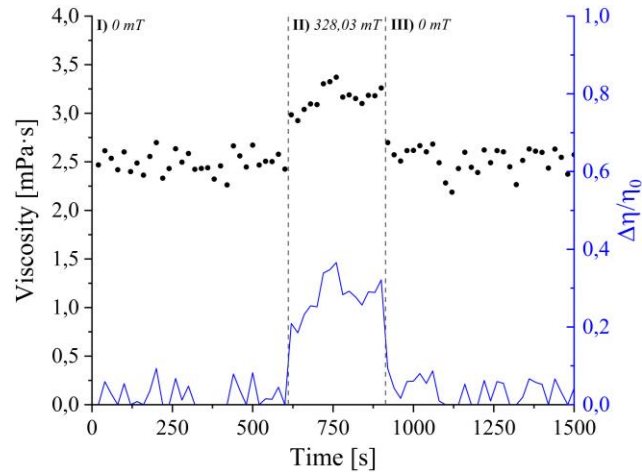
5.3. Mediciones del efecto magneto-viscoso con un reómetro MCR 302

5.3.1. Comportamiento inducido por el CM

Con el fin de poder determinar el efecto del CM sobre el comportamiento reológico del FF (0,87 % v/v) se construyeron curvas de viscosidad en función del tiempo. La **Figura 9** muestra la curva de viscosidad dividida en tres regiones que corresponden a los periodos mencionados en la metodología. En la región I se puede ver que la viscosidad relativa del FF permanece constante durante los primeros 600 segundos en los cuales $B = 0$. El pulso del CM inicia a los 600 segundos y se mantiene con una intensidad constante durante 300 segundos. En este intervalo de tiempo la viscosidad relativa del FF aumenta como se muestra en la región II. Este aumento en la viscosidad se debe a que las NPs suspendidas en el fluido forman estructuras lineales orientadas en la dirección del CM (Chand et al., 2014). Durante el último intervalo de tiempo (región III), en el cual nuevamente $B = 0$, se observa una disminución de la viscosidad relativa. Esta disminución en la viscosidad del FF se debe a que las interacciones magnéticas dipolo-dipolo entre las NPs ya no existen, por lo que, la cizalla rompe los aglomerados que se formaron durante el intervalo en el que $B \neq 0$ (Chand et al., 2014; Pop & Odenbach, 2008).

Figura 9.

Curva de flujo transitorio. (I) En ausencia de campo, (II) En presencia de un pulso magnético de 328,03 mT, (III) En ausencia de campo

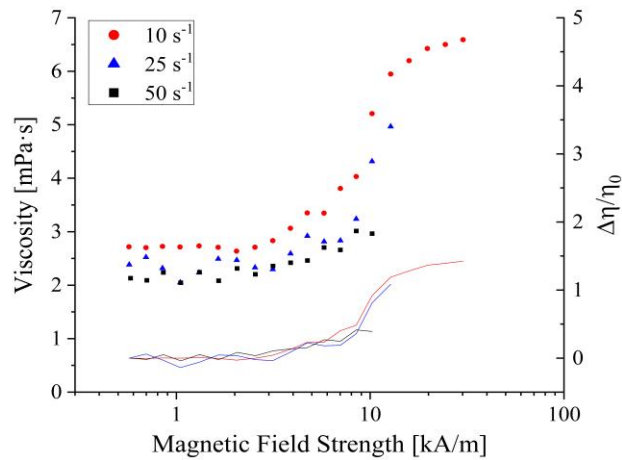


5.3.2. Efecto del CM en la viscosidad del FF para distintas velocidades de cizalla

De los resultados obtenidos (ver **Figura 10**) puede evidenciar que, al aumentar la intensidad del CM, hay un aumento considerable en la viscosidad del FF. Se ha demostrado que este comportamiento se debe a que, en presencia de CM las NPs forman cadenas microestructurales, las cuales se organizan en dirección al CM inducido (Odenbach, 2000). Estudios realizados por Chand et al. (Chand et al., 2014) evidencian por medio de imágenes de reomicroscopía la formación de estos aglomerados o cadenas en presencia de un CM. Estas cadenas de NPs impiden el flujo libre de fluido lo que da como resultado un aumento de la viscosidad (Kamiyama et al., 1983). Por otro lado, la **Figura 10** deja ver, además, un aumento en la viscosidad relativa del FF a velocidades de cizallamiento bajas, similar a los resultados experimentales que obtuvieron Pop & Odenbach (Pop & Odenbach, 2008) en una investigación del efecto magneto-viscoso en FFs de cobalto. Empleando un reómetro de placa cónica con un CM orientado perpendicularmente a la dirección de la vorticidad del flujo, Pop & Odenbach evidenciaron que un aumento en la intensidad del CM provoca un fuerte aumento de la viscosidad, especialmente a bajas velocidades de cizallamiento de 1 y 3 s⁻¹ a las cuales la diferencia de viscosidades es de hasta 80 y 60 η_0 , respectivamente.

Figura 10.

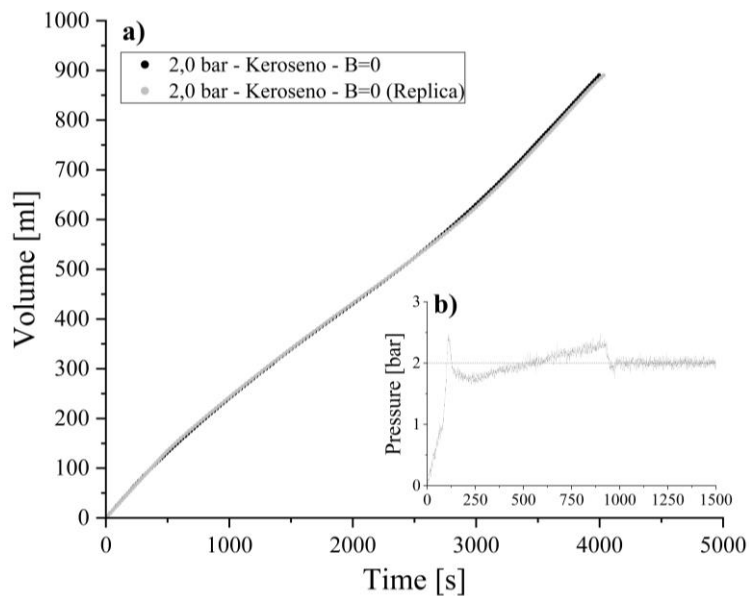
Efecto magneto-viscoso del FF para tasa de cizallamiento de 10, 25 y 50 s⁻¹

**5.4. Reproducibilidad en el sistema de flujo**

La **Figura 11** presenta el comportamiento del volumen (ver **Figura 11a**) y la presión (ver **Figura 11b**) en función del tiempo a lo largo de la prueba. Estas pruebas se realizaron utilizando el fluido portador (Keroseno), con el cual se formuló el FF y se fijó una presión de 2,0 bar.

Figura 11.

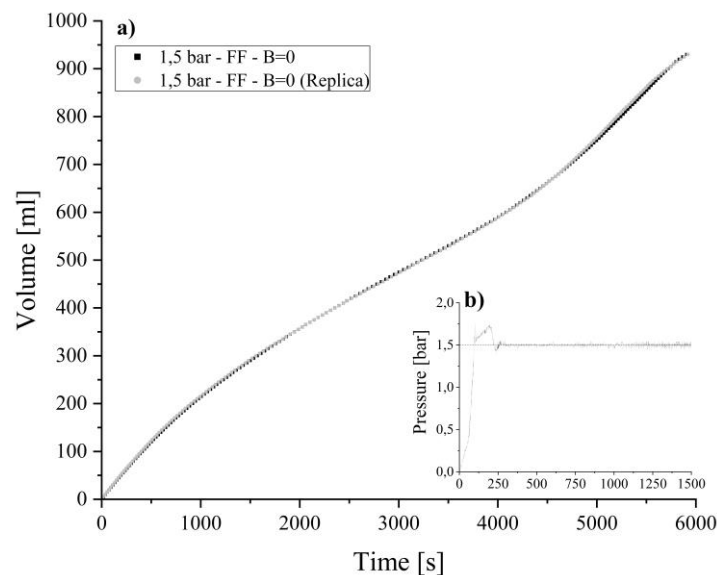
Comportamiento del keroseno. (a) Volumen en función del tiempo, (b) Presión en función del tiempo



En la **Figura 11a** se observa que ambas curvas presentan un comportamiento similar a una recta linealmente creciente, esto debido a que el valor de presión fijado (2,0 bar) es muy cercano al valor máximo de presión que alcanza el sistema. No obstante, en el intervalo comprendido alrededor de los 1250 y 3000 segundos, se observa una ligera curvatura, que podría asociarse a un estado de pseudoequilibrio en el que la altura de la columna de fluido al interior del cilindro-pistón permanece aproximadamente constante. Durante este estado hay un subintervalo donde los tiempos parciales permanecen relativamente altos, al cual se le denominó “tiempo muerto”. Para ambas pruebas el tiempo muerto está comprendido sobre los 1600 y 2200 segundos. Por otra parte, en la **Figura 11b**, las curvas de presión presentan un comportamiento similar, evidenciándose puntos en común, en primer lugar, los picos altos de presión ($\approx 2,45$ bar) a los 125 y 875 segundos, en segundo lugar, los picos bajos de presión ($\approx 1,65$ bar) a los 250 y 975 segundos, por último, la estabilización de la presión en el valor deseado o set point (2,0 bar) en un tiempo cercano a los 1000 segundos. Con la finalidad de descartar, que la reproducibilidad se ve afectada por el cambio del fluido, se realizaron pruebas utilizando el FF, a 1,5 bar de presión en ausencia de CM ($B=0$).

Figura 12.

Comportamiento del FF. (a) Volumen en función del tiempo, (b) Presión en función del tiempo



La **Figura 12** muestra que las pruebas elaboradas con FF presentan un comportamiento semejante (ver **Figura 12a**); como se observó en las realizadas con keroseno. Para esta muestra, el tiempo muerto ocurre entre los 2800 y 3500 segundos, con valores de tiempo parciales entre 45 y 47 segundos. También se logró observar que en ambas pruebas la estabilización de la presión es similar (ver **Figura 12b**), teniendo el comportamiento de un sistema subamortiguado con un tiempo de subida cercano a 110 segundos, así mismo ambas curvas presentan un sobre paso máximo de 0,25 bar a los 198 segundos (tiempo pico), además un periodo comprendido entre los 198 y 267 segundos, por último la estabilización de la presión (set point =1,5 bar) se da cerca de los 300 segundos (tiempo de asentamiento) de haber iniciado la prueba.

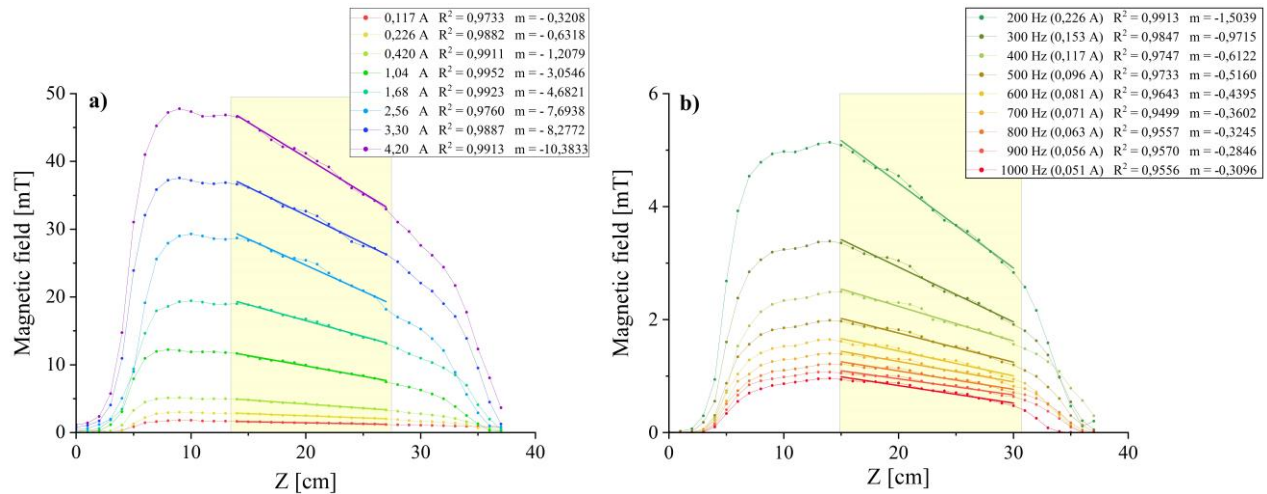
5.5. Determinación de las zonas linealmente crecientes

Con ayuda del software *OriginPro* se realizaron curvas de CM en función de la distancia a diferentes intensidades de corriente, al igual que los ajustes de las zonas linealmente crecientes. En la **Figura 13** se muestra la distribución de la densidad del flujo magnético a lo largo del embobinado cuando se aplica una corriente directa o DC (ver **Figura 13a**) y una corriente alterna o AC (ver **Figura 13b**). La caracterización del CM demostró que, efectivamente, el embobinado conformado por 6 bobinas de diferentes diámetros, produce un CM creciente no uniforme en dirección axial y que hay una zona con un crecimiento lineal comprendida entre los 15 y 30 centímetros aproximadamente. Además, de la **Figura 13** se observa que la intensidad del CM y el valor de corriente son directamente proporcionales, es decir al aumentar el valor de corriente alimentada, aumenta la intensidad de campo. Lo anterior, es igual a lo reportado por Kamiyama et al. (Kamiyama et al., 1983) en un estudio experimental del flujo de tuberías en el cual se empleó un CM transversal no uniforme. Los resultados de este estudio evidencian que el coeficiente de resistencia en la tubería aumenta con la intensidad del campo magnético para un flujo. Además,

los valores de coeficiente más altos observados por Kamiyama fueron a valores de corriente de 20A, ya que a dichos valores de corriente se lograron las intensidades de campo más altas.

Figura 13.

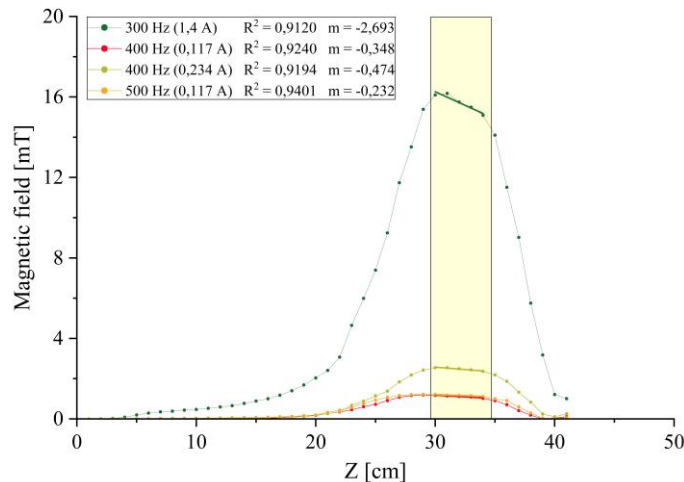
Distribución de la densidad de flux magnético proporcionado por 6 bobinas. (a) Corriente directa (DC), (b) Corriente alterante (AC)



Por otra parte, se observó que al disminuir el número de bobinas usadas a solo 3 las zonas linealmente crecientes son más cortas (ver **Figura 14**). Además, se puede ver que al aplicar una corriente alterante se obtuvieron intensidades de CM mayores a las que se obtuvieron con 6 bobinas.

Figura 14.

Distribución de la densidad de flux magnético proporcionado por 3 bobinas al aplicar una AC

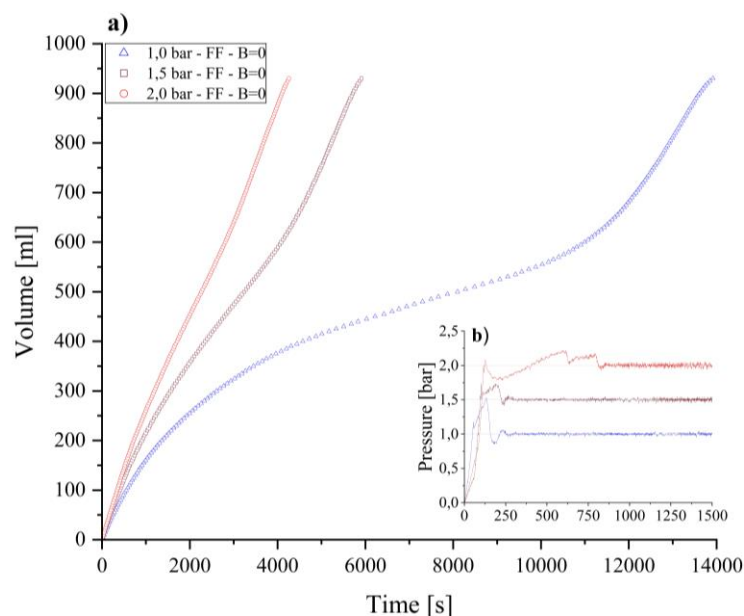


5.6. Efectos en el flujo volumétrico del FF variando la presión de entrada en ausencia de CM

De la **Figura 15** se evidencia que, al incrementar el gradiente de presión hay un aumento considerable en el flujo volumétrico del FF. Por otro lado, se observa que el comportamiento de la curva a 2,0 bar se asemeja a una recta con pendiente positiva, esto debido a que este valor es muy cercano al máximo de presión que opera el sistema con este fluido, ocasionando, que la estabilización de la presión se de en un tiempo más prologando en contraste a las otras pruebas. Esto último se puede constatar en la **Figura 15b**, ya que, para las pruebas realizadas a 1,0 y 1,5 bar de presión, el tiempo de estabilización es 250 y 300 segundos respectivamente; por el contrario, a 2,0 bar se extiende hasta los 870 segundos.

Figura 15.

Variaciones del volumen de FF total en el tiempo a presiones de 1,0, 1,5 y 2,0 bar en ausencia de un CM. (a) Volumen en función del tiempo, (b) Presión en función del tiempo



5.7. Efectos del CM en el flujo volumétrico del FF a diferentes configuraciones y densidades de flujo magnético

Para el análisis de los siguientes resultados se debe tener en cuenta que se utilizó un FF con una concentración de 0,87 % v/v y un mismo capilar en todos los experimentos. Además, para

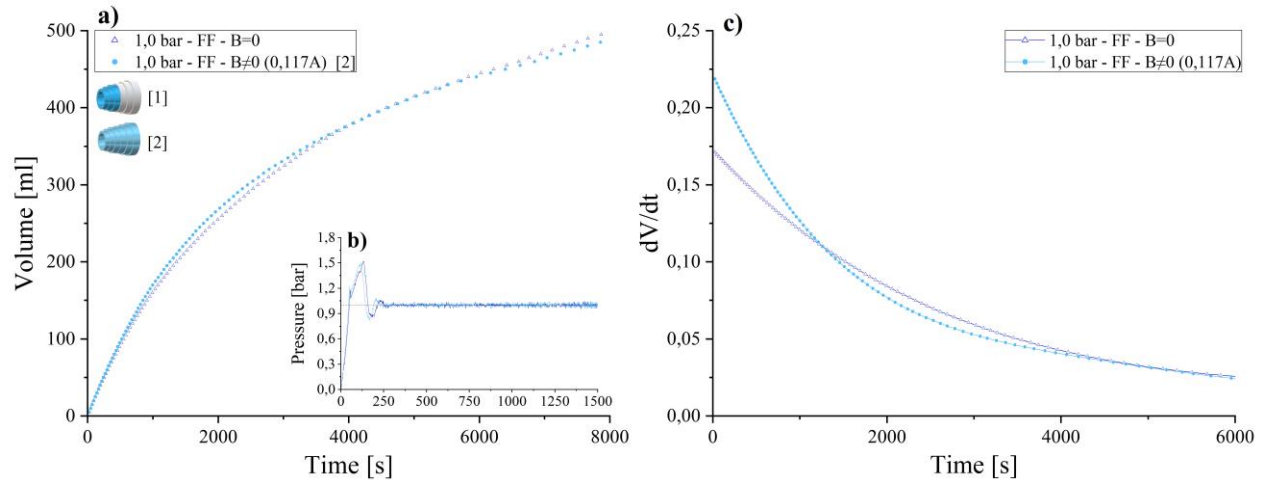
descartar variaciones en el flujo volumétrico por gradientes de presión generados por la bomba (ver **Figura 15**) se trabajó siempre a una presión de entrada de 1,0 bar.

5.7.1. Efectos de un CM creciente en el flujo volumétrico de un FF al aplicar una DC

Al analizar los resultados que se obtuvieron en presencia de un CM creciente en dirección axial generado por una DC de 0,117 A (ver **Figura 16**), se puede ver que durante los primeros 4000 segundos, la curva de volumen total en el tiempo en presencia de CM se encuentra por encima de la curva en ausencia de campo. En otras palabras, la cantidad de FF que salió del sistema en este intervalo de tiempo fue mayor en presencia de campo que en ausencia de CM, lo que evidencia una aceleración considerable del FF en los primeros 4000 segundos. Lo anterior puede deberse a la acción de la fuerza de cuerpo magnético (o fuerza de Kelvin) que se induce en el FF en presencia del CM no uniforme, como lo menciona Kamiyama et al. (Kamiyama et al., 1992b) en su estudio sobre el flujo de fluidos magnéticos por tuberías en presencia de un CM no uniforme. Esta fuerza adicional se origina a partir de la interacción del CM con el momento dipolar característico de cada partícula (Cecchini & Chiolerio, 2021; Rosensweig, 1982). No obstante, después de los 4000 segundos, se empieza a observar cómo en presencia de CM, la curva del volumen total de FF en el tiempo pasa a estar por debajo de la curva en ausencia de campo. Además, el flujo volumétrico en presencia de CM después de los 1262 segundos alcanza valores incluso menores en comparación a cuando $B = 0$ (ver **Figura 16c**), lo que demuestra una desaceleración del FF después de los 4000 segundos. Esto probablemente se debe a la formación de cadenas de NPs al interior del fluido (Chand et al., 2014; Pop & Odenbach, 2006) que hacen que el efecto magneto-viscoso sobrepase a los efectos de la fuerza de cuerpo magnético, lo que a su vez, causa una disminución en el flujo volumétrico en presencia de campo.

Figura 16.

Efecto de un CM generado por una DC a 1,0 bar. (a) Volumen de FF en función del tiempo, (b) Variación de la presión en función del tiempo, (c) Flujo volumétrico del FF en función del tiempo



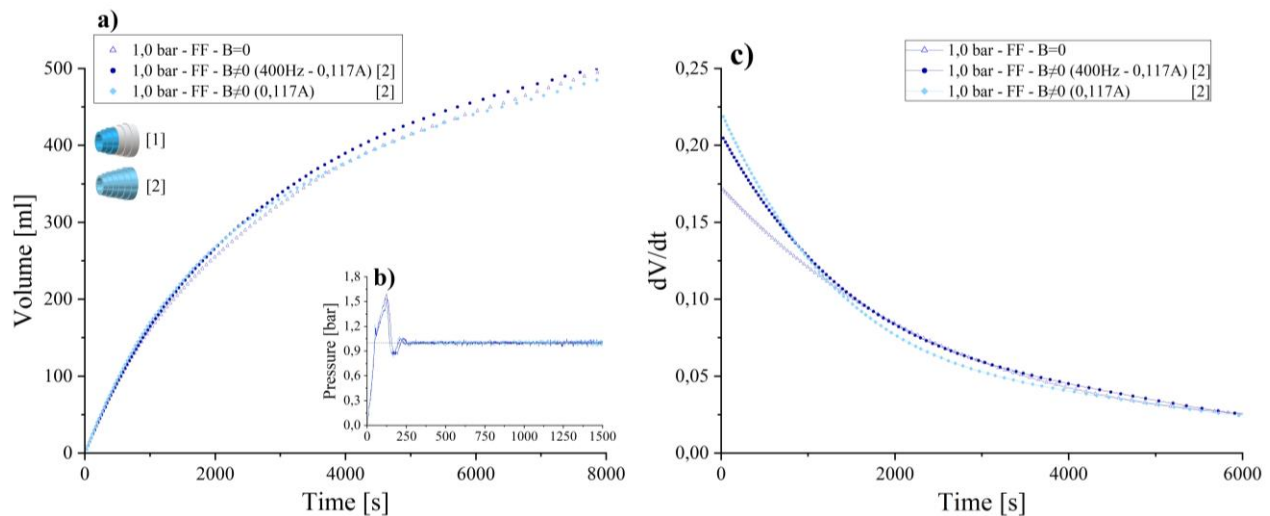
5.7.2. Efectos de un CM creciente en el flujo volumétrico de un FF al aplicar una AC

A diferencia de los resultados que se obtuvieron con un CM generado por una DC donde se evidenció una desaceleración después de los 4000 segundos, se observa que, la curva de volumen total de FF en el tiempo en presencia de un CM alternante (400 Hz-0,117 A) permanece por encima de la curva en ausencia de CM durante todo el tiempo de duración de la prueba (ver **Figura 17a**), lo que evidencia una aceleración del FF en presencia del CM alternante. Esto probablemente se debe a que, en presencia de un CM no uniforme generado por una AC, no solo se tiene la acción de la fuerza de cuerpo magnético, además, se tiene el efecto de la “viscosidad negativa” que causa una disminución de la viscosidad total del FF, tal y como lo demostraron Shliomis y Morozov por primera vez en 1994 (Odenbach, 2000). Este efecto de viscosidad "negativa" puede entenderse como una transferencia de energía magnética generada por el campo, al movimiento de rotación de las partículas que actúan como motores de tamaño nanométrico y reducen la fricción entre las capas de fluido vecinas. (Zeuner et al., 1998). Por otro lado, la **Figura 17c** muestra que el flujo volumétrico del FF en presencia de un CM generado por DC (0,117 A)

durante los primeros 896 segundos es incluso mayor al generado por un CM alternante. Sin embargo, a los 1000 segundos se puede ver cómo el flujo volumétrico del FF en presencia de CM alternante es mayor que en presencia de campo generado por DC y que en ausencia de campo. Además, puede evidenciar que, entre 1695 y 3030 segundos así, como los últimos 285 segundos de la prueba, los valores de flujo volumétrico en presencia de campo alternante y en ausencia de campo se superponen. Esto último se debe muy probablemente a la formación de cadenas de NPs dentro del FF debido a los efectos del campo, tal y como lo demostraron Pop & Odenbach (Pop & Odenbach, 2006), en estudios experimentales realizados en diferentes muestras de FFs haciendo uso de la técnica de Dispersión de Neutrones a Bajo Ángulo (SANS).

Figura 17.

Efecto de un CM generado por una AC a 1,0 bar. (a) Volumen de FF total en el tiempo en función del tiempo, (b) Variación de la presión en función del tiempo, (c) Flujo volumétrico del FF en función del tiempo



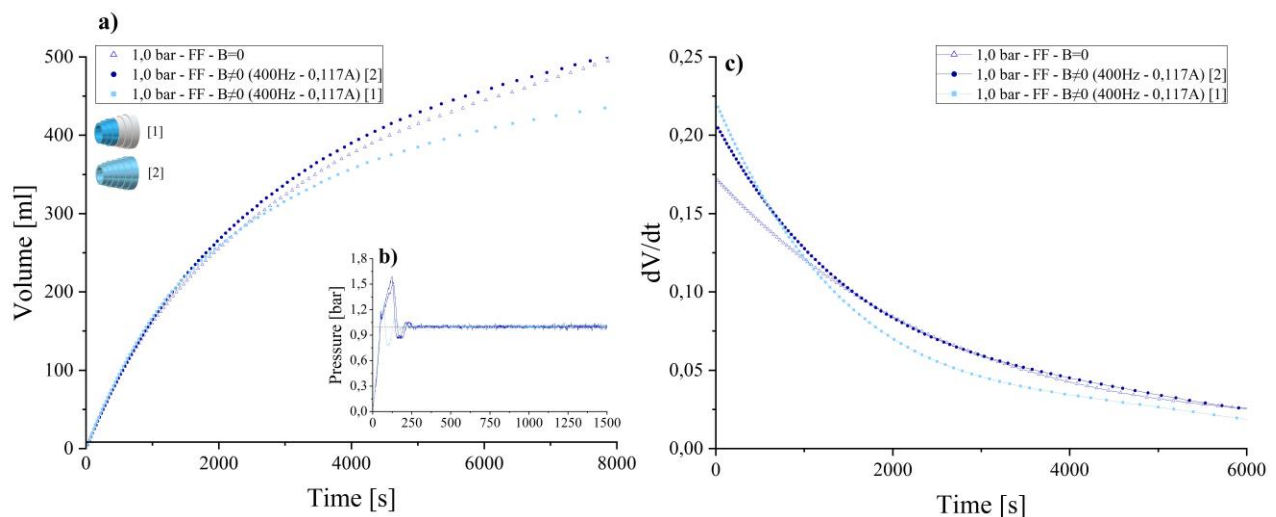
5.7.3. Efectos de la configuración del embobinado en el flujo volumétrico de un FF

Al cambiar la configuración del embobinado de 6 a solo 3 bobinas, se puede observar que el volumen total de FF a medida que transcurre el tiempo es mayor con respecto a la curva en ausencia de CM (ver **Figura 18**). No obstante, pasados los 1500 segundos, el volumen total de FF

en el tiempo queda incluso por debajo a la curva en ausencia de CM. Al comparar la curva de flujo volumétrico aplicando un CM generado por 3 bobinas, con la curva que se obtuvo al aplicar un campo generado por 6 bobinas, se evidencia una disminución considerable en el flujo volumétrico después de los 600 segundos. Esto probablemente se deba a que, al disminuir la cantidad de bobinas también disminuye la zona linealmente creciente, por lo que, la acción de la fuerza de cuerpo magnético es menor.

Figura 18.

Efecto de un CM generado por una AC a 1,0 bar, con una configuración de 6 y 3 bobinas. (a) Volumen de FF total en el tiempo en función del tiempo, (b) Variación de la presión en función del tiempo, (c) Flujo volumétrico del FF en función del tiempo



5.8. Variaciones en el flujo volumétrico del FF en presencia de CM a diferentes valores de presión de entrada

5.8.1 Variaciones en el flujo volumétrico del FF en presencia de CM a 1,5 bar

De los resultados obtenidos al variar la presión a 1,5 bar se evidencia que, independientemente del tipo de corriente, las curvas de volumen de FF total en el tiempo en presencia de CM terminan por debajo de la curva en ausencia de campo (ver **Figura 19** y **Figura 20**). Así mismo, se puede ver que incluso la curva en presencia de un CM alternante de (400 Hz –

0,117 A), con el cual se observó la mayor aceleración del FF a una presión de 1,0 bar, queda muy por debajo de la curva en ausencia de campo. En otras palabras, no se evidencia una aceleración del FF en presencia de CM a esta presión de entrada. Esto probablemente se debe a que, formaciones más de NPs no giran a la misma velocidad angular del fluido (vorticidad) y se genera el efecto de aumento de viscosidad. Además, como la fuerza de cuerpo magnético se origina por la interacción de un CM con el momento magnético dipolar característico de cada partícula (Rosensweig, 1982), se tiene que la acción de la fuerza de cuerpo magnético (o de Kelvin) es menor al aumentar la presión de entrada a 1,5 bar (Cecchini & Chiolerio, 2021; Hardoñ et al., 2018). Por lo anterior, los efectos magneto viscosos sobrepasan la acción de esta fuerza de cuerpo, lo que se ve reflejado en la desaceleración del FF.

Figura 19.

Efecto de un CM generado por una AC a 1,5 bar. (a) Volumen de FF total en el tiempo en función del tiempo, (b) Variación de la presión en función del tiempo, (c) Flujo volumétrico del FF en función del tiempo

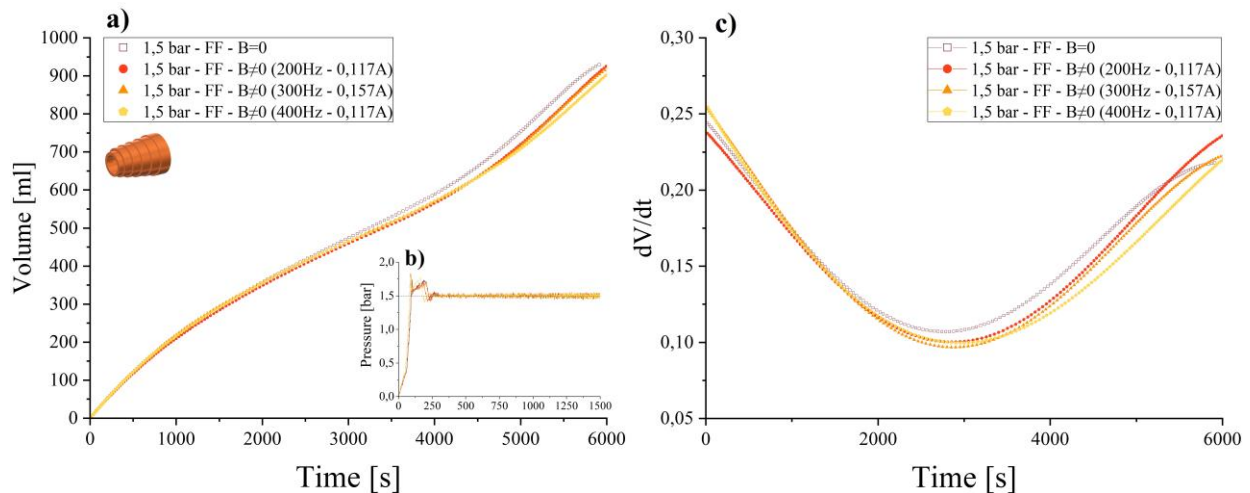
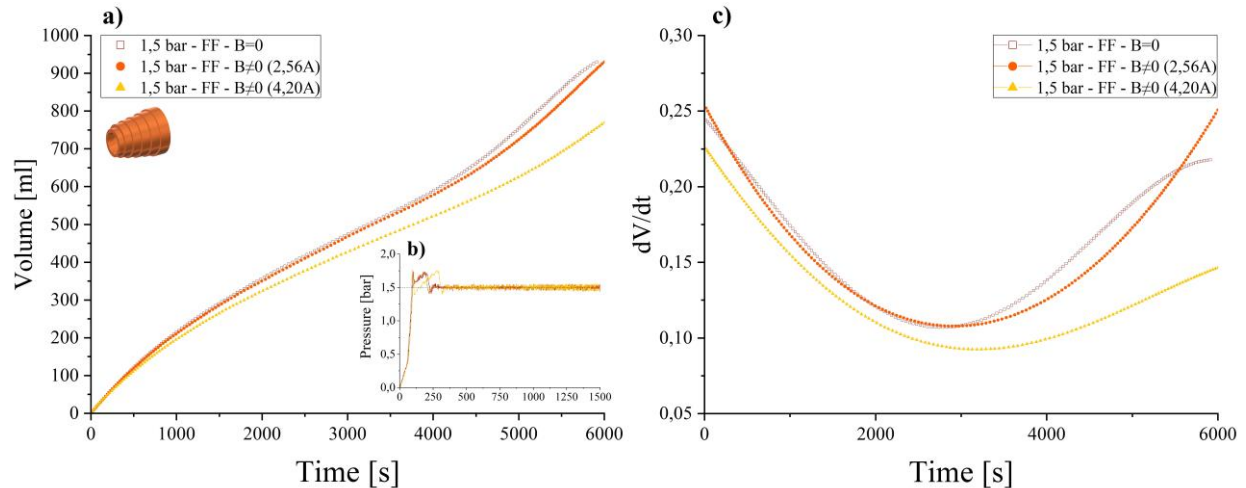


Figura 20.

Efecto de un CM generado por una DC a 1,5 bar. (a) Volumen de FF total en el tiempo en función del tiempo, (b) Variación de la presión en función del tiempo, (c) Flujo volumétrico del FF en función del tiempo

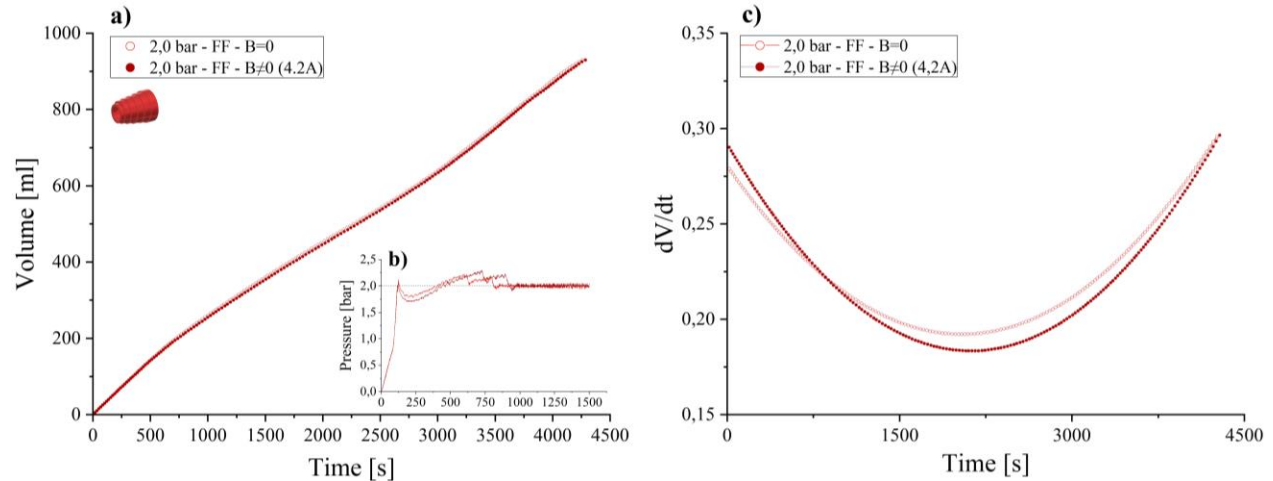


5.8.2 Variaciones en el flujo volumétrico del FF en presencia de CM a 2,0 bar

Al aumentar la presión de entrada a 2,0 bar se puede ver que, en el intervalo de tiempo que va de 750 segundos en adelante, la curva en presencia de CM generado por DC (4,2 A) se encuentra levemente por debajo de la curva en ausencia de campo (ver **Figura 21a**). La diferencia entre estas dos curvas es tan pequeña, que no se puede evidenciar con claridad los efectos del CM a esta presión de entrada. Lo anterior probablemente se deba a que, a 2,0 bar la velocidad de cizallamiento es tan alta que, los aglomerados que se alcanzan a formar debido a los efectos de campo son destruidos. En otras palabras, a mayores velocidades de cizallamiento menor es el efecto magneto-viscoso en el FF tal y como lo reportaron Chen & Li (Chen & Li, 2022) en su estudio sobre los efectos del tamaño de partícula en las propiedades reológicas de FFs. Además, es posible que, a mayor velocidad de cizalla, $M \cdot \nabla H \ll \Delta p$ lo que hace que no haya variaciones significativas en el flujo volumétrico del FF (ver **Figura 21c**).

Figura 21.

Efecto de un CM a 2,0 bar. (a) Volumen de FF total en el tiempo en función del tiempo, (b) Variación de la presión en función del tiempo, (c) Flujo volumétrico del FF en función del tiempo



6. Conclusiones

Se demostró que el sistema de flujo utilizado para esta investigación es reproducible, lo que permite afirmar que las variaciones observadas en el flujo volumétrico del FF en presencia de un CM se deben al efecto de este.

Al caracterizar el CM, se comprobó que este presenta un comportamiento linealmente creciente en dirección axial para ambas configuraciones de bobinado (3 y 6 bobinas), siendo la configuración de 6 bobinas la que muestra una zona lineal más amplia.

Se evidenció un aumento del flujo volumétrico del FF al inducir un CM creciente en dirección axial generado por una corriente DC al inicio de cada prueba. Sin embargo, únicamente a 1.0 bar el CM logra interactuar lo suficiente con el momento dipolar de las NPs, por lo que la acción de la fuerza de cuerpo magnético es lo suficientemente fuerte para proporcionarle un impulso adicional al FF, logrando así, que aceleración se mantenga por un tiempo más prolongado, a diferencia de las otras presiones (1,5 y 2,0 bar). No obstante, al incrementar el tiempo de exposición al campo, se forman agregados que obstruyen el flujo y causan un aumento de la viscosidad aparente, evidenciado durante los estudios magnetoreológicos.

Al aplicar un CM generado por una AC, en contraste con uno generado por una DC, se evidenció que el efecto de aceleración en el FF es más prolongado a lo largo de la prueba. Sin embargo, en tiempos prolongados, el FF presenta una tendencia a desacelerarse, probablemente debido a los efectos magnetoviscosos. Sin embargo, la prueba realizada a una frecuencia de 400Hz e intensidad de 0,117A mostró una mayor aceleración, en contraste con las demás configuraciones de campo.

Al modificar la configuración del embobinado de 6 a 3 bobinas, se demostró que esta disminuye el efecto de la fuerza de Kelvin, lo que se ve reflejado en una desaceleración anticipada en comparación con lo observado al utilizar la configuración de 6 bobinas.

El aumento de la velocidad de cizalla al incrementar la presión de entrada, ocasiona que los efectos generados por la acción de la fuerza de Kelvin sean superados por los efectos magnetoviscosos, debido al corto tiempo de interacción del FF con el CM.

Referencias bibliográficas

- Andrews, D. L., Lipson, R. H., & Nann, T. (2019). Comprehensive nanoscience and nanotechnology. In *Comprehensive Nanoscience and Nanotechnology* (Vols. 1–5). <https://doi.org/10.1016/c2016-1-02369-6>
- Bacri, J.-C.; Perzynski, R.; Shliomis, M. I.; Burde, G. I. (1995). “Negative-Viscosity” Effect in a Magnetic Fluid. *Physical Review Letters*, 75(11), 2128–2131. doi:10.1103/PhysRevLett.75.2128
- Bedanta, Subhankar; Barman, Anjan; Kleemann, Wolfgang; Petravic, Oleg; Seki, Takeshi (2013). *Synthesis, Properties, and Applications of Single-Domain Magnetic Nanoparticles*. *Journal of Nanomaterials*, 2013(), 1–2. doi:10.1155/2013/130180
- Cecchini, L., & Chiolerio, A. (2021). The magnetic body force in ferrofluids. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 54(35), 355002. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac0a0a>
- Chand, Mahesh; Shankar, Ajay; Ali, Noorjahan; Jain, Komal; Pant, Rajender P. (2014). *An improved property of bidispersed magneto-rheological fluids*. *RSC Adv.*, (), 10.1039/C4RA07431A–. doi:10.1039/C4RA07431A
- Chen, S., & Li, D. (2022). *Control of Magnetic Particle Size in Ferrofluid and Its Effect on Rheological Properties*. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 35(1), 79. doi.org/10.1186/s10033-022-00718-z
- de Sousa, M. E., Fernández van Raap, M. B., Rivas, P. C., Mendoza Zélis, P., Girardin, P., Pasquevich, G. A., Alessandrini, J. L., Muraca, D., & Sánchez, F. H. (2013). Stability and Relaxation Mechanisms of Citric Acid Coated Magnetite Nanoparticles for Magnetic

- Hyperthermia. *The Journal of Physical Chemistry C*, 117(10), 5436–5445.
<https://doi.org/10.1021/jp311556b>
- Greivell, N.E.; Hannaford, B. (1997). *The design of a ferrofluid magnetic pipette.* , 44(3), 129–135. doi:10.1109/10.554759
- Hajiani, Pouya; Larachi, Faïçal (2013). *Controlling lateral nanomixing and velocity profile of dilute ferrofluid capillary flows in uniform stationary, oscillating and rotating magnetic fields.* *Chemical Engineering Journal*, 223(), 454–466. doi: 10.1016/j.cej.2013.02.129
- Hall, W.F.and Busenberg, S.N. (1969). Viscosity of magnetic suspensions. *J.Chem. Phys.*,51,1 p. 137.
- Hartshorne, H., Backhouse, C. J., & Lee, W. E. (2004). Ferrofluid-based microchip pump and valve. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 99(2–3), 592–600.
<https://doi.org/10.1016/j.snb.2004.01.016>
- Hatch, A., Kamholz, A. E., Holman, G., Yager, P., & Böhringer, K. F. (2001). A ferrofluidic magnetic micropump. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 10(2), 215–221.
<https://doi.org/10.1109/84.925748>
- Ilg, Patrick; Kroger, Martin (2020). *Dynamics of interacting magnetic nanoparticles: effective behavior from competition between Brownian and Néel relaxation.* *Physical Chemistry Chemical Physics*, (), 10.1039.D0CP04377J–. doi:10.1039/d0cp04377j
- Kamiyama, S.; Koike, K.; Oyama, T. (1983). *Pipe flow resistance of magnetic fluids in a nonuniform transverse magnetic field.*, 39(1), 23–26. doi:10.1016/0304-8853(83)90389-X

- Krekhov, A. P., Shliomis, M. I., Kamiyama, S., Krekhov, A. P., & Shliomis, M. I. (2005). *Ferrofluid pipe flow in an oscillating magnetic field*. 033105. <https://doi.org/10.1063/1.1863320>
- Landau, L. D. and Lifschitz, E. M. (1985) Lehrbuch der theoretischen Physik: Elektrodynamik der Kontinua; Band 8. Akademie Verlag Berlin, Berlin.
- Larachi, F., & Desvigne, D. (2006). Magnetoviscous control of wall channeling in packed beds using magnetic nanoparticles - Volume-average ferrohydrodynamic model and numerical simulations. *Chemical Engineering Science*, 61(5), 1627–1657. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2005.09.019>
- Larachi, F., & Desvigne, D. (2006). Magnetoviscous control of wall channeling in packed beds using magnetic nanoparticles - Volume-average ferrohydrodynamic model and numerical simulations. *Chemical Engineering Science*, 61(5), 1627–1657. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2005.09.019>
- Mao, L., Elborai, S., He, X., Zahn, M., & Koser, H. (2011). Direct observation of closed-loop ferrohydrodynamic pumping under traveling magnetic fields. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 84(10), 1–7. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.84.104431>
- Mørup, S., Hansen, M. F., & Frandsen, C. (2019). Magnetic nanoparticles. In *Comprehensive Nanoscience and Nanotechnology* (Vols. 1–5, Issue June). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11338-4>

Odenbach, S. (2000). Magnetoviscous effects in ferrofluids. *Applied Rheology*, 10(4).
<https://doi.org/10.1515/arh-2000-0011>

Pop, L. M., & Odenbach, S. (2008). Capillary viscosimetry on ferrofluids. *Journal of Physics Condensed Matter*, 20(20). <https://doi.org/10.1088/0953-8984/20/20/204139>

Pop, Loredana Mirela; Odenbach, Stefan (2006). *Investigation of the microscopic reason for the magnetoviscous effect in ferrofluids studied by small angle neutron scattering.* , 18(38), 0–0. doi:10.1088/0953-8984/18/38/s17

R Kötz; W Weitschies; L Trahms; W Semmler (1999). *Investigation of Brownian and Néel relaxation in magnetic fluids.* , 201(1-3), 102–104. doi:10.1016/s0304-8853(99)00065-7

R.E. Rosensweig; J. Popplewell; R.J. Johnston (1990). *Magnetic fluid motion in rotating field.*, 85(1-3), 171–180. doi:10.1016/0304-8853(90)90046-s

Rayment, I. (2003). Protein Structure. *Encyclopedia of Physical Science and Technology*, 191–218. <https://doi.org/10.1016/B0-12-227410-5/00616-5>

Rhodes, S., He, X., Elborai, S., Lee, S. H., & Zahn, M. (2006). Magnetic fluid behavior in uniform DC, AC, and rotating magnetic fields. *Journal of Electrostatics*, 64(7–9), 513–519.
<https://doi.org/10.1016/j.elstat.2005.10.021>

Rosensweig, R. E., *Ferrohydrodynamics* (Dover, New York, 1997).

Rosensweig, Ronald E. (1982). *Magnetic Fluids.* , 247(4), 136–145. doi:10.1038/scientificamerican1082-136

S. Odenbach, *Magnetoviscous effects in ferrofluids*, Springer, Berlin, 2002.

Shinichi Kamiyama; Masaaki Okubo; Fumio Fujisawa (1992). *Recent developments of technology in magnetic fluid experiments*. 5(5), 641–651. doi:10.1016/0894-1777(92)90020-6

Shliomis, M.I. (1972). Effective viscosity of magnetic suspensions. *Soviet Phys. JETP*, 34,6 p. 1291-1296.

Shliomis, Mark I.; Morozov, Konstantin I. (1994). *Negative viscosity of ferrofluid under alternating magnetic field*. *Physics of Fluids*, 6(8), 2855–. doi:10.1063/1.868108

Telling, N. (2019). High-Frequency Magnetic Response and Hyperthermia From Nanoparticles in Cellular Environments. In *Nanomaterials for Magnetic and Optical Hyperthermia Applications*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813928-8.00007-7>

V.V. Gogosov (1987). *Hydrodynamics of magnetic fluids.*, 65(2-3), 301–306. doi:10.1016/0304-8853(87)90056-4

Zeuner, A.; Richter, R.; Rehberg, I. (1998). *Experiments on negative and positive magnetoviscosity in an alternating magnetic field*. *Physical Review E*, 58(5), 6287–6293. doi:10.1103/physreve.58.6287

Apéndices

Apéndice A. Propiedades de los materiales

Tabla A1.

Propiedades fisicoquímicas del Keroseno

Propiedad	Condiciones	Descripción/ Valor
Estado físico	---	Líquido
Punto inflamación	---	120 °C
Densidad	---	0,80 g/cm ³
Presión de vapor	20 °C	0,31 hPa
Tensión superficial	20 °C	32 mN/m

Tomado de: <https://www.sigmaaldrich.com/CO/es/sds/sigald/329460>

Tabla A2.

Especificaciones y propiedades físicas de nanopartículas magnéticas secas EMG 1300M

Propiedad	Descripción/ Valor
Apariencia	Polvo negro
Tipo de tensioactivo	Polímero
Solubilidad en agua	Insoluble
Densidad	4,8 g/cm ³
Contenido de óxido de hierro (Magnetita)	(68,4 – 76,7) % V/V
Contenido de Dispersante polimérico/anhídrido maleico	(23,3 – 31,6) % V/V

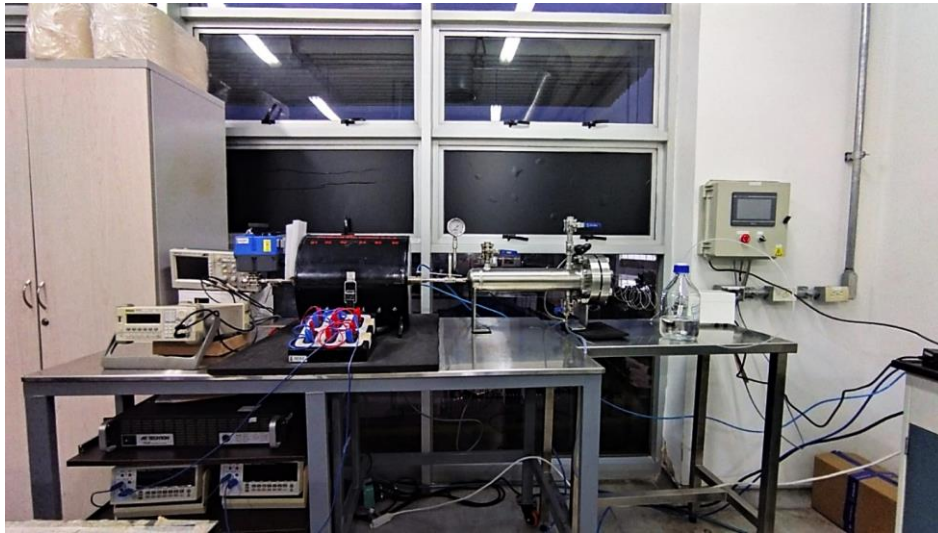
Adaptado de: <https://ferrofluid.ferrotec.com/wp-content/uploads/sites/3/emg1300sds.pdf>

Apéndice B. Características y funcionamiento del sistema de flujo

En esta sección se describe las principales características y el funcionamiento del sistema de flujo utilizado en esta investigación para determinar modificaciones en el flujo volumétrico de un FF por cambios graduales en la densidad de flujo magnético y tiempo de exposición en al CM.

Figura B1

Sistema de flujo.

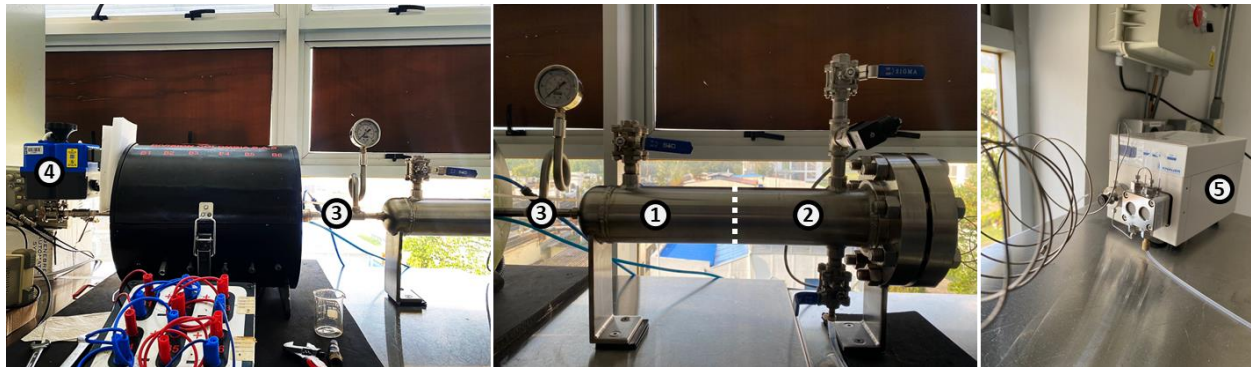


El sistema de flujo (**Figura B1**) está compuesto por tres subsistemas, los cuales se denotaron como sistema mecánico, de control y embobinado. El sistema mecánico (**Figura B2**) está compuesto por un tanque principal, el cual se secciona en dos cámaras mediante un pistón (bala) con sus respectivos empaques, para evitar el contacto de los fluidos involucrados. En la cámara 1, reside el fluido al cual se le realiza el estudio, en este caso el FF. Por otra parte, en la cámara 2 reside el fluido utilizado para generar el desplazamiento del pistón, en este caso etanol analítico. La cámara 1, está conectada a una tubería (1/4"-SCH 10), la cual pasa por el interior del embobinado, al otro extremo de esta tubería se encuentra una válvula automática que detiene o regula el paso del fluido a estudiar hacia el capilar que se encuentra al otro extremo de esta. La cámara 2 está conectada a

una bomba de desplazamiento positivo, que alimenta a la cámara 2, con el fin de realizar un desplazamiento el pistón y de esta manera hacer fluir el FF depositado en la cámara 1.

Figura B2

Sistema mecánico. (1) Cámara 1, (2) Cámara 2, (3) Tubería, (4) Válvula automática, (5) Bomba.



El sistema de control (**Figura B3**) está compuesto por un panel de control (HMI- Human-machine interfaz), utilizado para realizar las maniobras y configuraciones requeridas para el proceso, además de mostrar el comportamiento de las variables de manera gráfica. Este panel está conectado a tres elementos importantes en el sistema de control, los cuales son un sensor de presión ubicado en la cámara 2, la bomba que suministra fluido a dicha cámara y la válvula automática que se encuentra al otro extremo del sistema de flujo. El sistema de control es un sistema de lazo cerrado, que tiene como función mantener constante la presión, donde el sensor toma la lectura del valor de proceso (PV); y la compara con el valor deseado (SV), en caso de no estar en el rango admitido, el sistema le envía una señal a la bomba, la cual se encarga de aumentar o disminuir el caudal del fluido suministrado a la cámara 2.

Figura B3

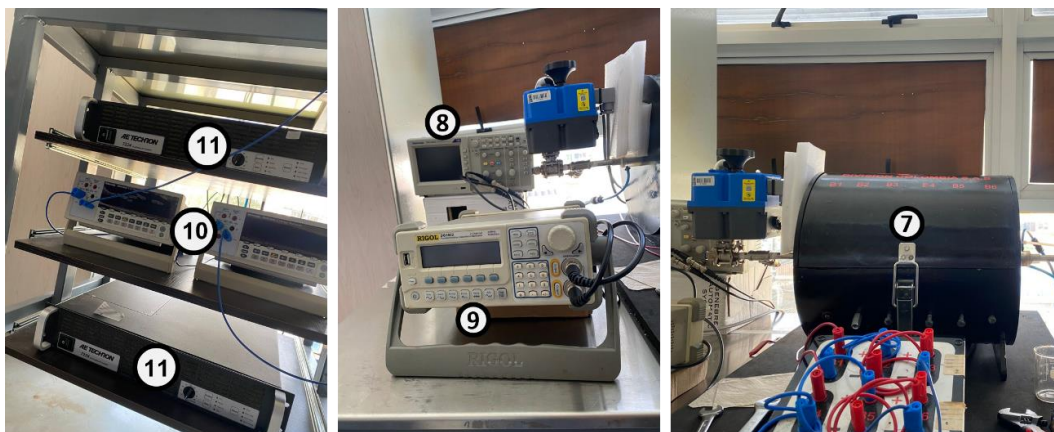
Sistema de control. (4) Válvula automática, (5) Bomba, (6) Panel de control



Finalmente, el sistema de embobinado (**Figura B4**), está conformado por seis bobinas de diferentes diámetros conectadas en serie, que generan un CM creciente en la dirección axial. Este sistema está conectado a un generador (Rigol DG1022), un par de amplificadores (AE TECHRON 7224), un osciloscopio (Tektronix TBS1062) y un par de multímetros digitales (Tektronix DMM4020), lo cual nos permite trabajar a diversas configuraciones de CM, ya sea variando el tipo de corriente utilizada (CD o AC) y, a su vez, variando los valores de frecuencia e intensidad.

Figura B4

Sistema de embobinado. (7) Embobinado, (8) Osciloscopio, (9) Generador, (10) Multímetros, (11) Amplificadores.

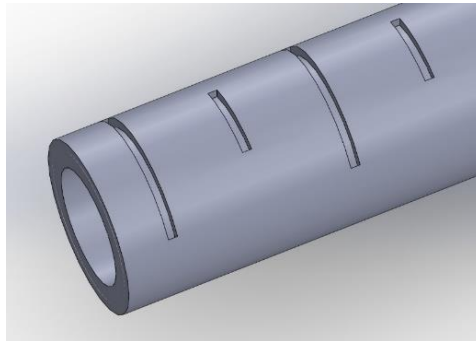


Apéndice C. Sistema de medición del campo magnético (CM)

Para la caracterización del CM se implementó un sistema de medición que fue diseñado por la empresa 3DInfill. Este sistema de medición consiste en un tubo cilíndrico de 60 centímetros de largo que está hecho a base de ácido poliláctico (PLA) con un diámetro interno de 8,40 milímetros y diámetro externo de 13,40 milímetros, además, como se observa en la **Figura C1** tiene en la superficie una escala graduada longitudinal de 5 milímetros. En el interior del sistema de medición se introdujo la sonda del Gaussímetro y de esta manera, se obtuvo el sistema ideal para la medición del CM de forma longitudinal.

Figura C1.

Modelo 3D del sistema de medición empleado en la caracterización del CM.



Apéndice D. Calculo detallado de la magnetización de saturación, la susceptibilidad magnética y el campo coercitivo de las NPs

Tabla D1.

Banco de datos de las propiedades magnéticas de las NPs de Fe_3O_4 mediante un magnetómetro de muestra vibrante (VSM).

Lazo Ascendente		Lazo Descendente	
Campo magnético (Oe)	Momento (emu)	Campo Magnético (Oe)	Momento (emu)
29981,338733	0,044772	29998,145500	0,044299
24340,626733	0,044798	24358,889000	0,044273
19759,697233	0,044660	19779,375000	0,044122
16042,443733	0,044487	16060,472500	0,043834
13024,071233	0,044180	13042,572500	0,043689
10570,782233	0,043534	10588,138000	0,043378
8580,556733	0,043176	8598,867000	0,042916
6963,891233	0,042715	6981,940000	0,042533
5651,081733	0,042282	5669,507000	0,042013
4585,195733	0,041733	4603,433000	0,041384
3719,815733	0,041016	3737,965000	0,040641
3016,947733	0,040248	3035,186000	0,039870
2446,254733	0,039363	2464,793000	0,038934
1982,937233	0,038329	2001,135000	0,037901
1606,973233	0,037171	1624,917000	0,036737
1301,132733	0,035810	1319,198500	0,035414
1053,192733	0,034256	1071,458000	0,033913
852,124233	0,032526	869,881500	0,032294
688,043733	0,030540	706,077500	0,030494
555,435733	0,028476	573,550000	0,028518
447,557233	0,026022	465,563000	0,026476
360,115733	0,023708	378,003000	0,024376
288,813733	0,021333	306,945000	0,022282
231,205233	0,018989	249,148500	0,020183
184,230733	0,016650	202,389500	0,018196
146,130233	0,014408	164,122500	0,016316
115,287233	0,012299	133,372500	0,014578

Lazo Ascendente		Lazo Descendente	
Campo magnético (Oe)	Momento (emu)	Campo Magnético (Oe)	Momento (emu)
89,979733	0,010316	108,292500	0,012945
69,733733	0,008503	87,949500	0,011504
53,251233	0,006866	71,251500	0,010200
39,764733	0,005387	58,026500	0,009059
28,853733	0,004085	47,230500	0,008057
19,983733	0,002949	38,085000	0,007187
12,750733	0,001950	30,988500	0,006470
7,008233	0,001129	25,193500	0,005844
2,185233	0,000417	20,251500	0,005298
-1,710267	-0,000183	16,493500	0,004867
-4,814767	-0,000641	13,393000	0,004506
-7,274767	-0,001017	10,896000	0,004195
-9,309267	-0,001310	8,711500	0,003934
-11,153267	-0,001571	7,111500	0,003756
-12,329767	-0,001730	5,913500	0,003600
-13,629267	-0,001894	4,641000	0,003450
-14,324267	-0,001995	3,697500	0,003330
-15,097267	-0,002101	3,159000	0,003255
-15,783767	-0,002181	2,541500	0,003175
-16,323267	-0,002264	1,887500	0,003093
-16,661767	-0,002307	1,653000	0,003055
-16,620267	-0,002304	1,038000	0,002974
-17,245767	-0,002383	0,992000	0,002978
-19,485267	-0,002681	-1,401500	0,002657
-19,608767	-0,002684	-1,439000	0,002655
-20,101767	-0,002761	-1,725000	0,002616
-20,390267	-0,002801	-2,142500	0,002555
-20,915267	-0,002858	-2,714500	0,002493
-21,441267	-0,002936	-3,038500	0,002439
-22,303267	-0,003039	-3,877500	0,002329
-23,012767	-0,003134	-4,778500	0,002210
-24,204767	-0,003288	-5,920000	0,002040
-25,654767	-0,003461	-7,378000	0,001853
-27,230767	-0,003675	-9,111000	0,001609
-29,283767	-0,003917	-10,941500	0,001331
-31,818267	-0,004235	-13,623500	0,000946

Lazo Ascendente		Lazo Descendente	
Campo magnético (Oe)	Momento (emu)	Campo Magnético (Oe)	Momento (emu)
-35,045767	-0,004616	-16,785500	0,000466
-38,803267	-0,005057	-20,615000	-0,000128
-43,590267	-0,005561	-25,362000	-0,000857
-49,490767	-0,006204	-31,249500	-0,001736
-56,610267	-0,006941	-38,307000	-0,002730
-65,427267	-0,007815	-47,144000	-0,003897
-76,461267	-0,008837	-58,252000	-0,005238
-89,798767	-0,010000	-71,592500	-0,006727
-106,306767	-0,011315	-88,281000	-0,008388
-126,716767	-0,012808	-108,344500	-0,010200
-152,011267	-0,014457	-133,600500	-0,012191
-182,645767	-0,016231	-164,598500	-0,014324
-220,626267	-0,018155	-202,523500	-0,016560
-267,535767	-0,020201	-249,494500	-0,018859
-325,488267	-0,022339	-307,204000	-0,021224
-396,433267	-0,024457	-378,402500	-0,023607
-483,993767	-0,026617	-465,839500	-0,025880
-591,782267	-0,028725	-573,831500	-0,028096
-724,715767	-0,030702	-706,489500	-0,030180
-888,113767	-0,032545	-869,972500	-0,032076
-1089,846267	-0,034237	-1071,544000	-0,033854
-1337,927267	-0,035760	-1319,946000	-0,035410
-1643,299267	-0,037064	-1625,039000	-0,036814
-2019,636267	-0,038285	-2001,323000	-0,038121
-2482,924767	-0,039033	-2464,578500	-0,039173
-3053,586767	-0,039920	-3035,240000	-0,040042
-3756,275767	-0,040692	-3738,189000	-0,040848
-4622,049767	-0,041441	-4603,667500	-0,041496
-5687,964767	-0,042042	-5669,450500	-0,042088
-7000,557767	-0,042583	-6982,236000	-0,042610
-8617,228267	-0,043046	-8599,208500	-0,043034
-10607,786267	-0,043466	-10590,367500	-0,043243
-13059,405767	-0,043786	-13041,967000	-0,043561
-16079,115267	-0,044175	-16061,028000	-0,043777
-19798,744267	-0,044235	-19779,596500	-0,044307
-24377,957267	-0,044398	-24358,113500	-0,044506

Lazo Ascendente		Lazo Descendente	
Campo magnético (Oe)	Momento (emu)	Campo Magnético (Oe)	Momento (emu)
-29981,791733	-0,044458	-30000,201000	-0,044458

Con los datos del momento magnético (μ) ilustrados en la **Tabla D1** y teniendo en cuenta que la masa de NPs en la muestra de FF ($m_{NPs} \approx 0,000762934$ g), se estimó la magnetización (M) mediante la siguiente formula:

$$M = \frac{\mu}{m_{NPs}} \quad (\text{Ec.11})$$

Tabla D2.

Valores estimados de magnetización.

Lazo Ascendente		Lazo Descendente	
Campo magnético (Oe)	Magnetización (emu/g)	Campo magnético (Oe)	Magnetización (emu/g)
29981,33873	58,68418	29998,14550	58,06391
24340,62673	58,71802	24358,88900	58,03019
19759,69723	58,53774	19779,37500	57,83186
16042,44373	58,31052	16060,47250	57,45395
13024,07123	57,90768	13042,57250	57,26495
10570,78223	57,06157	10588,13800	56,85687
8580,55673	56,59203	8598,86700	56,25131
6963,89123	55,98768	6981,94000	55,74890
5651,08173	55,41972	5669,50700	55,06711
4585,19573	54,70129	4603,43300	54,24275
3719,81573	53,76103	3737,96500	53,26887
3016,94773	52,75411	3035,18600	52,25839
2446,25473	51,59397	2464,79300	51,03235
1982,93723	50,23880	2001,13500	49,67860
1606,97323	48,72133	1624,91700	48,15193
1301,13273	46,93744	1319,19850	46,41877
1053,19273	44,90040	1071,45800	44,45106
852,12423	42,63273	869,88150	42,32879
688,04373	40,02962	706,07750	39,96997
555,43573	37,32402	573,55000	37,37979
447,55723	34,10779	465,56300	34,70333

Lazo Ascendente		Lazo Descendente	
Campo magnético (Oe)	Magnetización (emu/g)	Campo magnético (Oe)	Magnetización (emu/g)
360,11573	31,07415	378,00300	31,94976
288,81373	27,96118	306,94500	29,20509
231,20523	24,88945	249,14850	26,45449
184,23073	21,82417	202,38950	23,85049
146,13023	18,88488	164,12250	21,38589
115,28723	16,12031	133,37250	19,10790
89,97973	13,52193	108,29250	16,96676
69,73373	11,14537	87,94950	15,07812
53,25123	8,99884	71,25150	13,37001
39,76473	7,06076	58,02650	11,87446
28,85373	5,35405	47,23050	10,55993
19,98373	3,86589	38,08500	9,41973
12,75073	2,55625	30,98850	8,48023
7,00823	1,47972	25,19350	7,66021
2,18523	0,54707	20,25150	6,94400
-1,71027	-0,23985	16,49350	6,37949
-4,81477	-0,83979	13,39300	5,90584
-7,27477	-1,33252	10,89600	5,49912
-9,30927	-1,71763	8,71150	5,15668
-11,15327	-2,05944	7,11150	4,92347
-12,32977	-2,26739	5,91350	4,71909
-13,62927	-2,48239	4,64100	4,52214
-14,32427	-2,61449	3,69750	4,36469
-15,09727	-2,75394	3,15900	4,26601
-15,78377	-2,85929	2,54150	4,16137
-16,32327	-2,96790	1,88750	4,05459
-16,66177	-3,02373	1,65300	4,00419
-16,62027	-3,01966	1,03800	3,90297
-17,24577	-3,12296	0,99200	3,89862
-19,48527	-3,51436	-1,40150	3,48281
-19,60877	-3,51808	-1,43900	3,48055
-20,10177	-3,61896	-1,72500	3,42938
-20,39027	-3,67113	-2,14250	3,34916
-20,91527	-3,74612	-2,71450	3,26775
-21,44127	-3,84887	-3,03850	3,19744

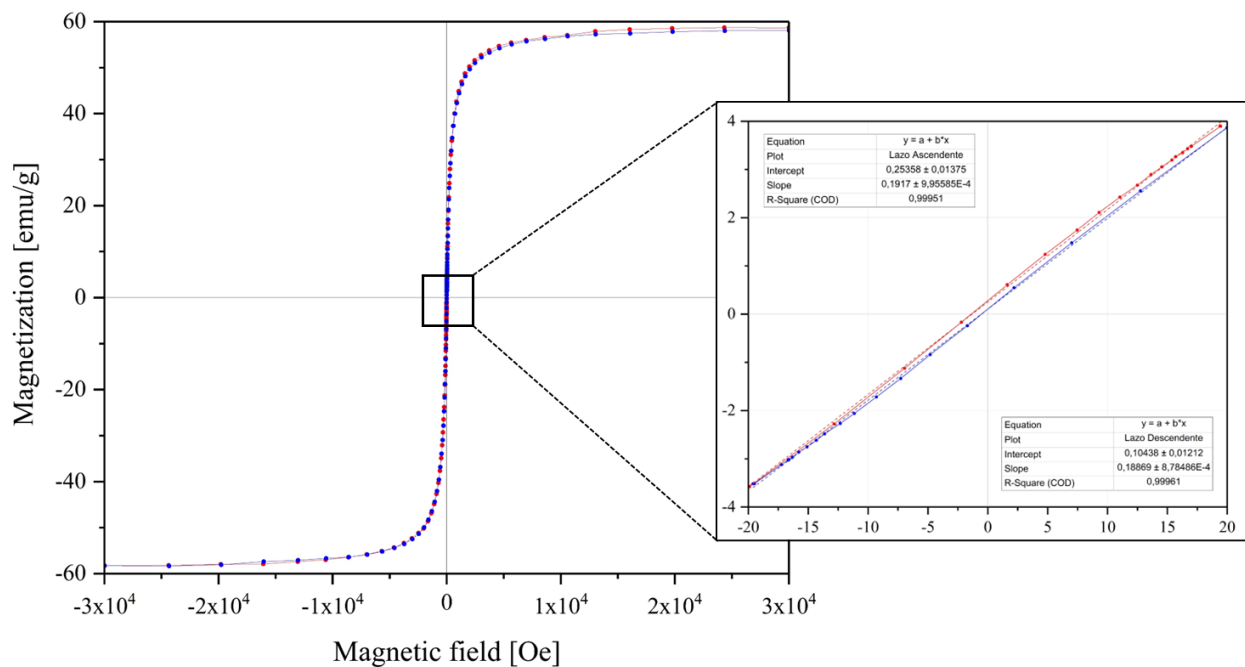
Lazo Ascendente		Lazo Descendente	
Campo magnético (Oe)	Magnetización (emu/g)	Campo magnético (Oe)	Magnetización (emu/g)
-22,30327	-3,98387	-3,87750	3,05332
-23,01277	-4,10765	-4,77850	2,89613
-24,20477	-4,30993	-5,92000	2,67448
-25,65477	-4,53708	-7,37800	2,42873
-27,23077	-4,81689	-9,11100	2,10890
-29,28377	-5,13458	-10,94150	1,74412
-31,81827	-5,55096	-13,62350	1,24059
-35,04577	-6,04986	-16,78550	0,61063
-38,80327	-6,62828	-20,61500	-0,16748
-43,59027	-7,28855	-25,36200	-1,12275
-49,49077	-8,13154	-31,24950	-2,27489
-56,61027	-9,09818	-38,30700	-3,57789
-65,42727	-10,24284	-47,14400	-5,10788
-76,46127	-11,58298	-58,25200	-6,86507
-89,79877	-13,10765	-71,59250	-8,81791
-106,30677	-14,83080	-88,28100	-10,99493
-126,71677	-16,78817	-108,34450	-13,36945
-152,01127	-18,94975	-133,60050	-15,97968
-182,64577	-21,27380	-164,59850	-18,77498
-220,62627	-23,79662	-202,52350	-21,70554
-267,53577	-26,47758	-249,49450	-24,71940
-325,48827	-29,28041	-307,20400	-27,81911
-396,43327	-32,05617	-378,40250	-30,94229
-483,99377	-34,88739	-465,83950	-33,92119
-591,78227	-37,65062	-573,83150	-36,82643
-724,71577	-40,24232	-706,48950	-39,55721
-888,11377	-42,65753	-869,97250	-42,04321
-1089,84627	-44,87549	-1071,54400	-44,37394
-1337,92727	-46,87142	-1319,94600	-46,41263
-1643,29927	-48,58119	-1625,03900	-48,25305
-2019,63627	-50,18117	-2001,32300	-49,96634
-2482,92477	-51,16164	-2464,57850	-51,34581
-3053,58677	-52,32469	-3035,24000	-52,48413
-3756,27577	-53,33560	-3738,18900	-53,54059
-4622,04977	-54,31767	-4603,66750	-54,39002

Lazo Ascendente		Lazo Descendente	
Campo magnético (Oe)	Magnetización (emu/g)	Campo magnético (Oe)	Magnetización (emu/g)
-5687,96477	-55,10593	-5669,45050	-55,16564
-7000,55777	-55,81482	-6982,23600	-55,84971
-8617,22827	-56,42215	-8599,20850	-56,40603
-10607,78627	-56,97206	-10590,36750	-56,67922
-13059,40577	-57,39178	-13041,96700	-57,09702
-16079,11527	-57,90185	-16061,02800	-57,37961
-19798,74427	-57,97957	-19779,59650	-58,07493
-24377,95727	-58,19412	-24358,11350	-58,27254
-29981,79173	-58,27254	-30000,20100	-58,33571

Ya estimados los valores de magnetización, se grafican en función del campo magnético (M-H). Una vez graficados, se procede a tomar los valores de magnetización a CM bajos (entre -20 a 20 Oe) y se ajusta las curvas obtenidas a la ecuación de una recta.

Figura D1

Magnetización a bajos CM.



De la **Figura D1**, se obtienen las rectas de los lazos descendente y ascendente,

Recta: $M(H) = X_m \cdot H + b$ (Ec.6)

Recta del lazo ascendente: $M(H) = 0,1917 \cdot H + 0,2536$

Recta del lazo descendente: $M(H) = 0,1887 \cdot H + 0,1044$

Curva antihisterética: $M(H) = 0,1902 \cdot H + 0,1790$

De lo anterior se obtuvo que $X_m \approx 0,1902 \text{ emu} \cdot (\text{g} \cdot \text{Oe})^{-1}$, para conocer el valor del H_c se iguala $M(H) = 0$ y se despeja H , como se muestra en la siguiente ecuación:

$$H_c = -\frac{b}{x_m} \quad (\text{Ec.7})$$

De la cual se estimó que $H_c \approx 0,9380 \text{ Oe}$; sin embargo, estos valores tienen presente la susceptibilidad del diamagneto (X_d). Para corregir esto, se procede a estimar el valor de X_d y a su vez el valor de la magnetización de saturación (M_s) mediante las ramas a intensidades altas de CM.

Inicialmente se promedian los datos de magnetización de ambos lazos, posteriormente se seleccionan los valores de magnetización a altas intensidades de CM (menores a -4900 y mayores a 4900 Oe), como se muestra en la **Tabla D3**. Con ayuda de la ecuación que describe la magnetización en función del CM:

Magnetización: $M(H) = X_d \cdot H^3 + M_s \left(1 - \frac{\alpha}{H} - \frac{\beta}{H^2}\right)$ (Ec.12)

$$y(H) = M \cdot H^2 \quad (\text{Ec.13})$$

Sustituyendo la (Ec.12) en la (Ec.13) se obtiene la ecuación Ec8):

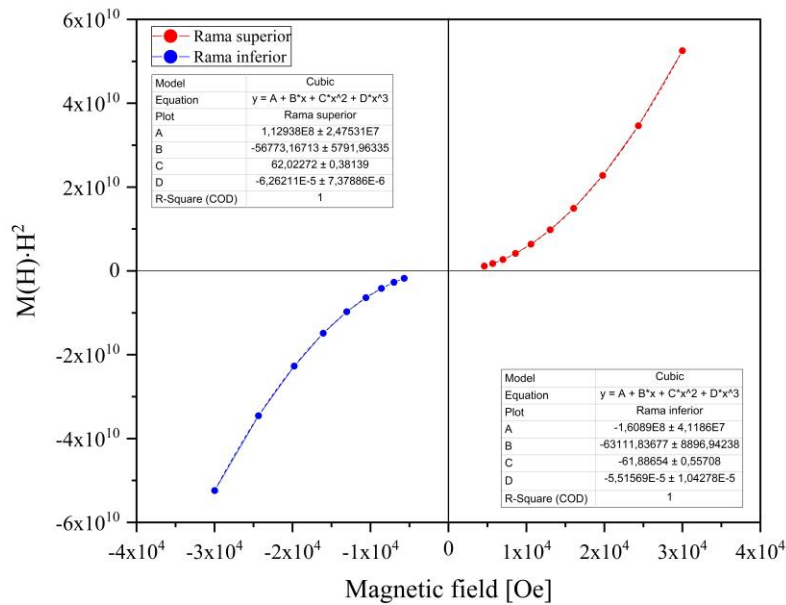
$$y(H) = X_d \cdot H^3 + M_s(H^2 - \alpha H - \beta) \quad (\text{Ec.8})$$

Teniendo en cuenta lo anterior se estiman los valores de $y(H) = M \cdot H^2$

Tabla D3*Magnetización a altas intensidades de CM*

Curva Antihesteretica		
Campo magnético (Oe)	Magnetización (emu/g)	$y(H)$
29998,9468	58,3740	5,253E+10
24358,9625	58,3741	3,464E+10
19778,7408	58,1848	2,276E+10
16060,6628	57,8822	1,493E+10
13042,5265	57,5863	9,796E+09
10588,6648	56,9592	6,386E+09
8598,9165	56,4217	4,172E+09
6982,1203	55,8683	2,724E+09
5669,4990	55,2434	1,776E+09
4603,5190	54,4720	1,154E+09
...
...
-5669,5030	-55,1358	-1,772E+09
-6982,1923	-55,8323	-2,722E+09
-8599,0138	-56,4141	-4,171E+09
-10589,8723	-56,8256	-6,373E+09
-13041,4818	-57,2444	-9,736E+09
-16060,8670	-57,6407	-1,487E+10
-19779,9658	-58,0273	-2,270E+10
-24358,8308	-58,2333	-3,455E+10
-29981,7917	-58,3041	-5,241E+10

Una vez estimamos los valores de $y(H)$, se grafican contra los valores del CM, como se muestra en la **Figura D2**.

Figura D2*Ramas a intensidades altas de CM*

En la **Figura D2** se observa las dos ramas, superior (Roja) e inferior (Azul), dichas curvas se ajustan a un polinomio de grados 3, luego promediar ambas curvas para realizar un contraste con la **Ec.8** y estimar los valores de la susceptibilidad del diamagneto (X_d) y magnetización de saturación (M_s).

Rama superior: $y(H) = -6,26 \times 10^{-5} H^3 + 62,0227 H^2 - 56773,1671 H + 1,13 \times 10^8$

Rama inferior: $y(H) = -5,51 \times 10^{-5} H^3 - 61,8865 H^2 - 63111,8367 H - 1,60 \times 10^8$

Rama promedio: $y(H) = -5,88 \times 10^{-5} H^3 + 61,95463 H^2 - 59942,5019 H - 2,40 \times 10^8$

Ecuación cubica: $y(H) = X_d \cdot H^3 + M_s(H^2 - \alpha H - \beta)$ (Ec.8)

Haciendo contraste de la ecuación que describe la rama promedio con la ecuación cubica (**Ec.8**), se deduce que el coeficiente que acompaña al termino de tercer grado es el valor de la susceptibilidad del diamagneto ($X_d \approx -5,88 \times 10^{-5} \text{emu} \cdot (\text{g} \cdot \text{Oe})^{-1}$) y el coeficiente que acompaña al termino de segundo grado es el valor de la magnetización de saturación ($M_s \approx$

61,9546 emu · g⁻¹). Una vez obtenido el valor de X_d , se realiza la corrección y la estimación de los nuevos valores de X_m y H_c mediante de las siguientes ecuaciones:

$$X_{m2} = X_{m1} - X_d \quad (\text{Ec.9})$$

$$H_{c2} = \frac{b}{X_{m2}} \quad (\text{Ec.10})$$

Dando como resultado que el nuevo valor de la susceptibilidad ($X_{m2} \approx \mathbf{0,1903 emu \cdot (g \cdot Oe)^{-1}}$) y campo coercitivo o coercitividad de las NPs ($H_{c2} \approx \mathbf{0,9408 Oe}$).

Apéndice E. Comportamiento del flujo volumétrico del FF a diferentes configuraciones, frecuencia e intensidad de CM

Figura E1.

Variaciones en el flujo volumétrico del FF a diferentes valores de frecuencia e intensidad de CM a 1,0 bar, utilizando una configuración de 6 bobinas. (a) Volumen de FF total en el tiempo en función del tiempo, (b) Variación de la presión en función del tiempo, (c) Flujo volumétrico del FF en función del tiempo

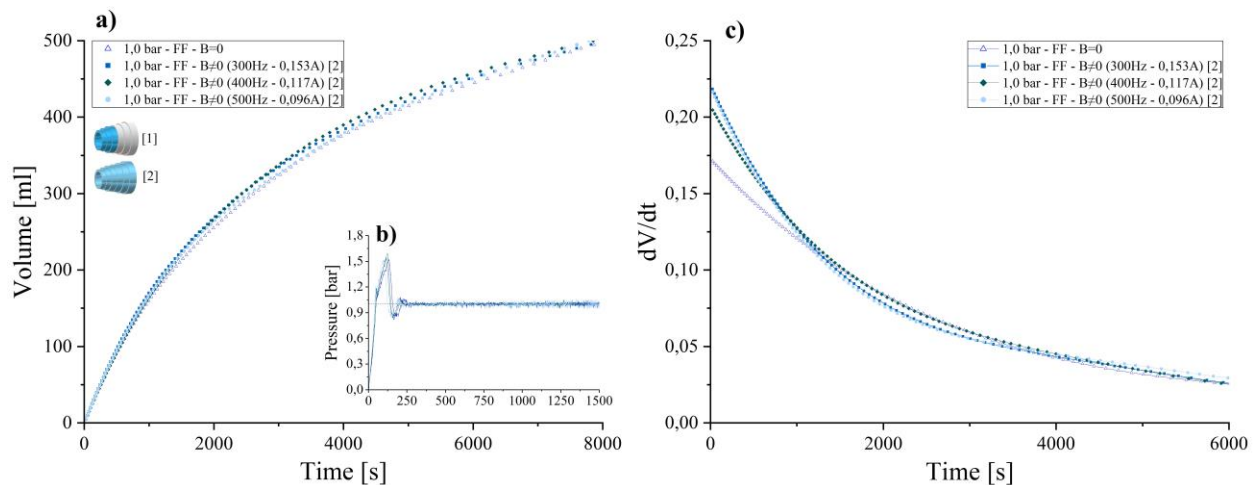


Figura E2.

Variaciones en el flujo volumétrico del FF a diferentes valores de frecuencia e intensidad de CM a 1,0 bar, utilizando una configuración de 3 bobinas. (a) Volumen de FF total en el tiempo en función del tiempo, (b) Variación de la presión en función del tiempo, (c) Flujo volumétrico del FF en función del tiempo

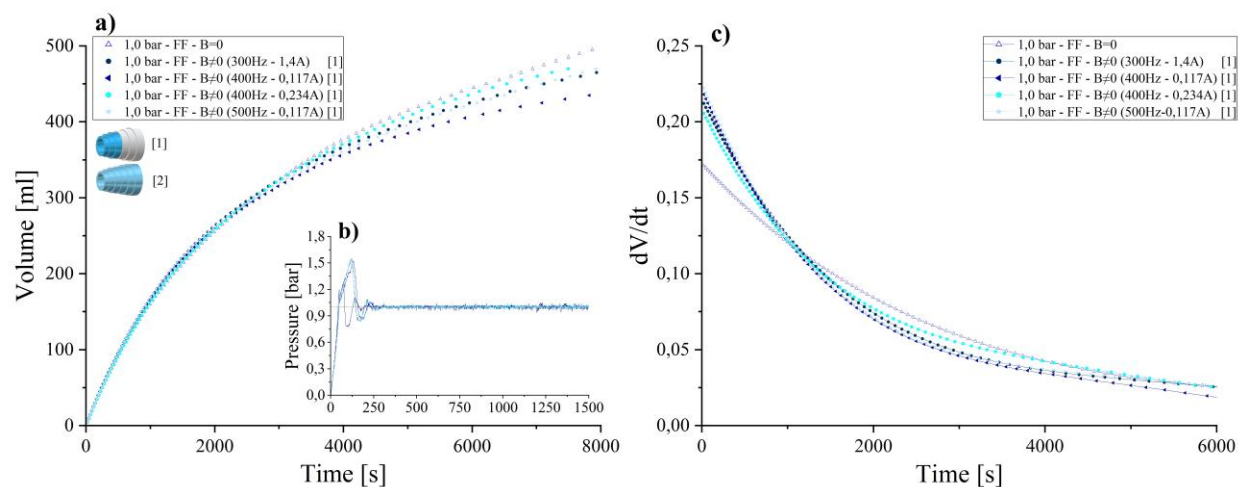
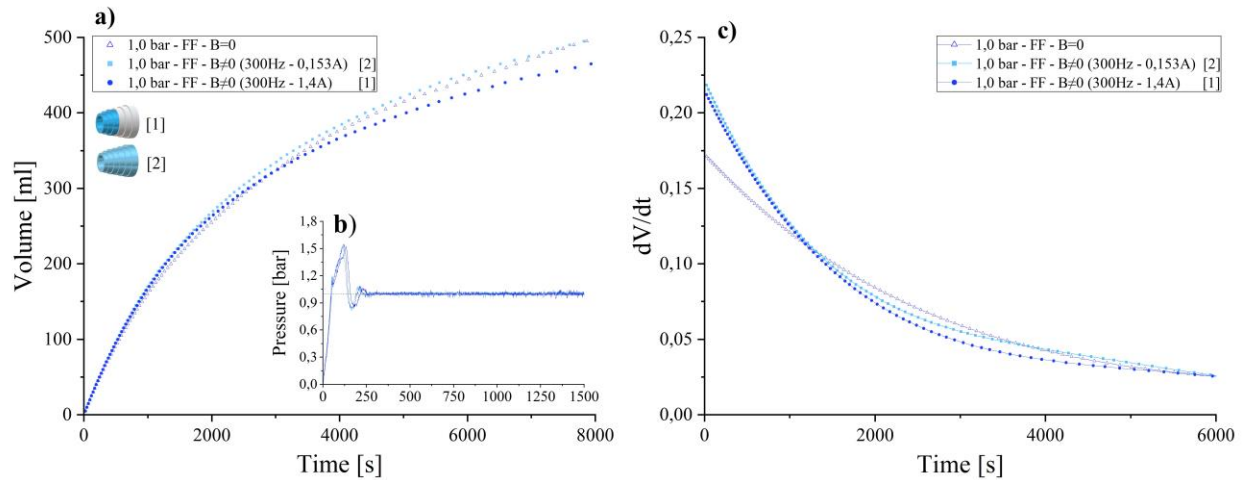


Figura E3.

Variaciones en el flujo volumétrico del FF a 300 Hz de frecuencia y diferentes valores intensidad en el CM a 1,0 bar, utilizando una configuración de 3 y 6 bobinas. (a) Volumen de FF total en el tiempo en función del tiempo, (b) Variación de la presión en función del tiempo, (c) Flujo volumétrico del FF en función del tiempo

**Figura E4.**

Variaciones en el flujo volumétrico del FF a 400 Hz de frecuencia y diferentes valores intensidad en el CM a 1,0 bar, utilizando una configuración de 3 y 6 bobinas. (a) Volumen de FF total en el tiempo en función del tiempo, (b) Variación de la presión en función del tiempo, (c) Flujo volumétrico del FF en función del tiempo

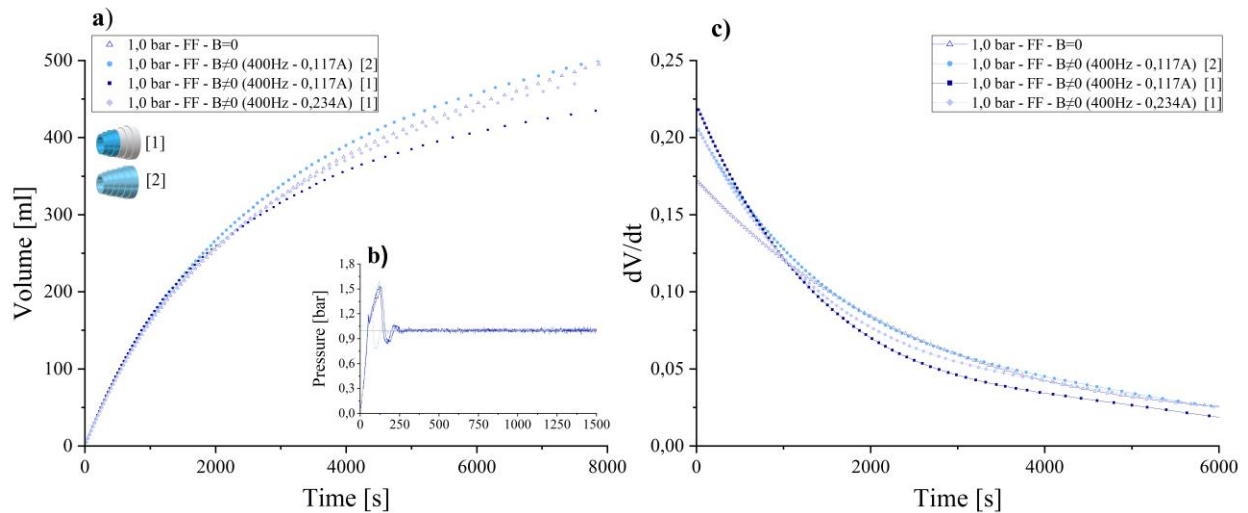


Figura E5.

Variaciones en el flujo volumétrico del FF a 500 Hz de frecuencia y diferentes valores intensidad en el CM a 1,0 bar, utilizando una configuración de 3 y 6 bobinas. (a) Volumen de FF total en el tiempo en función del tiempo, (b) Variación de la presión en función del tiempo, (c) Flujo volumétrico del FF en función del tiempo

