



COMPORTAMIENTO DE LA ATRACCIÓN ENTRE UN LÍQUIDO FERROMAGNÉTICO Y UN CAMPO MAGNÉTICO DEPENDIENDO DE LA TEMPERATURA DEL LÍQUIDO

CELINE ROJAS SCHRÖTER, RODRIGO PONCE DÍAZ

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey
Av. Eugenio Garza Sada 2501 Sur, Tecnológico
64849 Monterrey, N.L. México

(Recibido 13 de agosto de 2020, para publicación 7 de marzo de 2022)

Resumen – Se realizó un análisis experimental con el objetivo de identificar si existe un cambio en la atracción magnética entre un líquido ferromagnético y un campo magnético estable, dependiendo de la temperatura del líquido. El líquido ferromagnético analizado se sintetizó como una suspensión coloidal de partículas ferromagnéticas de ferrita de hierro Fe_3O_4 (II, III) (98%) en aceite de motor (Castrol Magnatec 20W-50) como líquido portador. Este experimento se llevó a cabo analizando 15 temperaturas para el fluido, dentro de un intervalo entre -11°C y 90°C . Los resultados de esta investigación muestran un efecto directo entre la fuerza de atracción del fluido y la inducción magnética debido al cambio de temperatura del líquido. Identificamos una tendencia decreciente de la fuerza de atracción al aumentar la temperatura del líquido que puede ser descrito con tres patrones de comportamiento: el primero entre -11°C a 24°C , el segundo entre 24°C a 35°C y el tercero entre 35°C a 90°C . En base a los resultados analizados, esta investigación expone la posibilidad de explicar este comportamiento como consecuencia de que la saturación magnética no sea únicamente una constante del material, sino dependa también de la temperatura del mismo.

Palabras clave – Líquido ferromagnético, atracción magnética, cambio de temperatura.

1. INTRODUCCIÓN

La idea de un combustible magnético para ser manipulado bajo gravedad cero dentro de un cohete de la NASA, es la primera aparición del líquido ferromagnético [1], un concepto que introdujo el término ferrohidrodinámica por primera vez en una publicación científica en 1963 por Neuringer y Rosensweig [2]. Este fluido magnético despertó investigaciones hasta 1999, año en el que se reportaron 178 artículos científicos con relación al nuevo nanofluido¹ [3]. Aun cuando la propuesta inicial no se llevó a cabo, 20 toneladas anuales de este líquido son producidas para diversas aplicaciones por la compañía que patentó esta tecnología: Ferrotec Corporation [1, 3].

Entre las aplicaciones del líquido ferromagnético, se encuentran: separación de materiales [1, 3], sellos dinámicos, dispositivos acústicos, impresoras [1, 6] y por sus propiedades para disipar calor se utiliza en la generación de energía nuclear, ventanas de doble panel, enfriamiento y calentamiento de edificios, colectores solares, enfriamiento electrónico [4-6] e incluso en aplicaciones médicas para atacar células cancerígenas [5, 6].

Debido a la falta de información que exponga explícitamente la relación entre las propiedades magnéticas y rangos de temperatura del líquido y las numerosas aplicaciones de este fluido, surge la siguiente pregunta de investigación como objetivo del presente trabajo, determinar si existe una relación entre las propiedades magnéticas del líquido y un cambio en su temperatura.

¹ Anexo.1: Gráfica del número de publicaciones sobre los líquidos ferromagnéticos entre 1968 y 2001 [3].

1.1. Principios del magnetismo

La teoría moderna del magnetismo acepta que el magnetismo “es una propiedad de la carga en movimiento” [7], resultado del movimiento orbital de los electrones alrededor del núcleo del átomo [7]. Estas partículas con masa y carga eléctrica crean un dipolo magnético² llamado magnetón o imán molecular [8]. Los imanes moleculares se concentran en grupos llamados dominios, donde los ejes magnéticos de los átomos, al apuntar en la misma dirección, crean momentos magnéticos. Estas agrupaciones alineadas generan un polo norte y un polo sur, lo que se conoce como campo magnético [7-9]. Dependiendo del tamaño de los dominios y su nivel de ordenamiento se puede clasificar su nivel de magnetismo. Esta medida de magnetismo se conoce como la permeabilidad, “capacidad de un medio para establecer líneas de flujo magnético” [7]. Al comparar la permeabilidad de un material contra la correspondiente al vacío ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} Tm A^{-1}$), es posible clasificar a los materiales magnéticos, razón conocida como permeabilidad relativa [7]:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (1)$$

Tres tipos de materiales pueden ser clasificados a partir de esta razón:

- Diamagnéticos: μ_r ligeramente menor a μ_0
- Paramagnéticos: μ_r ligeramente mayor a μ_0
- Ferromagnéticos: μ_r cientos hasta miles de veces mayor a μ_0 [7]

Son estos últimos los que conocemos como materiales magnéticos, compuestos por al menos uno de los siguientes materiales o sus aleaciones: hierro, níquel y cobalto.

1.2. Líquido ferromagnético

La ciencia que estudia la deformación de sustancias debido a fuerzas externas es conocida como reología [10]. Dentro de esta rama podemos identificar la descripción del flujo magnético denominado ferrohidrodinámica, como la mecánica del movimiento de fluidos influenciados por una fuerza magnética [3,11,12]. Después de consultar diferentes fuentes, se puede definir a un líquido ferromagnético como: una suspensión coloidal de partículas ferromagnéticas suspendidas en un líquido portador [2, 4, 5, 6, 10, 13, 14, 15]. Las fuerzas que describen el comportamiento de un líquido ferromagnético son [3, 12, 13]:

1. Magnetismo:

$$E_M = \mu_0 MBV \quad (2)$$

2. Gravedad

$$E_G = \Delta\rho VgL \quad (3)$$

3. Fuerza Intermolecular

- Capilaridad
- Energía térmica

$$E_T = kT \quad (4)$$

donde M es la saturación magnética³, B fuerza del campo magnético, $V = \pi d^3(6m)^{-3}$ volumen de una partícula esférica de diámetro d , $\Delta\rho$ diferencia de densidad al líquido portador, $g = 9.81ms^{-1}$ fuerza gravitacional de la tierra, L elevación en el campo gravitacional, $k = 1.38 \times 10^{-23} NmK^{-1}$ constante de Boltzmann⁴, T temperatura en Kelvin [3,12].

Un líquido ferromagnético se comporta como cualquier fluido en la ausencia de un campo magnético fuerte, pero si la fuerza del peso (2.gravedad) y la influencia de la tensión superficial (3.capilaridad) son compensadas por un campo magnético externo (1.magnetismo), entonces los dipolos magnéticos de las

² Polos opuestos y de igual magnitud [9].

³ Máxima magnetización alcanzada por un material [3].

⁴ Relación entre la energía y la temperatura absoluta [24].

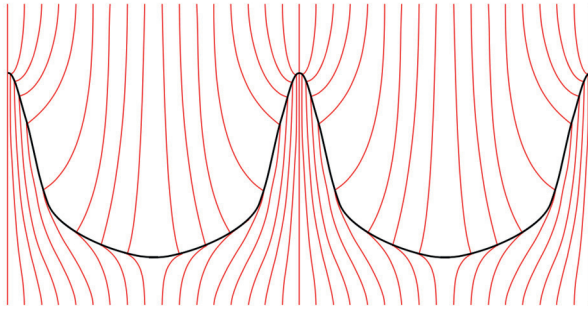


Fig. 1. Estructura que genera un líquido ferromagnético bajo la influencia de un campo magnético [13].

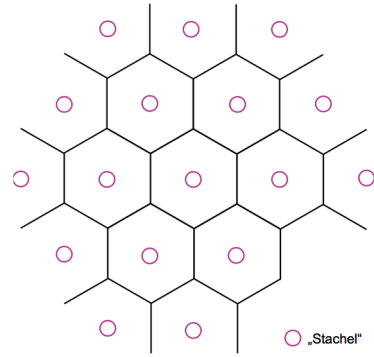


Fig. 2. Representación del patrón hexagonal que forma el líquido ferromagnético al interactuar con una fuerza magnética, donde los círculos representan las “espigas” [13].

partículas ferromagnéticas del líquido se alinearán con el campo magnético. Visualmente el fluido formará “espigas” separadas por “valles” [3, 13].

Las líneas de flujo del campo magnético externo se concentran en las “espigas”; estas aumentan en número mientras la distancia entre ellas se reduce al aumentar la fuerza magnética inducida. A esta inestabilidad de la superficie se le conoce como Inestabilidad de Rosensweig [13, 16].

En cuanto a las propiedades del líquido en relación con la temperatura podemos tomar en cuenta únicamente cuatro puntos:

1. Como cualquier fluido, este es afectado por el movimiento Browniano: movimiento dinámico de las nanopartículas en un líquido [17], que previene la aglomeración de las mismas [12].
2. Se ha investigado sobre el movimiento Browniano para predecir la conductividad termal de nanofluidos [17], tomando en cuenta que dentro de las amplias aplicaciones que tienen los líquidos ferromagnéticos [1-6] se ha mencionado una gran propiedad para conducir calor denominada termomagnetización [4-6].
3. Por encima de la temperatura de Curie⁵ T_C , el líquido no puede ser magnetizado [5].
4. La única relación que pude encontrar entre la energía termal y magnética es la siguiente:

$$\frac{\text{Energía termal}}{\text{Energía magnética}} = \frac{kT}{\mu_0 MBV} \geq 1 \quad (5)$$

indicando que la energía térmica debe ser mayor a la magnética para una desmagnetización [12].

2. DISEÑO EXPERIMENTAL

El objetivo de esta investigación es la medición del comportamiento de la fuerza de atracción entre un líquido ferromagnético y un campo magnético, para lo que se utilizaron las siguientes herramientas de medición:

1. Termopar (Fluke 52II) con un error de lectura de $\pm 0.1^\circ\text{C}$, para medir la temperatura del líquido (V_I).
2. Dinamómetro digital (PASCO PS-2104 con interface PASPORT), con un error de lectura de ± 0.10 N para medir la fuerza de atracción (V_D).

Esto significa que lo primero que se abordó para poder contestar a nuestra pregunta de investigación fue la elaboración de ambos componentes.

⁵ Temperatura a la cual un material pierde su magnetismo [23].

2.1. Síntesis del líquido ferromagnético

Lo primero que se intentó, fue sintetizar magnetita a partir de una neutralización. Se prepararon las soluciones: 2M FeCl₂ 1M FeCl₃ y 0.5M NH₄OH. Mezclando FeCl₂ en 1 ml de agua y FeCl₃ en 4 ml de agua y agregando 1.93 ml de Hidróxido de Amonio (25%)⁶ en 50 ml de agua por goteo a lo largo de 5 min, se obtuvo la magnetita como un precipitado negro. Se decantó la magnetita con la ayuda de un imán y se agregó 1 ml de Hidróxido de Tetrametilamonio (25%), que funcionó como un surfactante para la solución [18]. Esta mostró propiedades magnéticas en la presencia de un campo magnético, pero no presentó Inestabilidad de Rosensweig. Por lo tanto, se optó por una suspensión coloidal de Fe₃O₄(II, III) (98%), suspendida en un aceite de motor (Castrol Magnatec 20W-50) portador. Los resultados fueron positivos ya que al estar suspendidas las partículas de hierro en aceite no sufrían la tensión superficial del agua que el surfactante Hidróxido de Tetrametilamonio ocasionaba, al tener una concentración del 25% disuelto en agua. La suspensión coloidal sintetizada presentó Inestabilidad de Rosensweig.⁷ Se utilizó el mismo líquido ferromagnético durante toda la experimentación, ya que existe una relación entre el tamaño de las partículas y la inducción magnética [12]. Esta experimentación se llevó a cabo en el laboratorio TEMP⁸ de la Universidad de California, San Diego, EUA (UCSD), durante el programa ENLACE en el verano 2018.

2.2. Solenoide de níquel

El líquido ferromagnético sintetizado se colocó en un frasco de vidrio con el dinamómetro digital (dónde se desprecia la fuerza del peso de la masa del frasco y líquido de 4.50 g) sobre el polo sur del campo magnético generado por un solenoide, midiendo así la fuerza de atracción entre ambos componentes.

Un solenoide es un alambre enrollado en forma helicoidal o de espiras que al conectarlo con una corriente eléctrica se comporta de la misma manera que un imán de barra, generando líneas de flujo magnético entre un polo norte y sur [7, 19]. Se utilizó un solenoide para generar el campo magnético, ya que este se puede incrementar con:

- El número de espiras, al contribuir cada una con la intensidad magnética [7, 19].
- Incluir un núcleo ferromagnético en el interior del solenoide puede aumentar mil veces más la fuerza magnética [19].
- Además, su fuerza magnética se puede calcular con [7, 19]:

$$\vec{B} = \frac{\mu NI}{L} \quad (6)$$

donde \vec{B} representa la inducción magnética, μ la permeabilidad del núcleo, I la corriente en amperes y L la longitud del solenoide en metros.

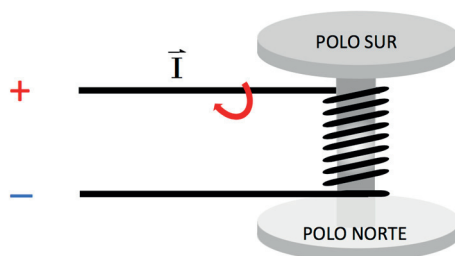


Fig. 3. Se determina el polo sur del solenoide por la dirección de la corriente.

⁶ Se agregó 1.95ml de Hidróxido de Amonio y no 1.5ml, ya que se trabajó con una concentración del 25% y no del 29% como en la investigación consultada.

⁷ Anexo.2: Evidencia de la solución sintetizada.

⁸ Thermal Energy Materials and Physics.

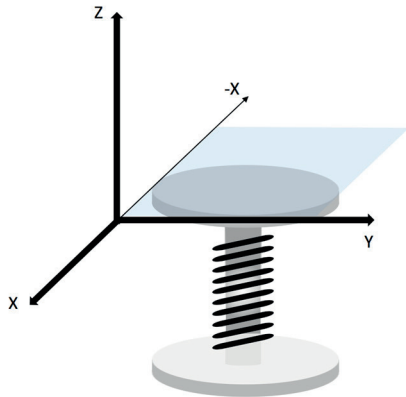


Fig. 4. Dirección del flujo magnético en el polo sur del solenoide.

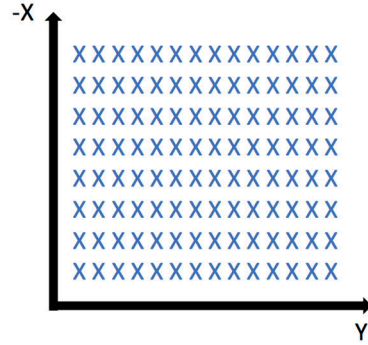


Fig. 5. Eje sobre el cual el fluido interactúa con el campo magnético generado por el solenoide.

- A Líquido Ferromagnético
- B Solenoide
- C Dinamómetro
- D Termopar
- E Fuente de Energía
- F Soporte universal
- G Computadora (para el registro de datos del dinamómetro)

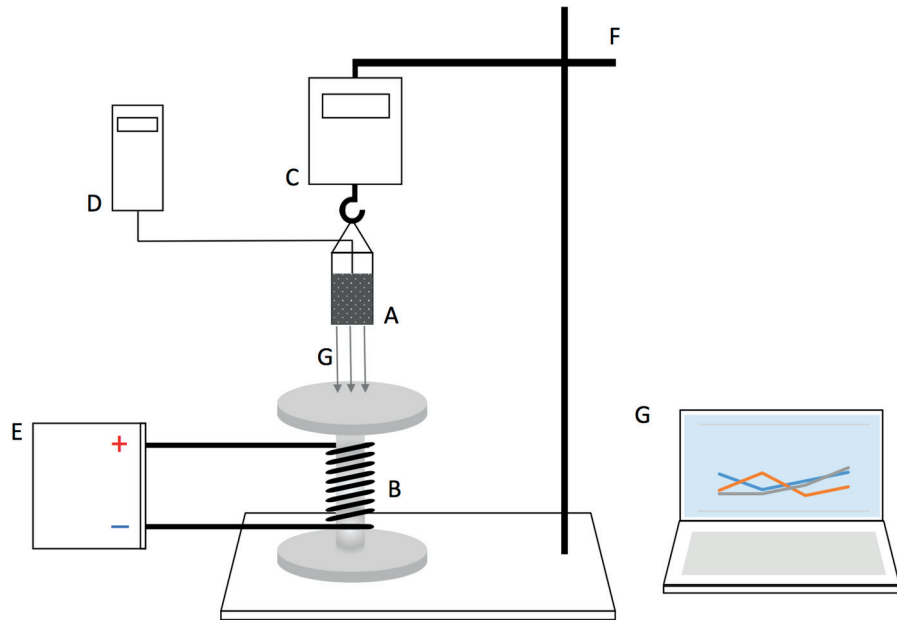


Fig. 6. Representación gráfica del diseño experimental.

Se utilizó un solenoide con 845 espiras de cobre con una resistividad teórica de $1.7 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ [20] y una barra de níquel (99.5%) con una longitud de 0.097 m. Se utilizó níquel ya que es un material ferromagnético y tiene una permeabilidad relativa de $600 \mu_r$ [21].

La temperatura del líquido se registró durante todo el experimento con el termopar. Se realizaron tres intentos para las siguientes 15 temperaturas: -11°C , -0°C , 24°C , 30°C , 35°C , 40°C , 45°C , 50°C , 60°C , 65°C , 70°C , 75°C , 80°C , 85°C y 90°C , durante las cuales el dinamómetro registró la fuerza de atracción en Newtons cada 0.05 s (para minimizar el cambio de temperatura en el registro de datos durante cada intento) durante un periodo de 7.00 s.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para identificar un comportamiento entre los -11°C y 90°C se calculó un promedio para los valores de fuerza de atracción registrados entre los 4.00 s y 7.00 s por temperatura en la Tabla.1, incluyendo el error aleatorio. En esta tabla se puede ver una disminución de la fuerza de atracción con respecto al aumento de la temperatura del fluido. La temperatura más baja, de -11.0°C , presenta una fuerza de atracción de 4.80 N, mientras que la temperatura más alta, de 90.0°C , presenta una fuerza de atracción de 2.56 N.

El decremento de fuerza parece ser constante con respecto al incremento de temperatura: únicamente los registros de fuerza correspondientes a las temperaturas -5.0°C , 45.0°C y 85°C muestran un incremento de fuerza respecto a la temperatura anterior. Entre los -5.0°C y 45.0°C existe un incremento de 0.02 N y 0.03 N con un error aleatorio igualmente mayor al de la temperatura anterior, lo que se pudiera deber a un error en la experimentación del ± 0.1 N, mismo valor del error de lectura que presenta la herramienta de medición, por lo que se puede considerar entre el rango despreciable. De igual forma, la fuerza correspondiente a los 85°C presenta la misma variación menor al 0.1 N de fuerza con respecto a la temperatura anterior.

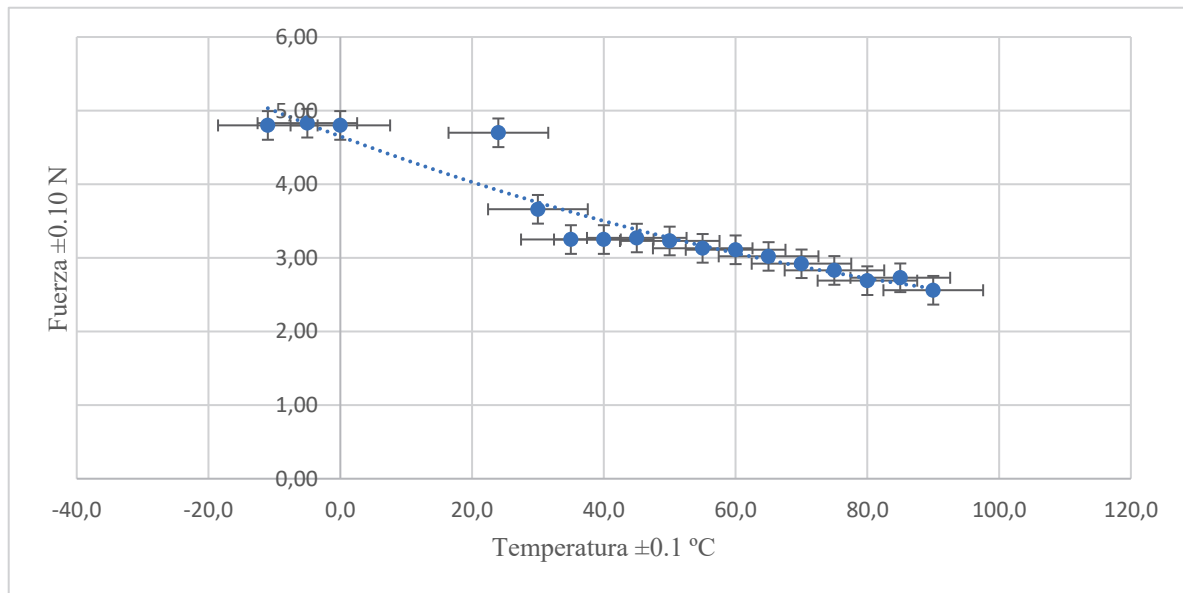
Tabla 1. Promedio de la fuerza de atracción magnética en Newtons ± 0.10 N, error aleatorio y porcentual por temperatura $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$.

Temperatura $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$	Fuerza ± 0.01 N	Error aleatorio	Error Porcentual %
-11.0	4.80	0.02	0.370
-5.0	4.83	0.06	1.25
0.0	4.80	0.04	0.820
24.0	4.70	0.2	4.26
30.0	3.66	0.03	0.820
35.0	3.25	0.03	1.03
40.0	3.25	0.02	0.710
45.0	3.27	0.03	1.01
50.0	3.23	0.04	1.15
55.0	3.13	0.03	0.850
60.0	3.11	0.02	0.640
65.0	3.02	0.03	0.950
70.0	2.92	0.02	0.850
75.0	2.83	0.03	1.01
80.0	2.69	0.02	0.700
85.0	2.73	0.02	0.740
90.0	2.56	0.03	1.16

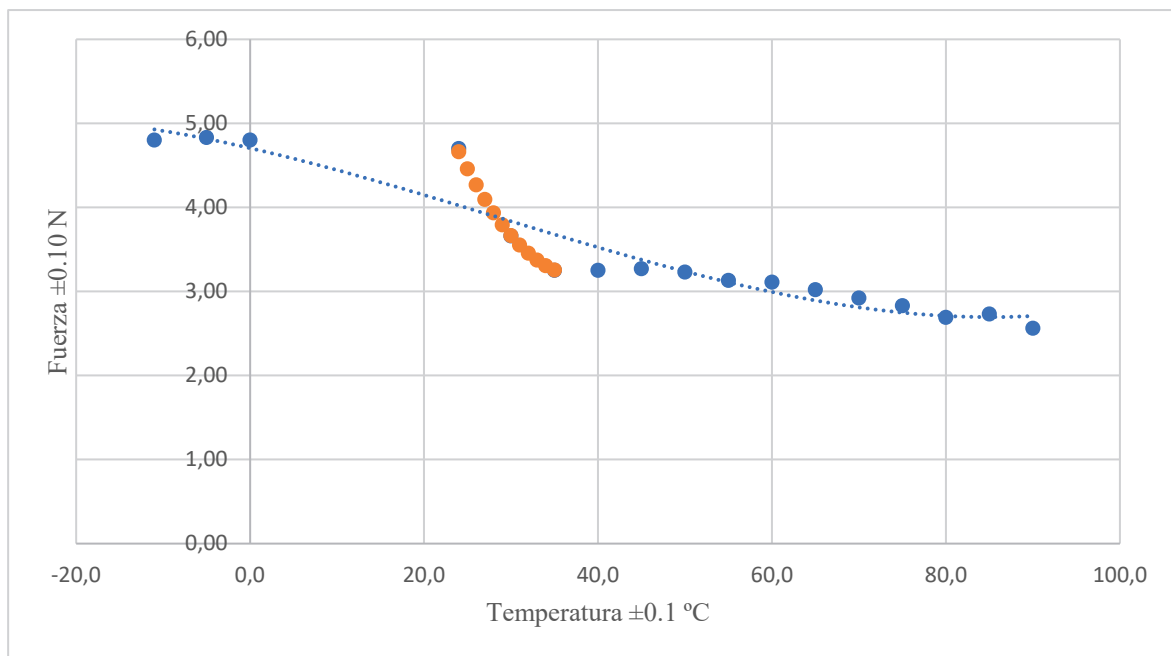
Si revisamos los errores aleatorios presentes en esta misma tabla, podemos ver que todos se encuentran por debajo del 0.1%, a excepción del valor correspondiente a los 40°C de 0.2%, siendo este porcentualmente menor al 5% con un valor del 4.26%, que pudiera deberse a un error en la experimentación. Todos los demás errores se encuentran alrededor del 1%.

En la Gráfica 1 podemos apreciar mejor la relación entre la temperatura del fluido y la fuerza de atracción con el campo magnético. Podemos observar el comportamiento decreciente analizado previamente, pero este no es constante, sin embargo, puede ser seccionado en tres intervalos como se representa en la Gráfica 2.

En la Gráfica 3 observamos que entre los 24.0°C y los 35.0°C se presenta un mayor decremento de la fuerza de atracción, con una línea de tendencia polinómica de segundo grado que se ajusta a la ecuación $F = 0.0083T^2 - 0.6217T + 14.838$ casi perfectamente con un $R^2 = 1$.

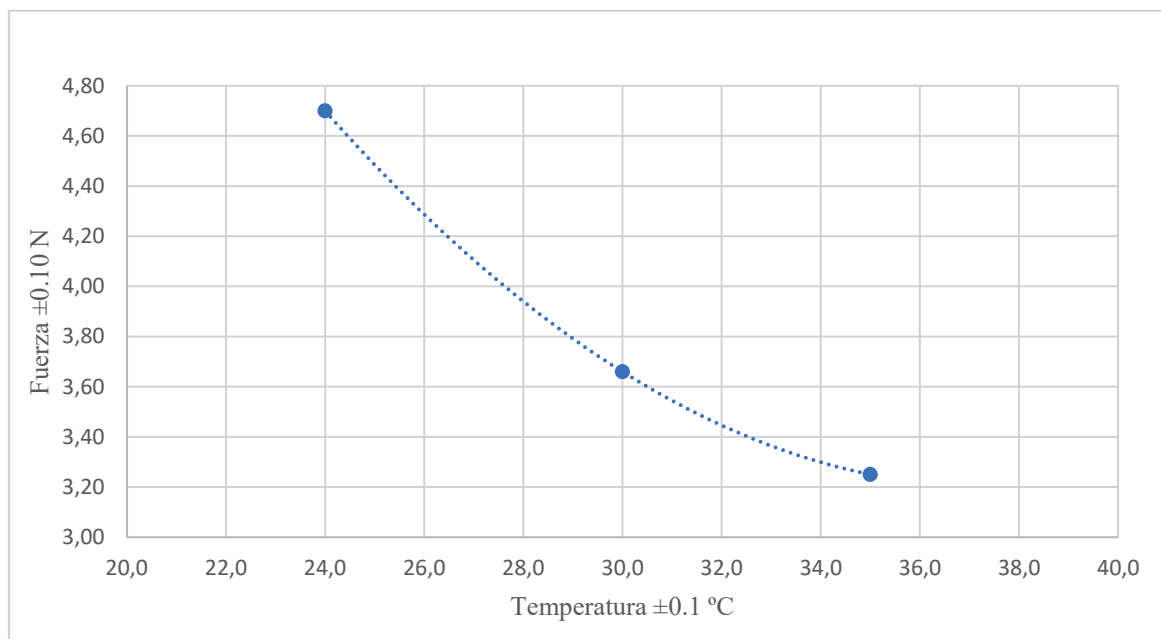


Gráfica 1. Relación entre el tiempo $\pm 0.05 \text{ s}$ y la fuerza de atracción $\pm 0.10 \text{ N}$ entre el líquido ferromagnético y el campo magnético por temperatura del líquido ferromagnético. Datos graficados de la Tabla.3 con una ecuación para la línea de tendencia de $F = 0.0001T^2 - 0.0334T + 4.651$ y una $R^2 = 0.9092$.

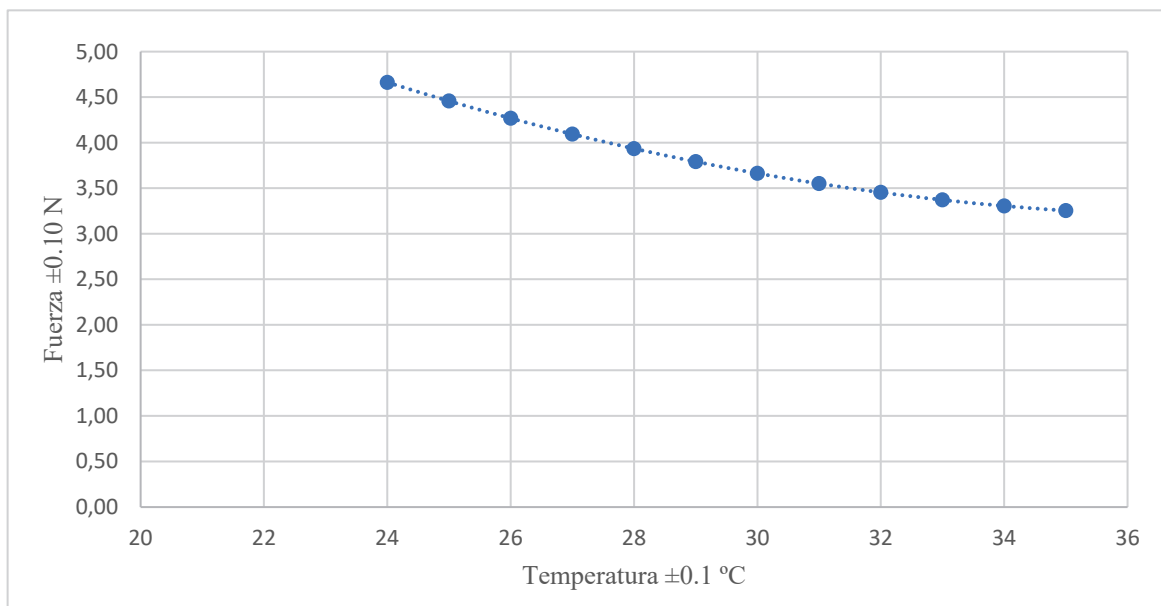


Gráfica 2. Relación entre el tiempo $\pm 0.05 \text{ s}$ y la fuerza de atracción $\pm 0.10 \text{ N}$ entre el líquido ferromagnético y el campo magnético entre -11°C y 90°C . Donde en naranja se muestran las temperaturas entre 24°C y 35°C calculadas a partir de la ecuación de la línea de tendencia $F = 0.0077T^2 - 0.5823T + 14.202$ con una $R^2 = 1$ y en azul las temperaturas registradas en la Gráfica.1.

Calculando a partir de la ecuación de esta gráfica los posibles valores entre 20°C y 35°C con un intervalo de 1°C y representando este resultado en la Gráfica 4, podemos ver una curva cóncava hacia arriba. Misma curva que podemos observar en la Gráfica 2 en color naranja, por encima de los datos calculados en la Tabla 3, para identificar el posible comportamiento de la fuerza en este intervalo.



Gráfica 3. Relación entre el tiempo ± 0.05 s y la fuerza de atracción ± 0.10 N entre el líquido ferromagnético y el campo magnético para las temperaturas entre 24°C y 35°C; con una ecuación para la línea de tendencia de $F = 0.0083T^2 - 0.6217T + 14.838$ y una $R^2 = 1$.



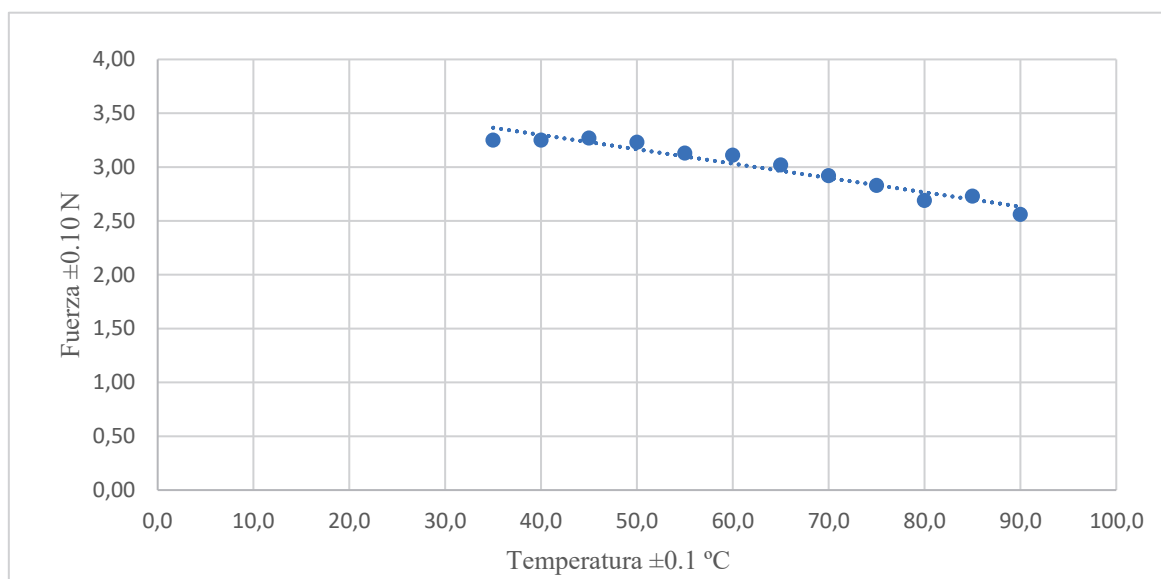
Gráfica 4. Relación entre el tiempo ± 0.05 s y la fuerza de atracción ± 0.10 N entre el líquido ferromagnético y el campo magnético para las temperaturas entre 24°C y 35°C calculadas a partir de la ecuación de la línea de tendencia $F = 0.0077T^2 - 0.5823T + 14.202$ con una $R^2 = 1$.

Si calculamos la razón a la cual pierde energía la fuerza de atracción entre los 24°C y 35°C, en la Tabla 2, vemos que lo hace con una razón de -0.136 N por 1°C, valor mayor a la cual se pierde fuerza entre los 35°C y 90°C, de -0.092 por 5°C.

De manera general podemos observar cómo el comportamiento de la fuerza contra la temperatura se secciona en tres intervalos: de -11°C a 24°C, de 24°C a 35°C y de 35°C a 90°C. El intervalo de 24°C a 35°C

Tabla 2. Fuerza ± 0.001 N calculada por grado Centígrado, entre los 24°C y los 35°C a partir de la ecuación de la línea de tendencia presente en la Gráfica 7. Fuerza promedio perdida por grado Celsius ± 0.001 N°C⁻¹ en este intervalo de temperatura.

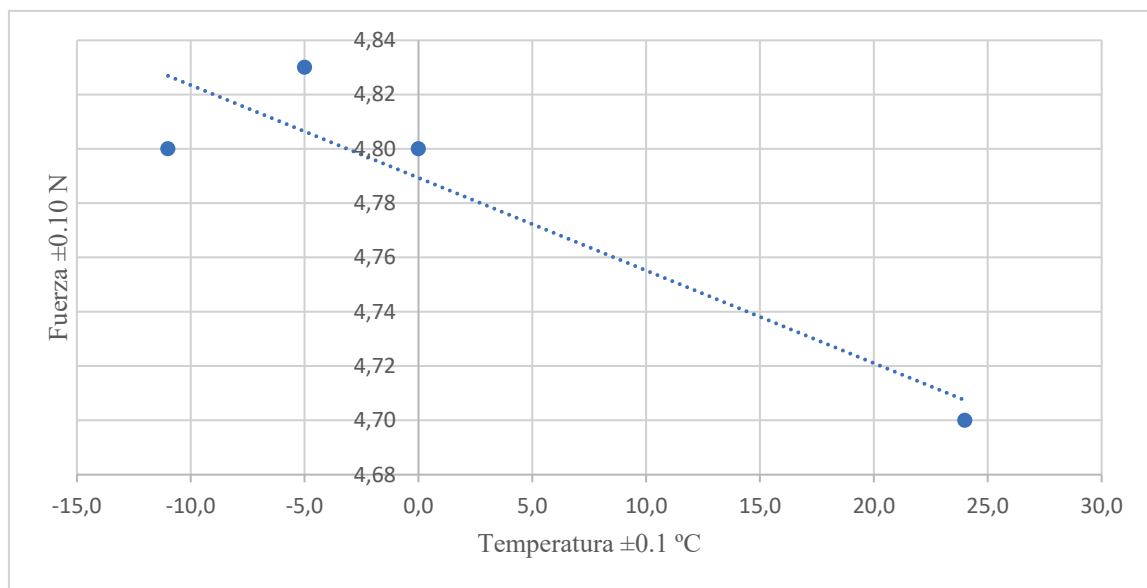
Temperatura ± 0.1 °C	Fuerza ± 0.001 N	Fuerza perdida por grado Celsius ± 0.001 N°C ⁻¹
24.0	4.662	
25.0	4.457	-0.205
26.0	4.267	-0.190
27.0	4.093	-0.174
28.0	3.934	-0.159
29.0	3.791	-0.143
30.0	3.663	-0.128
31.0	3.550	-0.113
32.0	3.453	-0.097
33.0	3.371	-0.082
34.0	3.305	-0.066
35.0	3.254	-0.051
Promedio de la fuerza perdida por grado Celsius ± 0.001 N°C⁻¹		-0.136



Gráfica 5. Relación entre el tiempo ± 0.05 s y la fuerza de atracción ± 0.10 N entre el líquido ferromagnético y el campo magnético para las temperaturas entre 35°C y 90°C; con una ecuación de la línea de tendencia $F = -0.0133T + 3.8318$ y una $R^2 = 0.93563$.

fue presentado anteriormente con el mayor decremento de fuerza, mientras que, en el tercer intervalo, de 35°C a 90°C, se presentan la mayor parte de los datos registrados.

Por últimos, el primer intervalo, de -11°C a 24°C, encontramos el menor decremento de fuerza, en el que una línea de tendencia con una ecuación lineal de $F = -0.0034T + 4.7893$ no se ajusta a los datos, presentando una $R^2=0.85$, menor al tercer y primer intervalo, conectando únicamente 4 puntos.



Gráfica 6. Relación entre el tiempo ± 0.05 s y la fuerza de atracción ± 0.10 N entre el líquido ferromagnético y el campo magnético para las temperaturas entre -11°C y 24°C ; con una ecuación de la línea de tendencia $F = -0.0034T + 4.7893$ y una $R^2 = 0.85031$.

4. CONCLUSIÓN

En este trabajo podemos demostrar que la temperatura del líquido ferromagnético sintetizado ejerce un efecto directo entre la fuerza de atracción del fluido y la inducción magnética generada por un solenoide: La fuerza de atracción entre un líquido ferromagnético y un campo magnético **disminuirá al incrementar** la temperatura del líquido y, viceversa, aumentará al decrecer la temperatura del líquido.

De forma general, el análisis muestra un comportamiento decreciente de la fuerza de atracción entre el fluido y el campo magnético, contra el aumento de temperatura del líquido. Más a detalle se observan 3 patrones de comportamiento, que podemos clasificar por intervalos de temperatura de la siguiente manera:

- En el primer intervalo de -11°C a 24°C se describe el **menor decremento** de fuerza de atracción con respecto a la temperatura, del -0.0034 NC^{-1} , a la que se ajusta una ecuación lineal de: $F = -0.0034T + 4.7893$.
- En el segundo intervalo de 24°C a 35°C se encuentra el **mayor decremento** de la fuerza de atracción con respecto a la temperatura, del -0.136 NC^{-1} , a la que se ajusta una ecuación polinómica de segundo grado de: $F = 0.0083T^2 - 0.6217T + 14.838$.
- En el tercer intervalo de 35°C a 90°C se ubica la **mayor parte de los resultados** con un decremento de -0.092 NC^{-1} , a la que se ajusta una ecuación lineal de $F = -0.0133T + 3.8318$.

Podemos ordenar los intervalos de comportamiento de la fuerza de atracción con respecto a la temperatura de menor a mayor, de la siguiente forma:

$$1\text{er intervalo} < 3\text{er intervalo} < 2\text{do intervalo}$$

Regresando a nuestro marco teórico, las fuerzas que interactúan con el líquido ferromagnético son: la fuerza magnética, gravitacional e intermolecular. Siendo la influencia magnética la que se estudia en este trabajo, consultamos la ecuación 2 referente a la energía por partícula que ejerce la misma:

$$E_M = \mu_0 MBV$$

Lo primero que debemos tomar en cuenta, es que la ecuación 2 no relaciona la temperatura con la energía magnética. Mientras μ_0 y B , representan valores que afectan al líquido ferromagnético y por lo tanto son independientes de sus propiedades, V y M hacen referencia a las características del material. El volumen por partícula V no toma en cuenta la energía térmica por partícula, ya que sus dimensiones no se alteran con un cambio de temperatura, únicamente la distancia y velocidad con la que se mueven entre ellas como lo menciona el movimiento Browniano. Al no tomarse en cuenta las partículas del fluido como un conjunto, V no incluye la temperatura a la que se exponen, mientras que la saturación magnética M si toma en cuenta al material como un conjunto y la máxima magnetización que este puede alcanzar como una constante por material, pero sin relacionar a la temperatura del mismo. Al existir un comportamiento entre la temperatura del fluido y su fuerza de atracción magnética, como lo demostró el experimento de este trabajo, y siendo μ_0 , B y V valores a los que no se puede relacionar la temperatura del material, esta investigación expone la posibilidad de que la saturación magnética M no sea una constante del material, pero dependa de la temperatura del mismo.

Una posible explicación para el comportamiento analizado pudiera ser el colectivo canónico, donde la suma de las energías individuales en la cinética por partícula es en conjunto una fuerza que contrarresta al magnetismo [22].

En cuanto a las limitaciones, este trabajo considera las siguientes:

- Se analizó únicamente el comportamiento del fluido entre los -11°C y 90°C , ya que no fue posible incrementar o disminuir en mayores rangos la temperatura del líquido ferromagnético.
- No era posible mantener la temperatura del líquido constante por periodos mayores a los 10.00 s para analizar el comportamiento del líquido en menores intervalos de temperatura, por lo que se midió la fuerza de atracción cada 0.05 s entre los 4.00 s y los 7.00 s, para intervalos de 5°C entre los -11°C y 90°C .

En cuanto a las recomendaciones propuestas para desarrollar estudios relacionados con esta investigación, se pudiera analizar:

- El comportamiento del líquido en rangos menores a los -11°C e intervalos más pequeños para obtener un perfil más extenso y preciso entre la fuerza de atracción y la temperatura del fluido.
- Experimentar con diferentes líquidos ferromagnéticos, variando el tamaño de las partículas o el líquido portador.
- Un perfil en cuanto a la densidad del líquido para las experimentaciones propuestas.

REFERENCIAS

- [1] Ferrotec Corporation, About Us | Ferrofluid. Retrieved from <https://ferrofluid.ferrotec.com/about-us/> (2019)
- [2] Venkatasubramanian, S., Kaloni, P., "Stability and Uniqueness of Magnetic Fluid Motions", *Proceedings: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, **458**(2021), 1189-1204. Retrieved from <http://0-www.jstor.org.millennium.itesm.mx/stable/3067261> (2002)
- [3] Lange, A., Instabilitäten magnetischer Flüssigkeiten in statischen Magnetfeldern. *Fakultät Für naturwissenschaftlicher Otto-Von-Guericke-Universität Magdeburg*, 1-9 (2003)
- [4] Kefayati, G., "Natural convection of ferrofluid in a linearly heated cavity utilizing LBM", *Journal Of Molecular Liquids*, **191**, 1-9. doi: 10.1016/j.molliq.2013.11.021 (2014)
- [5] Muhammad, N., Nadeem, S., Mustafa, M., "Analysis of ferrite nanoparticles in the flow of ferromagnetic nanofluid". *PLOS ONE*, **13**(1), 1-3. doi: 10.1371/journal.pone.0188460 (2018)
- [6] Mahajan, S., Mahajan, A., "A nonlinear stability analysis for magnetized ferrofluid heated from below". *Proceedings Of The Royal Society A: Mathematical, Physical And Engineering Sciences*, **464**(2089), 83-84. doi: 10.1098/rspa.2007.1906 (2008)
- [7] Tippens, P. (2011). Física, Conceptos y aplicaciones (7th ed.). Perú: El Comercio S.A
- [8] Mody, V., Singh, A., Wesley, B., "Basics of magnetic nanoparticles for their application in the field of magnetic fluid hyperthermia". *European Journal of Nanomedicine*, **5**(1), 11. doi: 10.1515/ejnm-2012-0008 (2013)
- [9] Pople, S., Lloyd, S., *Complete physics for Cambridge IGCSE*

- [10] Cuprich Rodríguez, M., Elizondo Garza, F., “Amortiguadores magnetoreológicos”. *Departamento De Dinámica, FIME-UANL*, **1**(2), 50 (1998).
- [11] Rosensweig, R., “Magnetic Fluids”, *Annual Review of Fluid Mechanics*, **19**(1), 437-461. doi: 10.1146/annurev.fl.19.010187.002253 (1987)
- [12] Rosensweig, R., *Ferrohydrodynamics* Mineola, New York: Dover Publications, Inc. (2014)
- [13] Reckerth, A., Ehmann, A., Nanotechnik Ferrofluide. *Institut Dr. Flad*, 1-13 (2015)
- [14] Majeed, A., Zeeshan, A., Ellahi, R., “Unsteady ferromagnetic liquid flow and heat transfer analysis over a stretching sheet with the effect of dipole and prescribed heat flux”. *Journal Of Molecular Liquids*, **223**, 528-529. doi: 10.1016/j.molliq.2016.07.145 (2016)
- [15] Szczech, M., Horak, W., Numerical Simulation and Experimental Validation of the Critical Pressure Value in Ferromagnetic Fluid Seals. *IEEE Transactions On Magnetics*, **53**(7), 1. doi: 10.1109/tmag.2017.2672922 (2017)
- [16] Sebastian, R., Nanotechnologie im Schulunterricht am Beispiel Rastertunnelmikroskop und Ferrofluid. *Julius-Maximilians-Universität Würzburg*, 87-100. Retrieved from <http://www.thomas-wilhelm.net/arbeiten/Nanotechnologie.pdf> (2011)
- [17] Sohel Murshed, S., Nieto de Castro, C., *Contribution of Brownian Motion in Thermal Conductivity of Nanofluids* London, U.K.: World Congress on Engineering (2011)
- [18] Chun, D., Karlen, S., Kolodziej, C., Jost, B., Virji, S., Weinberger, M., „Synthesis of an Aqueous Ferrofluid”, *The California Nanosystems Institute & Materials Creation Training Program University Of California, Los Angeles Science Outreach Program*, (3), 1-12. Retrieved from <http://voh.chem.ucla.edu/outreach.php3> (2005)
- [19] Serway, R., Jewett Jr, J., *Física para ciencias e ingenierías* Vol. 1. 7e. Mexico, México: Cengage Learning Editores S.A. de C.V. (2008)
- [20] David R. Lide CRC Press Inc, ed. *CRC Handbook of Chemistry and Physics* (en inglés) (90 edición). (2009)
- [21] Brown, W.F., *Magnetic Materials*, Ch 8 in the Handbook of Chemistry and Physics, Condon and Odishaw, eds., McGraw-Hill (1958)
- [22] Prausnitz, J. M., *Molecular thermodynamics of fluid-phase equilibria*, 3rd. Edition / John M. Prausnitz, Rüdiger N. Lichtenthaler, Edmundo Gomes de Azevedo, New Jersey : Upper Saddle River, N. J.: Prentice-Hall (1997) eng, 0139777458
- [23] Zeeshan, A., Majeed, A., Fetecau, C., Muhammad, S., “Effects on heat transfer of multiphase magnetic fluid due to circular magnetic field over a stretching surface with heat source/sink and thermal radiation”. *Results In Physics*, **7**, 3353-3356. doi: 10.1016/j.rinp.2017.08.047 (2017)
- [24] Çengel, Y.A., *Heat and Mass Transfer: a practical approach* (Tercera edición) McGraw Hill (2007)
- [25] Colin Cameron, A., Windmeijer, F., “An R-squared measure of goodness of fit for some common nonlinear regression models”. *Journal Of Econometrics*, **77**(2), 329-342. doi: 10.1016/s0304-4076(96)01818-0 (1997)

ANEXOS

Anexo 1:

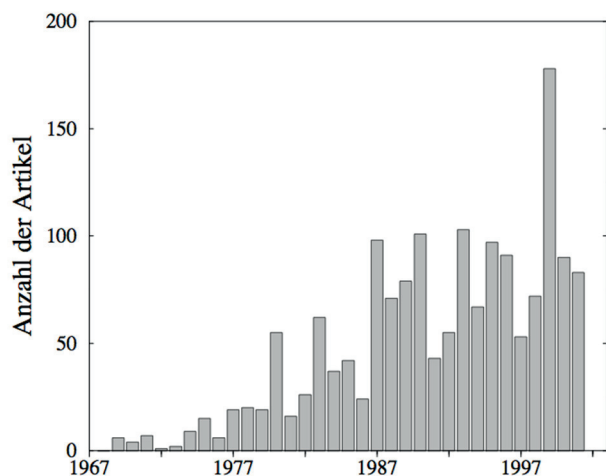


Fig. 8. Número de publicaciones sobre los líquidos ferromagnéticos entre 1968 y 2001 [3].

Anexo 2:



Fig. 9. La suspensión coloidal sintetizada presentó inestabilidad de Rosensweig.

ATTRACTIVE BEHAVIOR BETWEEN A FERROMAGNETIC LIQUID AND A MAGNETIC FIELD DEPENDING ON THE TEMPERATURE OF THE LIQUID

Abstract—Experimental analysis was performed to identify if there is a change in the magnetic attraction between a ferromagnetic liquid and a stable magnetic field, depending on the temperature of the liquid. The analyzed ferromagnetic fluid was synthesized as a colloidal suspension of ferromagnetic iron ferrite particles Fe_3O_4 (II, III) (98%) in engine oil (Castrol Magnatec 20W-50) as a carrier fluid. In this experiment, the ferrofluid was analyzed at 15 different temperatures, within an interval between -11°C and 90°C . The results of the present investigation show a direct effect between the attraction force of the fluid and the magnetic induction due to the temperature change of the liquid. A decreasing tendency of the attraction force was identified as the temperature of the liquid increased, which can be described within three patterns of behavior: the first one between -11°C and 24°C , the second one between 24°C and 35°C , and the third one between 35°C and 90°C . Based on the analyzed results, this article exposes the possibility of explaining this behavior as a consequence that the magnetic saturation is not only a constant of the material but also dependent on its temperature.

Keywords—Ferromagnetic Liquid, Magnetic Attraction, Change in Temperature.