

FLUJO DE EMULSIONES Y MEZCLAS CRUDO FERROFLUIDO

Evaluación del flujo de emulsiones magnéticas y mezclas crudo ferrofluido en campo estático y
oscilatorio

Luisa Fernanda Rodríguez Martínez

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Químico

Director

Arlex Chaves Guerrero

Doctor en ingeniería química

Codirector

Valentina Gómez Sanabria

Ingeniera Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2025

Dedicatorias

A Dios, por iluminar mi camino y brindarme la fortaleza para alcanzar este logro.

A mis papás, Silvia y Juan Carlos, por su amor, apoyo incondicional y por darme la fuerza para seguir adelante aún en momentos de oscuridad. Los amo, este logro también es de ustedes.

A mi abí, por estar presente en cada etapa de mi vida y recordarme constantemente que “yo puedo, yo sé y yo soy capaz”.

A Toby y Max, por ser mi compañía más fiel a lo largo de toda la carrera, incluso en las madrugadas. Los llevo siempre en mi corazón.

A José, por su amor genuino, por estar a mi lado en cada momento y por darme tranquilidad cuando más la necesitaba. Gracias por confiar en mí y por hacerme ver capacidades que, en ocasiones, no alcanzaba a reconocer.

A cada integrante de mi familia, por su interés constante y por estar presente con cariño y palabras de aliento. Su compañía fue un apoyo invaluable en cada etapa de este camino.

A mis amigos, por su paciencia y comprensión en mis momentos de ausencia, y por estar siempre dispuestos a tenderme una mano cuando más lo necesitaba.

Agradecimientos

A mi alma máter, la Universidad Industrial de Santander, a la Escuela de Ingeniería Química y a cada docente que contribuyó a mi formación como profesional.

A Valentina, quien no solo fue mi guía, sino también una compañera con la que trabajé siempre en equipo. Gracias por la paciencia, las enseñanzas, los consejos, por confiar en mí y acompañarme con dedicación hasta el final.

Al profesor Arlex Chaves, por su entrega, compromiso y orientación a lo largo del desarrollo de esta tesis.

Tabla de contenido

	Pág.
Introducción	12
1. Objetivos	15
1.1. Objetivo general.....	15
1.2. Objetivos específicos	15
2. Marco Teórico	16
2.1. Ferrofluidos.....	16
2.2. Viscosidad negativa en fluidos con rotaciones internas.....	18
2.3. Emulsión magnética.....	18
3. Estado del arte.....	20
4. Metodología	23
4.1. Materiales.....	23
4.1.1. Preparación de la emulsión O/W	23
4.1.2. Mezclas crudo/ferrofluido.....	24
4.2. Descripción de la metodología.....	24
4.2.1. Formulación de la emulsión O/W	25
4.2.1.1. Formulación de las mezclas crudo/ferrofluido	25
4.2.2. Caracterización reológica.....	26
4.2.3. Caracterización magnetoreológica.....	27

4.2.4. Evaluación de la emulsión y la mezcla crudo ferrofluido en el sistema de flujo..... 27

4.2.4.1. Pruebas en ausencia de CM 28

4.2.4.2. Pruebas en presencia de CM..... 28

5. Resultados y discusión..... 29

5.1. Caracterización reológica..... 29

5.1.1. Caracterización reológica de la emulsión 29

5.1.2. Caracterización reológica de las mezclas crudo/ferrofluido 30

5.2. Caracterización magnetoreológica..... 32

5.2.1. Caracterización magnetoreológica de la emulsión 32

5.2.2. Caracterización magnetoreológica de la mezcla crudo/ferrofluido 34

5.3. Evaluación de la emulsión y la mezcla crudo/ferrofluido en el sistema de flujo 35

5.3.1. Pruebas en ausencia de CM ($B=0$)..... 35

5.3.2. Pruebas con CM estático no uniforme 36

5.3.3. Pruebas con CM oscilatorio no uniforme 40

6. Conclusiones..... 42

Referencias Bibliográficas 45

Apéndices..... 52

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Fracciones de saturados (S), aromáticos (A), resinas (R), asfaltenos (A) y gravedad API del crudo.....	24
Tabla 2. Volumen recuperado de la mezcla crudo ferrofluido a un tiempo de 2500 segundos para las pruebas realizadas a una frecuencia de 200 Hz e intensidad de 0.226 A en comparación con las pruebas en ausencia de campo, bajo diferentes presiones de entrada.....	41

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Ferrofluido. (a) Suspensión coloidal, (b) Comportamiento en ausencia de CM, (c) Comportamiento en presencia de CM.....	16
Figura 2. Emulsión magnética de aceite en agua (O/W)	19
Figura 3. Diagrama metodológico	24
Figura 4. Caracterización reológica de la emulsión. (a) Curva de flujo. Viscosidad en función de la velocidad de cizalla, (b) Barrido de amplitud.....	29
Figura 5. Curvas de flujo. Viscosidad en función de la velocidad de cizalla. (a) Mezclas en ausencia de NPs, (b) Comparación entre mezclas en ausencia de NPs y crudo/ferrofluido	31
Figura 6. Barrido de amplitud de las mezclas. (a) En ausencia de NPs, (b) Crudo/ferrofluido....	32
Figura 7. Caracterización magnetoreológica de la emulsión. (a) Curva de flujo transitorio. (I) En ausencia de campo, (II) En presencia de un pulso magnético a 328.13 mT, (III) En ausencia de campo, (b) Efecto magnetoviscoso para tasas de cizallamiento de 1, 10 y 25 s ⁻¹	34
Figura 8. Caracterización magnetoreológica de la mezcla $M_{F-70/30}$ 7500 ppm. (a) Curva de flujo transitorio. (I) En ausencia de campo, (II) En presencia de un pulso magnético a 328.13 mT, (III) En ausencia de campo, (b) Efecto magnetoviscoso para tasas de cizallamiento de 1, 10 y 25 s ⁻¹	34
Figura 9. Pruebas en el sistema de flujo en ausencia de CM (B=0) para: (a) la emulsión a 2, 1.5 y 1 bar, (b) la mezcla crudo ferrofluido a 2.5 y 2 bar. Se evaluó el volumen y la presión en función del tiempo.....	36
Figura 10. Distribución de la densidad de flux magnético proporcionado por 6 bobinas en la tubería con aire. (a) Corriente directa (DC), (b) Corriente alternante (AC).	37

- Figura 11. Pruebas en el sistema de flujo en presencia de CM estático no uniforme para: (a) la emulsión a 1.5 bar, (b) la mezcla crudo ferrofluido a 2.5 y 2 bar. Se evaluó el volumen en función del tiempo y se muestra el flujo volumétrico para la mezcla en función del tiempo..... 39
- Figura 12. Efecto del CM estático (DC) sobre el flujo de la emulsión. (a) Volumen en función del tiempo a una presión de 2 bar, (b) Volumen en función del tiempo a una presión de 1 bar 39
- Figura 13. Efecto del CM oscilatorio no uniforme (AC) sobre el flujo de la emulsión. Se evaluó el volumen en función del tiempo a una presión de: (a) 2 bar, (b) 1.5 bar 40
- Figura 14. Efecto del CM oscilatorio no uniforme (AC) sobre el flujo de la mezcla crudo ferrofluido. Se evaluó el volumen en función del tiempo y flujo volumétrico a una presión de: (a) 2.5 bar, (b) 2 bar..... 41

Lista de apéndices

	Pág.
Apéndice A. Propiedades de los materiales	52
Apéndice B. Evaluación de la estabilidad de la emulsión	54
Apéndice C. Caracterización magneto-reológica de la mezcla $M_{F-70/30}$	59
Apéndice D. Sistema de flujo y protocolo de operación	60

Resumen

Título: Evaluación del flujo de emulsiones magnéticas y mezclas crudo ferrofluido en campo estático y oscilatorio*.

Autor: Luisa Fernanda Rodríguez Martínez**.

Palabras Clave: Ferrofluido, emulsión, crudo/ferrofluido, viscosidad, campo magnético, flujo volumétrico.

Descripción: La interacción entre fluidos magnetizables y campos magnéticos externos permite modificar activamente sus propiedades de flujo, abriendo nuevas posibilidades para el transporte eficiente de fluidos complejos, como los crudos pesados. En este estudio, se evaluó el comportamiento del flujo de dos tipos de fluidos en un sistema a escala de laboratorio, diseñado para generar campos magnéticos estáticos y oscilatorios con un gradiente linealmente creciente en la dirección axial: (i) una emulsión magnética compuesta por un ferrofluido (Fe_3O_4 en queroseno) disperso en una solución acuosa de surfactante catiónico, y (ii) mezclas de crudo pesado con ferrofluido. Las propiedades reológicas de los fluidos se caracterizaron mediante ensayos oscilatorios de baja amplitud (SAOS) y pruebas rotacionales en ausencia y presencia de un campo magnético (CM) estático y uniforme (magneto-reómetro). Los resultados muestran un efecto magnetoviscoso positivo, con un incremento relativo en la viscosidad de 207% para la emulsión con una concentración de surfactante de 3.5 % p/v y ferrofluido concentrado a 5000 ppm de nanopartículas, y del 126 % para la mezcla de crudo con ferrofluido a 7500 ppm, en presencia de un CM estático (0-796.73 mT) y velocidad de cizalla de 1 s^{-1} . Posteriormente, en las pruebas realizadas en el sistema de flujo, se observó que el incremento de la presión genera un comportamiento análogo al producido por el aumento de la tasa de corte, lo cual atenúa el efecto inducido por el CM. Se evidenció que la aplicación de un CM estático produce un incremento en la viscosidad de ambos fluidos, lo que conlleva una disminución del flujo volumétrico. En contraste, la aplicación de un campo oscilatorio generó una respuesta dual, logrando una aceleración del flujo únicamente bajo condiciones de baja frecuencia de CM (200 Hz y 0.226 A), tanto en la emulsión magnética como en la mezcla crudo/ferrofluido.

*Trabajo de grado

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Arlex Chaves Guerrero, Doctor en Ingeniería Química. Co-director: Valentina Gómez Sanabria, Ingeniera Química.

Abstract

Title: Evaluation of the flow of magnetic emulsions and ferrofluid mixtures in a static and oscillatory magnetic field*.

Author: Luisa Fernanda Rodríguez Martínez**.

Keywords: Ferrofluid, emulsion, crude oil/ferrofluid, viscosity, magnetic field, volumetric flow.

Description: The interaction between magnetizable fluids and external magnetic fields allows their flow properties to be actively modified, opening new possibilities for the efficient transport of complex fluids, such as heavy crude oils. In this study, the flow behavior of two types of fluids was evaluated in a laboratory-scale system designed to generate static and oscillatory magnetic fields with a linearly increasing gradient in the axial direction: (i) a magnetic emulsion composed of a ferrofluid (Fe₃O₄ in kerosene) dispersed in an aqueous solution of cationic surfactant, and (ii) mixtures of heavy crude oil with ferrofluid. The rheological properties of the fluids were characterized by low-amplitude oscillatory shear (SAOS) tests and rotational tests in the absence and presence of a static and uniform magnetic field (magneto-rheometer). The results show a positive magnetoviscous effect, with a relative increase in viscosity of 207% for the emulsion with a surfactant concentration of 3.5% w/v and ferrofluid concentrated at 5000 ppm of nanoparticles, and 126% for the mixture of crude oil with ferrofluid at 7500 ppm, in the presence of a static magnetic field (0-796.73 mT) and a shear rate of 1 s⁻¹. Subsequently, in the tests carried out in the flow system, it was observed a behavior analogous to that of a pressure increase with respect to the growth in shear rate, which attenuates the effect induced by the magnetic field. It was shown that the application of a static magnetic field produces an increase in the viscosity of both fluids, which leads to a decrease in volumetric flow. In contrast, the application of an oscillatory field generated a dual response: flow acceleration was achieved only under low magnetic field frequency conditions (200 Hz and 0.226 A), both in the magnetic emulsion and in the crude oil/ferrofluid mixture.

*Degree work

**Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: Arlex Chaves Guerrero, Doctor in Chemical Engineering. Co-director: Valentina Gómez Sanabria, Chemical Engineer.

Introducción

El creciente interés en el desarrollo de materiales inteligentes responde a su capacidad para modificar de forma controlada sus propiedades frente a estímulos externos, ya sean físicos o químicos, lo que los convierte en candidatos versátiles para satisfacer requerimientos técnicos específicos o para optimizar tecnologías ya existentes. En este contexto, los fluidos magnéticos (ferrofluidos, emulsiones magnéticas, fluidos magnetoreológicos etc.) se clasifican como materiales inteligentes debido a la capacidad de modificar sus propiedades reológicas, como la viscosidad y el comportamiento viscoelástico en función de un campo magnético (CM) externo (Genc & Derin, 2014). Estas características los convierten en materiales prometedores para diversas aplicaciones tecnológicas en áreas como la mecánica, biología y medicina, promoviendo el avance en la ciencia e ingeniería de materiales y consolidándose como un campo en constante evolución (Kole & Khandekar, 2021; Kúdelčík & Kúdelčíková, 2018; Odenbach & Störk, 1998). Uno de los fluidos magnéticos de considerable interés son los ferrofluidos, cuyo comportamiento superparamagnético permite el control magnético de su flujo y de sus propiedades reológicas. En particular, la configuración del CM aplicado (ya sea estático o dependiente del tiempo), así como su intensidad, influyen directamente en la respuesta del sistema (L. Pop & Odenbach, 2006), debido a que determinan el grado de alineación de los momentos magnéticos de las nanopartículas (NPs) y la formación de estructuras anisotrópicas dentro del fluido (Yang et al., 2022).

Por ejemplo, se ha comprobado que, en presencia de un CM estático y uniforme, un ferrofluido experimenta un aumento en su viscosidad. En contraste, cuando el CM es no uniforme, puede inducirse una fuerza de cuerpo magnético (fuerza tipo Kelvin) análoga a la ejercida por el campo gravitacional (ρg), que puede acelerar el flujo del fluido. Asimismo, bajo campos

magnéticos dependientes del tiempo (campos alternantes) se ha observado una disminución de la viscosidad, e incluso, la generación de flujo a velocidades del orden de milímetros por segundo, mediante campos magnéticos rotativos y de onda viajera. Un aspecto relevante es que la magnitud del CM requerida para inducir estos efectos magnetoreológicos se considera relativamente baja (0 a 29 mT) (Odenbach, 2003). Por otra parte, es importante resaltar que a pesar de la notable estabilidad coloidal que presentan los ferrofluidos, su uso se restringe en sistemas donde se requiera una respuesta magnetoviscosa de varios ordenes de magnitud, como en dispositivos de amortiguación de vibraciones que necesitan una disipación de energía controlada (Olabi & Grunwald, 2007).

En consecuencia, se han propuesto diversas estrategias para incrementar esta respuesta, entre las cuales destaca la formulación de sistemas complejos, como las emulsiones magnéticas. Estas consisten en sistemas bifásicos en los que pequeñas gotas de ferrofluido se dispersan en un líquido portador, inmiscible y no magnético (H P Cunha, 2018). Se ha evidenciado que, en estos sistemas, las gotas no solo se orientan en la dirección del CM, sino que también experimentan una elongación en dicha dirección (Cunha et al., 2020). En este contexto, en un trabajo previo en el grupo de investigación FIRST, se comprobó que emulsiones compuestas por un ferrofluido en base keroseno disperso en soluciones acuosas de surfactante (O/W), presentan un mayor efecto magnetoviscoso que el observado en un ferrofluido a la misma concentración, con un cambio relativo máximo en la viscosidad de 17 veces al estar expuestas a un CM estático uniforme (0-796.73 mT) y a una tasa de cizalla de 1 s^{-1} (V. , Gómez-Sanabria & Lucas-Lancheros, 2022).

Por otra parte, los ferrofluidos también presentan un alto potencial de aplicación en la industria del petróleo, tanto en su producción como en el transporte. En este contexto, Contreras–Mateus et al., (2021) demostraron que la incorporación de ferrofluidos en mezclas con crudos

pesados permite inducir un comportamiento magnetoreológico, lo que representa una estrategia prometedora para el control del flujo en medios altamente viscosos.

Considerando lo expuesto anteriormente, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar el impacto de campos magnéticos estáticos y dinámicos de intensidad linealmente creciente sobre fluidos magnéticos, empleando un sistema de flujo a escala de laboratorio. Para ello se trabajará inicialmente con una emulsión O/W de ferrofluido, utilizada como crudo modelo, y posteriormente con mezclas de crudo/ferrofluido, con el fin de determinar si mediante la aplicación de estas configuraciones de CM es posible inducir modificaciones en el flujo volumétrico de estos fluidos, contribuyendo a una mayor eficiencia en su transporte.

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Evaluar experimentalmente el flujo de una emulsión magnética O/W y mezclas de crudo/ferrofluido bajo campos magnéticos estáticos y oscilatorios no uniformes.

1.2. Objetivos específicos

Definir, basado en pruebas reológicas y magnetoreológicas, las proporciones de mezclas crudo/ferrofluido aptas para ser usadas en un sistema de flujo restringido a bajas viscosidades.

Determinar el efecto de campos magnéticos estáticos y alternantes no uniformes sobre el flujo volumétrico de una emulsión magnética O/W y de mezclas crudo/ferrofluido.

Establecer, basados en los resultados del objetivo específico anterior, la conveniencia de usar mezclas crudo/ferrofluido o emulsiones magnéticas, así como el tipo de campo magnético más conveniente para implementar en el transporte de crudos pesados.

2. Marco Teórico

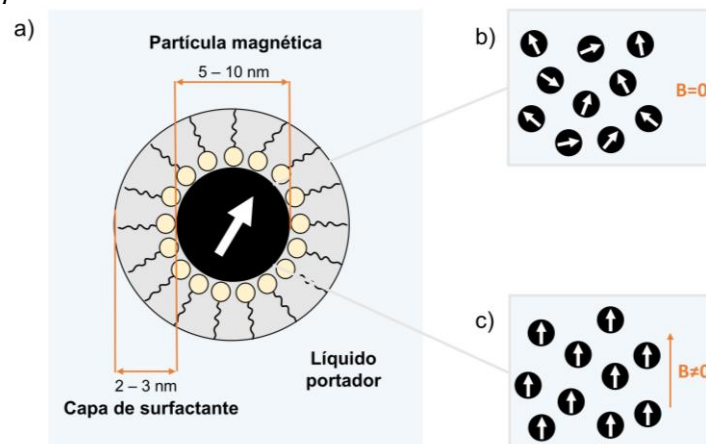
2.1. Ferrofluidos

Los ferrofluidos corresponden a suspensiones coloidales de partículas magnéticas de tamaño nanométrico (3-15 nm) y monodominio, recubiertas por un surfactante/polímero, el cual permite su suspensión de manera estable en un líquido portador no magnético, como agua o un hidrocarburo (Yang et al., 2022) (ver **Figura 1a**). Los ferrofluidos comerciales están constituidos predominantemente por NPs de magnetita (Fe_3O_4), aunque también se han empleado NPs de ferrita de cobalto (CoFe_2O_4) y cobalto especialmente en contextos de investigación (Bacri et al., 1995; L. M. Pop & Odenbach, 2008).

En ausencia de CM ($\mathbf{B} = \mathbf{0}$), los momentos magnéticos de las NPs presentan una orientación aleatoria dentro del fluido (**Figura 1b**). Sin embargo, estos sistemas exhiben un comportamiento superparamagnético, lo que implica que, al aplicarse un CM externo, los momentos magnéticos tienden a alinearse en la dirección del campo aplicado (Philip, 2023) venciendo el movimiento browniano, tal como se muestra en la **Figura 1c**.

Figura 1.

Ferrofluido. (a) Suspensión coloidal, (b) Comportamiento en ausencia de CM, (c) Comportamiento en presencia de CM



No obstante, se ha comprobado que la alineación del momento magnético con el campo se puede dar por dos mecanismos de relajación, el mecanismo browniano y el de Néel. En el primer caso, el momento magnético se encuentra anclado a la partícula, por lo que su alineación con un CM externo requiere la rotación física de toda la partícula dentro del fluido portador, movimiento que depende directamente del tamaño hidrodinámico de la partícula y la viscosidad del fluido portador. En contraste, la relajación de Néel ocurre cuando el momento magnético se reorienta dentro del núcleo de la partícula sin necesidad de la rotación del cuerpo completo. Este mecanismo, a diferencia del browniano, está influenciado por el volumen del núcleo magnético, ya que implica superar una barrera de energía interna para lograr la reorientación del vector de magnetización (Ilg & Kröger, 2020; Kötitz et al., 1999; Odenbach, 2003).

Es importante destacar, que el mecanismo de relajación importante en la interacción hidrodinámica entre las NPs y el fluido portador es el mecanismo browniano, el cual se asume como base en los estudios teóricos relacionados con el fenómeno de magnetoviscosidad. Este proceso se caracteriza por tener un tiempo de relajación dado por la siguiente expresión:

$$\tau_B = \frac{3\eta_0 \mathcal{V}_h}{k_B T} \quad (1)$$

donde \mathcal{V}_h , representa el volumen hidrodinámico de la partícula y η_0 la viscosidad del líquido portador (Karpavičius et al., 2021). Por lo tanto, el superparamagnetismo, sumado a la relajación browniana, implica que las Nps en el ferrofluido bajo situación de flujo podrían llegar a mantenerse fijas o inmóviles generando un incremento en la viscosidad, sin embargo, si el CM es alternante, la nanopartícula podría moverse oscilatoriamente; o en el caso de un CM rotativo, girar en el fluido comportándose como pequeños molinos que empujan el fluido. Esto es lo que se ha denominado como “rotación interna”.

2.2. Viscosidad negativa en fluidos con rotaciones internas

Es bien conocido que, un ferrofluido bajo un flujo por cizalladura (flujo de Couette), las NPs rotan (ω_p) a la misma velocidad de rotación local del fluido conocida como vorticidad $\Omega \equiv \frac{1}{2}\nabla \times v$. Sin embargo, cualquier alteración en la velocidad angular de las partículas ω_p en comparación con la velocidad angular del líquido Ω resulta en una disipación viscosa adicional que se refleja en un incremento de la viscosidad. Como ya se mencionó, esta alteración es generada por el comportamiento superparamagnético de las partículas que hace $\Omega \neq \omega_p$ (Bacri et al., 1995; Shliomis & Morozov, 1994).

De manera similar, en un ferrofluido inmóvil bajo un CM alternante y linealmente polarizado ($H = H_0 \cdot \cos(ft)$) de amplitud H_0 y frecuencia de oscilación f , induce oscilaciones rotacionales de los granos, pero sin una dirección preferida para su rotación. Por lo tanto, un promedio sobre un elemento físicamente pequeño del volumen de ferrofluido resulta en un giro de cero de las nanopartículas ($\omega_p = 0$). Sin embargo, cualquier flujo con una vorticidad distinta de cero es suficiente para hacer que la velocidad promedio angular de las partículas sea diferente de cero. Cuando la frecuencia del campo alternante es lo suficientemente alta, los granos giran más rápido que el fluido ($\omega_p > \Omega$) y entonces favorece el flujo. La aceleración ocurre, naturalmente, a expensas de la energía del campo de corriente alterna y se manifiesta en una reducción de la viscosidad total, es decir, en una viscosidad rotacional negativa (Odenbach, 2003).

2.3. Emulsión magnética

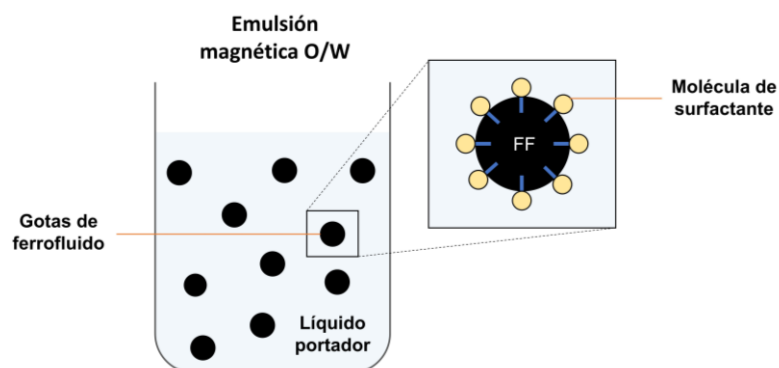
Una emulsión es un sistema disperso formado por dos líquidos inmiscibles, en el que uno de ellos (fase dispersa) se encuentra distribuido en forma de pequeñas gotas dentro del otro (fase continua). De acuerdo con la configuración de las fases, las emulsiones se clasifican como aceite

en agua (O/W) cuando el aceite se encuentra disperso en una fase acuosa, o como agua en aceite (W/O) cuando el agua se encuentra dispersa en una fase oleosa. Desde el punto de vista termodinámico, las emulsiones son sistemas inherentemente inestables, debido a la elevada energía libre interfacial entre ambas fases. Para mitigar esta inestabilidad y evitar fenómenos como la coalescencia, es común la incorporación de agentes tensioactivos (surfactantes), que actúan disminuyendo la tensión interfacial y favoreciendo la estabilización del sistema (Derkach, 2009; H P Cunha, 2018b; Piacentini et al., 2010).

La incorporación de NPs magnéticas en sistemas emulsificados da lugar a las emulsiones magnéticas, las cuales conservan la estructura de una emulsión convencional, pero adquieren la capacidad de responder activamente a campos magnéticos externos. Estas se obtienen, al dispersar un ferrofluido a base de aceite en un líquido portador inmisible (**Figura 2**). La presencia de un CM puede inducir la deformación de las gotas, las cuales tienden a adoptar una forma elipsoidal orientada en la dirección del campo. Esta respuesta se debe a la baja tensión interfacial del sistema, que permite que incluso campos de intensidad moderada generen deformaciones apreciables en las gotas (A. R. Zakinyan & Zakinyan, 2020).

Figura 2.

Emulsión magnética de aceite en agua (O/W)



3. Estado del arte

El estudio de fluidos magnéticos ha evolucionado considerablemente desde sus primeras aplicaciones en la ingeniería aeroespacial en 1963, cuando Stephen Papell dispersó partículas ferromagnéticas en un líquido portador (Arrighi, 2018), creando lo que más tarde se conocería como "ferrofluido". Este hallazgo marcó un precedente clave para el desarrollo de los ferrofluidos y la investigación de cómo los campos magnéticos afectan su flujo y propiedades físicas.

Rosensweig et al., (1969) y McTague, (1969) fueron los primeros en reportar el aumento en la viscosidad de un ferrofluido cuando se aplica un CM estático uniforme en dirección perpendicular al flujo. Sin embargo, mientras Rosensweig se centró en ferrofluidos comerciales para usos mecánicos y térmicos, McTague, (1969) utilizó una suspensión diluida (0.05% v/v) de partículas de cobalto, cuya concentración se ajustan más estrechamente a la definición clásica de un ferrofluido. Una primera explicación teórica a este fenómeno fue dada por Hall & Busenberg, (1969), fundamentada en el efecto de la magnetización de las NPs como medio de interacción con el flujo. Sin embargo, pasaron por alto el impacto de la energía térmica (movimiento browniano) sobre las NPs (Odenbach, 2003), lo que condujo a una subestimación significativa del CM necesario para inducir el máximo incremento de viscosidad. En particular, su predicción arrojó un valor de intensidad de campo dos órdenes de magnitud inferior al reportado experimentalmente por McTague, quien observó un valor en torno a $|H| \sim 10^3 \text{ Oe}$.

En 1972, Shliomis, (1972) logró una explicación satisfactoria de los resultados obtenidos por McTague, al proponer un modelo teórico conocido como "viscosidad rotacional" aplicable exclusivamente a ferrofluidos diluidos donde la interacciones entre NPs es despreciable. Según este enfoque, cuando estos fluidos se someten a un CM perpendicular al flujo, las NPs tienden a

alinearse en la dirección del campo, lo cual impide su libre rotación en el fluido portador, y da como resultado un incremento de viscosidad aparente.

En el caso de ferrofluidos concentrados, Odenbach, (2003) y colaboradores estudiaron el efecto magnetoviscoso usando tanto viscosímetros capilares como reómetros con dispositivos generadores de campo especialmente diseñados para estos estudios. Los resultados mostraron que el incremento en la viscosidad puede alcanzar varios órdenes de magnitud en comparación con ferrofluidos diluidos, y que dicha variación presenta una fuerte dependencia respecto a la tasa de deformación. Este incremento fue atribuido a la formación de agregados y cadenas de NPs, alineadas con la dirección del campo aplicado, los cuales generan una mayor resistencia al flujo (L. M. Pop & Odenbach, 2008). No obstante, pese a los avances significativos en la caracterización experimental del efecto magnetoviscoso en ferrofluidos concentrados, aún no se dispone de un modelo fenomenológico general que describa cuantitativamente la evolución de la viscosidad en función de la intensidad del CM, debido a la complejidad y naturaleza dinámica de las estructuras formadas.

Posteriormente, en 1994, Shliomis & Morozov, (1994) desarrollaron un modelo teórico donde analizaron el comportamiento de un ferrofluido bajo un CM oscilante, demostrando que la viscosidad es positiva a bajas frecuencias del campo y negativa a altas frecuencias. Esto ocurre debido a que el campo induce rotaciones en las partículas sin una dirección en específico, y ante un flujo con cizallamiento, las partículas giran en un sentido que favorece el movimiento del fluido, reduciendo su resistencia interna. A este fenómeno lo denominaron “viscosidad negativa”. Poco después, el grupo de Bacri et al., (1995) verificó experimentalmente esta teoría, empleando una suspensión acuosa de partículas de ferrita de cobalto (CoFe_2O_4) estabilizadas electrostáticamente, en un viscosímetro capilar ubicado dentro de un solenoide, el cual permitía aplicar un CM con una

intensidad de hasta 80 kA/m y variaciones de frecuencia entre 0 y 1 kHz (Odenbach, 2003). Cabe resaltar que, el comportamiento de flujo del ferrofluido no solo depende de la dinámica de las NPs, sino también de las fuerzas inducidas por el CM sobre el fluido. La interacción entre el CM no uniforme aplicado y la magnetización del fluido da lugar a las denominadas fuerzas de Kelvin, las cuales influyen en el control del flujo del fluido y están dadas por la siguiente ecuación:

$$F_K = \mu_0 \int \mathbf{M} \nabla \mathbf{H} dV \quad (2)$$

Donde \mathbf{M} denota la magnetización del fluido, $\nabla \mathbf{H}$ el gradiente del CM, μ_0 la permeabilidad en el vacío ($\mu_0 = 1.2566 \times 10^{-6}$ Vs/Am) y la integración se realiza sobre el volumen de la muestra V . Esta fuerza actúa de manera similar a la fuerza gravitacional sobre el fluido y es dirigida en la dirección del gradiente del CM (Kamiyama et al., 1983; Odenbach, 2003).

Por otra parte, estudios realizados con emulsiones magnéticas han demostrado que la dinámica de flujo de estos fluidos está fuertemente influenciada por la aplicación de un CM. Por ejemplo, Bashtovoi & Yarmolchik, (1994), expusieron emulsiones compuestas por aceite de transformador magnético y queroseno a un CM creciente (0 - 80 mT), observando un aumento relativo de la viscosidad hasta de 15 veces, incluso con un tamaño de gota limitante (≈ 1 mm) para la estabilidad del sistema. A partir de estos resultados, concluyeron que estos sistemas son prometedores como medios controlados magnéticamente. Además, estudiaron el flujo de la emulsión en una tubería con 0.1 m de longitud situada entre bobinas de Helmholtz, demostrando que, al aplicar el CM estático uniforme, las gotas de fluido magnético se alargan y se alinean en estructuras en cadena orientadas al plano de corte como consecuencia de las fuerzas de interacción dipolo-dipolo, fenómeno que ha sido igualmente reportado por otros autores (Fogolino et al., 2018; Ivanov et al., 2013; A. Zakinyan & Dikansky, 2011; A. R. Zakinyan & Zakinyan, 2020).

Tras abordar en detalle las propiedades físicas, comportamientos reológicos y respuestas de los ferrofluidos y emulsiones magnéticas frente a campos magnéticos, es pertinente mencionar las investigaciones que constituyen los antecedentes directos para el desarrollo del presente trabajo. En primer lugar, se ha demostrado que la adición de ferrofluido a una muestra de crudo pesado genera un efecto magnetoviscoso similar al de un ferrofluido convencional (Contreras–Mateus, 2018). Asimismo, experimentos realizados en un sistema de flujo con ferrofluido en presencia de campos magnéticos crecientes en la dirección axial, mostraron una aceleración significativa, donde la mayor aceleración se obtuvo al aplicar CM generado por corriente alterna (AC) (Saavedra-Niño & Gelvis-Rodríguez, 2023). Finalmente, se ha reportado que es posible potenciar el efecto magnetoviscoso de una emulsión O/W al incorporar ferrofluido como fase dispersa, en presencia de un CM perpendicular, en comparación con el ferrofluido puro a la misma concentración, evidenciando además una alta estabilidad coloidal que se mantiene a largo plazo (V. , Gómez-Sanabria & Lucas-Lancheros, 2022).

4. Metodología

4.1. Materiales

4.1.1. *Preparación de la emulsión O/W*

Para la fase continua de la emulsión se empleó agua desionizada tipo I y como surfactante, monohidrato de cloruro de hexadecilpiridinio (CPC), de naturaleza catiónica. Para el ferrofluido, que corresponde a la fase dispersa, se empleó como medio portador keroseno y NPs de óxido de hierro (EMG 1300M) con un diámetro nominal del orden de 10 nm con recubrimiento polimérico (Contreras–Mateus et al., 2021). Los materiales fueron adquiridos del fabricante Sigma-Aldrich, a

excepción de las NPs que provienen de Ferrotec Corporation. Las propiedades de los materiales se encuentran en el **Apéndice A**.

4.1.2. Mezclas crudo/ferrofluido

La mezcla crudo/ferrofluido se preparó utilizando crudo pesado cuyas características se muestran en la **Tabla 1**.

Tabla 1.

Fracciones de saturados (S), aromáticos (A), resinas (R), asfaltenos (A) y gravedad API del crudo

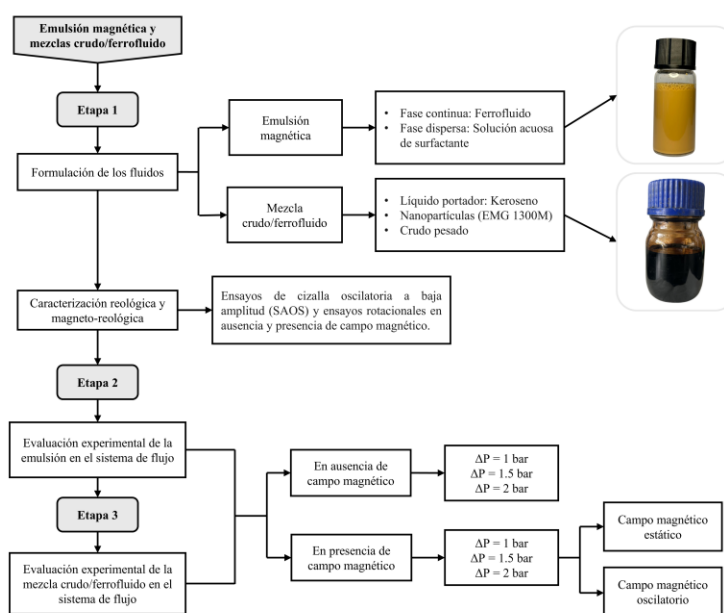
Muestra	Fracciones, %p/p				Gravedad API
	S	A	R	A	
Crudo	24,50	24,60	25,21	25,00	11,46

4.2. Descripción de la metodología

La metodología del presente trabajo de investigación se describe en la **Figura 3**.

Figura 3.

Diagrama metodológico



4.2.1. Formulación de la emulsión O/W

Inicialmente, se preparó la solución surfactante/agua a una concentración de 3.5% p/v mediante agitación magnética por 1 hora. Para el ferrofluido se empleó una concentración de NPs de 5000 ppm las cuales se integraron al keroseno y se homogenizaron empleando un baño ultrasónico (CPX 5800 Branson) por 2 horas. La selección de esta concentración se basó en referencias de estudios previos que reportan condiciones óptimas de estabilidad y respuesta magnetoviscosa de emulsiones magnéticas (V. Gómez-Sanabria et al., 2024). Para incorporar ambas fases, se usó la técnica rotor-estator por medio de un Ultra-Turrax IKA T-25, con un *Útil de dispersión S25N-25G*, cuyo espacio entre rotor y estator es de 0,5 mm, por un tiempo de agitación de 5 minutos a una velocidad de cizallamiento que se aumentó progresivamente hasta alcanzar 22.0000 rpm.

Es importante mencionar que se verificó la estabilidad de la emulsión durante las pruebas en el sistema de flujo, como se detalla en el **Apéndice B**. Para ello, se realizaron mediciones de viscosidad antes, durante y después de cada prueba, y se analizó la evolución de la distribución del tamaño de gota a lo largo del tiempo. A pesar de que se observó una disminución en el tamaño de las gotas, la emulsión conservó una distribución monomodal con dimensiones similares entre sí, lo que evidenció una notable estabilidad.

4.2.1.1. Formulación de las mezclas crudo/ferrofluido

Inicialmente, se prepararon tres mezclas de 100 ml cada una, en proporciones de 50/50, 60/40 y 70/30 % p/p, sin NPs, con el fin de identificar aquellas cuya viscosidad fuera igual o inferior a la de la emulsión magnética (30.85 mPa·s), valor considerado como límite operativo del sistema de flujo. Dado que la mezcla 50/50 superaba este valor, fue descartada, y se formuló una proporción intermedia de 55/45 % p/p.

Para la preparación de las mezclas con NPs, se adicionó el ferrofluido al crudo manteniendo la concentración de NPs en el ferrofluido en 5000 ppm para garantizar una comparación entre los fluidos. Con el fin de asegurar una dispersión homogénea de las NPs en la mezcla, se siguió el protocolo propuesto por Contreras–Mateus et al., (2021), el cual consiste en someter la suspensión a sonicación en un baño ultrasónico CPX 5800 Branson durante 6 horas, seguido de agitación orbital a 400 rpm por 15 horas y una segunda etapa de sonicación durante 6 horas adicionales.

La notación que se adopta en este documento para las mezclas en ausencia y presencia de NPs es: $M_{K-X/Y}$ para las mezclas sin NPs (crudo/keroseno) y $M_{F-X/Y}$ para las mezclas crudo/ferrofluido, donde K corresponde al keroseno, F representa el ferrofluido, $\frac{X}{Y}$ la relación %p/p entre el componente líquido (keroseno o ferrofluido) y el crudo presente en la mezcla.

4.2.2. Caracterización reológica

La caracterización reológica de la emulsión y de las mezclas se llevó a cabo en un reómetro MCR 302 Anton Paar. Para las pruebas reológicas de la emulsión se usó una geometría de conoplato ($\varnothing = 50$ mm) con una separación de 101 μm , mientras que para las mezclas, se optó por una geometría de platos paralelos con una separación de 500 μm . Se realizaron curvas de flujo (η vs $\dot{\gamma}$) donde se aplicó un cizallamiento previo (pre-shear) de 10 s^{-1} durante 3 minutos, seguido de un tiempo de reposo de 10 minutos para permitir la recuperación del sistema y posteriormente, un barrido logarítmico de $\dot{\gamma}$ de $100 - 0.01 \text{ s}^{-1}$. Por otro lado, con el propósito de determinar la región de comportamiento viscoelástico lineal (LVE), se realizó un barrido de amplitud a una frecuencia angular constante de 10 rad/s, evaluando los módulos dinámicos (G' y G'') en función de la deformación ($\dot{\gamma}$). Primero, se aplicó un pre-shear de 15 s^{-1} durante 3 minutos, seguido de un reposo

de 10 minutos. El rango de deformación aplicado fue de 0.01 – 100 %. Todas las pruebas se ejecutaron a temperatura ambiente.

4.2.3. Caracterización magnetoreológica

La caracterización magnetoreológica de los fluidos se llevó a cabo utilizando un magnetoréómetro MCR 302 Anton Paar acoplado con una celda magnetoreológica MRD 170/1T de platos paralelos de 20 mm de diámetro. Las pruebas se realizaron a una temperatura constante de 15 °C, controlada mediante un sensor PT-100 integrado al baño termostático (Julabo F32). Previo a cada ensayo, se estableció un tiempo de acondicionamiento térmico de 10 minutos, seguido de un pre-shear de 10 s^{-1} durante 3 minutos. Se realizaron dos pruebas principales: (i) evaluación del efecto magnetoviscoso bajo un CM estático uniforme, aplicando una deformación constante de 10 s^{-1} en tres intervalos secuenciales (sin campo, con pulso magnético de 328.13 mT por 5 minutos, y recuperación sin campo); y (ii) análisis del efecto magnetoviscoso a diferentes tasas de cizallamiento (1, 10 y 25 s^{-1}), con rampas de densidad de flujo magnético entre 0 y 796.73 mT.

En particular, la muestra $M_{F-70/30}$ presentó un incremento significativo en la viscosidad durante el tiempo de exposición al campo (véase **Apéndice C**), en comparación con las demás formulaciones. Dado que fue la única muestra que evidenció un aumento considerable, se decidió incrementar la concentración de NPs de 5000 a 7500 ppm, obteniéndose la muestra $M_{F-70/30 \text{ 7500 ppm}}$ con el objetivo de intensificar el efecto magnetoviscoso, considerando que la mezcla se evaluará posteriormente en un sistema de flujo con intensidades de CM más bajas.

4.2.4. Evaluación de la emulsión y la mezcla crudo ferrofluido en el sistema de flujo

Se realizaron inicialmente ensayos con la emulsión, utilizada como crudo modelo, con el fin de identificar las condiciones en las que el CM generaba una mayor aceleración o

desaceleración del flujo y emplearlas posteriormente para evaluar la mezcla en el sistema de flujo. La proporción crudo/ferrofluido que presentó el mayor efecto magnetoviscoso en las pruebas reológicas y magnetoreológicas fue seleccionada para su evaluación en el sistema de flujo. El objetivo fue analizar las diferencias en el comportamiento de ambos fluidos y establecer las condiciones bajo las cuales es posible inducir modificaciones en el flujo mediante la aplicación del CM. En el **Apéndice D**, se describe de manera detallada el sistema de flujo que se usó para el desarrollo de esta parte experimental.

4.2.4.1. Pruebas en ausencia de CM

Se realizaron ensayos en ausencia de CM para determinar el flujo volumétrico bajo diferentes presiones de entrada al sistema de flujo (2, 1.5 y 1 bar), con el fin de establecer una línea base que permitiera evaluar posteriormente el efecto del CM sobre el comportamiento de los fluidos. Además, se garantizó la reproducibilidad del sistema mediante una segunda prueba en las mismas condiciones (réplica). Durante las pruebas, se registraron los valores de presión a lo largo del tiempo y el caudal volumétrico se determinó midiendo el tiempo necesario para recuperar volúmenes de 5 ml hasta vaciar el sistema de flujo.

4.2.4.2. Pruebas en presencia de CM

Con el propósito de evaluar la posibilidad de inducir modificaciones en el flujo volumétrico de los fluidos por la acción de un CM, se empleó un CM estático linealmente creciente a diferentes intensidades de corriente directa (DC) y un CM oscilatorio linealmente creciente en la dirección de flujo generado por una señal sinusoidal de corriente alterna (AC) con distintas configuraciones de frecuencia e intensidad. Al igual que en los ensayos anteriores, se registraron los valores de presión y se siguió el mismo protocolo para la medición del caudal volumétrico. Los valores de

frecuencia e intensidad del CM se establecieron con base en resultados previamente reportados en pruebas realizadas con ferrofluido (Saavedra-Niño & Gelvis-Rodríguez, 2023).

5. Resultados y discusión

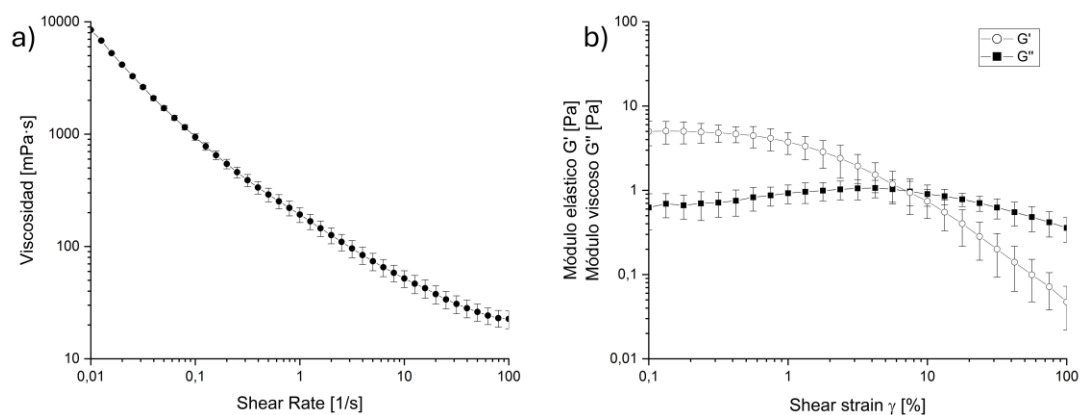
5.1. Caracterización reológica

5.1.1. Caracterización reológica de la emulsión

En la **Figura 4a** se observa una disminución progresiva de la viscosidad de la emulsión a medida que incrementa la tasa de cizallamiento ($\dot{\gamma}$), lo que indica un comportamiento reofluidizante. Este comportamiento concuerda con lo reportado en la literatura para sistemas emulsificados por Langevin, (2022) y Laurencio Alfonso & Delgado Drubey, (2008) y se atribuye a la deformación de las gotas inicialmente esféricas que conforman la emulsión, las cuales adoptan geometrías elipsoidales bajo cizalla, reduciendo su área de contacto en la dirección del flujo y, en consecuencia, la resistencia viscosa del sistema (Barnes, 1994; Foglino et al., 2018).

Figura 4.

Caracterización reológica de la emulsión. **(a)** Curva de flujo. Viscosidad en función de la velocidad de cizalla, **(b)** Barrido de amplitud



Con el objetivo de caracterizar el comportamiento viscoelástico del sistema, se realizaron barridos de amplitud en los que se evaluaron las respuestas del módulo de almacenamiento (G') y del módulo de pérdida (G''). De acuerdo con la **Figura 4b**, la emulsión se comporta como un sólido viscoelástico, evidenciado por un módulo elástico mayor que el módulo viscoso ($G' > G''$), con una diferencia cercana a un orden de magnitud (Jager-Lézer et al., 1998; Tadros, 2013). No obstante, el sistema exhibe un punto de fusión identificado por la intersección entre los módulos elástico (G') y viscoso (G''), a partir del cual predomina el comportamiento viscoso, como resultado del rompimiento de la microestructura interna de la emulsión.

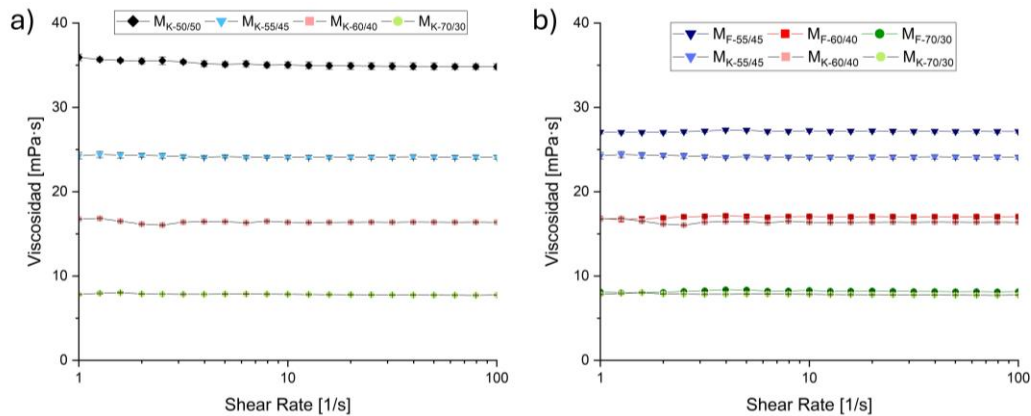
5.1.2. Caracterización reológica de las mezclas crudo/ferrofluido

En la **Figura 5a**, se observa que la viscosidad de las mezclas se mantiene constante a medida que la velocidad de cizallamiento aumenta, lo cual indica un comportamiento newtoniano de todos los casos. Este comportamiento contrasta con el observado en la emulsión y puede atribuirse a la naturaleza homogénea de las mezclas crudo/ferrofluido, las cuales carecen de estructuras internas deformables que puedan alterar la resistencia al flujo. Adicionalmente, y como se espera, se observa una disminución progresiva en la viscosidad de las muestras a medida que aumenta el contenido de keroseno en la mezcla. Esto se debe a la diferencia de viscosidades entre ambos fluidos, ya que el keroseno, al ser considerablemente menos viscoso que el crudo, actúa como agente diluyente. Este comportamiento también fue reportado por Contreras–Mateus et al., (2021), quienes observaron que la inclusión de KBF (ferrofluido a base de queroseno), redujo la viscosidad entre un 98-99% para dos muestras de crudo pesado, donde, además, atribuyeron el comportamiento newtoniano de los modelos diluidos a la presencia de los KBF.

Posteriormente, al comparar ambos sistemas (ver **Figura 5b**), se observó que la incorporación de NPs al líquido portador generó un ligero incremento en la viscosidad en todos los casos. Este comportamiento puede atribuirse a que, al agregar las NPs, el sistema se comporta como una nanosuspensión, en la cual la viscosidad tiende a aumentar con la concentración de partículas debido a interacciones con los componentes del crudo (Patel et al., 2018).

Figura 5.

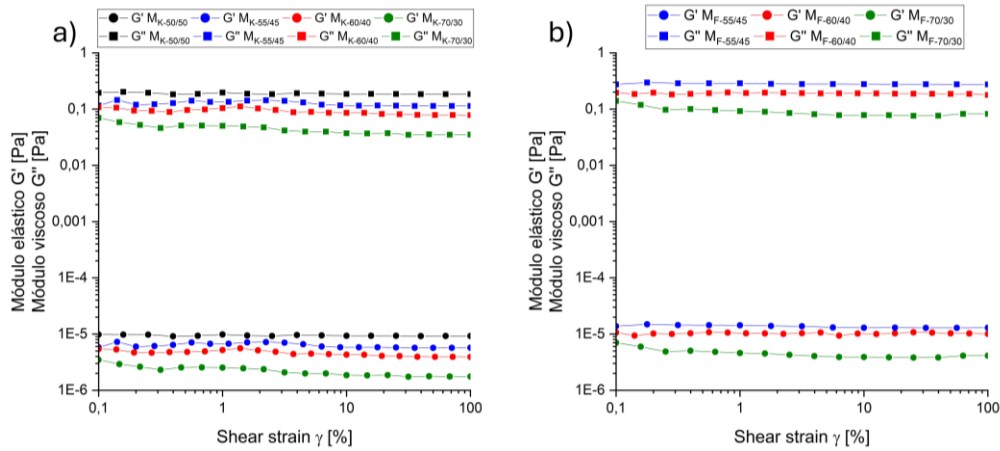
Curvas de flujo. Viscosidad en función de la velocidad de cizalla. (a) Mezclas en ausencia de NPs, (b) Comparación entre mezclas en ausencia de NPs y crudo/ferrofluido



En la **Figura 6a**, se presentan los resultados del barrido de amplitud para las mezclas, en las que, a diferencia de la emulsión, predomina un comportamiento marcadamente viscoso ($G'' > G'$). Posteriormente, en la **Figura 6b**, se observa que la relación entre los módulos viscoelásticos se mantiene inalterada, con $G'' \gg G'$, lo que indica que la adición de NPs no modifica el comportamiento predominantemente viscoso del sistema. No obstante, se evidencia un aumento moderado en los valores absolutos de ambos módulos, atribuible a la incorporación de las NPs, aunque este aumento no resulta suficiente para alterar su orden de magnitud ni para inducir un cambio en la naturaleza viscoelástica del sistema.

Figura 6.

Barrido de amplitud de las mezclas. (a) En ausencia de NPs, (b) Crudo/ferrofluido



5.2. Caracterización magnetoreológica

5.2.1. Caracterización magnetoreológica de la emulsión

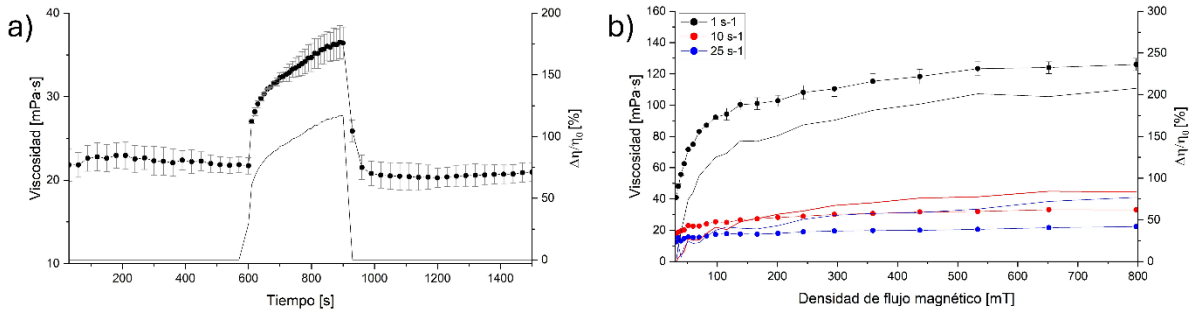
La **Figura 7** muestra la evaluación del efecto magnetoviscoso de la emulsión en presencia de un CM estático bajo distintas condiciones experimentales. En primer lugar, en la **Figura 7a**, se presenta la respuesta magnetoviscosa de la emulsión en una prueba de tres intervalos: los intervalos I y III en ausencia de campo, y el intervalo II en presencia de una densidad de flujo magnético de 328.13 mT, durante 5 minutos. En ausencia de CM (intervalo I), la viscosidad permanece estable y constante. No obstante, al inducir el CM (Intervalo II), se genera un aumento inmediato y progresivo en la viscosidad de la emulsión, que llega a ser del 117% respecto a su valor inicial $\left(\frac{\Delta\eta}{\eta_0}\right)$. Finalmente, al retirarse el CM en el tercer intervalo, la emulsión requiere aproximadamente los 600 segundos restantes para retornar a su estado inicial, lo que indica que no se produjeron cambios irreversibles en las gotas de la emulsión, y que la acción del campo no afectó de forma permanente las propiedades reológicas del fluido.

En este contexto, el incremento evidenciado en la viscosidad por la acción del CM, puede atribuirse a las interacciones dipolo-dipolo entre gotas que, dependiendo de la intensidad del CM, diámetro de gota y fracción volumétrica de estas, tienden a formar estructuras complejas como son: agregados de dos o tres gotas, cadenas cortas, cadenas largas y hasta estructuras columnares conformadas principalmente por cadenas de gotas, pequeños agregados de gotas y gotas individuales a intensidades del CM en el rango de 15 a 60 Gauss. La formación de estas estructuras fue documentada por Ivey et al., (2001) en emulsiones magnéticas de KBF (Fe_3O_4 , 14 nm) en agua, con fracciones volumétricas de partículas (ϕ) entre 0.3 y 10%v/v, y diámetro de gota de aproximadamente 0.3 μm con la emulsión en reposo (inmóvil).

Por otra parte, se evaluó el efecto magnetoviscoso como función de la intensidad del CM a diferentes valores de $\dot{\gamma}$ (1, 10, 25 s^{-1}). En la **Figura 7b**, se observa que la viscosidad está influenciada por la intensidad del CM y la velocidad de deformación ($\dot{\gamma}$) aplicada. En relación con la intensidad del campo, se observa un incremento progresivo de la viscosidad conforme aumenta la magnitud del campo aplicado, con un aumento relativo máximo de 207% posiblemente generado por la formación de cadenas y/o columnas de gotas (Chernobai & Yarmol'chik, 2025; A. R. Zakinyan & Zakinyan, 2020). Por otro lado, al analizar el efecto de $\dot{\gamma}$, se observa que el incremento en la viscosidad inducido por el CM es más pronunciado a bajas tasas de cizallamiento que a altas. Este comportamiento se explica por el predominio de las fuerzas hidrodinámicas a mayores valores de $\dot{\gamma}$, las cuales superan las interacciones entre gotas, dificultando su alineación en la dirección del campo y promoviendo la ruptura de cadenas o agregados. Como resultado, la viscosidad disminuye a medida que la tasa de cizallamiento aumenta (Qiao et al., 2012).

Figura 7.

Caracterización magnetoreológica de la emulsión. **(a)** Curva de flujo transitorio. (I) En ausencia de campo, (II) En presencia de un pulso magnético a 328.13 mT, (III) En ausencia de campo, **(b)** Efecto magnetoviscoso para tasas de cizallamiento de 1, 10 y 25 s⁻¹

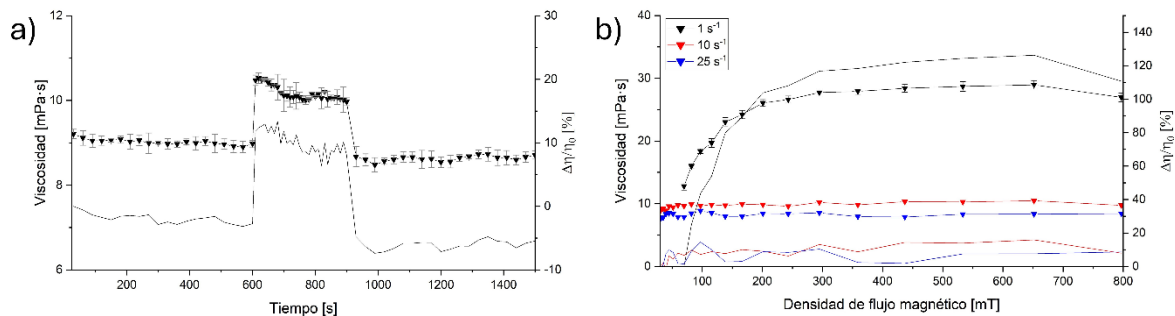


5.2.2. Caracterización magnetoreológica de la mezcla crudo/ferrofluido

De acuerdo con la **Figura 8a**, se observa un incremento del 13% en la viscosidad respecto a su valor inicial, atribuido a la posible formación de cadenas generadas por la reorganización de las NPs de mayor tamaño presentes en el fluido (Masoud Hosseini et al., 2010).

Figura 8.

Caracterización magnetoreológica de la mezcla M_{F-70/30} 7500 ppm. **(a)** Curva de flujo transitorio. (I) En ausencia de campo, (II) En presencia de un pulso magnético a 328.13 mT, (III) En ausencia de campo, **(b)** Efecto magnetoviscoso para tasas de cizallamiento de 1, 10 y 25 s⁻¹



Por otro lado, en la **Figura 8b**, se evidenció un aumento máximo del 126% en la viscosidad a la menor tasa aplicada, comportamiento magnetoviscoso dependiente de la tasa de cizalla

evidenciado también con la emulsión. Este efecto se explica por la formación de estructuras lineales inducidas por el CM, producto de las atracciones dipolares entre partículas, las cuales son progresivamente destruidas al aumentar la tasa de corte (Contreras–Mateus, 2018).

5.3. Evaluación de la emulsión y la mezcla crudo/ferrofluido en el sistema de flujo

Se llevaron a cabo ensayos en un sistema de flujo diseñado para evaluar el efecto de un CM, tanto estático (asociado a las fuerzas de Kelvin) como alternante de intensidad linealmente creciente en la dirección del flujo. Cabe resaltar que estas configuraciones experimentales de CM no pueden ser evaluadas en el reómetro disponible. El procedimiento consistió en realizar pruebas a diferentes presiones de entrada, tanto en presencia como en ausencia de CM, con el objetivo de analizar las variaciones en el flujo volumétrico, a partir de las cuales es posible inferir cambios en la viscosidad efectiva del fluido evaluado. Cabe resaltar que durante las pruebas realizadas con la mezcla, fue necesario reemplazar el resorte que sostiene el pistón debido a una deformación permanente que afectaba la estabilidad del sistema de flujo. Tras su sustitución, el sistema no respondió adecuadamente a presiones bajas (1.5 y 1 bar), por lo que fue necesario evaluar este fluido a presiones de 2 y 2.5 bar.

5.3.1. Pruebas en ausencia de CM ($B=0$)

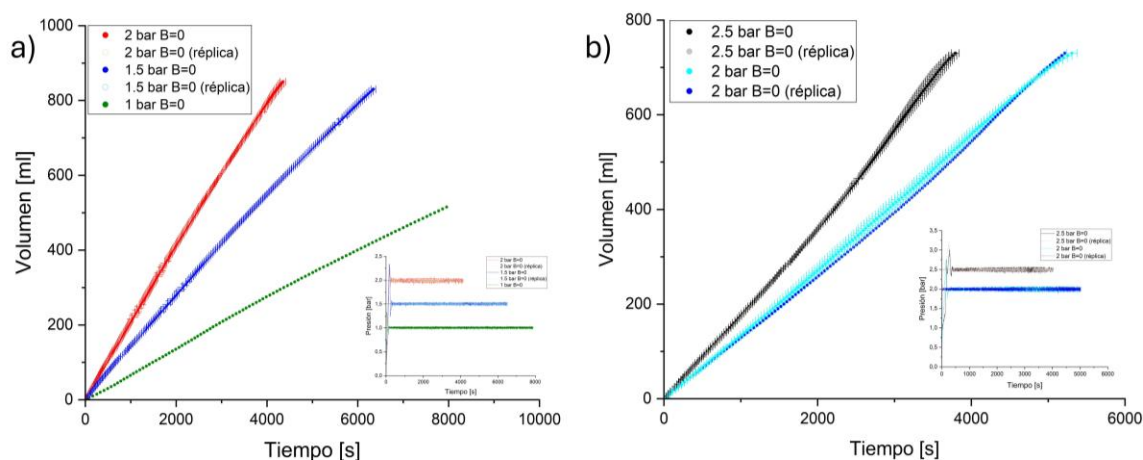
Como etapa inicial, se realizaron pruebas en ausencia de CM, aplicando distintas presiones de entrada con el propósito de establecer una línea base del comportamiento de la emulsión y de la mezcla crudo/ferrofluido sin influencia magnética.

La **Figura 9** muestra una relación lineal entre el volumen de fluido acumulado y el tiempo para la emulsión y la mezcla. Conforme a lo estimado, se observó que una mayor presión genera un mayor caudal del fluido, reflejado en pendientes más pronunciadas como es predicho por la

ecuación de Hagen Poiseuille, la cual establece que el caudal volumétrico es directamente proporcional a la diferencia de presión aplicada, dado que esta proporciona un mayor impulso al desplazamiento del fluido (Zhang & Hoshino, 2014). Por otra parte, se evidencia que, a todas las presiones de entrada evaluadas, el sistema atraviesa una fase inicial de estabilización caracterizada por fluctuaciones de presión que se extiende por aproximadamente 300 segundos hasta alcanzar un régimen estacionario. La alta concordancia entre las curvas de las réplicas y las pruebas originales confirman la reproducibilidad de los resultados obtenidos en el sistema de flujo. Cabe resaltar que los volúmenes se registraron una vez era alcanzada la presión de entrada deseada, garantizando condiciones controladas y repetibles.

Figura 9.

Pruebas en el sistema de flujo en ausencia de CM ($B=0$) para: **(a)** la emulsión a 2, 1.5 y 1 bar; **(b)** la mezcla crudo ferrofluido a 2.5 y 2 bar. Se evaluó el volumen y la presión en función del tiempo.



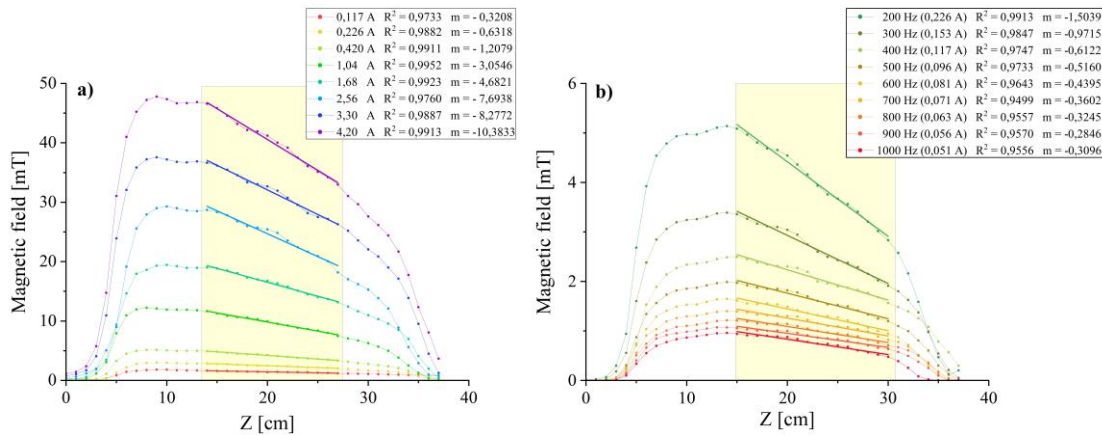
5.3.2. Pruebas con CM estático no uniforme

En la **Figura 10** se muestra la distribución de la densidad del flujo magnético a lo largo del embobinado al aplicar una corriente directa (DC) (**Figura 10a**) y una corriente alterna (AC) (ver **Figura 10b**), que permite identificar las zonas de mayor influencia magnética. Los resultados demuestran que, para ambas configuraciones de campo, se identifica una zona de comportamiento

lineal creciente en la dirección axial dentro del intervalo comprendido entre 15 y 30 cm, demostrando la presencia de un CM creciente no uniforme.

Figura 10.

Distribución de la densidad de flux magnético proporcionado por 6 bobinas en la tubería con aire. (a) Corriente directa (DC), (b) Corriente alternante (AC).



Para evaluar el comportamiento del flujo de la emulsión en presencia de un CM estático se aplicaron las tres intensidades de corriente más altas caracterizadas en el sistema (ver **Figura 10a**). Estas pruebas se realizaron a una presión intermedia de 1.5 bar con el objetivo de registrar un cambio significativo en el flujo volumétrico inducido por la acción del CM, además de un ajuste lineal a los datos experimentales con el fin de determinar la pendiente de cada curva, la cual representa el caudal volumétrico (dV/dt) en cada caso.

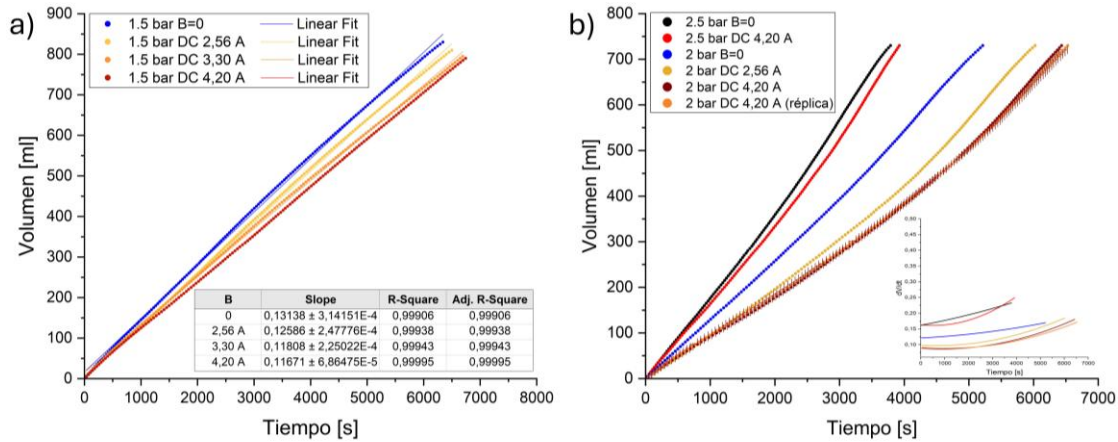
De acuerdo con la **Figura 11**, se puede observar que, a medida que aumenta la intensidad del CM, el flujo experimenta una desaceleración progresiva en comparación con la prueba en ausencia de campo ($B=0$) para ambos fluidos. Este comportamiento contrasta con lo teóricamente esperado, ya que un CM creciente en la dirección del flujo debería inducir fuerzas de Kelvin que actúen como un impulso adicional, favoreciendo así un aumento del flujo volumétrico. Sin embargo, este efecto también ha sido observado por Kamiyama et al., (1983), quien evaluó el

comportamiento del flujo de fluidos a base de agua y keroseno (WBF y KBF) con nanopartículas de magnetita con una fracción másica de 20% en peso de NPs en un sistema de flujo similar al usado en este trabajo, pero con intensidades del CM en el rango de 0.05 y 0.6 T. Además, evaluaron el factor de fricción (f) y encontraron que, para el WBF bajo el CM no uniforme, el valor de f incrementaba en comparación del valor esperado para un fluido Newtoniano en régimen laminar; sin embargo la desviación de f respecto al calculado sin campo disminuía en régimen turbulento. Ellos también observaron que para el KBF tanto en flujo laminar como turbulento, había una menor desviación del valor de f en comparación al WBF. Aunque el presente estudio se evaluó mediante variables distintas, reflejan una misma tendencia, donde el CM modifica las propiedades de flujo del sistema, desacelerando su flujo.

Asimismo, estos resultados concuerdan con los de Yang et al., (2022), quienes simularon el flujo de Couette-Poiseuille en un micro canal para ferrofluidos bajo CM no uniformes que generaban fuerzas de Kelvin en favor y en contra del flujo. Ellos encontraron, que existe un valor crítico de la intensidad del CM a partir del cual la fuerza de cuerpo incrementa el flujo, destacando que esto sucede tanto para fuerzas de Kelvin dirigidas en la misma dirección y contraria a la dirección del flujo. Valores inferiores de la intensidad del campo, por el contrario, generan una disminución del flujo. Sus simulaciones predicen que, para las condiciones más favorable, se podría lograr hasta un máximo valor de 24% en el incremento del flujo. Sin embargo, se debe verificar si las suposiciones que realizaron en su simulación, que incluyen el gradiente de CM, son alcanzables experimentalmente. De acuerdo con este trabajo, podría pensarse que no se pudo ver el incremento del flujo por las bajas intensidades del CM que se pueden alcanzar en el sistema de flujo utilizado.

Figura 11.

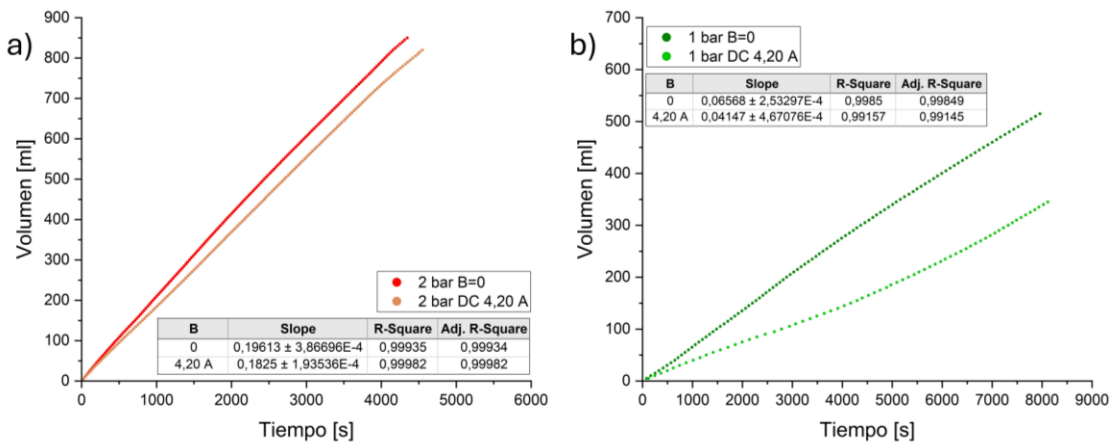
Pruebas en el sistema de flujo en presencia de CM estático no uniforme para: (a) la emulsión a 1.5 bar, (b) la mezcla crudo ferrofluido a 2.5 y 2 bar. Se evaluó el volumen en función del tiempo y se muestra el flujo volumétrico para la mezcla en función del tiempo.



De igual forma, la aplicación del CM para la emulsión a las demás presiones evaluadas ocasionó una reducción del flujo volumétrico del 7 % a 2 bar y del 37 % a 1 bar, en comparación con las pruebas sin campo (Figura 12). Esta diferencia podría relacionarse con la velocidad de deformación, ya que una menor presión implica un flujo más lento y, por tanto, una mayor exposición al CM, lo que intensifica su efecto sobre el comportamiento del fluido.

Figura 12.

Efecto del CM estático (DC) sobre el flujo de la emulsión. (a) Volumen en función del tiempo a una presión de 2 bar, (b) Volumen en función del tiempo a una presión de 1 bar



5.3.3. Pruebas con CM oscilatorio no uniforme

Finalmente, se evaluó el efecto de un CM oscilatorio generado por una corriente alterna (AC). Debido al desgaste inherente del cilindro-pistón, fue necesario restablecer el sistema de referencia sin CM para estas pruebas, con el fin de asegurar la validez y comparabilidad de los resultados con ambos fluidos.

En la **Figura 13** y **Figura 14** se evidencia que, tanto para la emulsión como para la mezcla de crudo con ferrofluido, la mayor aceleración del flujo se presenta a una frecuencia de 200 Hz e intensidad de corriente de 0.226 A. En el caso de la emulsión, se registró un aumento del 4 % en el flujo volumétrico a 2 bar y del 9 % a 1,5 bar, en comparación con la condición sin CM. Un comportamiento análogo se observó en la mezcla, donde únicamente las frecuencias de 200 y 300 Hz produjeron un incremento del flujo, siendo más pronunciado a 200 Hz, atribuible a la mayor intensidad del CM aplicado.

Figura 13.

Efecto del CM oscilatorio no uniforme (AC) sobre el flujo de la emulsión. Se evaluó el volumen en función del tiempo a una presión de: (a) 2 bar; (b) 1.5 bar

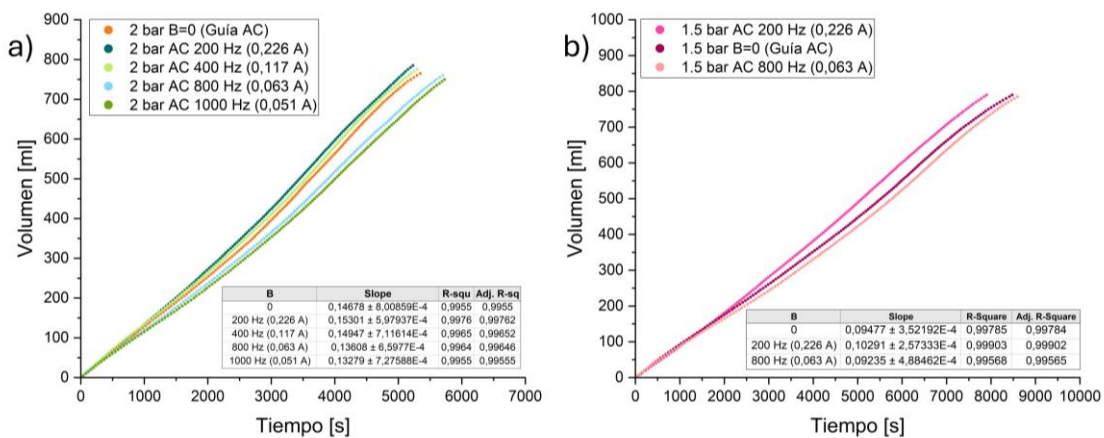
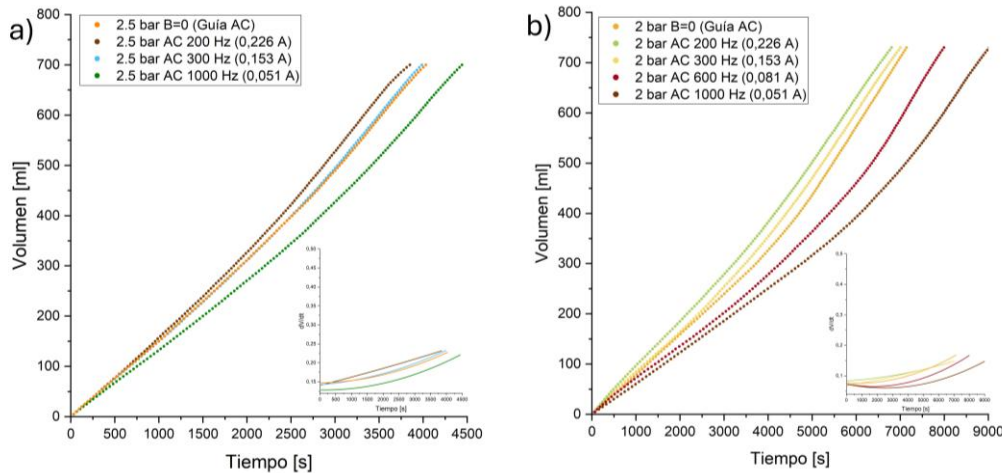


Figura 14.

Efecto del CM oscilatorio no uniforme (AC) sobre el flujo de la mezcla crudo ferrofluido. Se evaluó el volumen en función del tiempo y flujo volumétrico a una presión de: (a) 2.5 bar, (b) 2 bar



No obstante, con el fin de facilitar la comparación con las pruebas en ausencia de campo y campo alterno de la mezcla, se analizó el volumen recuperado tras 2500 segundos bajo la configuración de 200 Hz y 0.226 A, que representa el límite superior del sistema a las dos presiones evaluadas. Como se muestra en la **Tabla 2**, esta condición produjo un aumento del volumen del 5% a 2.5 bar y del 18% a 2 bar, en relación con las pruebas sin CM, demostrando la influencia de la presión en la interacción del fluido con el CM, siendo más pronunciada la aceleración del flujo a menores presiones cuando se emplean frecuencias bajas y altas intensidades de corriente.

Tabla 2.

Volumen recuperado de la mezcla crudo ferrofluido a un tiempo de 2500 segundos para las pruebas realizadas a una frecuencia de 200 Hz e intensidad de 0.226 A en comparación con las pruebas en ausencia de campo, bajo diferentes presiones de entrada

Prueba	2.5 bar B=0 (Guía AC)	2.5 bar AC 200 Hz (0.226 A)	2 bar B=0 (Guía AC)	2 bar AC 200 Hz (0.226 A)
Volumen recuperado [ml]	400	420	195	230

Los resultados obtenidos podrían atribuirse al fenómeno de viscosidad negativa, descrito en los trabajos teóricos de Shliomis & Morozov, (1994), donde las NPs, bajo campos magnéticos alternantes, se reorientan de forma que favorecen el flujo y reducen la resistencia interna del fluido. Asimismo, Bacri et al., (1995), observaron disminuciones en la viscosidad (asociadas al fenómeno de viscosidad negativa) pero únicamente a frecuencias relativamente altas. Aunque este efecto se ha observado principalmente en ferrofluidos diluidos y campos magnéticos uniformes, en el presente trabajo podría estar asociado a la capacidad del campo alterno, pese a su no homogeneidad, de inducir reordenamientos estructurales que modulan la respuesta reológica de los fluidos evaluados.

No obstante, resultados similares han sido observados a frecuencias más bajas. En el trabajo realizado por Saavedra-Niño & Gelvis-Rodríguez, (2023), utilizando el mismo sistema de flujo del presente trabajo con un ferrofluido a una concentración de 0.87 %v/v, obtuvieron la mayor aceleración del flujo al aplicar una corriente alterna (AC) con frecuencia de 400 Hz e intensidad de 0.117 A y presión de 1 bar. Este comportamiento fue atribuido no solo a la acción de la fuerza de cuerpo magnético, sino también al efecto “negativo” de la viscosidad.

6. Conclusiones

Se realizó la caracterización reológica de los fluidos, donde la emulsión presentó un comportamiento no-newtoniano y de tipo reofluidizante al esfuerzo de cizalla, mientras que las mezclas crudo ferrofluido mostraron un comportamiento newtoniano y un aumento en la viscosidad con la adición de NPs en el líquido portador.

A partir de la caracterización magnetoreológica, se seleccionó la formulación 70/30 % p/p de crudo/ferrofluido con 5000 ppm de NPs, debido al incremento significativo en la viscosidad

observado bajo la aplicación de CM, lo que la hizo adecuada para su uso en el sistema de flujo. No obstante, la concentración de NPs fue posteriormente ajustada a 7500 ppm con el fin de intensificar la respuesta magnetoviscosa, optimizando así el desempeño del sistema frente a condiciones de menor intensidad de campo.

Se observó el efecto de aplicación de un CM estático y oscilatorio no uniforme sobre ambos fluidos, donde un CM estático provocó un aumento en la viscosidad, lo que se tradujo en una desaceleración del flujo volumétrico, evidenciando el efecto magnetoviscoso en estos sistemas. En el caso del CM estático no uniforme, no se observó el efecto de la fuerza de cuerpo magnética (fuerza de Kelvin) esperado, posiblemente por un requerimiento de mayor intensidad y gradiente de campo magnético. En contraste, bajo la acción de un campo oscilatorio, se observó una aceleración del flujo, únicamente bajo condiciones específicas, correspondientes a la frecuencia más baja e intensidad más alta evaluadas. Esto indica que, mientras los campos estáticos tienden a estabilizar las estructuras internas del fluido, incrementando su resistencia al movimiento, los campos alternos inducen la reorientación dinámica de las partículas que, bajo ciertas condiciones, favorecen la movilidad del fluido.

De acuerdo con los resultados experimentales obtenidos al evaluar el comportamiento del flujo en la emulsión magnética y la mezcla crudo ferrofluido, se observó que ambos fluidos experimentan un incremento en la viscosidad y, en consecuencia, una desaceleración del flujo al ser sometidos a un CM estático, independientemente de la intensidad aplicada. No obstante, bajo la acción de un CM oscilatorio no uniforme, se evidenció una mayor aceleración del flujo en ambas formulaciones, siendo más pronunciada bajo la configuración de 200 Hz y 0.226 amperios. Estos hallazgos permiten establecer que, para el transporte de crudos pesados, resulta más conveniente la aplicación de un CM oscilatorio, siendo aplicables tanto a las emulsiones magnéticas como la

inclusión del ferrofluido al crudo. No obstante, se debe realizar una investigación más profunda en relación a la logística que implicaría el uso de NPs magnéticas y campos magnéticos alternantes como posible tecnología que pudiera competir económicamente con tecnologías como la dilución. Esto implicaría el desarrollo de equipos generadores de campos magnéticos alternantes especialmente diseñados para esta potencial aplicación y de alternativas para la generación de material magnético dentro del crudo que pueda ser usado en remplazo de las NPs magnéticas comerciales usadas en el presente trabajo. No obstante, los resultados obtenidos en este trabajo también pueden ser extendidos a otras aplicaciones.

Referencias Bibliográficas

- Arrighi, R. S. (2018). *Novel Rocket Fuel Spawned Ferrofluid Industry*.
<https://www.nasa.gov/history/novel-rocket-fuel-spawned-ferrofluid-industry/>
- Bacri, J.-C., Perzynski, R., Shliomis, M., & Burde, G. (1995). “Negative-Viscosity” Effect in a Magnetic Fluid. *Physical Review Letters*, 75, 2128–2131.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.75.2128>
- Barnes, H. A. (1994). Rheology of emulsions — a review. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 91, 89–95.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0927-7757\(93\)02719-U](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0927-7757(93)02719-U)
- Bashtovoi, V. G., & Yarmolchik, Y. P. (1994). Magnetofluid emulsion: New magnetocontrolled media. *IEEE Transactions on Magnetics*, 30(2), 1090–1094.
<https://doi.org/10.1109/20.312504>
- Chernobai, V. A., & Yarmol’chik, Yu. P. (2025). The effective viscosity of magnetofluid emulsions. *Magnetohydrodynamics*, 28(2).
- Contreras–Mateus, M. D. (2018). *Evaluación magneto-reológica de crudos pesados colombianos sin modificar y con contenido de nanopartículas magnéticas para aplicaciones de transporte por oleoductos*. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/39085>
- Contreras–Mateus, M. D., López–López, M. T., Ariza–León, E., & Chaves–Guerrero, A. (2021). Rheological implications of the inclusion of ferrofluids and the presence of uniform magnetic field on heavy and extra-heavy crude oils. *Fuel*, 285, 119184.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119184>

- Cunha, L. H. P., Siqueira, I. R., Cunha, F. R., & Oliveira, T. F. (2020). Effects of external magnetic fields on the rheology and magnetization of dilute emulsions of ferrofluid droplets in shear flows. *Physics of Fluids*, *32*(7), 073306. <https://doi.org/10.1063/5.0009983>
- Derkach, S. R. (2009). Rheology of emulsions. *Advances in Colloid and Interface Science*, *151*(1), 1–23. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cis.2009.07.001>
- Fogolino, M., Morozov, A. N., & Marenduzzo, D. (2018). Rheology and microrheology of deformable droplet suspensions. *Soft Matter*, *14*(46), 9361–9367. <https://doi.org/10.1039/C8SM01669K>
- Genc, S., & Derin, B. (2014). Synthesis and rheology of ferrofluids: a review. *Current Opinion in Chemical Engineering*, *3*, 118–124. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.coche.2013.12.006>
- Gómez-Sanabria, V. , & Lucas-Lancheros, L. G. (2022). *Formulación y caracterización de emulsiones magnéticas aceite-agua*. <https://noesis.uis.edu.co/items/bb03dd98-3229-42a6-b52f-ca34628dad4a>
- Gómez-Sanabria, V., Contreras-Mateus, M. D., Chaves-Guerrero, A., Mercado, R., & Nassar, N. N. ((2024) .نشأت ن. Rheology and magnetorheology of ferrofluid emulsions: Insights into formulation and stability. *Physics of Fluids*, *36*(12), 123107. <https://doi.org/10.1063/5.0241606>
- H P Cunha, L. (2018a). *Magnetic emulsions in shear flow under external magnetic fields*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26312.98564>

- H P Cunha, L. (2018b). *Magnetic emulsions in shear flow under external magnetic fields*.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26312.98564>
- Hall, W. F., & Busenberg, S. N. (1969). Viscosity of Magnetic Suspensions. *The Journal of Chemical Physics*, 51(1), 137–144. <https://doi.org/10.1063/1.1671698>
- Ilg, P., & Kröger, M. (2020). Dynamics of interacting magnetic nanoparticles: effective behavior from competition between Brownian and Néel relaxation. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 22(39), 22244–22259. <https://doi.org/10.1039/D0CP04377J>
- Ivanov, A., Kuznetsova, O., & Subbotin, I. (2013). Magnetic properties of ferrofluid emulsions: the effect of droplet elongation. *Magnetohydrodynamics*, 49, 287–292. <https://doi.org/10.22364/mhd.49.3-4.7>
- Ivey, M., Liu, J., Zhu, Y., & Cutillas, S. (2001). Magnetic-field-induced structural transition in a ferrofluid emulsion. *Physical Review. E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 63, 011403. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.63.011403>
- Jager-Lézer, N., Tranchant, J.-F., Alard, V., Vu, C., Tchoreloff, P. C., & Grossiord, J.-L. (1998). Rheological analysis of highly concentrated w/o emulsions. *Rheologica Acta*, 37(2), 129–138. <https://doi.org/10.1007/s003970050099>
- Kamiyama, S., Koike, K., & Oyama, T. (1983). Pipe flow resistance of magnetic fluids in a nonuniform transverse magnetic field. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 39(1), 23–26. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0304-8853\(83\)90389-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0304-8853(83)90389-X)

- Karpavičius, A., Coene, A., Bender, P., & Leliaert, J. (2021). Advanced analysis of magnetic nanoflower measurements to leverage their use in biomedicine. *Nanoscale Advances*, 3(6), 1633–1645. <https://doi.org/10.1039/D0NA00966K>
- Kole, M., & Khandekar, S. (2021). Engineering applications of ferrofluids: A review. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 537, 168222. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168222>
- Kötitz, R., Weitschies, W., Trahms, L., & Semmler, W. (1999). Investigation of Brownian and Néel relaxation in magnetic fluids. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 201(1), 102–104. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(99\)00065-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0304-8853(99)00065-7)
- Kúdelčík, J., & Kúdelčíková, M. (2018). Magnetic Fluids and their Applications. *Communications - Scientific Letters of the University of Zilina*, 20, 137–143. <https://doi.org/10.26552/com.C.2018.1A.137-143>
- Langevin, D. (2022). Motion of small bubbles and drops in viscoelastic fluids. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 57, 101529. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cocis.2021.101529>
- Laurencio Alfonso, H., & Delgado Drubey, Y. (2008). PROPIEDADES REOLÓGICAS DE EMULSIONES DE PETRÓLEO PESADO EN AGUA. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 16, 244–249.
- Masoud Hosseini, S., Fazlali, A., Ghasemi, E., Ahmadi Moghaddam, H., & Salehi, M. (2010). Rheological properties of a γ -Fe₂O₃ paraffin-based ferrofluid. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 322(23), 3792–3796. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2010.08.003>

- McTague, J. P. (1969). Magnetoviscosity of Magnetic Colloids. *The Journal of Chemical Physics*, 51(1), 133–136. <https://doi.org/10.1063/1.1671697>
- Odenbach, S. (2003). *Magnetoviscous Effects in Ferrofluids*. <http://www.springer.de/phys/books/lnpm>
- Odenbach, S., & Störk, H. (1998). Shear dependence of field-induced contributions to the viscosity of magnetic fluids at low shear rates. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 183(1), 188–194. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(97\)01051-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0304-8853(97)01051-2)
- Olabi, A. G., & Grunwald, A. (2007). Design and application of magneto-rheological fluid. *Materials & Design*, 28(10), 2658–2664. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.10.009>
- Patel, H., Shah, S., Ahmed, R., & Ucan, S. (2018). Effects of nanoparticles and temperature on heavy oil viscosity. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 167, 819–828. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.04.069>
- Philip, J. (2023). Magnetic nanofluids (Ferrofluids): Recent advances, applications, challenges, and future directions. *Advances in Colloid and Interface Science*, 311, 102810. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cis.2022.102810>
- Piacentini, E., Figoli, A., Giorno, L., & Drioli, E. (2010). 4.03 - Membrane Emulsification. In E. Drioli & L. Giorno (Eds.), *Comprehensive Membrane Science and Engineering* (pp. 47–78). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-093250-7.00024-4>
- 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, L., & Odenbach, S. (2006). Investigation of the microscopic reason for the magnetoviscous effect in ferrofluids studied by small angle neutron scattering. *J. Phys.: Condens. Matter*, *18*, 2785–2802. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/18/38/S17>
- Qiao, X., Zhou, J., Binks, B. P., Gong, X., & Sun, K. (2012). Magnetorheological behavior of Pickering emulsions stabilized by surface-modified Fe₃O₄ nanoparticles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *412*, 20–28. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2012.06.026>
- Rosensweig, R. E., Kaiser, R., & Miskolczy, G. (1969). Viscosity of magnetic fluid in a magnetic field. *Journal of Colloid and Interface Science*, *29*(4), 680–686. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(69\)90220-3](https://doi.org/10.1016/0021-9797(69)90220-3)
- Saavedra-Niño, D. S., & Gelvis-Rodríguez, R. A. (2023). *Evaluación experimental del flujo de un ferrofluido bajo un campo magnético creciente en la dirección axial*. <https://noesis.uis.edu.co/items/409e1a69-510c-401d-ab0d-889bba63901c>
- Shliomis, M. (1972). Effective Viscosity Of Magnetic Suspensions. *Sov. Phys. JETP*, *34*, 1291–1294.
- Shliomis, M., & Morozov, K. (1994). Negative viscosity of ferrofluid under alternating magnetic field. *Physics of Fluids - PHYS FLUIDS*, *6*, 2855–2861. <https://doi.org/10.1063/1.868108>
- Tadros, T. F. (2013). Emulsion Formation, Stability, and Rheology. In *Emulsion Formation and Stability* (pp. 1–75). <https://doi.org/10.1002/9783527647941.ch1>

- Yang, W., Fang, B., Liu, B., & Yang, Z. (2022). Promotion of ferrofluid microchannel flows by gradient magnetic fields. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 300, 104730. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2021.104730>
- Zakinyan, A., & Dikansky, Y. (2011). Drops deformation and magnetic permeability of a ferrofluid emulsion. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 380(1), 314–318. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2011.03.018>
- Zakinyan, A. R., & Zakinyan, A. A. (2020). Rotating field induced torque on ferrofluid emulsion with deformable dispersed phase microdrops. *Sensors and Actuators A: Physical*, 314, 112347. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112347>
- Zhang, J. X. J., & Hoshino, K. (2014). Microfluidics and Micro Total Analytical Systems. In *Molecular Sensors and Nanodevices* (pp. 103–168). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-1-4557-7631-3.00003-x>

Apéndices

Apéndice A. Propiedades de los materiales

Tabla A1.

Propiedades fisicoquímicas del monohidrato de cloruro de hexadecilpiridinio (CPC)

Propiedad	Descripción/Valor
Estado físico	Sólido
Punto de fusión	80°C – 84°C
Punto inicial de ebullición a 0,09 hPa	120°C – 124°C
Ph a 20°C	5 a 5,4
Solubilidad en agua a 20°C	111 g/L

Tomado de: <https://www.sigmaaldrich.com/CO/en/sds/sigma/c9002>

Tabla A2.

Propiedades fisicoquímicas del Keroseno

Propiedad	Descripción/Valor
Estado físico	Líquido
Punto de inflamación	82°C
Densidad	0,800 g/cm ³
Presión de vapor a 20°C	0,31 hPa
Tensión superficial a 20°C	32 mN/m

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

Tabla A3.*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

Tomado de: <https://ferrofluid.ferrotec.com/products/ferrofluid-emg/powder/emg-1300/>

Apéndice B. Evaluación de la estabilidad de la emulsión

Seguimiento del tamaño promedio de gota

Se empleó microscopía óptica (Leica DM500) con una ampliación de 100x para capturar imágenes semanales de la emulsión. Las imágenes obtenidas fueron analizadas mediante el software ImageJ, midiendo 400 gotas por imagen con el propósito de determinar el tamaño promedio de gota. Adicionalmente, se elaboraron histogramas semanales utilizando el software OriginLab, con el fin de evaluar la distribución del tamaño de gota a lo largo del tiempo.

La evolución visual se presenta en las microscopías ópticas de las **Figuras B1 a B7** junto con la distribución de tamaño de gota realizadas durante las 7 semanas que se evaluó la emulsión en el sistema de flujo, las cuales presentan una notable estabilidad a lo largo del tiempo, manteniendo una distribución monomodal a pesar de que la emulsión presentó una reducción en el diámetro promedio de gota de $4.1015 (\pm 0.0504) \mu\text{m}$ a $2.8325 (\pm 0.1187) \mu\text{m}$ al finalizar las pruebas en el sistema.

Figura B1.

Microscopía y distribución de tamaño promedio de gota. Semana 1

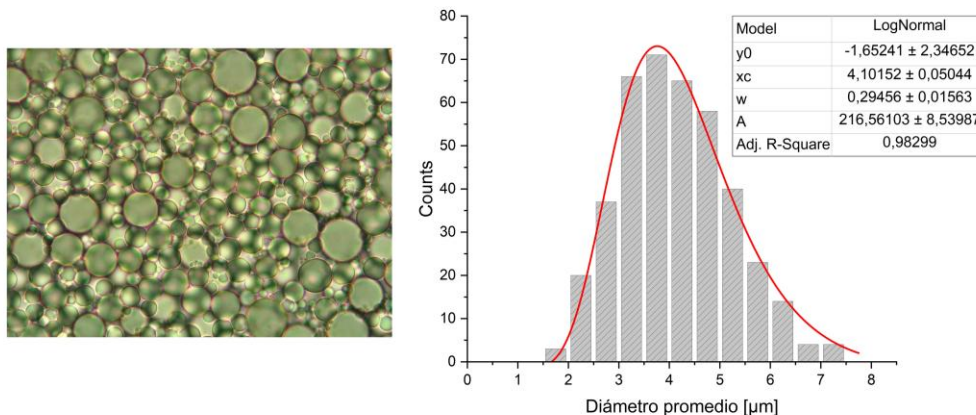


Figura B2.

Microscopía y distribución de tamaño promedio de gota. Semana 2

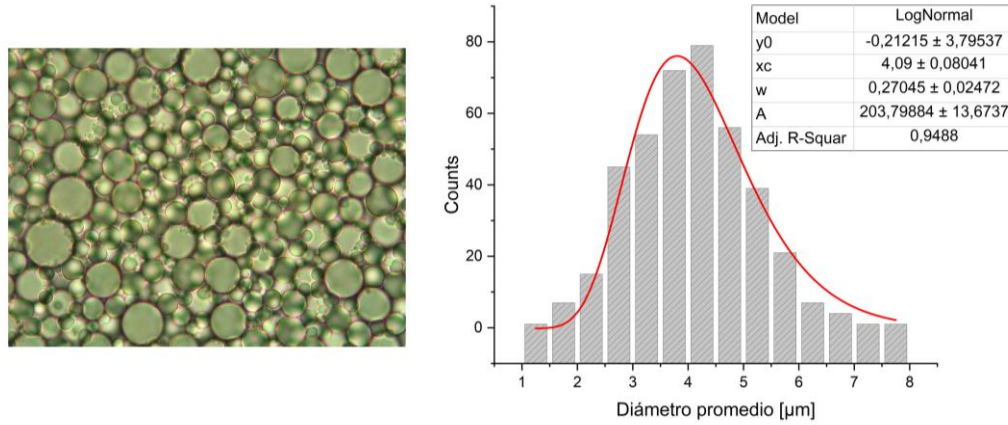


Figura B3.

Microscopía y distribución de tamaño promedio de gota. Semana 3

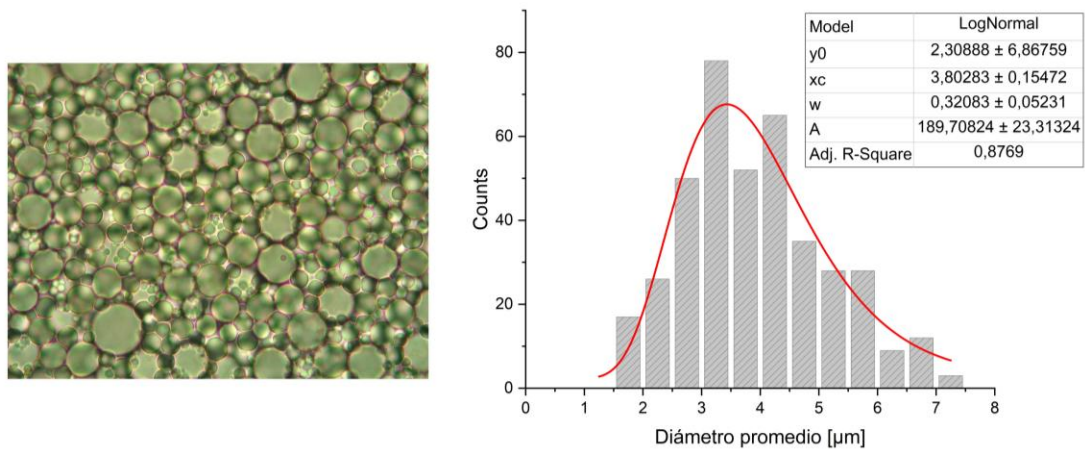


Figura B4.

Microscopía y distribución de tamaño promedio de gota. Semana 4

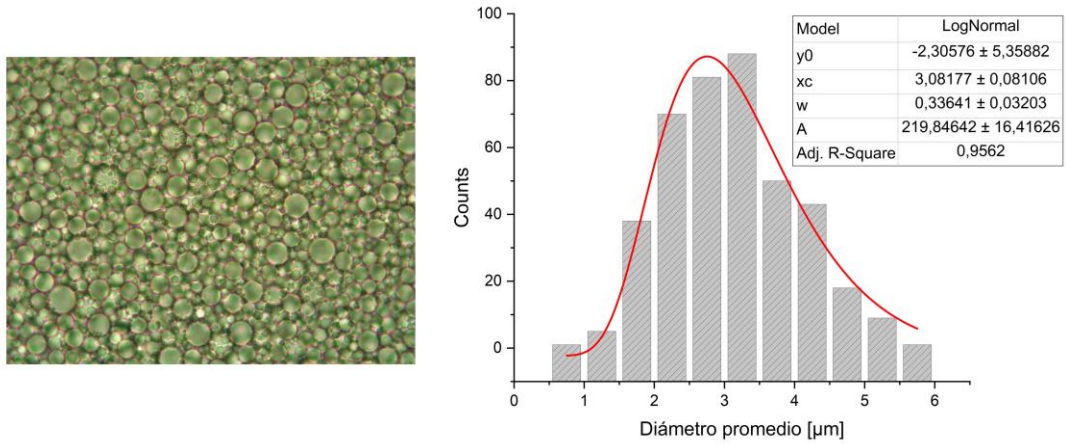


Figura B5.

Microscopía y distribución de tamaño promedio de gota. Semana 5

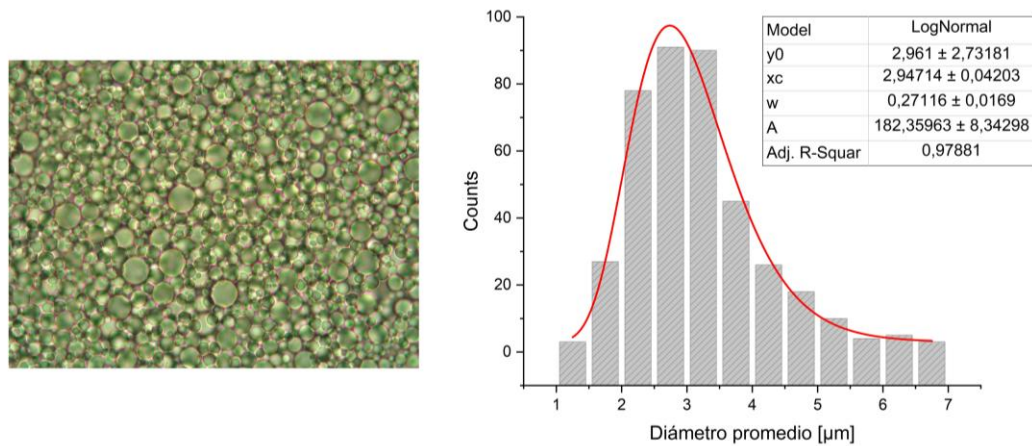


Figura B6.

Microscopía y distribución de tamaño promedio de gota. Semana 6

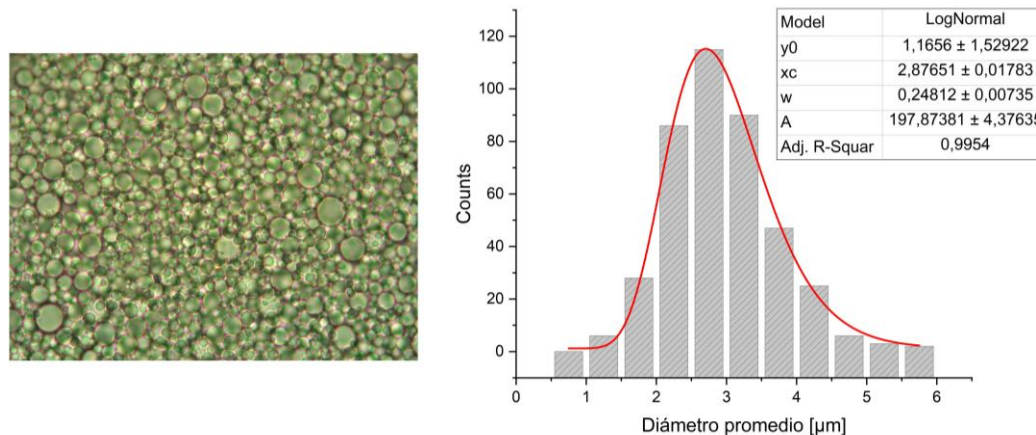
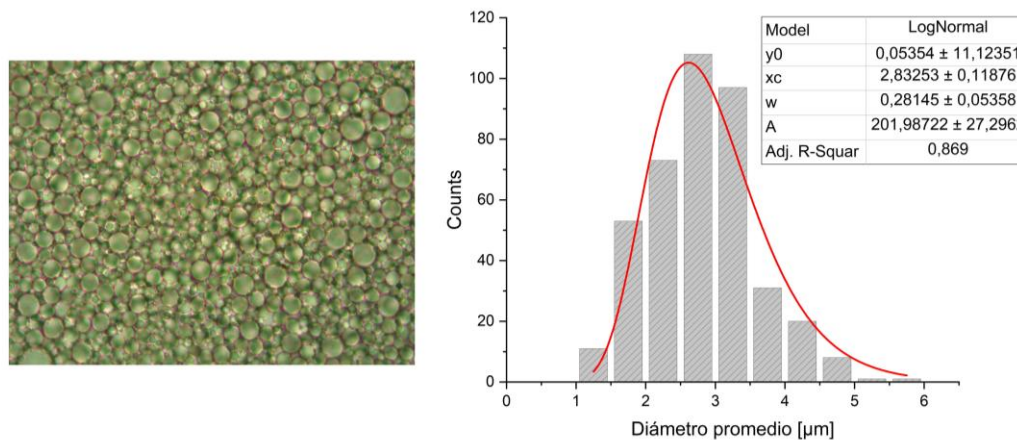


Figura B7.

Microscopía y distribución de tamaño promedio de gota. Semana 7



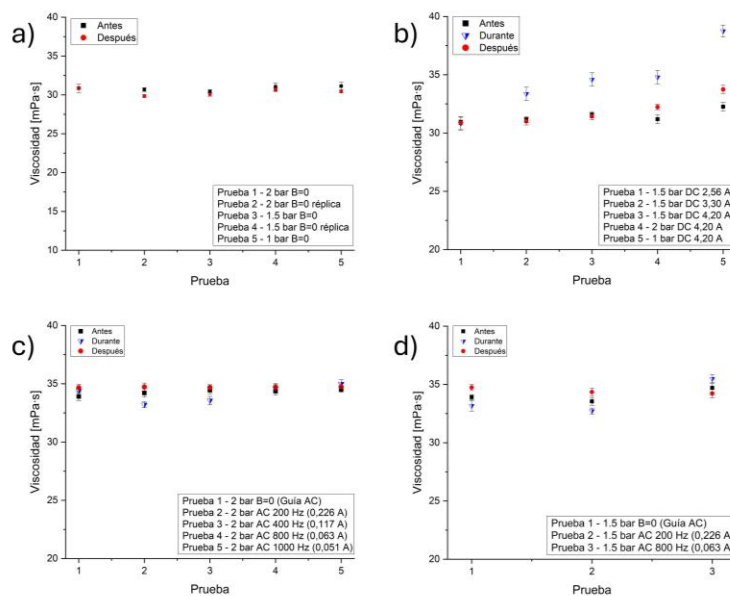
Medición de viscosidad entre pruebas

La viscosidad se midió utilizando un viscosímetro rotacional ViscoQC 100 Anton Paar. Para cada muestra, el tiempo de medición fue de 5 minutos con una velocidad de deformación de 12 rpm. Las mediciones se realizaron antes, durante y después de cada ensayo en el sistema de

flujo con la emulsión. En la **Figura B8** se observa que, en ausencia de CM, la viscosidad de la emulsión se mantiene constante a las diferentes presiones de entrada, indicando que no hubo alteraciones en el tamaño ni en la distribución de gotas de la emulsión. Sin embargo, bajo la aplicación de un CM estático, se registró un incremento transitorio de la viscosidad, más pronunciado a 1 bar debido a un mayor tiempo de exposición al campo. En este caso, el sistema no recuperó su valor inicial ($B=0$), sugiriendo una modificación estructural de la emulsión. Por otra parte, las pruebas con CM alterno mostraron que, a bajas frecuencias y altas intensidades, la viscosidad disminuye; mientras que, a frecuencias elevadas e intensidades menores, esta se incrementa independientemente de la presión aplicada. No obstante, estos efectos fueron reversibles, ya que al finalizar las pruebas la viscosidad retornó a valores similares a los medidos antes de cada prueba.

Figura B8

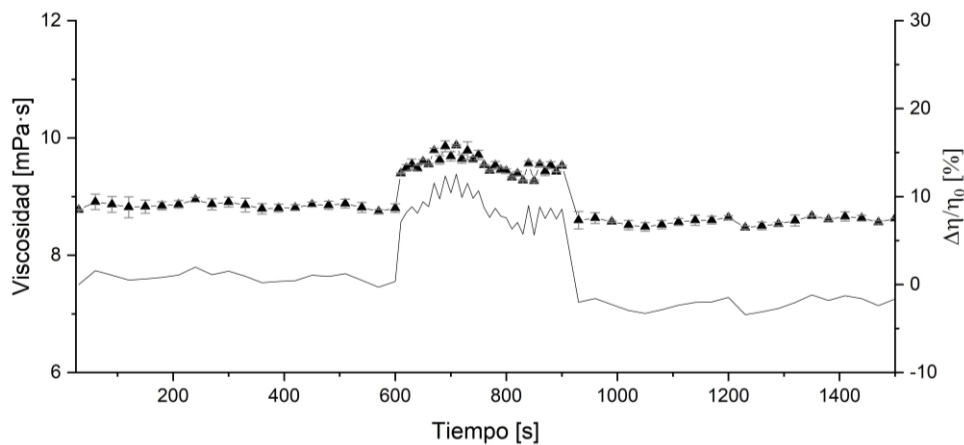
Viscosidad de la emulsión magnética en: (a) Ausencia de campo, (b) Presencia de un CM generado por una corriente directa (DC), (c) Presencia de un CM generado por una corriente alterna (AC) a una presión de 2 bar, (d) Presencia de un CM generado por una corriente alterna (AC) a una presión de 1.5 bar



Apéndice C. Caracterización magnetoreológica de la mezcla $M_{F-70/30}$

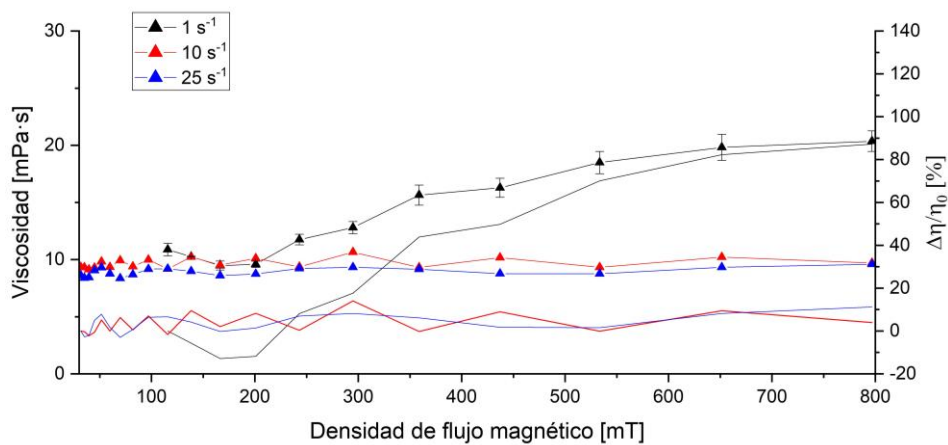
Apéndice C1.

Curva de flujo transitorio. (I) En ausencia de campo, (II) En presencia de un pulso magnético a 328.13 mT, (III) En ausencia de campo



Apéndice C2.

Efecto magnetoviscoso para tasas de cizallamiento de 10, 25 y 50 s-1.



Apéndice D. Sistema de flujo y protocolo de operación

Descripción del sistema

El sistema consta de una cámara tipo cilindro-pistón, donde el movimiento del ferrofluido, emulsión magnética o mezcla de crudo ferrofluido es impulsado por el desplazamiento del pistón, el cual está conectado a una bomba hidráulica Azura que usa etanol para desplazar el pistón. El control de la presión del sistema (relacionada a la velocidad de deformación) se realiza mediante un sistema PLC. La cámara está acoplada a una tubería de acero inoxidable (1/4"-SCH 10), la cual precede al dispositivo generador del CM, compuesto por seis bobinas con diámetros linealmente crecientes en la dirección axial (**Figura D1**). Para generar los campos magnéticos (**Figura D2**), se emplea un conjunto de equipos electrónicos que incluye un generador de señales, dos amplificadores, un osciloscopio y dos multímetros digitales, lo que permite operar bajo diversas configuraciones de CM.

Figura D1.

Sistema de flujo

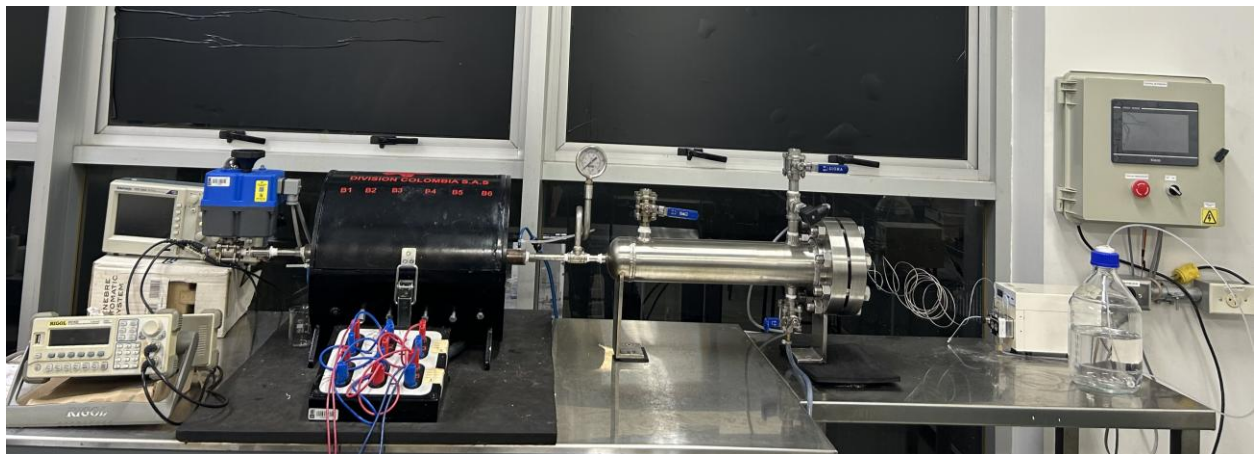


Figura D2

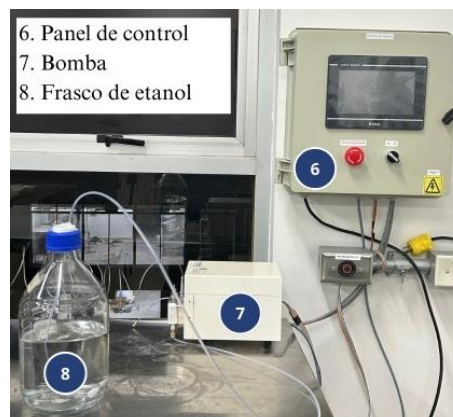
Equipos electrónicos

**Protocolo de operación*****Procedimiento inicial y venteo del sistema:***

Conecte tanto la bomba (7) como el controlador (6) a la corriente eléctrica. Una vez encendidos, aparecerá una alarma en el panel del controlador, la cual debe ser desactivada. Para ello, seleccione la opción “**Ver alarma**”, luego presione “**Reset alarma**” y regrese al panel principal.

Figura D2

Panel de control (6), Bomba (7), Frasco de etanol (8)



Posteriormente, realice el proceso de venteo del sistema durante aproximadamente 15 minutos para eliminar impurezas y residuos del líquido de la prueba anterior. Esta acción previene el taponamiento del capilar.

Para realizar el venteo, conecte las mangueras correspondientes a la válvula trasera (4) y a la válvula de conexión del capilar (5). Luego, coloque el acople en la cámara de carga del fluido de estudio (1) y conecte a este la manguera de aire. Abra la válvula automática (9) desde el panel de control y la válvula trasera manualmente, y a continuación, abra completamente la válvula de aire. Una vez transcurridos los 15 minutos, desconecte las mangueras y retire el acople de la cámara del fluido, junto con la manguera de aire.

Figura D3

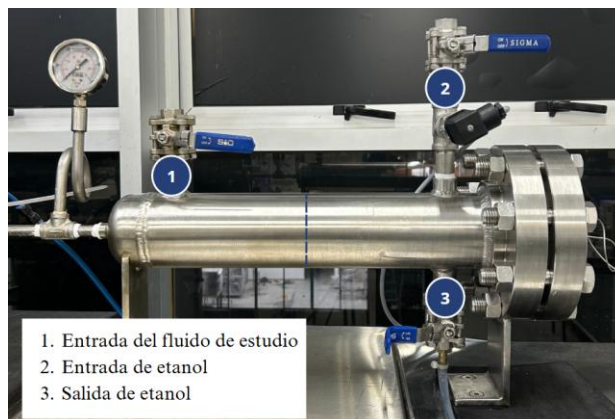
Válvula trasera (4), Válvula de conexión del capilar (5), Válvula automática (9)



Capilar:

Nota: Verifique que el capilar esté destapado y limpio antes de colocarlo en el sistema.

Enrolle teflón hacia el lado contrario de la rosca que se encaja al sistema y solo hasta la mitad de la rosca del capilar. Asegúrese de colocar el suficiente para evitar fugas.

Carga de fluidos:**Figura D4*****Cámara cilindro-pistón***

Llene el frasco de etanol conectado a la bomba (8) sobre el aforo. Luego, cargue el etanol en la cámara (2) hasta que rebose, cerrando y abriendo la válvula para eliminar burbujas y asegurar el llenado completo de la cámara. Una vez llena, cierre la válvula.

Ahora, ingrese el fluido de estudio por la cámara (1), cerrando y abriendo la válvula para eliminar burbujas y asegurar el llenado completo de la cámara. Una vez llena, cierre la válvula.

En el panel de control, seleccione la apertura automática de la válvula hasta que salga la primera gota de fluido por el capilar. Si al hacer la primera apertura de la bomba el fluido no sale, se cierra la válvula y se vuelve a llenar por la cámara (1), repitiendo el procedimiento hasta que se vea la primera gota. Después de verificar el nivel y que el fluido esté pasando por el capilar, cierre la válvula de la cámara (1).

Inicio de la prueba:

En el panel de control (6), ajuste la presión verificando que el valor de presión de apertura de válvula y el valor deseado de presión sean iguales. Una vez configurada la presión, abra la compuerta del panel y **conecte la memoria USB**.

Figura D5*Panel de control*

Active el modo automático de la bomba en el panel de control. Tome nota de la hora del controlador para verificar posteriormente que el inicio de los datos de presión coincida con el inicio de la prueba, ya que están desfasados con la hora mundial.

Inicie la toma de datos de flujo una vez el sistema haya alcanzado la presión deseada y esta se mantenga constante (durante este periodo de estabilización, se estima que se llene aproximadamente una probeta y media). Para registrar los tiempos con precisión, se recomienda utilizar el cronómetro en línea disponible en el siguiente enlace: <https://reloj-alarma.es/cronometro/#>.

Mida el volumen de flujo de salida cada 5 ml en probetas de 25 ml cambiándolas manualmente de forma rápida una vez lleguen al tope.

Cuando el pistón alcance su posición máxima en la cámara (1) y se observe un aumento de presión en el panel de control, el caudal de la bomba disminuirá hasta cero, lo que indica la finalización de la prueba. Una vez concluida la toma de datos, retire la memoria del panel de control.

Fin de la prueba:

Al finalizar la prueba, abra simultáneamente la válvula de salida de etanol (3) y la válvula de entrada (2) con el fin de despresurizar el sistema y facilitar la recuperación del etanol. A continuación, abra la válvula trasera (4) para drenar el fluido restante por acción de la gravedad. Asimismo, puede abrir la válvula de la cámara (1) e introducir una pipeta para extraer la mayor cantidad posible de fluido residual.

Retire el capilar para recuperar la muestra con un vaso de precipitado y coloque el acople con la manguera azul corta. Inmediatamente, realice la limpieza del capilar empleando tolueno y una jeringa, con el fin de evitar su obstrucción. Posteriormente, ventee el capilar utilizando la pistola de aire comprimido. Si lo considera necesario, repita la limpieza con una segunda pasada de tolueno y, nuevamente, realice el venteo del capilar.

Retroceso del pistón:

Conecte la manguera del suministro de aire a la válvula trasera (4) y, de manera simultánea, abra lentamente tanto la llave de aire como la válvula (4) hasta que se perciba el sonido de que el pistón se retrocedió. A partir de este punto, proceda con precaución para despresurizar el sistema. Para ello, cierre la llave de aire y conecte la manguera azul corta, junto con el acople, a la válvula de conexión del capilar (5). Coloque un vaso de precipitado al final de la manguera para recolectar el líquido descargado. Active el modo manual desde la parte posterior de la válvula (9) y ábrala

lentamente hasta un ángulo de 45° o hasta que la presión en el manómetro descienda a cero. Una vez despresurizado el sistema, restablezca el modo automático en la bomba. Use nuevamente la pipeta para recuperar la totalidad del fluido de estudio que quedó en la cámara (1).

Recomendación: Antes de iniciar la prueba, se recomienda tomar una fotografía del nivel inicial del fluido de estudio. Al finalizar, verifique nuevamente dicho nivel, teniendo en cuenta que, por lo general, se pierde un volumen aproximado de 100 ml por prueba debido a residuos que no pueden ser recuperados del sistema.

Limpieza del equipo:

Nota: Para limpiar el equipo, se utiliza isopropanol y tolueno. Se recomienda hacer 2 pasadas de isopropanol y luego 1 de tolueno, sin embargo, se pueden realizar 2 pasadas de tolueno si es necesario.

Cargue el isopropanol o el tolueno en la cámara (1) y abra la válvula en modo manual desde el panel de control para que salga el fluido. Cierre la válvula automática y recupere por la válvula trasera (4). Nuevamente, use la pipeta para recuperar el fluido que quedó en la cámara (1). Repita el procedimiento hasta que se observe la menor cantidad de fluido posible.

Finalmente, realice el venteo del sistema nuevamente por 15 minutos o hasta que no se vea rastro de líquido. Al terminar, cierre todas las válvulas y desconecte la bomba y el controlador de la corriente.