

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

Estudio del Estado del Arte del Flujo de Ferrofluidos Inducido por Campos Magnéticos

Variantes en el Tiempo

Anyi Natalia Salgado Estupiñan, Diego Snayder Carrillo Urrego

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Químico

Director

Arlex Chaves Guerrero

Ingeniero químico, PhD.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2025

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

Dedicatoria

Dedicado principalmente a Dios quien nos ha dado la oportunidad de desarrollarnos personal y profesionalmente, a nuestras familias que se esforzaron mucho para contribuir con nuestra formación, a cada uno de nuestros docentes y compañeros que estuvieron presentes desde el primer día y vieron la sumatoria de esfuerzos diarios que dan origen a las personas que somos el día de hoy.

Especialmente queremos agradecer a nuestro director de proyecto de grado, el profesor Arlex Cháves Guerrero a quien consideramos un gran docente y persona, sus esfuerzos han tenido una gran importancia y su ayuda tiene un gran impacto en esta investigación y en nuestro desarrollo como futuros profesionales.

De parte de Natalia, quiero dejar plasmado que Diego Carrillo, ha sido un gran apoyo en mi transcurso de vida académica y debo darle gracias por cada vez que ha estado allí, este proyecto ha demostrado que no pude haber encontrado un mejor compañero y amigo.

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	12
1. Planteamiento del problema.....	13
Objetivos	15
Objetivo general.....	15
Objetivos específicos	15
2. Metodología	15
3. Marco teórico: Ferrofluidos	18
3.1. Comportamiento magnético.....	19
3.2. Mecanismos de relajación magnética	20
3.3. Comportamiento magnetoreológico.....	21
4. Ferrohodinámica.....	26
4.1. Ecuaciones ferrohodinámicas	27
4.2. Condiciones de frontera	29
4.2.1. Condición de frontera en las interfaces fluido-fluido	30
5. Avances en el flujo de ferrofluidos generados por CM rotativos	31
5.1. Flujo de un ferrofluido dentro de un recipiente cilíndrico	32
5.1.1. Teoría de Difusión del Momento Angular Interno (1969).....	32
5.1.2. Primeras mediciones del Perfil de velocidad al interior del fluido	39
5.2. Flujo de un ferrofluido dentro de una esfera.....	43
5.2.1. Teoría de la generación de flujo por disipación viscosa de calor	48
6. Conclusiones	49

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

Referencias Bibliográficas	51
Apéndices.....	60

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Ecuaciones de viscosidad para ferrofluidos cuando está sometido a un CM.</i>	23

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>a) Estructura general de un ferrofluido (fase dispersa y dispersante); (b-c) representa la interacción repulsiva más común en las NPs magnéticas: b) estérica o polimérica, c) electrostática.</i>	18
Figura 2 <i>Curva de magnetización para diferentes tamaños de partículas de magnetita.</i>	20
Figura 3 <i>Intervención del par magnético $\mu_0 \mathbf{M} \times \mathbf{H}$ y el par viscoso $\mathbf{12} \nabla \times \mathbf{v} - \boldsymbol{\omega}$ en la viscosidad rotacional: a) la vorticidad y el campo magnético son colineales, la partícula puede girar alrededor de la dirección del momento magnético, b) un ángulo finito entre la vorticidad y el campo magnético hace que la partícula gire en dirección del flujo magnético y c) el campo (dirección z) es perpendicular a la componente y de la vorticidad, y por tanto el torque magnético tiende a mantener el momento magnético en la dirección de z impidiendo la rotación de la partícula sobre el eje y, resultando en un incremento máximo de la viscosidad efectiva del ferrofluido en comparación con el caso b).</i>	22
Figura 4 <i>a) viscosidad experimental reducida vs campo magnético para diferentes frecuencias; b-c) variaciones teóricas de g para diferentes valores de $\boldsymbol{\omega} \tau \mathbf{B}$.</i>	24
Figura 5 <i>a) Geometría para medir el torque sobre la superficie interna del ferrofluido cuando este es inducido al flujo por un CM rotativo. b) Geometría sujeta al viscosímetro durante la medición. c) viscosidad experimental reducida vs campo magnético para diferentes frecuencias; c-d) variaciones teóricas de g para diferentes valores de $\boldsymbol{\omega} \tau \mathbf{B}$.</i>	25
Figura 6 <i>Experimento de generación del flujo por campo magnético giratorio en un recipiente cilíndrico.</i>	32

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

Figura 7 a) Perfil de velocidad angular de las partículas; b) velocidad traslacional del ferrofluido. En el gráfico a) y b) LD , es la zona de difusión del momento angular. Para la gráfica b) se divide en dos zonas, la primera zona con movimiento de cuerpo rígido y la segunda zona de capa límite donde la velocidad cae a cero con rapidez.	33
Figura 8 Experimento de Brown y Horsnell 1969.	35
Figura 9 Sentido de rotación controlado por la forma de la superficie libre.	38
Figura 10 Dependencia del perfil de velocidad con la frecuencia del campo magnético, resultados obtenidos usando propiedades físicas y magnéticas del ferrofluido EMG900-3. La figura del lado izquierdo son los perfiles de velocidad de espín y traslación calculados en el espacio anular de dos cilindros coaxiales para 5mT de campo magnético aplicado. La figura del lado derecho representa el perfil de velocidad en el espacio anular lleno, obtenidos con cuatro transductores en diferentes ángulos con respecto a la diagonal.	42
Figura 11 Estructura del experimento empleado para estudiar el flujo de ferrofluido en una esfera.	46
Figura 12 Medición por velocímetro de ultrasonido para el ferrofluido EFH1 sin campo y bajo un campo magnético uniforme.	46
Figura 13 Perfil de velocidad obtenido por Torrez Díaz y Rinaldi en el velocímetro de ultrasonido dentro de la esfera.	47
Figura 14. Métodos de síntesis físicos para la obtención de nanopartículas magnéticas. Bottom-Up: a) CVD por descomposición térmica, b) PLD. Top-Down: c) ablación laser-litografía, d) molino de bolas.	60
Figura 15. Métodos de síntesis químicos para la obtención de nanopartículas magnéticas. Bottom-Up: a) sol-gel, b) pirólisis por pulverización.	61

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

- Figura 16 *Campo magnético aplicado a un ferrofluido: a) campo magnético ubicado verticalmente, en el ferrofluido se forman unos picos, b) cuando el campo magnético se ubica horizontalmente, ya no hay formación de picos. Intensidad del campo magnético a una gota de ferrofluido: a) no hay campo, b-f) a medida que se acerca el imán, el campo magnético se hace más intenso y los picos se hacen más pronunciados. 62*
- Figura 17 *Biosensores: a) sensor LPFG, b) sensor FPI, c) transmisión de luz, d) de doble parámetro..... 64*
- Figura 18 *a) sistema de una bomba electromagnética, b) bomba diseñada con el principio de acción termomagnética, c) válvulas usando ferrofluidos 65*
- Figura 19 *Recolectores de energía que utilizan ferrofluidos como: a) manantial líquido, b) movimiento chapoteante, c) lubricador. d) intercambio de calor empleando fluido magnético.. 66*

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A. Síntesis de las nanopartículas magnéticas y respuesta de los ferrofluidos al campo magnético.....	60
Apéndice B. Aplicaciones de los ferrofluidos	64

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

Resumen

Título: Estudio del Estado del Arte del Flujo de Ferrofluidos Inducido por Campos Magnéticos Variantes en el Tiempo *

Autor: Anyi Natalia Salgado Estupiñan, Diego Snayder Carrillo Urrego**

Palabras Clave: Ferrofluido, nanopartícula, viscosidad, torque.

Descripción: El comportamiento de los ferrofluidos bajo la influencia de campos magnéticos rotativos ha sido objeto de numerosas investigaciones durante décadas, sin embargo, el mecanismo exacto que subyace a este fenómeno sigue siendo un tema de debate. Este trabajo presenta una revisión exhaustiva de las teorías y experimentos más relevantes, desde los primeros estudios de Moskowitz y Rosensweig hasta las investigaciones más recientes. Se discuten las principales hipótesis, incluyendo la difusión del momento angular interno, los efectos de los esfuerzos superficiales y el papel de las no uniformidades del campo magnético. Las técnicas experimentales empleadas para estudiar el flujo de ferrofluidos han evolucionado significativamente, pasando de mediciones macroscópicas a técnicas más sofisticadas como la velocimetría Doppler. Sin embargo, la complejidad del fenómeno y las dificultades inherentes a las mediciones en fluidos magnéticos han dificultado la obtención de resultados concluyentes. En los últimos años, las simulaciones numéricas han desempeñado un papel cada vez más importante en la comprensión de los mecanismos de flujo. Los modelos matemáticos utilizados se basan en las ecuaciones de Navier-Stokes modificadas para incluir los efectos magnéticos y las expresiones para el tensor de esfuerzos de Maxwell. Sin embargo, la validación experimental de estos modelos sigue siendo un desafío. En resumen, esta revisión bibliográfica revela que el estudio del flujo de ferrofluidos es un campo de investigación activo y en constante evolución. Si bien se han logrado avances significativos, aún quedan muchas preguntas por responder y nuevos experimentos y modelos teóricos son necesarios para obtener una comprensión más completa de este fascinante fenómeno.

* Trabajo de Grado

** Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Escuela de ingeniería química. Ingeniería química. Director: Arlex Chaves Guerrero. Ingeniero químico, PhD.

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

Abstract

Title: State of the Art Study of Ferrofluid Flow Induced by Time-Varying Magnetic Fields *

Author(s): Anyi Natalia Salgado Estupiñan, Diego Snayder Carrillo Urrego **

Key Words: Ferrofluid, nanoparticle, viscosity, torque.

Description: The behaviour of ferrofluids under the influence of rotating magnetic fields has been the subject of numerous investigations for decades, however, the exact mechanism underlying this phenomenon is still a matter of debate. This paper presents a comprehensive review of the most relevant theories and experiments, from the early studies of Moskowitz and Rosensweig to the most recent research. The main hypotheses are discussed, including the diffusion of internal angular momentum, the effects of surface stresses and the role of magnetic field non-uniformities. The experimental techniques used to study ferrofluid flow have evolved significantly from macroscopic measurements to more sophisticated techniques such as Doppler velocimetry. However, the complexity of the phenomenon and the difficulties inherent to measurements in magnetic fluids have made it difficult to obtain conclusive results. In recent years, numerical simulations have played an increasingly important role in the understanding of flow mechanisms. The mathematical models used are based on the Navier-Stokes equations modified to include magnetic effects and expressions for the Maxwell stress tensor. However, experimental validation of these models remains a challenge. In summary, this literature review reveals that the study of ferrofluid flow is an active and evolving field of research. While significant progress has been made, many questions remain to be answered and new experiments and theoretical models are needed to gain a more complete understanding of this fascinating phenomenon.

* Degree Work

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Chemical Engineering. Director: Arlex Chaves Guerrero. Chemical Engineer, PhD.

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

Introducción

En 1959, Richard Feynman, en una de sus legendarias conferencias en el Instituto de Tecnología de California, afirmó que los avances de la ciencia permitirán manipular y controlar materiales a pequeña escala, incorporando un nuevo universo nanométrico [1]. Es así como se dio paso a la nanotecnología [2], ciencia que interviene en diseños y técnicas revolucionarias empleando materiales constituido por nanopartículas (NP). Estos materiales también dieron origen a los nanofluidos, que son suspensiones coloidales de nanopartículas poliméricas, metálicas, óxidos metálicos, etc. suspendidas en un líquido, siendo la mejora de la conductividad térmica del fluido portador la principal motivación para su creación. Los ferrofluidos o fluidos magnéticos son categorizados con un tipo especial de nanofluido, con la particularidad de que lo materiales de las nanopartículas son superparamagnéticas. A pesar, de que los ferrofluidos son considerados un tipo especial de nanofluidos, estos se sintetizaron mucho tiempo antes que se hablara del concepto de nanofluido por Choi en 1995 [3]; dándosele el crédito de su creación a Steven Papell [4] científico de la Nasa quien en 1965 recibió en los Estados Unidos la patente US3215572 bajo el título “*Low viscosity magnetic fluid obtained by the colloidal suspension of magnetic particles*”.

Con el paso del tiempo las técnicas de síntesis de ferrofluidos se han perfeccionado, mejorando sus propiedades magnéticas, el tiempo de estabilidad de la suspensión, mayor control de la distribución y tamaño de partícula, e incluso se ha logrado incidir en la forma de las partículas (redondas, cubicas, etc.). Esto ha influido directamente en la capacidad de controlar el comportamiento reológico de ferrofluidos por medio de campos magnéticos (CMs), también como en el número de sus aplicaciones. Precisamente, es esta capacidad francamente sorprendente, que tienen los ferrofluidos para cambiar su comportamiento de flujo bajo campos magnéticos, lo que

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

los ha puesto en el centro de muchas aplicaciones mecánicas (transferencia de calor, en cojinetes), médicas, y artísticas, así como la investigación en otros campos como el recobro mejorado de petróleo [5].

Los estudios del comportamiento de flujo bajo CM variantes del tiempo también han servido para discutir aspectos fundamentales de la *Mecánica de Medios Continuos*, tales como la inter-conversión del momentum lineal y angular interno y su proceso de difusión, y de la magnitud (y hasta la existencia) de los respectivos coeficientes fenomenológicos. En nuestra revisión previa del estado del arte, se detectó un vacío de información consolidada sobre las teorías propuesta de generación de flujo de ferrofluidos por CMs dependientes del tiempo, así como de los trabajos experimentales que se han realizado para validarlas. Por lo tanto, este trabajo de grado se enfocó en evaluar el estado del arte sobre la generación de flujo de ferrofluidos bajo campos magnéticos dependientes del tiempo y de los modelos fenomenológicos que existen para describir dichos comportamientos y su validación. En lo que sigue, tratamos la descripción de los ferrofluidos, su síntesis, las ecuaciones que gobiernan su flujo, así como los diferentes sistemas de flujo que se han usado para captar la evidencia experimental que permita dilucidar cuál de las teorías planteadas describe mejor los comportamientos magnetoreológicos observados.

1. Planteamiento del problema

La disciplina que describe el comportamiento del flujo de los nanofluidos magnéticos en presencia de un campo magnético (estático o variante en el tiempo) es conocida como ferrohodinámica, nombre que se le atribuye a Ronald Rosensweig.

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

Al cambiar adaptativamente su comportamiento reológico por acción de un campo magnético externo, los ferrofluidos han sido objeto de estudio de aplicaciones diversas en áreas de la ingeniería y la investigación de grupos interdisciplinarios. Por ejemplo, se han reportado que el uso de ferrofluidos genera mejoras en procesos de transferencia de masa, transferencia de cantidad de movimiento en flujos laminares y tubulares en tuberías, en flujos en medio porosos, y el movimiento de las nanopartículas magnéticas en flujos gas-liquido con o sin campos magnéticos externos. Dentro de esto resaltamos trabajos que muestran que mezclando ferrofluidos y crudos pesados se puede inducir cambios magnetoreológicos en estos último, que puede ser usados para el mejoramiento del proceso de transporte de crudos.

No obstante, investigaciones a nivel fundamental, del mecanismo fenomenológico por medio de los cuales se genera la respuesta magnetoreológico de ferrofluidos (cambio de viscosidad y generación de flujo), son necesarias con el fin de poder predecir comportamientos y mejorar las aplicaciones en las cuales están involucrados este tipo de nano-fluido. Sin embargo, a lo mejor de nuestro conocimiento, hasta el momento no se han reportado revisiones del estado del arte enfocadas a ese tipo de estudio. En consecuencia, esta revisión del estado del arte se enfocará en reportar las diferentes teorías planteadas para explicar el comportamiento de flujo de ferrofluidos inducidos por campos magnéticos variantes en el tiempo y los trabajos experimentales realizados para validar o descartar cada una de ellas. Esto incluye la descripción de modelos fenomenológicos (ecuaciones de balance, ecuaciones de magnetización y condiciones de frontera) y sus simplificaciones, sus predicciones de flujo y comparación con resultados experimentales. Se evaluará los procedimientos experimentales que tienen en cuenta las restricciones o simplificaciones de los análisis fenomenológicos y tipos de ferrofluido.

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

Objetivos

Objetivo general

Evaluar los avances en el desarrollo de teorías enfocadas a explicar el comportamiento reológico de ferrofluidos en campos magnéticos rotativos de una revisión del estado del arte.

Objetivos específicos

- Evaluar desde la literatura los desarrollos experimentales de generación de flujo de ferrofluido por campos magnéticos variantes en el tiempo.
- Describir las teorías que expliquen los mecanismos de generación de flujo.
- Determinar las teorías de flujo que mejor describan el comportamiento experimental de flujo de ferrofluidos por comparación de los resultados de los objetivos específicos anteriores.

2. Metodología

El presente trabajo consiste en una revisión bibliográfica exhaustiva sobre los estudios realizados en torno al flujo de ferrofluido inducido por un campo magnético rotativo.

El objetivo principal fue recopilar y analizar la literatura científica existente en el tema, con el fin de presentar un panorama actualizado y completo de las teorías y experimentos relevantes. Para ello, se utilizó una metodología que incluyó la búsqueda y selección de fuentes de información en diversas bases de datos académicas, como Science@direct, Springer, APS - physical review all, ACS - american chemical society, entre otras. Estas fuentes fueron clave para acceder a artículos científicos, libros especializados, tesis doctorales y patentes que aportaran

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

información relevante sobre los mecanismos propuestos para el flujo de ferrofluidos, así como los avances experimentales que respaldan estas teorías.

La búsqueda de literatura se realizó con criterios específicos que incluyeron la fecha de publicación, la relevancia de los estudios para el tema de interés y la calidad de las fuentes, priorizando aquellas publicadas en revistas indexadas y congresos de alto impacto. Para refinar los resultados, se utilizaron palabras clave relacionadas con el ferrofluido, campos magnéticos rotativos, vorticidad, y las diversas teorías propuestas, lo que permitió identificar los trabajos más influyentes en el campo. Además, se consideraron documentos de referencia y revisiones previas, lo cual permitió no solo conocer los hallazgos recientes, sino también rastrear la evolución histórica de las ideas en este ámbito.

Una vez seleccionada la literatura más pertinente, se procedió a organizar la información de manera que facilitara la comprensión de los principales enfoques y hallazgos. La organización de la información incluyó la identificación de las teorías más relevantes, como la de difusión de momento angular interno (DMAI), los mecanismos propuestos para el flujo en función de los gradientes de temperatura y permeabilidad magnética, y los avances experimentales más significativos, como los realizados por Moskowitz, Rosensweig y sus sucesores. Asimismo, se analizó la crítica y los enfoques alternativos que han sido presentados a lo largo de las últimas décadas, lo que permitió evaluar de forma crítica los avances y limitaciones de cada teoría.

El proceso de revisión también involucró la comparación de los diferentes enfoques experimentales, como el uso de la técnica de "*Pulsed Ultrasound Doppler Velocimetry*", y la incorporación de nuevos avances metodológicos que han mejorado la precisión en la medición de los perfiles de velocidad dentro del fluido. Esta organización temática permitió estructurar el artículo de manera coherente, presentando una narrativa clara sobre la evolución del conocimiento

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

en torno al flujo de ferrofluidos inducido por un CM rotativo. De esta forma, el trabajo no solo resume las principales contribuciones del área, sino que también identifica los vacíos en la investigación actual y las direcciones futuras para profundizar en la comprensión de este fenómeno complejo.

A pesar de estos avances, aún falta un entendimiento completo sobre los mecanismos que rigen el flujo de ferrofluido bajo distintas condiciones. Por ejemplo, aunque se ha demostrado que la DMAI es adecuada para describir el flujo en algunas condiciones, la teoría no logra explicar completamente las discrepancias observadas en las mediciones experimentales, sobre todo en situaciones de campo magnético no uniforme o en geometrías más complejas. La relación precisa entre la intensidad del campo magnético, la frecuencia de rotación, las propiedades del ferrofluido y la geometría del sistema sigue siendo un área activa de investigación.

Además, los efectos de la heterogeneidad del campo magnético, tales como los armónicos de alto orden generados por los dispositivos experimentales, deben ser evaluados con más detalle para entender su impacto en los perfiles de velocidad del ferrofluido. Las investigaciones futuras deben centrarse en resolver estas discrepancias, mejorar los modelos teóricos que incluyan efectos tanto volumétricos como superficiales, y considerar mejor las condiciones experimentales como la distribución del campo magnético.

En resumen, la investigación en este campo se encuentra en un punto crucial, donde la experimentación avanzada y los desarrollos teóricos deben continuar para ofrecer una explicación más coherente y completa del flujo de ferrofluido. Los próximos pasos implican un mayor refinamiento de las teorías actuales, la mejora de las técnicas de medición y la exploración de nuevos modelos que aborden la complejidad de los flujos observados en experimentos con campos magnéticos no uniformes y geometrías más realistas. Se espera que, con estos avances, se logre

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

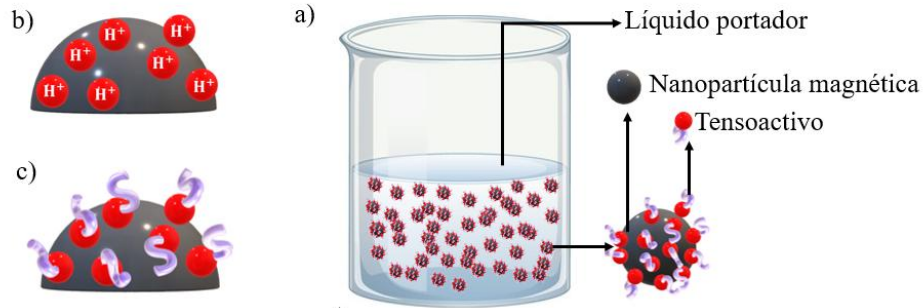
una comprensión más precisa y robusta de los fenómenos que rigen el comportamiento de los ferrofluidos en campos magnéticos, con implicaciones potenciales en aplicaciones tecnológicas como dispositivos de control de fluidos magnéticos, sensores y materiales avanzados.

3. Marco teórico: Ferrofluidos

Los ferrofluidos son suspensiones estables de nanopartículas magnéticas (~5-20 nm) mono dominio en un líquido portador newtoniano no conductor de electricidad. Típicamente, las NPs son materiales ferromagnéticos como la magnetita, la ferrita de cobalto, Co, Zn, etc.; y la preferencia entre una y otra depende de la aplicación específica. La estabilidad del ferrofluido es fundamental y en ella juega un papel protagónico el movimiento browniano (agitación térmica) al que se encuentran sometidas, siendo las fuerzas gravitacionales despreciables debido a su tamaño. Adicionalmente, para evitar la aglomeración y formación de clústeres de NPs, se usan surfactantes (molécula ~2-3 nm) o la generación de cargas eléctricas en la superficie, dotándolas de repulsión estérica y coulombiana; ver Figura 1. La síntesis de NPs magnéticas es un tema ampliamente investigado y el lector interesado puede referirse a la siguiente referencia [6].

Figura 1 *a) Estructura general de un ferrofluido (fase dispersa y dispersante); (b-c) representa la interacción repulsiva más común en las NPs magnéticas: b) estérica o polimérica, c) electrostática.*

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS



3.1. Comportamiento magnético

En 1949 Néel [7] señaló qué: si el tamaño de las partículas se volviera lo suficientemente pequeñas, la energía anisotrópica (KV) disminuirá de tal forma que las fluctuaciones de energía térmica (k_bT) podrían superar las fuerzas de anisotropía y revertir espontáneamente la magnetización de una dirección fácil a otra, incluso en ausencia de un CM aplicado. Este fenómeno se conoce como *superparamagnetismo* y es similar al paramagnetismo, con la diferencia que en el primero, el momento magnético es mucho más grande. En ambos casos, el momento magnético \mathbf{m} de las NPs experimenta un torque ($\mu_o \mathbf{m} \times \mathbf{H}$) que tiende a alinearlo en la dirección del vector del campo magnético \mathbf{H} . Este proceso de magnetización de equilibrio \mathbf{M}_{eq} es descrito matemáticamente por la ecuación de Langevin para el caso de un CM estático y para un ferrofluido con despreciable interacción entre las partículas.

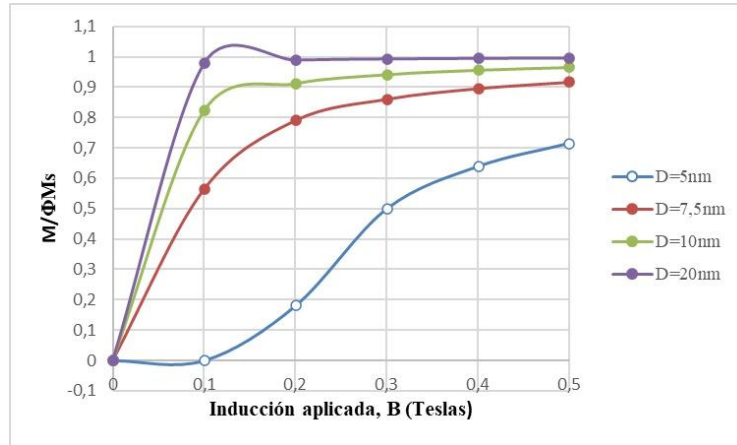
$$\frac{\mathbf{M}_{eq}}{\phi M_d} = L(\alpha) \frac{\mathbf{H}}{|\mathbf{H}|}; L(\alpha) \equiv \left[\coth \alpha - \frac{1}{\alpha} \right]; \alpha = \frac{\mu_o M_d |\mathbf{H}| V_c}{k_B T} \quad \text{Ecuación 1}$$

En la anterior ecuación α es el parámetro de Langevin que representa la relación entre las fuerzas magnética y térmicas, $L(\alpha)$ es la función de Langevin, $|\mathbf{H}|$ es la magnitud del CM aplicado y V_c es el volumen magnético de la nanopartícula. En la figura 2, se muestra la curva de

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

magnetización de equilibrio contra el campo magnético aplicado para diferentes tamaños de partículas de magnetita.

Figura 2 Curva de magnetización para diferentes tamaños de partículas de magnetita.



3.2. Mecanismos de relajación magnética

El comportamiento superparamagnético de las nanopartículas, implica que el momento magnético (\mathbf{m}) cambia de orientación conforme la dirección del campo cambia. Los mecanismos por el cual se da esta reorientación de \mathbf{m} se conocen como mecanismo de relajación de Néel y de Brown: en el primero, el momento magnético se relaja dentro de las NPs, en un periodo de tiempo del orden de magnitud τ_N ; y en el mecanismo de relajación browniano el momento magnético de la partícula rota con la NP suspendida en el fluido en un tiempo del orden de τ_B :

$$\tau_B = 3 \frac{\eta_0 \mathcal{V}}{kT} \quad \tau_N = \frac{1}{f_0} \exp\left(\frac{KV_c}{kT}\right) \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde \mathcal{V} , representan el volumen hidrodinámico de la NP, η_0 representa la viscosidad del líquido portador, f la frecuencia de Larmor y K es la constante anisotrópica.

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

Como se nota en ambas expresiones, el tiempo de relajación depende del volumen magnético e hidrodinámico de la NP con una dependencia exponencial y lineal respectivamente. Esto hace que el mecanismo de relajación del ferrofluido pueda ser cambiado, ya sea, manteniendo el diámetro de la NP, pero incrementando la capa de surfactante que las rodea (volumen hidrodinámico), o también cambiando el material de la NP procurando aquellos con un mayor valor de la constante anisotrópica, lo cual favorece el mecanismo de relajación browniano, como fue demostrado por Torres-Díaz et al., [8] . El lector interesado puede referirse a la Figura 2 de Ref. [8] para una ilustración grafica del efecto del valor de la constante anisotrópica sobre los tiempos de relajación.

Por otro lado, Rosensweig [9] [10] [11] propuso que ambos mecanismos de relajación pueden darse de manera simultánea, dominando el más pequeño de ellos como se puede observar de la siguiente expresión para el tiempo efectivo de relajación del ferrofluido.

$$\frac{1}{\tau_{eff}} = \frac{1}{\tau_B} + \frac{1}{\tau_N} \quad \text{Ecuación 3}$$

3.3.Comportamiento magnetoreológico

Cuando el ferrofluido fluye en presencia de un campo magnético *estático*, el ferrofluido experimenta un incremento en la viscosidad que depende de la intensidad y orientación del campo respecto a la dirección del flujo. McTague en 1969 [12], observó que la viscosidad efectiva del ferrofluido incrementa el doble cuando el CM es orientado en dirección perpendicular al flujo en comparación al incremento de la viscosidad con un CM dirigido en dirección del flujo. Este incremento de viscosidad en ferrofluidos diluidos ha sido atribuido al efecto del torque magnético ($\mu_o \mathbf{M} \times \mathbf{H}$) que resulta cuando existe un ángulo de desfase (β) entre el momento magnético de las NPs y la dirección del campo que impide la libre rotación de las NPs en el fluido. Esto genera

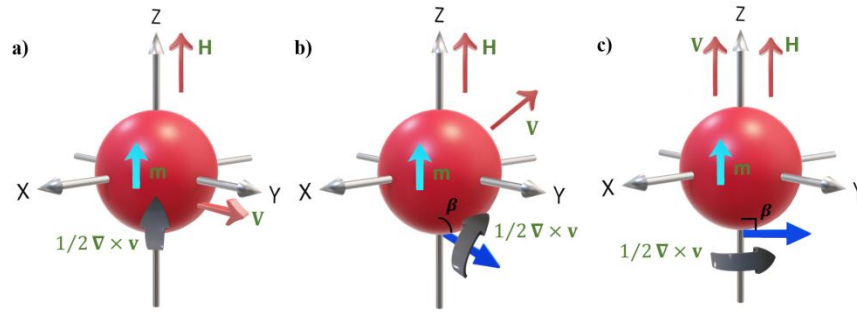
FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

una fricción entre la NPs y el fluido que las rodea, que es proporcional, a la diferencia entre la velocidad angular de rotación del fluido y la de las NPs, es decir: $\left(\frac{1}{2}\nabla \times \mathbf{v} - \boldsymbol{\omega}\right)$, este fenómeno físico se le ha denominado en la literatura como “*viscosidad rotacional*”. En la Figura 4, se ilustra el mecanismo.

En la tabla 1, se presentan algunas de las expresiones más relevantes para la viscosidad rotacional. En la actualidad, las predicciones teóricas de viscosidad rotacional para ferrofluidos diluidos coinciden con los resultados experimentales. No obstante, no es el caso para ferrofluidos concentrados, debido a tres complicaciones: 1) teóricamente se asume una distribución de tamaño de NPs monodispersa, pero en la práctica esto no sucede; 2) es complejo medir el ángulo exacto entre la vorticidad y el CM y 3) la concentración de NPs hace que las interacciones dipolares entre ellas generan la formación de clústeres y cadenas que implican un mayor reto a la hora de obtener expresiones más generales.

Figura 3 *Intervención del par magnético $\mu_o(\mathbf{M} \times \mathbf{H})$ y el par viscoso $\left(\frac{1}{2}\nabla \times \mathbf{v} - \boldsymbol{\omega}\right)$ en la viscosidad rotacional: a) la vorticidad y el campo magnético son colineales, la partícula puede girar alrededor de la dirección del momento magnético, b) un ángulo finito entre la vorticidad y el campo magnético hace que la partícula gire en dirección del flujo magnético y c) el campo (dirección z) es perpendicular a la componente y de la vorticidad, y por tanto el torque magnético tiende a mantener el momento magnético en la dirección de z impidiendo la rotación de la partícula sobre el eje y, resultando en un incremento máximo de la viscosidad efectiva del ferrofluido en comparación con el caso b).*

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS



Nota. Tomado de: *Bhandari A* [14]

Aún más interesante ha sido el trabajo desarrollado por *Shliomis et al.* [13], en la evaluación de la viscosidad de ferrofluidos bajo CM *alternantes*. En este caso, se ha mostrado que, bajo ciertas condiciones de magnitud y frecuencia del CM, la viscosidad efectiva del ferrofluido puede disminuir lo que se conoce como viscosidad negativa. En la Figura 5, se muestran datos de la viscosidad de un ferrofluido de NPs de cobalto en agua, mientras que en la figura 5b se presenta la solución numérica obtenida por *Shliomis et al. al.* [13], encontrándose un acuerdo de tipo cuantitativo.

Tabla 1 Ecuaciones de viscosidad para ferrofluidos cuando está sometido a un CM.

Ecuaciones de viscosidad en presencia de un campo magnético

$$\Delta\eta = \eta_{nf} \left(1 + \frac{5}{2} \tilde{\varphi} + \frac{3}{2} \tilde{\varphi} \sin^2 \varepsilon_1 \right)$$

$$\sin^2 \varepsilon_1 = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{\varepsilon_r^2} \right) - \left[\frac{1}{4} \left(1 + \frac{1}{\varepsilon_r^2} \right)^2 - \frac{1}{\varepsilon_r^2} \sin^2 \beta \right]^{\frac{1}{2}} ; \quad \varepsilon_r = \frac{\eta_0 M_d H}{4\pi \eta_{nf} d^3 \dot{\gamma}}$$

El término $\sin^2 \varepsilon_1$ incluye la parte magnética, donde β es el ángulo entre la vorticidad y la dirección de campo magnético y ε_r relaciona el par magnético con el par viscoso, donde $\dot{\gamma}$ es la velocidad de corte y d denota el diámetro medio de las partículas magnéticas.

Para flujo de Poiseuille viene dada por:

$$\Delta\eta = \frac{3}{2} \tilde{\varphi} \eta_{nf} \frac{\alpha - \tanh \alpha}{\alpha + \tanh \alpha}$$

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

Donde $\alpha = \frac{\mu_0 M_d H V_c}{k_B T}$ es el parámetro de Langevin. Esta ecuación se aplica cuando el CM es perpendicular a la vorticidad.

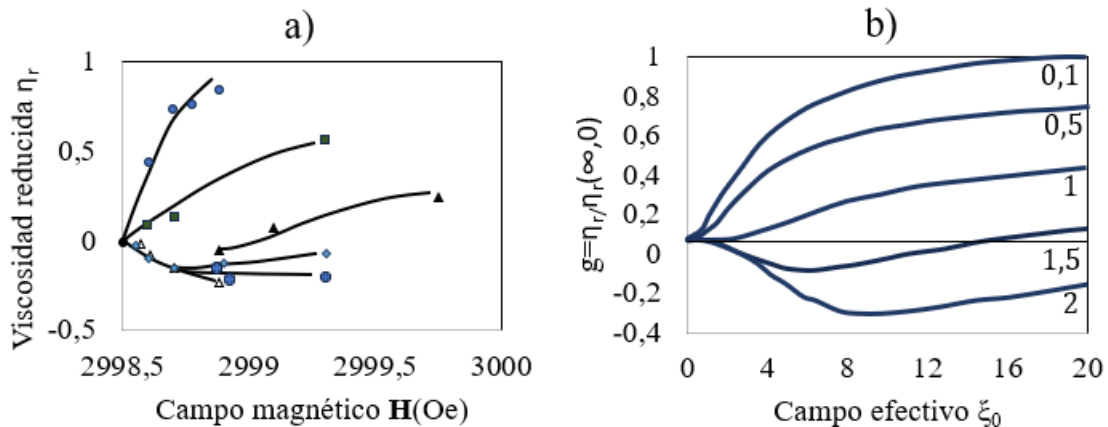
$$\Delta\eta = \frac{3}{2} \tilde{\varphi} \eta_{nf} \frac{\alpha - \tanh \alpha}{\alpha + \tanh \alpha} \sin^2 \beta$$

Esta expresión se usa cuando existe un ángulo entre el campo magnético y la vorticidad en el flujo.

Nota. Tomado de: *Bhandari A* [14]

Este fenómeno es explicado por *Shliomis et al.* [13], de la siguiente manera: un CM polarizado linealmente, produce un movimiento oscilatorio de las NPs en el fluido portador. Cuando el ferrofluido fluye con una velocidad angular diferente de cero ($\nabla \times \mathbf{v} \neq \mathbf{0}$), y la frecuencia del CM es lo suficientemente alta, el promedio de la velocidad de rotación de las NPs (ω), es mayor que la velocidad angular local del fluido lo que genera la aceleración del flujo, que finalmente se nota como una disminución de la viscosidad del fluido.

Figura 4 a) viscosidad experimental reducida vs campo magnético para diferentes frecuencias; b-c) variaciones teóricas de g para diferentes valores de $\omega\tau_B$.



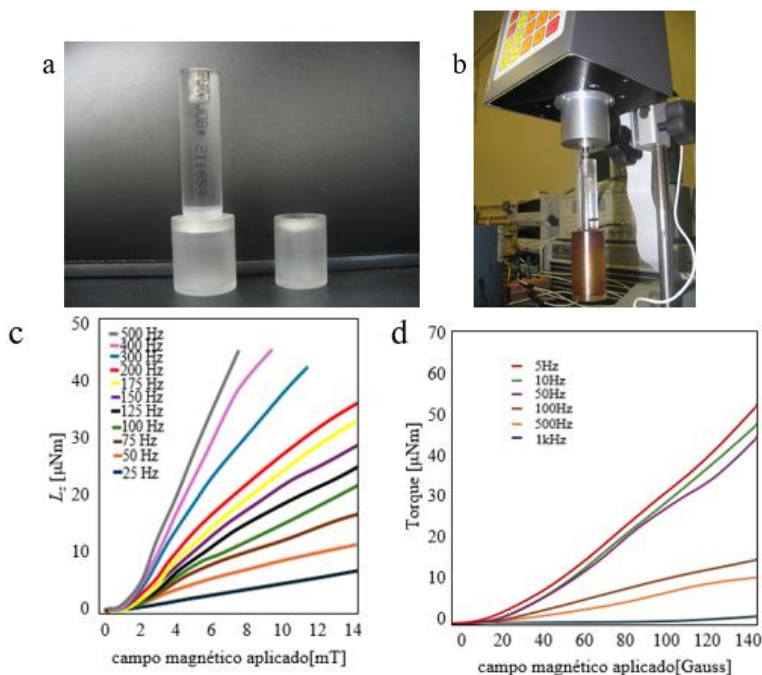
Nota. Tomado y modificado de *Shliomis et al* [13],

Por otro lado, se ha comprobado experimentalmente que CM rotativos pueden inducir el flujo. Este caso particular, ha sido estudiado por *Rinaldi et al.* [15]. Ellos midieron, el torque

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

generado por el flujo del ferrofluido inducido por CMs rotativos sobre la superficie interna de un cilindro (Spin-Up Geometry, Figura 5), y también, sobre la superficie externa del cilindro (flujo Couette). Para el primer caso, se usó como geometría un cilindro hueco que contenía el ferrofluido y luego se sujetaba al viscosímetro. En ambas geometrías no se impuso movimiento el cilindro interno, permitiéndole que se mueva libremente y así medir el torque generado por el ferrofluido sobre la superficie. Resultados experimentales de estas mediciones son presentados en la figura 5c-d.

Figura 5 a) Geometría para medir el torque sobre la superficie interna del ferrofluido cuando este es inducido al flujo por un CM rotativo. b) Geometría sujeta al viscosímetro durante la medición. c) viscosidad experimental reducida vs campo magnético para diferentes frecuencias; c-d) variaciones teóricas de g para diferentes valores de $\omega\tau_B$.



Nota. Tomado y modificado de *Rinaldi et al* [15] y *Chaves y Rinaldi* [16].

La figura 5c, corresponde al torque experimental generado por el ferrofluido sobre la superficie interna del cilindro (“Spin Up Geometry”) como función de la intensidad y frecuencia

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

de rotación del CM. Chaves y Rinaldi [16] obtuvieron una expresión para el torque para el caso que la intensidad del CM es despreciable obteniendo la siguiente expresión:

$$\lim_{\kappa \rightarrow \infty} \tilde{L}_{O.z} = -\frac{\chi_i \tilde{\Omega}}{1 + \tilde{\Omega}^2} \left[1 - \frac{(7 - \tilde{\Omega}^2 + 2\tilde{\Omega}^4)}{20(1 + \tilde{\Omega}^2)^2} \varepsilon \right] + \mathcal{O}(\varepsilon^2) \quad \text{Ecuación 4}$$

El parámetro $\tilde{\Omega}$ es definido como el producto de la frecuencia de rotación del campo por el tiempo de relajación. Predicciones del torque obtenidas a partir de la anterior ecuación es presentada en la Figura 5. Sin embargo, una directa comparación entre experimentos y predicciones teóricas no pueden realizarse debido a que se requiere una solución válida para amplitudes moderadas y altas de la intensidad del campo magnético.

4. Ferrohidrodinámica

En 1964 Neuringer y Rosensweig publicaron un artículo titulado “Ferrohydrodynamics” [17] el cual es considerado el inicio de esta nueva disciplina. La ferrohidrodinámica se enfoca en describir la dinámica de flujo de fluidos incompresibles y polarizables en presencia de campos magnéticos. A su vez la ferrohidrodinámica se ha subdividido en dos áreas: Ferro-hidroestática, en el cual se asume que la magnetización del ferrofluido (\mathbf{M}) y el campo magnético (\mathbf{H}) son colineales lo que implica que este tipo de flujo es afectado únicamente por fuerzas volumétricas tipo Kelvin ($\mathbf{M} \cdot \nabla \mathbf{H}$) además de la fuerza gravitacional. Esta aproximación a permitido describir la forma de interfaces estáticas ferrofluido-fluido (meniscos) y el comportamiento de ferrofluidos en sellos magnéticos, etc. Por otro lado, una aproximación donde se permite la no colinealidad entre \mathbf{M} y \mathbf{H} , lo que implica un torque sobre el momento magnético de la N_p que hace que ésta rote u oscile en el fluido portador. Este es un fenómeno fluidodinámico más complejo que implica la no

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

conservación del momento angular interno y su difusión. Este último caso, es del que se ocupa esta revisión del estado del arte.

4.1. Ecuaciones ferrohidrodinámicas

Las ecuaciones ferrohidrodinámicas han sido presentadas por varios investigadores entre los que se encuentra Rosensweig [17], Shliomis [18], Rinaldi [19] and Cunha [20] entre otros. Estas ecuaciones son conformadas por la ecuación de continuidad para un fluido incompresible ($\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$), la ecuación de cambio de momentum lineal y la ecuación de cambio de momentum angular interno.

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = \mu_0 \mathbf{M} \cdot \nabla \mathbf{H} - \nabla \mathcal{P} + 2\zeta \nabla \times \left(\frac{1}{2} \nabla \times \mathbf{v} - \boldsymbol{\omega} \right) + \eta \nabla^2 \mathbf{v} \quad \text{Ecuación 5}$$

En la ecuación del cambio de momento lineal (Ec. 6), el primer término del lado derecho representa la razón a la cual el campo magnético externo introduce momentum lineal a un elemento diferencial de fluido; este término es conocido como fuerza volumétrica tipo Kelvin y es generada cuando el campo magnético \mathbf{H} no es uniforme; μ_0 es la permeabilidad del espacio libre. El tercer término, corresponde a la parte antisimétrica del tensor de esfuerzos; este caracteriza la resistencia que existe entre la partícula y el fluido que la rodea. Esta se genera, cuando la velocidad angular de rotación de la partícula es diferente a la velocidad de rotación local del fluido representada por la vorticidad ($1/2 \nabla \times \mathbf{v}$). El parámetro ζ es el coeficiente de “*vortex viscosity*”, el cual para una suspensión diluida está dada por $\zeta = 3/2 \phi_h \eta_0$ [21]. Los demás términos tienen el significado acostumbrado de la ecuación de Navier-Stokes.

Por otro lado, en la ecuación de cambio del momentum angular interno es:

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

$$\rho\kappa \frac{D\boldsymbol{\omega}}{Dt} = \mu_0 \mathbf{M} \times \mathbf{H} + 2\zeta \nabla \times (\nabla \times \mathbf{v} - 2\boldsymbol{\omega}) + \eta' \nabla^2 \boldsymbol{\omega} \quad \text{Ecuación 6}$$

El primer término de la derecha representa el torque magnético o “*Body Couple*” y representa la velocidad a la cual se introduce momentum angular interno al elemento de fluido desde un CM externo. El tercer término representa la difusión del momento angular interno del fluido, y es cuantificado por el coeficiente fenomenológico de “*spin viscosity*” η' . Como puede notarse, el término $(1/2 \nabla \times \mathbf{v} - \boldsymbol{\omega})$ aparece en las Ec. 6 y Ec. 7, y de acuerdo con Dhaler y Scriven (1961) representa la inter-conversión del momentum lineal a momentum angular interno a través de la parte antisimétrica del tensor de esfuerzos.

Es necesario sumar una ecuación que tiene en cuenta el efecto del campo de velocidad lineal del fluido y angular de las partículas sobre la desviación de la magnetización del fluido de su valor de equilibrio. Hay al menos tres ecuaciones de magnetización que son: la ecuación de magnetización de Shliomis [22] propuesta en 1972 (Sh-72); la ecuación de magnetización propuesta por Martsenyuk, Raikher, and Shliomis [23]; y la ecuación derivada por Shliomis [24] en 2001. La ecuación de magnetización de Sh-72 fue obtenida desde argumentos fenomenológicos y se ha probado que funciona bien en aplicaciones con CM estáticos sin importar su magnitud (pequeña o alta), no obstante, en campos magnéticos oscilatorios o rotativos solo es válida para intensidades del campo magnético que tiende a cero ($|\mathbf{H}| \rightarrow 0$) y valores de $\Omega_f \tau \ll 1$. A pesar de estas limitaciones, esta ecuación ha sido usada ampliamente en la literatura para evaluar el campo de flujo de ferrofluidos en campos magnéticos rotativos a moderadas intensidades. La ecuación de magnetización de Shliomis de 1972 es:

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

$$\frac{D\mathbf{M}}{Dt} = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{M} - \frac{1}{\tau}(\mathbf{M} - \mathbf{M}_{eq}) \quad \text{Ecuación 7}$$

En la anterior ecuación \mathbf{M}_{eq} es la magnetización de equilibrio y es dada por la ecuación de Langevin para el caso de partículas sólidas y no interactuantes. Teniendo en cuenta que la no linealidad de la ecuación de Langenvin, varios investigadores usan como aproximación en sus análisis $\mathbf{M}_{eq} \approx \chi_i \mathbf{H}$ para el caso de campos magnéticos de intensidad despreciable; χ_i es la susceptibilidad magnética inicial que típicamente es evaluada experimentalmente. Por otro lado, la ecuación de MRSh es:

$$\frac{D\mathbf{M}}{Dt} = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{M} - \frac{\mathbf{H}[\mathbf{H} \cdot (\mathbf{M} - \mathbf{M}_0)]}{\tau_{||}|\mathbf{H}|^2} - \frac{\mathbf{H} \times (\mathbf{M} \times \mathbf{H})}{\tau_{\perp}|\mathbf{H}|^2} \quad \text{Ecuación 8}$$

$$\tau_{||} = \frac{d \ln L(\alpha)}{d \ln \alpha} \tau_B, \quad \tau_{\perp} = \frac{2L(\alpha)}{\alpha - L(\alpha)} \tau_B \quad \text{Ecuación 9}$$

El uso de la ecuación de MRSh implica el uso de técnicas numéricas para resolver el sistema de ecuaciones magnéticas, pero se ha probado que describe bien la magnetización del ferrofluido cuando el ferrofluido es sometidos a CMs dependientes del tiempo. Por último, se requiere el uso de las ecuaciones de Maxwell en el límite magneto-cuasi-estático:

$$\nabla \cdot (\mathbf{M} + \mathbf{H}) = 0 ; \quad \nabla \times \mathbf{H} = 0 \quad \text{Ecuación 10}$$

4.2. Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera para el campo de velocidad lineal en superficies son la condición de no deslizamiento y no penetración que se han aplicado también para la velocidad angular de las NPs.

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

4.2.1. Condición de frontera en las interfaces fluido-fluido

Una situación particular es presentada en problemas de flujo de ferrofluidos que involucran interfases fluido-fluido, donde uno o ambos fluidos son ferrofluidos. Esta situación, ha sido abordada por Rosensweig [25] y por Chaves y Rinaldi [26] de manera independiente. Rosensweig, obtuvo condiciones de frontera en interfases para ferrofluidos sin tener en cuenta el efecto de la difusión del momento angular interno, mientras que Chaves y Rinaldi, lo tuvieron en cuenta. Los balances interfaciales presentados en Ec. 12, permiten concluir que además de gradientes de la tensión interfacial, un salto del tensor antisimétrico de esfuerzos viscosos a través de la interfase o una distribución de corriente superficial puede generar flujo:

$$\left(\mathbf{T}_{nn|b} - \mathbf{T}_{nn|a} \right) + 2\mathcal{H}\gamma + \mathbf{B}_n \left(\mathbf{H}_{n|b} - \mathbf{H}_{n|a} \right) + \frac{1}{2}\mu_0 \left(\mathbf{H}^2|_b - \mathbf{H}^2|_a \right) = 0, \quad \text{Ecuación 11}$$

$$T_{nt|b} - T_{nt|a} + \mathbf{t} \cdot \nabla_s \gamma + \mathbf{B}_n K_{s,t} = 0$$

Los componentes normal y tangencial del tensor de esfuerzos están dadas por:

$$T_{nn} = -p + 2\eta' \frac{\partial v_n}{\partial x_n} + \lambda' (\nabla \cdot \mathbf{v}) \quad \text{Ecuación 12}$$

$$T_{nt} = \eta \left(\frac{\partial v_n}{\partial x_t} + \frac{\partial v_t}{\partial x_n} \right) + \zeta \mathbf{tn} : \varepsilon \cdot (\nabla \times \mathbf{v} - 2\boldsymbol{\omega}) \quad \text{Ecuación 13}$$

En la ecuación 12, \mathcal{H} representa la curvatura media de la interfase, γ es la tensión superficial, ∇_s representa el operador gradiente superficial que describe la variación de la cantidad dentro de la interfase y $K_{s,t}$ la densidad de corriente superficial. Los subíndices \mathbf{n} y \mathbf{t} indican la componentes normal y tangencial a la interfase y los subíndices a y b indican la fase sobre la cual se evalúa la cantidad. Ahora los términos $\mathbf{H}^2|_a$ y $\mathbf{H}^2|_b$ corresponden a:

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

$$\mathbf{H}^2|_a = \mathbf{H}_n^2|_a + \mathbf{H}_t^2|_a ; \quad \mathbf{H}^2|_b = \mathbf{H}_n^2|_a + \mathbf{H}_t^2|_a \quad \text{Ecuación 14}$$

Para el caso del balance de momento angular interno en la interfase, Chaves y Rinaldi demostraron que las condiciones de frontera normal y tangencial son la continuidad del flux de momentum angular interno dado por el tensor de “*couples stresses*” a través de la interfase, como se muestra en la siguiente expresión:

$$\mathbf{C}_{nn}|_b = \mathbf{C}_{nn}|_a ; \quad \mathbf{C}_{nt}|_b = \mathbf{C}_{nt}|_a \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde el tensor \mathbf{C} esta dado por:

$$\mathbf{C} = \eta'[\nabla\boldsymbol{\omega} + (\nabla\boldsymbol{\omega})^t] + I\left(\lambda' - \frac{2}{3}\right)\nabla \cdot \boldsymbol{\omega} \quad \text{Ecuación 16}$$

Codiff y Dahler [27] propusieron que el tensor \mathbf{C} es simétrico y depende únicamente del gradiente de la velocidad angular de rotación de las partículas de manera similar al tensor de esfuerzos viscosos. En esta expresión η' y λ' son los coeficientes de corte y volumétrico de “spin viscosity”. Para una discusión sobre análisis de orden de magnitud para estimar η' el lector puede referirse a Contreras et al. [28].

5. Avances en el flujo de ferrofluidos generados por CM rotativos

Es importante resaltar que a la fecha no hay acuerdo en la comunidad científica sobre el mecanismo generador de flujo de ferrofluido por un CM rotativo. A continuación, se hace un

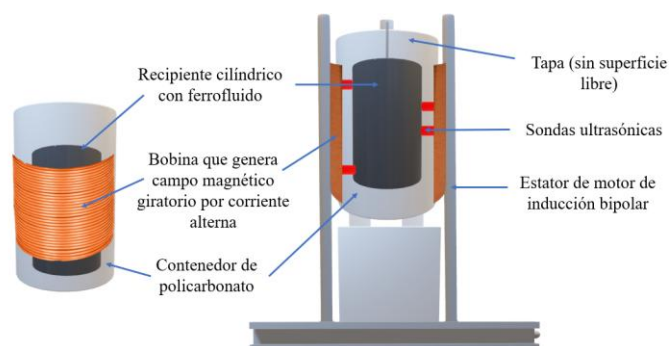
FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

recorrido sobre las teorías y evidencias experimentales más relevantes que se han propuesto y evaluado en los últimos 57 años.

5.1. Flujo de un ferrofluido dentro de un recipiente cilíndrico

Moskowitz y Rosensweig (M&R) [29] en 1967, fueron los primeros en observar que cuando un ferrofluido contenido en un recipiente cilíndrico fijo, y se pone dentro del estator de un motor trifásico que genera un CM rotativo, se genera el flujo del ferrofluido. La Figura 6, esquematiza esta configuración experimental. Desde entonces, se han propuesto varias teorías para explicar la generación del flujo, las cuales se discuten de manera general a continuación.

Figura 6 Experimento de generación del flujo por campo magnético giratorio en un recipiente cilíndrico.



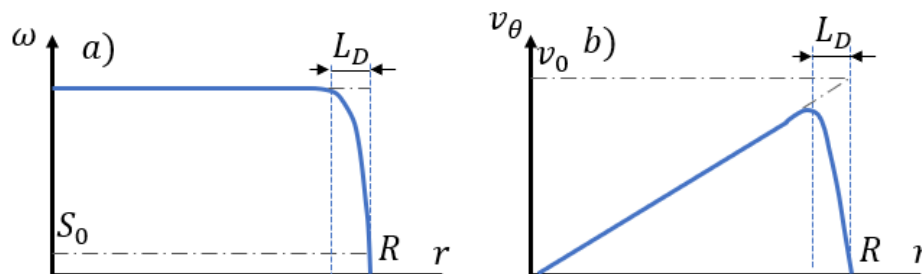
5.1.1. Teoría de Difusión del Momento Angular Interno (1969)

Moskowitz y Rosensweig (M&R) [29] fueron los primeros en reportar la generación de flujo de un ferrofluido por la acción de un CM rotativo “uniforme”, Figura 6. Este experimento es conocido en la literatura como “*Spin Up Flow*”. Ellos midieron la velocidad de rotación del fluido en la interfase ferrofluido-aire, notando que la intensidad del flujo dependía de la intensidad y frecuencia del CM. M&R concluyeron que el flujo es generado por torques magnéticos actuando sobre el momento magnético de las NPs, el cual, a su vez, genera la rotación del fluido alrededor de las NPs por efectos de la fricción. Según, los autores la suma de toda esta vorticidad alrededor

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

de las NPs es responsable del movimiento macroscópico del fluido. Esta explicación fue desestimada por Zaitsev y Shliomis (Z&Sh) [30] quienes argumentan que, en una distribución *uniforme* de velocidad angular de las partículas, la suma de los micro remolinos alrededor ellas se cancelen y, por lo tanto, no se genera flujo. En consecuencia, la única forma que se genere movimiento macroscópico es que $\nabla^2 \boldsymbol{\omega} \neq \mathbf{0}$, es decir, que exista transporte molecular de momento angular interno. Esta afirmación, se ha probado analíticamente, demostrando que cuando el término $\eta' \nabla^2 \boldsymbol{\omega}$ es cero, la solución de las ecuaciones ferrohídrodinámicas no predicen flujo. Esta teoría predice un perfil de velocidad caracterizado por una zona con movimiento de cuerpo rígido que se mantiene en la mayor parte del radio del cilindro, y una zona estrecha (“*boundary layer*”) donde se difunde el momento angular interno; y *co-rotación del flujo y el CM*. Sin embargo, Z&Sh [30], realizaron un análisis de orden de magnitud para estimar el valor de η' , obteniendo un valor despreciable, que genera flujos de magnitud mucho menores a los observados por M&R y por ende una “*boundary layer*” estrecha del orden de micrómetros.

Figura 7 a) Perfil de velocidad angular de las partículas; b) velocidad traslacional del ferrofluido. En el gráfico a) y b) L_D , es la zona de difusión del momento angular. Para la gráfica b) se divide en dos zonas, la primera zona con movimiento de cuerpo rígido y la segunda zona de capa límite donde la velocidad cae a cero con rapidez.



Nota: Tomado y modificado de Zaitsev y Shliomis (Z&Sh) [30]

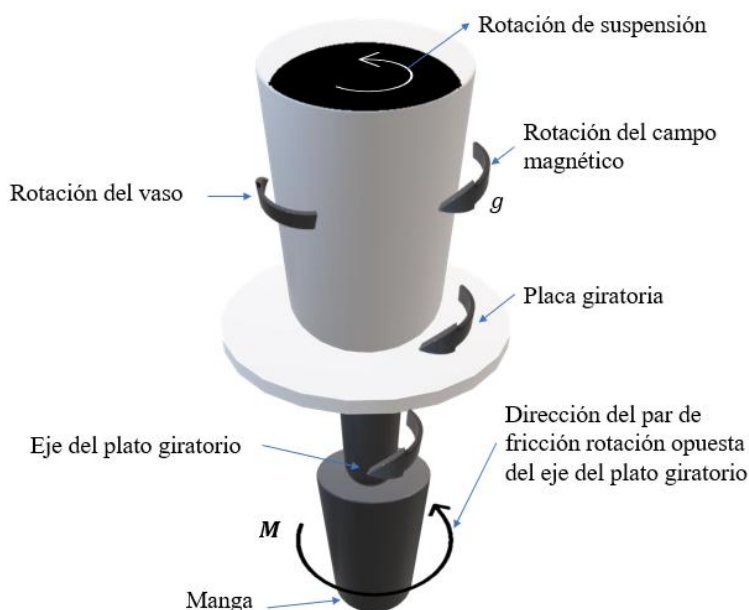
FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

Sin embargo, en el mismo año que se planteó esta teoría, Brown y Horsnell [30] repitieron el experimento de M&R-1969 [29], pero montando el cilindro en una superficie que rotaba libremente, como se muestra en la Figura 8. El experimento permitió confirmar, que el flujo de ferrofluido observado en la interfase es en la dirección contraria a la de rotación del CM. Este hallazgo, más el hecho (antes mencionado) de un $\eta' \approx 0$, fueron suficientes para poner en duda la teoría de difusión del momento angular interno como el mecanismo generador del flujo.

Ante este panorama, se empezaron a plantear otras teorías para explicar el flujo. Por ejemplo, Glazov [32] arguyó, que M&R-1969 [29], Z&Sh-69 [30] suponen en sus análisis, que el CM rotativo es uniforme, sin embargo, experimentalmente esta condición es parcialmente cumplida, ya que, debido a los efectos de las ranuras del estátor donde se genera el campo, podría generarse una dependencia del CM con la dirección azimutal, que requiere el uso de armónicos superiores al fundamental ($m=1$) para ser modelado. Esencialmente, el análisis de Glazov [32] consideró la misma teoría fenomenológica utilizada por Z&S-69 [30], *pero ignora las contribuciones debidas a difusión del momento angular interno* ($\eta' = 0$). La expresión obtenida por Glazov [32], para el perfil de velocidad, depende del radio elevado a una potencia en función del número del armónico (m), y solo predice flujo para valores de $m \neq 1$. Adicionalmente, los resultados de Glazov [32] predicen rotación del fluido y del CM en la misma dirección para fracciones volumétricas de las NPs menores a 0.12; mientras que para valores mayores contra rotación. Según Glazov [32], armónicos diferentes al fundamental, producen una fuerza en la dirección- θ que genera el flujo; no se tuvo en cuenta la variación del CM en la dirección axial. Para validar las predicciones de su teoría respecto a los resultados experimentales, Glazov estimó el valor de la velocidad angular del ferrofluido medido en la superficie y los comparó con los resultados de Kagan *et al.*, [33] (1973) encontrando un acuerdo satisfactorio.

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

Figura 8 Experimento de Brown y Horsnell 1969.



Diecinueve años después de que Z&Sh-69 [30] propusieran la teoría de DFMAI, Shliomis *et al.*, (1988) [34] afirman que esta teoría es errónea. Para ellos, la rotación de NPs en el fluido no puede generar vorticidad macroscópica, pues los microvórtices generados por la rotación de las partículas no se extienden dentro del fluido más allá de una distancia del orden de magnitud del diámetro de las NPs, y cuando se promedia los micro vórtices se cancelan entre sí, y no producen flujo macroscópico. Por lo tanto proponen que, el flujo del ferrofluido es impulsado por gradientes de la permeabilidad magnética, generados a su vez, por gradientes de temperatura en dirección radial producidos por la disipación viscosa en los micro remolinos que surgen alrededor de las partículas en rotación, especialmente a altas frecuencias de rotación del CM. Shlioms *et al.*, (1988) [34] no obtienen una expresión para el perfil de velocidad, pero calculan la energía disipada por la rotación de las NPs, la cual interpretan como una generación volumétrica de calor, lo que predice un perfil de temperatura parabólico. Según sus cálculos, para frecuencias de rotación del campo en el experimento de M&R-1967 [29] se pudo generar un gradiente de temperatura de varios puntos

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

porcentuales. Esta visión fue ampliada en una publicación de Pshenichnikov *et al.*, [35], quienes resolvieron las ecuaciones ferrohodinámicas con las siguientes restricciones: i) despreciando el término de difusión de momento angular interno, ii) baja intensidad del CM, pero iii) altas frecuencias de rotación, iv) desprecia el valor de la vorticidad en comparación de la frecuencia de rotación del campo $|\nabla \times \mathbf{v}| \ll \Omega$ lo que permite linealizar la ecuación de magnetización. Adicionalmente, los autores consideran v) dependencia débil de la susceptibilidad respecto a la temperatura, lo que justifica: el uso de una relación lineal para describirla en el cálculo de la fuerza magnética, y la suposición de una fuente de calor volumétrica uniforme en la ecuación de energía. Como resultado ellos obtienen un perfil de temperatura parabólico en dirección radial; y un perfil de velocidad con una dependencia del radio y de la intensidad del CM $v_\theta(r^3, H_0^4)$ y adicionalmente, predice una dirección del flujo contraria a la del campo magnético para $\Omega \leq 10^5 s^{-1} (\approx 1591 Hz)$, como consecuencia del valor negativo de la derivada con respecto a la temperatura de $\ln(\chi_2/[1 + \chi_1])$. Para validar sus resultados, ellos calcularon el valor de la velocidad predicha y lo compararon con el de velocidades experimentales medidos en la superficie encontrando buen acuerdo, sin embargo, los autores hace notar que lo más adecuado es poder medir el perfil de velocidad al interior del fluido.

En 1990, Ronsensweig *et al.*, (R&P&J-90) [36] mejoraron el desarrollo experimental de M&R-67 [29], usando un “verdadero ferrofluido”^{††} y afinando la técnica para obtener los perfiles de velocidad *superficiales*. Con estos resultados se enfocaron en evaluar la teoría de DFMAI, teniendo en cuenta que los perfiles de velocidad predichos por ésta y se asemejan cualitativamente

^{††} Primeros experimentos usaron suspensiones con partículas magnéticas del orden de micrómetros y altas concentraciones que generan aglomeraciones de ellas por lo cual no son consideradas como ferrofluidos.

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

a los observados experimentalmente, con excepción, de la dirección del flujo y de la longitud de difusión del momento angular interno (L_D) experimental, que es mayor que lo predicho por análisis de orden de magnitud. En estos experimentos, se verificó la uniformidad del campo magnético, encontrando que, en el plano perpendicular a z , en un recipiente de 0.3 cm de diámetro es de 0.2% y para un recipiente de 3.6 cm fue de $\pm 20\%$. Ellos confirmaron que los perfiles de velocidad en la superficie tienen la característica de movimiento de cuerpo rígido en la mayor parte del radio del cilindro con una estrecha zona junto a la superficie del cilindro, donde la velocidad cae rápidamente a cero; la forma del perfil se conserva en el rango de frecuencias de rotación del campo que fueron evaluadas en acuerdo con los resultados de Z&Sh-69 [30]. Resaltan que este tipo de perfil resulta ser único, para el caso de un fluido en un contenedor estático. Adicionalmente, ellos obtienen una expresión para el perfil de velocidad en el “*bulk*” del fluido, a partir de la cual se puede predecir el valor de la velocidad angular del fluido. Esta expresión predice una velocidad angular de rotación constante, y de magnitud inversamente proporcional al radio del contenedor, lo cual está de acuerdo con la evidencia experimental aportada por ellos mismos, y que resaltan un comportamiento no visto en el flujo de fluidos viscosos. Por otro lado, a partir de los valores experimentales de velocidad máxima y la solución analítica, ellos calcularon un valor de $\kappa^{-1} \approx 0.033 \text{ cm}$, el cual resulta ser mucho mayor al esperado por Z&Sh-97 de $\kappa_{Z\&Sh}^{-1} \approx 0.05 \mu\text{m}$ quienes lo interpretan como la distancia entre partículas.

En resumen, R&P&J-90 [36] encuentran acuerdo entre las predicciones teóricas de la teoría DMAI y los resultados experimentales obtenidos en la superficie del ferrofluido, con excepción de la dirección del flujo del ferrofluido que resulta ser contraria a la predicha. Esto los llevó a concluir que: “*Thus, the spin diffusion mechanism cannot be the cause of the flow fields we observe*”. En consecuencia, R&P&J-90 [36] proponen una nueva teoría: que el flujo es generado

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

por esfuerzos superficiales más que por esfuerzos volumétricos. Para demostrarlo, ellos realizan experimentos donde se observa la contra rotación entre ferrofluido y campo, cuando la interfase tiene una forma cóncava, cero flujo cuando la superficie es plana, y co-rotación entre el fluido y el campo cuando la superficie es convexa, como se observa en la siguiente figura.

Figura 9 Sentido de rotación controlado por la forma de la superficie libre.



Posteriormente, ellos realizan un análisis cualitativo a partir del tensor de esfuerzos totales (parte simétrica, antisimétrica, y tensor de esfuerzos de Maxwell) suponiendo que el fluido se mantiene en reposo, obteniendo una expresión para el salto en esfuerzos a través de la interfase como: (35) $t_t^f - t_t^{air} = -2\zeta\omega_z \sin \beta$ donde β es el ángulo entre el vector de la velocidad angular de las partículas y el vector normal a la superficie. El signo de β , depende de la forma de la interfase (cóncava o convexa) y toma el valor de cero cuando es la superficie es plana. La evidencia experimental más este análisis cualitativo, le dieron bases a R&P&J-90 [36] para concluir que: i) La DMAI no puede ser la causa del flujo observado de ferrofluidos en contenedores cilíndricos ya que esta teoría no puede explicar el contra flujo entre ferrofluido y campo magnético. II) El flujo observado en la interfase no es generado por esfuerzos volumétricos (DMAI) si no por efectos superficiales, específicamente es el salto en esfuerzos magnéticos tangenciales a través de la interfase lo que genera el flujo.

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

5.1.2. Primeras mediciones del Perfil de velocidad al interior del fluido

La principal limitación de los experimentos reportados hasta esa época (1990), fue la imposibilidad de medir perfiles de velocidad al interior del fluido, obligando a los investigadores a evaluar teorías fundamentadas en esfuerzos volumétricos con datos experimentales afectados por efectos superficiales. Motivados a resolver esta situación, Rinaldi y colaboradores presentaron varios trabajos donde se tomaron perfiles de velocidad al interior del fluido usando la técnica de “*Pulsed Ultrasound Doppler Velocimetry*” los cuales fueron comparados con predicciones de la teoría de DMAI [37] [38] [39] [40] [41] [42] [43] [44] [45] [8]. La principal ventaja de esta técnica es que permite medir los perfiles de velocidad en fluidos oscuros y en tiempo real, con excepción de las zonas próximas (3 o 5 mm) a las paredes del recipiente.

En 2006, *Chaves et al* [46], presentaron los primeros perfiles de velocidad medidos al interior del ferrofluido. Los experimentos se realizaron con dos ferrofluidos comerciales: EMG 705 (wáter based ferrofluid) y EMG 900 (Kerosene Based Ferrofluido). La geometría corresponde a un cilindro de policarbonato de 24.7 mm de radio interno y 63.5 mm de alto. A pesar de que el CM ha sido considerado como uniforme en los análisis, ellos determinaron una variación radial del CM de 2,2 % desde el centro del cilindro hasta la pared del contenedor a media altura; y un máximo del 6 % en la parte superior del contenedor, mientras que el campo en dirección axial tiene una variación del 4 % desde la mitad hasta 3/4 de altura y del 21 % hasta el tope. El primer set de experimentos se realizó usando el recipiente con tapa con el fin de evitar efectos superficiales y midiendo los perfiles alturas del cilindro: H , $3/4H$, $1/2H$, y $1/4H$. Fue encontrado que los perfiles de velocidad concuerdan cualitativamente con los predichos por la teoría de DMAI, *incluyendo que el flujo rota en la misma dirección del campo en las cuatro posiciones medidas*. La forma de los perfiles se mantuvo para todas las intensidades y frecuencias de rotación del campo. No

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

obstante, la magnitud de flujo para el EMG 900 es menor y la capa límite es mucho más estrecha que para el WBF. Este hallazgo tiene gran significado pues la dirección de flujo vs la dirección de rotación del campo se había convertido en la característica de mayor peso para desechar la teoría de DMAI. El segundo set del experimento se realizó sin usar tapa en el recipiente, es decir efectos superficiales son presentes. Para este caso, los perfiles de velocidad mostraron que cerca de la interfase ferrofluido-aire (altura del probe igual a H) la dirección del flujo es contraria a la del campo magnético, mientras que a alturas de $3/4H$, $1/2H$, y $1/4H$ la dirección del flujo coincide con la de rotación del campo.

Estos experimentos demostraron, que las medidas experimentales realizadas desde M&R-67 a la fecha no eran convenientes para evaluar la teoría DMAI, pues cerca de la superficie ferrofluido aire, el flujo es generado por esfuerzos superficiales, mientras que esta teoría de DMAI, se fundamenta en el efecto de *torques magnéticos* al interior del fluido. Adicionalmente, estos experimentos contrarios a validar una teoría u otra (Z&Sh-69 [30] o R&P&J-90 [36]), confirman que los dos mecanismos de flujo están presentes cuando se mantiene el tope del contenedor sin tapa. En principio, se podría pensar que esta observación desvirtuaría la frase de R&P&J-90 [35] *“In spite of all the above evidence, the spin diffusion theory suffers from a fatal flaw - we find that the direction of flow is the reverse in each instance from that which is predicted.”* pero no fue así, como se verá más adelante. Siguiendo la misma línea de investigación, Rinaldi y colaboradores presentaron varios trabajos que se enumeran a continuación. En el primero, (A. Chaves, M. Zahn, and C. Rinaldi, 2008) [42] fue retomado el análisis teórico para el Spin Up, usando un análisis de perturbación regular cuyo parámetro de perturbación depende de la intensidad del CM al cuadrado. En este análisis solo se llegó hasta soluciones de cero y primer orden, lo que en la práctica limita el análisis a bajos campos magnéticos y bajos valores del

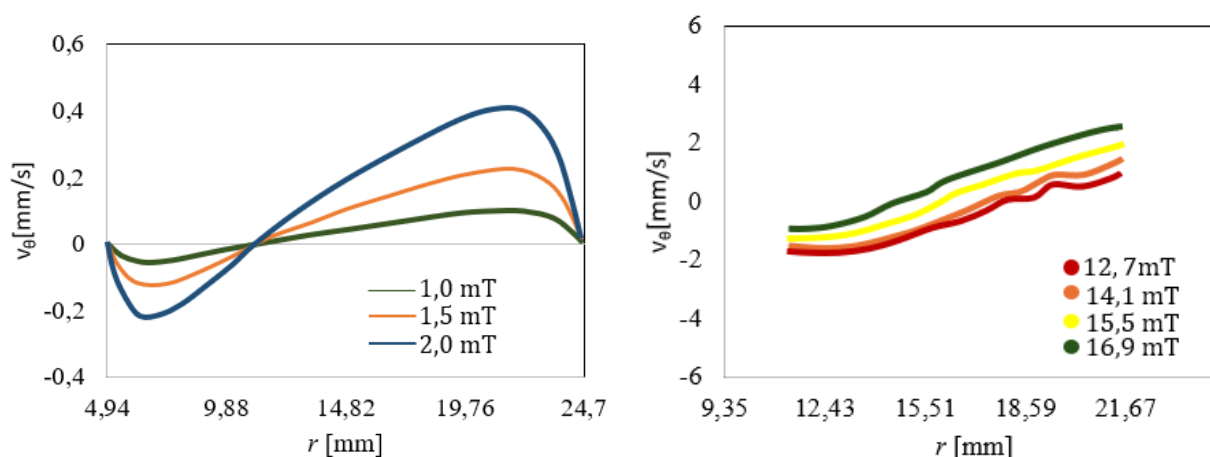
FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

producto de la frecuencia angular y el tiempo de relajación ($\omega\tau \ll 1$). Comparación de las predicciones teóricas versus resultados de perfiles de velocidad experimentales mostraron acuerdo cualitativo en la forma de los perfiles. Sin embargo, la magnitud del flujo medido experimentalmente resultó ser menor (pero no despreciable) que la predicha por el análisis teórico. Adicionalmente, ellos usaron los datos experimentales de perfiles de velocidad junto a valores de la velocidad extrapolada en la pared, con lo cual estimaron un valor del coeficiente de “spin viscosity” el cual es 8 órdenes de magnitud mayor que el predicho por análisis de orden de magnitud de Z&Sh [42]. En otro trabajo, Chaves *et al.* [44], obtuvo una solución analítica para el flujo de ferrofluido en el espacio anular de dos cilindros concéntricos. A diferencia de la típica geometría de Spin Up, en este caso, además del torque magnético, se genera una fuerza tipo Kelvin en la dirección azimutal debido a la no uniformidad del campo magnético, para la cual Chaves *et al.* obtienen una solución analítica-numérica en el límite de campo magnético despreciable. Siguiendo la misma línea de investigación, Rinaldi y colaboradores presentaron varios trabajos que se enumeran a continuación. En el primero, (A. Chaves, M. Zahn, and C. Rinaldi, 2008) [42] fue retomado el análisis teórico para el Spin Up, usando un análisis de perturbación regular cuyo parámetro de perturbación depende de la intensidad del CM al cuadrado. En este análisis solo se llegó hasta soluciones de cero y primer orden, lo que en la práctica limita el análisis a bajos campos magnéticos y bajos valores del producto de la frecuencia angular y el tiempo de relajación ($\omega\tau \ll 1$). Comparación de las predicciones teóricas versus resultados de perfiles de velocidad experimentales mostraron acuerdo cualitativo en la forma de los perfiles. Sin embargo, la magnitud del flujo medido experimentalmente resultó ser menor (pero no despreciable) que la predicha por el análisis teórico. Adicionalmente, ellos usaron los datos experimentales de perfiles de velocidad junto a valores de la velocidad extrapolada en la pared, con lo cual estimaron un valor del

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

coeficiente de “spin viscosity” el cual es 8 órdenes de magnitud mayor que el predicho por análisis de orden de magnitud de Z&Sh [42]. En otro trabajo, Chaves *et al.* [44], obtuvo una solución analítica para el flujo de ferrofluido en el espacio anular de dos cilindros concéntricos. A diferencia de la típica geometría de Spin Up, en este caso, además del torque magnético, se genera una fuerza tipo Kelvin en la dirección azimutal debido a la no uniformidad del campo magnético, para la cual Chaves *et al.* obtienen una solución analítica-numérica en el límite de campo magnético despreciable.

Figura 10 Dependencia del perfil de velocidad con la frecuencia del campo magnético, resultados obtenidos usando propiedades físicas y magnéticas del ferrofluido EMG900-3. La figura del lado izquierdo son los perfiles de velocidad de espín y traslación calculados en el espacio anular de dos cilindros coaxiales para 5mT de campo magnético aplicado. La figura del lado derecho representa el perfil de velocidad en el espacio anular lleno, obtenidos con cuatro transductores en diferentes ángulos con respecto a la diagonal.



Nota. Tomado y modificado de Chaves *et al.* [44].

Posteriormente, Torres-Diaz *et al.* [8], explican que la diferencia en la magnitud del flujo entre los valores experimentales y teóricos de Chaves *et al.*, es debido a que una fracción de las NPs del

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

ferrofluido usado, no se relajan por mecanismo browniano, es decir, no contribuyen a la generación de flujo. Para probarlo, ellos sintetizaron NPs de Ferrita Cobalto que se caracterizan por tener un valor de la constante anisotrópica mayor que la de la magnetita, lo cual asegura un mecanismo de relajación browniano en la mayoría de las partículas en el ferrofluido. Estas NPs fueron suspendidas en agua y en mezclas de agua-glicerina lo que les permitió estudiar el flujo bajo condiciones de $\omega\tau \ll 1$ y $\omega\tau \gg 1$. Usando estos ferrofluidos “brownianos”, demostraron que los perfiles de velocidad para ferrofluidos en base agua, concuerdan cuantitativamente, como cualitativamente, a las predichas por la teoría de DMAI. De hecho, ellos, pudieron mostrar experimentalmente que el efecto de la frecuencia sobre el flujo de ferrofluido se caracteriza por tener un punto crítico a partir del cual, incrementar la frecuencia disminuye el flujo, lo cual es predicho por la teoría de DMAI. No obstante, los perfiles de velocidad a campos magnéticos de intensidad moderada dejan de ajustarse, ya que el análisis de flujo es válido solo para CM de intensidad despreciable como ya se había mencionado.

5.2. Flujo de un ferrofluido dentro de una esfera

Una de las limitaciones experimentales del flujo de ferrofluido en un contenedor cilíndrico, es que mientras que el análisis teórico supone que el CM es uniforme, los estátores de motores trifásicos usados en este tipo de experimento generan CM que se desvían de la uniformidad. En los experimentos ya descritos, este efecto ha sido despreciado, tomando recipientes cilíndricos de diámetro inferior al del estátor, de forma que se pueda reducir la heterogeneidad del CM. No obstante, esto ha generado dudas sobre si este tipo de heterogeneidad del campo, en últimas, es la que genera el flujo por la acción de una $\mathbf{F}_\theta = (\mathbf{M} \cdot \nabla \mathbf{H})_\theta$. El primero en evaluar esta posibilidad fue Glazov [32], quien propuso que un campo magnético rotativo uniforme no puede generar el flujo de ferrofluido observado, y que este, es generado por armónicos de alto orden asociados a la

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

no-uniformidad del CM. Con el fin de evaluar la argumentación de Glazov, Torrez-Díaz et al. [8] realizaron un trabajo analítico y experimental usando un estátor de cuatro polos y así generar campos magnéticos no uniformes para medir perfiles de velocidad en geometrías cilíndrica y anular. Las principales conclusiones de este trabajo fueron: 1) que desafortunadamente, Glazov [32] no resolvió las ecuaciones gobernantes de manera consistente, ya que introdujo una condición “ad hoc” para el perfil de velocidad del espín, que implica que el ángulo de desfase entre la magnetización y el campo magnético aumentaba con el número de polos lo cual es incorrecto y por tanto sus predicciones no son correctas. 2) A partir del análisis teórico, Torres-Díaz [8] concluyen que para valores arbitrarios del número de polos del estator no se predice flujo cuando $\eta' = 0$, es decir, que no es suficiente la no uniformidad del campo para generar el flujo. 3) Que los perfiles de velocidad de ferrofluidos en geometrías cilíndricas y de cilindros concéntricos tienen las características de los perfiles predichos suponiendo CM uniformes, esto indica, que las no idealidades del estator no son apreciables (armónicos de alto orden) y que el armónico fundamental es dominante. 4) Existe un acuerdo cualitativo entre la teoría DMAI y los perfiles de velocidad experimentales generados con CM no uniformes (estátor con $m = 4$), lo que proporciona una fuerte indicación del importante papel del spin viscosity para explicar algunos flujos de ferrofluidos.

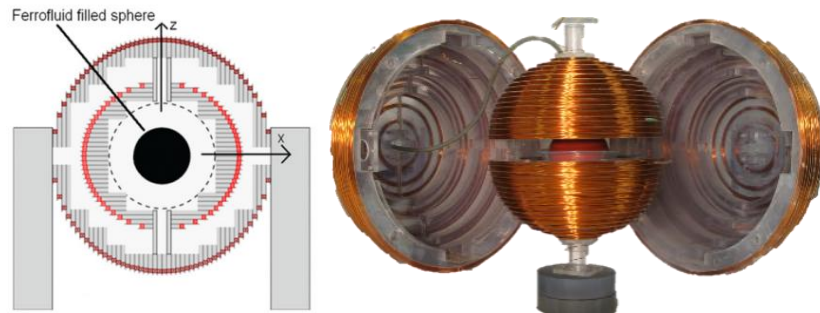
No obstante, estas observaciones, las dudas sobre el efecto de la no uniformidad del campo se mantuvieron, motivando a los investigadores a buscar una geometría que permitiera obtener un CM uniforme. Con este objetivo, Lawler y Zahn [47] diseñaron y construyeron un dispositivo con bobinados esféricos conocido como “fluxball” el cual permite inducir un CM rotativo con 98% de uniformidad en un recipiente esférico, Figura 11. Usando el fluxball, Khushrushahi y Zahn [48] evaluaron los perfiles de velocidad del ferrofluido en el contenedor esférico para varias

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

situaciones: *i*) contenedor esférico completamente lleno (torques magnéticos y difusión del momento angular interno), *ii*) contenedor parcialmente lleno (2/3) (efecto de torques magnéticos y esfuerzos magnéticos superficiales), y *iii*) contenedor lleno con un imán (o uso de un tercer embobinado esférico) sobre la esfera para generar la no uniformidad del CM. Ellos reportaron que, para el caso (*i*) no se observó flujo medible, mientras que para los casos (*ii*) y (*iii*) se pudieron medir los perfiles de velocidad. Estas observaciones los llevó a afirmar que: *“El principal mecanismo de flujo en el ajuste reciente de la velocidad de flujo experimental a la teoría de difusión de espín se debió en realidad a los campos no uniformes generados dentro del volumen de ferrofluido debido a los efectos del campo desmagnetizante no uniforme asociados con el contenedor cilíndrico de altura finita (con una tapa superior), que los autores [3,5,6] no consideraron”*. En cuanto, a las predicciones teóricas, Khushrushahi y Zahn [48] resuelven el problema de flujo de la esfera para el caso de $\eta' = 0$ bajo un campo magnético uniforme, a pesar de que es bien conocido que para esta situación la teoría de DMAI no predice flujo. Adicionalmente, ellos mencionan que no les fue posible obtener los perfiles de velocidad teóricos para el flujo de ferrofluido contenido en la esfera para el campo magnético no uniforme usando COMSOL, y en su lugar, resolvieron un problema análogo suponiendo un cilindro infinitamente largo de ferrofluido en un campo magnético rotativo uniforme, al cual es agregado un imán permanente infinitamente largo de espesor finito, adyacente al cilindro de ferrofluido, lo que finalmente resulta en un campo magnético rotativo no uniforme. Este inconveniente no permite hacer una comparación directa entre los perfiles de velocidad experimentales y teóricos, ya que evidentemente no son las mismas geometrías.

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

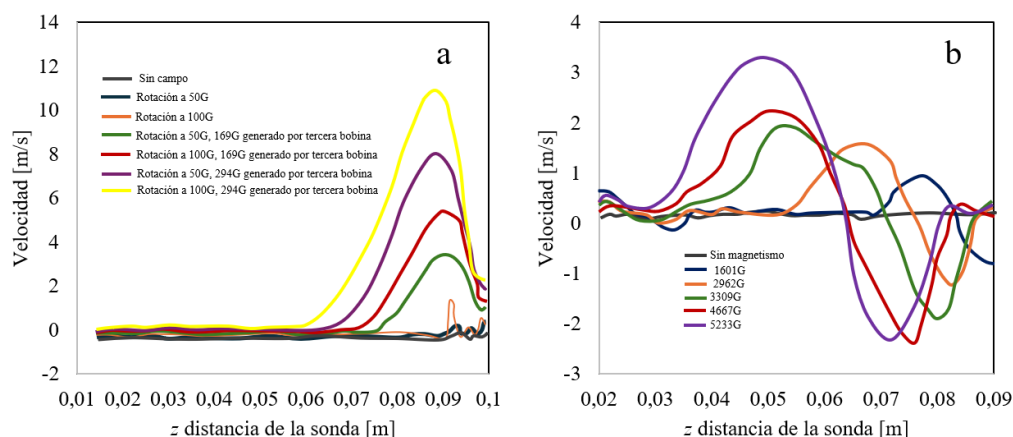
Figura 11 Estructura del experimento empleado para estudiar el flujo de ferrofluido en una esfera.



Posteriormente, Torres-Diaz *et al.* [49], complementaron este trabajo experimental, usando el mismo ferrofluido y equipo experimental (fluxball) usado por Khushrushahi y Zahn, pero cambiando el eje de rotación del campo magnético del eje y al eje z , de forma que la componente de la fuerza gravitacional no fuera en la dirección del flujo. Con este ligero cambio, ellos detectaron flujo y midieron los perfiles de velocidad para la esfera llena de ferrofluido. Adicionalmente, evaluaron el flujo del ferrofluido en un contenedor cilíndrico ubicado dentro del fluxball, encontrando que es similar al flujo generado en un estator de un motor de dos polos, lo que les permitió concluir que la heterogeneidad introducida por los efectos de ranura y la altura finita del devanado del estator no son la fuente principal del flujo rotacional reportado por Chaves y Rinaldi quienes usaron estatores de motores trifásicos para generar el campo magnético.

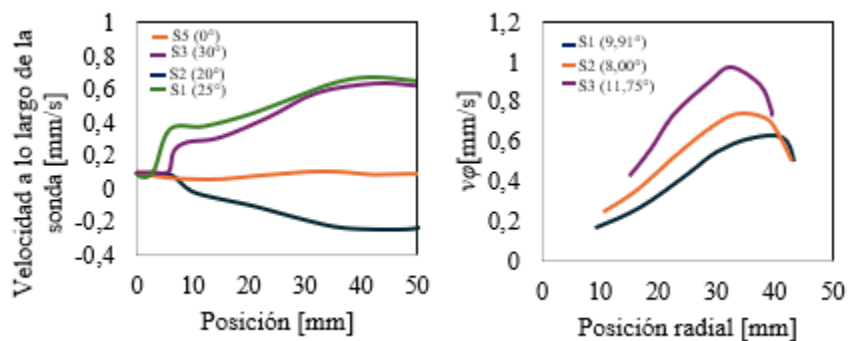
Figura 12 Medición por velocímetro de ultrasonido para el ferrofluido EFH1 sin campo y bajo un campo magnético uniforme.

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS



Nota. El gráfico a) la medición de velocidad de flujo se hace bajo tres escenarios: sin campo, CM uniforme y CM alterado por una bobina excitada con CA. Para la gráfica b) son las mismas configuraciones para a) pero el CM alterado es por un imán impuesto sobre el “fluxball” Tomado y modificado de *Khushrushahu y Zahn* [48]

Figura 13 Perfil de velocidad obtenido por *Torrez Díaz y Rinaldi* en el velocímetro de ultrasonido dentro de la esfera.



Nota. El campo magnético se aplicó en dirección de las agujas del reloj, obteniendo varios perfiles de velocidad: a) a lo largo de la ubicación de las sondas; b) en dirección azimutal. Tomado y modificado *Díaz y Rinaldi* [49].

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

5.2.1. Teoría de la generación de flujo por disipación viscosa de calor

Shliomis *et al.*, [34] sugirieron que el “spin up flow” de ferrofluido es generado por la heterogeneidad de la permeabilidad magnética debido a gradientes de temperatura en dirección radial producidos por la disipación viscosa de los micro remolinos que surgen alrededor de las partículas rotando, especialmente a altas frecuencias del campo magnético.

Esta visión fue ampliada analíticamente por Pshenichnikov *et al.* [35], tomando $\eta' = 0$, suponiendo que la vorticidad del fluido es mucho menor que la frecuencia de rotación del campo, lo que les permitió, simplificar la ecuación de magnetización a una relación lineal entre los vectores \mathbf{M} y \mathbf{H} , desacoplando el problema magnético del hidrodinámico. Adicionalmente, la generación de calor volumétrica dentro del ferrofluido por la rotación de las NPs fue encontrada y es $\mu_0 \chi'' |H|^2 \Omega_f$. Usando estas consideraciones y tomando en cuenta el cambio de la susceptibilidad con la temperatura, ellos obtienen una expresión para el perfil de velocidad del ferrofluido en el cilindro, que predice contra rotación entre el fluido y el campo magnético para frecuencias inferiores a 10^5 s^{-1} ($\approx 16 \text{ kHz}$).

Este mismo análisis, fue retomado por Shliomis, [50] pero esta vez permitiendo que la intensidad del campo magnético no se limite a valores despreciables. Al igual que en el caso de Pshenichnikov *et al.* [35], el nuevo análisis de Shliomis, predice que el flujo del ferrofluido va en dirección contraria a la dirección de rotación del campo magnético; valor de la velocidad máxima es independiente de las propiedades del ferrofluido y se da en $r = R/\sqrt{3}$. Así mismo, predice que el valor máximo de la velocidad depende, inicialmente de la intensidad del campo magnético de acuerdo con $\alpha^4/18$, hasta alcanzar un máximo de la velocidad a un $\alpha = 4.19$, para luego empezar a disminuir con una dependencia de $2/\alpha$.

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

En este caso, Shliomis va más allá, afirmando el perfil parabólico de la temperatura dentro del ferrofluido, genera una componente de velocidad en la dirección axial (v_z) de tal forma que el ferrofluido ubicado en la región central del cilindro ($0 \leq r \leq R/\sqrt{3}$) ascienda, mientras que el fluido cercano a la pared desciende ($R/\sqrt{3} \leq r \leq R$). A partir de un análisis de orden de magnitud, Shliomis concluye que $v_\theta/v_z \sim 1$ es la zona de mayor velocidad de la componente axial.

No obstante, una revisión de estas predicciones contra los perfiles de velocidad experimentales, muestran que estas predicciones fallan en cuanto a que el flujo al interior del ferrofluido siempre se da en la rotación del campo, que la dependencia del flujo con la intensidad del campo magnético es de α^2 para bajos campos, y menor a la potencia de dos para altos campos. También se ha medido experimentalmente una componente de velocidad axial en el cilindro, pero es asociada a los efectos de la pared inferior y superior del contenedor cilíndrico y que $v_\theta/v_z > 1$, se recomienda al lector revisar la Fig. 7 de [30].

6. Conclusiones

Esta revisión del estado de arte muestra que la generación de flujo de ferrofluidos por la acción de campos magnéticos dependientes del tiempo es un tema que merece capítulo aparte en dentro del espectro de dinámica de fluidos. Esta ciencia requiere de equipos multidisciplinarios conformados por ingenieros, físicos y químicos para el desarrollo de investigación fundamental que permita plantear y validar teorías que expliquen el comportamiento reológico de estos fluidos bajo campos magnéticos. Como se desprende del desarrollo de esta revisión del estado del arte, el flujo de ferrofluidos inducido por campos magnéticos dependientes del tiempo ha servido para

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

estudiar el comportamiento hidrodinámico de fluidos estructurados que experimentan densidades de torques magnéticos, difusión de momento angular interno, plantear balances superficiales que permiten evaluar las formas de interfaces que involucran fluidos magnéticos, la aplicación de condiciones de frontera para la velocidad angular de las unidades del subcontinuo (NPs en este caso) así como estimaciones de nuevos coeficientes fenomenológicos para la difusión de momento angular interno.

A pesar de la evidencia experimental que se tiene de medidas de perfiles de velocidad al interior de ferrofluido en varias geometrías, algunos investigadores han ignorado esta evidencia para examinar sus teorías. A la luz de la evidencia experimental recolectada en esta revisión del estado del arte, como medio de validación de las teorías propuestas, se puede asegurar que la teoría de difusión de momento angular interno es la que describe con exactitud las principales características del flujo de ferrofluidos. No obstante, se debe seguir investigando en la evaluación experimental o teórica del valor del "spin viscosity".

Se presenta en forma exacta el aporte del desarrollo del trabajo en concordancia a la justificación presentada. Se describe en forma lógica, los resultados del trabajo, dando respuesta a los objetivos o propósitos planteados. Basado en los resultados recolectados, incluido el tratamiento estadístico o cualitativo. Se muestra en forma concisa los productos y/o resultados y se resaltan las contribuciones del trabajo al contexto local, regional, nacional e internacional, cuando aplique.

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

Referencias Bibliográficas

- [1] Silvestri, S.O; Munuce, A. C; Alassia, M. E; Seferian, A; Reviglio, A y Soria, L. R. (2014) Nanotecnología hoy: el desafío de conocer y enseñar, Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Renata Kándico.
- [2] Acosta, J. A. J. (2019) La nanotecnología: el mundo de las maquinas a escala nanométrica, Barcelona: RBA Libros..
- [3] Choi , S. U. y Eastman, J. A. (1995). «Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles,» de ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, San Francisco, CA,.
- [4] Papell, S. (1965). Low viscosity magnetic fluid obtained by the colloidal suspension of magnetic particles (Estados Unidos. Patente US-PATENT-3,215,572).
- [5] Contreras-Mateus, D; Chaves-Guerrero, A; Sanchez, F. y Nassar, N. (2024) «Ferrofluids and magnetism in the oil industry: Theories, challenges, and current applications—A comprehensive review,» Physics of fluid, p. 36., <https://doi.org/10.1063/5.0241131>
- [6] Ali, A; Zafar, H.; Zia, M.; Haq, I.; Phull, A. R.; Ali, J. S. y Hussain, A. (2016.) «Synthesis, characterization, applications, and challenges of iron oxide nanoparticles,» Nanotechnology, Science and Applications, pp. 49-67., <https://doi.org/10.2147/NSA.S99986>
- [7] Graham, C. y Cullitty, B. (2008) Introduction to magnetic materials, Estados Unidos: IEEE Press,.

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

- [8] Torrez-Díaz, I.; Cedeño-Mattei, Y.; Perales-Perez, O. y Rinaldi, C. (2014). «Flows and torques in Brownian ferrofluids subjected to rotating uniform magnetic fields in a cylindrical and annular geometry,» *Physics of fluids* 26, 012004,. <https://doi.org/10.1063/1.4863201>
- [9] Rosensweig, R. (1985). *Ferrohydrodynamics*, New York: Dover publication, INC.
- [10] Stefan, O. y Thurm, S. (2002). «Magnetoviscous Effects in Ferrofluids,» de *Ferrofluids* (pp 185-201), Springer.
- [11] Blums, E.; Cebers, A. y Maiorov, M. (1998) «Magnetic Fluids», *Journal of Fluid Mechanics.*, , pp. 376-378. <https://doi.org/10.1017/S0022112097227904>
- [12] McTague, J. (1969) «Magnetoviscosity of Magnetic Colloids,» *Journal of chemical Physics*, pp. 133-136, 1969. <https://doi.org/10.1063/1.1671697>
- [13] Bacri, J.; Perzynski, R.; Shliomis, M. y Burde, G. (1995) «“Negative-Viscosity” Effect in a Magnetic Fluid,» *Physical Review Letters*, pp. 2128-2131. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.75.2128>
- [14] Anupam-Bhandari. (2023)«Theoretical Development in the Viscosity of Ferrofluid,» *Tribol, J.*, p. 9. <https://doi.org/10.1115/1.4056626>
- [15] Rosenthal, A.; Rinaldi, C.; Franklin, T. y Zahn, M. (2003). «Torque Measurements in Spin-Up Flow of Ferrofluids,» *J. Fluids Engineering*, p. 8. <https://doi.org/10.1115/1.1669030>

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

- [16] Chavez, A.; Zahn, M. y Rinaldi, C. (2005) «Spin-up flow of ferrofluids: Asymptotic theory and experimental measurements,» *Physics of Fluids*, vol. 20, n° 5,.
<https://doi.org/10.1115/1.1669030>
- [17] Neuringer, J. y Rosensweig, R. (1964) «Ferrohydrodynamics,» *Physics of fluids*, pp. 1927-1937,.
<https://doi.org/10.1063/1.1711103>
- [18] Shliomis, M. (1974) «Magnetic fluids,» *Soviet Physics Uspekhi*, vol. 17, n° 2,.
<https://doi.org/10.1070/PU1974v017n02ABEH004332>
- [19] Rinaldi, C. (2002) «Continuum modeling of polarizable systems,» Massachusetts Institute of Technology, p. 228,.
- [20] Cunha, F. y Rosa, A. «The influence of dipolar particle interactions on the magnetization and the rotational viscosity of ferrofluids,» *The Physics of Fluids*, 2019.
- [21] Brenner, H. (1970) «Rheology of two-phase systems,» *Annual review of fluid mechanics*, vol. 2, pp. 137-176,.
<https://doi.org/10.1146/annurev.fl.02.010170.001033>
- [22] Shliomis, M. (1972) «Effective Viscosity of Magnetic Suspensions,» *Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics*, vol. 34, p. 1291,
<https://doi.org/10.1143/JPSJ.59.111>
- [23] Martsenyuk, M.; Raikher, Y. y Shliomis, M. (1974) «On the Kinetics of Magnetization of Ferromagnetic Particle Suspension,» *Soviet Physics JETP*, vol. 38, pp. 413-416,.
http://www.jetp.ras.ru/cgi-bin/dn/e_038_02_0413.pdf

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

- [24] Shliomis, M. (2001) «Ferrohydrodynamics: testing a third magnetization equation,» Physical Review E, vol. 64, n° 6, p. 4,. <https://doi.org/10.1021/ie060657e>
[10.1103/PhysRevE.64.060501](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.64.060501)
- [25] Rosensweig, R.E. (2007) «Stress Boundary-Conditions in Ferrohydrodynamics,» Industrial & Engineering Chemistry Research, vol. 46, n° 19,.
<https://doi.org/10.1021/ie060657e>
- [26] Chaves, A. y Rinaldi, C. (2014) «Interfacial stress balances in structured continua and free surface flows in ferrofluids,» Physics of Fluids, vol. 26,.
<https://doi.org/10.1063/1.4869856>
- [27] Condiff, D.W. y Dahler, J. (1964) «Fluid Mechanical Aspects of Antisymmetric Stress,» Phys. Fluids, vol. 7, pp. 842-854,. <https://doi.org/10.1063/1.1711295>
- [28] Contreras-Mateus, D. Ariza-León, E. y Chaves-Guerrero, A. (2024) «Flow of ferrofluid within a channel driven by a rotating magnetic field: Implications of surface magnetic stresses and magnetic body couples,» Physics of Fluids, vol. 36,.
<https://doi.org/10.1063/5.0232461>
- [29] Moskowitz, R. y Rosensweig, R. (1967) «Nonmechanical torque driven flow of a ferromagnetic fluid by an electromagnetic field,» Appl. Phys. Lett., vol. 11, pp. 301-303,.
<https://doi.org/10.1063/1.1754952>
- [30] Zaitsev, V. y Shliomis, M. (1969) «Entrainment of ferromagnetic suspension by a rotating field,» Applied Mechanics and Technical Physics, vol. 10, pp. 696-700,.
<https://doi.org/10.1007/BF00907424>

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

- [31] Brown, R. y Horsnell, T. (1969) «Wrong way round,» *Electrical Review*, vol. 184, n° 7, p. 235,.
- [32] Glazov, O. (1983) «Motion of a ferrosuspension under a combination of rotating and steady magnetic fields,» *Magneto hydrodynamics*, vol. 19, n° 3, pp. 255-258,.
- [33] Kagan, I. y Rykov, V. (1973) «Flow of a dielectric ferromagnetic suspension in a rotating magnetic field,» *Magneto hydrodynamics*, vol. 9, n° 2, pp. 258-261,.
- [34] Shliomis, M.; Lyubimova, T. y Lyubimov, D. (1988) «Ferrohydrodynamics: An essay on the progress of ideas,» *Chemical Engineering Communications*, vol. 67,.
<https://doi.org/10.1080/00986448808940389>
- [35] Pshenichnikov, A. Lebedev, A. y Shliomis, M. (2000) «On the rotational effect in nonuniform magnetic fluids,» *Magneto hydrodynamics*, vol. 36, n° 4, pp. 339-346.
- [36] Rosensweig, R.; Popplewell, J. y Johnston, R. (1990) «Magnetic fluid motion in rotating field,» *Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 85, pp. 171-180,.
[https://doi.org/10.1016/0304-8853\(90\)90046-S](https://doi.org/10.1016/0304-8853(90)90046-S)
- [37] Rinaldi, C.; Lee, J.H.; Rosenthal, A.; Franklin, T. y Zahn, M. (2008)
«Ferrohydrodynamics in Time-Varying Magnetic Fields,» *International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE)*, pp. 155-160,.
<https://doi.org/10.1115/IMECE2002-32275>
- [38] Rosenthal, A.; Rinaldi, C.; Franklin, T. y Zahn, M. (2004) «Torque Measurements in Spin-Up Flow of Ferrofluids,» *Fluids Engineering*, pp. 198-205,.
<https://doi.org/10.1115/1.1669030>

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

- [39] Rinaldi, C.; Gutman, F.; Zahn, M.; He, X. y Rosenthal, A. (2005) «Torque measurements on ferrofluid cylinders in rotating magnetic fields,» *Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 289, pp. 307-310. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2004.11.087>
- [40] Chaves, A.; Rinaldi, C.; Elborai, S.; He, X. y Zahn, M. (2006) «Bulk Flow in Ferrofluids in a Uniform Rotating Magnetic Field,» *Physical Review Letters*, vol. 96,. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.96.194501>
- [41] Chaves, A.; Gutman, F. y Rinaldi, C. (2007) «Torque and Bulk Flow of Ferrofluid in an Annular Gap Subjected to a Rotating Magnetic Field,» *Fluids Eng.*, pp. 412-422,. <https://doi.org/10.1115/1.2567918>
- [42] Chaves, A.; Zahn, M. y Rinaldi, C. (2008) «Spin-up flow of ferrofluids: Asymptotic theory and experimental measurements,» *Physics of Fluids*, vol. 20,. <https://doi.org/10.1063/1.2907221>
- [43] Sánchez, J.H. y Rinaldi, C. (2010) «Magnetoviscosity of dilute magnetic fluids in oscillating and rotating magnetic fields,» *Physics of Fluids*, vol. 22,. <https://doi.org/10.1063/1.3370119>
- [44] Chaves, A.; Torrez-Diaz, I. y Rinaldi, C. (2010) «Flow of ferrofluid in an annular gap in a rotating magnetic field,» *Physics of Fluids*, vol. 22,. <https://doi.org/10.1063/1.3483598>
- [45] Torrez-Díaz, I y Rinaldi, C. (2011) «Ferrofluid flow in the annular gap of a multipole rotating magnetic field,» *Physics of Fluids*, vol. 23,. <https://doi.org/10.1063/1.3611027>

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

- [46] Chaves, A.; Rinaldi, C.; Elborai, S.; He, X. y Zahn, M. (2006) «Bulk flow in ferrofluids in a uniform rotating magnetic field.,» *Physical Review Letters*, vol. 96., <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.96.194501>
- [47] Clinton, L. y Zahn, M. (2001) «A Two-Phase Spherical Electric Machine for Generating», Estados Unidos: Massachusetts Institute of technology.
- [48] Khushrushahi, S. y Zahn, M. (2011) «Ultrasound velocimetry of ferrofluid spin-up flow measurements using a spherical coil assembly to impose a uniform rotating magnetic field.,» *Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 323, n° 10, pp. 1302-1308., <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2010.11.035>
- [49] Torres-Días, I.; Rinaldi, C.; Khushrushahi, S. y Zahn, M. (2012) «Observations of ferrofluid flow under a uniform rotating magnetic field in a spherical cavity.,» *Appl. Phys.*, vol. 111., <https://doi.org/10.1063/1.3675153>
- [50] Shliomis, M.I. (2021) «How a rotating magnetic field causes ferrofluid to rotate.,» *Phys. Rev. Fluids*, vol. 6., <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.6.043701>
- [51] Salas, G.; Casado, C.; Teran, F.; Miranda, R.; Carlos, S. y Puerto-Morales, R. (2012) «Controlled synthesis of uniform magnetite nanocrystals with high-quality properties for biomedical applications.,» vol. 22, n° 39, p. 210, [10.1039/c2jm34402e](https://doi.org/10.1039/c2jm34402e).
- [52] Jin, J.; Ohkoshi, S. y Hashimoto, K. (2004) «Giant Coercive Field of Nanometer-Sized Iron Oxide.,» vol. 16, n° 1, pp. 48-51., <https://doi.org/10.1002/adma.200305297>

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

- [53] Gich, M.; Roig, A.; Taboada, E.; Molins, E.; Bonafos, C. y Snoeck, E. (2007) «Stabilization of metastable phases in spatially restricted fields: the case of the Fe₂O₃ polymorphs,» *Faraday Discussions*, vol. 136. <https://www.doi.org/10.1039/B616097B>
- [54] Popovici, M.; Gich, M.; Nižňanský, D.; Roig, A.; Savii, C.; Casas, L.; Molins, E.; Zaveta, K.; Enache, C.; Sort, J.; de Brion, S.; Chouteau, G. y Nogués, J. (2004) «Optimized Synthesis of the Elusive ε-Fe₂O₃ Phase via Sol–Gel Chemistry,» *Chemistry of Materials*,. <https://doi.org/10.1021/cm048628m>
- [55] Estévez, M.; Cicúendez, M.; Crespo, J.; Serrano-López, J.; Colilla, M.; Fernández-Acevedo, C.; Oroz-Mateo, T.; Rada-Leza, A.; González, B.; Izquierdo-Barba, I. y Valler-Regí, M. (2023) «Large-scale production of superparamagnetic iron oxide nanoparticles by flame spray pyrolysis: In vitro biological evaluation for biomedical applications,» *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 650, pp. 560-572,. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2023.07.009>
- [56] Latikka, M.; Backholm, M.; Timonen, J. y Ras, R. (2018) «Wetting of ferrofluids: Phenomena and control,» *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, vol. 36, pp. 118-129, . <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2018.04.003>
- [57] Kole, M. y Khandekar, S. (2021) «Engineering applications of ferrofluids: A review,» *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, p. 537,. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168222>
- [58] Oehlsen, O.; Cervantes-Ramírez, S.; Cervantes-Avilés, P. y Medina-Velo, L. (2022) «Approaches on Ferrofluid Synthesis and Applications: Current Status and Future Perspectives,» *ACS Omega*,. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c05631>

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

- [59] Yang, W.; Zhang, Y.; Yang, X.; Sun, C. y Chen, Y. (2022) «Systematic analysis of ferrofluid: a visualization review, advances engineering applications, and challenges,» Journal of Nanoparticle Research, vol. 24, n° 102,. <http://dx.doi.org/10.1007/s11051-022-05477-5>
- [60] Philip, J. (2023) «Magnetic nanofluids (Ferrofluids): Recent advances, applications, challenges, and future directions,» Advances in Colloid and Interface Science, vol. 311,. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2022.102810>
- [61] Joseph, A. y Mathew, S. (2014) «Ferrofluids: Synthetic Strategies, Stabilization, Physicochemical Features, Characterization, and Applications,» ChemPlusChem, vol. 79, n° 10, pp. 1382-1420,. <https://doi.org/10.1002/cplu.201402202>

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

Apéndices**Apéndice A. Síntesis de las nanopartículas magnéticas y respuesta de los ferrofluidos al campo magnético.**

La obtención de estos fluidos magnéticos requiere de la síntesis de las nanopartículas por procedimientos de “Top-Down” comenzando con un patrón a gran escala reduciendo a nanoescala y “Bottom-Up” empezando desde una estructura nanométrica; donde a su vez se subdividen mediante dos rutas: físicas o químicas. En la figura 14 podemos observar algunos métodos físicos Bottom-up donde cuentan los procesos de: descomposición química de vapor (CVD) por descomposición térmica [51], deposición por láser pulsado (PLD) [52]; y por técnicas Top-Down tenemos: ablación laser-litografía [53] o molino de bolas. Mediante estos sistemas se obtienen un sustrato con alto grado de cristalinidad, pero con altos costos de producción y rendimientos muy bajos. En la figura 15 podemos ver algunas de las técnicas por síntesis química, por métodos Bottom-Up: sol-gel [54], pirólisis por pulverización [55]. Existen otras rutas de síntesis como son: por radiación, con métodos de radiación gama o microonda; y los métodos llamados “green síntesis”, implementando procesos biológicos y ambientales, mediante bacterias, hongos y levaduras.

Figura 14. *Métodos de síntesis físicos para la obtención de nanopartículas magnéticas. Bottom-Up: a) CVD por descomposición térmica, b) PLD. Top-Down: c) ablación laser-litografía, d) molino de bolas.*

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

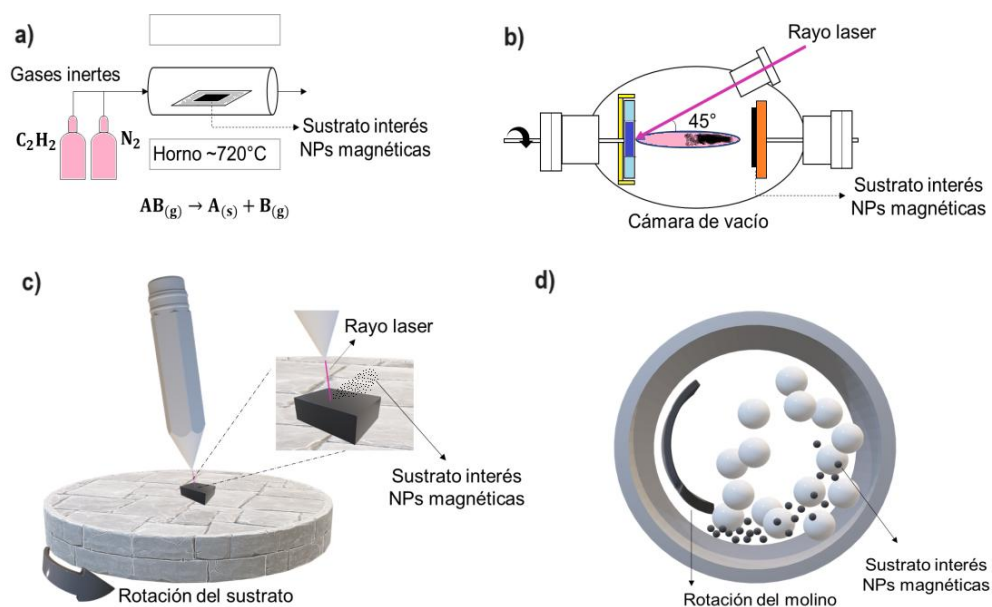
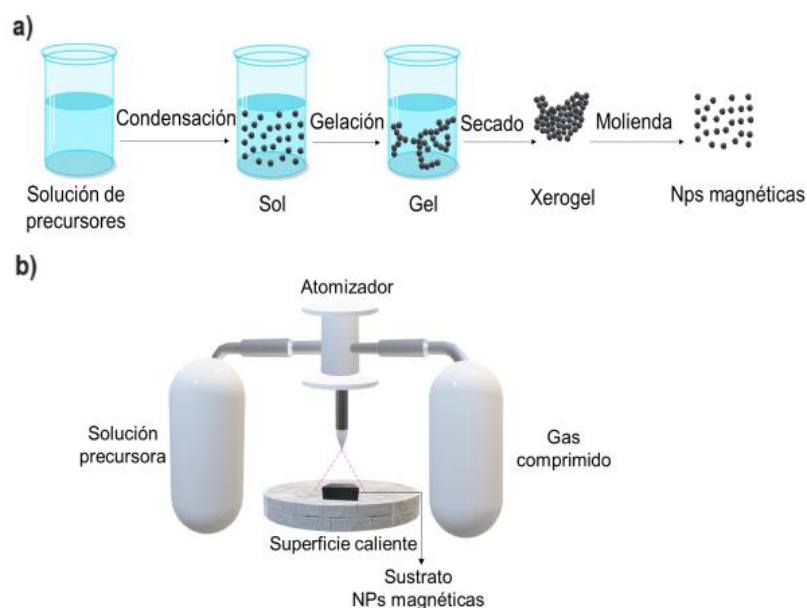


Figura 15. Métodos de síntesis químicos para la obtención de nanopartículas magnéticas. *Bottom-Up:* a) sol-gel, b) pirólisis por pulverización

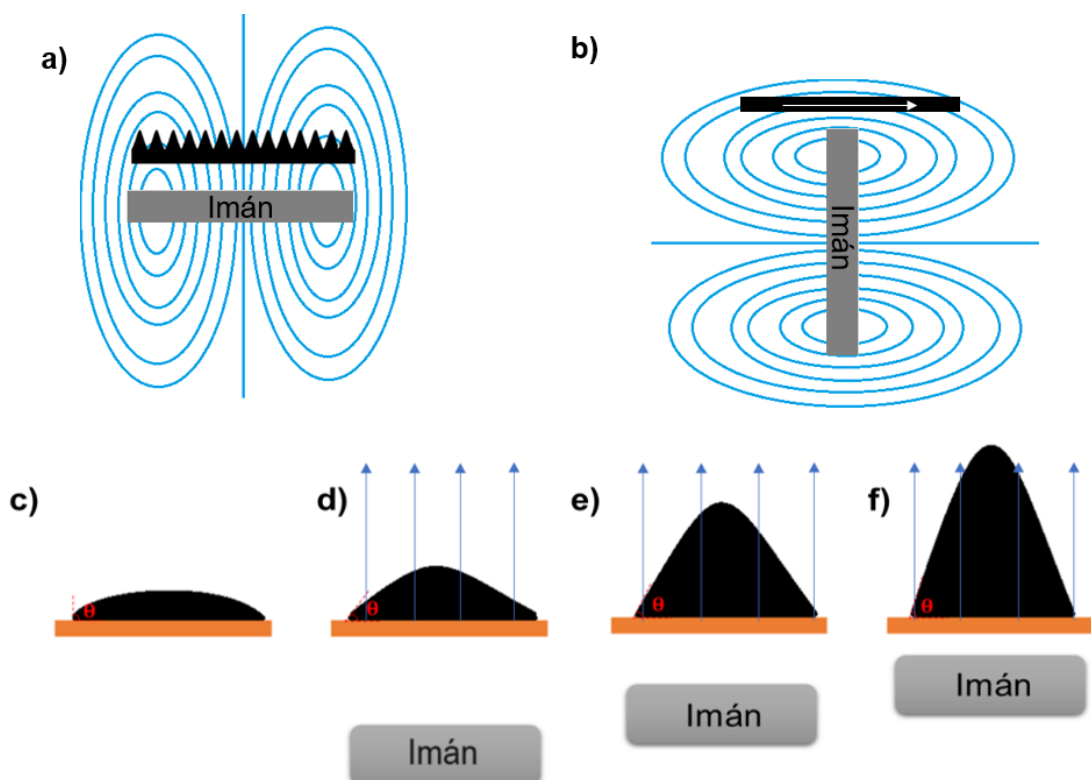


Cuando se le aplica un campo magnético, el primer fenómeno físico que se observa es que el fluido magnético es atraído por la magnetización tanto que la gravedad ya no importa demasiado,

FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

subiendo en forma de puntas en la dirección del campo. Al aumentar el flujo magnético, las líneas de campo se alejan yendo hacia arriba al igual que los picos, como se observa en la figura 16 c-f). Al girar la densidad de flujo magnético, los picos siguen el campo magnético hasta que las líneas del campo en el ferrofluido son horizontales y los picos no pueden formarse en horizontal [56]. Este es uno de los fenómenos que posee los fluidos magnéticos, y gracias esta excelente respuesta magnética, los ferrofluidos se convierten en un material único de gran interés para muchos investigadores con el fin de comprender la dinámica y sus propiedades fisicoquímicas.

Figura 16 Campo magnético aplicado a un ferrofluido: a) campo magnético ubicado verticalmente, en el ferrofluido se forman unos picos, b) cuando el campo magnético se ubica horizontalmente, ya no hay formación de picos. Intensidad del campo magnético a una gota de ferrofluido: a) no hay campo, b-f) a medida que se acerca el imán, el campo magnético se hace más intenso y los picos se hacen más pronunciados.



FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

Cada nanopartícula está compuesta por pocos átomos y cada una está constituida de un solo dominio y por eso se dice que son ferromagnéticas, es decir, los espines de sus electrones están en el mismo sentido y conservan una magnetización remanente. Cuando se agrupan las partículas, se genera un sistema desordenado con dominios aleatorios y los momentos magnéticos no interactúan unos con otros, comportándose como un paramagneto, donde los orbitales se alinean al campo magnético aplicado por encima de la temperatura de Curie (energía necesaria para romper el orden).

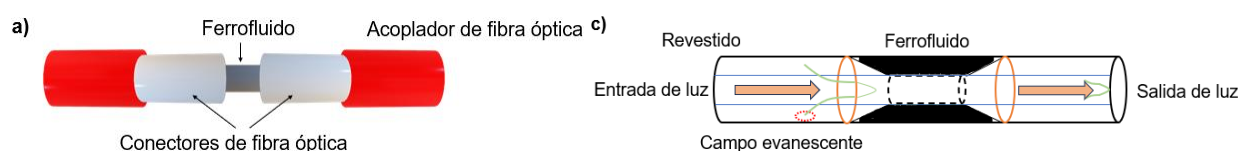
FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

Apéndice B. Aplicaciones de los ferrofluidos

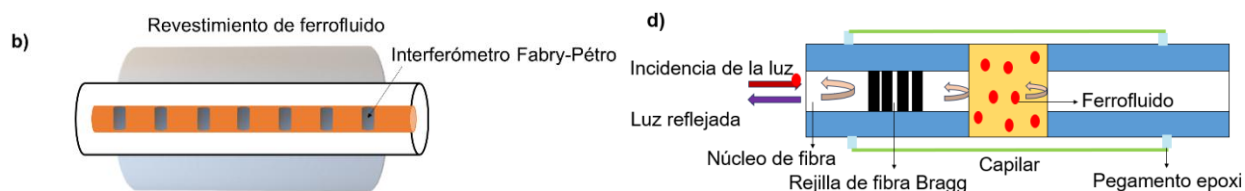
El primer ferrofluido fue sintetizado por S. Pappel en 1963 [4], y con el tiempo se han perfeccionado, mejorando las propiedades (magnéticas, tamaño de partícula, distribución de tamaño) y el tiempo de estabilidad de la suspensión, debido a la posibilidad de incidir en el comportamiento reológico de ferrofluidos por medio de campos magnéticos, el número de sus aplicaciones ha crecido casi exponencialmente en aplicaciones biomédicas e ingeniería [57].

En la disciplina de la biomedicina, los fluidos magnéticos tienen mucha influencia por sus propiedades de superparamagnetismo, respuesta a los campos magnéticos y bioafinidad, utilizados en las áreas de técnica de imágenes, biosensores y administración de medicamentos en un sitio específico [58]. En la disciplina de los biosensores de campo magnéticos tienen ventajas que sobresalen sobre los demás debió a la resistencia a la corrosión, protección contra la interferencia electromagnética y ausencia al desgaste. El diseño se basa de acuerdo con el cambio del índice de refracción (sensor LPFG “rejilla de fibra de periodo largo” y FPI “interferómetro Fabry-Péto”), la transmisión de luz, de doble parámetro (medición del campo y temperatura) como se puede ver como esquemáticamente en la figura 17.

Figura 17 Biosensores: a) sensor LPFG, b) sensor FPI, c) transmisión de luz, d) de doble parámetro.

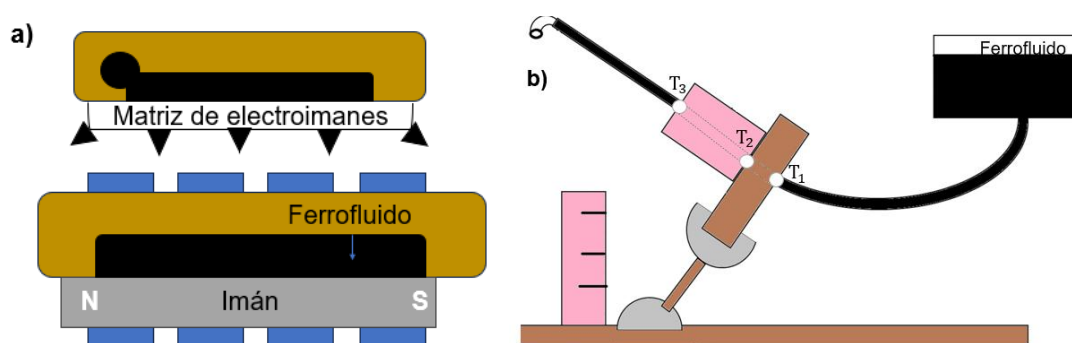


FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS

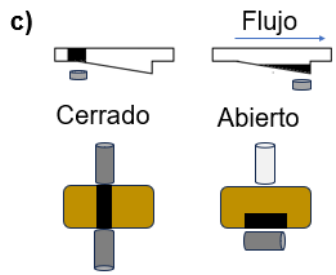


En el área de la ingeniería, la tecnología más ambigua son los sellos de ferrofluidos, que utiliza un campo para fijar el fluido magnético a la pieza que se va a sellar, conocido comúnmente como sellador rotativo. Gracias al fuerte magnetismo que posee los ferrofluidos, estos se emplean también en bombas usando como fuerza impulsora el electromagnetismo (usando electroimanes para lograr el transporte de algún fluido), y por acción magnetotérmica (empleando ferrofluidos que se ajusten al campo magnético y al gradiente de la temperatura); de manera similar estos fluidos magnéticos mediante campos magnéticos pueden abrir y cerrar tuberías, actuando como válvulas [59]. Estas aplicaciones se pueden ver en la figura 18.

Figura 18 a) sistema de una bomba electromagnética, b) bomba diseñada con el principio de acción termomagnética, c) válvulas usando ferrofluidos



FLUJO DE FERROFLUIDOS INDUCIDO POR CAMPOS MAGNETICOS



En el campo de la ingeniería térmica, encontramos aplicaciones como almacenamiento energía, por movimiento chapoteante, como manantial líquido, o lubricante; ver figura 19. También se emplean en transformadores de potencia y en intercambiadores de calor, con el fin de eliminar o aislar el calor, y en la transferencia de calor por convección monofásica (ferrofluido) y bifásica (aire-ferrofluido) [60]. Aún existen desafíos que limitan la aplicación de los ferrofluidos, una de ellas es entender el micromecanismo y la segunda mejorar el rendimiento [61].

Figura 19 Recolectores de energía que utilizan ferrofluidos como: a) manantial líquido, b) movimiento chapoteante, c) lubricador. d) intercambio de calor empleando fluido magnético

