

Evaluación del efecto de campos magnéticos sobre el comportamiento de flujo de  
mezclas de crudo-ferrofluido y emulsiones magnéticas

Aura Michelle Perdomo Sánchez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Magister en Ingeniería Química

Director

Arlex Chaves Guerrero

Doctor en Ingeniería Química

Codirector

María Daniela Contreras Mateus

Doctora en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2026

### **Dedicatoria**

*A Dios, por ser la luz que guio cada paso de este camino, por darme la fortaleza en los momentos de duda y la claridad cuando el camino se oscurecía.*

*A mis padres, raíz y refugio de todo lo que soy. Este logro es el fruto de su amor incondicional, de cada sacrificio silencioso y de cada palabra de aliento que nunca llegó tarde. Gracias por enseñarme que los sueños se construyen con esfuerzo y fe.*

*A mi hermano, compañero de vida, cómplice y soporte. Tu presencia ha sido uno de los mejores regalos.*

*A mis compañeros de trabajo, que se convirtieron en mucho más que colegas: en grandes amigos. Gracias por compartir no solo las jornadas, sino también las risas, los desvelos y la alegría de crecer juntos.*

*Este trabajo lleva un poco de cada uno de ustedes.*

### **Agradecimientos**

*A mi alma máter, la Universidad Industrial de Santander, y a la Escuela de Ingeniería Química, por brindarme no solo conocimiento, sino la formación que moldea profesionales con visión.*

*Al profesor Arlex, mi director, quien con paciencia, sabiduría y genuino compromiso guió cada paso de este proceso. Su orientación fue brújula y respaldo en los momentos más exigentes de esta investigación. Gracias por creer en este trabajo y por exigirme siempre dar lo mejor.*

*Al grupo de investigación FIRST, por ser el espacio donde las ideas cobran vida, donde el trabajo se convierten en resultados. Ser parte de este grupo fue un privilegio y un aprendizaje constante.*

*Al proyecto de investigación titulado “Evaluación de tecnologías no convencionales basadas en el uso de nanopartículas magnéticas, óxido de grafeno y campos electromagnéticos sobre la ferrohodinámica de crudos pesados” con código 82220 de la Convocatoria 890 de 2020 de Minciencias.*

*Al profesor Ronald, por su disposición y su valiosa ayuda a lo largo de este camino.*

*A cada una de estas personas e instituciones, mi más profunda gratitud. Este logro también es suyo.*

**Tabla de contenido**

|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Introducción .....                                                                    | 14 |
| 1 Objetivos .....                                                                     | 17 |
| 1.1 Objetivo general .....                                                            | 17 |
| 1.2 Objetivos específicos .....                                                       | 17 |
| 2 Marco Teórico .....                                                                 | 18 |
| 3 Estado del Arte .....                                                               | 34 |
| 4 Metodología .....                                                                   | 46 |
| 4.1 Preparación de Fluidos Magnéticos .....                                           | 46 |
| 4.1.1 Preparación de Ferrofluidos .....                                               | 46 |
| 4.1.2 Preparación de Mezclas Crudo Ferrofluido .....                                  | 47 |
| 4.1.3 Preparación de Emulsiones Magnéticas .....                                      | 48 |
| 4.2 Evaluación de comportamiento Magnetoreológico .....                               | 50 |
| 4.3 Configuración de Dispositivo Generadores de Campos Magnéticos .....               | 51 |
| 4.3.1 Configuración de dispositivo generador de Campo Magnético Rotativo .....        | 51 |
| 4.3.2 Configuración de dispositivo generador de campo magnético de onda viajera ..... | 53 |
| 4.4 Procedimiento Experimental .....                                                  | 56 |
| 4.4.1 Medición de Torque .....                                                        | 56 |
| 4.4.2 Medición de Perfiles de Velocidad .....                                         | 57 |
| 5 Resultados .....                                                                    | 72 |
| 5.1 Evaluación emulsiones magnéticas a base ferrofluido .....                         | 72 |
| 5.1.1 Caracterización de la emulsión a base de ferrofluido .....                      | 72 |
| 5.1.2 Evaluación del torque inducido por CMR en emulsiones magnéticas .....           | 75 |
| 5.1.3 Perfiles de Velocidad en CMR para Emulsiones Magnéticas .....                   | 82 |

|       |                                                                                            |     |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.1.4 | Medición flujo de emulsiones magnéticas bajo campo magnético de onda viajera .....         | 90  |
| 5.2   | Evaluación mezclas crudo-ferrofluido .....                                                 | 99  |
| 5.2.1 | Caracterización Mezclas Crudo-Ferrofluido .....                                            | 99  |
| 5.2.2 | Medición de Torque Mezclas Crudo-Ferrofluido .....                                         | 101 |
| 5.2.3 | Medición de Perfiles de Velocidad Mezcla Crudo-Ferrofluido .....                           | 105 |
| 5.2.4 | Medición de flujo de mezclas crudo-ferrofluido bajo campo magnético de onda viajera<br>111 |     |
| 5.3   | Evaluación emulsión crudo-ferrofluido.....                                                 | 117 |
| 5.3.1 | Caracterización emulsión crudo-ferrofluido.....                                            | 117 |
| 5.3.2 | Medición de torque en emulsiones de mezcla crudo-ferrofluido .....                         | 119 |
| 5.3.3 | Medición de Perfiles de Velocidad Emulsión Mezcla Crudo-Ferrofluido bajo CMR .             | 120 |
|       | Conclusiones .....                                                                         | 125 |
|       | Referencias Bibliográficas .....                                                           | 127 |
|       | Apéndices.....                                                                             | 144 |

**Lista de Tablas**

|                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Velocidad del sonido en fluidos magnéticos en estudio ..... | 60 |
| Tabla 2. Caracterización fisicoquímica crudos estudiados. ....       | 99 |

### Lista de Figuras

|                                                                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Ilustración esquemática del proceso de magnetización. ....                                                                                                               | 23 |
| Figura 2. Conexión para generación de campos magnéticos rotativos. ....                                                                                                            | 51 |
| Figura 3. Caracterización Campo Magnético Rotativo. Amplitud alcanzada por unidad de corriente alimentada [mT] vs Intensidad aplicada [A] a diferentes valores de frecuencia. .... | 52 |
| Figura 4. Configuración experimental bobina electromagnética .....                                                                                                                 | 53 |
| Figura 5. Embobinado electromagnético. ....                                                                                                                                        | 54 |
| Figura 6. Amplitud campo magnético respecto a la distancia del embobinado electromagnético. ....                                                                                   | 55 |
| Figura 7. Montaje de medición de torque. ....                                                                                                                                      | 57 |
| Figura 8. Transductor emisor y receptor de un haz ultrasónico [94]. ....                                                                                                           | 58 |
| Figura 9. Equipo de agitación para flujo Couette. ....                                                                                                                             | 61 |
| Figura 10. Trayectoria del haz .....                                                                                                                                               | 62 |
| Figura 11. Resultados pruebas preliminares (teórica vs experimental) flujo cilindros concéntricos utilizando glicerina como fluido de estudio a 6 rpm.....                         | 64 |
| Figura 12. Montaje experimental evaluación de flujo en tubería. ....                                                                                                               | 64 |
| Figura 13. Resultado pruebas preliminares: flujo en tubería mezcla agua-glicerina (66% agua, 33% glicerina p/p) con una viscosidad de 20.37 mPa·s.....                             | 66 |
| Figura 14. Configuración cilíndrica con ranuras para ubicación del sensor de ultrasonido a un ángulo de 10°. ....                                                                  | 67 |
| Figura 15. Montaje para medición de perfiles de velocidad de fluidos magnéticos bajo la aplicación de campos magnéticos rotativos. ....                                            | 68 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 16. Condiciones de amplitud de campo magnético y frecuencias utilizadas en la evaluación de perfiles de velocidad bajo CMR.....                                                                                                                             | 69 |
| Figura 17. Montaje para medición de perfiles de velocidad en campo magnético de onda viajera. ....                                                                                                                                                                 | 70 |
| Figura 18. Condiciones de amplitud de campo magnético y frecuencias utilizadas en la evaluación de perfiles de velocidad bajo TMF .....                                                                                                                            | 71 |
| Figura 19. Curvas de flujo emulsiones a base de ferrofluido .....                                                                                                                                                                                                  | 72 |
| Figura 20. Microscopia emulsión magnética $E_{FF-Q15000}$ .....                                                                                                                                                                                                    | 73 |
| Figura 21. Curva de magnetización $M(H)$ de emulsión de ferrofluido.....                                                                                                                                                                                           | 74 |
| Figura 22. Medición del torque para $E_{FF-Q 15000}$ bajo CMR en sentido de las manecillas del reloj (torque negativo) y en sentido en contra de las manecillas del reloj (torque positivo) a diferentes valores de frecuencia y amplitud de campo magnético. .... | 77 |
| Figura 23. Medición del torque para la emulsión $E_{FF-Q 15000}$ .....                                                                                                                                                                                             | 78 |
| Figura 24. Representación esquemática de los tres escenarios experimentales para la medición del torque .....                                                                                                                                                      | 79 |
| Figura 25. Medición de torque dentro y fuera del cilindro para emulsión magnética a) $E_{FF-Q5000}$ y b) $E_{FF-Q10000}$ a diferentes valores de frecuencia y amplitud de campo magnético. ....                                                                    | 80 |
| Figura 26. Comparación medición de torque dentro del cilindro para ferrofluido y emulsión magnética de ferrofluido bajo diferentes valores de amplitud de campo magnético y una frecuencia de 500 Hz. ....                                                         | 82 |
| Figura 27. Perfiles de velocidad de $E_{FF-Q 5000}$ bajo CMR .....                                                                                                                                                                                                 | 83 |
| Figura 28. Ajuste de ley de potencia de la pendiente $m$ en función de a) $H$ y b) $\Omega_f$ .....                                                                                                                                                                | 85 |
| Figura 29. Perfiles de velocidad de a) $E_{FF-Q 10000}$ y b) $E_{FF-Q 15000}$ a diferentes valores de amplitud de campo magnético y una frecuencia de 200 Hz. ....                                                                                                 | 86 |

|                                                                                                                                                                                                                                                         |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 30. Perfiles de velocidad de emulsiones magnéticas bajo un campo magnético de 9,57 mT y una frecuencia de 300 Hz.....                                                                                                                            | 87  |
| Figura 31. Perfiles de velocidad de Ferrofluido y Emulsión Magnética a 100Hz y 9,57 mT .....                                                                                                                                                            | 89  |
| Figura 32. Perfiles de velocidad de a) $E_{FF-Q}$ 5000, b) $E_{FF-Q}$ 10000 y c) $E_{FF-Q}$ 15000 a una frecuencia de 400Hz y diferentes valores de amplitud de campo magnético. d) Caudal en función de la amplitud del campo magnético a 400 Hz. .... | 92  |
| Figura 33. Efecto de la frecuencia sobre el flujo inducido en $E_{FF-Q15000}$ : perfiles de velocidad (a) y flujo volumétrico (b) .....                                                                                                                 | 95  |
| Figura 34. Efecto de la concentración de nanopartículas sobre el flujo inducido en emulsiones $E_{FF-Q}$ a 400 Hz: perfiles de velocidad (a) y flujo volumétrico (b).....                                                                               | 96  |
| Figura 35. Variación de la presión ( $\Delta P$ ) respecto a la velocidad máxima alcanzada .....                                                                                                                                                        | 97  |
| Figura 36. Perfiles de velocidad para ferrofluido y emulsión con la misma concentracion de nanopartículas a una frecuencia de 400 Hz y un campo magnético de 4,25 mT.....                                                                               | 99  |
| Figura 37. Curvas de flujo crudos.....                                                                                                                                                                                                                  | 100 |
| Figura 38. Curvas de flujo mezclas crudo-ferrofluido.....                                                                                                                                                                                               | 101 |
| Figura 39. Medición de torque dentro y fuera del cilindro para a) $M_{C1-FFQ}$ 5000 b) $M_{C3-FFQ}$ 5000 y c) $M_{C5-FFQ}$ 5000 bajo diferentes valores de frecuencia y amplitud de campo magnético. ....                                               | 103 |
| Figura 40. Medición de torque de ferrofluido y mezclas crudo-ferrofluido a diferentes valores de amplitud de campo magnético y una frecuencia de 500 Hz. ....                                                                                           | 105 |
| Figura 41. Perfiles de velocidad de a) $M_{C1-FFQ5000}$ , b) $M_{C3-FFQ5000}$ y c) $M_{C5-FFQ5000}$ a diferentes valores de amplitud de campo magnético y una frecuencia de 200 Hz. ....                                                                | 107 |
| Figura 42. a) Perfiles de velocidad para $M_{C1-FFQ5000}$ a diferentes valores de frecuencia y una amplitud de campo magnético de 9,57 mT b) Ajuste de la pendiente con la frecuencia (ley de potencia).....                                            | 109 |

|                                                                                                                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 43. Perfiles de velocidad de FF-Q <sub>5000</sub> y M <sub>C1-FFQ5000</sub> a una frecuencia de 100Hz y una amplitud de campo magnético de 9,57 mT. ....                                     | 110 |
| Figura 44. Perfiles de velocidad de a) M <sub>C1-FFQ10000</sub> y b) M <sub>C5-FFQ10000</sub> a diferentes valores de amplitud de campo magnético y una frecuencia de 400 Hz. ....                  | 112 |
| Figura 45. Perfiles de velocidad de M <sub>C1-FFQ10000</sub> a diferentes valores de frecuencia y una amplitud de campo magnético de 4,25 mT. ....                                                  | 114 |
| Figura 46. Perfiles de velocidad de FF-Q <sub>10000</sub> y M <sub>C1-FFQ10000</sub> a una frecuencia de 300 Hz y una amplitud de campo magnético de 4,25 mT. ....                                  | 116 |
| Figura 47. Variación de la presión respecto a la velocidad máxima .....                                                                                                                             | 116 |
| Figura 48. Curva de flujo emulsión a base de mezcla crudo-ferrofluido (E <sub>M C1-FFQ 5000</sub> ) .....                                                                                           | 118 |
| Figura 49. Imagen Microscopia Óptica E <sub>M C1-FFQ 5000</sub> . ....                                                                                                                              | 118 |
| Figura 50. Medición de torque dentro y fuera del cilindro para E <sub>M C1-FFQ 5000</sub> bajo diferentes valores de frecuencia y amplitud de campo magnético. ....                                 | 120 |
| Figura 51. Perfiles de velocidad para E <sub>M C1-FFQ 5000</sub> a diferentes valores de amplitud de campo magnético y una frecuencia de 200 Hz. ....                                               | 121 |
| Figura 52. a) Perfiles de velocidad de E <sub>M C1-FFQ 5000</sub> a diferentes valores de amplitud de campo magnético y una frecuencia de 200 Hz. b) Ajuste de la pendiente con la frecuencia. .... | 123 |
| Figura 53. Perfiles de velocidad de E <sub>M C1-FFQ 5000</sub> y M <sub>C1-FFQ 5000</sub> a una amplitud de campo magnético de 9,57 mT y una frecuencia de 100 Hz .....                             | 124 |

### **Lista de Apéndices**

|                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Apéndice A: Tecnologías tradicionales para mejorar el transporte de crudo .....                     | 144 |
| Apéndice B: Efecto de campos magnéticos sobre crudos .....                                          | 145 |
| Apéndice C: Diseño y construcción del sistema generador de campo magnético de onda viajera<br>..... | 148 |
| Apéndice D: Perfiles de velocidad bajo CMR .....                                                    | 151 |
| Apéndice E: Perfiles de velocidad bajo TMF .....                                                    | 160 |

### Resumen

**Título:** Evaluación del efecto de los campos magnéticos en el comportamiento de flujo de mezclas de crudo-ferrofluido y emulsiones magnéticas\*

**Autor:** Aura Michelle Perdomo Sánchez\*\*

**Palabras clave:** Emulsiones magnéticas, mezclas crudo-ferrofluido, nanopartículas, campos magnéticos, magnetorreología.

**Descripción:** Los fluidos magnéticos constituyen un campo de investigación en rápido crecimiento, tanto en interés científico como en el desarrollo de nuevas aplicaciones, debido a su capacidad de modificar sus propiedades reológicas bajo campos magnéticos, particularmente en ferrofluidos la teoría de difusión del momento angular interno describe cómo los torques magnéticos inducen alineación y rotación de nanopartículas, generando incrementos viscosos y fenómenos magnetorreológicos como la generación de flujo bajo campos magnéticos rotativos (CMR). Así mismo, estudios recientes han evidenciado que excitaciones más complejas, como los campos magnéticos de onda viajera (TMF), pueden inducir desplazamiento lineal de ferrofluidos. En este contexto, surge el interés por las emulsiones magnéticas, cuya microestructura (gotas deformables de fase magnética inmersas en una matriz continua) amplifica la respuesta magnetoviscosa bajo CM. Paralelamente, se ha demostrado que la incorporación de ferrofluidos en crudos pesados permite inducir efectos magnetoviscosos bajo la aplicación de campos magnéticos externos, abriendo posibilidades para el transporte y manejo de fluidos de alta viscosidad.

Por lo tanto, el presente estudio evaluó la influencia de campos magnéticos dependientes del tiempo (CMR y TMF) sobre el comportamiento reológico de emulsiones magnéticas y mezclas crudo-ferrofluido. En ambos sistemas se observó una respuesta cualitativamente similar a la reportada en ferrofluidos: generación de flujo y aparición de torques magnéticos internos, con dependencia tanto de la concentración como de las condiciones del campo aplicado (frecuencia e intensidad). Las emulsiones con fase dispersa de ferrofluido y 15.000 ppm de nanopartículas magnéticas alcanzaron velocidades acimutales de hasta 8,06 mm/s bajo CMR (9,57 mT, 200 Hz), mientras que bajo TMF se indujo un flujo laminar desarrollado con un caudal de 653,53 mm<sup>3</sup>/s (4,25 mT, 400 Hz). Por su parte, las mezclas crudo-ferrofluido con 5.000 ppm alcanzaron velocidades de hasta 6,18 mm/s bajo CMR (9,57 mT, 200 Hz), y las mezclas con 10.000 ppm registraron caudales de hasta 347,32 mm<sup>3</sup>/s bajo TMF (4,25 mT, 400 Hz). Estos resultados constituyen evidencia experimental de la generación de flujo en sistemas magnéticos complejos bajo campos dependientes del tiempo, extendiendo los fenómenos magnetorreológicos previamente documentados en ferrofluidos hacia fluidos de mayor complejidad microestructural y viscosidad.

---

\* Trabajo de Investigación Maestría.

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Maestría en Ingeniería Química. Director: Ph.D. Arlex Chaves Guerrero. Codirectora: Ph.D. María Daniela Contreras Mateus.

### Abstract

**Title:** Evaluation of the effect of magnetic fields on the flow behavior of crude oil-ferrofluid mixtures and magnetic emulsions\*

**Author:** Aura Michelle Perdomo Sánchez\*\*

**Keywords:** Magnetic emulsions, crude-ferrofluid mixtures, nanoparticles, magnetic fields, magnetorrheology.

**Description:** Magnetic fluids constitute a rapidly growing field of research, both in scientific interest and in the development of new applications, due to their ability to modify their rheological properties under magnetic fields, particularly in dilute ferrofluids. The diffusion theory of internal angular momentum describes how magnetic torques induce nanoparticle alignment and rotation, generating viscous increases and magnetorheological phenomena such as the generation of flux under rotating magnetic fields (CMR). Likewise, recent studies have shown that more complex excitations, such as traveling wave magnetic fields (TMF), can induce linear displacement of ferrofluids. In this context, interest in magnetic emulsions arises, whose microstructure (deformable magnetic phase droplets immersed in a continuous matrix) amplifies the magnetoviscous response under CM. At the same time, it has been shown that the incorporation of ferrofluids in heavy crudes allows inducing magnetoviscous effects under the application of external magnetic fields, opening possibilities for the transport and handling of high viscosity fluids.

Therefore, the present study evaluated the influence of time-dependent magnetic fields (CMR and TMF) on the rheological behavior of magnetic emulsions and crude-ferrofluid mixtures. In both systems, a response was qualitatively similar to that reported in ferrofluids: generation of flow and appearance of internal magnetic torques, depending on both the concentration and the conditions of the applied field (frequency and intensity). Emulsions with ferrofluid dispersed phase and 15.000 ppm of magnetic nanoparticles reached azimuth rates of up to 8,06 mm/s under CMR (9,57 mT, 200 Hz), while under TMF a fully developed laminar flow was induced with a flow rate of 653,53 mm<sup>3</sup>/s (4,25 mT, 400 Hz). On the other hand, the crude-ferrofluid mixtures with 5.000 ppm reached speeds of up to 6.18 mm/s under CMR (9,57 mT, 200 Hz), and the mixtures with 10.000 ppm recorded flow rates of up to 347,32 mm<sup>3</sup>/s under TMF (4,25 mT, 400 Hz). These results constitute experimental evidence of flux generation in complex magnetic systems under time-dependent fields, extending the magnetorheological phenomena previously documented in pure ferrofluids to fluids of greater microstructural complexity and viscosity.

---

\* Master's Thesis.

\*\* Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Master's degree in chemical engineering. Director: Ph.D. Arlex Chaves Guerrero. Co-director: Ph.D. María Daniela Contreras Mateus.

### **Introducción**

En la actualidad, el transporte eficiente de crudo pesado representa uno de los principales desafíos para la industria petrolera, especialmente en países como Colombia, donde más de la mitad de las reservas de crudo corresponden a crudos no convencionales (pesados y extrapesados) [1]. Sin embargo, su alta viscosidad y comportamiento reológico complejo (viscoelástico) dificultan su flujo a través de tuberías y procesamiento. Tradicionalmente, este problema de aseguramiento de flujo ha sido tratado con técnicas como el calentamiento térmico, la dilución con crudos más livianos o fracciones livianas destiladas del petróleo [2], [3], la formación de emulsiones (Orimulsión) [4], la generación de flujo anular [2], entre otras. Sin embargo, estas tecnologías presentan limitaciones como sus altos costos operativos, disminución en el volumen efectivo del crudo transportado, generación de vapores y desestabilización de asfaltenos [2], [3], [5], [6].

En este contexto, la nanotecnología acoplada al uso de campos magnéticos externos ha surgido como una tecnología alternativa con potencial para optimizar el flujo de fluidos. Es bien conocido que el comportamiento reológico complejo de estos crudos está relacionado con la alta concentración de asfaltenos, los cuales se encuentran dispersos en forma de nano-agregados, pero presentan una marcada tendencia a formar clústeres de mayor tamaño, lo que constituye la principal causa de su elevada viscosidad y de los problemas de precipitación durante el transporte y almacenamiento [2], [7]. Frente a esto, diversos estudios [8], [9], [10], [11] han demostrado que las nanopartículas metálicas (incluyendo magnéticas) se unen selectivamente a los asfaltenos, adsorbiéndolos en su superficie, estabilizando sus moléculas y evitando la formación de conglomerados, gracias a su elevada área superficial y abundantes sitios activos.

Más allá de su aplicación en la modificación del crudo, las nanopartículas magnéticas han sido ampliamente estudiadas en la formulación de fluidos magnéticos, entre los cuales destacan los ferrofluidos, estos son suspensiones coloidales estables de partículas ferromagnéticas (10 a 30 nm) dispersas en un líquido portador; y que se caracterizan porque su comportamiento reológico puede ser controlado por la aplicación de campos magnéticos. [12].

Varios autores han observado que campos magnéticos rotativos, tanto en geometrías cilíndricas [13], [14], [15], [16] como esféricas [17] inducen el flujo del ferrofluido y que este incrementa al aumentar la intensidad y frecuencia del campo magnético. Así mismo, Mao *et al.* [18], [19], evidenciaron que campos magnéticos de onda viajera inducen el flujo del ferrofluido en una tubería; ellos encontraron que la velocidad máxima del flujo (o el gradiente de presión generado) se incrementa con la intensidad del campo magnético, mientras que, para el caso de la frecuencia, el flujo aumenta hasta un valor crítico, a partir del cual un incremento de la frecuencia disminuye el flujo. En ambos tipos de campos, la interacción entre el momento magnético de las partículas y el campo aplicado permite manipular el flujo del ferrofluido.

Avanzando en esta dirección, investigaciones posteriores [20], [21], [22], han mostrado que las emulsiones magnéticas con ferrofluido como fase dispersa pueden responder a campos magnéticos externos con mayor intensidad que los ferrofluidos de igual concentración de nanopartículas. Este comportamiento surge de fenómenos microscópicos complejos como la deformación, rotación y reorganización de las gotas bajo la acción de fuerzas y torques hidrodinámicos y magnéticos, los cuales determinan la forma y orientación de las gotas relativa y, en consecuencia, las propiedades reológicas macroscópicas de la emulsión [23]. Así, bajo campos estáticos la viscosidad tiende a aumentar [24], mientras que bajo campos oscilantes puede aumentar o disminuir dependiendo de las condiciones del sistema [25].

Por otro lado, teniendo en cuenta las características únicas de los ferrofluidos, Contreras *et al.* [26] exploraron el uso de mezclas de crudo pesado con ferrofluidos sometidas a campos magnéticos externos, con el fin de inducir comportamientos reológicos similares a los observados en estos materiales inteligentes. El estudio mostró que dichas mezclas presentan alteraciones reológicas similares (a la del ferrofluido) bajo un campo magnético estático, abriendo una línea de investigación prometedora enfocada al mejoramiento del flujo de crudos pesados.

Es evidente entonces que existe un creciente interés en desarrollar nuevos fluidos que no solo mantengan las propiedades adaptativas de los ferrofluidos, sino que también ofrezcan ventajas adicionales en términos de versatilidad y capacidad de adaptación en sistemas complejos [27]. En este sentido, las mezclas crudo-ferrofluido y emulsiones magnéticas se presentan como una opción prometedora.

Con base en lo anterior, este trabajo de investigación se centró en la obtención de información experimental sobre el comportamiento reológico de mezclas crudo-ferrofluido y emulsiones magnéticas bajo la acción de campos magnéticos dependientes del tiempo, con el fin de evaluar su potencial aplicación en el mejoramiento de flujo. Para ello, se realizaron mediciones de perfiles de velocidad, torque y flujo volumétrico. Este estudio constituye un primer paso hacia el desarrollo de una tecnología alternativa para facilitar el transporte de crudos pesados en tuberías.

## **1 Objetivos**

### **1.1 Objetivo general**

Evaluar el efecto de campos magnéticos dependientes del tiempo sobre el comportamiento reológico de mezclas crudo-ferrofluido y emulsiones magnéticas.

### **1.2 Objetivos específicos**

Determinar el efecto de la aplicación de un campo magnético rotativo sobre los perfiles de velocidad y el torque en la superficie de un cilindro generado por mezclas de crudo-ferrofluido y emulsiones magnéticas.

Estudiar el efecto de un campo magnético de onda viajera sobre el flujo mezclas crudo-ferrofluido y emulsiones magnéticas en un sistema de flujo a escala de laboratorio.

Comparar el efecto de los campos magnéticos dependientes del tiempo sobre el comportamiento reológico de ferrofluidos contra el observado en mezclas de crudo ferrofluido y emulsiones magnéticas.

## 2 Marco Teórico

Esta sección se desarrolla considerando que los ferrofluidos son los sistemas de referencia cuyo comportamiento magnetorreológico se busca extender a matrices más complejas, tales como las mezclas crudo-ferrofluido y las emulsiones magnéticas (gotas de ferrofluido dispersas en agua). Por tanto, en esta sección se describen algunas propiedades físicas y magnéticas de los ferrofluidos diluidos, así como las teorías propuestas para explicar el comportamiento magnetoviscoso de estos en diferentes tipos de campo magnéticos.

### Fluidos Magnéticos

Los fluidos magnéticos más conocidos son los fluidos magnetorreológicos (MRF) y los ferrofluidos. Ambos están compuestos de partículas magnéticas, un surfactante que evita su aglomeración y un líquido portador que permite su suspensión [28]. La principal diferencia entre estos sistemas radica en el tamaño de las partículas suspendidas: los MRF contienen partículas magnéticas de tamaño micrométrico (1 a 20  $\mu\text{m}$ ), mientras que los ferrofluidos contienen partículas nanométricas (10 a 30 nm). El mayor tamaño de las partículas en los MRF permite alcanzar niveles elevados de magnetización y favorece la formación reversible de estructuras agregadas bajo la acción de un campo magnético externo. En presencia de dicho campo, las partículas ferromagnéticas interactúan mediante fuerzas dipolares y se alinean formando cadenas y estructuras columnarias a lo largo de las líneas de campo y del flujo, lo que puede provocar un incremento de la viscosidad aparente de hasta  $10^3$  veces [27].

Más recientemente, las emulsiones magnéticas han surgido como un nuevo tipo de fluido magnético. Bashtovoi & Yarmolchik [29] introdujeron el concepto de emulsiones magnéticas

como sistemas magnetocontrolados que consisten en una fase dispersa magnética (un ferrofluido) suspendida en una fase continua no magnética. Su comportamiento macroscópico está determinado por fenómenos microscópicos complejos, como la deformación, rotación y ruptura de las gotas, los cuales están gobernados por la acción de fuerzas y torques hidrodinámicos y magnéticos [23]. A diferencia de los ferrofluidos, las emulsiones magnéticas, en ausencia de CM, presentan comportamientos reológicos que van desde el newtoniano y no-newtoniano hasta el viscoelástico, dependiendo de su formulación. Por otro lado, bajo la acción de un CM estático, se ha demostrado que su viscosidad aumenta [24], mientras que bajo campos magnéticos oscilantes pueden disminuir o incrementar su viscosidad efectiva [25]. Esto se debe a que el campo magnético juega un papel clave en la forma y la orientación de las gotas relativa al flujo y, en consecuencia, en la reología macroscópica de la emulsión [30].

Esta nueva clase de fluidos magnetocontrolables han surgido como una alternativa dentro de los fluidos magnéticos estructurados, donde su microestructura particular les confiere ventajas frente a los MRF convencionales, entre ellas una mayor resistencia a la sedimentación de las partículas magnéticas [31]. Adicionalmente, su versatilidad ha impulsado su exploración en diversas áreas de aplicación, que incluyen la microfluídica [32], el autoensamblaje de estructuras reconfigurables [33] y la biomedicina, donde destacan usos como la encapsulación celular y la administración dirigida de fármacos [34].

### **Ferrofluidos**

Los ferrofluidos son suspensiones coloidales, estables, de nanopartículas magnéticas (10 a 30 nm), típicamente magnetita u otros óxidos de hierro, dispersas en un medio portador como agua o hidrocarburos [12]. La estabilidad coloidal de estos sistemas se garantiza mediante mecanismos

de estabilización estática y/o electroestática, los cuales evitan la aglomeración de las nanopartículas [35]. Estos fluidos fueron desarrollados en la década de 1960 por la NASA con el fin de controlar el flujo del combustible bajo condición de ingravidez durante los vuelos espaciales. Tal como se mencionó previamente, los ferrofluidos permiten el control de su comportamiento reológico mediante la aplicación de un campo magnético externo [3], [12]. De hecho, el tipo de campo magnético (estático o dependiente del tiempo), así como parámetros como su intensidad y homogeneidad, y frecuencia en el caso de campos variantes en el tiempo, han sido usados para inducir y direccionar comportamientos reológicos específicos. No obstante, es importante resaltar que los cambios inducidos por el campo magnético en ferrofluidos suelen ser menos pronunciados que los observados en MRF. Entre los comportamientos magnetoreológicos reportados en ferrofluidos se cuentan: el incremento de la viscosidad en campos magnéticos estáticos [26]; la disminución de la viscosidad bajo ciertos valores de frecuencia e intensidad en campos magnéticos alternantes (oscilatorios) y la generación de flujo inducido por campos magnéticos dependientes del tiempo, como rotativos y de onda viajera [13], [14], [15], [18], [36]. Algunas de las aplicaciones destacadas de los ferrofluidos son de tipo mecánicas, como sellos herméticos en ejes rotativos y sistemas mecánicos, así como en dispositivos de control de vibraciones, y aplicaciones biomédicas, tales como hipertermia magnética, liberación controlada de medicamentos, mejoramiento de imágenes diagnósticas [37], entre otras.

### **Superparamagnetismo**

En ausencia de interacciones entre partículas, el comportamiento reológico del ferrofluido está determinado principalmente por la respuesta de las nanopartículas al campo magnético, además de los efectos brownianos e hidrodinámicos [21]. En 1949 Néel señaló que, si el tamaño

de las partículas (ferromagnéticas) se volviera lo suficientemente pequeño, generalmente entre 10 y 150 nm de diámetro según el material [38], [39], las nanopartículas pasarían a ser monodominio, en contraste a materiales de tamaño micro o macroscópico, los cuales están formados por estructuras de dominios magnéticos no alineadas y separadas por paredes de dominio.

Adicionalmente, las nanopartículas magnéticas se consideran que tienen '*anisotropía magnética uniaxial*', una propiedad, que implica que el momento magnético tiene una dirección preferida conocida como el "*eje fácil de magnetización*". Eso implica que el cambio en la dirección del momento magnético debe superar una barrera energética conocida como la energía anisotrópica o magneto-cristalina y que es cuantificada por la expresión:

$$E_{ani} = -K\mathcal{V} \cos^2(\alpha) \quad (1)$$

Donde  $K$  es la constante anisotrópica,  $\mathcal{V}$  es el volumen de la nanopartícula y  $\alpha$  es el ángulo entre la magnetización  $\mathbf{M}$  y el eje fácil de magnetización.

De acuerdo con Néel, el momento magnético de la nanopartícula puede invertirse espontáneamente debido a las fluctuaciones térmicas o de energía térmica incluso sin la presencia de un campo magnético externo. La expresión para la energía térmica está dada por:

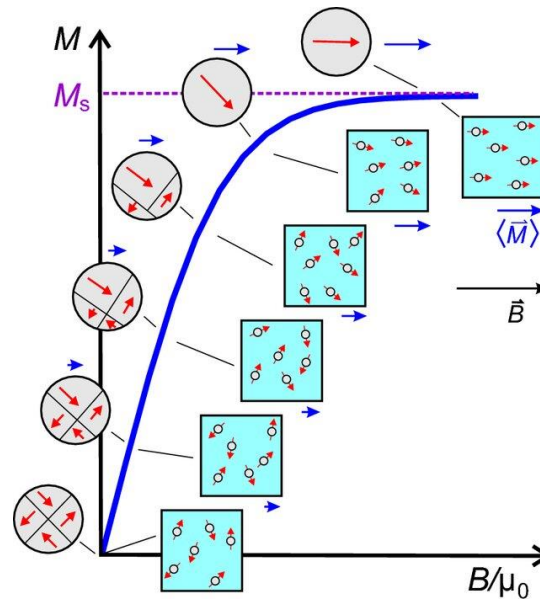
$$E_{térmica} = k_B T \quad (2)$$

Donde  $k_B$  es la constante de Boltzmann y  $T$  es la temperatura absoluta.

Se debe tener en cuenta que una inversión exitosa del momento magnético solo ocurre cuando la energía térmica puede invertir la mayoría de los momentos presentes en un tiempo muy corto (del orden de  $10^{-9}$  s o menos). Por lo tanto, en cualquier punto instantáneo dado en el tiempo,

una partícula superparamagnética puede considerarse una muestra de material altamente magnetizada. No obstante, durante un período de tiempo suficientemente largo (sustancialmente mayor que  $10^{-9}$  s), se debería observar que las partículas tienen una magnetización neta cero [12], [40], [41].

Por otro lado, cuando se aplica un campo magnético externo, el momento magnético de las partículas se dirigen hacia los mínimos de energía de anisotropía simple (orientación del momento magnético en la dirección del campo) y, por lo tanto, logran una magnetización observable comparable a la de su material en masa. Mientras que, en ausencia de un campo magnético externo, las fluctuaciones térmicas superan la energía anisotrópica ( $E_{térmica} \gg E_{anis}$ ) lo que provoca que los momentos magnéticos ( $\mathbf{m}$ ) de las nanopartículas se orienten al azar, resultando en una magnetización neta cero en el ferrofluido. Sin embargo, al aplicar un campo magnético moderado, los momentos magnéticos tienden a alinearse en la dirección del campo; siendo el grado de alineación dependiente del balance entre energía magnética a térmica. Cuando, la energía magnética supera la energía térmica se alcanza un valor máximo de magnetización, conocido como magnetización de saturación ( $M_s$ ), donde prácticamente todos los dipolos están alineados con el campo magnético[12], [40], [41]. La siguiente figura ilustra esta situación.

**Figura 1.***Ilustración esquemática del proceso de magnetización.*

*Nota.* Magnetización de partículas grandes con varios dominios (círculos grises a la izquierda de la curva) y nanopartículas superparamagnéticas (cuadrados azul claro a la derecha de la curva). La curva muestra la magnetización promedio en función del campo magnético aplicado, que apunta hacia la derecha [42].

### Mecanismos de Relajación de Momentos Magnéticos

Existen dos mecanismos fundamentales de relajación asociados a la rotación de los momentos magnéticos de las partículas. El primero corresponde a la rotación de la partícula magnética dentro del líquido portador, conocida como relajación browniana. En este caso, incluso sin un campo magnético externo, la partícula experimenta torques brownianos originados por colisiones moleculares con el fluido circundante, lo que da lugar a un movimiento browniano rotacional [12], [43]. Para partículas esféricas, el tiempo característico de relajación browniana está dado por:

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

Donde  $\mathcal{V}_h$ , representa el volumen hidrodinámico,  $\eta_0$  representa la viscosidad del líquido portador,  $k_B$  la constante de Boltzmann y  $T$  la temperatura absoluta.

El segundo mecanismo corresponde a la rotación del momento magnético con respecto a la partícula, conocido como relajación de Néel. A diferencia de la relajación browniana, este proceso no implica el movimiento físico de la partícula, sino la reorientación interna del momento magnético venciendo la barrera de anisotropía magnética [12], [43]. El tiempo de relajación de Néel ( $\tau_N$ ) depende de forma exponencial del volumen magnético de la partícula y de la temperatura y está dado por:

$$\tau_N = \frac{1}{f_0} \exp\left(\frac{K \mathcal{V}_m}{k_B T}\right) \quad (4)$$

Donde  $f_0$  es la frecuencia de Larmor, y  $\mathcal{V}_m$  el volumen de la nanopartícula magnética. Cuando la rotación de Néel es el mecanismo dominante, es decir, cuando el momento magnético es casi libre de rotar, la partícula es superparamagnética. Según Rosensweig [12], ambos mecanismos de relajación se pueden dar en forma simultánea, siendo el dominante el menor entre los dos. Estos mecanismos de relajación son fundamentales para el diseño de aplicaciones que involucren nanopartículas magnéticas, así como para explicar el comportamiento magnetoreológico desplegado por ferrofluidos.

Las formulaciones teóricas que describen la dinámica rotacional de partículas superparamagnéticas en ferrofluidos asumen: *i)* que cada partícula presenta un eje de fácil magnetización, representado por un vector unitario  $\mathbf{c}$ . *ii)* Se considera que el momento magnético

**m** posee un módulo constante y puede rotar dentro de la partícula bajo la acción de un potencial anisotrópico uniaxial. *iii*) Se supone que el momento de inercia de las partículas es despreciable en las ecuaciones de movimiento rotacional, en comparación con los torques brownianos y los términos de disipación rotacional [43].

### Magnetización de Equilibrio en Ferrofluidos

El proceso de magnetización para una suspensión de nanopartículas superparamagnéticas, con despreciable interacción entre ellas (ferrofluido diluido), y en ausencia de flujo, es descrito matemáticamente por la ecuación de Langevin [12].

$$\frac{\mathbf{M}_{eq}}{\phi M_d} = L(\alpha) \frac{\mathbf{H}}{H}; L(\alpha) \equiv \left[ \coth \alpha - \frac{1}{\alpha} \right]; \alpha \equiv \frac{\mu_0 M_d H \mathcal{V}_m}{k_B T} \quad (5)$$

Donde  $\mathbf{M}_{eq}$  es la magnetización de equilibrio,  $M_d$  es la magnetización,  $\phi$  la fracción volumétrica,  $\mathbf{H}$  es el vector del campo magnético,  $H$  es la magnitud del campo magnético,  $\alpha$  es el parámetro de Langevin que representa la relación entre las fuerzas magnéticas y térmicas,  $L(\alpha)$  es la función de Langevin. Es importante mencionar, que muchos investigadores usan como aproximación a bajas intensidades del campo magnético que  $\mathbf{M}_{eq} \approx \chi_i \mathbf{H}$ , donde  $\chi_i$  es la susceptibilidad de la suspensión. Expresiones asintóticas para la anterior ecuación en el límite de  $\alpha \ll 1$  y  $\alpha \gg 1$  son respectivamente:

$$\frac{\mathbf{M}_{eq}}{\phi M_d} = \frac{\alpha}{3}; \quad \frac{\mathbf{M}_{eq}}{\phi M_d} = 1 - \frac{1}{\alpha}; \quad (6)$$

A partir de la Ecn. (6) Rosenweig obtuvo una expresión para la susceptibilidad inicial.

$$\chi_i = \frac{\pi}{18} \phi \mu_0 \frac{M_d^2 d^3}{kT} \quad (7)$$

Esta expresión es importante, ya que, en principio, permite estimar el diámetro de partícula usando curvas experimentales de M vs H, si se conoce el valor de la fracción volumétrica de partículas  $\phi$ .

### **Comportamiento magnetoreológico en ferrofluidos**

A partir de su naturaleza superparamagnética, se ha investigado la respuesta de los ferrofluidos ante campos magnéticos estáticos (uniformes y no uniformes) y dependientes del tiempo.

#### ***Aplicación campos magnéticos estáticos y oscilatorios sobre ferrofluidos***

La descripción analítica de sus propiedades magnetorreológicas se aborda generalmente bajo dos escenarios: 1) ferrofluidos diluidos donde la interacción entre nanopartículas se considera despreciable y el ferrofluido se modela como una suspensión de partículas esféricas duras, y 2) para ferrofluidos concentrados de (7 a 10% en volumen de nanopartículas), donde las interacciones magnéticas entre partículas generan agregados y/o cadenas, lo que dificulta el desarrollo de modelos predictivos para el flujo [12].

En el caso de ferrofluidos diluidos, se demostró experimentalmente, que un campo magnético estático orientado paralelo o perpendicular a la dirección del flujo, genera un incremento de la viscosidad del ferrofluido [44]. Shliomis [45] atribuyó este fenómeno al torque magnético que impide la libre rotación de la nanopartícula ( $\omega$ ) en el fluido portador bajo

condiciones de flujo lo cual se manifiesta como un incremento en la viscosidad efectiva de la suspensión.

En ferrofluidos concentrados, las interacciones dipolares inducen la formación de clústeres o cadenas cuyas dimensiones dependen del material, la polidispersidad y la intensidad del campo [46] lo que genera una respuesta viscosa mayor que la de ferrofluidos diluidos. La complejidad del comportamiento reológico de ferrofluidos concentrados ha implicado que la mayoría de las investigaciones que se han realizado se enfoquen en la caracterización magnetoreológica en función de las propiedades físicas del ferrofluido, así como la simulación de formación de agregados usando técnicas de hidrodinámica, dinámica molecular y simulación browniana. Por ejemplo, Chen & Li [47] así como Odenbach & Thurm [40] han documentado que el comportamiento reológico de los ferrofluidos, newtoniano en ausencia de campo magnético, cambia a no-newtoniano con la aplicación de un campo magnético estático. Una de las características a destacar, es que se ha registrado hasta un 40% de incremento en la viscosidad (efecto magnetoviscoso) en ferrofluidos concentrados [47], en comparación a incrementos de 2 a 4 % registrado en ferrofluidos diluidos (viscosidad rotacional) [46].

Por otro lado, se ha reportado que, en campos magnéticos alternantes la viscosidad efectiva del ferrofluido puede incrementar o disminuir, dependiendo de la intensidad y frecuencia de oscilación del campo magnético. Una explicación de este efecto fue ofrecida por Shliomis & Morozv [48] en los siguientes términos: un campo magnético alternante, polarizado linealmente  $\mathbf{H} = (H_0 \cos \omega_f t, 0, 0)$  induce oscilaciones rotacionales de las nanopartículas, pero no señala ninguna dirección preferida de su rotación, el promedio sobre un elemento físicamente pequeño de volumen de ferrofluido da como resultado una velocidad angular de las partículas  $\omega = 0$ , lo

que indica que no hay generación de flujo. Sin embargo, cualquier flujo con una vorticidad distinta de cero es suficiente para romper la degeneración de la dirección de rotación y conduce a una velocidad angular macroscópica de las nanopartículas distinta de cero. Cuando la frecuencia del campo ( $\omega_f$ ) es lo suficientemente alta, las nanopartículas giran más rápido que el fluido ( $\omega > \Omega$ ) y, en consecuencia, inducen un movimiento rotacional en el flujo. La aceleración del fluido ocurre a expensas de la energía del campo magnético AC y se manifiesta en una reducción de la viscosidad total, es decir, en una viscosidad rotacional negativa:  $\eta_r < 0$ .

### ***Aplicación campos magnéticos rotativos sobre ferrofluidos***

El trabajo de Moskowitz & Rosensweig [49] constituyó la primera evidencia de que un campo magnético rotatorio puede inducir movimiento en un ferrofluido. Ellos usaron una geometría cilíndrica y el campo magnético fue inducido por dos pares de bobinas tipo Helmholtz perpendiculares entre sí. Las observaciones del flujo se hicieron en la interfase aire-ferrofluido.

Desde entonces, se han propuesto distintas teorías que permitan explicar el mecanismo responsable de la generación del flujo de ferrofluidos por campos magnéticos rotativos (CMR). A nuestro juicio, la teoría que mejor describe este fenómeno, sin ser aún validada por la comunidad científica, es la de difusión del momento angular interno (difusión del “*spin*”) propuesta por Zaitsev & Shliomis [20]. No obstante, antes de que Zaitsev & Shliomis presentaran su teoría aplicada específicamente a ferrofluidos, Dahler & Scriven [50], [51] sentaron las bases para la descripción del flujo de fluidos estructurados o polares, manteniendo la conveniencia del concepto de campo, es decir, de la aproximación de medios continuos. Posteriormente, Condiff & Dahler [52] propusieron ecuaciones constitutivas para el flujo de soluciones iónicas bajo campos eléctricos rotativos, obteniendo lo que ellos llamaron ecuaciones generalizadas de Navier-Stokes.

En el caso de ferrofluidos, estas ecuaciones son conocidas como las ecuaciones ferrohídrodinámicas, y están conformadas por la ecuación de continuidad para un fluido incompresible ( $\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$ ) las ecuaciones del balance para el momento lineal y momento angular interno, la ecuación de magnetización y las ecuaciones de Maxwell en el límite magnetocuasiestático que son mostradas a continuación:

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = \rho \mathbf{g} + \mu_0 \mathbf{M} \cdot \nabla \mathbf{H} - \nabla p - 2\zeta \nabla \times \left( \frac{1}{2} \nabla \times \mathbf{v} - \boldsymbol{\omega} \right) + \eta \nabla^2 \mathbf{v} \quad (8)$$

$$\rho I \frac{D\boldsymbol{\omega}}{Dt} = \mu_0 \mathbf{M} \times \mathbf{H} + 4\zeta \left( \frac{1}{2} \nabla \times \mathbf{v} - \boldsymbol{\omega} \right) + \eta' \nabla^2 \boldsymbol{\omega} \quad (9)$$

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v} \mathbf{M}) = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{M} - \frac{1}{\tau} (\mathbf{M} - \mathbf{M}_{eq}) \quad (10)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{0}, \quad \nabla \cdot (\mathbf{M} + \mathbf{H}) = 0 \quad (11)$$

De acuerdo, a Dhaler & Scriven [50], [51], en las anteriores ecuaciones, el campo magnético es una fuente de momento lineal y momento angular interno entrando al fluido como una densidad de fuerza magnética ( $\rho \mathbf{f} = \mu_0 \mathbf{M} \cdot \nabla \mathbf{H}$ ) y una densidad de torque magnético  $\rho G = \mu_0 \mathbf{M} \times \mathbf{H}$  respectivamente. Tanto  $\rho \mathbf{f}$  como  $\rho G$  actúan sobre el volumen del fluido de manera similar a como el campo gravitacional  $\rho \mathbf{g}$  lo hace en fluidos no estructurados. Por otro lado, el tercer término del lado derecho de la Ecuación 9 representa la difusión del momento angular interno o del “*spin*” y que es cuantificado por el parámetro de “*spin viscosity*  $\eta'$ ”. Es fácil demostrar que cuando  $\eta' = 0$ , las ecuaciones ferrohídrodinámicas no predicen flujo por acción de un CMR en ausencia de fuerzas magnéticas. Por último, el término  $\zeta \left( \frac{1}{2} \nabla \times \mathbf{v} - \boldsymbol{\omega} \right)$  que, aparece en ambas ecuaciones de balance, representa la *resistencia* que se genera por la diferencia entre la

velocidad de angular de rotación de un elemento de fluido ( $\boldsymbol{\Omega} \equiv \frac{1}{2} \nabla \times \mathbf{v}$ ) y la velocidad angular de las nanopartículas. Por ejemplo, cuando no hay un campo magnético que restrinja o incremente la rotación de las nanopartículas,  $\frac{1}{2} \nabla \times \mathbf{v} - \boldsymbol{\omega} = \mathbf{0}$  y el fluido se comporta como un fluido newtoniano. Entonces en el caso de fluidos estructurados la resistencia adicional generada por la desincronización entre la velocidad angular de rotación de un elemento de fluido y de las nanopartículas se representa por la parte antisimétrica del tensor de esfuerzos. Usando palabras de Dahler & Scriven [51]: “*Esta ecuación de cambio del momento angular interno aclara el destino del momento angular externo: es transmutado a la forma interna mediante la alquimia de un estado de esfuerzo asimétrico*”. De acuerdo con los autores, esto significa que en el caso de fluidos estructurados o polares (como también se conocen), el momento de la cantidad de movimiento y el momento angular interno dejan de conservarse independientemente.

Por otro lado, la Ecuación 10 se conoce como la ecuación de magnetización y tiene en cuenta la desviación de la magnetización efectiva del ferrofluido de su valor de equilibrio por efecto del flujo. Se han propuesto varias ecuaciones de magnetización, sin embargo, las más evaluadas y usadas en ferrohodinámicas son la ecuación de magnetización de Shliomis [45] y la ecuación de Martsenyuk, *et al.* [53] (MRSh). Se ha probado que en el caso de campos magnéticos estáticos las predicciones de ambas ecuaciones coinciden. Sin embargo, en campos magnéticos variantes en el tiempo con intensidades del campo magnético en el rango de moderadas a altas, la ecuación de MRSh es la que produce resultados más ajustados a evidencia experimental [54]. El conjunto de ecuaciones es completado por las ecuaciones de Maxwell en el límite magneto cuasi-estático [12], [55].

La literatura reporta además otras hipótesis que intentan explicar la primera observación de generación de flujo de un ferrofluido en un contenedor cilíndrico inducido por un campo magnético rotativo “uniforme” [49]. Por ejemplo, Glazov [22], atribuyó el flujo a fuerzas magnéticas en la dirección acimutal que impulsan el flujo y que surgen como consecuencia de altos armónicos espaciales que pueden ser generados en el bobinado del estator debido a que no se encuentran uniformemente distribuidos si no que se alojan en ranuras lo que puede alterar el flujo magnético. Sin embargo, esta hipótesis fue refutada experimentalmente por Torres-Díaz & Rinaldi [56] quienes mostraron analíticamente que aún para el caso que de que se presenten altos armónicos se requiere que  $\eta' \neq 0$  para que las ecuaciones ferrohodinámicas predigan flujo. Rosensweig *et al.* [57] plantearon que el flujo es impulsado por esfuerzos magnéticos superficiales y la curvatura de la superficie libre; Kaloni [58] propuso que la presencia de condiciones de deslizamiento dependientes del esfuerzo cortante en la velocidad traslacional del ferrofluido, acopladas con un deslizamiento rotacional; y Shliomis [45] propone que el flujo es generado por mecanismos de disipación energética asociados a la rotación de la partículas en el fluido que generan gradientes de temperatura y, en consecuencia, gradientes en las propiedades magnéticas del fluido, dando lugar a fuerzas volumétricas magnéticas que impulsan el flujo incluso en dirección opuesta a la rotación del campo aplicado.

A pesar de estas alternativas, la teoría de difusión de *spin* de Zaitsev & Shliomis [59] es la única que ha mostrado acuerdo cualitativo con las observaciones experimentales de flujo volumétrico en ferrofluidos bajo campos magnéticos rotativos [13], [15], [41], [60]. Su solución predice un perfil de velocidad acimutal casi de cuerpo rígido, corrotando con el campo, con una delgada capa límite junto a la pared.

El avance experimental decisivo llegó con Chaves *et al.* [15], quienes obtuvieron por primera vez mediciones directas del flujo volumétrico mediante velocimetría pulsada ultrasónica Doppler en ferrofluidos contenidos en un cilindro con tapa, eliminando así los efectos de interface libre. Sus resultados confirmaron la corrotación del fluido con el campo en la mayor parte del volumen, con comportamiento de cuerpo rígido, y contrarrotación localizada únicamente en la región próxima a la interfase aire-fluido cuando el contenedor estaba abierto. Los perfiles de velocidad experimentales se encontraron en concordancia cualitativa con los predichos por la teoría de difusión del spin de Zaitsev & Shliomis [61], cuando el valor de  $\eta'$  se sitúa en el rango de  $10^{-12}$  a  $10^{-8} \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , es decir, varios órdenes de magnitud por encima de las estimaciones obtenidas usando análisis de orden de magnitud [13].

### ***Aplicación de campos magnéticos de onda viajera en ferrofluidos***

Por otro lado, la aplicación de campos magnéticos de onda viajera (*Traveling Magnetic Field*, TMF) sobre ferrofluidos induce la generación de flujo neto mediante fuerzas magnéticas, sin intervención de elementos mecánicos, denominado bombeo ferrohdrodinámico [18], [19].

El elemento físico central del mecanismo de bombeo ferrohdrodinámico es que el TMF es inherentemente no uniforme en el espacio: se propaga axialmente a lo largo de la dirección  $z$  con número de onda  $k$  y frecuencia angular  $\omega_f$ . Esta no uniformidad del campo en las direcciones axial ( $z$ ) y radial ( $r$ ) inducen fuerzas magnéticas en las mismas direcciones [18]; no obstante, solo la componente axial contribuye al flujo.

Además, el campo genera un torque magnético neto  $\rho\mathbf{G}$  sobre las nanopartículas, que induce la rotación física de las partículas mediante relajación Browniana, y la transferencia de

momento angular hacia el fluido. Mao & Koser [18] demuestran que el bombeo persiste incluso en el límite  $\eta' \rightarrow 0$  es decir, cuando actúa únicamente  $(\rho \mathbf{f})_z$ , lo que según ellos confirmaría que la contribución de la difusión del *spin* es secundaria.

La validación experimental de este concepto fue realizada posteriormente por Mao *et al.* [19] quienes midieron por primera vez el flujo del ferrofluido en un sistema de flujo a escala de laboratorio inducido por a TMF. El sistema consistió en una tubería de flujo en circuito cerrado de PVC, equipado con bobinas electromagnéticas de cuatro fases en cuadratura que generaban un campo magnético axialmente viajero de amplitud moderada ( $\sim 10$  mT). Ellos determinaron que el campo magnético induce velocidades promedias máxima del ferrofluido de 7,4 mm/s (caudal de 0,69 ml/s) y una presión diferencial de 4,8 Pa, alcanzadas a 12 A de amplitud de corriente y 1 kHz de frecuencia. Tanto la velocidad de flujo como la presión inducida mostraron fuerte dependencia con la frecuencia de excitación, con una frecuencia óptima que se desplazó hacia valores más altos al aumentar la corriente aplicada. Los resultados experimentales fueron contrastados con simulaciones por elementos finitos (COMSOL) que implementaron las ecuaciones ferrohodinámicas, encontrándose que el bombeo sin viscosidad de *spin* es posible en geometría cilíndrica siempre que el campo interno sea espacialmente no uniforme.

### 3 Estado del Arte

Este trabajo de investigación se enmarca en un proyecto que evalúa la posibilidad de facilitar el flujo de crudos pesados durante su transporte en tuberías. La motivación surge de evidencia experimental que reporta la reducción de la viscosidad efectiva de ferrofluidos bajo la acción de campos magnéticos oscilatorios [48] e incluso la generación del flujo de ferrofluidos por campos magnéticos rotatorios [13], [14], [15], [60] y de onda viajera [18], [19], fenómenos discutidos en detalle en la sección anterior. En este contexto, el estado del arte de la presente investigación aborda, en primer lugar, el uso de nanopartículas magnéticas y campos magnéticos externos para la modificación de la viscosidad de crudos pesados, además de observaciones del comportamiento magnetorreológico de mezclas crudo-ferrofluido sometidas a campos magnéticos estáticos y oscilatorios.

Adicionalmente, dado que la emulsificación constituye una de las estrategias tecnológicas que la industria petrolera ha empleado para facilitar el transporte de crudos pesados, esta investigación plantea como etapa inicial la caracterización reológica y de flujo de emulsiones magnéticas bajo campos magnéticos variantes en el tiempo, como primer paso al estudio de emulsiones de crudo-ferrofluido en agua.

#### **Transporte de crudo pesado**

En las últimas décadas el desarrollo económico y el crecimiento demográfico han provocado una creciente demanda de combustibles fósiles, lo que se ha traducido en una disminución gradual de las reservas convencionales de petróleo (crudos livianos y medios), y un mayor uso de crudos no convencionales (pesados y extrapesados) con el fin de satisfacer la

demanda cada vez mayor de energía [2]. Los crudos no convencionales, representan aproximadamente el 70% de las reservas mundiales [1], [62]. A diferencia del petróleo convencional, caracterizado por sus bajos costos de producción, el no convencional requiere de un esfuerzo tecnológico mayor para su extracción, transporte y refinación debido a su composición que le confieren una alta viscosidad y un comportamiento reológicamente complejo (viscoelasticidad, comportamiento tixotrópico, etc.). La viscosidad que se encuentra típicamente en el rango de  $10^3$  a  $10^6$  cP [2], [3] y la baja gravedad API (menos de 20 para el petróleo pesado y 10 para el petróleo extrapesado) se deben principalmente al alto contenido de componentes de alto peso molecular, como asfaltenos y resinas [62], dificultando su movilidad vía oleoducto y requiriendo de la implementación de tecnologías para el aseguramiento de flujo.

Con el fin de mejorar el transporte de petróleo pesado, se han implementado diferentes técnicas que se pueden catalogar como tradicionales, y que se centran, en reducir la viscosidad o disminuir la fricción del fluido con las tuberías para mejorar la eficiencia del flujo [2], [3]. Dentro de estas se cuentan, el calentamiento mediante intercambiadores de calor o calentadores directos, la dilución con crudos livianos o refinados (ampliamente usada en Colombia) [3], [5], la formación de emulsiones [3] y el flujo anular [2] (estudiado en Brasil, pero de la cual no tenemos conocimiento de su aplicación industrial). De hecho, existen diversos reportes que muestran las desventajas tecnológicas y económicas de cada una de estas tecnologías [2], [3] y que ponen en evidencia la necesidad de proponer alternativas más eficientes para el transporte de crudos pesados.

Una alternativa a las tecnologías tradicionales es la aplicación de campos eléctricos y magnéticos al crudo para reducir su viscosidad [6], [63], [64]. Investigaciones han demostrado que

esta técnica ha funcionado solo en algunos crudos livianos, disminuyendo la viscosidad incluso por un tiempo considerable posterior a la aplicación del campo magnético [64]. También se ha registrado que la exposición del crudo a un campo magnético disminuye la temperatura de aparición de ceras, lo cual es beneficioso para el transporte de este tipo de crudos [65], [66], [67]. No obstante, el problema principal es que no se conoce de manera certera el mecanismo que genera el efecto del campo magnético sobre el crudo, ni específicamente sobre cuáles componentes de este actúa, lo que impide predecir cómo y en qué magnitud el campo magnético podría usarse en beneficio del aseguramiento del flujo.

Por otro lado, no hay registros de que crudos pesados colombianos respondan reológicamente a campos magnéticos. Por ejemplo, Contreras *et al.* [26] no observaron cambios en el comportamiento reológico de cinco crudos pesados colombianos al ser expuestos a un campo magnético estático.

En conclusión, el efecto de campos magnéticos sobre la movilidad y transporte de crudos es un área de investigación que aún tiene muchos retos, especialmente, en determinar los mecanismos de interacción entre el campo magnético y el crudo, y sobre cuales componentes. En este caso, simulación molecular como la presentada por Chen *et al.* [67] podrían aportar a aclarar este efecto. Adicionalmente, de los resultados experimentales observados hasta ahora, la aplicación del campo magnético tendría una mayor aplicación retardando la temperatura de aparición de ceras, más que mejorando la eficiencia de flujo.

### **Uso de nanotecnología para reducir la viscosidad de crudos pesados**

Diversos estudios han determinado que la presencia de asfaltenos en crudos pesados influye significativamente en la viscosidad, debido a su tendencia a agregarse en estructuras complejas lo que dificulta su movilidad [3], [8]. Los asfaltenos son los componentes más pesados y polares del crudo, y su composición química incluye carbono (80-85%), hidrógeno (7-10%) y cantidades significativas de heteroátomos como azufre, oxígeno, nitrógeno y trazas de metales como el níquel y vanadio [68]. Su estructura molecular es altamente aromática y polinuclear, con grupos funcionales que contienen oxígeno y nitrógeno, lo que les confiere una naturaleza polar que les permite formar agregados. Estos agregados surgen debido a interacciones moleculares como enlaces de hidrógeno, interacciones  $\pi$ - $\pi$  y fuerzas de Van der Waals, lo que genera una estructura con partículas moleculares pequeñas y nanoagregados [7]. La incidencia de estos componentes en la reología del crudo fue evaluada por Ghanavati *et al.* [69] quienes observaron que la viscosidad de muestras de petróleo pesado desasfaltado incrementaba exponencialmente al añadir asfaltenos a temperatura constante. En consecuencia, se han buscado estrategias de inhibición o dispersión de asfaltenos, encontrando en la nanotecnología una alternativa con gran potencial. Nanopartículas de óxido metálico han demostrado una alta afinidad por los asfaltenos mediante procesos de adsorción [9], [10], lo que contribuye a la reducción de la viscosidad de crudos pesados [8].

En este sentido, las nanopartículas presentan la ventaja de poseer una gran área superficial y sitios activos que les confieren propiedades de selectividad excepcionales sobre los asfaltenos [9].

En la literatura se ha reportado que el uso de nanopartículas de óxidos de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$  [9],  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  [8], [9],  $\gamma$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$  [11],  $\alpha$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$  [11]), aluminio ( $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  [10],  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [70]), níquel ( $\text{NiO}$  [10]), silicio ( $\text{SiO}_2$  [63]) pueden disminuir significativamente la viscosidad del crudo. Según Nassar *et al.* [10], la adsorción de asfaltenos es específica de óxidos metálicos y su capacidad de adsorción siguió el orden  $\text{CaO} > \text{Co}_3\text{O}_4 > \text{Fe}_3\text{O}_4 > \text{MgO} > \text{NiO} > \text{TiO}_2$ . Asimismo, el estudio de Ezeonyeka *et al.* [9] sobre nanopartículas de óxidos de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) mostró que la adsorción de asfaltenos sobre su superficie reduce la formación de agregados, lo que se traduce en una menor viscosidad. En la misma línea, Shayan & Mirzayi [11] determinaron que tanto la maghemita ( $\gamma$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) como la hematita ( $\alpha$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) logran reducciones en la viscosidad, con capacidades máximas de adsorción de 108,1 y 45,8 mg/g respectivamente.

Por su parte, Mateus *et al.* [71], evaluaron el efecto de nanopartículas magnéticas de ferrita de cobre (CFNS) de 150 nm de diámetro para la reducción de la viscosidad de crudo extrapesado. Ellos reportaron una reducción de la viscosidad de hasta el 18% con una concentración de 500 mg/L de CFNS. Los autores destacan la recuperabilidad del nanomaterial mediante separación magnética y lavado con tolueno para su posterior reúso.

No obstante, existe una concentración crítica de nanopartículas a partir de la cual la viscosidad se incrementa, superando incluso el valor original. Por ejemplo, Aristizábal-Fontal *et al.* [8] determinaron que la concentración óptima de nanopartículas de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) para su sistema se sitúa entre 0 y 50.000 mg/L, logrando una reducción máxima del 81 %, respuesta del efecto conjunto del uso de nanopartículas y la dilución. Más allá de esta concentración, las nanopartículas tienden a agregarse disminuyendo su área superficial por unidad de masa y su

capacidad de adsorción; esto compromete la efectividad de las NPs para inhibir la agregación de los asfaltenos.

En cuanto al uso de nanofluidos para mejorar la movilidad del crudo pesado en condiciones de midstream. Montes *et al.* [72] llevaron a cabo la primera aplicación de nanofluidos a escala de pozo mediante un sistema de inyección capilar continua en un campo colombiano. El nanofluido fue formulado con nanopartículas de SiO<sub>2</sub> dispersas en un fluido portador compuesto por xileno como diluyente del crudo y dimetilformamida (DMF) como dispersante de las nanopartículas, con una concentración de nanopartículas de 1000 mg/L. Para el ensayo de campo, el nanofluido se inyectó de forma continua a concentraciones de 3200 y 2700 mg/L. Los resultados mostraron una reducción de viscosidad superior al 60% sostenida en el tiempo para ambos escenarios de dosificación, sin requerir inyección adicional de nafta ni reductores de viscosidad convencionales. Adicionalmente, se registró un incremento en la tasa de producción de petróleo del 10% durante las primeras dos semanas de intervención, aunque el objetivo principal de la aplicación era la reducción de costos operativos asociados al consumo de diluyentes.

### **Efecto de aplicación de campos magnéticos en mezclas crudo-ferrofluido**

Hasta el momento, las investigaciones revisadas se han centrado exclusivamente en la reducción de viscosidad mediante la adsorción de asfaltenos sobre nanopartículas magnéticas. En contraste, la presente investigación, desarrollada en el grupo FIRST, propone un enfoque integral que no solo aprovecha dicha adsorción, sino que explora (por primera vez en la literatura consultada) el uso de las propiedades superparamagnéticas de las nanopartículas para modular la reología del crudo bajo diferentes configuraciones de campo magnético. Este planteamiento busca determinar cómo la orientación y tipo de campo magnético pueden inducir un control dinámico

sobre el flujo, marcando un precedente en el estudio de comportamientos magnetorreológicos aplicados a crudos pesados.

Por ejemplo, Contreras *et al.* [26], investigaron por primera vez, la posibilidad de inducir respuesta magnetorreológica en crudos pesados al mezclarlos con ferrofluidos. Las mezclas fueron preparadas incorporando una relación 80/20 en peso de crudo a ferrofluido; este último con un contenido de nanopartículas comerciales de magnetita de 0,2 a 5 % p/p suspendidas en querosene. Los resultados demostraron que a una concentración crítica de nanopartículas (0,6% p/p para mezclas preparadas con crudo C<sub>1</sub>) la acción sinérgica entre las nanopartículas y el fluido portador produjo una reducción adicional de viscosidad de aproximadamente 29%<sup>1</sup> respecto a la mezcla de referencia sin nanopartículas.

Bajo la aplicación de un campo magnético estático uniforme, orientado perpendicularmente a la dirección del flujo, se registró un incremento de la viscosidad efectiva proporcional a la intensidad del campo, aunque de menor magnitud que el reportado en ferrofluidos. Asimismo, se demostró que el campo magnético atenúa los procesos iniciales de relajación viscoelástica de las mezclas. Este comportamiento fue atribuido a la formación de cadenas y ensambles columnares de nanopartículas, análogos a los observados en fluidos magnetorreológicos, cuya presencia fue confirmada mediante microscopía electrónica de barrido acoplada a espectroscopía de dispersión de energía (SEM-EDS). Los análisis morfológicos revelaron el

---

<sup>1</sup> Es importante notar, que otros estudios reportan mayores valores de reducción de viscosidad al aplicar nanopartículas, pero ese valor engloba el efecto de dilución del líquido portador de las nanopartículas además de la reducción por adsorción de asfaltenos.

desarrollo de superensambles columnares gruesos, alineados en la dirección del campo aplicado y constituidos por complejos nanopartícula-asfaleno.

Continuando con este trabajo, Contreras *et al.* [73] usando una combinación de ensayos oscilatorios de gran amplitud (Large Amplitude Oscillatory Shear/LAOS) y magnetometría, (curvas de magnetización en función del campo y medidas de magnetización en función de temperatura utilizando las rutinas ZFC y FC) demostraron la formación espontánea de agregados anisotrópicos de nanopartículas magnéticas y asfalenos en crudos pesados modificados mediante la adición de un ferrofluido, los cuales se alinean preferentemente en paralelo al campo magnético aplicado.

Recientemente, Rodríguez Martínez [25] evaluó experimentalmente el flujo de emulsiones magnéticas O/W y mezclas crudo/ferrofluido en un sistema a escala de laboratorio diseñado para operar a presión constante bajo campos magnéticos estáticos y oscilatorios con gradiente linealmente creciente en la dirección axial. Las mezclas fueron preparadas con crudo pesado colombiano y ferrofluido a base de querosene con nanopartículas de magnetita (EMG 1300M), en proporciones de 70/30 % p/p y concentraciones de nanopartículas de 5000 a 7500 ppm.

Los resultados mostraron que la aplicación del CM estático no uniforme indujo una desaceleración del flujo, comportamiento que se atribuye al predominio del efecto magnetoviscoso sobre la fuerza de cuerpo magnética (fuerza de Kelvin) e hidrodinámicas bajo las intensidades de campo alcanzables en el sistema. Por lo tanto, bajo la acción de un CM oscilatorio no uniforme se observó una aceleración del flujo volumétrico bajo condiciones de baja frecuencia y a la mayor intensidad posible en el equipo, con incrementos del 5% a 2,5 bar y del 18% a 2 bar para la mezcla

crudo/ferrofluido. Estos resultados constituyen el primer antecedente experimental del efecto de un CM oscilatorio no uniforme sobre el flujo de mezclas crudo/ferrofluido a escala laboratorio.

### **Efecto de aplicación de campos magnéticos en emulsiones magnéticas**

El comportamiento de emulsiones magnéticas ha sido objeto de estudio desde múltiples perspectivas (como su síntesis y estabilidad, caracterización morfológica, y reológica con y sin campo magnético) constituyendo un área de creciente interés para el desarrollo de materiales de respuesta controlada.

Dese el punto de vista de la respuesta viscosa, Bashtovoi & Yarmolchik [29] observaron que la viscosidad de una emulsión de ferrofluido puede aumentar hasta 15 veces al incrementar la intensidad de un CM estático de 0 a 80 mT, lo que resulta ser superior a la de un ferrofluido. Además, observaron la elongación de las gotas a lo largo de las líneas del campo y la reestructuración en forma similar a cadenas. Este comportamiento fue atribuido a la baja tensión interfacial característica de estas emulsiones, que facilita la deformación de las microgotas [74]. Más recientemente, Gómez-Sanabria *et al.*[24] investigaron la estabilidad y las propiedades reológicas y magnetoreológicas de emulsiones magnéticas (O/W) formuladas con ferrofluidos de base queroseno con nanopartículas de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , estabilizadas con dos agentes emulsificantes: cloruro de hexadecilpiridinio y Tergitol NP-40. Los sistemas formulados resultaron estables por más de dos meses, con tamaños de gota promedio inferiores a 4  $\mu\text{m}$ , siendo la reducción de la tensión interfacial el mecanismo primario de estabilización. Las emulsiones exhibieron comportamiento adelgazante al corte y viscoelástico, ambos reforzados por el aumento en la concentración del emulsificante; las formulaciones con hexadecilpiridinio mostraron una rigidez estructural un orden de magnitud superior a las preparadas con Tergitol. Ante un campo magnético estático

perpendicular, se demostró que incorporar el ferrofluido como fase dispersa potencia el efecto magnetoviscoso respecto al ferrofluido puro a igual concentración, con un incremento relativo de viscosidad de hasta 3 veces en emulsiones con 2,5% p/v de hexadecilpiridinio y 10.000 ppm de nanopartículas expuestas a campos de hasta 796,73 mT a  $1 \text{ s}^{-1}$ , siendo este efecto reproducible hasta un año después de la formulación.

De igual manera, Promislow & Gast [75] observaron que, bajo campos magnéticos pulsados de baja intensidad, las gotas de emulsiones monodispersas de ferrofluido ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -octano en agua) adoptan forma elipsoidal alargada. Al aumentar la intensidad del campo, el eje menor del elipsoide se expande y surgen puntas cónicas en los extremos cuya morfología varía con la frecuencia del pulso.

Por su parte, Cunha *et al.* [76] realizaron un análisis numérico en dos dimensiones de la deformación de una gota de ferrofluido bajo campo magnético estático y esfuerzos cortantes. Los resultados indican que cuando el campo se orienta paralelo a la vorticidad del flujo, la gota se deforma y se alinea con el flujo, reduciendo la resistencia viscosa y disminuyendo la viscosidad efectiva de la emulsión. En contraste, cuando el campo se orienta perpendicularmente a la vorticidad, el par magnético generado por la desalineación entre el momento magnético y el campo restringe la rotación de las partículas, provocando un aumento de la viscosidad. Abicalil *et al.* [22] realizaron un estudio similar al de Cunha *et al.* [76] pero tridimensional. El campo orientado perpendicular induce un incremento monótono de la viscosidad con la intensidad del campo, fenómeno denominado *magneto-thickening*, aunque el ángulo de desalineación entre la magnetización y el campo fue menor que en el modelo bidimensional de Cunha *et al.* [76], lo que sugiere una respuesta más controlada de las gotas en sistemas tridimensionales.

Desde el punto de vista de la permeabilidad magnética Zakinyan & Dikansky [77] demostraron que el campo magnético aplicado a la emulsión induce la formación de dipolos en las gotas y provoca su elongación, reduciendo su factor desmagnetizante y generando un máximo de la permeabilidad efectiva de la emulsión, a bajas intensidades de campo donde la magnetización es aproximadamente proporcional a la intensidad del campo magnético aplicado. Este comportamiento, ausente en los ferrofluidos convencionales, constituye una característica diferencial de las emulsiones magnéticas. Ivanov *et al.* [78] confirmaron este fenómeno mediante un modelo teórico de gotas no interactuantes comparado con datos experimentales en emulsiones de ferrofluido de base queroseno en aceite de aviación, identificando desviaciones cuantitativas atribuibles a la magnetización mutua entre gotas y a la polidispersidad del sistema.

Con respecto a la aplicación de campos magnéticos dependientes del tiempo, en un estudio reciente de Zakinyan & Zakinyan [79] observaron experimentalmente que un campo magnético rotativo genera flujos por torque magnético en emulsiones de ferrofluido con microgotas deformables, siendo el torque inducido varios órdenes de magnitud superior al observado en ferrofluidos puros a concentraciones equivalentes. Esta amplificación se atribuye a la capacidad de las microgotas de deformarse bajo el campo rotatorio, potenciando la transferencia de energía y los flujos inducidos, Guilherme *et al.* [80] mostraron que el torque interno generado en las gotas por el campo externo puede inducir tensiones de cizallamiento incluso en flujos puramente extensionales, revelando la complejidad del acoplamiento entre la deformación de las gotas y la reología macroscópica de la emulsión.

Finalmente, en el contexto de la estabilidad de las formulaciones, Pajouhandeh *et al.* [81]. encontraron que la adición de nanopartículas en concentraciones de hasta 0,1% en peso incrementó

la viscosidad de la emulsión de 36,5 a 49 cP y redujo el diámetro medio de gota de 5,68 a 4,11  $\mu\text{m}$ , mejorando la estabilidad coloidal, aunque las propiedades del sistema mostraron dependencia temporal con el envejecimiento. En el ámbito de sistemas más complejos, Balan *et al.* [65], caracterizaron reológicamente emulsiones de aceite crudo parafínico adicionadas con ferrofluido bajo campos magnéticos y eléctricos de baja intensidad, demostrando que el comportamiento reológico anómalo del fluido base se transfiere y amplifica en presencia del ferrofluido, evidenciando la sensibilidad de estos sistemas complejos a la combinación de estímulos magnéticos y la microestructura de la emulsión.

Por su parte, Peña [82] realizó la síntesis de emulsiones aceite en agua (O/W) donde la fase dispersa correspondía a una mezcla de 60% crudo pesado y 40% ferrofluido, evaluando el efecto de tres tensioactivos: Tergitol NP10, Tergitol NP40, ambos no iónicos, y cloruro de hexadecilpiridinio (CPC), de carácter catiónico. La estabilidad de las formulaciones fue monitoreada macroscópica y microscópicamente mediante índices de clarificación, presencia de crudo libre y distribución de tamaños de gota. Los ensayos magnetoreológicos se realizaron en una celda Anton Paar sobre la formulación preparada con Tergitol NP10, seleccionada por su mayor reproducibilidad y estabilidad. Bajo la aplicación de un campo magnético estático perpendicular al flujo, se observó un incremento progresivo de la viscosidad de aproximadamente el doble a bajas y medias tasas de cizalla, confirmando la viabilidad de estas emulsiones como sistemas con modulación magnetoviscosa controlable.

## 4 Metodología

### 4.1 Preparación de Fluidos Magnéticos

Los fluidos magnéticos objeto de esta investigación son las mezclas de crudo ferrofluido y emulsiones magnéticas, además de los ferrofluidos en base queroseno (FF-Q). Este último se tomó como línea base para evaluar el comportamiento magnetoreológico de los dos primeros sistemas. Es oportuno mencionar, que el proyecto no implica la síntesis de nanopartículas (NPs); sin embargo, se garantizó la estabilidad de las nanopartículas en las mezclas de crudo ferrofluido y emulsiones magnéticas, siguiendo los protocolos de síntesis desarrollados y por Contreras *et al.* [26] y Gómez *et al.* [24] respectivamente.

Las nanopartículas utilizadas pertenecen a la línea EMG 1300M de Ferrotec Corporation U.S.A. De acuerdo al fabricante, son óxidos de hierro, con un diámetro promedio de 10 nm, una magnetización de saturación 50-70 emu/g y son recubiertas con un tensioactivo polimérico que les permiten ser suspendidas en líquidos orgánicos, además de evitar su agregación. Estas nanopartículas presentan un comportamiento superparamagnético.

#### 4.1.1 Preparación de Ferrofluidos

Las nanopartículas son agregadas al queroseno en diferentes concentraciones (5.000, 10.000 y 15.000 ppm). La suspensión se agitó manualmente y luego se sumergió en un baño ultrasónico durante 15 min, con el fin de favorecer su dispersión homogénea. Posteriormente, se realizó agitación orbital a 150 rpm y 40 °C durante 2 h [26]. Esta temperatura fue probada previamente y sugerida como la óptima para garantizar la estabilidad de la suspensión [83].

#### **4.1.2 Preparación de Mezclas Crudo Ferrofluido**

Las mezclas crudo-ferrofluido se prepararon siguiendo el procedimiento descrito por Contreras *et al.* [26].

En primer lugar, se evaluaron diferentes proporciones de crudo/ferrofluido (50/50, 40/60 y 30/70 %p/p) y concentración de nanopartículas de 5.000, 7.500 y 10.000 ppm con el fin de determinar la formulación que permitiera generar un efecto magnetoviscoso diferenciable con una concentración de nanopartículas económicamente viable. Se encontró que la mezcla que mejor cumple con esta condición es la mezcla crudo/ferrofluido 30/70 p/p, y 5.000 ppm de NPs. Esta formulación fue seleccionada teniendo en cuenta los resultados obtenidos por Rodríguez [25] quien estableció, a partir de ensayos reológicos, que la mezcla en proporción 30/70 presentó un incremento continuo en la viscosidad durante el tiempo de exposición al campo estático, incluso a concentraciones de 5.000 ppm, y mostró respuesta a campos magnéticos oscilatorios.

Con el fin de lograr una homogenización adecuada de los tres componentes, las mezclas fueron sometidas a baño ultrasónico por 6 horas seguido de agitación orbital durante 12 horas a 350 rpm y, finalmente, se reincorporan a baño ultrasónico por 6 horas más. Este protocolo garantiza la dispersión uniforme de las nanopartículas en la mezcla, minimizando la formación de agregados [26].

Se prepararon tres mezclas empleando tres crudos pesados diferentes, estos crudos fueron seleccionados con base en los resultados reportados por Contreras *et al* [26]. Según esta investigación, estos crudos se comportan como materiales viscoelásticos que siguen el modelo generalizado de Maxwell. Además, demostraron que la dilución con queroseno, así como la

agregación de nanopartículas no solo promueve la disminución de su viscosidad, sino que también permite inducir comportamiento magnetoreológico, particularmente un aumento de la viscosidad en mezclas de crudo-ferrofluido bajo un campo magnético estático, a partir de ensayos en una celda magnetoreológica Anton Paar.

#### **4.1.3 Preparación de Emulsiones Magnéticas**

En este trabajo de investigación se sintetizaron dos tipos emulsiones del tipo O/W; una donde la fase dispersa es compuesta por gotas de FF-Q y la otra con la fase dispersa compuesta por una mezcla de crudo y FF-Q.

##### ***Emulsiones de ferrofluido***

Para efectos de esta investigación, se prepararon tres emulsiones con ferrofluido en base queroseno (FF-Q) como fase dispersa y una solución acuosa de monohidrato de cloruro de hexadecilpiridinio (CPC) al 3,5% p/v como fase continua, a concentraciones de nanopartículas de 5.000, 10.000 y 15.000 ppm, denominadas  $E_{FF-Q5000}$ ,  $E_{FF-Q10000}$  y  $E_{FF-Q15000}$ , respectivamente.

La formulación de las emulsiones siguió el procedimiento establecido por Gómez *et al.* [84]. La fase dispersa y la fase continua se mezclaron en relación 1:1. La homogenización de las fases se realizó por la técnica rotor-estator utilizando el equipo Ultra-Turrax IKA T-25, por un tiempo de 5 minutos y velocidad de cizallamiento de 22.000 rpm hasta alcanzar una sola fase homogénea.

La selección del surfactante CPC se fundamentó en los resultados reportados por Gómez *et al.* [24], [84], quienes estudiaron las propiedades de estabilidad, reología y magnetorreología de emulsiones O/W compuestas por ferrofluidos en base queroseno dispersos en soluciones de

agentes emulsificantes. Sus resultados demostraron que las emulsiones estabilizadas con CPC presentaron una mayor rigidez estructural, con módulos dinámicos aproximadamente un orden de magnitud superiores a los obtenidos con formulaciones de Tergitol. Adicionalmente, al incorporar el ferrofluido como fase dispersa en una emulsión bajo la acción de un campo magnético perpendicular, se potenció el efecto magnetoviscoso en comparación con el ferrofluido puro a igual concentración de nanopartículas, observándose un aumento máximo relativo de viscosidad en emulsiones estabilizadas con CPC al 2,5% p/v y 10.000 ppm de nanopartículas. Adicionalmente, señalaron que el efecto magnetoviscoso en dichas emulsiones se mantuvo estable y reproducible incluso un año después de su preparación.

#### ***Emulsiones de mezcla de crudo-ferrofluido***

La formulación de este tipo de emulsiones siguió el procedimiento establecido por Peña [82]. En este caso, la fase dispersa está conformada por una mezcla 60% de crudo  $C_1$  y 40% FF-Q p/p con una concentración de 10.000 ppm de NPs en la mezcla, y la fase continua está conformada por una solución acuosa al 6 %p/v de polietoxilato de nonilfenol con 10 moles de óxido de etileno (Tergitol NP10). La fase dispersa y la fase continua se mezclaron en relación 1:1. La homogenización de las fases se realizó por la técnica rotor-estator utilizando un tiempo de 10 minutos a una velocidad de 22.000 rpm hasta alcanzar una sola fase homogénea.

En el estudio realizado por Peña [82] se llevaron a cabo ensayos de estabilidad y magnetorreología en emulsiones a base de crudo pesado, con el objetivo de optimizar la respuesta magnetoviscosa previamente observada por Contreras *et al.* [26] en mezclas crudo-ferrofluido, sus resultados evidenciaron que una relación 60/40 %p/p crudo-ferrofluido, con una concentración de 5.000 ppm de NPs en la emulsión, generaba una respuesta significativa frente a la aplicación

de un campo magnético estático, particularmente un incremento de la viscosidad cercano al doble respecto al estado sin campo. Adicionalmente, se reportó que una concentración de 6 % p/v de Tergitol NP10 en la fase acuosa garantizaba la estabilidad macroscópica de la emulsión durante al menos tres semanas, limitando fenómenos de coalescencia y separación de fases.

#### **4.2 Evaluación de comportamiento Magnetoreológico**

Con el fin de evaluar la respuesta magnetoreológica de las emulsiones magnéticas y de las mezclas crudo ferrofluido bajo campos magnéticos rotativos, se realizaron medidas del torque inducido por el flujo del fluido magnético sobre superficies cilíndricas y de los perfiles de velocidad en recipientes cilíndricos. En el caso de CM de onda viajera, se evaluó la magnitud del flujo generado por el campo a frecuencias e intensidades específicas. Para esto se usó la técnica de perfiles de velocidad por ultrasonido, la cual, por integración del perfil de velocidad en la sección del sistema de flujo fuera de la zona de generación del CM permitió determinar el caudal.

Es importante mencionar, que las geometrías usadas para medir el torque y perfiles de velocidad fueron diseñadas específicamente para estas aplicaciones usando materiales no magnéticos y con impedancia acústica similar a la del fluido magnético. Se siguió la configuración utilizada por [13], [15], [16] para la medición de perfiles de velocidad en CM rotativo y, adicionalmente, se diseñó y construyó el sistema de flujo con campo magnético de onda viajera siguiendo los trabajos de Mao *et al.* [19].

### 4.3 Configuración de Dispositivo Generadores de Campos Magnéticos

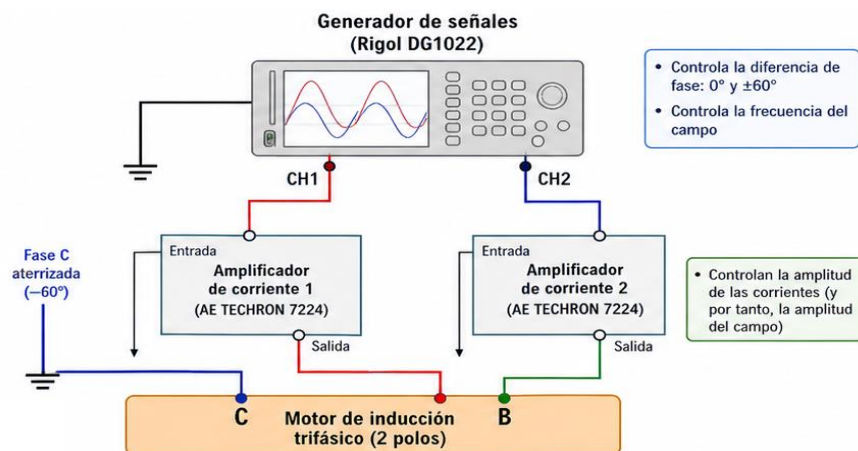
#### 4.3.1 Configuración de dispositivo generador de Campo Magnético Rotativo

La configuración del dispositivo generador de campos magnéticos rotativos uniforme, sigue la configuración usada en los trabajos de Rosenthal *et al.* [36], Rinaldi *et al.* [85], Chaves *et al.* [14], [15] y Torres-Díaz *et al.* [17].

El campo magnético rotativo uniforme girando en el sentido horario o antihorario es generado en el devanado del estator de un motor de inducción trifásico de dos polos alimentado por dos corrientes sinusoidales amplificadas; una con  $0^\circ$  y otra con  $\pm 60^\circ$  de desfase, mientras que la tercera fase es aterrizada [36]. La diferencia de fases y la frecuencia del campo es controlada por un generador de señales (Rigol DG1022) y la amplitud del campo por dos amplificadores de corriente (AE TECHRON 7224). En la Figura 2 se puede observar la conexión para la generación campo magnético rotativo.

**Figura 2.**

*Conexión para generación de campos magnéticos rotativos.*

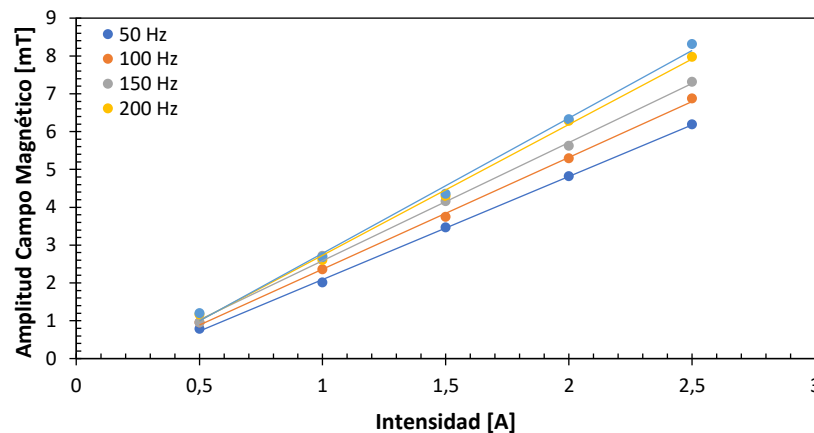


Posteriormente se realizó la caracterización del campo magnético, que consistió en determinar la intensidad del campo magnético alcanzado por unidad de corriente alimentada al estator para cada valor de frecuencia sin fluido. Para esto se usó un Gauss Meter Model GM-2 marca Alpha Lab Inc.

En la Figura 3 se presenta la caracterización del campo para diferentes valores de frecuencia, cabe resaltar que la dependencia lineal observada entre la intensidad de corriente y el campo magnético es típica de una bobina, ya que el campo magnético generado es directamente proporcional a la corriente que fluye a través de las espiras, según la ley de Ampère.

**Figura 3.**

*Caracterización Campo Magnético Rotativo. Amplitud alcanzada por unidad de corriente alimentada [mT] vs Intensidad aplicada [A] a diferentes valores de frecuencia.*



Las medidas se realizaron a tres diferentes alturas del estátor: base (0,1H), mitad (0,5H) y tope (H), donde H es la altura total del estátor, igual a 62,08 cm, y el radio del estátor es de 27,01 cm. Adicionalmente, se evaluó la uniformidad del campo magnético en dirección axial, encontrando una variación en la amplitud del campo de aproximadamente 11% entre la altura H y

0,5H, y de 8,5% entre H y 0,1H. En la dirección radial, a la altura 0,5H, se registró una diferencia en la amplitud del campo del 10% aproximadamente.

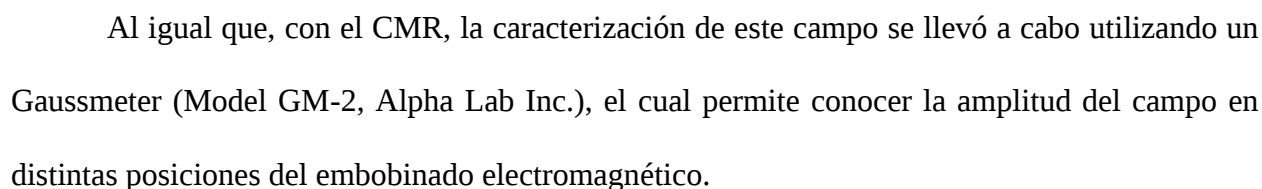
#### ***4.3.2 Configuración de dispositivo generador de campo magnético de onda viajera***

El concepto de campo magnético de onda viajera y su efecto sobre la generación de flujo de un ferrofluido es presentado por Mao *et al.* [18], [19] quienes utilizaron bobinas electromagnéticas multifásicas accionadas con corrientes eléctricas alternas sinusoidales (hasta 12 A pico a pico) para generar un campo magnético que se desplaza axialmente dentro de una sección lineal de un sistema de flujo de circuito cerrado. En este proyecto esta configuración fue extendida para el estudio de mezclas crudo ferrofluido y emulsiones magnéticas.

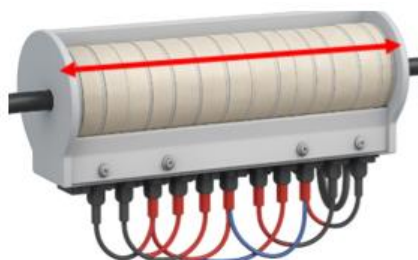
Las cuatro fases equilibradas (0, 90, 180 y 270 grados), constituyen un período completo del campo magnético viajero de manera similar al estator de un motor eléctrico lineal, donde Mao *et al.* [18], [19] confirmaron que las amplitudes del campo magnético generadas dentro de la tubería dependen linealmente de las amplitudes de corriente aplicadas.

Para efecto de este proyecto se construyó un embobinado electromagnético con 8 rollos de cintas de cobre Holland Shielding System BV de 16,8 m de longitud cada uno en un carrete plástico de 16 ranuras que siguieron la conexión exhibida en la Figura 4.

### Configuración experimental bobina electromagnética



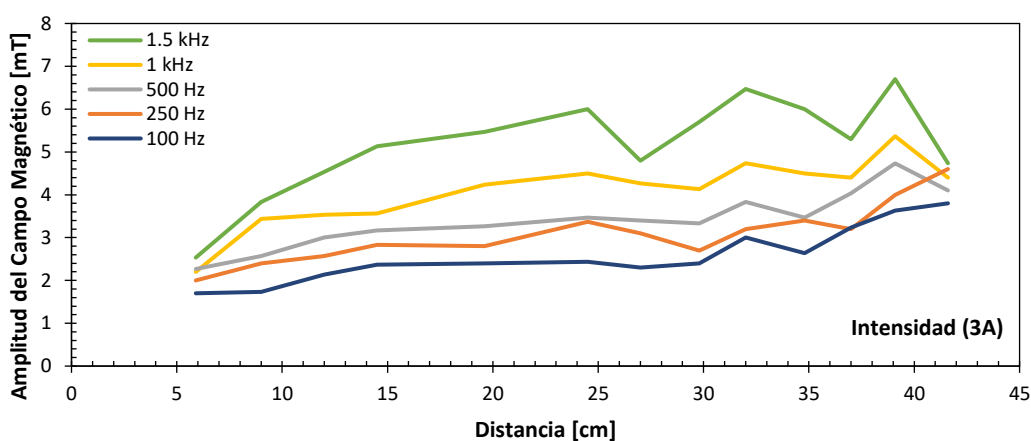
*Embobinado electromagnético.*



Se caracterizó el campo magnético generado evaluando la amplitud del campo magnético en función de la distancia a lo largo del embobinado y de la intensidad de corriente aplicada. Las mediciones se realizaron a una corriente de 3A y en un rango de frecuencias de 100 a 1500 Hz, obteniéndose los siguientes resultados:

**Figura 6.**

*Amplitud campo magnético respecto a la distancia del embobinado electromagnético.*



En la Figura 6 se presenta la variación de la amplitud del campo magnético a lo largo del embobinado para cinco frecuencias (100, 250, 500, 1000 y 1500 Hz) a una corriente de 3 A. Se observa que la amplitud del campo magnético depende tanto de la frecuencia aplicada como de la posición axial a lo largo del embobinado: a mayor frecuencia, se registra una mayor intensidad de campo, alcanzando valores de hasta ~6,5 mT a 1500 Hz en la región distal del embobinado. No obstante, a frecuencias elevadas se aprecia una mayor oscilación en la amplitud del campo a lo largo de la posición axial, evidenciada en fluctuaciones más pronunciadas en las curvas de 1000 y 1500 Hz respecto a las de menor frecuencia. Este comportamiento sugiere que, aunque las frecuencias altas permiten alcanzar mayores amplitudes de campo, comprometen la uniformidad

espacial del mismo. Adicionalmente, se aprecia un incremento leve pero progresivo de la amplitud conforme se avanza a lo largo de las bobinas, lo que indica que el campo no es perfectamente uniforme en dirección axial. Cabe destacar que la presencia de este gradiente espacial de campo magnético es relevante, dado que un campo con gradiente puede generar una fuerza de tipo Kelvin en dirección axial, la cual contribuiría a impulsar el fluido a lo largo del sistema. Estos resultados concuerdan con lo reportado en la literatura sobre motores lineales y sistemas de excitación magnética dependientes del tiempo [86]. Una vez realizada la caracterización del campo, se procedió a montar el embobinado en una configuración experimental con el fin de evaluar si este tipo de campo logra la generación de flujo de fluidos magnéticos complejos.

#### **4.4 Procedimiento Experimental**

##### **4.4.1 Medición de Torque**

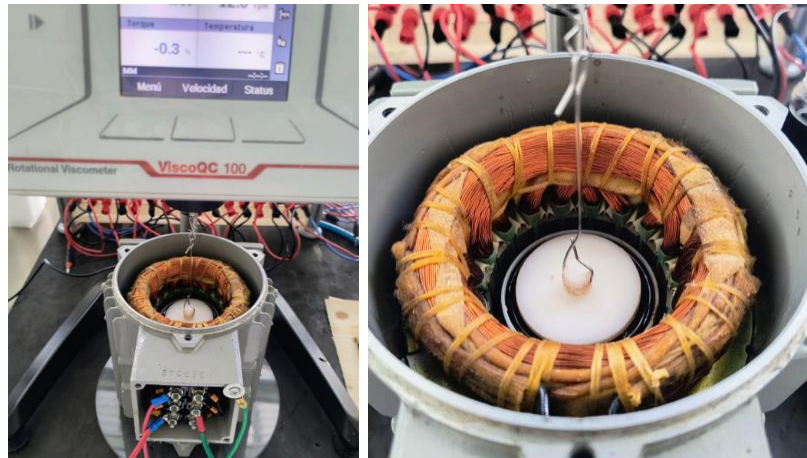
Las mediciones de torque se realizaron utilizando un viscosímetro rotacional Anton Paar modelo ViscoQC100 con un torque máximo de  $0,7187 \text{ mN}\cdot\text{m}$ . El viscosímetro mide el torque necesario para mantener un eje sumergido en un fluido girando a una velocidad angular constante en sentido antihorario. Los ejes estándar del viscosímetro están elaborados en acero inoxidable, que estaría sujeto a corrientes parásitas inducidas y torques en presencia de un campo magnético rotativo; por lo tanto, para esta investigación se reemplazaron por ejes personalizados que se diseñaron en polietileno de alta densidad, teniendo en cuenta las medidas del devanado del estator.

La medición del torque se realizó en tres configuraciones diferentes: 1) cuando el husillo está completamente lleno de fluido magnético, es decir el fluido está en contacto con la superficie

interna de un cilindro 2) cuando el husillo está rodeado de fluido magnético; y 3) cuando el husillo está completamente rodeado y lleno de fluido magnético, como se observa en la Figura 7.

**Figura 7.**

*Montaje de medición de torque.*



Estas medidas de torque se obtuvieron con el fin de evaluar la dependencia del torque con la amplitud del campo magnético a un valor de la frecuencia constante.

#### **4.4.2 Medición de Perfiles de Velocidad**

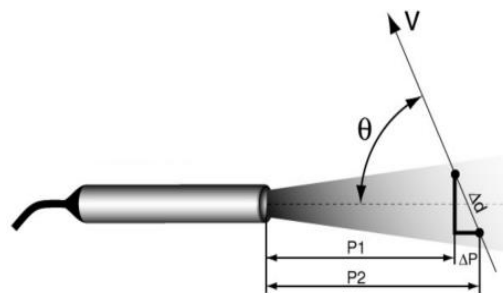
La medición de perfiles de velocidad se constituye en una técnica de caracterización del campo de velocidad de fluidos muy útil en la reología ya que permite validar modelos teóricos y numéricos del movimiento de fluidos [87]. Básicamente, el perfil de velocidad describe el vector de velocidad como función de la posición y el tiempo. Además, permite comprender la influencia de la geometría de flujo, el comportamiento reológico del fluido, el régimen de flujo y el tipo de fuerzas aplicada para inducir su movimiento.

Los métodos para medir perfiles de velocidad pueden incluir técnicas basadas en el uso de láseres y partículas trazadoras como en la velocimetría por imágenes de partículas, o la velocimetría Doppler láser, entre otros, sin embargo, tienen como limitación que se debe aplicar solo a fluidos traslucidos [88], [89], [90]. Por su parte, la técnica de medición de velocidad por ultrasonido se basa en el principio del efecto Doppler, que permite determinar la velocidad de flujo de un fluido mediante la emisión y recepción de ondas ultrasónicas y es ideal para la medición de perfiles de velocidad en líquidos opacos como los ferrofluidos [91]. Este método de medición tiene ventajas sobre las técnicas convencionales, ya que es un proceso eficiente de mapeo de flujo, aplicabilidad a líquidos opacos y guarda un registro del campo de velocidad espacio-temporal [92], [93].

Por lo tanto, los perfiles de velocidad para mezclas de crudo-ferrofluido y emulsiones magnéticas se obtuvieron utilizando un velocímetro ultrasónico DOP4000 (Signal Processing, Lausanne, Suiza). El equipo mide el componente del vector de velocidad paralelo a la dirección de propagación del haz, y la ubicación espacial se determina a partir del retardo de tiempo entre la ráfaga emitida y el eco registrado, donde la magnitud de la velocidad se determina a partir de la correlación de las señales de eco aleatorias de un tren de emisión pulsada [91].

### Figura 8.

*Transductor emisor y receptor de un haz ultrasónico [94].*



Para la medición de perfiles de velocidad por ultrasonido se deben tener en cuenta parámetros como:

PRF [ $\mu$ s]: Es la frecuencia de repetición de pulso, determina la profundidad máxima medible, así como la frecuencia máxima de Doppler que se puede medir.

Valor del nivel de amplificación TGC [dB]: Da el aumento del nivel de señal desde el transductor hasta la entrada del convertidor interno.

Ángulo Doppler: Es el ángulo entre el eje del haz ultrasónico y la dirección del vector de velocidad real.

Resolución [mm]: Distancia entre el centro de volúmenes de muestreo adyacente.

Sensibilidad: Definen el nivel por debajo del cual se cancela el cálculo de la frecuencia Doppler media en presencia de una energía. En los niveles altos es posible captar ruido.

Poder emisor: La potencia emitida debe seleccionarse para recibir suficiente energía dispersada de las partículas.

Velocidad del sonido: Se debe tener en cuenta cual es la velocidad del sonido respecto al medio que se está utilizando, esto permite transformar los cambios de frecuencia Doppler [95].

#### **4.4.2.1 Validación de protocolo de medición de perfiles de velocidad**

En esta investigación, la medición de perfiles de velocidad se llevó a cabo en dos escenarios experimentales: 1) Generación de flujo inducido por un campo magnético rotativo (CMR) en recipientes cilíndricos, y 2) Generación de flujo inducido por un campo magnético de onda viajera, en configuración de flujo interno en tubería.

Con el propósito de verificar la confiabilidad de la técnica de medición ultrasónica, se realizó inicialmente una etapa de validación experimental. En esta fase se establecieron los parámetros que permitieran la medición de perfiles de velocidad en configuraciones de flujo similares a las evaluadas bajo campos magnéticos: flujo Couette (cilindros concéntricos) y flujo Poiseuille (flujo por tubería).

Los perfiles medidos se compararon con las soluciones teóricas reportadas en la literatura, lo que permitió ajustar el diseño y el montaje de los sistemas experimentales. Para esta validación se emplearon fluidos de referencia, específicamente agua y glicerina, ya que sus propiedades reológicas son conocidas.

En el caso de flujo Couette, Takeda [89], [96], [97] recomienda el uso de ángulos Doppler pequeños, alrededor de  $10^\circ$ , con el fin de obtener perfiles de velocidad con mayor resolución y reducir errores asociados a la curvatura de la geometría. Por otra parte, para mediciones de perfiles de velocidad en flujo interno en tubería, se reportan ángulos Doppler en el rango de  $70^\circ$  a  $75^\circ$ , los cuales favorecen la sensibilidad de la medición en la dirección axial del flujo [90].

Otro de los parámetros de gran importancia para este tipo de medición es la velocidad del sonido (Apéndice C); un error en este parámetro provoca un desplazamiento en la frecuencia Doppler que afecta la exactitud de los perfiles de velocidad y es propio de cada fluido [89]. La velocidad del sonido para los fluidos de estudio, se presentan en la Tabla 1.

**Tabla 1.**

*Velocidad del sonido en fluidos magnéticos en estudio*

| Fluido                 | Velocidad del Sonido [m/s] |
|------------------------|----------------------------|
| E <sub>FF-Q</sub> 5000 | 2137                       |

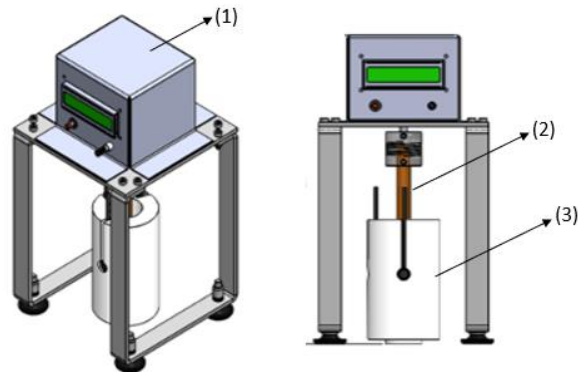
|                   |      |
|-------------------|------|
| $E_{FF-Q}$ 10000  | 2294 |
| $E_{FF-Q}$ 15000  | 2246 |
| $M_{C1-FFQ}$ 5000 | 1310 |
| $M_{C3-FFQ}$ 5000 | 1350 |
| $M_{C5-FFQ}$ 5000 | 1449 |
| $E_M$ C1-FFQ 5000 | 2300 |

### ***Pruebas Preliminares Flujo Couette***

Para la medición del flujo de Couette se diseñó y construyó un equipo de agitación en un cilindro (Figura 9). Este desarrollo formó parte del trabajo de grado de un estudiante de pregrado, en el marco del proyecto 3911 financiado por Minciencias.

#### **Figura 9.**

*Equipo de agitación para flujo Couette.*



*Nota.* La configuración cuenta con tres partes: 1) Un equipo electrónico que permitió la medición y control de la velocidad en tiempo real, 2) un agitador y 3) un recipiente con ranuras que permitieron la ubicación del sensor de onda ultrasónica a un ángulo de  $10^\circ$ .

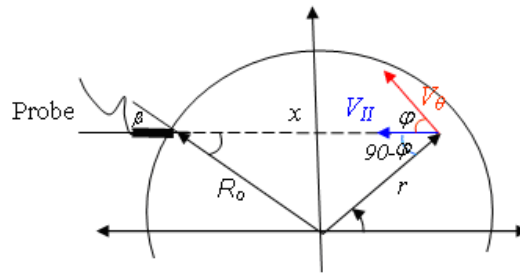
Se buscó validar la configuración experimental usando perfiles de velocidad teóricos en geometrías similares a la elegida. Por tal razón, se seleccionó el modelo para el perfil de velocidad en el espacio anular entre dos cilindros concéntricos de un fluido newtoniano en régimen laminar:

$$v_{\theta}(r) = \frac{R_1^2(r^2 - R_2^2)\omega}{r(R_1^2 - R_2^2)} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde,  $\omega$  es la velocidad angular del cilindro interno,  $R_1$  es el radio del cilindro interno,  $R_2$  del cilindro externo y  $v_{\theta}$  es la componente de velocidad en la dirección acimutal. Con el fin de validar los resultados experimentales por comparación con los teóricos, la componente de velocidad dada por el equipo debe ser convertida a la componente de velocidad relevante de la geometría de flujo usada teniendo en cuenta el ángulo de incidencia del haz. Para esto se buscó determinar una expresión para la componente de velocidad acimutal ( $v_{\theta}$ ) a partir de la velocidad que entrega el DOP 4000, es decir la componente de velocidad paralela ( $v_{\parallel}$ ) a la dirección del haz de ultrasonido. Para ello se tuvo en cuenta las relaciones geométricas mostradas en la Figura 10 y que corresponden a las ecuaciones mostradas a continuación:

**Figura 10.**

*Trayectoria del haz*



$$v_{\theta} = v_{\parallel} \frac{\sqrt{R^2 + x^2 - 2Rx\cos\beta}}{R\sin\beta} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde  $R$  es el radio interno del recipiente,  $x$  la posición de medición a lo largo de la trayectoria del haz ultrasónico, y  $\beta$  el ángulo formado entre el eje del transductor y la dirección radial.

La distancia  $x$  dada por el DOP4000 se puede convertir a radio usando la siguiente expresión:

$$r = \sqrt{R^2 + x^2 - 2Rx\cos\beta} \quad \text{Ecuación 3}$$

En las dos anteriores ecuaciones,  $\beta$  corresponde al ángulo de reflexión que hace el haz de ultrasonido cuando pasa la pared del recipiente y que se puede determinar a partir de la siguiente expresión:

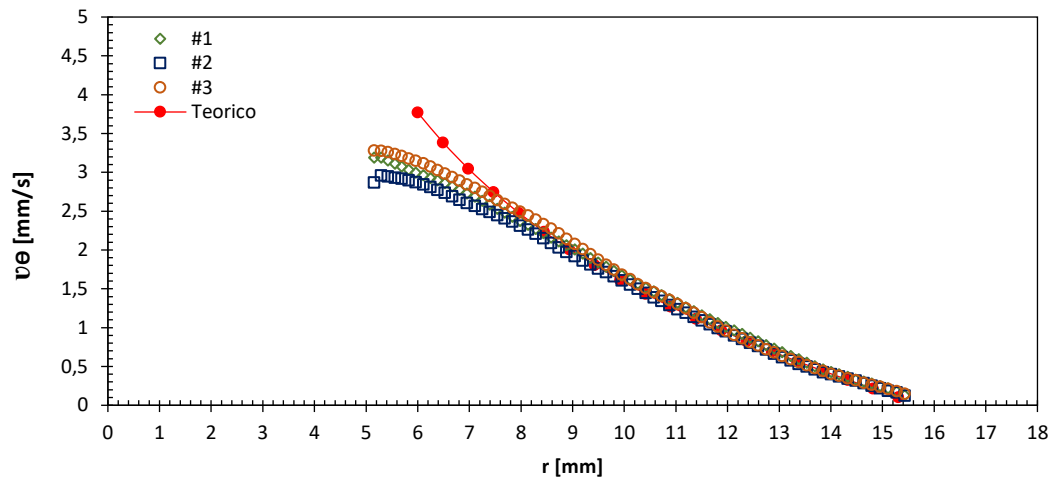
$$\beta = \sin^{-1} \left( \frac{V_{fluid} \sin\alpha}{V_{material}} \right) \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde  $V_{fluid}$  es la velocidad del sonido del fluido,  $V_{material}$  es la velocidad del sonido del material de la pared y  $\alpha$  es el ángulo Doppler.

La comparación de los resultados experimentales con los teóricos se presenta en la Figura 11. En ella se observa que la técnica de medición de perfiles de velocidad permite obtener resultados con buena precisión. A partir de esta comparación fue posible definir parámetros de operación adecuados, tales como la frecuencia de pulsación, la ubicación del sensor, el ángulo de medición, entre otros. Asimismo, se identificó una disminución aparente de la velocidad medida cuando  $r$  se aproxima a la superficie del agitador (cilindro interno). Este comportamiento se atribuye a la interferencia de la onda ultrasónica con la superficie del agitador, efecto asociado a la sensibilidad de la técnica en regiones cercanas a paredes o superficies sólidas. No obstante, al considerar esta limitación local, se corroboró que la técnica es confiable para la medición de perfiles de velocidad en la mayor parte del dominio de flujo. Se estableció que la técnica permite medir velocidades de baja magnitud sin que se presenten interferencias significativas en la señal.

**Figura 11.**

*Resultados pruebas preliminares (teórica vs experimental) flujo cilindros concéntricos utilizando glicerina como fluido de estudio a 6 rpm.*

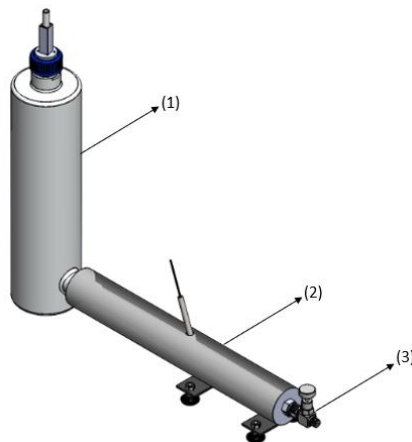


### ***Pruebas Preliminares Flujo Pouiselle***

De igual manera, se diseñó una configuración experimental que permitió la medición de velocidad en flujo interno en tubería, como se muestra en la Figura 12.

**Figura 12.**

*Montaje experimental evaluación de flujo en tubería.*



*Nota.* El montaje consto de 1) un frasco de Mariotte, que permitió mantener aproximadamente constante la presión del sistema; 2) una sección cilíndrica construida en polietileno de alta densidad, que facilitó el ajuste del sensor a un ángulo de 70°; y 3) una válvula de control, utilizada para regular el caudal de salida.

Para un flujo laminar desarrollado en tubería circular, el perfil de velocidad axial teórico está dado por la expresión clásica de Poiseuille:

$$v_z = v_{max} \left( 1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde  $v_z$  es la velocidad axial del fluido,  $v_{max}$  es la velocidad máxima.

Experimentalmente, la velocidad axial se obtiene a partir de la corrección geométrica de la velocidad medida por el equipo ultrasónico. La relación está dada por:

$$v_z = \frac{v_{\parallel}}{\cos\beta} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde  $v_z$  es la velocidad axial real del fluido en la tubería,  $v_{\parallel}$  es la velocidad medida en la dirección del haz ultrasónico y  $\beta$  es el ángulo Doppler, definido como el ángulo entre la dirección del flujo y la dirección de propagación del haz.

Adicionalmente, la posición radial dentro de la tubería se determina mediante:

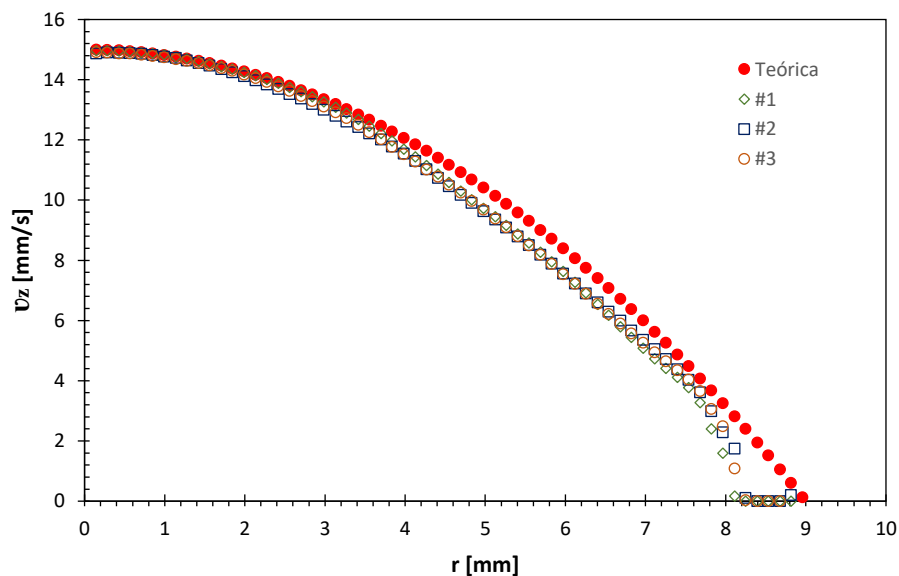
$$r = x \sin\beta \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde  $r$  es la distancia radial desde el eje de la tubería y  $x$  es la distancia medida a lo largo de la trayectoria del haz ultrasónico dentro del fluido.

Los resultados se presentan en la Figura 13, se observa que la técnica permite obtener mediciones de velocidad precisas y reproducibles. Sin embargo, se identificaron algunas diferencias entre el modelo teórico y los resultados experimentales que se atribuyen principalmente a: i) la estimación del ángulo Doppler, ii) la ubicación del transductor, ya que los primeros milímetros de medición presentan menor precisión debido a efectos de proximidad; iii) la determinación de la velocidad del sonido en el fluido, debido a que se trabajó con una mezcla cuyas propiedades acústicas pueden variar; y iv) la estimación de la velocidad media del flujo, calculada de forma manual a partir del volumen recolectado en un intervalo de tiempo determinado. No obstante, considerando estas fuentes de incertidumbre, se establece que la técnica permite una medición confiable en este sistema con un buen ajuste.

**Figura 13.**

*Resultado pruebas preliminares: flujo en tubería mezcla agua-glicerina (66% agua, 33% glicerina p/p) con una viscosidad de 20.37 mPa·s.*

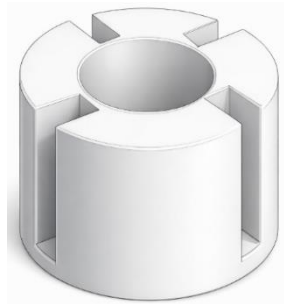


***Medición de perfiles de velocidad bajo CMR***

Para la medición de perfiles de velocidad bajo la aplicación de un campo magnético rotativo, se diseñaron y construyeron recipientes cilíndricos en polietileno de alta densidad de 31,06 mm de diámetro (Figura 14), similar a la utilizada en [14], [16], [85], que cuenta con ranuras que permiten la ubicación del sensor a un ángulo de  $10^\circ$ . Se seleccionó este material debido a su impedancia acústica lo que permitirá evitar reflexiones internas en la pared.

**Figura 14.**

*Configuración cilíndrica con ranuras para ubicación del sensor de ultrasonido a un ángulo de  $10^\circ$ .*



La geometría cilíndrica encaja perfectamente en el centro del devanado del estator del motor trifásico, como se observa en la Figura 15. Para garantizar condiciones de flujo uniforme y estable, el recipiente cuenta con una tapa del mismo material para evitar esfuerzos interfaciales. Este control de las condiciones de frontera es especialmente relevante en fluidos magnéticos sometidos a CMR, donde las tensiones magnetostáticas pueden generar inestabilidades interfaciales si la superficie libre no está confinada [12].

**Figura 15.**

*Montaje para medición de perfiles de velocidad de fluidos magnéticos bajo la aplicación de campos magnéticos rotativos.*



Las partículas en los fluidos de estudio se encuentran en el orden nanométrico, por lo tanto, fue necesario agregar micropartículas trazadoras (Copoliamida GRILTEX 2A P 80-160), con el fin de obtener señales ultrasónicas fuertes. Se ha establecido que el rango de partículas que permiten una buena medición de perfiles de velocidad está entre el rango 0,011-0,033 kg/L [98].

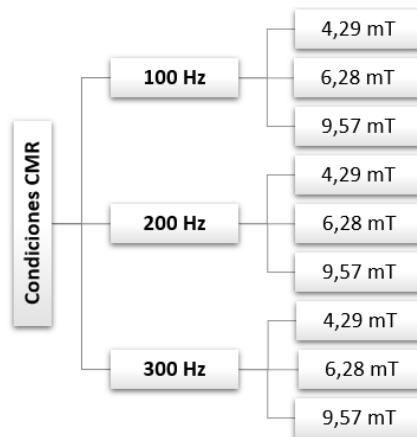
Cuando se aplica un CMR, las nanopartículas en el fluido magnético se alinean y se reorientan, generando fuerzas que inducen movimiento en el fluido circundante [14], [15]. Teniendo en cuenta que el flujo está en la dirección acimutal, el componente acimutal  $v_{\theta}$  de la velocidad se puede relacionar con la velocidad medida  $v_{\parallel}$  a través de la Ecuación 2 y Ecuación 3.

La distancia en donde inicia la medición o la longitud cerca al campo tiene en cuenta la velocidad del sonido, la frecuencia y radio del transductor. En este caso, se utilizan transductores ultrasónicos o “*ultrasound probes*” con frecuencia de emisión de 8 MHz. Es importante resaltar que el transductor es ubicado sobre la superficie externa del recipiente, por lo que la distancia entre la superficie del transductor ultrasónico y la del fluido es de aproximadamente 2mm.

Teniendo en cuenta la caracterización del CMR, la limitación de los equipos y las investigaciones previas [13], [14], [17] donde se ha demostrado que, en campos magnéticos moderados, la respuesta de ferrofluidos diluidos está fuertemente influenciada por la intensidad y geometría del campo aplicado, se definieron las condiciones experimentales del estudio donde se evaluó la respuesta de los fluidos magnéticos bajo tres valores de frecuencia a tres amplitudes de campo magnético (Figura 16).

**Figura 16.**

*Condiciones de amplitud de campo magnético y frecuencias utilizadas en la evaluación de perfiles de velocidad bajo CMR*



### ***Medición del flujo inducido por campo magnético de onda viajera***

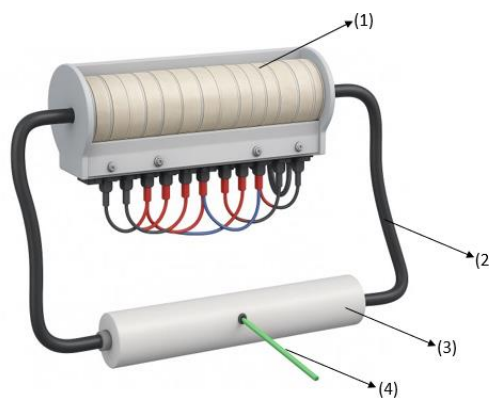
Estos experimentos fueron diseñados para evaluar la posibilidad de generar flujo por la aplicación de un campo magnético de onda viajera sobre los fluidos magnéticos estudiados, y en el caso de generar flujo, evaluar la magnitud como función de la frecuencia e intensidad del campo. El flujo fue obtenido por integración del perfil de velocidad en una sección de tubería contigua a la zona de influencia del campo magnético de onda viajera. El sistema consistió en un sistema de

flujo cerrado compuesto por el embobinado electromagnético descrito en la sección 4.3.2 que se conecta con tubo recto de polietileno de alta densidad de 20 mm de diámetro interno, 30 mm de diámetro externo y 33,5 cm de longitud. El espesor de la pared del tubo permite ubicar un sensor de ultrasonido a un ángulo de 70° para la medición de perfiles de velocidad por la técnica de medición por ultrasonido utilizando el equipo DOP 4000. Es necesario tener en cuenta que en la sección del embobinado no es posible medir el perfil de velocidad debido a la falta de espacio para ubicar el sensor de ultrasonido.

La conexión entre el embobinado y la geometría cilíndrica se realizó a través de una manguera de poliuretano de 12,7 mm de diámetro externo y 7,5 mm de diámetro interno, con una presión de trabajo de 100 psi a 20°C. La manguera pasa por el embobinado de manera recta 42,7 cm y en los extremos para la conexión con el tubo, se disponen tramos de 29 cm en configuración curvada como se observa en la Figura 17.

**Figura 17.**

*Montaje para medición de perfiles de velocidad en campo magnético de onda viajera.*

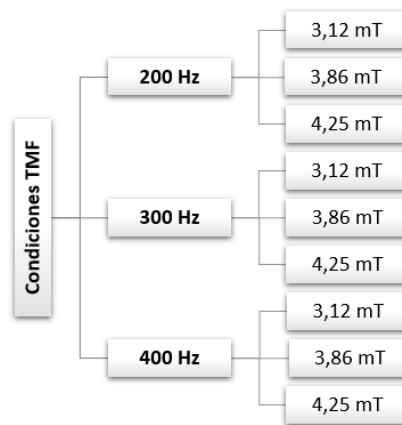


*Nota.* El montaje consiste en: 1) embobinado electromagnético, 2) manguera de poliuretano de  $\frac{1}{4}$ ", 3) tubería cilíndrica de diámetro 1,9 cm que permite la ubicación de 4) sensor ultrasónico.

Los valores de intensidad del campo magnético y frecuencia se seleccionaron tomando como referencia los resultados previamente reportados por Mao *et al.* [19], las limitaciones de los equipos y la caracterización del embobinado electromagnético. Se establecieron tres valores de amplitud de campo magnético que se evaluarán a tres valores de frecuencia (Figura 18).

**Figura 18.**

*Condiciones de amplitud de campo magnético y frecuencias utilizadas en la evaluación de perfiles de velocidad bajo TMF*



Considerando que las velocidades de flujo esperadas tanto bajo la acción de campos magnéticos rotativos como campos magnéticos de onda viajera eran bajas, la configuración del equipo se realizó con parámetros específicos que optimizaron la calidad de la señal. Se utilizó una frecuencia de repetición alta, que incrementó la resolución temporal; un número de emisiones por perfil moderado, que equilibró la calidad de los datos con el tiempo de adquisición; y una sensibilidad elevada, indispensable para captar los ecos generados por partículas en suspensión en condiciones de bajo caudal. Asimismo, el número y tamaño de gates se seleccionaron en función de las dimensiones del sistema cilíndrico y la ubicación del transductor. Esta configuración permitió reducir ruidos y ecos indeseados, obteniendo perfiles de velocidad reproducibles.

## 5 Resultados

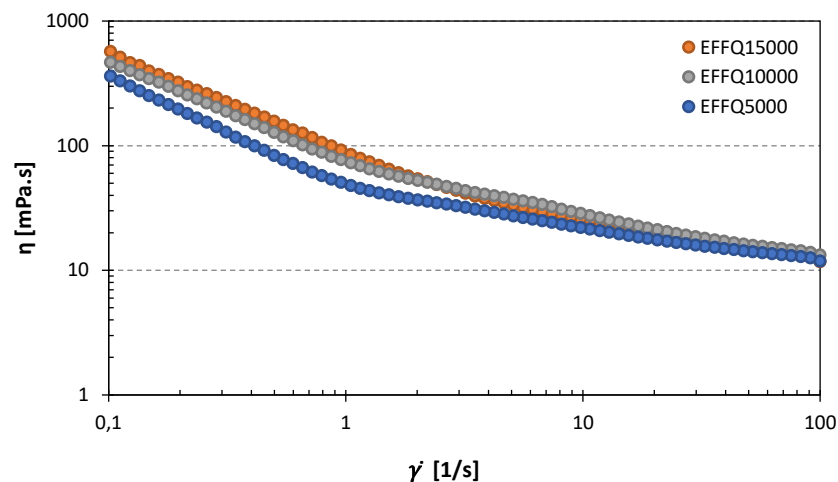
### 5.1 Evaluación emulsiones magnéticas a base ferrofluido

#### 5.1.1 Caracterización de la emulsión a base ferrofluido

Se prepararon tres emulsiones magnéticas denominadas  $E_{FF-Q\ 5000}$ ,  $E_{FF-Q\ 10000}$  y  $E_{FF-Q\ 15000}$ . Como se observa en la Figura 19, estas emulsiones exhiben un comportamiento reofluidizante, es decir, una disminución continua y progresiva de la viscosidad al aumentar la tasa de corte en el rango evaluado ( $0,1$  a  $100\ s^{-1}$ ). Este comportamiento es característico de emulsiones, donde las gotas de la fase dispersa se deforman y reorganiza progresivamente bajo el esfuerzo aplicado. Asimismo, se observó que el incremento en la concentración de nanopartículas produce un aumento moderado en la viscosidad, siendo  $E_{FF-Q\ 15000}$  la emulsión más viscosa en todo el rango evaluado.

**Figura 19.**

*Curvas de flujo emulsiones a base ferrofluido*

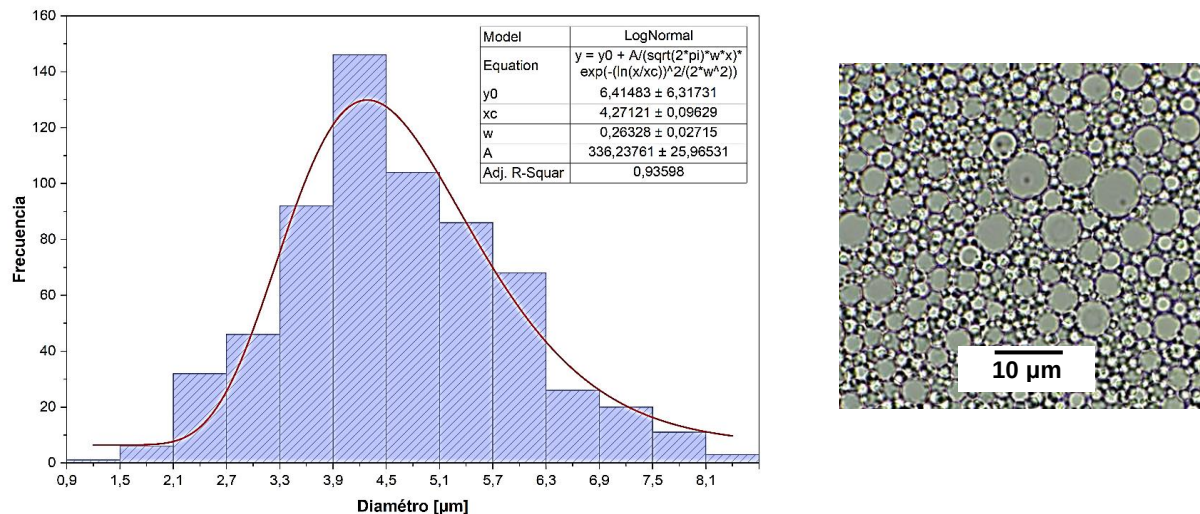


Por otro lado, se realizaron ensayos de microscopía óptica utilizando un microscopio Trinocular Motic Panthera C2, con una cámara digital Moticam BMH4000X y el software *ImageJ*

para el análisis de las imágenes. Las capturas se realizaron con una ampliación de 100X. A partir de estas, se analizaron en promedio 400 gotas por imagen para determinar el tamaño de gota obteniéndose un diámetro promedio de  $4,27 \pm 0,096 \mu\text{m}$ . La distribución de tamaño de gota (Figura 20) se ajustó satisfactoriamente a un modelo Log-Normal ( $R^2 = 0,936$ ), evidenciando una distribución polidispersa con una mayor frecuencia de gotas en el rango de 3,9 a 4,5  $\mu\text{m}$ . La presencia de una “cola” hacia diámetros mayores indica una distribución asimétrica, característica común en procesos de emulsificación donde coexisten poblaciones de gotas de distintos tamaños debido a la dinámica de ruptura y coalescencia durante la preparación.

**Figura 20.**

*Microscopia emulsión magnética  $E_{FF-Q15000}$*



#### 5.1.1.1 Caracterización magnética

Las curvas de magnetización  $M(H)$ , de los núcleos magnéticos dentro de la emulsión se midieron utilizando un magnetómetro de muestra vibrante (VSM) de la serie Lake Shore 7407-S a temperatura ambiente ( $T=300 \text{ K}$ ). La caracterización magnética se hizo a la muestra  $E_{FF-Q 5000}$ . El

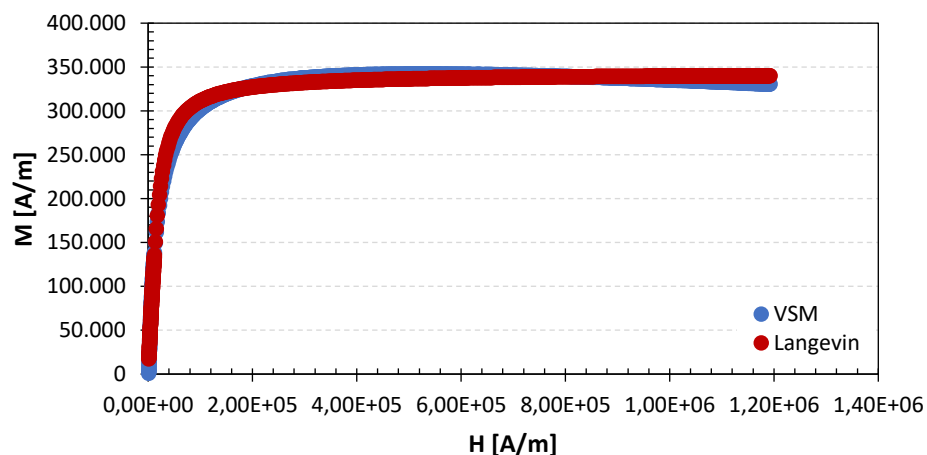
ajuste a los volúmenes magnéticos se realizó suponiendo partículas esféricas con una magnetización de 58 emu/g ( $2.818 \times 10^5$  A/m), basándose en estimaciones previas.

Como se muestra en la Figura 21, las curvas de histéresis mostraron un comportamiento totalmente reversible, con ramas ascendentes y descendentes prácticamente superpuestas en todo el rango de campos aplicados. La coercitividad, la histéresis y la magnetización remanente medibles, cercanas a cero, eran compatibles con el hecho de que el sistema permaneciera magnéticamente desbloqueado a 300 K, asemejándose así a un conjunto superparamagnético polidisperso sin interacción. Por tanto, resulta válido el uso del modelo de Langevin para evaluar el comportamiento de la magnetización.

De los valores obtenidos se establece que el diámetro promedio de las nanopartículas es 11,308 nm, la magnetización de saturación es de 342.865,5 A/m y la susceptibilidad magnética inicial, obtenida de la pendiente en la región de bajos campos ( $H < 10^4$  A/m), donde la respuesta magnética es esencialmente lineal, es de  $\chi_0 = 12,046$ .

**Figura 21.**

*Curva de magnetización  $M(H)$  de emulsión de ferrofluido*



### 5.1.2 Evaluación del torque inducido por CMR en emulsiones magnéticas

Inicialmente, se realizaron las medidas del torque generado por las emulsiones magnéticas sobre el área perpendicular a la dirección radial de un cilindro a diferentes valores de la intensidad y frecuencia de campos magnéticos rotativos.

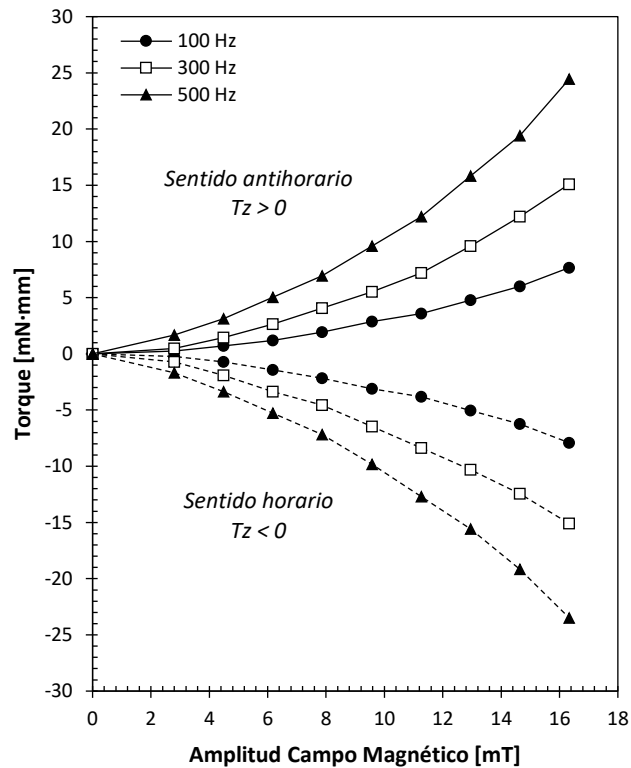
Con el propósito de verificar que el viscosímetro permite registrar el torque tanto en valores positivos como negativos, y de confirmar la simetría de la respuesta magnética del sistema respecto al sentido de rotación del campo, se determinó el torque inducido en la emulsión E<sub>FF-Q15000</sub> bajo un CMR aplicado primero en el sentido horario y posteriormente en el sentido antihorario. En este caso el torque se midió sobre la superficie interna de la pared de un cilindro completamente lleno de fluido magnético, configuración análoga a la empleada por Chaves *et al.* [13] para ferrofluidos. Estos autores reportaron que la dirección del campo rotativo se fijó en sentido horario para obtener mediciones de torque positivas y aprovechar el rango completo del instrumento, verificando que invertir la dirección de rotación del campo simplemente invertía la dirección del torque y del flujo.

Los resultados del torque como función de la intensidad, frecuencia y sentido de rotación del CM se presentan en la Figura 22. Como se observa, cuando el CMR se desplaza en el sentido horario ( $\theta < 0$ ), el torque medido fue negativo ( $T_z < 0$ ), indicando que el fluido ejerce un torque sobre la pared del cilindro que tiende hacerlo rotar en el sentido horario. Por el contrario, al aplicar el CMR en sentido antihorario ( $\theta > 0$ ), el torque resultó con la misma magnitud y corota con el campo ( $T_z > 0$ ). En conclusión, cuando la emulsión está dentro del cilindro el torque generado sobre la superficie por la emulsión magnética tiende a girar el cilindro en la misma dirección de rotación del CM.

El comportamiento observado para el torque concuerda, cualitativamente, con el reportado para ferrofluidos [13], [36] y cuyo mecanismo se ha explicado de la siguiente manera: cuando el campo magnético rota, arrastra los momentos magnéticos de las nanopartículas fuera de su posición de equilibrio, generando un desfase entre la magnetización del fluido y el campo aplicado. Este desfase produce un torque magnético neto en las nanopartículas haciéndolas rotar en la misma dirección del CM, que se transmite a la superficie del cilindro por dos mecanismos diferentes: i) por los esfuerzos viscosos generados por el flujo inducido por el campo asociados a la parte simétrica del tensor de esfuerzos, y ii) por la rotación de las NPs en contacto directo con la superficie, correspondiente a la parte antisimétrica. Se puede establecer que el primero es depreciable con respecto al segundo debido a la baja velocidad y viscosidad efectiva de la emulsión magnética. Por otro lado, al cambiar el sentido de rotación del campo, las partículas simplemente rotaran en el sentido contrario siguiendo el campo, lo que se traduce en una fuerza sobre la superficie.

**Figura 22.**

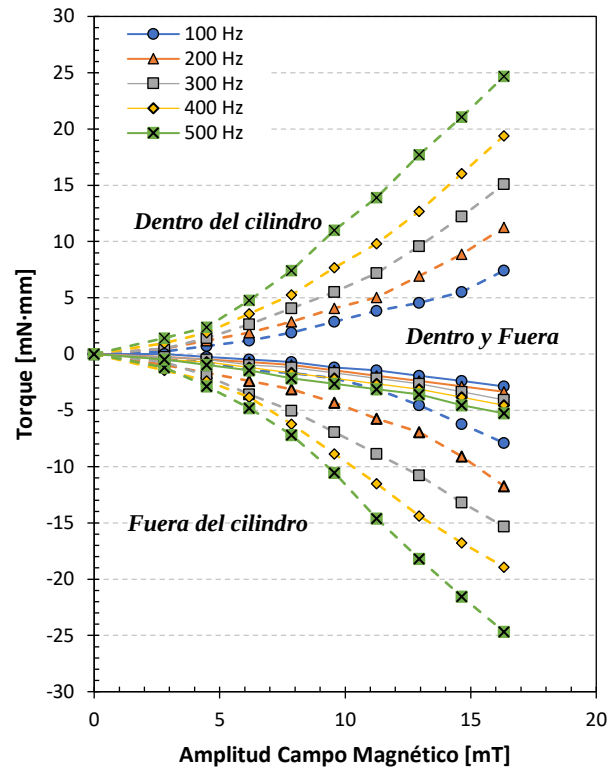
*Medición del torque para  $E_{FF-Q 15000}$  bajo CMR en sentido de las manecillas del reloj (torque negativo) y en sentido en contra de las manecillas del reloj (torque positivo) a diferentes valores de frecuencia y amplitud de campo magnético.*



En la Figura 23, se reportan las medidas de torque para la emulsión  $E_{FF-Q 15000}$  en los tres escenarios evaluados bajo un CMR girando en sentido antihorario. En todos los casos se observó que el torque aumenta en forma monotónica con la amplitud y la frecuencia del campo magnético similar a lo observado en ferrofluidos [13].

**Figura 23.**

*Medición del torque para la emulsión  $E_{FF-Q 15000}$ .*



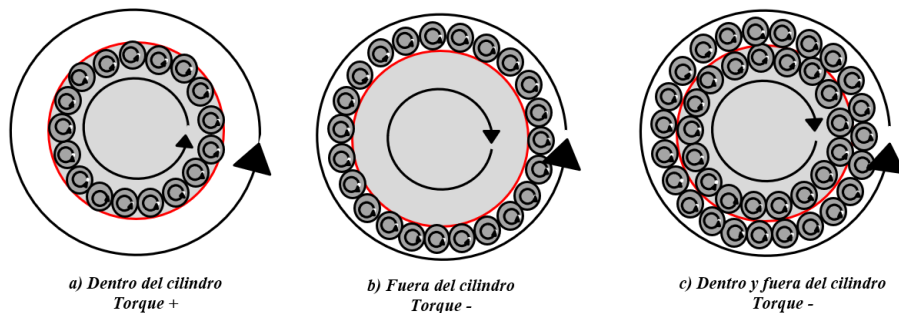
*Nota.* Medición de torque cuando 1) el husillo está lleno de emulsión, 2) el husillo está rodeado de fluido y 3) el husillo está completamente lleno y rodeado de emulsión. Campo girando en las manecillas del reloj.

Cuando el husillo se encuentra completamente lleno de la emulsión (escenario 1), el torque medido es positivo, alcanzando un valor máximo de aproximadamente 24,32 mN·mm a 16 mT y 500 Hz. Por el contrario, cuando el eje está rodeado externamente por la emulsión (escenario 2), el torque registrado es negativo con una magnitud ligeramente superior (-24,67 mN·mm), lo que indica que el fluido exterior ejerce un momento sobre la pared del cilindro en sentido opuesto al caso del fluido en el interior. Este resultado concuerda con el hecho que el torque es proporcional al valor del área superficial en contacto con el fluido:  $\iint \mathbf{r} \times (\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{n}) dA$ ; y que la pequeña diferencia

en la magnitud de los torques evaluados en las superficies ubicadas en  $R_1$  y  $R_2$  es congruente con la pequeña diferencia de las respectivas áreas. Por otro lado, el signo contrario en el valor del torque es debido al cambio de orientación sobre la cual se aplica el esfuerzo (“*Cauchy's fundamental lemma*”). El resultado más notable corresponde al escenario 3, donde el eje se encuentra simultáneamente lleno y rodeado de emulsión. En este caso, el torque neto es negativo y de magnitud considerablemente menor ( $-5,27 \text{ mN}\cdot\text{mm}$  a 500 Hz y 16 mT) a la de los escenarios 1 y 2. El menor valor del torque evidencia el balance (o la suma), de las contribuciones al torque por los fluidos en contacto con las superficies interior y exterior (véase la Figura 24). La pequeña diferencia residual negativa sugiere una ligera dominancia de la contribución exterior, asociada a la mayor área efectiva de interacción con el fluido. Este comportamiento es análogo al reportado por Rinaldi *et al.* [85] para ferrofluidos, quienes observaron que la configuración simultánea lleno-rodeado produce una reducción significativa del torque neto respecto a los escenarios individuales.

**Figura 24.**

*Representación esquemática de los tres escenarios experimentales para la medición del torque*

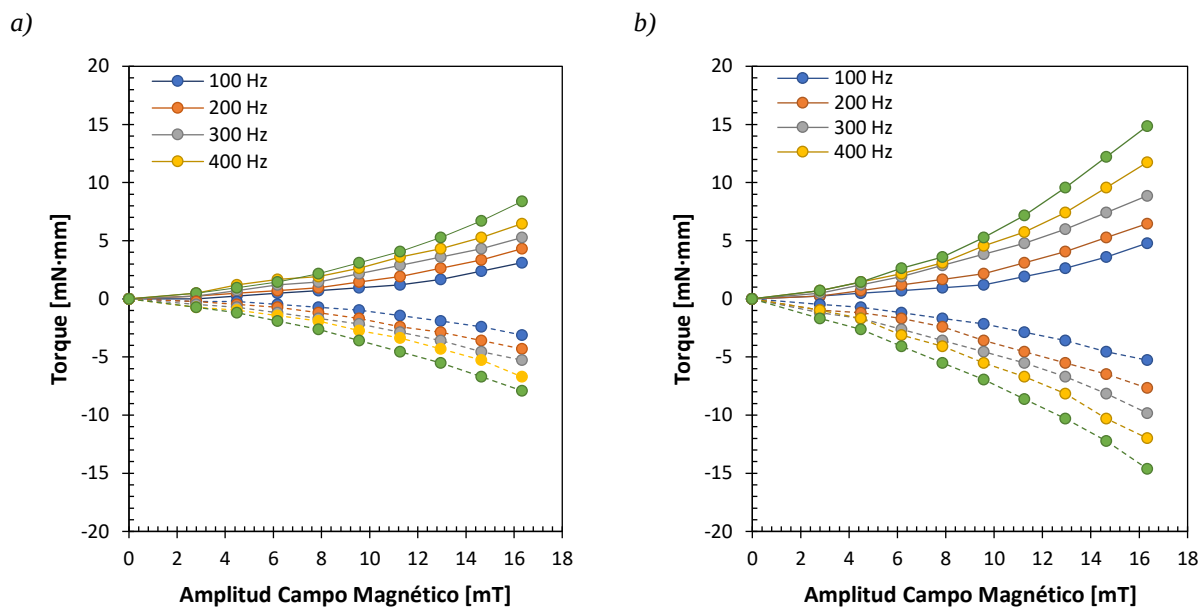


*Nota.* Torque inducido por un campo magnético rotativo sobre un eje cilíndrico: a) fluido en el interior del eje, torque positivo; b) fluido en el exterior del eje, torque negativo y c) fluido en el interior y exterior del eje, torque neto negativo.

Posteriormente, se evaluó el efecto de la concentración de las NPs (5.000 y 10.000 ppm) sobre la magnitud del torque. Esto fue hecho usando CMRs en sentido horario en dos configuraciones geométricas: eje completamente lleno de emulsión (escenario 1, torque positivo) y eje completamente rodeado de emulsión (escenario 2, torque negativo). Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 25, se observa que la magnitud del torque incrementa de manera proporcional con la concentración de nanopartículas, lo que evidencia una posible mayor transferencia de momento angular hacia el fluido a medida que se incrementa el contenido de material magnético. Este incremento progresivo del torque con la concentración de nanopartículas es coherente con el marco teórico de la ferrohidrodinámica, según el cual el torque magnético volumétrico es proporcional a la magnetización del fluido [12], [45].

**Figura 25.**

*Medición de torque dentro y fuera del cilindro para emulsión magnética a)  $E_{FF-Q5000}$  y b)  $E_{FF-Q10000}$  a diferentes valores de frecuencia y amplitud de campo magnético.*



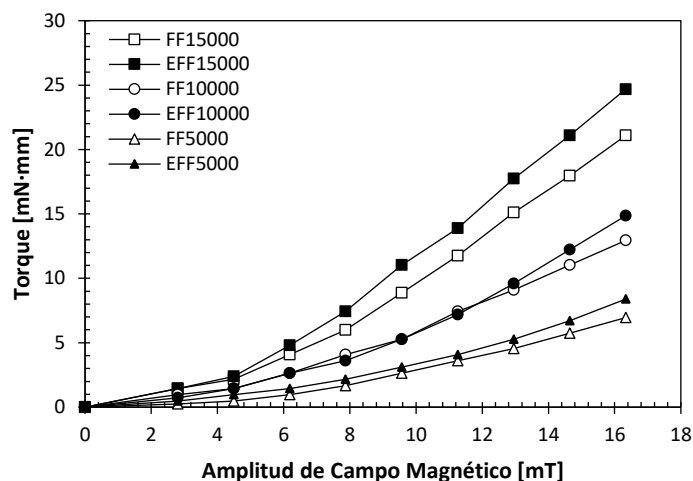
Con el fin de comparar la magnitud del torque generado por las emulsiones magnéticas respecto a la de un ferrofluido con la misma concentración de NPs y bajo la misma configuración experimental, se graficaron los resultados experimentales en la Figura 26. Es claro que ambos sistemas tienen un comportamiento cualitativamente similar respecto al efecto de la intensidad del campo y frecuencia sobre el torque, con la diferencia de que la magnitud es mayor en el caso de las emulsiones. Similares resultados han sido reportados para cambios de viscosidad de emulsiones bajo campos magnéticos estáticos en comparación con los ferrofluidos bases [24].

Estos resultados son coherentes con lo reportado por Zakinyan & Zakinyan [79], quienes atribuyeron dicho incremento a la rotación colectiva de las microgotas, las cuales actúan como unidades magnéticas de mayor escala que las nanopartículas individuales. No obstante, la magnitud de este efecto es condicionado por la deformabilidad de las gotas: aquellas con menor tensión interfacial se aplanan en el plano de rotación del campo, aumentando su área efectiva de interacción magnética y amplificando el torque transferido. Por el contrario, las gotas más rígidas mantienen una morfología esférica, reduciendo así su contribución interfacial al torque y su contribución interfacial al torque disminuye.

Adicionalmente, dado que los esfuerzos antisimétricos son proporcionales a la viscosidad vórtice  $\zeta$ , la cual a su vez escala con la fracción volumétrica de partículas y la viscosidad del fluido portador [12], la mayor viscosidad efectiva de la emulsión respecto al ferrofluido puede contribuir directamente a amplificar el torque transferido a la pared del cilindro.

**Figura 26.**

*Comparación medición de torque dentro del cilindro para ferrofluido y emulsión magnética de ferrofluido bajo diferentes valores de amplitud de campo magnético y una frecuencia de 500 Hz.*



### 5.1.3 Perfiles de Velocidad en CMR para Emulsiones Magnéticas

Como se mencionó en secciones anteriores, se realizaron las mediciones de perfiles de velocidad mediante la técnica de *Velocimetría Doppler Ultrasónica Pulsada*, con el fin de caracterizar detalladamente el comportamiento del flujo de la emulsión inducido por CMRs.

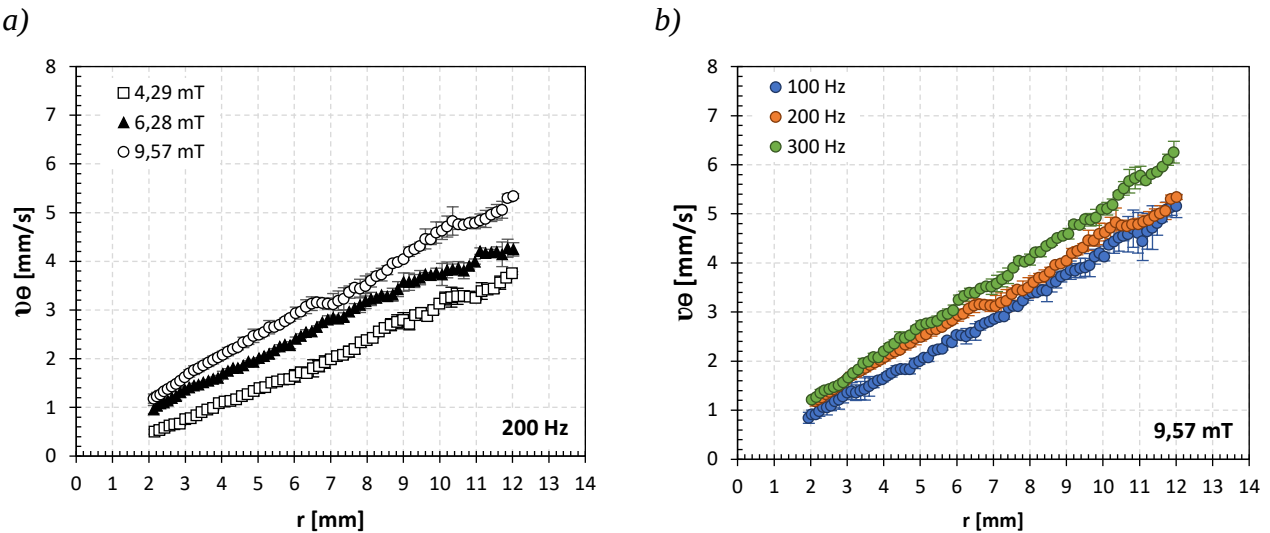
En la Figura 27, se muestran los perfiles de velocidad de la emulsión  $E_{FF-Q 5000}$ . La Figura 27a muestra los flujos inducidos por campos magnéticos rotativos de diferentes intensidades (4,29 mT, 6,28 mT y 9,57 mT) a una frecuencia de 200 Hz. Por su parte, en la Figura 27b expone los perfiles para diferentes valores de la frecuencia (100 Hz, 200Hz y 300 Hz), manteniendo fija la intensidad del campo en 9,57 mT.

Los resultados evidencian que la aplicación del campo magnético induce el flujo de la emulsión magnética, y que la velocidad depende de ambos parámetros del campo. Un hallazgo

fundamental de estos experimentos es la demostración, por primera vez, de que un CMR induce el flujo en emulsiones magnéticas de manera análoga a lo observado en ferrofluidos [13], [15], en el sentido de que dicha respuesta dinámica depende de las características del campo.

**Figura 27.**

*Perfiles de velocidad de  $E_{FF-Q 5000}$  bajo CMR*



*Nota.* a) Perfiles de velocidad a diferentes intensidades de campo magnético y una frecuencia de 200 Hz y  
b) Perfiles de velocidad a diferentes frecuencias y una intensidad de campo magnético de 9,57 mT.

Una evaluación más detallada de la Figura 27 evidencia que la magnitud del flujo incrementa con la intensidad del campo magnético (H) y la frecuencia ( $\Omega_f$ ), pero con diferente dependencia, siendo más claro e importante el efecto de la intensidad del campo.

Los perfiles obtenidos muestran que la velocidad incrementa progresivamente con el radio hasta aproximarse a la pared del cilindro, donde desciende abruptamente a cero, en concordancia con la condición de no deslizamiento. En el marco de la ferrohdrodinámica [12], esta linealidad confirma que el mecanismo impulsor del flujo no es una pared móvil, sino un torque volumétrico

distribuido uniformemente en el seno del fluido. En este escenario, cada gota actúa posiblemente como microrotor que, al girar bajo la acción del campo rotativo, transfiere momento angular al fluido circundante por acoplamiento viscoso, generando colectivamente el flujo observado.

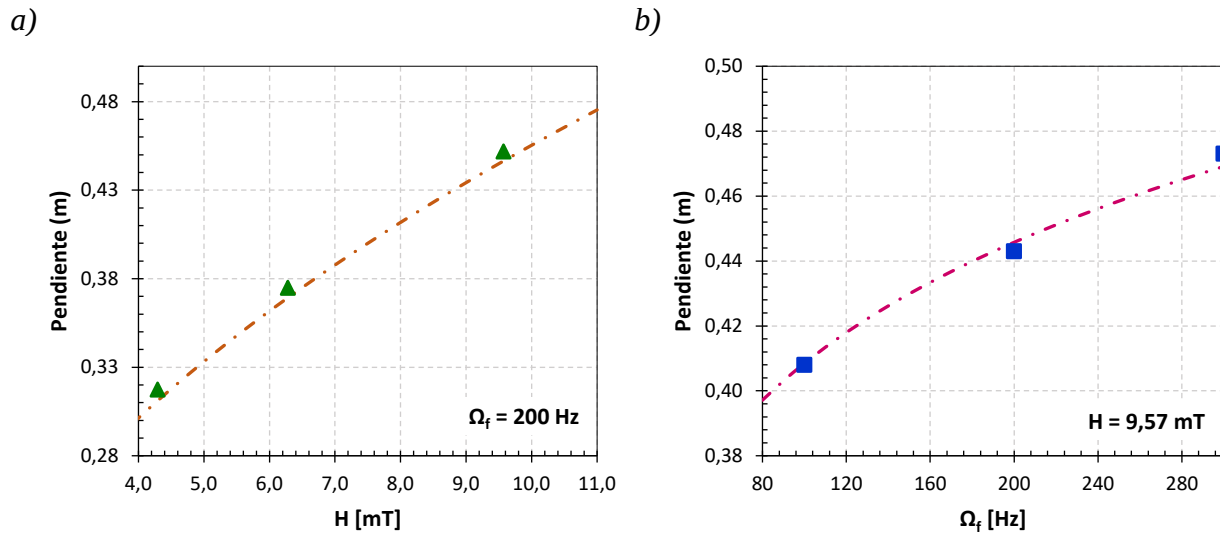
Con el fin de cuantificar el efecto de ambas variables sobre el flujo, se estimó el valor de las pendientes de cada uno de los perfiles de la Figura 27b y se graficaron en la Figura 28. Se puede observar que, pese al limitado número de datos, la dependencia sigue una relación de potencia del tipo:

$$m_{H-const} \sim \Omega_f^{n1} \text{ y } m_{\Omega_f-const} \sim H^{n2}$$

En este contexto, la pendiente constituye una medida directa de la intensidad del flujo inducido magnéticamente, y su variación con la frecuencia permite evaluar la eficiencia de la transferencia de torque desde las gotas de ferrofluido hacia la fase continua de la emulsión. Si bien se registró un incremento en la velocidad máxima alcanzada, con un valor de 5,84 mm/s a 300 Hz, las diferencias entre los perfiles son moderadas y el comportamiento no es monótono con la frecuencia, dado que la velocidad angular aparente a 200 Hz resulta inferior a la de 100 Hz. Este comportamiento es consistente con la hipótesis de que el tiempo de relajación efectivo de las gotas de ferrofluido en la emulsión es significativamente mayor que el de las nanopartículas en el ferrofluido. Este resultado sugiere que la frecuencia no constituye un parámetro dominante en este sistema, a diferencia de lo reportado para ferrofluidos homogéneos, donde la dependencia con la frecuencia es más pronunciada y predecible según el modelo de Shliomis [45].

**Figura 28.**

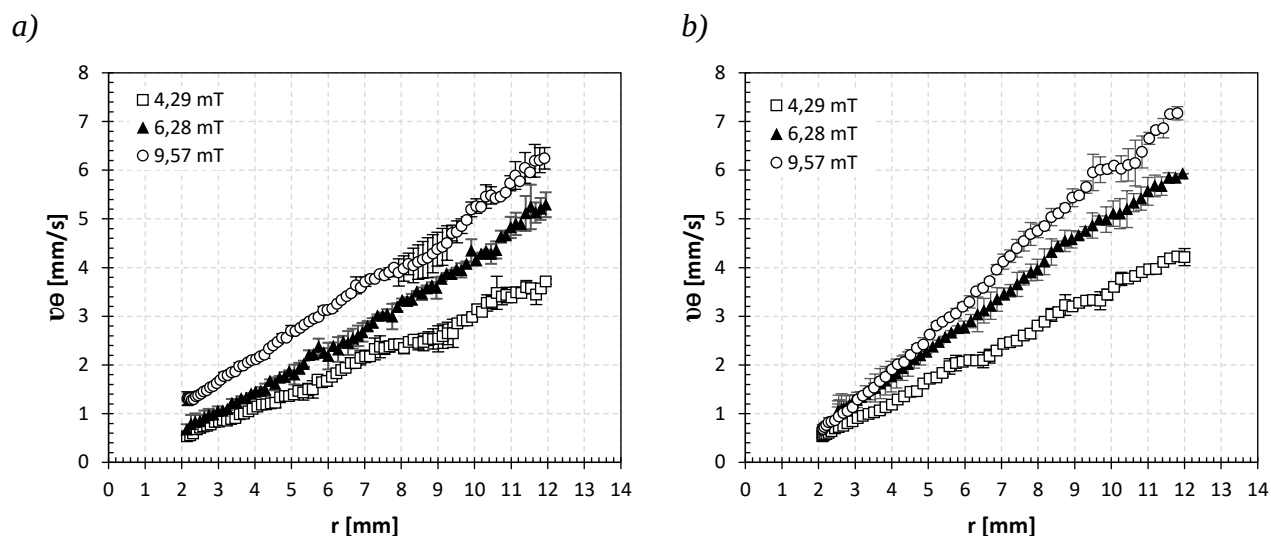
*Ajuste de ley de potencia de la pendiente  $m$  en función de a)  $H$  y b)  $\Omega_f$*



Adicionalmente, se evaluó el efecto simultáneo de la intensidad del campo y de la concentración de NPs (10.000 y 15.000 ppm) sobre el perfil de velocidad de las emulsiones (Figura 29). De manera consistente con los resultados obtenidos previamente, se observó que la velocidad aumenta al incrementar la amplitud del campo magnético aplicado alcanzando velocidades máximas de 7,82 mm/s para la emulsión  $E_{FF-Q15000}$  y 6,84 mm/s para la emulsión con  $E_{FF-Q10000}$  a una amplitud de campo de 9,57 mT y una frecuencia de 200 Hz.

**Figura 29.**

Perfiles de velocidad de a)  $E_{FF-Q\ 10000}$  y b)  $E_{FF-Q\ 15000}$  a diferentes valores de amplitud de campo magnético y una frecuencia de 200 Hz.

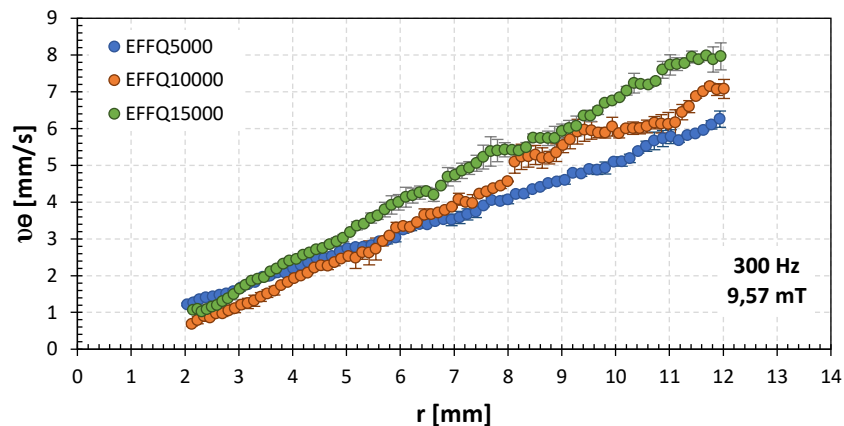


Con el fin de evaluar la influencia de la concentración de nanopartículas sobre el flujo inducido, se compararon los perfiles de velocidad obtenidos a una frecuencia de 300 Hz y una amplitud de campo magnético de 9,57 mT, cuyos resultados se presentan en la Figura 30. La velocidad máxima alcanzada por cada una de las emulsiones sigue el mismo orden de la concentración de NPs de la siguiente manera: 8,06 mm/s para la emulsión con 15.000 ppm; 7,56 mm/s para la emulsión con 10.000 ppm y 6,21 mm/s para la emulsión de 5.000 ppm. Este comportamiento puede explicarse al considerar que una mayor concentración de nanopartículas en la fase dispersa incrementa la magnetización efectiva de la emulsión, dado que la respuesta magnética del sistema depende directamente de la cantidad de material magnético presente. En consecuencia, un mayor contenido de nanopartículas se traduce en un torque magnético por unidad de volumen mayor, intensificando la transferencia de momento angular desde la fase dispersa hacia la fase continua.

Estos resultados concuerdan con lo reportado para ferrofluidos; en particular, Chaves *et al.* [15] observaron que la viscosidad rotacional efectiva de un ferrofluido, y por ende su capacidad de transferir torque, aumenta con la concentración de nanopartículas. Así mismo, Rinaldi *et al.* [85] demostraron experimentalmente que el flujo inducido por campos magnéticos rotativos en ferrofluidos se intensifica con la concentración de la fase magnética, lo que respalda la tendencia observada en las emulsiones estudiadas.

### Figura 30.

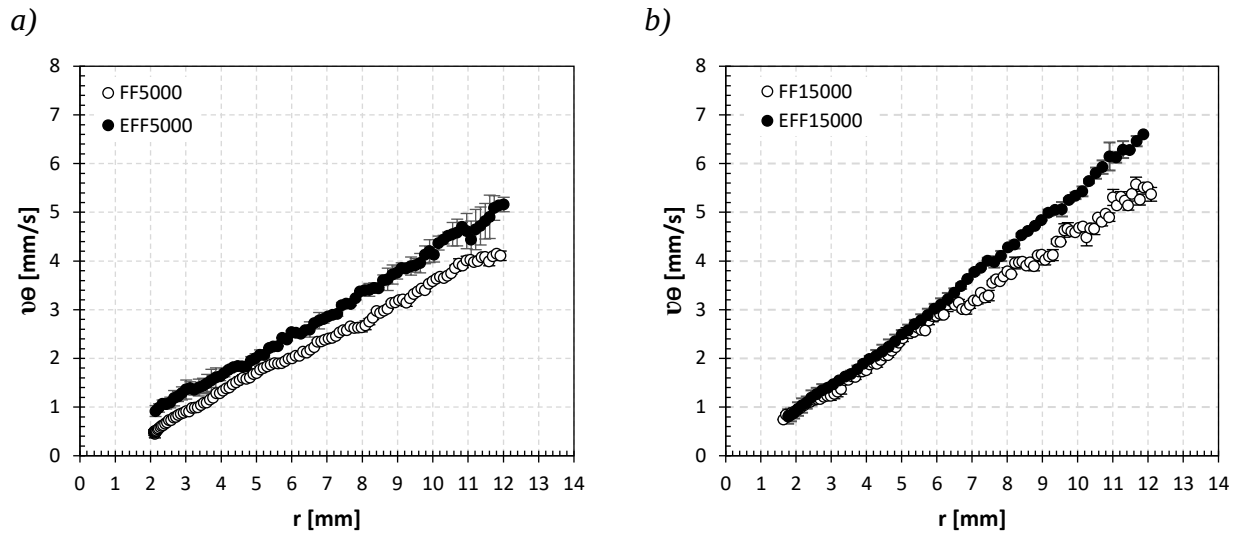
*Perfiles de velocidad de emulsiones magnéticas bajo un campo magnético de 9,57 mT y una frecuencia de 300 Hz.*



Finalmente, en la Figura 31, se comparan los perfiles de velocidad para un ferrofluido y una emulsión de igual concentración de NPs (5.000 ppm), obtenidos a una frecuencia de 100Hz y una intensidad de campo magnético de 9,57 mT. De manera cualitativa, ambos sistemas exhiben un comportamiento de flujo similar, aunque la emulsión alcanza una ligeramente mayor velocidad de flujo (1,2 veces la del FF-Q). Este resultado sorprende, teniendo en cuenta las diferencias morfológicas entre ambos sistemas (suspensión vs. emulsión) y de que la viscosidad de la emulsión

magnética ( $\approx 20 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ) es aproximadamente 7,8 veces mayor que la del ferrofluido base ( $\approx 2,57 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ).

No obstante, en el flujo inducido por campos magnéticos rotativos, la velocidad resultante no está determinada únicamente por la viscosidad efectiva del fluido, sino por el balance entre el torque magnético volumétrico generado y la resistencia viscosa del sistema [36], [85]. El hecho de que la emulsión, siendo más viscosa, alcance una velocidad superior a la del ferrofluido, indica que el torque magnético efectivo generado en la emulsión es considerablemente mayor, compensando el efecto de su mayor viscosidad. Esto implica que la eficiencia de transferencia de momento angular en la emulsión podría superar a la del ferrofluido bajo las mismas condiciones de campo. Una posible explicación radica en el mecanismo interfacial adicional de transferencia de torque asociado a la dinámica de las gotas deformables. Zakinyan & Zakinyan [79], demostraron experimentalmente que las gotas de ferrofluido se deforman y rotan bajo la acción de un campo magnético rotativo, lo que favorece una transmisión más eficiente del momento angular y se traduce en mayores velocidades de flujo bajo las mismas condiciones de frecuencia y amplitud del campo.

**Figura 31.***Perfiles de velocidad de Ferrofluido y Emulsión Magnética a 100Hz y 9,57 mT*

Con base en las similitudes del comportamiento de flujo entre emulsiones magnéticas y ferrofluidos, se puede suponer que el mecanismo de flujo de las emulsiones podría ser similar al de estos últimos. Como se mencionó en la sección del marco teórico, según nuestro mejor conocimiento, la teoría de difusión del momento angular interno es la que mejor describe las características del flujo de ferrofluidos bajo campos magnéticos dependientes del tiempo. En tal caso, se propone que el mecanismo impulsor del flujo es el torque volumétrico actuando sobre las NPs, el cual genera su rotación en el fluido y la consecuente difusión del momento angular interno hacia el fluido portador dentro de la gota. De acuerdo con esta teoría, parte del momento angular interno se convierte en momento lineal, generando así el flujo. El flujo dentro de la gota se transmite a la fase continua de la emulsión a través de la interfase. A diferencia de los ferrofluidos, donde las NPs y sus agregados son rígidos, en el caso de las emulsiones magnéticas deben tenerse en cuenta la rigidez de la interfase y la relación entre fuerzas interfaciales y fuerzas hidrodinámicas para predecir el flujo.

#### 5.1.4 *Medición flujo de emulsiones magnéticas bajo campo magnético de onda viajera*

En la sección anterior se evaluó el flujo de emulsiones magnéticas generado por CMRs con el fluido contenido en un recipiente cilíndrico. Sin embargo, aunque esta configuración es beneficiosa para la caracterización del flujo desde un punto de vista del estudio fundamental del fenómeno, su geometría limita la posibilidad de escalar el sistema hacia aplicaciones de bombeo y transporte de fluidos en tubería. Por tal razón, en esta sección se realizó la evaluación del flujo de emulsiones magnéticas y ferrofluidos inducido por campos magnéticos de onda viajera (TMF, por sus siglas en inglés).

Dicha caracterización se realizó mediante la medición de perfiles de velocidad en la sección recta de un tubo ubicada fuera de la zona de aplicación de campo magnético. Esto se debió a que no era posible ubicar el transductor ultrasónico dentro de la zona de influencia del campo, tal como se detalló en la sección de metodología 4.3.2.

En la Figura 32 se muestran los resultados obtenidos tras la aplicación de campos magnéticos de onda viajera sobre las emulsiones  $E_{FF-Q}$ . *El hallazgo central de esta sección es la comprobación de que se puede inducir el flujo de la emulsión con la única acción de un campo magnético de onda viajera.* Sin embargo, a diferencia del caso del flujo del CMR en el cilindro que es estrictamente asociado a torques magnéticos, en este caso también debe considerarse la fuerza magnética volumétrica ( $\mathbf{f} = \mu_0 \mathbf{M} \cdot \nabla \mathbf{H}$ ) generada por la no uniformidad del campo en dirección axial.

La idea de que las fuerzas y los torques magnéticos actúan simultáneamente para mover un ferrofluido fue estudiada experimentalmente por Chaves *et al.* [15], en el flujo entre cilindros concéntricos bajo campos magnéticos rotantes, y numéricamente por Mao & Koser [18] para el

caso de campos magnéticos de onda viajera, modelando el flujo en un canal de placas paralelas. La simulación predice que, incluso ignorando la difusión del momento angular interno ( $\eta' = 0$ ), el fluido no permanece estático: sigue existiendo un bombeo, aunque de baja magnitud, impulsado exclusivamente por la fuerza magnética. Sin embargo, al incorporar la difusión del momento angular, incluso con valores extremadamente bajos de viscosidad de spin (en el orden de  $10^{-9}$  a  $10^{-6}$  kg/(m·s)) el flujo crece considerablemente. Este resultado resalta el rol sinérgico del torque magnético y la difusión del momento angular interno en la generación del flujo. No obstante, esta predicción numérica requiere validación experimental directa dentro del rango de parámetros explorados.

Un resultado de particular importancia metodológica en nuestras medidas es que los perfiles de velocidad exhiben una distribución parabólica ( $R^2 = 0,98$ ). Esta distribución es característica del flujo de Hagen-Poiseuille en régimen laminar desarrollado, que corresponde al perfil de velocidad esperado en esta zona del sistema de flujo. Adicionalmente, la observación de simetría axial del perfil nos permite determinar el caudal en la sección completa del tubo.

En la Figura 32 se presentan los perfiles de velocidad medidos para las tres emulsiones:  $E_{FF-Q\ 5000}$  (a),  $E_{FF-Q\ 10000}$  (b) y  $E_{FF-Q\ 15000}$  (c), a una frecuencia constante de 400Hz bajo tres intensidades de campo magnético. Además, cada grafica incluye los valores de caudal respectivos, calculados por integración de los perfiles de velocidad experimentales, los cuales son graficados en la Figura 32d para facilitar su análisis.

Los resultados muestran una tendencia monótona creciente del flujo con la intensidad del campo magnético para las tres emulsiones, de manera similar a la observada bajo CMR. Al realizar un ajuste potencial de cada una de las curvas de la Figura 32d, se obtiene:

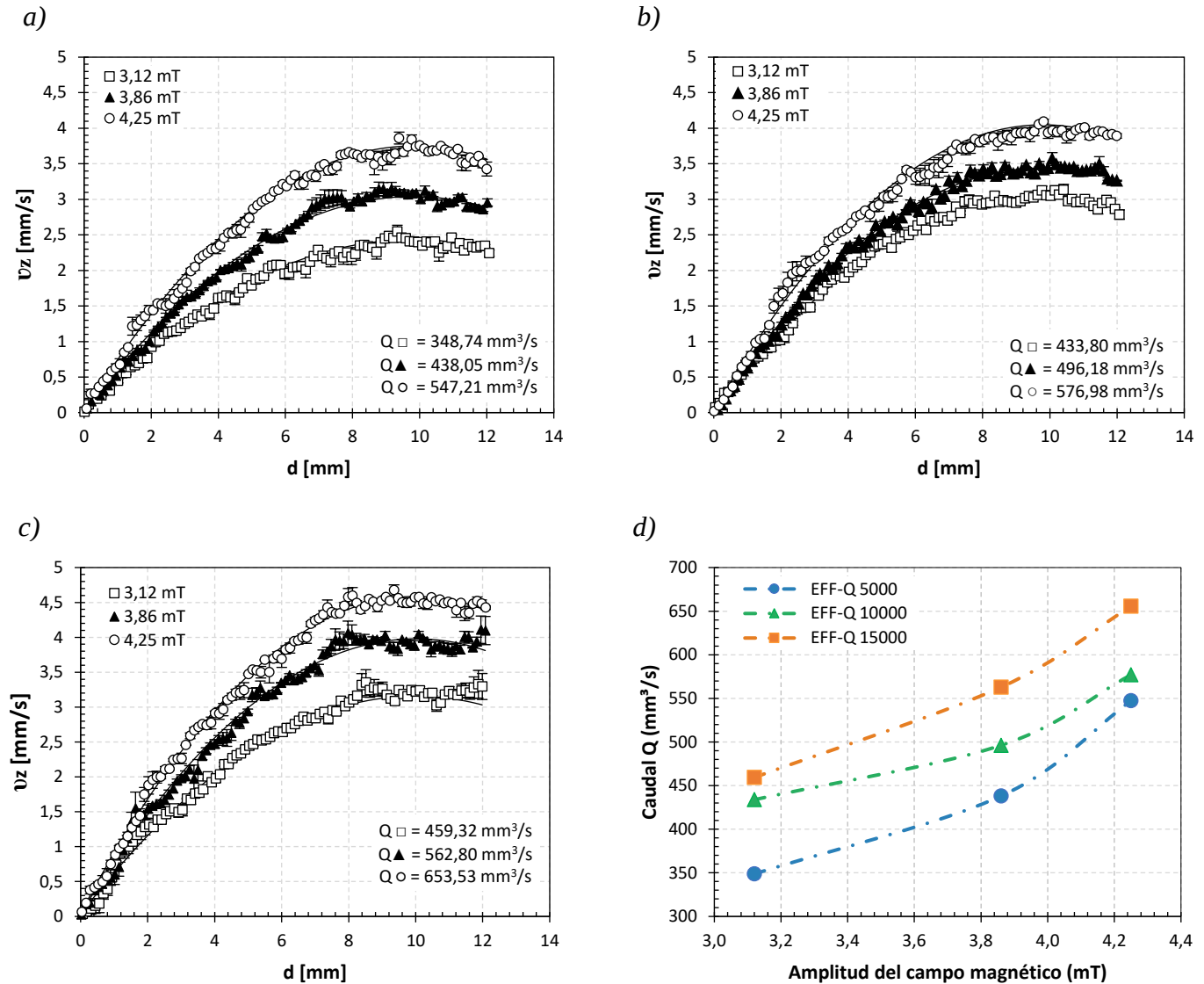
- $E_{FF-Q\ 5000}$ :  $n \approx 1,39$  (relación:  $Q \propto H^{1.39}$ ).
- $E_{FF-Q\ 10000}$ :  $n \approx 0.87$  (relación:  $Q \propto H^{0.87}$ ).
- $E_{FF-Q\ 15000}$ :  $n \approx 1,11$  (relación:  $Q \propto H^{1.11}$ ).

Esta tendencia es físicamente coherente: al aumentar la amplitud del campo se incrementa simultáneamente la magnitud del gradiente axial del campo y el grado de magnetización del fluido, de modo que ambos factores que componen la fuerza de Kelvin crecen de forma acoplada, amplificando la fuerza propulsora neta. Cabe señalar, no obstante, que la relación no es estrictamente lineal, el incremento en velocidad entre el segundo y tercer punto es mayor que entre el primero y el segundo. Esto sugiere que, en el rango de amplitudes explorado, el sistema podría estar operando en una región de respuesta no lineal de la magnetización, o bien en una región donde la contribución del torque magnético gana peso relativo a medida que el desfase entre  $M$  y  $H$  se acentúa con la intensidad de excitación.

En todos los casos se mantiene la tendencia de incremento de velocidad y de flujo con la amplitud del campo, y la comparación entre formulaciones a igual amplitud (4,25 mT) indica que la velocidad inducida aumenta con la concentración de nanopartículas, lo cual es coherente con el mayor torque magnético disponible por unidad de volumen de fase dispersa a mayor contenido de partículas [18].

### Figura 32.

*Perfiles de velocidad de a)  $E_{FF-Q\ 5000}$ , b)  $E_{FF-Q\ 10000}$  y c)  $E_{FF-Q\ 15000}$  a una frecuencia de 400Hz y diferentes valores de amplitud de campo magnético. d) Caudal en función de la amplitud del campo magnético a 400 Hz.*



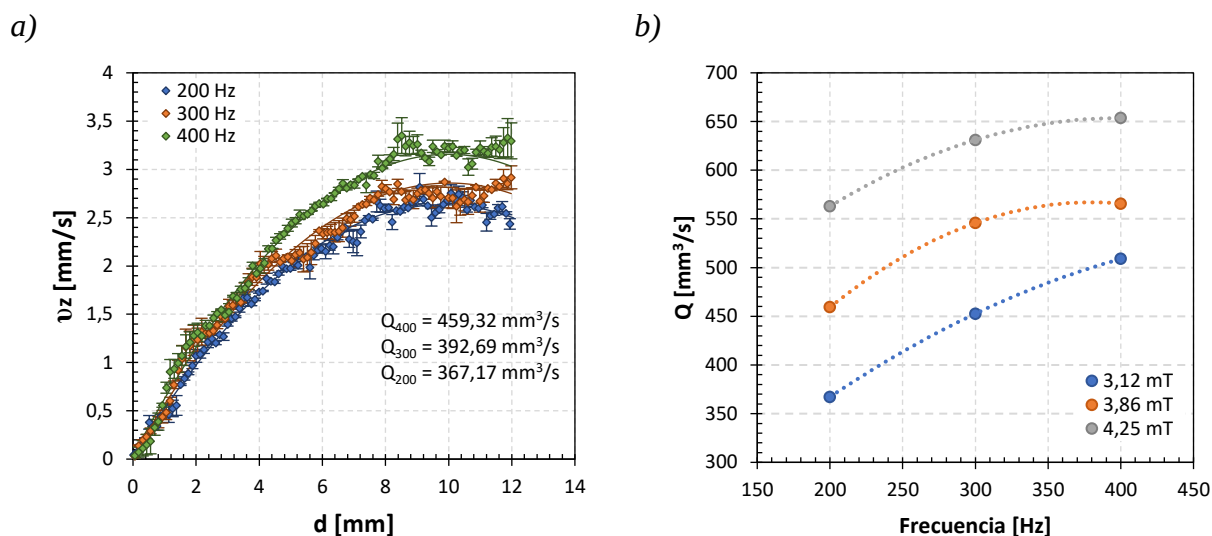
Por otro lado, se evaluó la influencia de la frecuencia del campo sobre la velocidad máxima inducida en la emulsión bajo campo magnético de onda viajera. La Figura 33 presenta el comportamiento para la emulsión  $E_{FF-Q 15000}$  a amplitud de campo constante de 3,12 mT; los resultados muestran un incremento progresivo de la velocidad máxima con la frecuencia aplicada: a 200 Hz se obtuvo una velocidad de 2,77 mm/s, a 300 Hz de 2,95 mm/s y a 400 Hz de 3,24 mm/s.

Esta dependencia es coherente con el principio ferrohídrodinámico establecido por Mao & Koser [18], quienes demostraron numéricamente que la velocidad de bombeo aumenta con la frecuencia de excitación hasta alcanzar un máximo cuando ésta se aproxima al inverso del tiempo de relajación magnética de las partículas ( $f \approx 1/\tau$ ), y decrece a frecuencias superiores. En el rango evaluado (200-400 Hz), las emulsiones  $E_{FF-Q}$  operan en la región previa al óptimo, donde la velocidad crece de forma sostenida con la frecuencia, lo que explica la tendencia observada. Esta tendencia global, velocidad creciente con la frecuencia hasta un máximo cuya posición se desplaza hacia valores más altos al incrementar la amplitud del campo, fue también documentada experimentalmente por Mao *et al.* [19] en ferrofluidos en lazo cerrado, si bien en ese trabajo la velocidad se midió dentro de la zona de excitación electromagnética, mientras que en el presente estudio los perfiles se obtienen en una sección recta fuera del campo, donde el flujo es hidráulicamente desarrollado. Esta diferencia metodológica implica que los valores de velocidad aquí reportados corresponden al caudal neto transportado por el sistema, y no a la velocidad local bajo la acción directa del campo.

En las emulsiones  $E_{FF-Q}$ , las microgotas de ferrofluido actúan como entidades magnéticas de mayor tamaño hidráulico efectivo que las nanopartículas individuales, lo que implica tiempos de relajación Browniana más largos y, en consecuencia, frecuencias óptimas de bombeo más bajas que las reportadas para ferrofluidos puros. Esto sugiere que el máximo de velocidad podría ubicarse en frecuencias cercanas o superiores a 400 Hz para las condiciones estudiadas, convirtiendo este rango en una región de operación favorable para el sistema.

**Figura 33.**

*Efecto de la frecuencia sobre el flujo inducido en  $E_{FF-Q15000}$ : perfiles de velocidad (a) y flujo volumétrico (b)*



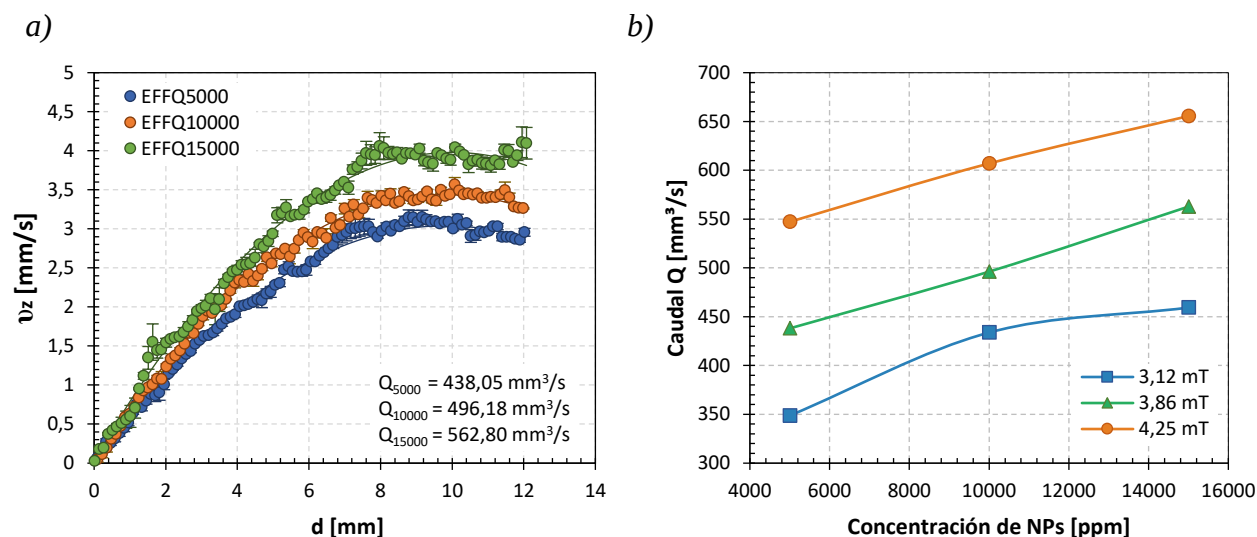
Con el propósito de evaluar la influencia de la concentración de nanopartículas sobre el flujo inducido, se comparan los perfiles de velocidad a 400 Hz y una amplitud de campo de 3,86 mT para las tres emulsiones  $E_{FF-Q}$  estudiadas (Figura 34a). Por su parte, la Figura 34b muestra el flujo volumétrico en función de la concentración de nanopartículas para diferentes intensidades de campo magnético, a partir de la cual se encontró que  $Q_{3.1 \text{ mT}} \propto \phi^{0.31}$ ,  $Q_{3.8} \propto \phi^{0.23}$  y  $Q_{4.2 \text{ mT}} \propto \phi^{0.15}$  lo que indica que a medida que incrementa la intensidad del campo, la influencia de la concentración de NPs disminuye.

La relación proporcional entre concentración y velocidad inducida es físicamente coherente: a mayor contenido de nanopartículas magnéticas, mayor es la susceptibilidad magnética efectiva de la emulsión y, por tanto, mayor la magnetización desarrollada ante el campo viajero. Dado que la fuerza de cuerpo axial tipo Kelvin escala con el producto de la magnetización y el

gradiente de campo, un incremento en la fracción magnetizable del sistema amplifica directamente la fuerza propulsora y, en consecuencia, el caudal transportado.

**Figura 34.**

*Efecto de la concentración de nanopartículas sobre el flujo inducido en emulsiones EFF-Q a 400 Hz: perfiles de velocidad (a) y flujo volumétrico (b)*



La Figura 35 presenta la variación de presión ( $\Delta P$ ) ejercida por el campo magnético, calculada a partir de las velocidades alcanzadas por el fluido y las pérdidas por fricción, considerando las características propias del sistema. Rosensweig presenta una ecuación de Bernoulli Generalizada dada por la siguiente expresión:

$$\frac{1}{2}v^2 + \frac{p}{\rho} - p_m - p_s = \text{const}$$

En esta ecuación,  $p$  representa la presión mecánica,  $p_m$  representa la presión magnética asociada a la fuerza de Kelvin y  $p_s$  es la presión magnetostrictiva asociada a cambios en la magnetización por cambios en el volumen o la concentración. Sin embargo, esta ecuación supone

que los vectores de  $\mathbf{M}$  y  $\mathbf{H}$  son paralelos, es decir no tiene en cuenta torques magnéticos generados por el campo, y obviamente supone que no existen perdidas por fricción. Si se tuviera en cuenta estas dos últimas contribuciones podríamos inferir que:

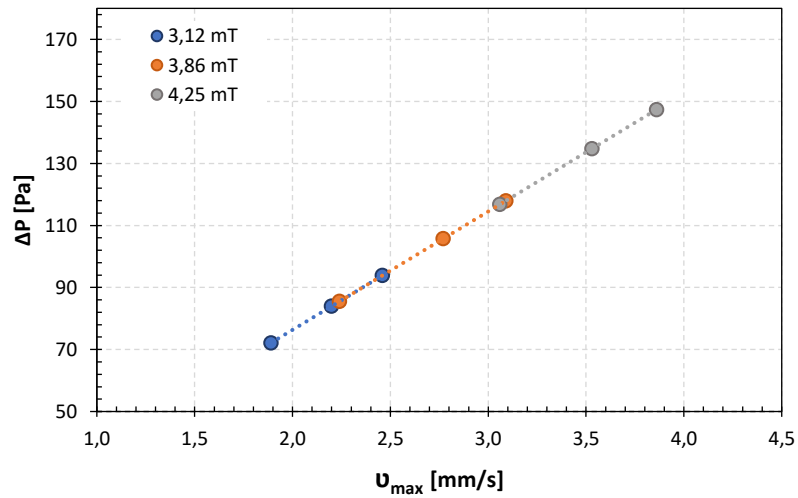
$$2\mu_o \bar{M} H_2 + \Delta p_{rot} - h_{dif-spin} = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) + h_f \quad \text{Ecuación 8}$$

Esto implica que el cambio en velocidad debe ser igual a la presión magnética, más la generación de flujo por la difusión del momento angular interno  $\Delta p_{rot}$ . Sin embargo, no toda la energía del torque magnético es convertida a momento angular del fluido, sino que parte se convierte a calor. Por ende, el  $\Delta p_{eff}$  graficado en la Figura 35 corresponde a:

$$2\mu_o \bar{M} H_2 + \Delta p_{rot} - h_{dif-spin} \quad \text{Ecuación 9}$$

**Figura 35.**

*Variación de la presión ( $\Delta P$ ) respecto a la velocidad máxima alcanzada*



Con base en los resultados obtenidos, se establece que la aplicación de campos magnéticos de onda viajera permite la generación de flujo en emulsiones que tiene como fase dispersa

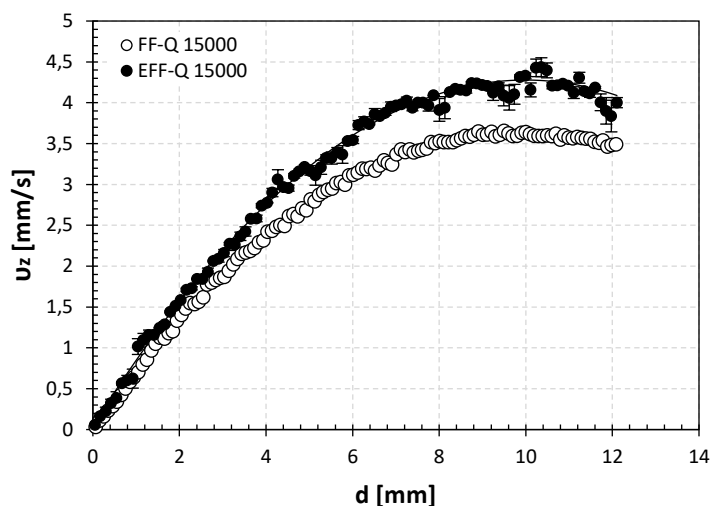
ferrofluidos, en concordancia con lo reportado en investigaciones previas [18], [19], quienes demostraron la inducción de movimiento en fluidos magnetizables mediante campos magnéticos dependientes del tiempo.

La Figura 36 presenta los perfiles de velocidad obtenidos para la emulsión  $E_{FF-Q15000}$  y el ferrofluido base  $FF-Q_{15000}$ , ambos con igual concentración de nanopartículas magnéticas, bajo la aplicación del campo magnético de onda viajera (400 Hz y 4,25 mT). En ambos casos se obtienen perfiles parabólicos consistentes con flujo en tubería, lo que confirma que el campo magnético induce un flujo organizado en los dos sistemas y que ambos presentan una respuesta cualitativamente similar. Los ajustes realizados presentan coeficientes de determinación de  $R^2 = 0,9991$  para el ferrofluido y  $R^2 = 0,9954$  para la emulsión. No obstante, la emulsión alcanza una velocidad máxima de 4,31 mm/s frente a 3,63 mm/s del ferrofluido, lo que representa un incremento del 18,7% en la velocidad máxima al emulsionarse el ferrofluido.

De nuevo, es importante tener en cuenta que los trabajos de Mao *et al.* [18], [19] son para ferrofluidos bajo TMF de baja amplitud, y con nanopartículas no interactuantes con tiempos de relación browniano típico de  $10^{-6}$  s. No obstante, estos resultados ratifican que, a pesar de la diferencia físicas y reológicas entre ferrofluidos y emulsiones, presentan un comportamiento cualitativamente similar del flujo con forme la intensidad del campo y frecuencia cambian.

**Figura 36.**

*Perfiles de velocidad para ferrofluido y emulsión con la misma concentración de nanopartículas a una frecuencia de 400 Hz y un campo magnético de 4,25 mT.*



## 5.2 Evaluación mezclas crudo-ferrofluido

### 5.2.1 Caracterización Mezclas Crudo-Ferrofluido

Se prepararon las mezclas en proporciones específicas de 30% de crudo y 70% de queroseno, con una concentración de nanopartículas de 5.000 ppm. La caracterización fisicoquímica de los crudos utilizados, que incluye el análisis SARA, densidad y °API, se presenta en la Tabla 2.

**Tabla 2.**

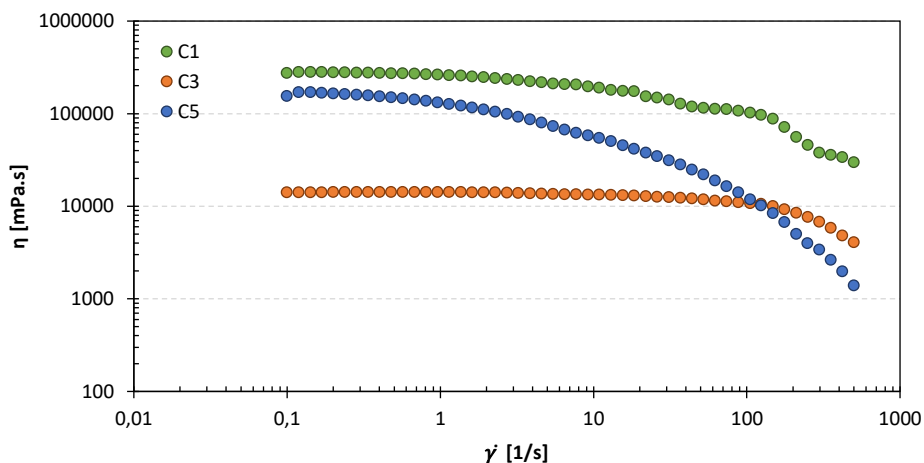
*Caracterización fisicoquímica crudos estudiados.*

| Muestra | Saturados | Aromáticos | Resinas | Asfáltenos | Volátiles | Densidad<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | °API |
|---------|-----------|------------|---------|------------|-----------|----------------------------------|------|
| C1      | 24,5      | 24,6       | 25,2    | 25,0       | 0,7       | 988,5                            | 11,5 |
| C3      | 29,1      | 20,7       | 28,6    | 21,0       | 0,6       | 983,4                            | 12,4 |
| C5      | 37,8      | 20,3       | 18,9    | 22,9       | 0,2       | 971,1                            | 14,1 |

De la misma forma, en la Figura 37 se presentan las curvas de viscosidad ( $\eta$ ) en función de la tasa de corte ( $\dot{\gamma}$ ) para los tres crudos pesados. Los tres sistemas exhiben un comportamiento reofluidizante caracterizado por una disminución progresiva de la viscosidad al aumentar la tasa de corte. El crudo  $C_1$  presenta la mayor viscosidad (aproximadamente 30.000 mPa·s) en todo el rango evaluado, manteniéndose prácticamente constante hasta una tasa de corte de  $10 \text{ s}^{-1}$  lo que sugiere una estructura interna rígida, similar a lo observado en el  $C_3$ , el cual presentó la menor viscosidad en el rango evaluado y se mantuvo constante hasta tasas de corte de aproximadamente  $50 \text{ s}^{-1}$ . Por su parte el  $C_5$  presenta una viscosidad inicial cercana a 15.000 mPa·s, con una caída más pronunciada y continua desde tasas de corte bajas, sin evidencia de valle (plateau), alcanzando valores del orden de 1.000 mPa·s a altas tasas de corte.

**Figura 37.**

*Curvas de flujo crudos*



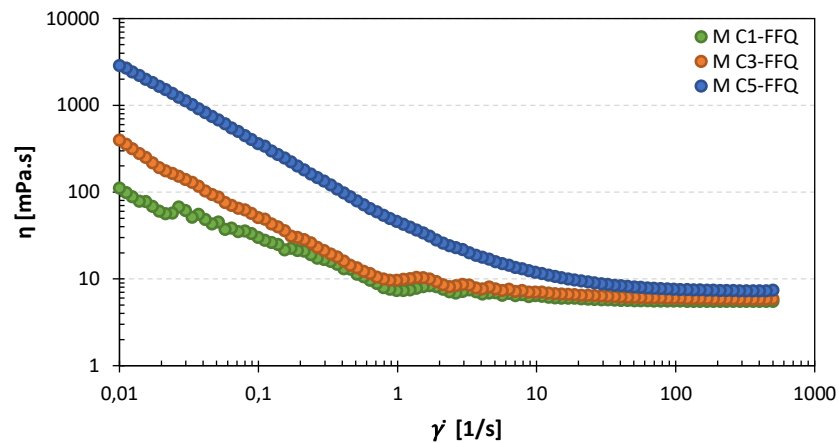
Con cada uno de los crudos se preparó una mezcla en las proporciones previamente indicadas. Las viscosidades obtenidas a una velocidad de deformación de corte de  $15 \text{ s}^{-1}$  fueron 9,31, 10,94 y 18,18 mPa·s, y las velocidades de sonido 1310, 1350 y 1449 m/s para las mezclas preparadas con los crudos  $C_1$ ,  $C_3$ , y  $C_5$ , respectivamente. Cabe destacar que las mezclas, al igual

que sus crudos de origen, mantienen un comportamiento reofluidizante como se observa en la Figura 38.

En adelante se usará la notación  $M_{C1-FFQ}$ ,  $M_{C3-FFQ}$  y  $M_{C5-FFQ}$  para cada una de las mezclas.

**Figura 38.**

*Curvas de flujo mezclas crudo-ferrofluido.*



### 5.2.2 Medición de Torque Mezclas Crudo-Ferrofluido

Se realizó la medición del torque para las tres mezclas de crudo-ferrofluido ( $M_{C1-FFQ5000}$ ,  $M_{C3-FFQ5000}$  y  $M_{C5-FFQ5000}$ ) evaluando las dos configuraciones: eje completamente lleno (torque positivo) y eje completamente rodeado (torque negativo), bajo campo magnético rotativo en sentido horario. Los resultados se presentan en la Figura 39. De manera consistente con lo observado en los sistemas anteriores, en ambas configuraciones el torque aumenta progresivamente en magnitud con la amplitud y la frecuencia del campo magnético, donde los torques positivos y negativos presentan simetría, confirmando que el mecanismo de transferencia

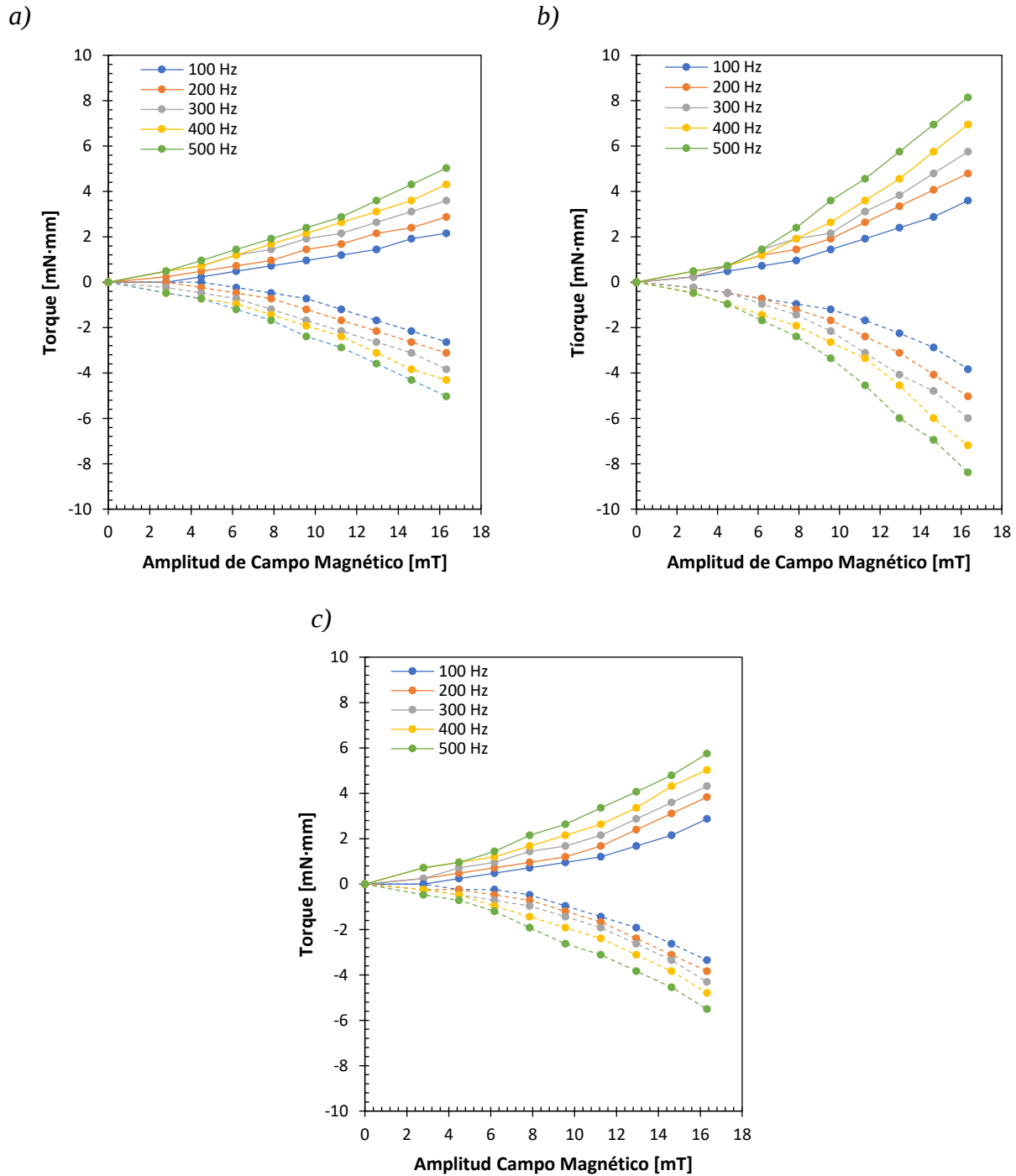
de momento angular opera con igual eficiencia independientemente de si el fluido ocupa el interior o el exterior del eje.

En cuanto a la magnitud del torque, la mezcla  $M_{C3-FFQ5000}$  alcanza un valor máximo de torque, cuando el fluido se encuentra dentro del eje, de  $8,15 \text{ mN}\cdot\text{mm}$ , mientras que las mezclas  $M_{C1-FFQ5000}$  y  $M_{C5-FFQ5000}$  presentan valores de  $5,03 \text{ mN}\cdot\text{mm}$  y  $5,71 \text{ mN}\cdot\text{mm}$ , respectivamente, bajo una frecuencia de 500 Hz y una amplitud de campo magnético de 16 mT.

En términos del movimiento inducido, la simetría observada entre los torques positivos y negativos permite inferir que, cuando el eje está lleno de mezcla, el fluido magnético tiende a rotar en el mismo sentido que el campo rotativo, ejerciendo un torque positivo sobre la pared interior del eje, es decir, el fluido arrastra el eje en la dirección del campo. Por el contrario, cuando el eje está rodeado de mezcla, el fluido exterior ejerce un torque negativo sobre la pared exterior del eje, indicando que el fluido también tiende a rotar con el campo, pero en este caso arrastra el eje en sentido contrario al convencional de medición. En ambos casos el mecanismo impulsor es el mismo: el torque magnético volumétrico, generado por el desfase entre la magnetización de las nanopartículas y el campo rotativo, que se transfiere al fluido a través de esfuerzos viscosos antisimétricos y de allí a la superficie del eje [12], [13], [45]. Este resultado confirma que las mezclas crudo-ferrofluido son susceptibles de ser impulsadas mediante campo magnético rotativo, lo que abre posibilidades para su aplicación en el transporte de fluidos de alta viscosidad sin partes móviles.

**Figura 39.**

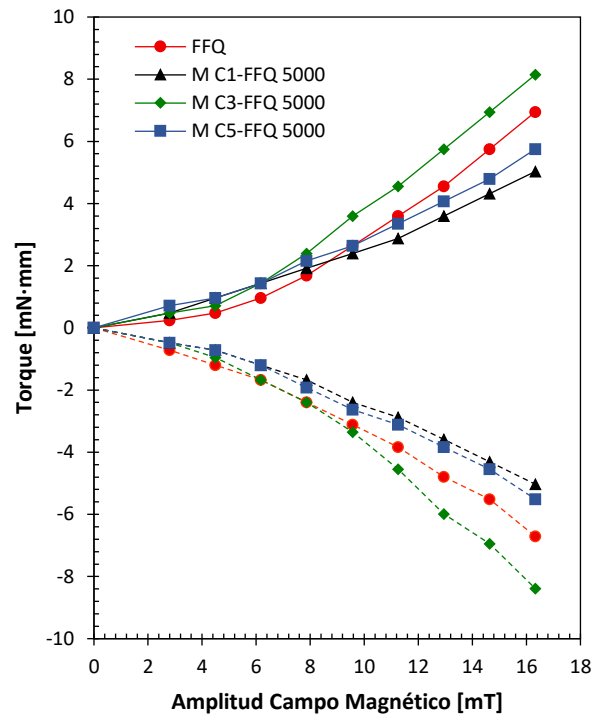
Medición de torque dentro y fuera del cilindro para a)  $M_{C1-FFQ\ 5000}$  b)  $M_{C3-FFQ\ 5000}$  y c)  $M_{C5-FFQ\ 5000}$  bajo diferentes valores de frecuencia y amplitud de campo magnético.



La respuesta de las mezclas crudo-ferrofluido ante la aplicación de un campo magnético rotativo es comparable con los resultados obtenidos para el ferrofluido base queroseno (FF-Q) con la misma concentración de nanopartículas magnéticas, como se muestra en la Figura 40. Este comportamiento era esperado, pues el mecanismo de inducción de flujo en estas mezclas es esencialmente el mismo que opera en los ferrofluidos puros: el campo magnético rotativo genera un torque sobre las nanopartículas, cuya magnetización no logra alinearse instantáneamente con el campo en rotación debido a la resistencia viscosa del medio circundante. Este desfase entre la magnetización y el campo constituye el origen del torque magnético volumétrico. Como demuestran Chaves *et al.* [15], el flujo de volumen inducido por campo magnético rotativo en ferrofluidos, conocido como *spin-up flow*, surge precisamente porque el par magnético generado por este desfase se transfiere al fluido mediante esfuerzos viscosos antisimétricos, produciendo la rotación macroscópica del fluido en el mismo sentido del campo. La existencia de este flujo en las mezclas crudo-ferrofluido confirma que las nanopartículas dispersas en el crudo mantienen su capacidad de responder al campo rotativo y de actuar como elementos transmisores de momento angular hacia el fluido de mayor viscosidad que las rodea.

**Figura 40.**

*Medición de torque de ferrofluido y mezclas crudo-ferrofluido a diferentes valores de amplitud de campo magnético y una frecuencia de 500 Hz.*



### 5.2.3 Medición de Perfiles de Velocidad Mezcla Crudo-Ferrofluido

A partir de los resultados obtenidos, presentados en la Figura 41, se demuestra que la aplicación de campos magnéticos rotativos permite inducir flujo en mezclas crudo-ferrofluido. Este resultado constituye un hallazgo relevante, ya que evidencia la posibilidad de extender el principio de bombeo sin partes mecánicas móviles, reportado previamente para ferrofluidos [15], [60], a fluidos no magnéticos siempre y cuando se puedan suspender NPs magnéticas. En este esquema, el flujo es inducido por la acción del campo magnético rotativo sobre la fase magnética de la mezcla, siendo el ferrofluido la fase activa que transfiere el momento angular al fluido no

magnético, en este caso el crudo pesado. En consecuencia, estos resultados sugieren una estrategia potencial para el transporte de fluidos viscosos de difícil manejo, como los crudos pesados, mediante el uso de ferrofluidos como fase activa controlada magnéticamente [26], [41].

En cuanto a la caracterización del flujo, los perfiles de velocidad muestran que las mezclas crudo-ferrofluido, presentan una respuesta dinámica cualitativamente similar a la observada en ferrofluidos. En particular, se observa un perfil lineal ( $v_\theta \propto r$ ) en la mayor parte del radio del cilindro ( $R^2 \approx 0.98$ ), geoméricamente análogo al de una rotación de cuerpo rígido, pero posiblemente originado por la distribución del torque magnético volumétrico [59], [61], así como una dependencia de la magnitud del flujo con la intensidad y frecuencia del del campo magnético rotativo, comportamiento consistente con lo reportado para ferrofluidos en configuración cilíndrica [13], [15].

Posteriormente, se procedió a evaluar si el tipo de crudo pesado usado en la preparación de la mezcla genera algún cambio en el patrón de flujo. Para ello se tomaron los perfiles de velocidad de las mezclas hechas con los crudos  $C_1$ ,  $C_3$  y  $C_5$  los cuales son presentadas en la Figura 41.

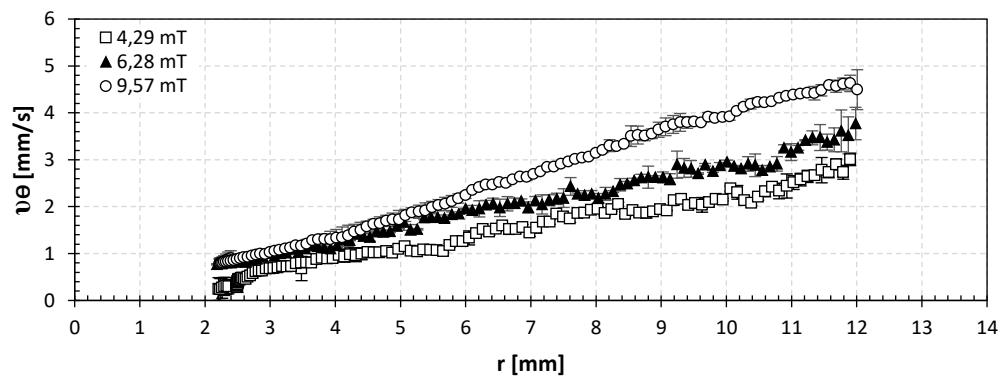
De las velocidades acimutales registradas para cada mezcla crudo-ferrofluido mostradas en la Figura 41, se puede concluir que los perfiles de velocidad son similares para los tres crudos bajo las mismas condiciones de intensidad del campo magnético y frecuencia (9,57 mT y 200 Hz), la diferencia en las velocidades es reducida; por ejemplo, la mezcla  $M_{C3-FFQ5000}$  alcanza una velocidad máxima de hasta 5,90 mm/s bajo la aplicación de un campo magnético de 9,57 mT y una frecuencia de 200 Hz, mientras que las mezclas  $M_{C1-FFQ5000}$  y  $M_{C5-FFQ5000}$  registran una velocidad máxima de 4,85 y 5,09 mm/s. Resulta notable que, a pesar de que la mezcla  $M_{C5-FFQ5000}$  presenta la mayor viscosidad entre las formulaciones evaluadas, alcanza velocidades similares a

las demás mezclas bajo la acción del campo magnético rotativo. Este comportamiento puede interpretarse considerando que, en medios de mayor viscosidad, el tiempo de relajación browniana de las nanopartículas aumenta, lo que incrementa el ángulo de desfase entre la magnetización del fluido y el campo rotativo [15], [45]. Este mayor desfase se traduce en un incremento del torque magnético volumétrico, el cual compensaría la resistencia viscosa adicional impuesta por el crudo  $C_5$ , resultando en velocidades de flujo comparables entre las mezclas.

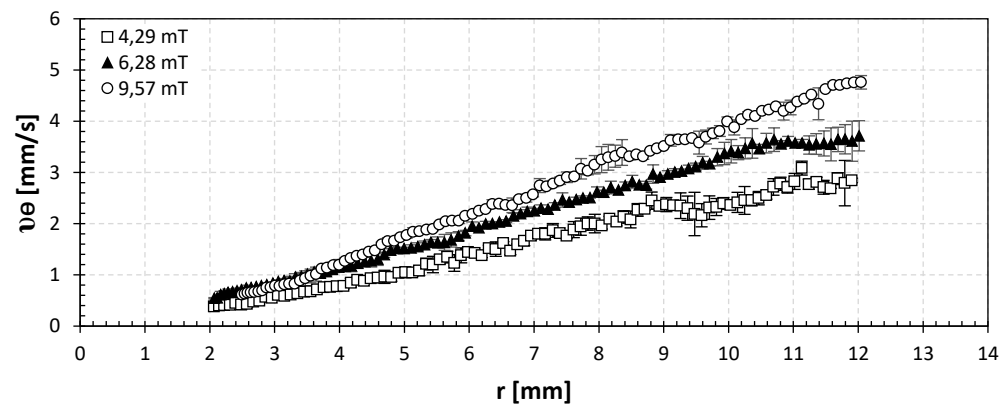
**Figura 41.**

*Perfiles de velocidad de a)  $M_{C1-FFQ5000}$ , b)  $M_{C3-FFQ5000}$  y c)  $M_{C5-FFQ5000}$  a diferentes valores de amplitud de campo magnético y una frecuencia de 200 Hz.*

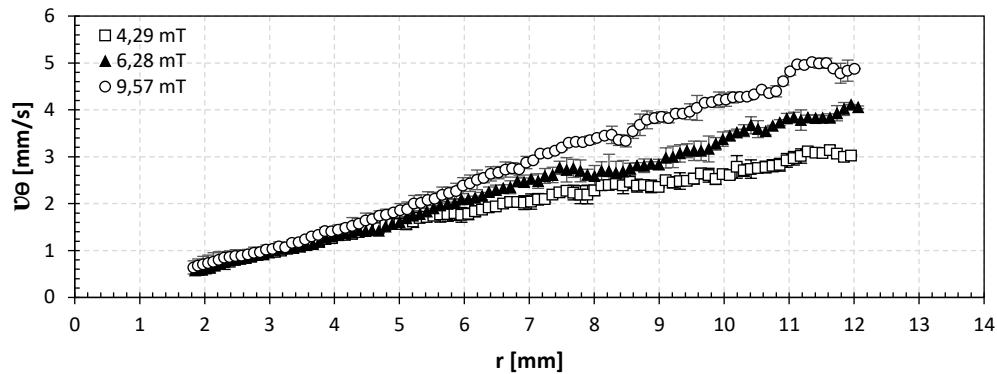
a)



b)



c)



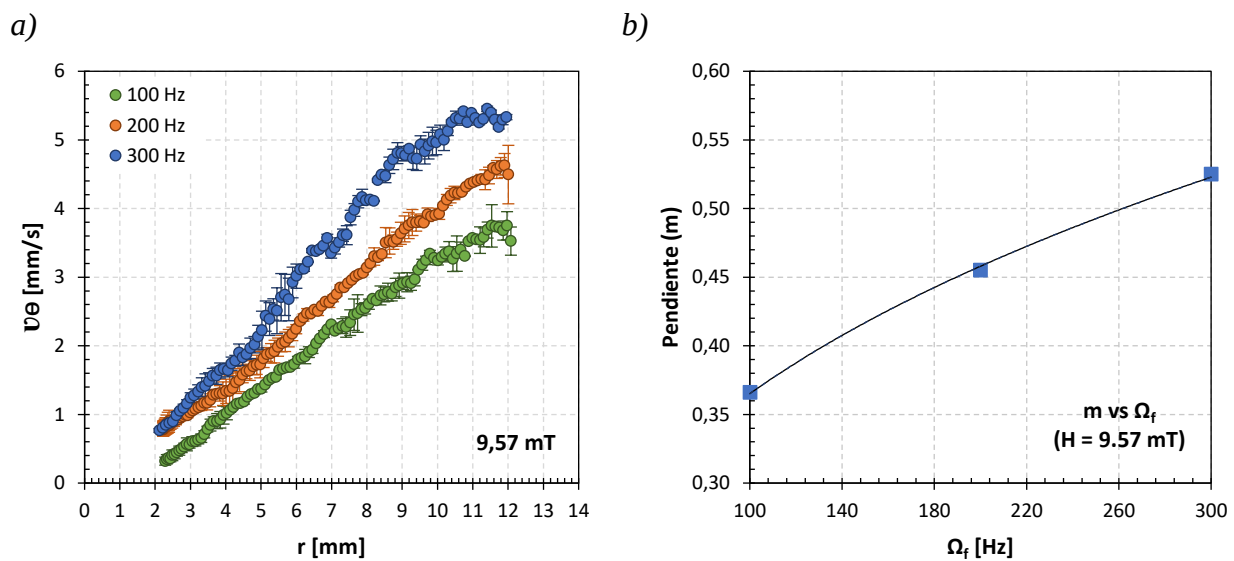
Por otro lado, con el fin de evaluar el efecto de la frecuencia sobre la velocidad alcanzada bajo una misma amplitud de campo magnético (9,57 mT), se presentan los resultados para la mezcla  $M_{C1-FFQ5000}$  a diferentes valores de frecuencia en la Figura 42. Los perfiles muestran un comportamiento aproximadamente lineal con el radio, cuya pendiente, equivalente a la velocidad angular aparente del fluido y que varía con la frecuencia del campo aplicado de la siguiente forma: 0,366 rad/s a 100 Hz, 0,415 rad/s a 200 Hz y 0,525 rad/s a 300 Hz. En términos de velocidad acimutal máxima, se obtienen valores de 3,75 mm/s a 100 Hz, 4,75 mm/s a 200 Hz y 5,54 mm/s a 300 Hz, evidenciando una relación directa y progresiva entre la frecuencia del campo magnético rotativo y la velocidad del fluido.

Este comportamiento es cualitativamente consistente con la teoría de Shliomis [45], en la cual el torque magnético volumétrico transferido al fluido es proporcional al ángulo de desfase  $\theta$  entre la magnetización y el campo rotativo, descrito por la relación  $\tan \theta = (\gamma - \omega)\tau$ , donde  $\gamma$  es la frecuencia angular del campo,  $\omega$  la velocidad angular del fluido y  $\tau$  el tiempo de relajación browniano. En el régimen  $\omega\tau \ll 1$ , el torque crece con la frecuencia y la velocidad de flujo aumenta de forma progresiva; cuando  $\omega\tau \approx 1$ , el torque alcanza su máximo; para  $\omega\tau \gg 1$ , la magnetización no logra seguir al campo, el torque decrece y la velocidad puede disminuir [45], [48]. Dado que

los tres valores de frecuencia producen velocidades crecientes, los resultados sugieren que el sistema opera en el régimen  $\omega\tau < 1$ , donde el torque y la velocidad de flujo aún no han alcanzado su máximo. En la Figura 42b, se observa el ajuste de la pendiente con la frecuencia.

**Figura 42.**

a) Perfiles de velocidad para  $M_{C1-FFQ5000}$  a diferentes valores de frecuencia y una amplitud de campo magnético de 9,57 mT b) Ajuste de la pendiente con la frecuencia (ley de potencia).



Con el propósito de establecer si el comportamiento de las mezclas crudo-ferrofluido es similar a la de los ferrofluidos bajo la acción de campos magnéticos rotativos, se realizó la comparación de sus perfiles de velocidad bajo las mismas condiciones de frecuencia (100 Hz) y amplitud del campo magnético (9,57 mT).

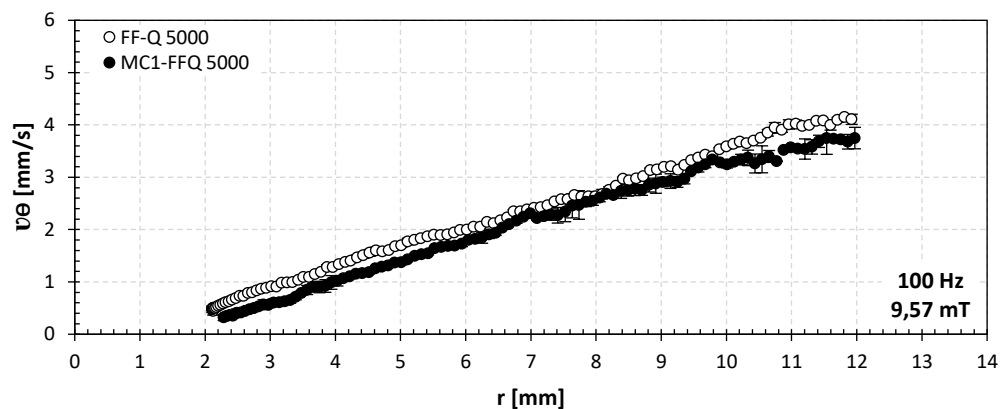
Con base en los resultados presentados en la Figura 43, se establece que la velocidad alcanzada por la mezcla  $M_{C1-FFQ 5000}$  es del mismo orden de magnitud que la del ferrofluido a base de queroseno FF-Q<sub>5000</sub>, ambos con la misma concentración de nanopartículas (5000 ppm). Este

resultado sugiere que la presencia del crudo en la mezcla, en las proporciones utilizadas, no inhibe significativamente la respuesta al campo magnético rotativo.

En particular, la mezcla  $M_{C1-FFQ\ 5000}$ , que presenta una viscosidad de 10,94 mPa·s y contiene 30% p/p de crudo  $C_1$ , alcanza una velocidad máxima de 3,75 mm/s; mientras que el ferrofluido, con una viscosidad de 2,57 mPa·s y comportamiento newtoniano, alcanza una velocidad de 4,15 mm/s. A pesar de que la viscosidad de la mezcla es aproximadamente cuatro veces mayor, la reducción en la velocidad máxima es cercana al 10 %, lo que indica que el torque magnético volumétrico mantiene su efectividad como mecanismo impulsor del flujo [45] incluso en presencia del crudo. En cuanto al ajuste, el coeficiente de determinación para el FF- $Q_{5000}$  es de 99,76% y para la mezcla  $M_{C1-FFQ\ 5000}$  es del 99,46%.

**Figura 43.**

*Perfiles de velocidad de FF- $Q_{5000}$  y  $M_{C1-FFQ5000}$  a una frecuencia de 100Hz y una amplitud de campo magnético de 9,57 mT.*



Teniendo en cuenta la similaridad de los perfiles de velocidad de los ferrofluidos y las mezclas crudo-ferrofluido, al igual que para el caso de emulsiones magnéticas, el flujo observado se atribuye a la difusión de momento angular interno que ya previamente se ha explicado

#### **5.2.4 Medición de flujo de mezclas crudo-ferrofluido bajo campo magnético de onda viajera**

Con el fin de conocer la acción del campo de onda viajera sobre las mezclas de crudo-ferrofluido, se realizó la medición del comportamiento de dos mezclas con una concentración de nanopartículas de 10000 ppm. En este caso se eligió la mezcla de crudo  $C_1$  ( $M_{C1-FFQ}$ ) y la mezcla de crudo  $C_5$  ( $M_{C5-FFQ}$ ), esto teniendo en cuenta que la mezcla con crudo  $C_5$  es la que presenta una mayor viscosidad (18,24 mPa·s) y la mezcla con crudo  $C_1$  ha sido ampliamente estudiada en la formulación de emulsiones magnéticas [82] y bajo la aplicación de diferentes campos magnéticos estáticos y oscilatorios [25].

En la Figura 44 se presentan los perfiles radiales de velocidad axial  $v_z(r)$  para las mezclas  $M_{C1-FFQ\ 10000}$  y  $M_{C5-FFQ\ 10000}$ , bajo la acción de un campo magnético de onda viajera. Como resultado de la distribución radial de la fuerza de cuerpo, la condición de no deslizamiento en la pared ( $v_z = 0$  en  $r = R$ ) y la continuidad del fluido, la velocidad axial crece desde cero en la pared hasta alcanzar un máximo en las proximidades del eje central, dando lugar al perfil de forma parabólica que se observa en la figura.

De manera cuantitativa, para la mezcla  $M_{C1-FFQ\ 10000}$  a una frecuencia de 400 Hz, se registró una velocidad máxima de 2,40 mm/s y un caudal de 347,32 mm<sup>3</sup>/s a 4,25 mT; 1,96 mm/s y 272,19 mm<sup>3</sup>/s a 3,86 mT; y 1,44 mm/s y 214,07 mm<sup>3</sup>/s a 3,12 mT, evidenciando una relación directamente proporcional entre la velocidad alcanzada y la amplitud del campo magnético aplicado. De igual forma, el efecto de la intensidad del campo sobre el flujo de la mezcla  $M_{C5-FFQ10000}$ , obteniendo que

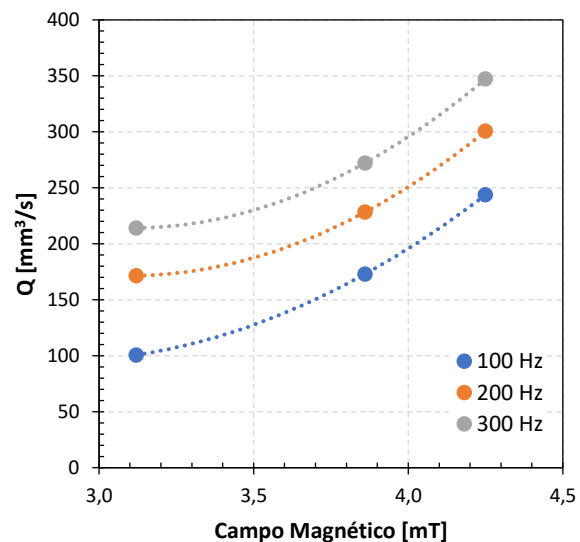
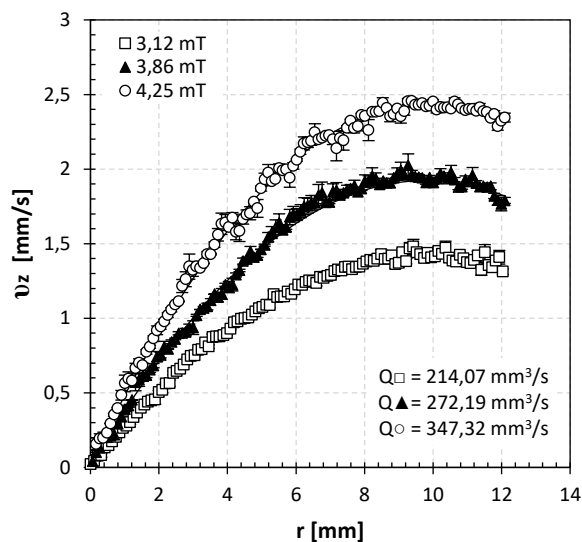
a 4,25 mT se alcanza una velocidad máxima de 1,93 mm/s y un caudal de 286,36 mm<sup>3</sup>/s; a 3,86 mT de 1,66 mm/s y 243,83 mm<sup>3</sup>/s; y a 3,12 mT de 1,32 mm/s y 197,05 mm<sup>3</sup>/s, confirmando una relación directamente proporcional entre la amplitud del campo magnético y la velocidad inducida (Véase Figura 44b).

Al comparar los perfiles de velocidad de la mezcla  $M_{C1-FFQ10000}$  con los de la mezcla  $M_{C5-FFQ10000}$  (bajo condiciones similares), se observa que las velocidades son ligeramente inferiores en todos los niveles de amplitud evaluados, lo que puede atribuirse a la mayor viscosidad y complejidad composicional del crudo  $C_5$ .

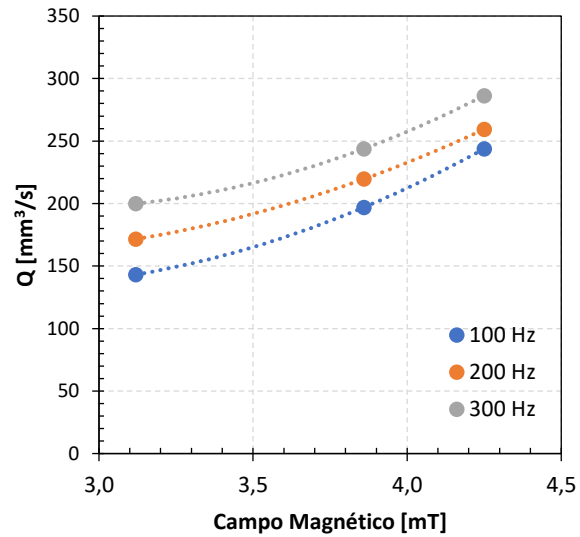
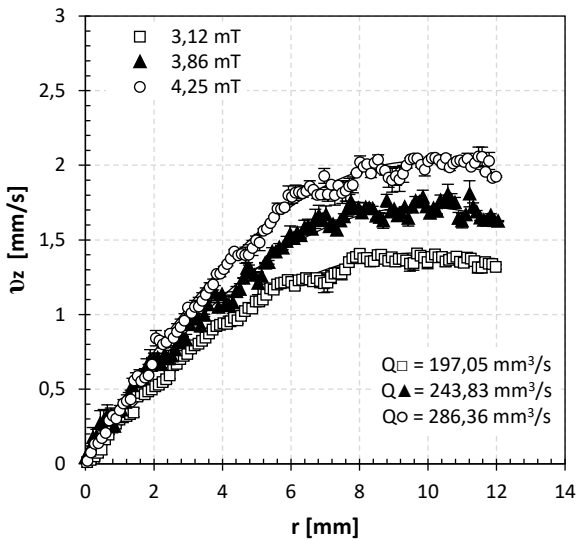
**Figura 44.**

*Perfiles de velocidad de a)  $M_{C1-FFQ10000}$  y b)  $M_{C5-FFQ10000}$  a diferentes valores de amplitud de campo magnético y una frecuencia de 400 Hz.*

a)



b)

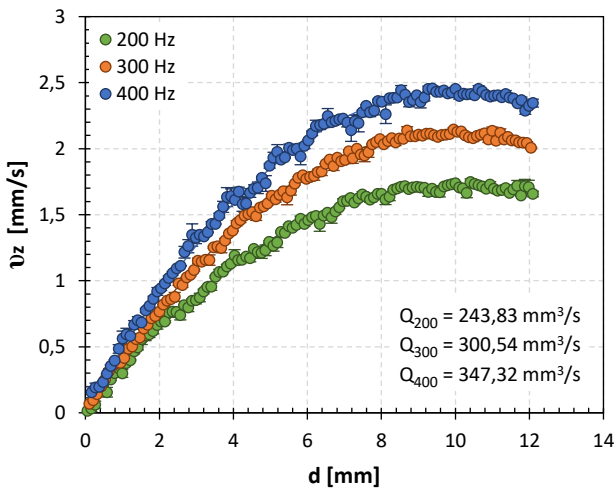


Con el fin de establecer la relación entre la frecuencia y la velocidad alcanzada, en la Figura 45 se presentan los resultados obtenidos para la mezcla de crudo  $C_1$  a una amplitud de campo magnético de 4,25 mT y tres valores de frecuencia. Se registró una velocidad de 1,72 mm/s a 200 Hz, 2,13 mm/s a 300 Hz y 2,40 mm/s a 400 Hz, evidenciando un incremento progresivo de la velocidad inducida con la frecuencia del campo de onda viajera en el rango evaluado. Junto con los resultados previos de variación de amplitud, esto confirma que tanto la amplitud del campo magnético como la frecuencia son parámetros determinantes en la generación de flujo. Este comportamiento es consistente con lo reportado por Mao *et al.* [18], [19], estos resultados sugieren que, en las condiciones del presente trabajo, el sistema opera dentro de este régimen sub-óptimo.

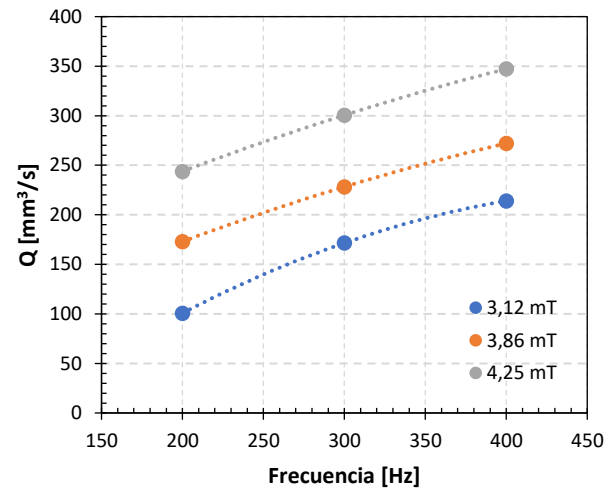
**Figura 45.**

a) Perfiles de velocidad de  $M_{C1-FFQ10000}$  a diferentes valores de frecuencia y una amplitud de campo magnético de 4,25 mT. b) Caudal en función de la frecuencia

a)



b)



Finalmente, en la Figura 46 se observa que tanto el ferrofluido FF-Q<sub>10000</sub> como la mezcla  $M_{C1-FFQ10000}$  presentan una respuesta cualitativamente similar ante la aplicación de un campo magnético de onda viajera, obteniéndose perfiles de velocidad parabólicos comparables a los de un flujo desarrollado en tubería. No obstante, la mezcla presenta una respuesta de menor intensidad que el ferrofluido puro, a pesar de que ambos sistemas contienen la misma concentración de nanopartículas (10000 ppm). Particularmente, para una frecuencia de 300 Hz y una amplitud de campo magnético de 4,25 mT, el ferrofluido FF-Q<sub>10000</sub> alcanza una velocidad máxima de 3,65 mm/s, mientras que la mezcla  $M_{C1-FFQ10000}$  registra 2,13 mm/s, representando una reducción aproximada del 42%.

Esta diferencia puede atribuirse a dos factores físicos interrelacionados, ambos consecuencia directa del incremento en viscosidad al incorporar el crudo. La viscosidad del

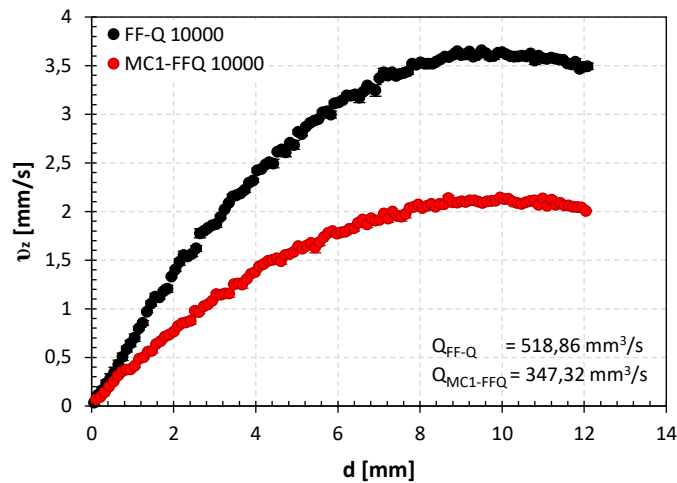
ferrofluido FF-Q<sub>10000</sub> es de 2,57 mPa·s, mientras que la mezcla M<sub>C1-FFQ10000</sub> presenta una viscosidad de 10,18 mPa·s, aproximadamente cuatro veces mayor. Esta mayor viscosidad incrementa la resistencia al flujo axial inducido por el campo, reduciendo la velocidad que puede desarrollarse ante una misma fuerza de cuerpo magnética.

Estos resultados concuerdan con los de Torres-Díaz *et al.* [99], quienes midieron perfiles de velocidad en ferrofluidos con partículas de ferrita de cobalto suspendidas en agua y en mezclas agua-glicerina, lo que les permitió estudiar el efecto de la viscosidad del fluido portador sobre el flujo inducido. Sus resultados muestran que la velocidad disminuye al aumentar la viscosidad del fluido portador manteniendo el mismo tipo de nanopartículas. Adicionalmente, confirmaron la importancia del parámetro  $\Omega$  al observar que este se asocia a una frecuencia crítica a partir de la cual la dependencia del flujo con la frecuencia cambia de directamente proporcional a inversamente proporcional, lo que es consistente con la tendencia observada en nuestros experimentos, donde el incremento del flujo con la frecuencia se hace progresivamente menor a medida que esta aumenta.

El segundo factor corresponde al cambio en el estado de las nanopartículas dentro de las mezclas crudo-ferrofluido. En este sistema, las NPs adsorben asfaltenos en forma de monocapa sobre su superficie, lo que modifica su diámetro hidrodinámico efectivo. Esta capa adsorbida actúa como una barrera estérica que, si bien inhibe la formación de agregados de gran tamaño, también tiende a reducir el efecto magnetoreológico [26].

**Figura 46.**

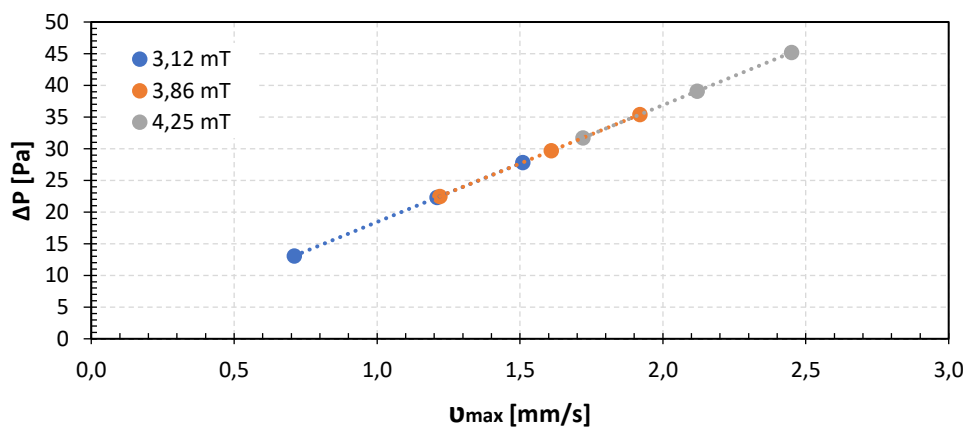
*Perfiles de velocidad de FF- $Q_{10000}$  y  $MC1\text{-}FFQ_{10000}$  a una frecuencia de 300 Hz y una amplitud de campo magnético de 4,25 mT*



En la Figura 47 se representa la energía magnética convertida en energía mecánica a través del cálculo de la variación de presión respecto a la velocidad máxima alcanzada a tres valores diferentes de intensidad de campo magnético (3,12, 3,86 y 4,25 mT).

**Figura 47.**

*Variación de la presión respecto a la velocidad máxima*



### 5.3 Evaluación emulsión crudo-ferrofluido

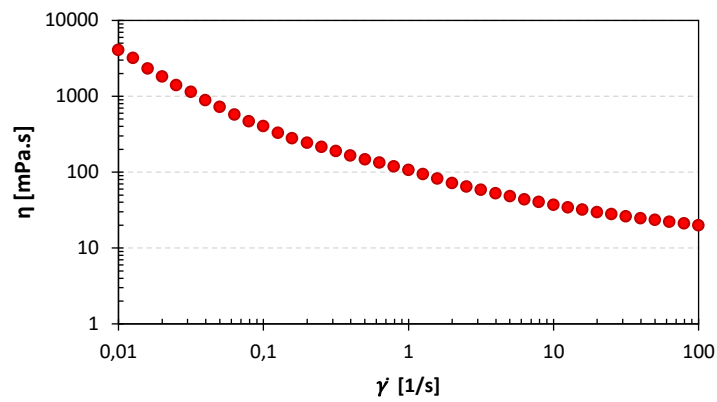
#### 5.3.1 Caracterización emulsión crudo-ferrofluido

El objetivo de este proyecto es facilitar el transporte de crudos pesados por oleoductos. Una de las alternativas es la emulsificación del crudo o de productos pesados del petróleo lo cual reduce sustancialmente los requerimientos energéticos del flujo en tubería. En este sentido, fue formulada una nueva emulsión magnética con fase dispersa formadas por mezcla de crudo  $C_1$  y ferrofluido ( $EM_{C1-FFQ\ 5000}$ ) con el fin de potenciar la eficiencia del flujo por el efecto del campo magnético rotativo.

La Figura 48 presenta la curva de viscosidad aparente ( $\eta$ ) en función de la tasa de corte ( $\dot{\gamma}$ ) de la emulsión. Se observa que la viscosidad disminuye de manera continua y pronunciada a medida que aumenta la tasa de corte, este comportamiento es característico de un fluido reofluidizante, en el cual las estructuras internas del fluido, (en este caso, posiblemente asociadas a la organización de las gotas dispersas y a las interacciones entre los componentes de la emulsión), se orientan y deforman progresivamente bajo la acción del esfuerzo de corte, reduciendo la resistencia al flujo.

Figura 48.

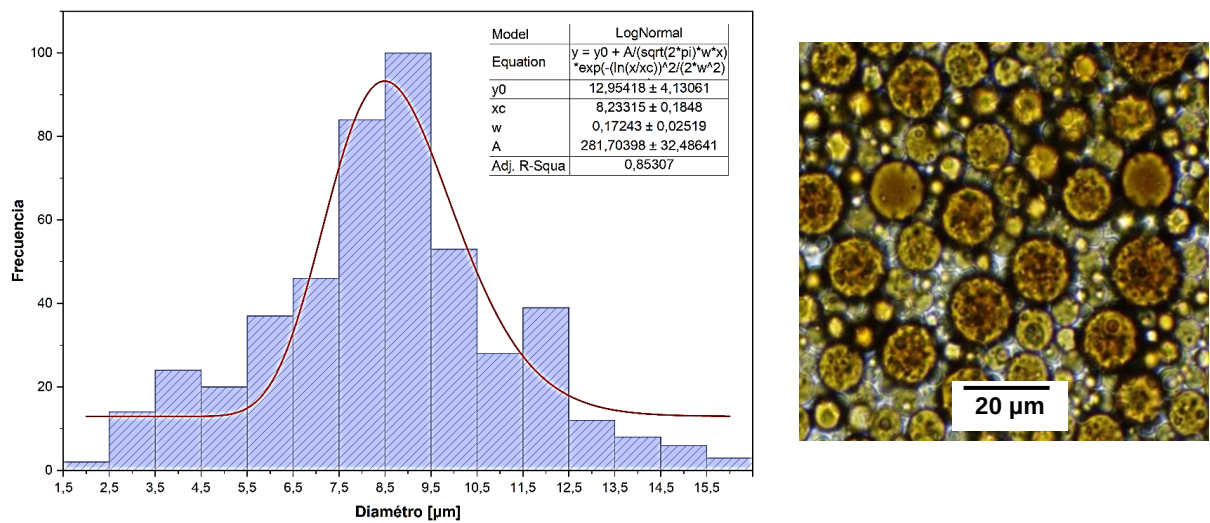
Curva de flujo emulsión a base de mezcla crudo-ferrofluido ( $E_{M\ C1-FFQ\ 5000}$ )



En la Figura 49 se presentan las micrografías de la emulsión, así como la distribución de tamaño obtenida de 400 gotas. Los resultados muestran un diámetro promedio de  $8,23 \pm 0,18\ \mu\text{m}$  y un ajuste a una distribución LogNormal de 85,3% con un parámetro de forma  $w = 0,172 \pm 0,025$ , indicativo de una distribución estrecha y una emulsión de carácter relativamente monodisperso.

Figura 49.

Imagen Microscopia Óptica  $E_{M\ C1-FFQ\ 5000}$ .



### 5.3.2 Medición de torque en emulsiones de mezcla crudo-ferrofluido

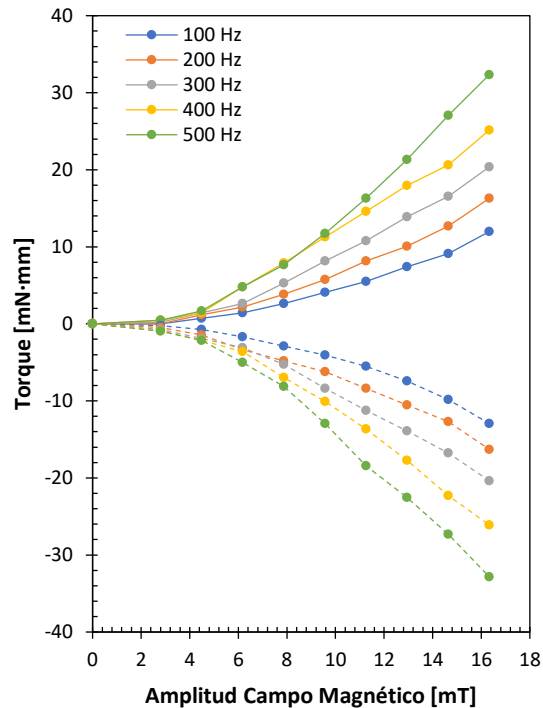
Se realizaron las mediciones de torque para la emulsión de mezcla de crudo-ferrofluido (Véase Figura 50), observándose que este sistema alcanza valores de torque de hasta 32,34 mN·mm. Es necesario notar que la magnitud del torque es considerablemente mayor al de los otros fluidos magnéticos evaluados para la misma concentración de NPs, en particular las emulsiones a base de ferrofluido con una concentración de 5.000 ppm ( $E_{FF-Q\ 5000}$ ) alcanzó un torque de hasta 10 mN·mm, mientras que la mezcla  $M_{C1-FFQ\ 5000}$  registró un valor de aproximadamente 5,06 mN·mm a 500 Hz y 16 mT.

Aunque el sistema estudiado por Zakinyan & Zakinyan [79] corresponde a una emulsión aceite en aceite, en la emulsión crudo-ferrofluido aquí analizada se presenta una configuración estructuralmente análoga: una fase dispersa de carácter magnético, la mezcla crudo-ferrofluido, en una fase continua no magnética. En este sistema, los mecanismos descritos por [79] podrían operar de manera similar. La viscosidad característica de la mezcla crudo-ferrofluido, que actúa en el interior de las gotas dispersas, favorecería tiempos de relajación rotacional más prolongados, acercando el sistema a la condición en la que el torque sobre cada gota alcanza su valor máximo. Asimismo, el tamaño de gota característico de aproximadamente 8  $\mu\text{m}$  implica volúmenes mayores que amplifican directamente la contribución de cada gota al torque macroscópico total, dado que el torque individual escala con el volumen de la gota.

A estos efectos se suma el comportamiento magnetoviscoso documentado por Peña *et al.* [82] en emulsiones donde la fase dispersa es mezcla crudo-ferrofluido: bajo la acción de un campo magnético estático uniforme, se produce un aumento de la viscosidad relativa del sistema. Este efecto, indica que el campo magnético modifica estructuralmente el sistema durante su aplicación.

**Figura 50.**

*Medición de torque dentro y fuera del cilindro para  $E_{MCI-FFQ\ 5000}$  bajo diferentes valores de frecuencia y amplitud de campo magnético.*



### 5.3.3 Medición de Perfiles de Velocidad Emulsión Mezcla Crudo-Ferroluido bajo CMR

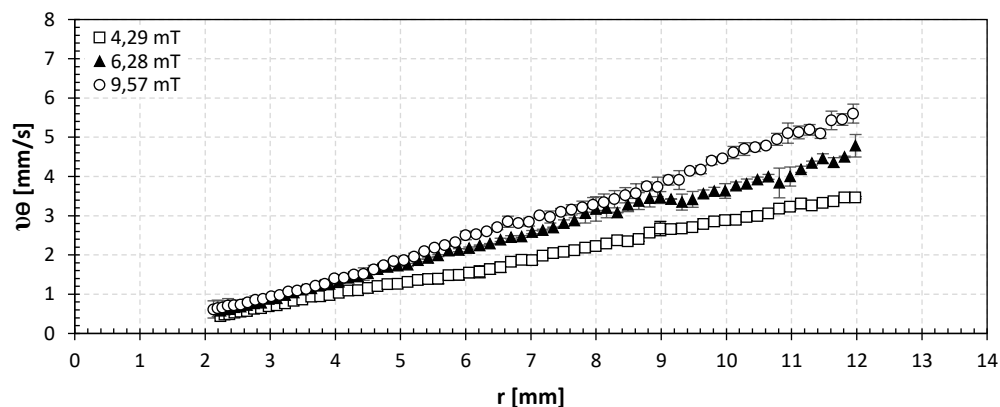
De manera similar a lo observado en los fluidos magnéticos complejos como las mezclas de crudo-ferrofluido y emulsiones magnéticas, la emulsión de mezclas de crudo-ferrofluido responde al campo magnético rotativo mostrando la generación de flujo dentro del sistema, Figura 51. Se observa que la velocidad acimutal aumenta con el radio de manera aproximadamente lineal en la mayor parte del dominio radial evaluado, de nuevo sugiriendo un mecanismo de difusión del momento angular interno.

Este comportamiento, previamente reportado para ferrofluidos puros en geometría cilíndrica [13], [15], se extiende aquí a un sistema emulsionado de mayor complejidad estructural, lo que constituye un resultado de interés para la comprensión del transporte de fluidos magnéticos en sistemas multifásicos.

En términos cuantitativos, la emulsión alcanza velocidades de hasta 5,23 mm/s bajo una amplitud de campo de 9,57 mT y una frecuencia de 200 Hz, para amplitudes menores, de 6,28 mT y 4,29 mT, se registran velocidades máximas de 4,16 y 3,29 mm/s respectivamente.

### Figura 51.

*Perfiles de velocidad para  $E_{M\ C1-FFQ\ 5000}$  a diferentes valores de amplitud de campo magnético y una frecuencia de 200 Hz.*



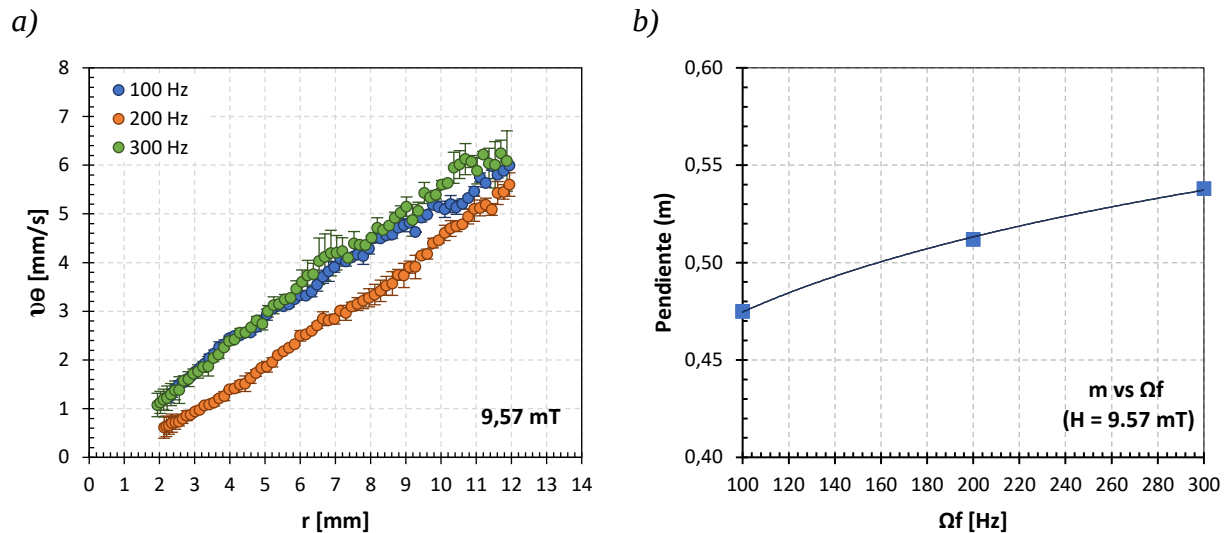
En la Figura 52 se presentan los perfiles de velocidad de la emulsión  $E_{M\ C1-FFQ\ 5000}$  para tres frecuencias (100, 200 y 300 Hz) bajo una amplitud fija de 9,57 mT. A diferencia de lo observado en las mezclas crudo-ferrofluido sin emulsionar, donde la frecuencia es un parámetro que influye en la velocidad inducida, en la emulsión las velocidades máximas registradas son prácticamente independientes de la frecuencia en el rango evaluado: 6,02 mm/s a 100 Hz, 5,98 mm/s a 200 Hz y

6,18 mm/s a 300 Hz, con una variación inferior al 4%. Este comportamiento se refleja igualmente en las velocidades angulares aparentes, obtenidas de la pendiente de los perfiles lineales: 0,475 rad/s a 100 Hz, 0,507 rad/s a 200 Hz y 0,538 rad/s a 300 Hz, que muestran un incremento progresivo pero reducido con la frecuencia, lo que sugiere que la respuesta de la emulsión al campo magnético rotativo es menos sensible a los cambios de frecuencia en el rango evaluado. Esto puede explicarse considerando que, esta emulsión, tiene un diámetro de gota promedio mayor que la emulsión magnética a base de ferrofluido, así que el tiempo de relajación hidrodinámico de la gota debe ser mayor, generando que, para frecuencias similares a las usadas con  $E_{FF-Q}$ , el valor de frecuencia crítica se reduzca.

Por otro lado, de acuerdo con la expresión del torque volumétrico propuesta por Zakinyan & Zakinyan [79], el torque depende del producto  $\omega\tau$  a través de la susceptibilidad dinámica del ferrofluido; sin embargo, en una emulsión la respuesta macroscópica está adicionalmente condicionada por las interacciones entre microgotas, las cuales, a concentraciones relativamente altas, pueden limitar la rotación individual de las gotas y reducir la sensibilidad del flujo a los cambios de frecuencia.

**Figura 52.**

a) Perfiles de velocidad de  $E_{MCI-FFQ\ 5000}$  a diferentes valores de amplitud de campo magnético y una frecuencia de 200 Hz. b) Ajuste de ley de la potencia con la frecuencia.



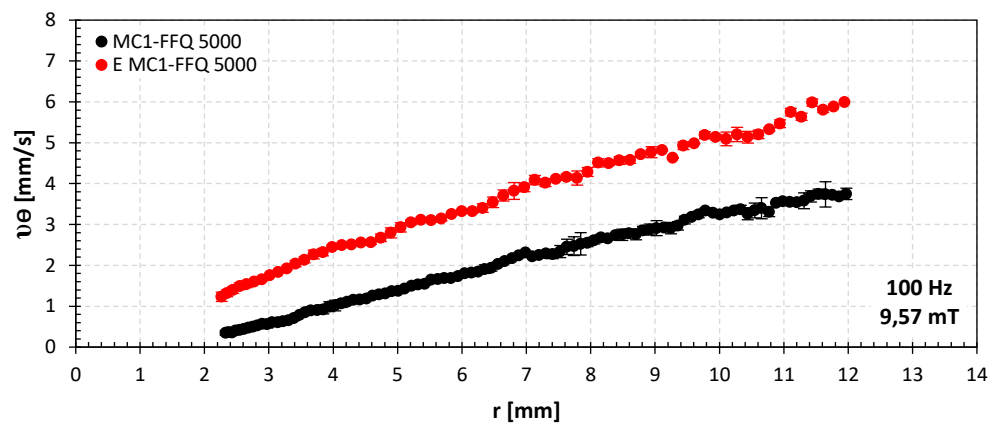
De manera notable, la emulsificación de la mezcla intensifica la respuesta ante el campo magnético en comparación con la mezcla sin emulsionar (Véase Figura 53). Esto es consistente con lo reportado por Gómez *et al.* [24], quienes demostraron que incorporar el ferrofluido como fase dispersa en una emulsión aceite en agua potencia el efecto magnetoviscoso, en comparación con el ferrofluido puro a la misma concentración de nanopartículas y bajo un campo magnético estático perpendicular al flujo. En el mismo sentido, Zakinyan & Zakinyan [79] reportaron la generación de un torque macroscópico en emulsiones de ferrofluido con microgotas deformables bajo la acción de un campo magnético rotativo, demostrando que la magnitud del torque resultante en la emulsión es superior a la observada en ferrofluidos puros de igual contenido magnético. Estos antecedentes son cualitativamente consistentes con el comportamiento observado en las emulsiones crudo-ferrofluido de la presente investigación, sugiriendo que las microgotas juegan

un papel activo en la amplificación de la transferencia del torque magnético hacia el fluido continuo.

En términos cuantitativos, a una frecuencia de 100 Hz y una amplitud de campo magnético de 9,57 mT, la emulsión alcanza una velocidad máxima de 6,02 mm/s, mientras que la mezcla sin emulsionar bajo las mismas condiciones registra 3,75 mm/s, lo que representa un incremento aproximado del 60% como resultado de la emulsificación. Es necesario destacar que el ajuste frente a un modelo lineal tuvo coeficientes de determinación de 99,44% para  $M_{C1-FFQ\ 5000}$  y de 99,14% para  $E_{M\ C1-FFQ\ 5000}$ .

**Figura 53.**

*Perfiles de velocidad de  $E_{M\ C1-FFQ\ 5000}$  y  $M_{C1-FFQ\ 5000}$  a una amplitud de campo magnético de 9,57 mT y una frecuencia de 100 Hz*



### Conclusiones

El presente estudio permitió obtener información experimental sobre el comportamiento de fluidos magnéticos complejos (emulsiones magnéticas y mezclas crudo-ferrofluido) bajo la aplicación de campos magnéticos dependientes del tiempo, específicamente campos magnéticos rotativos (CMR) y de onda viajera (TMF), extendiendo los fenómenos magnetorreológicos previamente documentados en ferrofluidos puros hacia fluidos de mayor complejidad microestructural y viscosidad.

En todos los fluidos estudiados, la aplicación de campos magnéticos rotativos indujo flujo acimutal, el cual fue caracterizado mediante perfiles de velocidad y torques medibles en la superficie cilíndrica. Las emulsiones magnéticas con 15.000 ppm de nanopartículas alcanzaron velocidades acimutales de hasta 8,06 mm/s (9,57 mT, 200 Hz), mientras que emulsiones con 10.000 y 5.000 ppm alcanzaron velocidades de 7,56 mm/s y 6,21 mm/s, respectivamente. Por otro lado, las mezclas crudo-ferrofluido con 5.000 ppm alcanzaron velocidades de hasta 6,18 mm/s bajo las mismas condiciones de campo. En ambos casos, la respuesta mostró dependencia tanto de la frecuencia como de la intensidad del campo, en concordancia con la transferencia de torques magnéticos internos descrita por la teoría de difusión del momento angular.

La aplicación de campos magnéticos de onda viajera logró inducir, por única acción del campo, flujo laminar desarrollado en sistemas cerrados, con perfiles de velocidad axial  $v(z)$  de forma parabólica a lo largo del radio. El caudal exhibió dependencia creciente tanto con la frecuencia como con la intensidad del campo, en el rango evaluado, alcanzando valores de hasta 576,98 mm<sup>3</sup>/s en emulsiones magnéticas (4,25 mT, 400 Hz) y 347,32 mm<sup>3</sup>/s en mezclas crudo-ferrofluido bajo condiciones equivalentes. Este constituye, hasta donde se conoce, el primer

reporte experimental de inducción de flujo mediante TMF en este tipo de fluidos magnéticos complejos, extendiendo el alcance de esta técnica más allá de los ferrofluidos previamente estudiados en la literatura.

Finalmente, se establece que la respuesta magnetorreológica observada en emulsiones y mezclas crudo-ferrofluido fue cualitativamente similar a la reportada para ferrofluidos, lo que valida la extensión de los mecanismos de generación de flujo a sistemas más complejos. Notablemente, la emulsificación de la fase magnética amplificó la respuesta, evidenciando que la microestructura de gotas deformables incrementa el torque magnético efectivo y compensa el efecto de la mayor viscosidad del sistema. Este resultado sugiere que la emulsificación controlada representa una estrategia efectiva para potenciar los efectos magnetoviscosos.

### Referencias Bibliográficas

- [1] H. Peñuela Muñoz, J. Humberto, and P. Muñoz, “Crudos pesados Crudos pesados: la realidad del sector hidrocarburos de Colombia.”
- [2] F. Souas, A. Safri, and A. Benmounah, “A review on the rheology of heavy crude oil for pipeline transportation,” Jun. 01, 2021, *KeAi Publishing Communications Ltd.* doi: 10.1016/j.ptlrs.2020.11.001.
- [3] R. Martínez-Palou *et al.*, “Transportation of heavy and extra-heavy crude oil by pipeline: A review,” Jan. 2011. doi: 10.1016/j.petrol.2010.11.020.
- [4] J.-L. Salager, M. Briceno, M. I. Briceño, and C. L. Bracho, “Heavy hydrocarbon emulsions. Making use of the state of the art in formulation engineering Heavy Hydrocarbon Emulsions 1 Encyclopedic Handbook of EmulsionTechnology Heavy Hydrocarbon Emulsions. Making use of the State of the Art in Formulation Engineering,” 2001. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/303783073>
- [5] J. A. D. Muñoz and J. Ancheyta, “Techno-economic analysis of heating techniques for transportation of heavy crude oils by land pipeline,” *Fuel*, vol. 331, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.fuel.2022.125640.
- [6] R. Tao and X. Xu, “Reducing the viscosity of crude oil by pulsed electric or magnetic field,” *Energy and Fuels*, vol. 20, no. 5, pp. 2046–2051, Sep. 2006, doi: 10.1021/ef060072x.

- [7] J. G. Speight, “Petroleum Asphaltenes Part 1 Asphaltenes, Resins and the Structure of Petroleum,” 2004.
- [8] J. E. Aristizábal-Fontal, F. B. Cortés, and C. A. Franco, “Viscosity reduction of extra heavy crude oil by magnetite nanoparticle-based ferrofluids,” *Adsorption Science and Technology*, vol. 36, no. 1–2, pp. 23–45, Feb. 2018, doi: 10.1177/0263617417704309.
- [9] N. L. Ezeonyeka, A. Hemmati-Sarapardeh, and M. M. Husein, “Asphaltenes Adsorption onto Metal Oxide Nanoparticles: A Critical Evaluation of Measurement Techniques,” *Energy and Fuels*, vol. 32, no. 2, pp. 2213–2223, Feb. 2018, doi: 10.1021/acs.energyfuels.7b03693.
- [10] N. Nassar, A. Hassan, and P. Pereira-Almao, “Metal oxide nanoparticles for asphaltene adsorption and oxidation,” *Energy and Fuels*, vol. 25, no. 3, pp. 1017–1023, Mar. 2011, doi: 10.1021/ef101230g.
- [11] N. Shayan and B. Mirzayi, “Adsorption and removal of asphaltene using synthesized maghemite and hematite nanoparticles,” *Energy and Fuels*, vol. 29, no. 3, pp. 1397–1406, Mar. 2015, doi: 10.1021/ef502494d.
- [12] R. E. Rosensweig, “Ferrohydrodynamics,” 1985.
- [13] A. Chaves, M. Zahn, and C. Rinaldi, “Spin-up flow of ferrofluids: Asymptotic theory and experimental measurements,” *Physics of Fluids*, vol. 20, no. 5, 2008, doi: 10.1063/1.2907221.

- [14] A. Chaves, I. Torres-Díaz, and C. Rinaldi, “Flow of ferrofluid in an annular gap in a rotating magnetic field,” *Physics of Fluids*, vol. 22, no. 9, Sep. 2010, doi: 10.1063/1.3483598.
- [15] A. Chaves, C. Rinaldi, S. Elborai, X. He, and M. Zahn, “Bulk flow in ferrofluids in a uniform rotating magnetic field,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 96, no. 19, 2006, doi: 10.1103/PhysRevLett.96.194501.
- [16] S. M. Elborai, “Ferrofluid Surface and Volume Flows in Uniform Rotating Magnetic Fields,” 2006.
- [17] I. Torres-Díaz, C. Rinaldi, S. Khushrushahi, and M. Zahn, “Observations of ferrofluid flow under a uniform rotating magnetic field in a spherical cavity,” *J. Appl. Phys.*, vol. 111, no. 7, 2012, doi: 10.1063/1.3675153.
- [18] L. Mao and H. Koser, “Ferrohydrodynamic pumping in spatially traveling sinusoidally time-varying magnetic fields,” in *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Mar. 2005, pp. 199–202. doi: 10.1016/j.jmmm.2004.11.058.
- [19] L. Mao, S. Elborai, X. He, M. Zahn, and H. Koser, “Direct observation of closed-loop ferrohydrodynamic pumping under traveling magnetic fields,” *Phys. Rev. B Condens. Matter Mater. Phys.*, vol. 84, no. 10, Sep. 2011, doi: 10.1103/PhysRevB.84.104431.
- [20] B. Jameel *et al.*, “Magnetorheological characterization of oil-in-oil magnetic Pickering emulsions,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 588, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.jmmm.2023.171433.

- [21] P. Capobianchi, M. Lappa, N. Oliveira, and F. T. Pinho, “Shear rheology of a dilute emulsion of ferrofluid droplets dispersed in a non-magnetizable carrier fluid under the influence of a uniform magnetic field,” 2021.
- [22] V. G. Abicalil, R. F. Abdo, L. H. Pires da Cunha, and T. Felamingo de Oliveira, “On the magnetization of dilute ferrofluid emulsions in shear flows,” *Physics of Fluids*, vol. 33, no. 5, p. 053313, May 2021, doi: 10.1063/5.0050643.
- [23] L. H. P. Cunha, I. R. Siqueira, T. F. Oliveira, and H. D. Cenicerros, “Field-induced control of ferrofluid emulsion rheology and droplet break-up in shear flows,” *Physics of Fluids*, vol. 30, no. 12, Dec. 2018, doi: 10.1063/1.5055943.
- [24] V. Gómez-Sanabria, M. D. Contreras-Mateus, A. Chaves-Guerrero, R. Mercado, and N. N. (نشأت ن) Nassar, “Rheology and magnetorheology of ferrofluid emulsions: Insights into formulation and stability,” *Physics of Fluids*, vol. 36, no. 12, p. 123107, Dec. 2024, doi: 10.1063/5.0241606.
- [25] L. Rodríguez, A. Chaves, and V. Gómez Sanabria, “Evaluación del flujo de emulsiones magnéticas y mezclas crudo ferrofluido en campo estático y oscilatorio,” 2025. Accessed: Feb. 17, 2026. [Online]. Available: <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/46016>
- [26] M. D. Contreras-Mateus, M. T. López-López, E. Ariza-León, and A. Chaves-Guerrero, “Rheological implications of the inclusion of ferrofluids and the presence of uniform magnetic field on heavy and extra-heavy crude oils,” *Fuel*, vol. 285, p. 119184, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119184>.

- [27] O. Oehlsen, S. I. Cervantes-Ramírez, P. Cervantes-Avilés, and I. A. Medina-Velo, “Approaches on Ferrofluid Synthesis and Applications: Current Status and Future Perspectives,” *ACS Omega*, vol. 7, no. 4, pp. 3134–3150, Feb. 2022, doi: 10.1021/acsomega.1c05631.
- [28] C. Sarkar and H. Hirani, “Synthesis and characterization of antifriction magnetorheological fluids for brake,” *Def. Sci. J.*, vol. 63, no. 4, pp. 408–412, 2013, doi: 10.14429/dsj.63.2633.
- [29] V. G. Bashtovoi and Y. P. Yarmolchik, “Magnetofluid emulsion: New magnetocontrolled media,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 30, no. 2, pp. 1090–1094, Mar. 1994, doi: 10.1109/20.312504.
- [30] L. H. P. Cunha, I. R. Siqueira, F. R. Cunha, and T. F. Oliveira, “Effects of external magnetic fields on the rheology and magnetization of dilute emulsions of ferrofluid droplets in shear flows,” *Physics of Fluids*, vol. 32, no. 7, Jul. 2020, doi: 10.1063/5.0009983.
- [31] L. Vékás, “Ferrofluids and magnetorheological fluids,” in *CIMTEC 2008 - Proceedings of the 3rd International Conference on Smart Materials, Structures and Systems - Smart Materials and Micro/Nanosystems*, Trans Tech Publications Ltd, 2008, pp. 127–136. doi: 10.4028/www.scientific.net/AST.54.127.
- [32] D. Chakrabarty, S. Dutta, N. Chakraborty, and R. Ganguly, “Magnetically actuated transport of ferrofluid droplets over micro-coil array on a digital microfluidic

- platform,” *Sens. Actuators B Chem.*, vol. 236, pp. 367–377, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.06.001>.
- [33] R. Song, S. Cho, S. Shin, H. Kim, and J. Lee, “From shaping to functionalization of micro-droplets and particles,” *Nanoscale Adv.*, vol. 3, no. 12, pp. 3395–3416, Jun. 2021, doi: 10.1039/d1na00276g.
- [34] Q. Liu, H. Li, and K. Y. Lam, “Optimization of Deformable Magnetic-Sensitive Hydrogel-Based Targeting System in Suspension Fluid for Site-Specific Drug Delivery,” *Mol. Pharm.*, vol. 15, no. 10, pp. 4632–4642, Oct. 2018, doi: 10.1021/acs.molpharmaceut.8b00626.
- [35] L. Vékás, “Ferrofluids and magnetorheological fluids,” in *CIMTEC 2008 - Proceedings of the 3rd International Conference on Smart Materials, Structures and Systems - Smart Materials and Micro/Nanosystems*, Trans Tech Publications Ltd, 2008, pp. 127–136. doi: 10.4028/www.scientific.net/AST.54.127.
- [36] A. D. Rosenthal, C. Rinaldi, T. Franklin, and M. Zahn, “Torque measurements in spin-up flow of ferrofluids,” in *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, Mar. 2004, pp. 198–205. doi: 10.1115/1.1669030.
- [37] J. Kudelcik and M. Kudelcikova, “Magnetic Fluids and their Applications,” *Communications - Scientific letters of the University of Zilina*, vol. 20, no. 1A, pp. 137–143, May 2018, doi: 10.26552/com.C.2018.1A.137-143.
- [38] T. D. Clemons, R. H. Kerr, and A. Joos, “3.10 - Multifunctional Magnetic Nanoparticles: Design, Synthesis, and Biomedical Applications,” in *Comprehensive*

*Nanoscience and Nanotechnology (Second Edition)*, Second Edition., D. L. Andrews, R. H. Lipson, and T. Nann, Eds., Oxford: Academic Press, 2019, pp. 193–210. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.10462-X>.

- [39] B. K. Nandi, R. Uppaluri, and M. K. Purkait, “Effects of dip coating parameters on the morphology and transport properties of cellulose acetate-ceramic composite membranes,” *J. Memb. Sci.*, vol. 330, no. 1–2, pp. 246–258, Mar. 2009, doi: 10.1016/j.memsci.2008.12.071.
- [40] S. Odenbach and S. Thurm, “Magnetoviscous Effects in Ferrofluids.”
- [41] I. Torres-Díaz and C. Rinaldi, “Recent progress in ferrofluids research: novel applications of magnetically controllable and tunable fluids,” *Soft Matter*, vol. 10, no. 43, pp. 8584–8602, 2014, doi: 10.1039/C4SM01308E.
- [42] P. Blümmler, F. Raudzus, and F. Schmid, “A comprehensive approach to characterize navigation instruments for magnetic guidance in biological systems,” *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, Dec. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-58091-x.
- [43] C. Scherer and A. M. Figueiredo Neto, “Ferrofluids: Properties and Applications,” 2005.
- [44] J. P. McTague, “Magnetoviscosity of magnetic colloids,” *J. Chem. Phys.*, vol. 51, no. 50, pp. 133–136, 1969, doi: 10.1063/1.1671697.
- [45] M. I. Shliomis, “Effective Viscosity of Magnetic Suspensions,” 1972.

- [46] A. (方昂波) Fang, “Consistent hydrodynamics of ferrofluids,” *Physics of Fluids*, vol. 34, no. 1, p. 013319, Jan. 2022, doi: 10.1063/5.0079357.
- [47] S. Chen and D. Li, “Control of Magnetic Particle Size in Ferrofluid and Its Effect on Rheological Properties,” *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*, vol. 35, no. 1, Dec. 2022, doi: 10.1186/s10033-022-00718-z.
- [48] M. I. Shliomis and K. I. Morozov, “Negative viscosity of ferrofluid under alternating magnetic field,” *Physics of Fluids*, vol. 6, no. 8, pp. 2855–2861, 1994, doi: 10.1063/1.868108.
- [49] R. Moskowitz and R. E. Rosensweig, “Nonmechanical torque-driven flow of a ferromagnetic fluid by an electromagnetic field,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 11, no. 10, pp. 301–303, 1967, doi: 10.1063/1.1754952.
- [50] J. S. Dahler and L. E. Scriven, “Theory of structured continua I. General consideration of angular momentum and polarization,” *Proc. R. Soc. Lond. A Math. Phys. Sci.*, vol. 275, no. 1363, pp. 504–527, Oct. 1963, doi: 10.1098/rspa.1963.0183.
- [51] J. S. Dahler and L. E. Scriven, “Angular Momentum of Continua,” *Nature*, vol. 192, no. 4797, pp. 36–37, 1961, doi: 10.1038/192036a0.
- [52] D. W. Condiff and J. S. Dahler, “Fluid mechanical aspects of antisymmetric stress,” *Physics of Fluids*, vol. 7, no. 6, pp. 842–854, 1964, doi: 10.1063/1.1711295.
- [53] M. A. Martsenyuk, Y. L. Raikher, and M. I. Shliomis, “On the kinetics of magnetization of suspensions of ferromagnetic particles,” 1974.

- [54] D. Soto-Aquino, D. Rosso, and C. Rinaldi, “Oscillatory shear response of dilute ferrofluids: Predictions from rotational Brownian dynamics simulations and ferrohydrodynamics modeling,” *Phys. Rev. E Stat. Nonlin. Soft Matter Phys.*, vol. 84, no. 5, Nov. 2011, doi: 10.1103/PhysRevE.84.056306.
- [55] R. E. Rosensweig, “Continuum equations for magnetic and dielectric fluids with internal rotations,” *Journal of Chemical Physics*, vol. 121, no. 3, pp. 1228–1242, Jul. 2004, doi: 10.1063/1.1755660.
- [56] I. Torres-Díaz and C. Rinaldi, “Ferrofluid flow in the annular gap of a multipole rotating magnetic field,” *Physics of Fluids*, vol. 23, no. 8, 2011, doi: 10.1063/1.3611027.
- [57] R. E. Rosensweig, J. Popplewell, and R. J. Johnston, “Magnetic fluid motion in rotating field,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 85, no. 1, pp. 171–180, 1990, doi: [https://doi.org/10.1016/0304-8853\(90\)90046-S](https://doi.org/10.1016/0304-8853(90)90046-S).
- [58] P. N. Kaloni, “Some remarks on the boundary conditions for magnetic fluids,” *Int. J. Eng. Sci.*, vol. 30, no. 10, pp. 1451–1457, 1992, doi: [https://doi.org/10.1016/0020-7225\(92\)90155-A](https://doi.org/10.1016/0020-7225(92)90155-A).
- [59] V. Zaitsev and M. Shliomis, “Entrainment of ferromagnetic suspension by a rotating field,” 1969. doi: <https://doi.org/10.1007/BF00907424>.
- [60] A. Chaves, F. Gutman, and C. Rinaldi, “Torque and bulk flow of ferrofluid in an annular gap subjected to a rotating magnetic field,” *Journal of Fluids Engineering*,

*Transactions of the ASME*, vol. 129, no. 4, pp. 412–422, Apr. 2007, doi: 10.1115/1.2567918.

- [61] V. M. Zaitsev and M. I. Shliomis, “Entrainment of ferromagnetic suspension by a rotating field,” *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, vol. 10, no. 5, pp. 696–700, 1969, doi: 10.1007/BF00907424.
- [62] M. S. Haidar, A. Faris, and A. A. Abdulrazak, “Improvement Heavy Oil Transportation IN Pipelines (laboratory study).”
- [63] R. Tao and H. Tang, “Reducing viscosity of paraffin base crude oil with electric field for oil production and transportation,” *Fuel*, vol. 118, pp. 69–72, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.10.056>.
- [64] C. Jiang *et al.*, “Magnetic field effect on apparent viscosity reducing of different crude oils at low temperature,” *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 629, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.colsurfa.2021.127372.
- [65] C. Balan, D. Broboana, E. Gheorghiu, and L. Vékás, “Rheological characterization of complex fluids in electro-magnetic fields,” *J. Nonnewton. Fluid Mech.*, vol. 154, no. 1, pp. 22–30, 2008, doi: 10.1016/j.jnnfm.2008.01.007.
- [66] A. D. Kulkarni and K. S. Wani, “Prediction of viscosity in magnetic fluid conditioning of crude oil,” *Mater. Today Proc.*, vol. 57, pp. 1871–1876, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.01.181.

- [67] X. Chen, L. Hou, W. Li, S. Li, and Y. Chen, “Molecular dynamics simulation of magnetic field influence on waxy crude oil,” *J. Mol. Liq.*, vol. 249, pp. 1052–1059, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.molliq.2017.11.101.
- [68] I. Wiehe, *Process Chemistry of Petroleum Macromolecules*. 2008. doi: 10.1201/9780367800901.
- [69] M. Ghanavati, M.-J. Shojaei, and S. A. Ahmad Ramazani, “Effects of asphaltene content and temperature on viscosity of Iranian heavy crude oil: Experimental and modeling study,” *Energy and Fuels*, vol. 27, no. 12, pp. 7217 – 7232, 2013, doi: 10.1021/ef400776h.
- [70] E. A. Taborda, C. A. Franco, M. A. Ruiz, V. Alvarado, and F. B. Cortés, “Experimental and Theoretical Study of Viscosity Reduction in Heavy Crude Oils by Addition of Nanoparticles,” *Energy and Fuels*, vol. 31, no. 2, pp. 1329–1338, Feb. 2017, doi: 10.1021/acs.energyfuels.6b02686.
- [71] L. Mateus, E. A. Taborda, C. Moreno-Castilla, M. V. López-Ramón, C. A. Franco, and F. B. Cortés, “Extra-heavy crude oil viscosity reduction using and reusing magnetic copper ferrite nanospheres,” *Processes*, vol. 9, no. 1, pp. 1–16, Jan. 2021, doi: 10.3390/pr9010175.
- [72] D. Montes, “Upscaling Process for Nanofluids Usage for Heavy Oil Mobility Enhancement: Experimental Design and Field Trial Application,” 2020. [Online]. Available: <http://onepetro.org/SPEATCE/proceedings-pdf/20ATCE/2-20ATCE/D023S100R015/2492321/spe-204273-stu.pdf/1>

- [73] M. D. Contreras-Mateus, A. Chaves-Guerrero, N. N. Nassar, and F. H. Sánchez, “Exploring induced microstructural changes in magnetically modified crude oils through nonlinear rheology and magnetometry,” *Physics of Fluids*, vol. 36, no. 4, p. 043115, Apr. 2024, doi: 10.1063/5.0205277.
- [74] Yu. I. Dikansky and A. R. Zakinyan, “Dynamics of a nonmagnetic drop suspended in a magnetic fluid in a rotating magnetic field,” *Technical Physics*, vol. 55, no. 8, pp. 1082–1086, 2010, doi: 10.1134/S1063784210080025.
- [75] J. H. E. Promislow and A. P. Gast, “Magnetorheological Fluid Structure in a Pulsed Magnetic Field,” *Langmuir*, vol. 12, no. 17, pp. 4095–4102, Jan. 1996, doi: 10.1021/la960104g.
- [76] L. H. P. Cunha, I. R. Siqueira, F. R. Cunha, and T. F. Oliveira, “Effects of external magnetic fields on the rheology and magnetization of dilute emulsions of ferrofluid droplets in shear flows,” *Physics of Fluids*, vol. 32, no. 7, p. 073306, Jul. 2020, doi: 10.1063/5.0009983.
- [77] A. Zakinyan and Y. Dikansky, “Drops deformation and magnetic permeability of a ferrofluid emulsion,” *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 380, no. 1–3, pp. 314–318, May 2011, doi: 10.1016/j.colsurfa.2011.03.018.
- [78] A. O. Ivanov, O. B. Kuznetsova, and I. M. Subbotin, “Magnetic properties of ferrofluid emulsions: Model of non-interacting droplets,” *Magnetohydrodynamics*, vol. 47, no. 2, pp. 129–134, 2011, doi: 10.22364/mhd.47.2.3.

- [79] A. R. Zakinyan and A. A. Zakinyan, “Rotating field induced torque on ferrofluid emulsion with deformable dispersed phase microdrops,” *Sens. Actuators A Phys.*, vol. 314, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.sna.2020.112347.
- [80] A. L. Guilherme, I. R. Siqueira, L. H. P. Cunha, R. L. Thompson, and T. F. Oliveira, “Ferrofluid droplets in planar extensional flows: Droplet shape and magnetization reveal novel rheological signatures of ferrofluid emulsions,” *Phys. Rev. Fluids*, vol. 8, no. 6, p. 63601, Jun. 2023, doi: 10.1103/PhysRevFluids.8.063601.
- [81] A. Pajouhandeh, A. Kavousi, M. Schaffie, and M. Ranjbar, “Towards a mechanistic understanding of rheological behaviour of water-in-oil emulsion: Roles of nanoparticles, water volume fraction and aging time,” *South African Journal of Chemistry*, vol. 69, pp. 113–123, 2016, doi: 10.17159/0379-4350/2016/v69a14.
- [82] L. Peña, “Síntesis y caracterización reológica de emulsiones crudo-ferrofluido/agua,” 2025. Accessed: Jan. 22, 2026. [Online]. Available: <https://noesis.uis.edu.co/items/8f62afe4-999e-42db-84cd-24d545affb42>
- [83] B. D. Chin, J. H. Park, M. H. Kwon, and O. O. Park, “Rheological properties and dispersion stability of magnetorheological (MR) suspensions,” *Rheol. Acta*, vol. 40, no. 3, pp. 211–219, 2001, doi: 10.1007/s003970000150.
- [84] V. Gómez Sanabria and L. G. Lucas Lancheros, “Formulación y caracterización de emulsiones magnéticas aceite-agua,” Universidad Industrial de Santander, 2022.

- [85] C. Rinaldi, F. Gutman, X. He, A. D. Rosenthal, and M. Zahn, “Torque measurements on ferrofluid cylinders in rotating magnetic fields,” in *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Mar. 2005, pp. 307–310. doi: 10.1016/j.jmmm.2004.11.087.
- [86] I. Boldea and S. A. Nasar, “Linear electric actuators and generators,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 14, no. 3, pp. 712–717, 1999, doi: 10.1109/60.790940.
- [87] S. Krishna, G. Thonhauser, S. Kumar, A. Elmgerbi, and K. Ravi, “Ultrasound velocity profiling technique for in-line rheological measurements: A prospective review,” Dec. 01, 2022, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.measurement.2022.112152.
- [88] E. Y. Wong, M. L. Thorne, H. N. Nikolov, T. L. Poepping, and D. W. Holdsworth, “Doppler Ultrasound Compatible Plastic Material for Use in Rigid Flow Models,” *Ultrasound Med. Biol.*, vol. 34, no. 11, pp. 1846–1856, 2008, doi: 10.1016/j.ultrasmedbio.2008.01.002.
- [89] Y. Takeda, “Velocity profile measurement by ultrasonic doppler method,” *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 10, no. 4, pp. 444–453, 1995, doi: [https://doi.org/10.1016/0894-1777\(94\)00124-Q](https://doi.org/10.1016/0894-1777(94)00124-Q).
- [90] C. Tan, Y. Murai, W. Liu, Y. Tasaka, F. Dong, and Y. Takeda, “Ultrasonic Doppler Technique for Application to Multiphase Flows: A Review,” Nov. 01, 2021, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2021.103811.
- [91] S. A Signal Processing, *Functioning principles of pulsed Doppler ultrasound. Signal Processing*. 2019.

- [92] Y. Takeda, “Velocity profile measurement by ultrasonic doppler method,” *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 10, no. 4, pp. 444–453, May 1995, doi: 10.1016/0894-1777(94)00124-Q.
- [93] H. Kikura, Y. Takeda, and T. Sawada, “Velocity profile measurements of magnetic fluid flow using ultrasonic Doppler method,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 201, no. 1–3, pp. 276–280, Jul. 1999, doi: 10.1016/S0304-8853(99)00008-6.
- [94] “File:Pulse doppler theory.gif - Wikimedia Commons.” Accessed: Oct. 04, 2025. [Online]. Available: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pulse\\_doppler\\_theory.gif](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pulse_doppler_theory.gif)
- [95] “Working principle of Ultrasonic Doppler Velocimetry (UDV) and velocity profiles measurements | Signal Processing.” Accessed: Oct. 04, 2025. [Online]. Available: <https://www.signal-processing.com/background.php>
- [96] Y. Takeda, “Development of an ultrasound velocity profile monitor,” *Nuclear Engineering and Design*, vol. 126, no. 2, pp. 277–284, 1991, doi: [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(91\)90117-Z](https://doi.org/10.1016/0029-5493(91)90117-Z).
- [97] Y. Takeda, “Velocity profile measurement by ultrasound Doppler shift method,” *Int. J. Heat Fluid Flow*, vol. 7, no. 4, pp. 313–318, 1986, doi: [https://doi.org/10.1016/0142-727X\(86\)90011-1](https://doi.org/10.1016/0142-727X(86)90011-1).
- [98] T. Wang, J. Wang, F. Ren, and Y. Jin, “Application of Doppler ultrasound velocimetry in multiphase flow,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 92, no. 1–3, pp. 111–122, Apr. 2003, doi: 10.1016/S1385-8947(02)00128-6.

- [99] I. Torres-Diaz, A. Cortes, Y. Cedeño-Mattei, O. Perales-Perez, and C. Rinaldi, “Flows and torques in Brownian ferrofluids subjected to rotating uniform magnetic fields in a cylindrical and annular geometry,” *Physics of Fluids*, vol. 26, no. 1, p. 012004, Jan. 2014, doi: 10.1063/1.4863201.
- [100] Z. Zhu, L. Hou, X. Zhang, J. Liu, X. Sun, and Y. Xiong, “Effect of magnetic field on the apparent viscosity of water-in-oil waxy crude oil emulsion,” *J. Mol. Liq.*, vol. 400, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.molliq.2024.124575.
- [101] R. Upadhyay, K. Raj, K. Parekh, M. Pisuwala, and M. Jadav, “The viscous response of ferrofluids subjected to external magnetic field,” *J. Dispers. Sci. Technol.*, vol. 44, no. 13, pp. 2541–2554, 2023, doi: 10.1080/01932691.2022.2106997.
- [102] Z. Zhu, L. Hou, X. Zhang, J. Liu, X. Sun, and Y. Xiong, “Experimental Investigation on Viscosity Change of Waxy Crude Oil Emulsion with Magnetic Field,” 2023.
- [103] I. N. Evdokimov and K. A. Kornishin, “Apparent disaggregation of colloids in a magnetically treated crude oil,” *Energy and Fuels*, vol. 23, no. 8, pp. 4016–4020, Aug. 2009, doi: 10.1021/ef900296e.
- [104] Y. V. Loskutova, N. V. Yudina, and S. I. Pisareva, “Effect of magnetic field on the paramagnetic, antioxidant, and viscosity characteristics of some crude oils,” *Petroleum Chemistry*, vol. 48, no. 1, pp. 51–55, 2008, doi: 10.1134/s0965544108010106.

- [105] A. Chaves, J. Rey, J. Pinzón, E. Ariza, and C. Jiménez, “Estudio de la influencia de un campo eléctrico externo en la movilidad de crudos parafinico,” 2013.

## Apéndices

### Apéndice A: Tecnologías tradicionales para mejorar el transporte de crudo

Una opción eficiente es el calentamiento mediante intercambiadores de calor o calentadores directos, sin embargo, esta tecnología tiene como desventaja altos costos tanto operativos como de inversión, en parte debido al incremento de la corrosión interna de las tuberías causada por las elevadas temperaturas requeridas para mantener el flujo. Además, exige un gran número de estaciones de calentamiento a lo largo del oleoducto, lo cual aumenta la complejidad y las pérdidas de calor en el trayecto, especialmente en condiciones de bajo caudal. Estas pérdidas, junto con la generación de vapores asociados al calentamiento, pueden tener efectos adversos sobre el medio ambiente, lo que plantea desafíos adicionales en términos de sostenibilidad y normativas de emisiones [2], [3]. Otra alternativa de uso común para mejorar el flujo, consiste en diluir el crudo pesado, con crudos más ligeros o solventes, permitiendo disminuir las pérdidas de energía mecánica por fricción en las tuberías; no obstante, el costo de los diluyentes, como la nafta, puede ser alto en ciertas regiones o causar desestabilización de asfaltenos [3], [5], además de la disminución del volumen efectivo de crudo transportado. Otra técnica es la creación de emulsiones aceite-agua (O/W), su principal ejemplo de aplicación fue la Orimulsión®, desarrollada por PDVSA (Petróleos de Venezuela) en la década de los ochenta. Esta técnica consiste en una emulsión de crudo pesado en agua, generalmente con una concentración volumétrica de aproximadamente 70% de crudo y 30% de agua y se desarrolló para facilitar el transporte del crudo pesado [4]. Durante la década de los 90, la Orimulsión® se consolidó como un producto exitoso en el mercado energético debido a sus propiedades y su competitividad frente a otras fuentes de combustibles. Sin embargo, a finales de esa década, las tecnologías de mejora del crudo

comenzaron a evolucionar de manera significativa, lo que permitió transformar el bitumen en productos de mayor valor añadido. Esto generó una nueva competencia por el uso del betún, ya que se empezó a priorizar su conversión en derivados más rentables en lugar de su emulsificación en agua, reduciendo la demanda de Orimulsión® [3].

Con el mismo objetivo, también se ha investigado la técnica de flujo anular, en esta se utiliza el agua como fluido anular entre la tubería y el crudo con el propósito de reducir las fuerzas de fricción y por lo tanto mejorar la movilidad del crudo en las tuberías, una opción viable en climas fríos o regiones offshore [2]. Sin embargo, tiene como desventaja la dificultad para mantener una película de agua hidrodinámicamente estable [3]. Si bien, estas tecnologías muestran potencial, su implementación sigue planteando desafíos, en particular en lo que respecta a la viabilidad económica y las complejidades operativas asociadas al transporte de crudo pesado.

### **Apéndice B: Efecto de campos magnéticos sobre crudos**

Al aplicar campos magnéticos en crudos se debe tener en cuenta que su efecto en las propiedades del crudo depende de una serie de parámetros como la fuerza del campo magnético, el tiempo de exposición y la composición del crudo [63], [65], [66], [67], [100], [101]. Estos mecanismos implican principalmente la interacción de los campos magnéticos con la estructura molecular de los fluidos, lo que provoca cambios en la agregación de partículas y la dinámica de los fluidos [100], [102]. Las investigaciones indican que tanto los campos eléctricos como los magnéticos pulsados pueden inducir una agregación temporal de partículas en el crudo, lo que altera sus propiedades reológicas al cambiar la forma en que las partículas interactúan entre sí, mejorando así las características generales de flujo, lo que lleva a una disminución de la viscosidad sin alterar la temperatura [6], [63]. Por ejemplo, un estudio de Jiang *et al.* [64] demostró

reducciones de viscosidad de hasta un 26,88% a 5 °C utilizando una densidad de flujo magnético de 1 T. Esto se le atribuyó a cambios en la agregación de las partículas en suspensión, las cuales fueron influidas por la intensidad y la frecuencia del campo magnético [64], [102]. Así mismo, otras investigaciones han planteado que las fuerzas magnéticas rompen, reorientan o cambian la morfología de los agregados [103], [104]. Experimentalmente, observaron por espectroscopía UV-Vis una reducción en el coeficiente de extinción que sirvió como indicador cualitativo de la disminución del tamaño de partícula, lo que les permitió proponer que el campo magnético rompe los enlaces de hidrógeno de los asfaltenos y, en consecuencia, los desagrega [103].

No obstante, a diferencia de lo sugerido en otros estudios, Contreras *et al.* [26] no observaron cambios en el comportamiento reológico de cinco crudos pesados bajo un campo magnético estático, lo cual subraya la importancia de investigar más a fondo cómo las propiedades magnéticas pueden influir en la reología del crudo, especialmente en sistemas de mayor complejidad composicional.

En el caso de campos eléctricos un estudio de Chaves *et al.* [105] analizó el impacto de los campos eléctricos externos en la movilidad de los crudos parafínicos, centrándose específicamente en su viscosidad, punto de enturbiamiento y punto de fluidez. Los resultados experimentales indicaron que la aplicación de campos eléctricos provocó cambios significativos en estas propiedades lo que resultó en un aumento de la viscosidad, el punto de enturbiamiento y el punto de fluidez del petróleo crudo. Esto sugiere que la exposición a campos eléctricos acelera la precipitación de compuestos orgánicos, lo que es contraproducente para la producción y el transporte del petróleo.

A partir de la información disponible sobre la aplicación de campos eléctricos y magnéticos, es necesario destacar que la literatura presenta numerosas contradicciones en cuanto a los efectos de los campos magnéticos y eléctricos sobre los crudos, lo cual dificulta alcanzar conclusiones definitivas sobre su influencia en las propiedades reológicas de los crudos y si permite mejorar el transporte de los crudos.

### **Apéndice C: Medición Velocidad del Sonido**

La velocidad del sonido puede variar significativamente según las propiedades del medio, estas variaciones afectan la conversión de las frecuencias Doppler medidas en velocidades de flujo reales. El equipo DOP4000 permite calcular la velocidad del sonido midiendo el tiempo que tarda una ráfaga ultrasónica en propagarse a una distancia definida, esta se denomina “*distancia de referencia*” y debe estar en el rango de 15 a 50 mm [91], para esto se realizó el diseño y construcción de una configuración utilizando un micrómetro de profundidad y un patrón como se muestra en la Figura C1. La precisión de la medición se garantizó realizando ensayos con fluidos de referencia.

**Figura C1.** Configuración experimental para medición de velocidad del sonido.



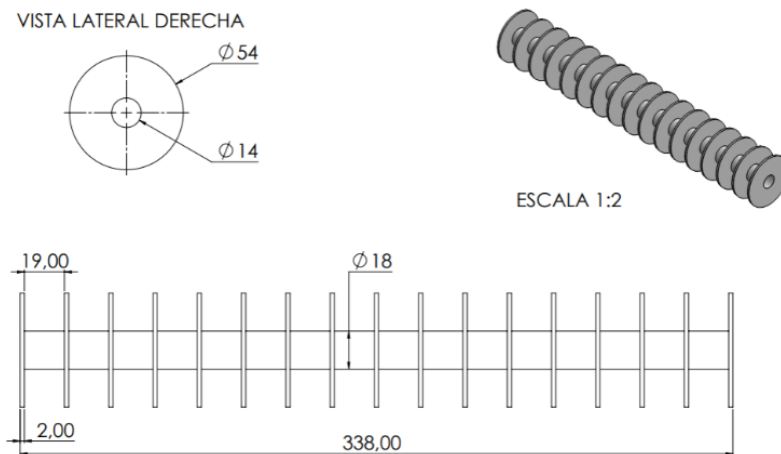
**Apéndice D: Diseño y construcción del sistema generador de campo magnético de onda viajera**

Se realizó el diseño del generador de campo magnético de onda viajera, fundamentado en el trabajo de Mao *et al.* [19], adaptado para cumplir con los materiales disponibles para la construcción de los carretes de cada una de las bobinas, del material conductor y las conexiones de los enrollamientos de cada una de las ranuras. En este trabajo, el equipo se usó para estudiar el efecto sobre el comportamiento de mezclas de crudo ferrofluido y emulsiones magnéticas.

El ensamblaje de las bobinas electromagnéticas se realizó usando 8 rollos de cintas de cobre *Holland Shielding System BV* (número de pieza 3218-20-16,5) de 16,8 m de longitud aproximadamente cada una. El espesor de la cinta de cobre es de 0,38 mm, de los cuales 0,18 mm son del grosor del cobre y 0,20 mm de un adhesivo que funciona como aislante eléctrico.

El embobinado se construyó sobre un carrete en forma de cilindro hueco con diámetro interno de 18 mm y 16 ranuras separables donde se realizó el enrollamiento de la cinta de cobre (62 vueltas). El material del carrete es plástico que soporta el armado del embobinado. Las medidas del carrete son las mostradas en la Figura D1.

**Figura D1.** *Diseño de carrete de 16 ranuras y 18 mm de diámetro para embobinado electromagnético.*



Para la ejecución de la construcción, se mecanizaron cada uno de los dieciséis carretes o slots, que forman cada ranura para soportar el devanado o bobina de cinta de cobre, como se muestra en la Figura D2.

**Figura D2.** Secciones individuales para construcción de carrete



Este diseño permite, de una manera ingeniosa, conectar el cable que alimenta con corriente el arrollamiento de cinta de cobre (entrada de corriente) en cada ranura o slot; esto se hizo haciendo una pequeña canal que permite ubicar un alambre que sale por el lado del carrete y que está en estrecho contacto con el inicio del devanado de cinta de cobre, permitiendo alimentar la bobina con corriente. La transición de cinta de cobre a cable, en la salida de la corriente de la bobina, se hizo con una abrazadera tipo clip como la mostrada en la Figura D3.

**Figura D3.** Canal para cable que hace contacto con el inicio del devanado y abrazadera tipo clip para transición de la cinta de cobre al cable.



Una vez enrollada cada ranura en el carrete plástico, se ensamblan una tras otra hasta completar las 16 bobinas requeridas, conservando las medidas mencionadas anteriormente.

**Figura D4.** Ensamblaje de bobina electromagnética a partir de las secciones individuales.



Cada una de las bobinas se conectó de manera individual, a través de la caja de conexiones externa que se observa en la imagen; esto con el fin de poder retirar las bobinas individualmente en el caso de que una de ellas falle. Se revisó que la continuidad de corriente entre cada uno de los cables que salen de las bobinas y van a la caja de conexiones funcionaran y evaluó la forma en que se deben conectar estas bobinas a los amplificadores de corriente, generador de señales y multímetros.

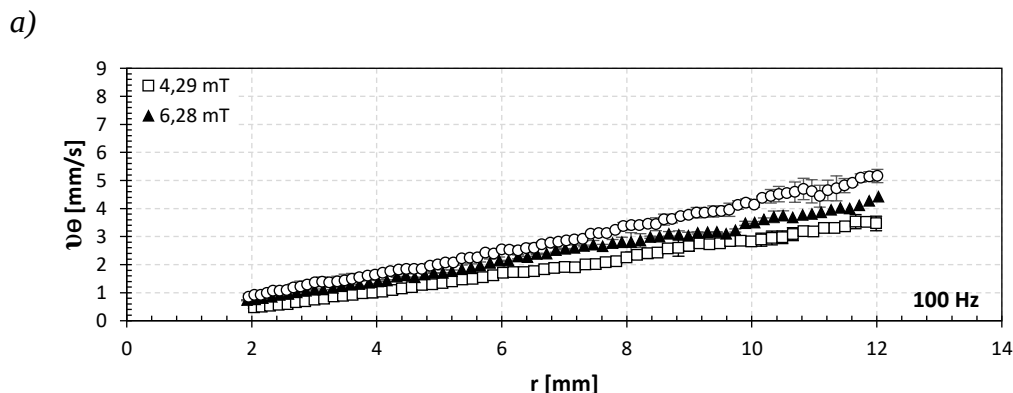
Para la generación de campos magnéticos de onda viajera, se alimentan al embobinado electromagnético dos señales sinusoidales desfasadas  $90^\circ$ . La diferencia de fases y la frecuencia del campo son controladas por un generador de señales (Rigol DG1022) y la amplitud del campo por dos amplificadores de corriente (AE TECHRON 7224). Las cuatro fases equilibradas ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  y  $270^\circ$ ) constituyen un período completo del campo magnético viajero de manera similar al estator de un motor eléctrico lineal, donde Mao *et al.* [18], [19], confirmaron que las amplitudes del campo magnético generadas dentro de la tubería dependen linealmente de las amplitudes de corriente aplicadas.

### Apéndice E: Perfiles de velocidad bajo CMR

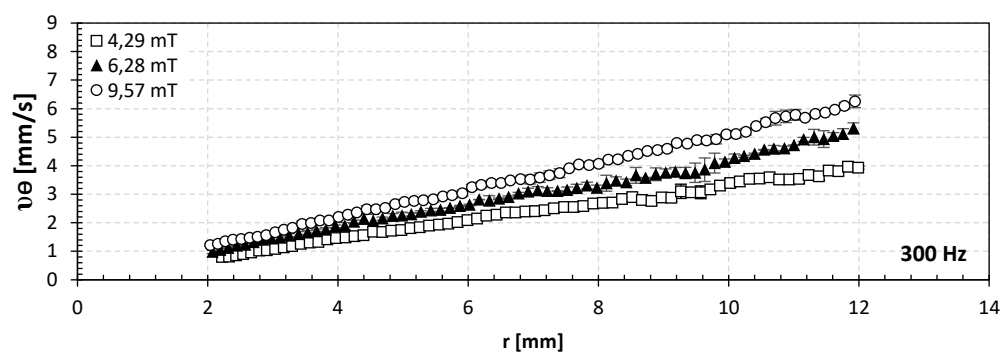
Se realizó la medición de los perfiles de velocidad de emulsiones magnéticas y mezclas crudo-ferrofluido bajo campos magnéticos rotativos, como se explica en la Sección 4.4.2 a diferentes condiciones de frecuencia e intensidad del campo.

#### *Perfiles de velocidad emulsiones a base ferrofluido*

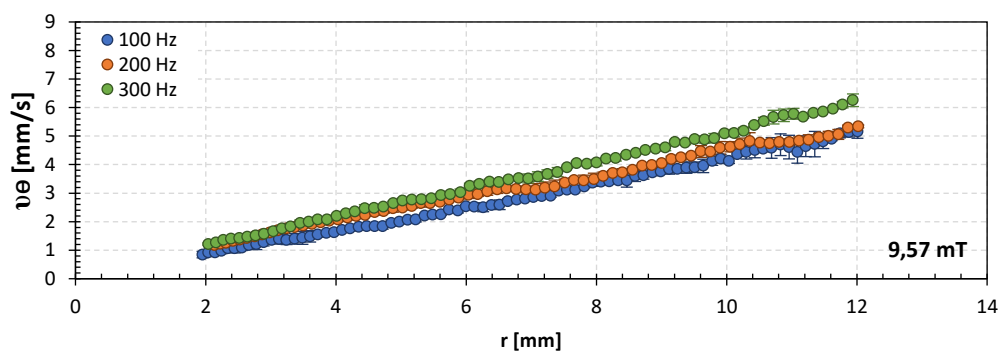
**Figura E1.** Perfiles de velocidad  $E_{FF-Q5000}$  a diferentes valores de amplitud de campo magnético y una frecuencia de a) 100 Hz y b) 300 Hz



b)

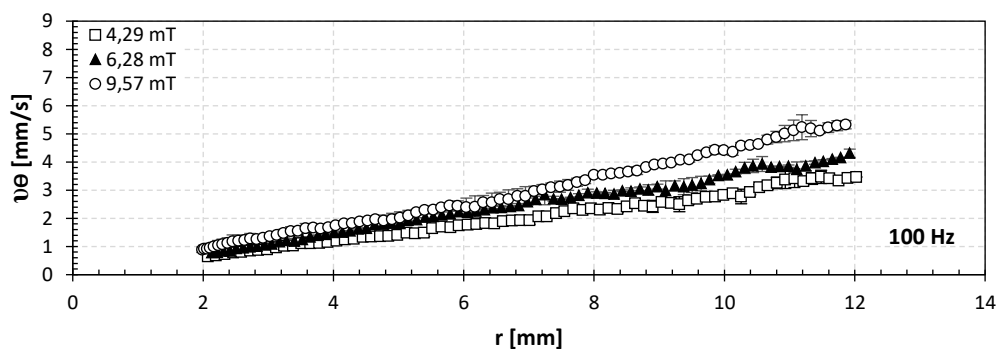


**Figura E2.** Perfiles de velocidad  $E_{FF-Q5000}$  a diferentes valores de frecuencia y una amplitud de campo de 9,57 mT

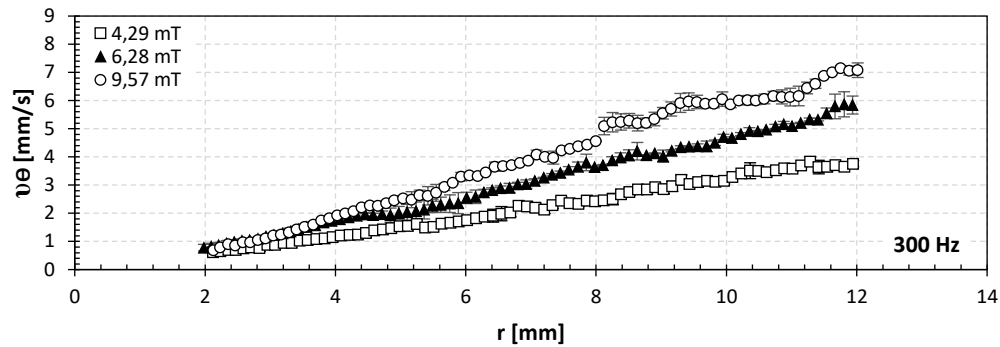


**Figura E3.** Perfiles de velocidad  $E_{FF-Q10000}$  a diferentes valores de amplitud de campo magnético y una frecuencia de a) 100 Hz y b) 300 Hz

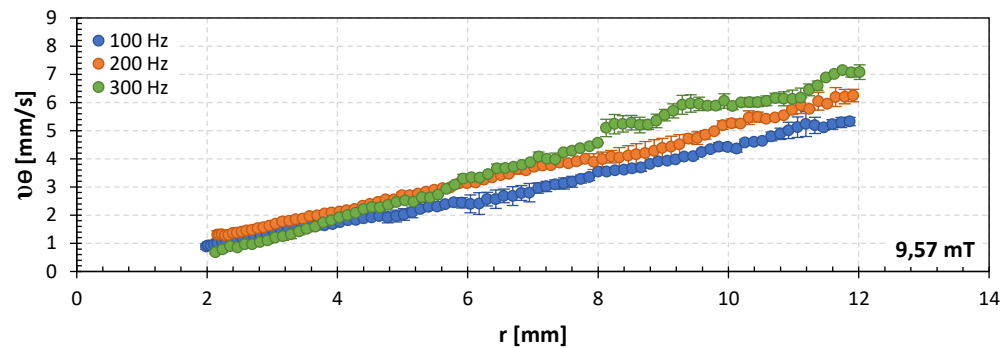
a)



b)

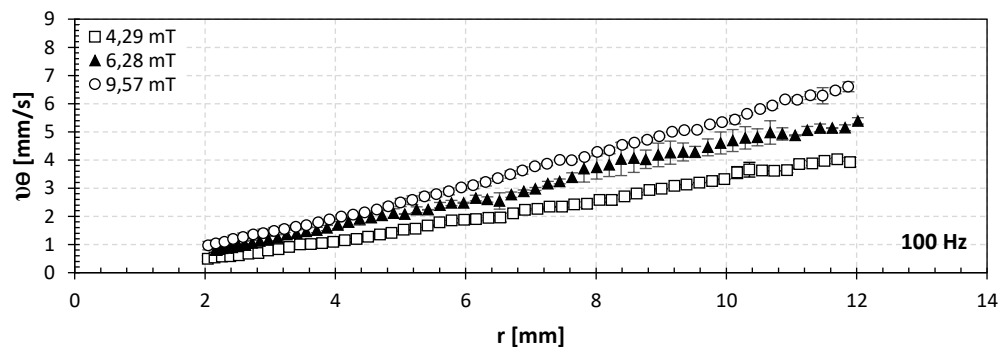


**Figura E4.** Perfiles de velocidad  $E_{FF-Q10000}$  a diferentes valores de frecuencia y una amplitud de campo de 9,57 mT

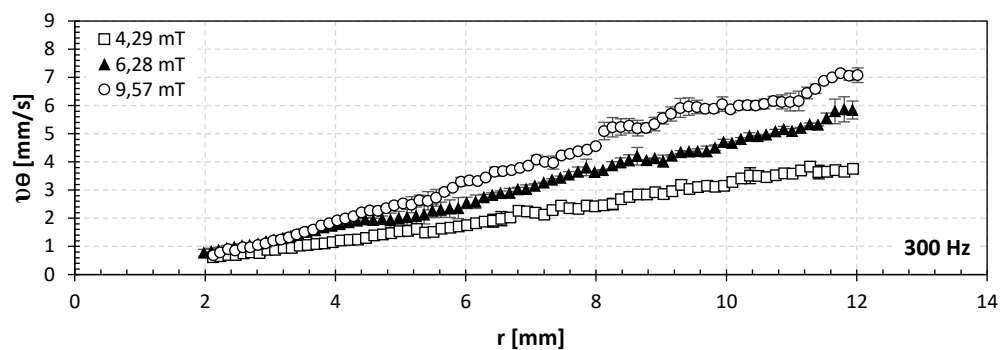


**Figura D5.** Perfiles de velocidad  $E_{FF-Q15000}$  a diferentes valores de amplitud de campo magnético y una frecuencia de a) 100 Hz y b) 300 Hz

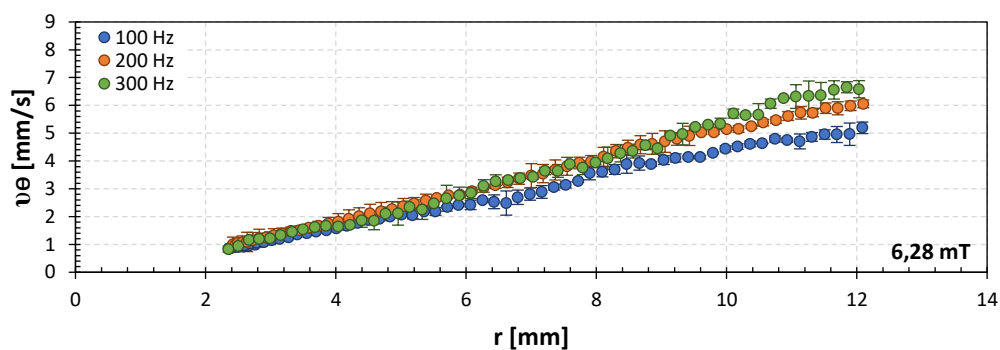
a)



b)



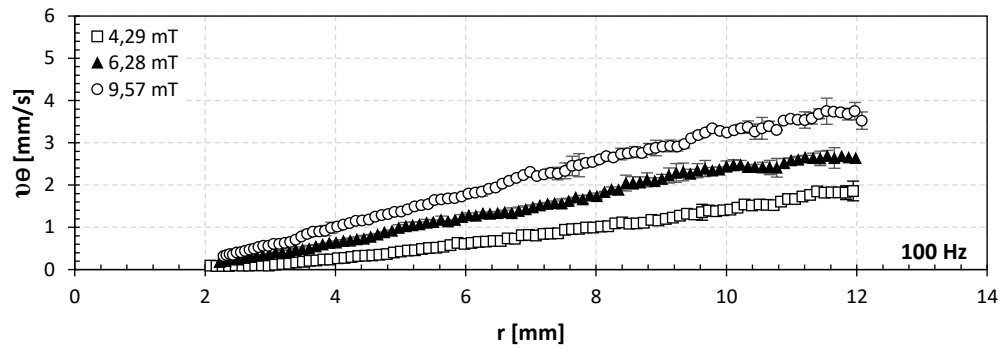
**Figura E6.** Perfiles de velocidad  $E_{FF-Q15000}$  a diferentes valores de frecuencia y una amplitud de campo de 6,28 mT



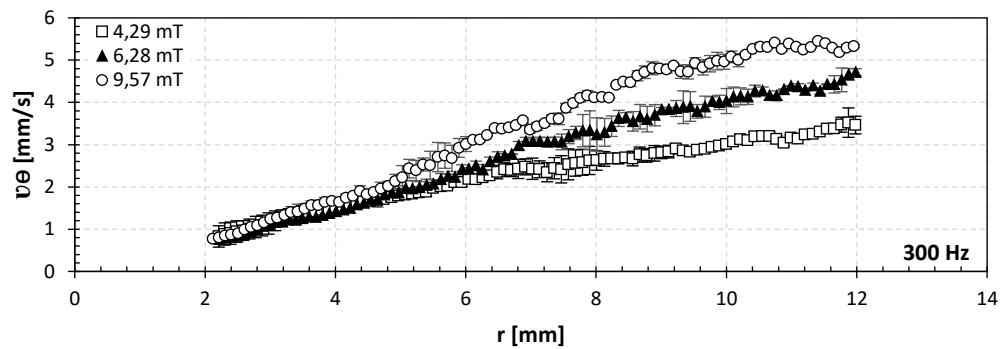
### Perfiles de velocidad mezclas crudo-ferrofluido

**Figura E7.** Perfiles de velocidad  $M_{C1-FFQ5000}$  a diferentes valores de amplitud de campo magnético y una frecuencia de a) 100 Hz y b) 300 Hz

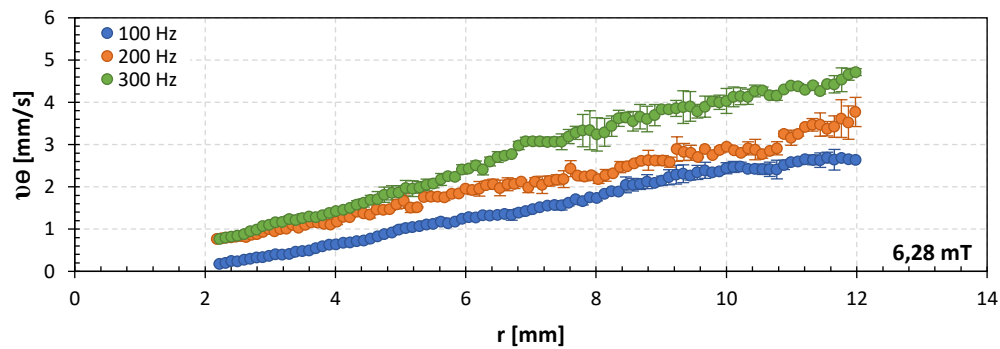
a)



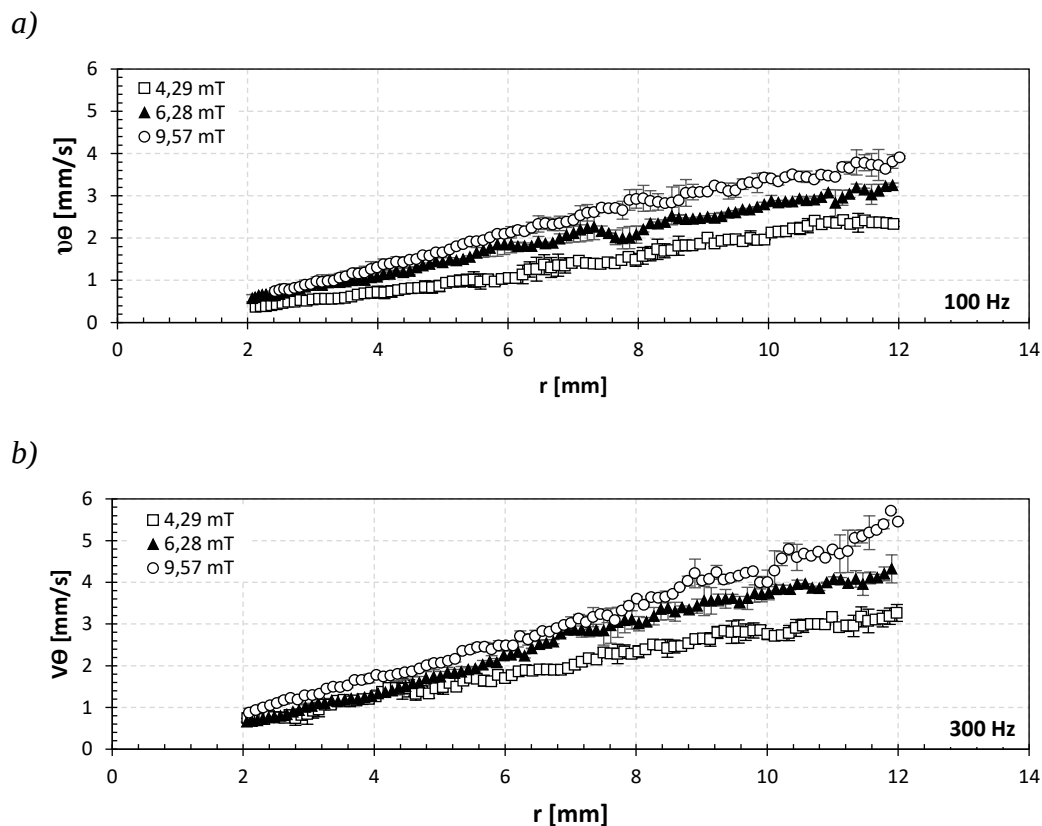
b)



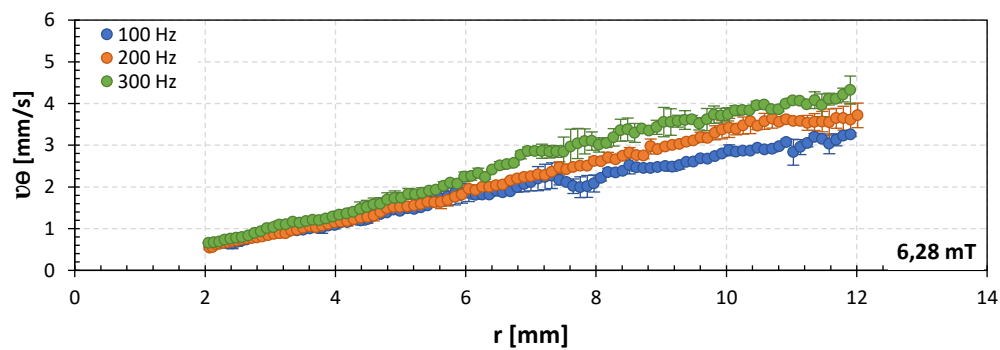
**Figura E8.** Perfiles de velocidad  $E_{FF-Q15000}$  a diferentes valores de frecuencia y una amplitud de campo de 6,28 mT



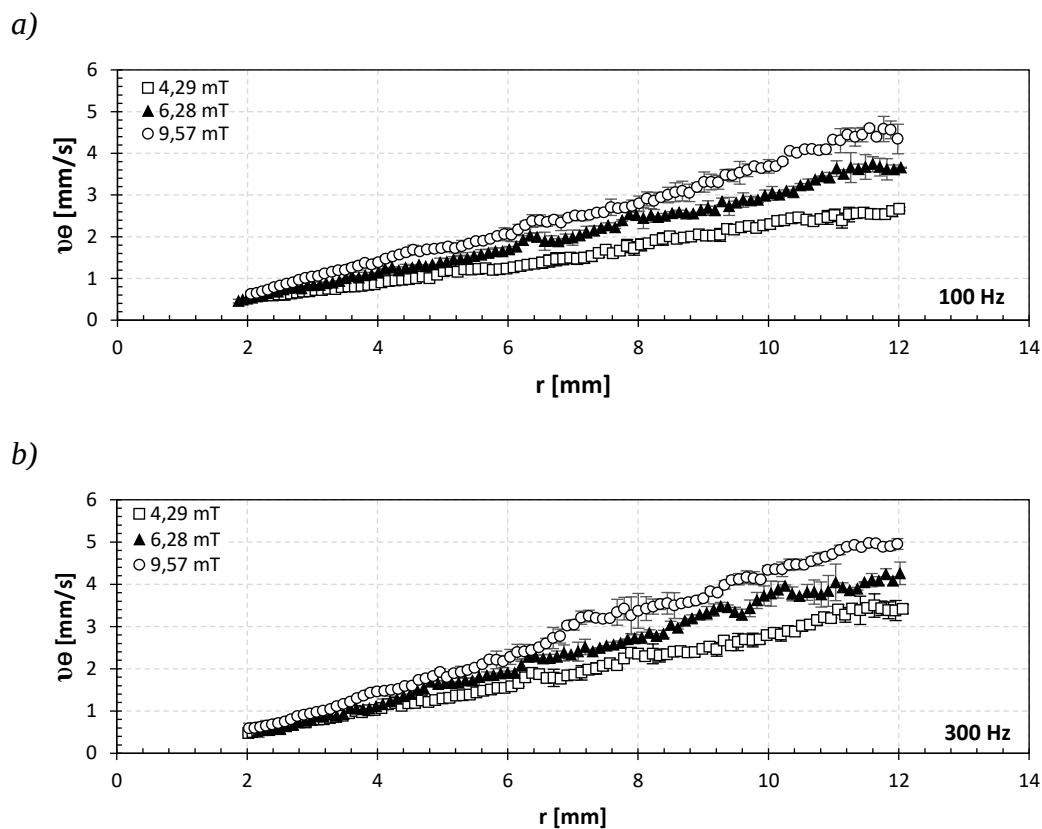
**Figura E9.** Perfiles de velocidad  $M_{C3-FFQ5000}$  a diferentes valores de amplitud de campo magnético y una frecuencia de a) 100 Hz y b) 300 Hz



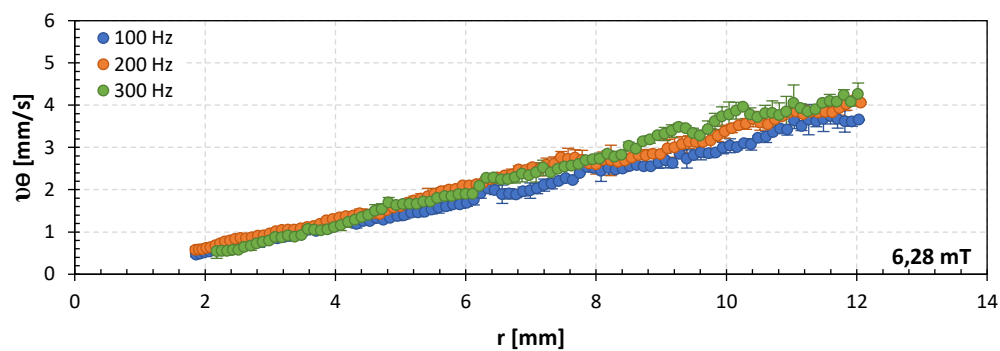
**Figura E10.** Perfiles de velocidad  $M_{C3-FFQ5000}$  a diferentes valores de frecuencia y una amplitud de campo de 6,28 mT



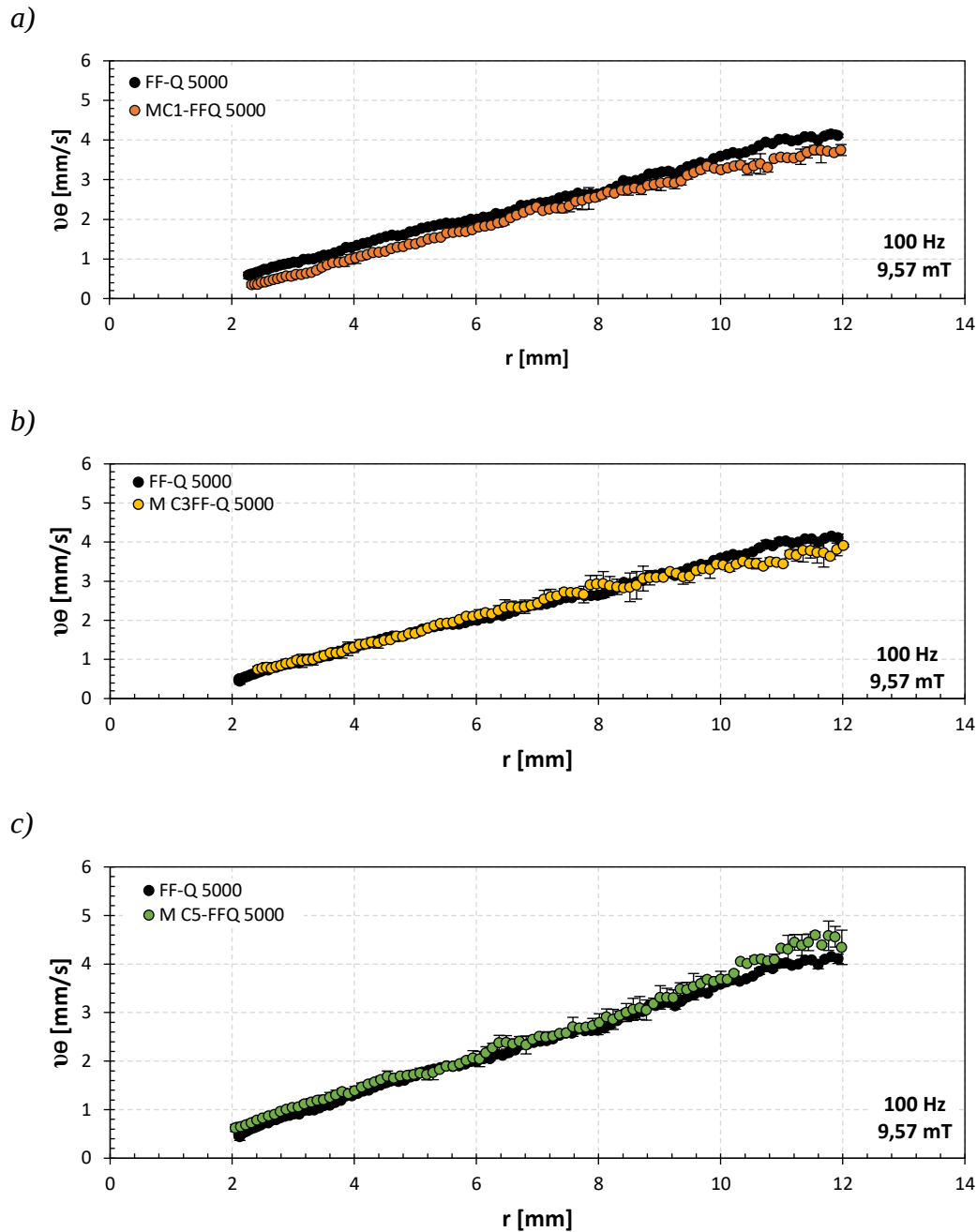
**Figura E11.** Perfiles de velocidad  $M_{C5-FFQ5000}$  a diferentes valores de amplitud de campo magnético y una frecuencia de a) 100 Hz y b) 300 Hz



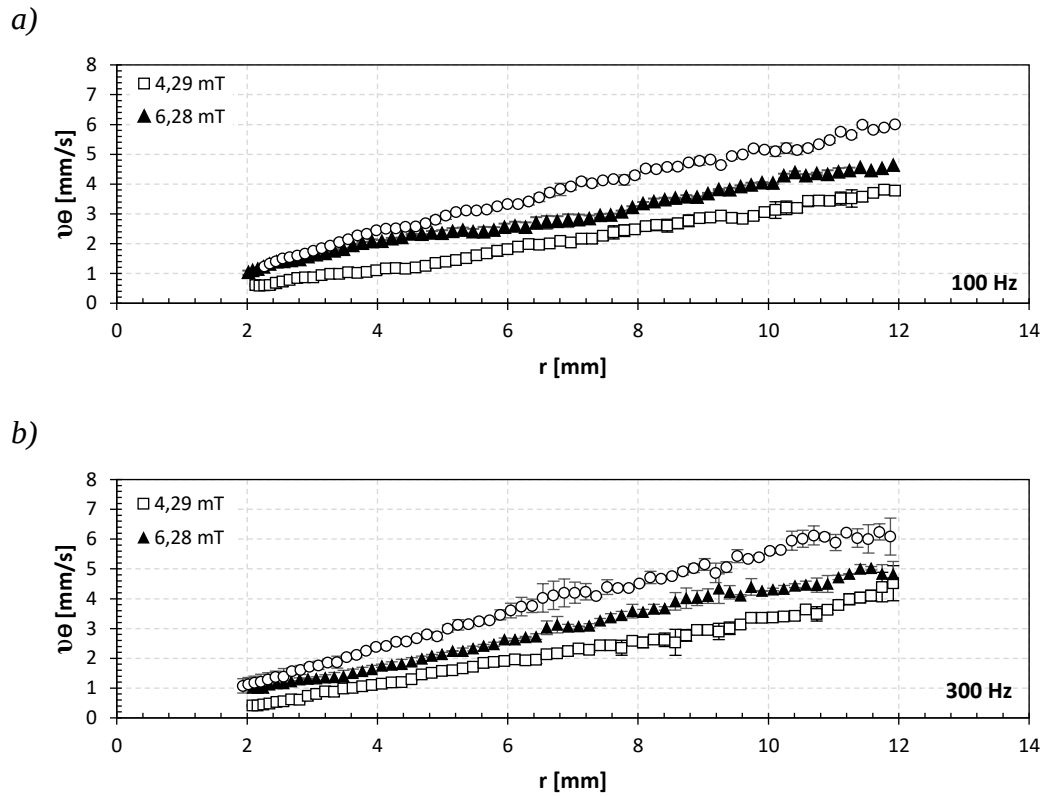
**Figura E12.** Perfiles de velocidad  $M_{C5-FFQ5000}$  a diferentes valores de frecuencia y una amplitud de campo de 6,28 mT



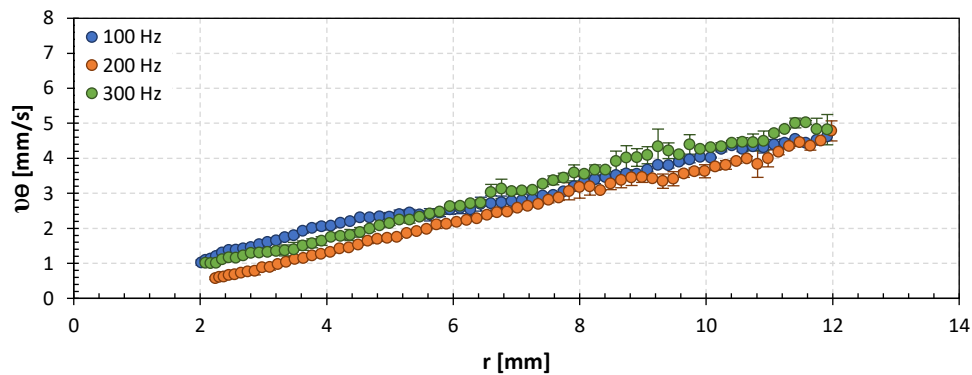
**Figura E13.** Perfiles de velocidad FF-Q5000 y a)  $M_{C1-FFQ5000}$ , b)  $M_{C3-FFQ5000}$  y c)  $M_{C5-FFQ5000}$  bajo una amplitud de campo magnético de 9,57 mT y 100 Hz.



**Figura E14.** Perfiles de velocidad  $E_M$  C1-FFQ 5000 a diferentes valores de amplitud de campo magnético y una frecuencia de a) 100 Hz y b) 300 Hz



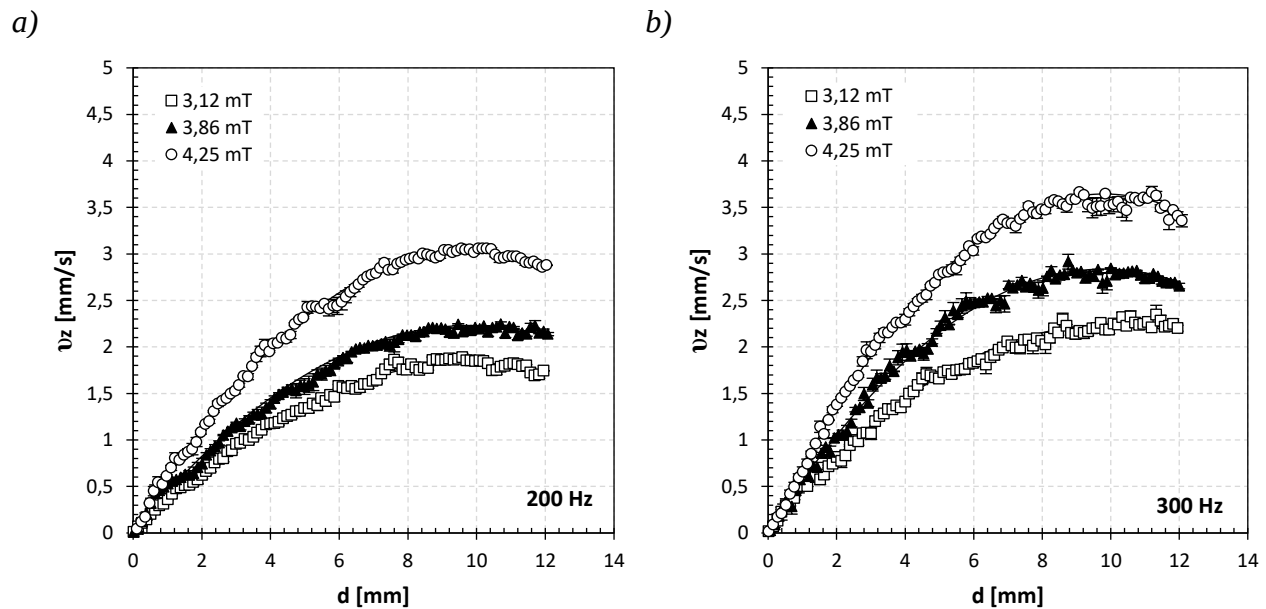
**Figura E15.** Perfiles de velocidad  $E_M$  C1-FFQ 5000 a diferentes valores de frecuencia y una amplitud de campo magnético de 3,86 mT



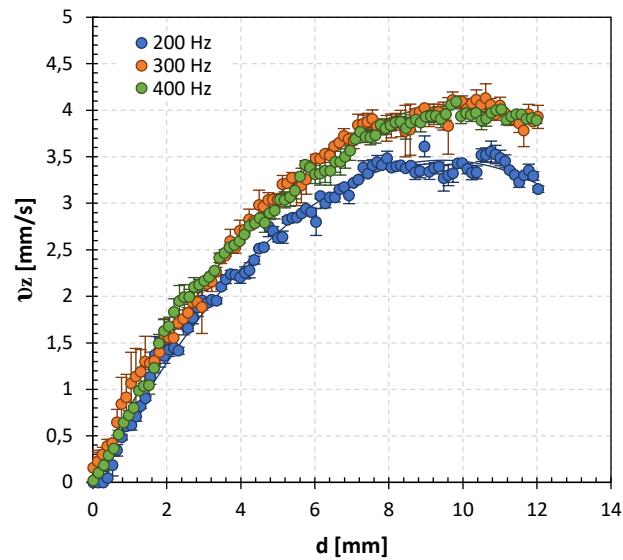
**Apéndice F: Perfiles de velocidad bajo TMF*****Perfiles de velocidad emulsiones a base ferrofluido***

Se realizó la medición de los perfiles de velocidad de emulsiones magnéticas y mezclas crudo-ferrofluido bajo campos magnéticos de onda viajera, como se explica en la Sección 4.4.2 a diferentes condiciones de frecuencia e intensidad del campo.

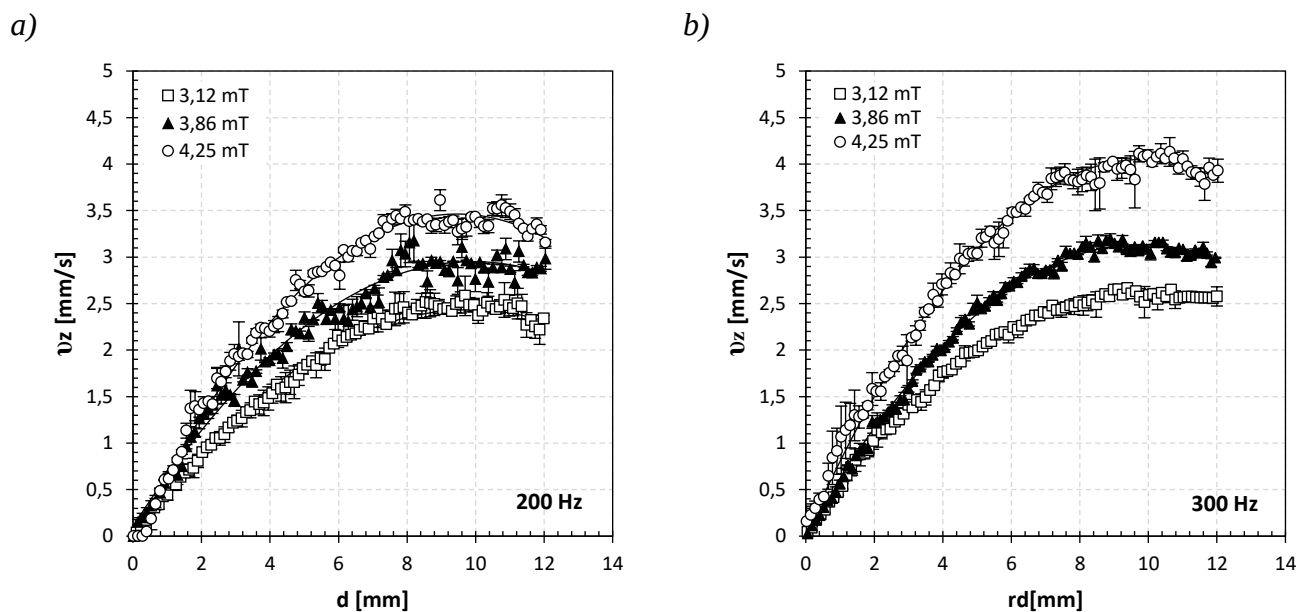
**Figura F1.** *Perfiles de velocidad  $E_{FF-Q5000}$  a diferentes valores de amplitud de campo magnético y una frecuencia de a) 200 Hz y b) 300 Hz*



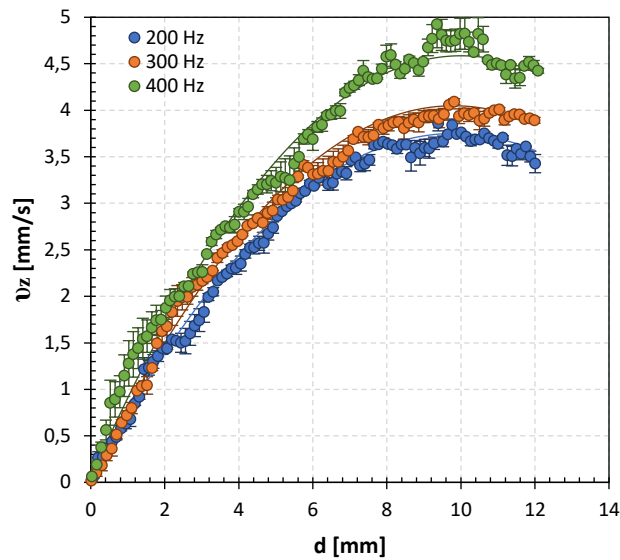
**Figura F2.** *Perfiles de velocidad  $E_{FF-Q5000}$  a diferentes valores de frecuencia y una amplitud de campo magnético de 4,25 mT*



**Figura F3.** Perfiles de velocidad  $E_{FF-Q10000}$  a diferentes valores de amplitud de campo magnético y una frecuencia de a) 200 Hz y b) 300 Hz

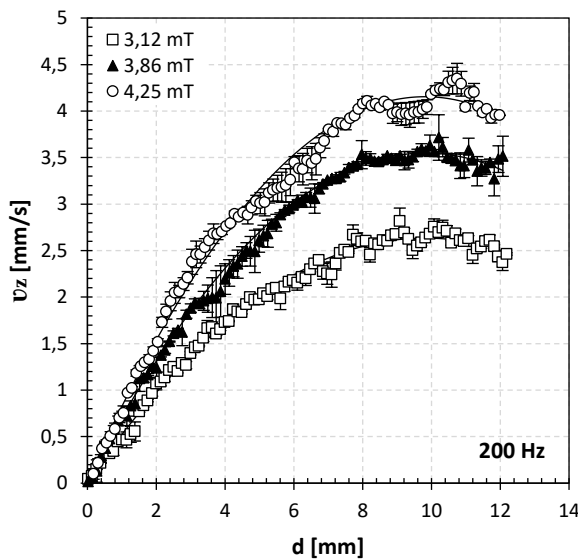


**Figura F4.** Perfiles de velocidad  $E_{FF-Q10000}$  a diferentes valores de frecuencia y una amplitud de campo magnético de 4,25 mT

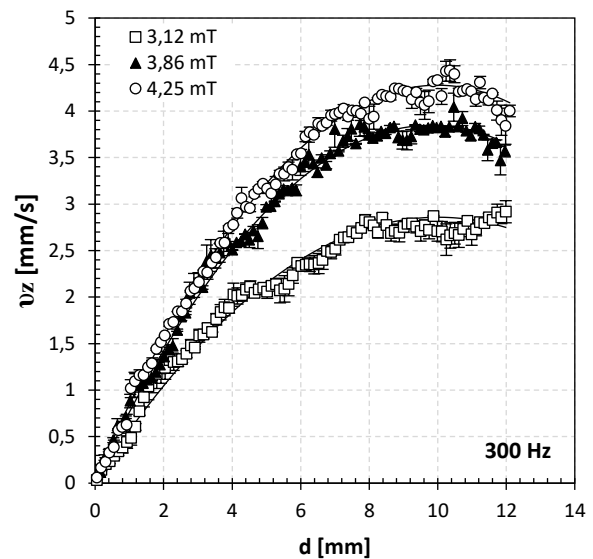


**Figura F5.** Perfiles de velocidad  $E_{FF-Q15000}$  a diferentes valores de amplitud de campo magnético y una frecuencia de a) 200 Hz y b) 300 Hz

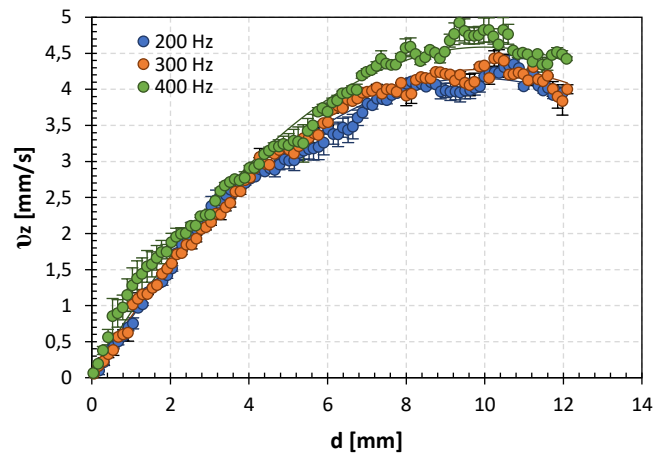
a)



b)

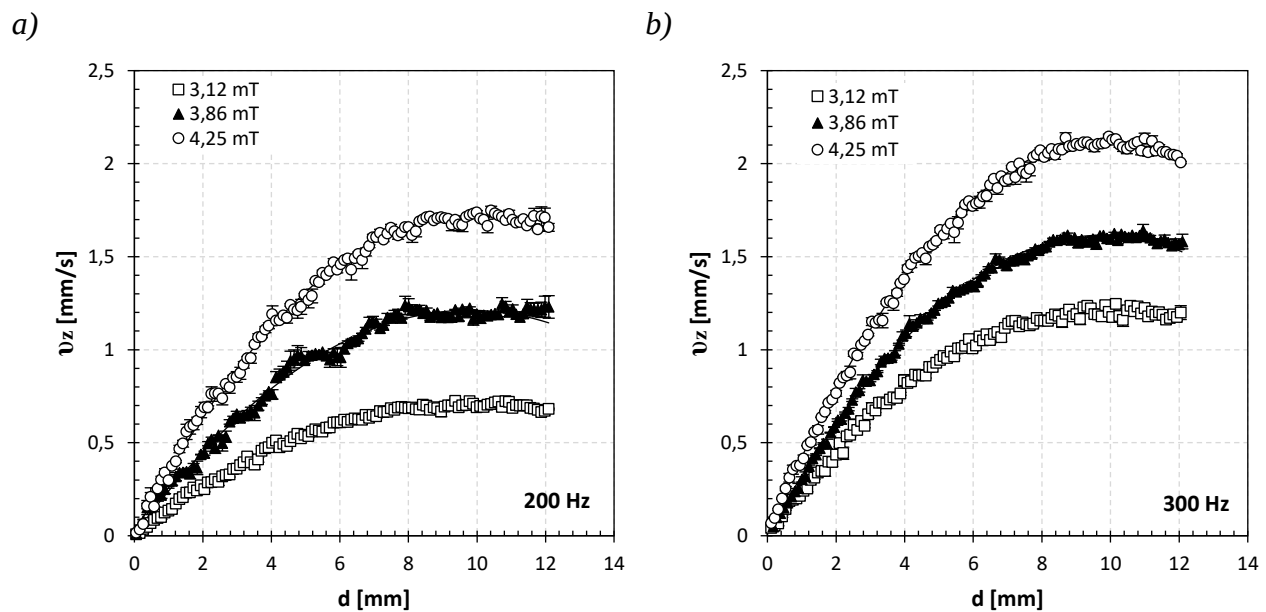


**Figura F6.** Perfiles de velocidad  $E_{FF-Q15000}$  a diferentes valores de frecuencia y una amplitud de campo magnético de 4,25 mT

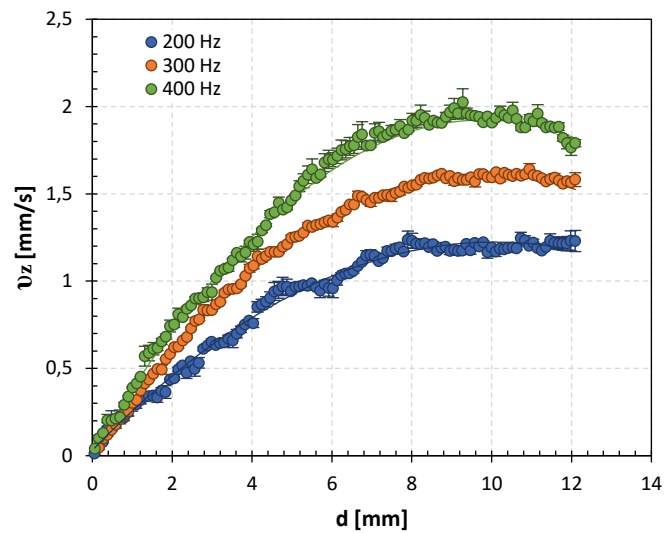


### Perfiles de velocidad mezclas crudo-ferrofluido

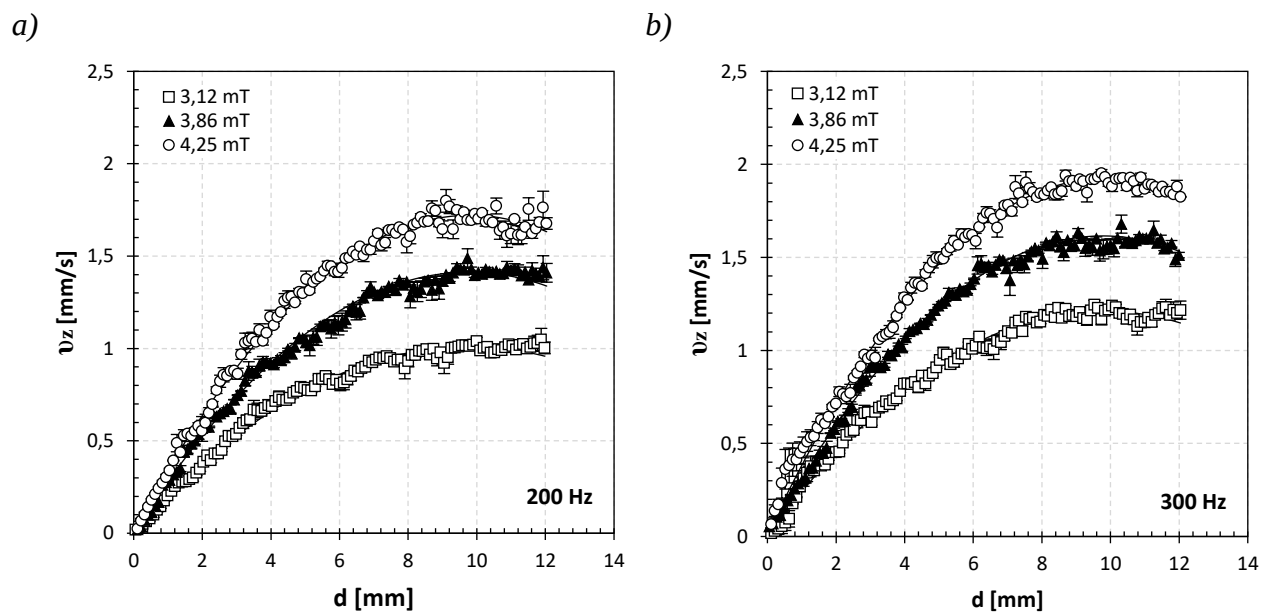
**Figura F7.** Perfiles de velocidad  $M_{C1-FFQ10000}$  a diferentes valores de amplitud de campo magnético y una frecuencia de a) 200 Hz y b) 300 Hz



**Figura F8.** Perfiles de velocidad  $M_{C1-FFQ10000}$  a diferentes valores de frecuencia y una amplitud de campo magnético de 3,86 mT



**Figura F9.** Perfiles de velocidad  $M_{C5-FFQ10000}$  a diferentes valores de amplitud de campo magnético y una frecuencia de a) 200 Hz y b) 300 Hz



**Figura F10.** Perfiles de velocidad  $M_{C5-FFQ10000}$  a diferentes valores de frecuencia y una amplitud de campo magnético de 4,25 mT

