

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE OCCIDENTE
Departamento de Matemáticas y Física

Sustentabilidad y Tecnología

PROYECTO DE APLICACIÓN PROFESIONAL (PAP)
Programa de Apoyo a la Investigación en Nanociencias y Nanotecnología I



PAP4I03: Dispositivos médicos nanoestructurados
Estudio del efecto de la interacción dipolar en sistemas de nanoalambres
magnéticos biestables como sistemas de almacenamiento de información

PRESENTAN

Programas educativos y Estudiantes
Ing. en Nanotecnología Pablo García Bedoy Fernández

Profesor PAP: Yenni Guadalupe Velázquez Galván
Tlaquepaque, Jalisco, julio de 2023

ÍNDICE

Contenido

REPORTE PAP	2
Presentación Institucional de los Proyectos de Aplicación Profesional	2
Resumen	2
1. Introducción	3
1.1. Objetivos	3
1.2. Justificación.....	3
1.3 Antecedentes	4
1.4. Contexto.....	4
2. Desarrollo	5
2.1. Sustento teórico y metodológico	5
2.2. Planeación y seguimiento del proyecto	12
3. Resultados del trabajo profesional.....	21
4. Reflexiones del alumno o alumnos sobre sus aprendizajes, las implicaciones éticas y los aportes sociales del proyecto.....	29
5. Conclusiones	32
6. Bibliografía.....	33
Anexos (en caso de ser necesarios).....	¡Error! Marcador no definido.

REPORTE PAP

Presentación Institucional de los Proyectos de Aplicación Profesional

Los Proyectos de Aplicación Profesional (PAP) son una modalidad educativa del ITESO en la que el estudiante aplica sus saberes y competencias socio-profesionales para el desarrollo de un proyecto que plantea soluciones a problemas de entornos reales. Su espíritu está dirigido para que el estudiante ejerza su profesión mediante una perspectiva ética y socialmente responsable.

A través de las actividades realizadas en el PAP, se acreditan el servicio social y la opción terminal. Así, en este reporte se documentan las actividades que tuvieron lugar durante el desarrollo del proyecto, sus incidencias en el entorno, y las reflexiones y aprendizajes profesionales que el estudiante desarrolló en el transcurso de su labor.

Resumen

El presente trabajo es una exploración de trabajos anteriores en los que se postulan sistemas de nanoalambres magnéticos biestables como memorias no volátiles. Tiene como objetivo encontrar qué efectos tiene en la curva de remagnetización la magnitud de la interacción magnetostática entre los nanoalambres por medio del cálculo y análisis de regresión y estadístico de las diferencias de campo negativo entre la curva de remagnetización ideal y la misma en el caso en el que no existiera tal interacción entre nanoalambres. A partir de los análisis, se encuentra una invarianza entre la media de las diferencias y la interacción magnetostática presente en la muestra. Por otro lado, se observa una relación positiva entre la dispersión de los datos con respecto al modelo de regresión lineal.

A partir de los hallazgos se propone un modelo lineal generalizado que modele el comportamiento de las diferencias de campo calculadas y, a su vez, se proponen análisis

futuros pertinentes, así como sugerencias de mediciones siguientes para poder probar los resultados encontrados.

1. Introducción

1.1. Objetivos

Estudiar el efecto de la interacción dipolar de la curva de remagnetización de sistemas biestables tras someterlos a una secuencia de ciclos menores de histéresis.

Objetivos específicos:

- Investigar literatura relevante sobre sistemas de grabados.
Familiarización con los datos de las mediciones ya hechas.
- Analizar las curvas de remagnetización para distintas secuencias grabadas por medio de Python.
- Estimar las curvas ideales para cada una de las secuencias.
- Calcular las diferencias de las curvas ideales respecto al caso en el que no hay interacción.
- Realizar análisis de regresión de tales diferencias.
- Realizar lo mismo con otras muestras y comprobar hipótesis que surjan con el paso anterior.

1.2. Justificación

El cálculo de la interacción magnética dipolar (IMD) entre nanoalambres (NA) embebidos en una membrana porosa puede ser realizada a partir del protocolo y método de curvas de desmagnetización por corriente directa (DCD) y de remanencia isotérmica (IRM) (J. M. Martínez Huerta, 2012). Obtener una manera de calcular la IMD a partir de la curva de remagnetización (RMC) de la muestra podría tener beneficios cualitativos y de practicidad para el estudio de los sistemas de NA magnéticos, así como para su aplicación posterior como tecnología de la información. Esto debido a que, por un lado, evitaría la necesidad de

hacer el protocolo de medición de las curvas IRM y DCD mientras que también permitiría el estudio de la RMC de la muestra desde el entendimiento de su interacción de manera que, por ejemplo, se pueda escoger un rango de interacción óptimo para las aplicaciones deseadas.

1.3 Antecedentes

Anteriormente, la doctora Yenni junto con sus colaboradores, ya habían trabajado con muestras de NA magnéticos planteándolas como sistemas en los cuáles hacer grabado de información —específicamente números y códigos de barras. En tales trabajos se encontró la posibilidad de, efectivamente, ser utilizados como tales. Situación que fue demostrada al hacer grabación de información y recuperándola por medio de los patrones de remagnetización de las muestras.

El presente trabajo surge como una exploración subsecuente de estos análisis centrándose, a grandes rasgos, en el análisis de los datos obtenidos en aquellos estudios y, específicamente, en la RMC y su relación con la IMD del sistema.

1.4. Contexto

Actualmente, las tecnologías utilizadas para el almacenamiento de información no volátil —que puede ser almacenada por un periodo prolongado de tiempo— se acercan a verse limitadas por los límites físicos a los que están sujetas (Makarov, 2012). Además, la cantidad de información que se tendrá que procesar y almacenar se verá incrementada prácticamente cuatro veces entre 2020 y 2025 (Lotnyk, 2019). Por estas razones, es de muy alta importancia la creación de nuevas tecnologías que permitan tratar con la información cumpliendo con cuatro principios básicos: escalabilidad, bajo consumo de poder, alta velocidad de operación y no volatilidad una vez que se apaga la fuente de energía del sistema (Makarov, 2012).

2. Desarrollo

2.1. Sustento teórico y metodológico

En un sistema en el que se tienen NA embebidos en una superficie porosa de manera paralela (ver figura 1) y se le aplica un campo magnético externo, se puede estimar el campo al que cada uno de los NA está sometido. En el caso en el que se tengan NA en los que las anisotropías magnetocristalinas puedan despreciarse y tenga un comportamiento de monodominio (Medina, 2005), solo se tendrá una única anisotropía de forma a lo largo de su eje mayor —en dirección de su longitud (Darques, 2004). De esta manera, el NA solo tendrá dos tipos de magnetización posibles: hacia “arriba” o hacia “abajo” determinada por un ciclo de histéresis cuadrado (Medina, 2005).

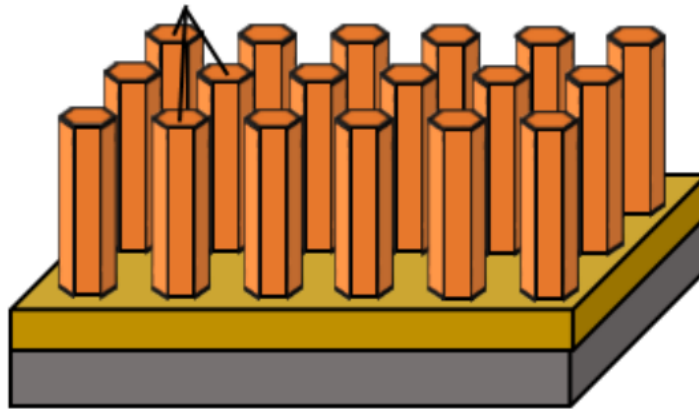


Figura 1: Ilustración de nanoalambres crecidos en membrana porosa por epitaxia (Medina, 2005)

Por otro lado, el NA se verá afectado por el campo magnético de cada uno de los NA circundantes a partir de su IMD. La forma en la que se puede expresar el campo total H_{NA} al que un NA dado está sometido en función del campo externo aplicado H y el campo resultante de la interacción dipolar $H_{dipolar}$ es la siguiente (Kou, 2011):

$$H_{NA} = H + H_{dipolar}$$

(1)

Más aún, debido a la interacción entre NA y su ciclo de histéresis cuadrado, es posible llevar a un estado irreversible a cada uno de los NA. Esto ocurre cuando se lleva a un estado de saturación H_{NA_S} y después se mantienen valores absolutos de campo menores o iguales a H_{NA_S} de campo. Es decir, que se mantenga la siguiente relación (Kou, 2011):

$$|H + H_{dipolar}| \leq H_{NA_S} \quad (2)$$

Debido a la relación (2), se puede establecer un estado estable, no volátil, de comportamiento binario —hacia “arriba” o hacia “abajo”—, que apunta naturalmente hacia usos en información escrita en binario —bits.

Importante tomar en cuenta que el campo por ocasionado por la IMD suele expresarse como una relación lineal con la magnetización m de la siguiente manera:

$$H_{dipolar} = \alpha m \quad (3)$$

Grabado y lectura de información

Gracias a sus características de remanencia y biestabilidad, estos sistemas pueden ser utilizados como memorias que contengan información. Si se utilizan series de ciclos de histéresis menores —ciclos de histéresis en los que sus campos máximos y mínimos son menores que el ciclo de histéresis mayor—, la muestra puede “recordar” los campos límites a los que fue sometida, garantizado que cada uno de los ciclos menores tenga valores de campo máximo y mínimo que cumplan la relación (2) respecto al ciclo de histéresis anterior.

Por ejemplo, si se lleva a una muestra hasta saturación, después se lleva hasta un campo negativo H_1 , luego se aumenta el campo hasta uno positivo H_2 menor al campo de saturación, después se vuelve a reducir el campo hasta uno negativo H_3 de magnitud menor a H_1 y así sucesivamente hasta el número de campos deseado de tal manera que $|H_1| >$

$H_2 > |H_3| > H_4 > \dots$ (Y. Velázquez). En el caso de la figura 2, los campos son 6 y, por lo tanto, los ciclos de histéresis menores; 3.

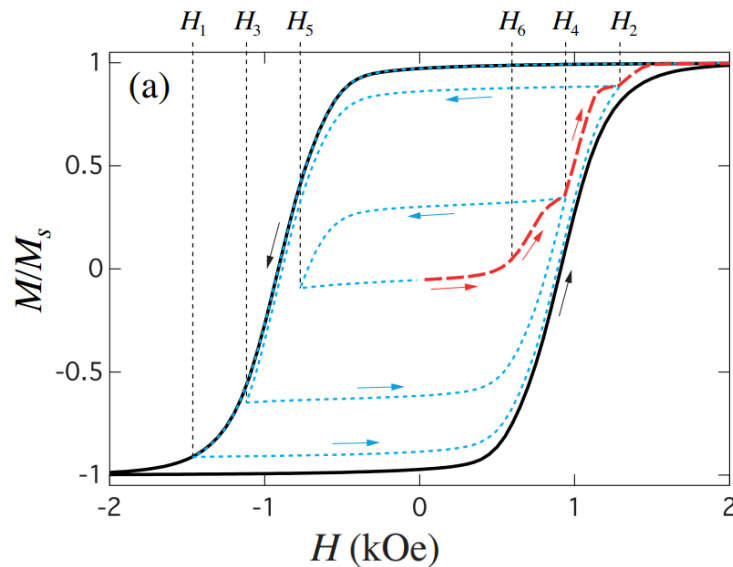


Figura 2: Secuencia de 3 ciclos menores (línea punteada azul) determinados por 6 campos y su RMC (línea guion roja) (Y. Velázquez).

Una vez que se ha hecho este proceso, se puede decir que se han grabado los valores de estos campos en la muestra pues se ha cumplido la relación (2) a lo largo de la secuencia. La manera de leer esta información es llevando al sistema hasta saturación de nuevo y analizar su RMC. Esta RMC muestra un comportamiento escalonado. Tal comportamiento se explica por periodos de transición de momento de magnetización en grupos de NA —pendientes o subidas— y rangos de valores de campo en los que el cambio no ocurre o es mínimo —planicies determinadas por los valores absolutos de los campos a los que estuvo sujeta la muestra (A. Encinas, 2007). Si se calcula su derivada $\chi = \frac{dM}{dH} \epsilon^1$, se obtiene un comportamiento visiblemente binario de valles y cimas. Tal comportamiento puede interpretarse como información binaria que dependerá de cómo se realizó el grabado en cuanto a tamaño de intervalos entre campos y número de ciclos de histéresis se refiere.

¹ La constante ϵ no tiene ninguna relevancia física y solo se utiliza para hacer la magnitud de la derivada comparable con la magnitud de la curva de remagnetización normalizada

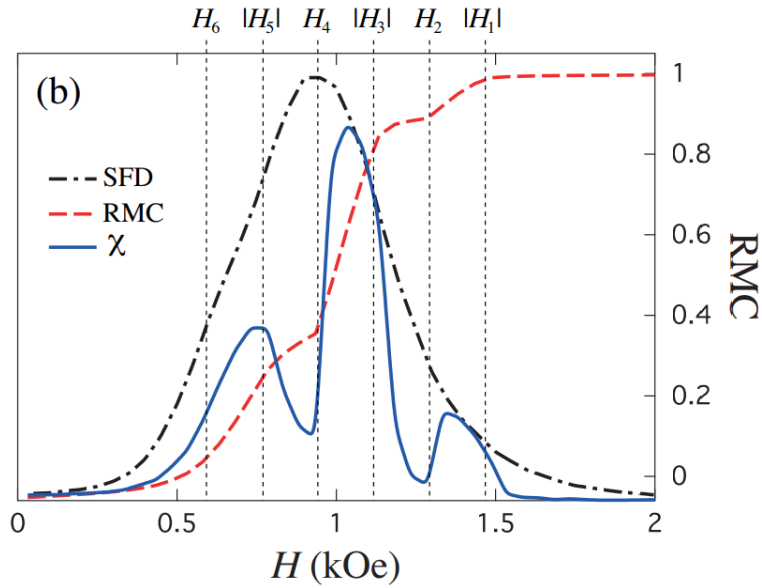


Figura 3: RMC (línea guion roja) y su derivada χ (línea azul) (Velázquez et al, s.f.)

Se puede sacar provecho de este comportamiento dado que se pueden tomar como 0's los valles y 1's las cimas (ver figura 4) como medio para escribir, por ejemplo, números en binario. Es importante mencionar que, al leer la información grabada, se destruye la misma de la muestra pues se lleva a saturación todo el sistema. Lo que hace al sistema uno de lectura única y eliminado automático (Y. Velázquez).

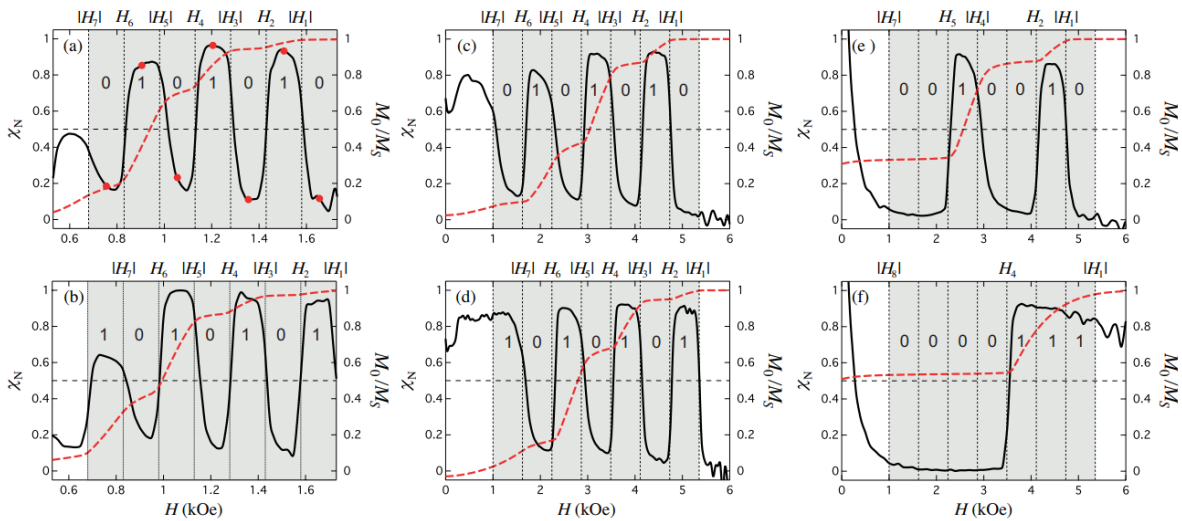


Figura 4: Ejemplos de uso de la RMC para llevar a cabo la lectura de la información en binario (Y. Velázquez).

Diferencia entre RMC real, RMC ideal y RMC sin interacción

Cómo se ha expuesto, la interacción entre los NA es fundamental para que estos sistemas puedan ser utilizados como memoria. Aun así, presentan retos para el análisis de la RMC, pues a medida que aumenta la magnitud de la IMD, la curva se suaviza y se desdibuja su comportamiento escalonado. Para poder tratar con la curva suave, se postula una idealización recta de la misma que se llamará RMC ideal. Esta curva se genera a partir de los vértices indicados por los campos positivos, extendiendo una recta hacia la izquierda hasta que se encuentre con el modelo lineal que represente la “subida” previa a la planicie. De tal manera que quede una curva idealizada sobrepuesta a la RMC real como en la figura 5.

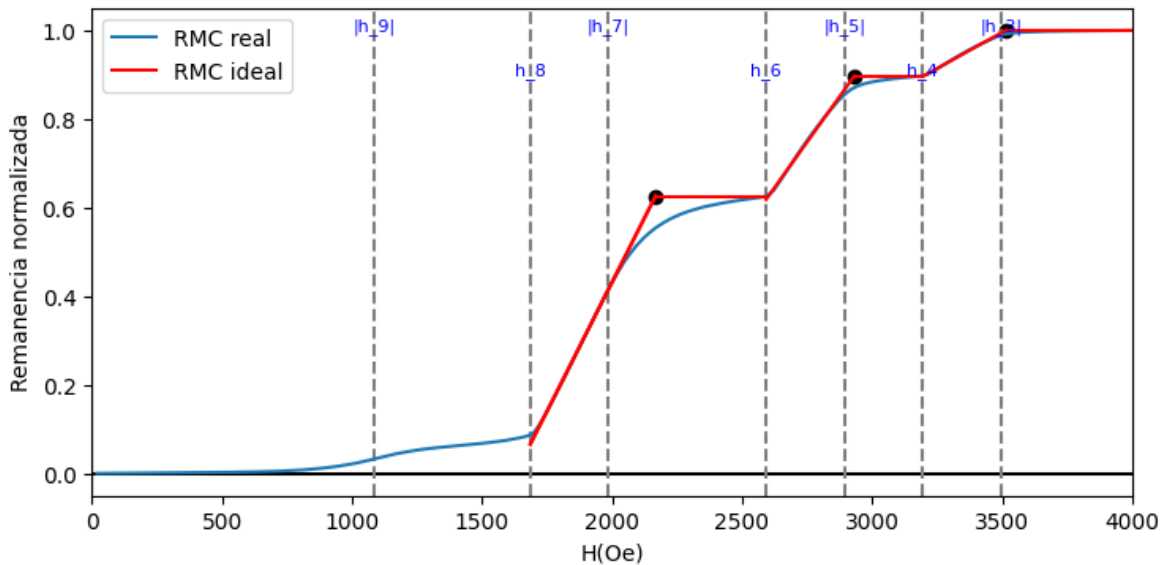


Figura 5: Ejemplo de RMC ideal (roja) sobre RMC real (azul).

Por otro lado, se tiene otra curva, que se nombrará RMC sin interacción. Esta curva sería similar a la RMC ideal con la diferencia de que la arista —puntos negros en la figura anterior— coincide con los valores absolutos de los campos negativos aplicados— $|H_7|$, $|H_5|$ y $|H_3|$, respectivamente para el ejemplo en la figura 5. Tal discrepancia se explica cualitativamente por la IMD, aunque, por el momento, no se tiene una explicación cuantitativa de la magnitud de ésta.

Cálculo de la interacción

Ahora bien, como actualmente no se puede obtener la magnitud de la IMD a partir de la RMC, se utiliza el método por IRM y DCD. Este método consiste en los siguientes pasos (J. M. Martínez Huerta, 2012):

- Primeramente, se tienen por separado las dos curvas normalizadas respecto a la magnetización de saturación (ver figura 6):

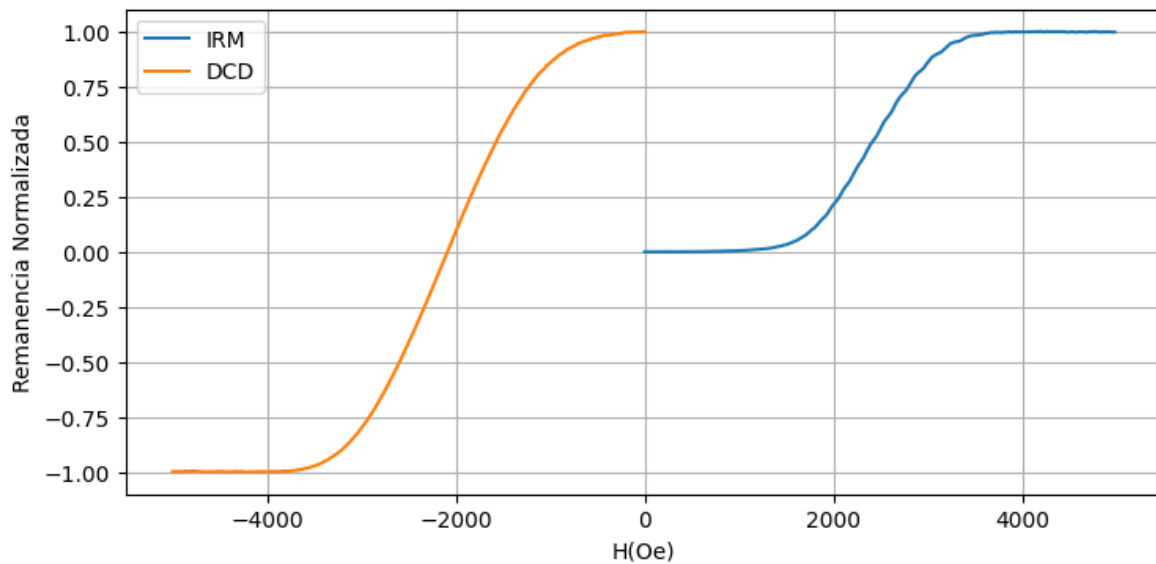


Figura 6: Curva IRM y DCD respectivamente.

- Se calcula el negativo de la curva DCD (figura 7)

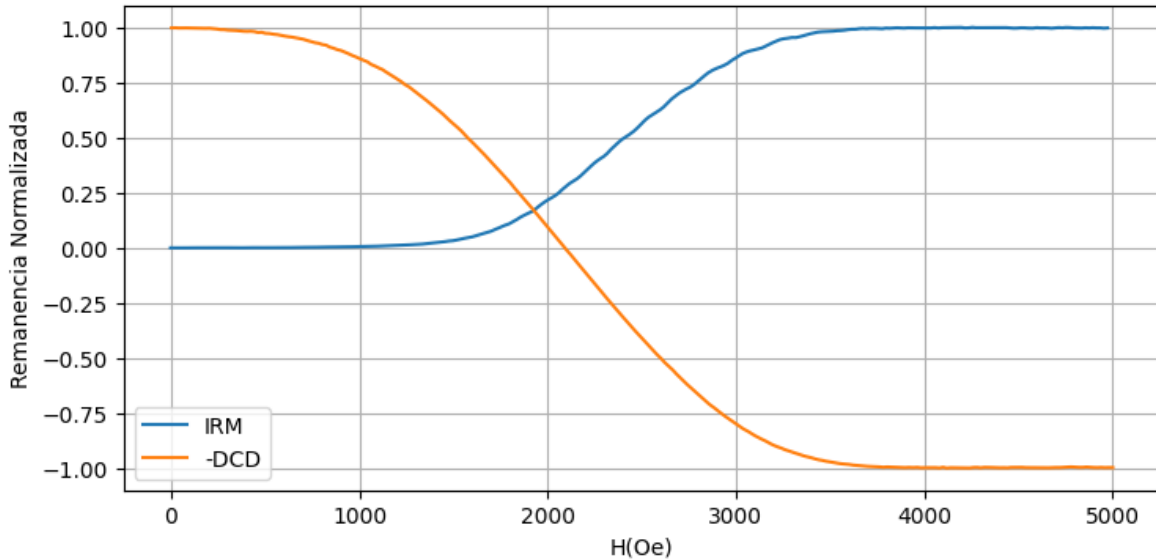


Figura 7: Curva IRM y el negativo de la DCD

- Por medio de la relación de Wohlfarth se tiene que $-m_{dcd} = 1 - 2m_{irm}$. Así que se le aplica esa relación a la curva IRM

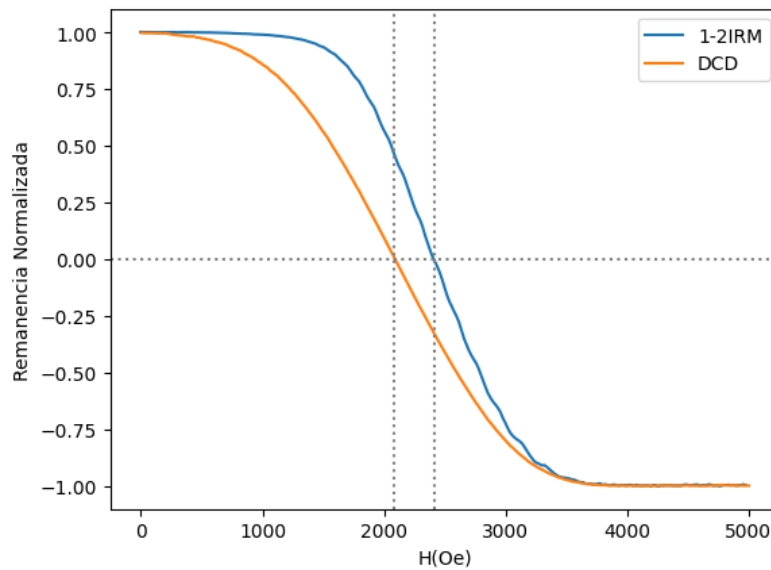


Figura 8: Curvas $1 - 2IRM$ y DCD. Las curvas deberían de ser las mismas de no haber IMD.

- En caso de que no hubiera IMD, las curvas deberían de ser iguales. La diferencia en campo entre los dos puntos de intersección de las dos curvas con el eje “x” permiten el cálculo de α —presentado en la ecuación (3)— por medio de la siguiente relación:

$$\alpha = 2\Delta H$$

(4)

Especificación de muestras

Para el presente trabajo se utilizaron distintas muestras; La primera, NA de CoFe sobre una membrana de synkera; los segundos, NA de Co preparados en un pH de 2.0 sobre una membrana de policarbonato; los terceros, NA de Co preparados en un pH de 6.6 sobre una membrana de policarbonato; y, por último, NA de NiFe preparados en una membrana de synkera. Para cada una se muestra también la porosidad —número de poros entre unidad de área— de la membrana sobre la cual los NA están embebidos. Esta información se puede observar en la tabla 1.

Tabla 1: pH y porosidad de cada una de las muestras

Muestra	pH	P(%)
Co20	2	3
Co66	6.6	3
CoFe	-	12
NiFe	-	1

Aunque todas las muestras utilizadas son nanoalambres magnéticos. Se ha visto que los nanoalambres de cobalto pueden no ser óptimos para este tipo de aplicaciones debido a que presentan estructuras policristalinas y polidomino según sus condiciones de síntesis — específicamente, su pH— pudiendo ocasionar anisotropías magnetocristalinas que distorsionen su comportamiento (Darques, 2004). Específicamente, se ha encontrado que dichas anisotropías se ven eliminadas dentro rangos de pH bajos (Darques, 2004).

2.2. Planeación y seguimiento del proyecto

- Descripción del proyecto

Este proyecto consiste en la investigación de la literatura relevante al tema, la exploración y graficación de los datos previamente adquiridos de los ciclos de histéresis menores de cuatro muestras de nanoalambres magnéticos. Seguido, el cálculo de la interacción

magnetostática de cada una de las muestras, el estudio de la curva de remagnetización de cada una de las secuencias de cada una de las muestras. Por último, la estimación de su curva ideal, su diferencia con la curva sin interacción y análisis estadísticos subsecuentes de estas diferencias.

- Plan de trabajo

Con el fin de cumplir los objetivos planteados y llevar a cabo el fin último del proyecto se plantea un cronograma de las actividades a realizar. El cronograma se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 2: Cronograma de actividades del proyecto

Nombre de la actividad	Tiempo (días)	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8
Investigación inicial e introducción al tema.	5								
Exploración y graficación de datos de ciclos de histéresis/ comparación de gráficas.	5								
Datos graficados y cálculo de alfa /Estudio del modelo.	5								
Análisis de la RMC y su derivada para calcular alfa.	5								
RMC con comportamiento ideal y real / Primeras estimaciones de alfa.	5								
Análisis de regresión de diferencia entre campos para encontrar modelo.	5								
Análisis de regresión de diferencia entre campos con muestra distinta	5								
Aanálisis de datos obtenidos.	5								
Escritura RPAPs	5								
Presentación del RPAP	4								

Además de estas actividades específicas, se tendrán reuniones semanales entre el estudiante, el profesor PAP y, esporádicamente, el colaborador del profesor PAP en la

investigación. También, todo el trabajo se entiende como trabajo personal de análisis de datos por medio del lenguaje Python en la computadora personal del estudiante.

Los periodos del proyecto están determinados por las siete primeras de la duración de este. A continuación, se plantea y justifica lo desarrollado en cada una de las semanas.

Específicamente

- Semana 1:

Esta semana consistió en un primer acercamiento hacia la literatura relevante en el tema. Principalmente, se puso especial atención a un artículo realizado por la doctora Yenni y colaboradores que consiste en la aplicación de sistemas de NA biestables para usos de codificación en binario y códigos de barras.

- Semana 2:

Una vez que se tuvo la familiarización con el tema, se trabajó con los datos de distintas secuencias grabadas (diez secuencias en total) en la muestra de CoFeS. Se buscó tener una comprensión del formato de la información y poder tener la capacidad seccionarla y seleccionar estas secciones según la necesidad que se presente. Para ello, se ideó un código que separa a toda la secuencia en segmentos de incremento y decremento. Cada uno de estos trayectos fueron coloreados de distinto color para poder visualizar esta segmentación de los datos y se puede ver en la siguiente figura.

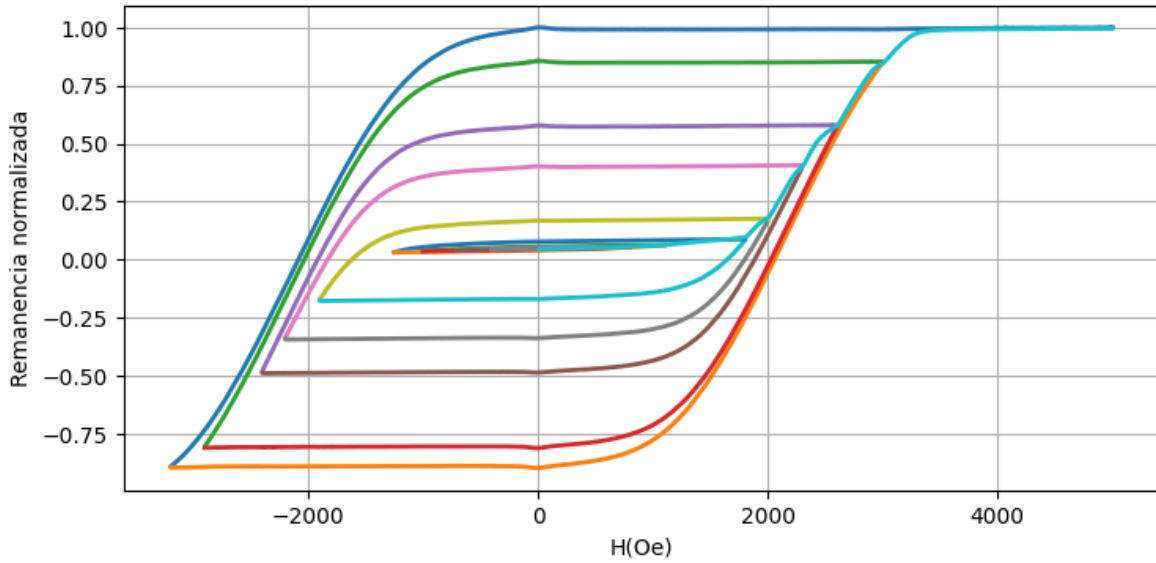


Figura 9: Una de las secuencias de la muestra CoFe con cada uno de sus segmentos crecientes o decrecientes coloreados con un color distinto.

- Semana 3:

A continuación, en la tercera semana, se buscó calcular el término α de la muestra de CoFe con base en la ecuación (3). Para ello, se aplicó el protocolo IRM-DCD explicado previamente en la en la sección 2.1. El valor calculado de α obtenido —y calculado con la ecuación (4)— fue de 663.40 Oe. Los valores de la diferencia a partir de la cual, se calcula la IMD se muestran en la figura 10.

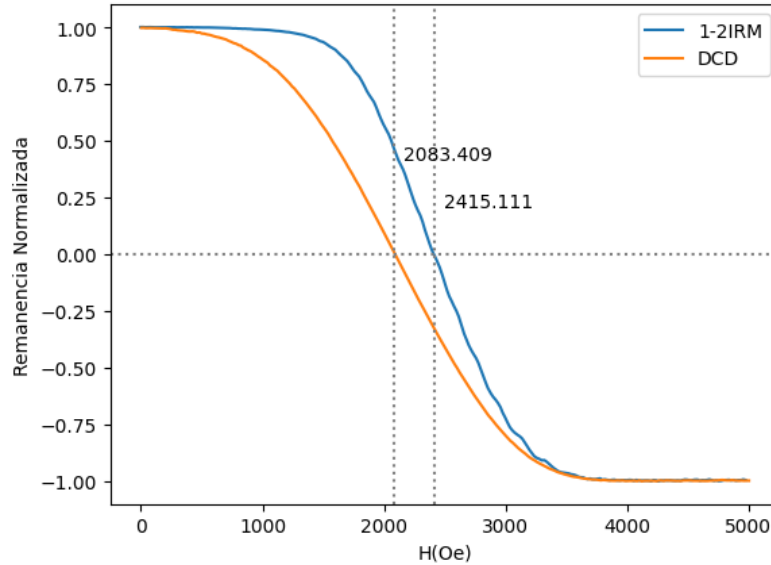


Figura 10: Tras el protocolo IRM-DCD, se obtiene que la curva $1 - 2IRM$ intercepta el eje x en el valor 2415.111 Oe mientras que la DCD en el valor 2083.409 Oe.

- Semana 4:

En la siguiente semana, se comenzó a trabajar con las RMC de las diez secuencias. Con este fin, se buscaron y encontraron tales curvas dentro de las curvas separadas determinadas en la semana anterior. Es decir, se hizo una exploración de cada uno de ellos hasta dar con la RMC en cada secuencia. También, se determinaron los valores de los campos —negativos y positivos— con los que se realizó el grabado. La forma en la que se hizo esto fue encontrando para cada curva su valor máximo —en el caso de ser una curva ascendente— y su valor mínimo —en caso de ser una curva descendente.

Seguido, se graficaron todos estos valores de campo sobre la RMC. Los valores negativos de campo —aquellos que se registraron como valores mínimos de curvas descendentes— fueron graficados transformados a su valor absoluto. A continuación, se observa el resultado de este procedimiento en una secuencia de la muestra de CoFe.

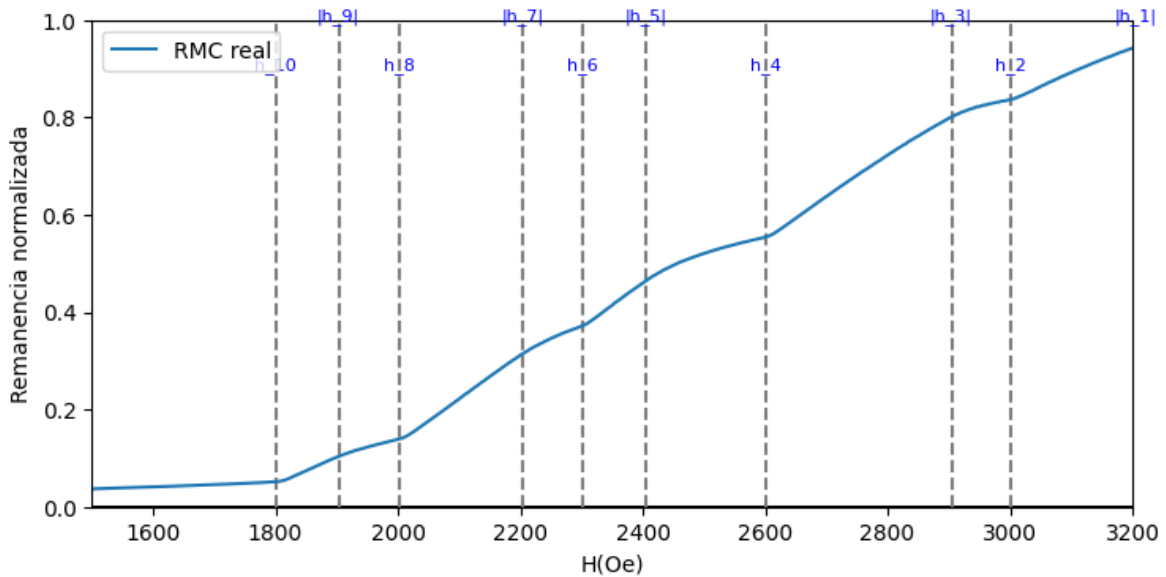


Figura 11: RMC de una secuencia con sus respectivos campos graficados sobre de ella. Los campos en valor absoluto representan los puntos mínimos del campo de los ciclos de histéresis menores y los otros son los puntos máximos

- Semana 5:

Esta semana consistió en la construcción de las RMC ideales para cada una de las secuencias. Debido a que las RMC reales presenta un comportamiento escalonado más bien tenue, se plantea la construcción de las RMC ideales como una de comportamiento escalonado manteniendo la estructura subyacente de la real.

La forma en la que se hicieron tales gráficas es la siguiente. En la RMC real, los intervalos que van desde el campo positivo hacia el negativo —el que se presenta con valor absoluto— se consideran como pendientes o subidas y los intervalos que van desde el negativo hacia el positivo, como planicies.

En las subidas se plantean regresiones lineales con los datos dentro del intervalo. A su vez, en las planicies se dibuja una línea horizontal desde la intersección del campo positivo con la curva hacia la izquierda hasta encontrarse con la regresión lineal establecida en el

intervalo anterior —que será siempre una subida. La RMC ideal sobre la real se presenta en la siguiente figura.

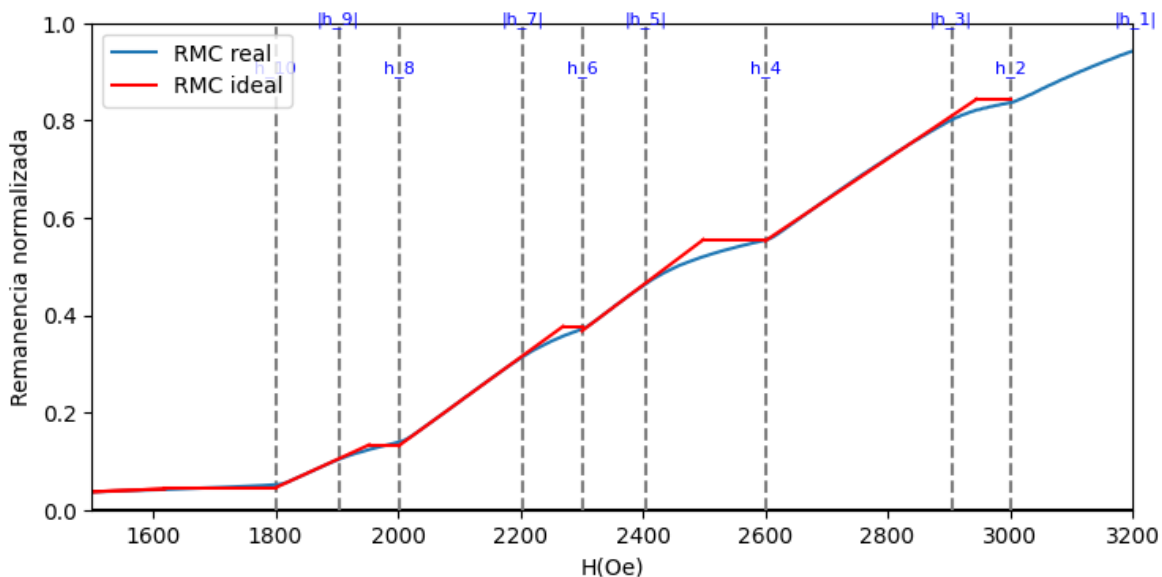


Figura 12: RMC ideal (roja) sobre la RMC real (azul)

- Semana 6:

En la sexta semana se calcularon las diferencias entre la RMC ideal y los campos negativos. Esto es debido a que, en el caso de que la muestra no presente interacción dipolar, la arista en la que se encuentran la recta de la regresión lineal y la línea horizontal determinada por el campo positivo (ver figura anterior), debería de coincidir con el campo negativo. Esta diferencia (ver figura 13) puede dar indicios de la magnitud de la interacción dipolar.

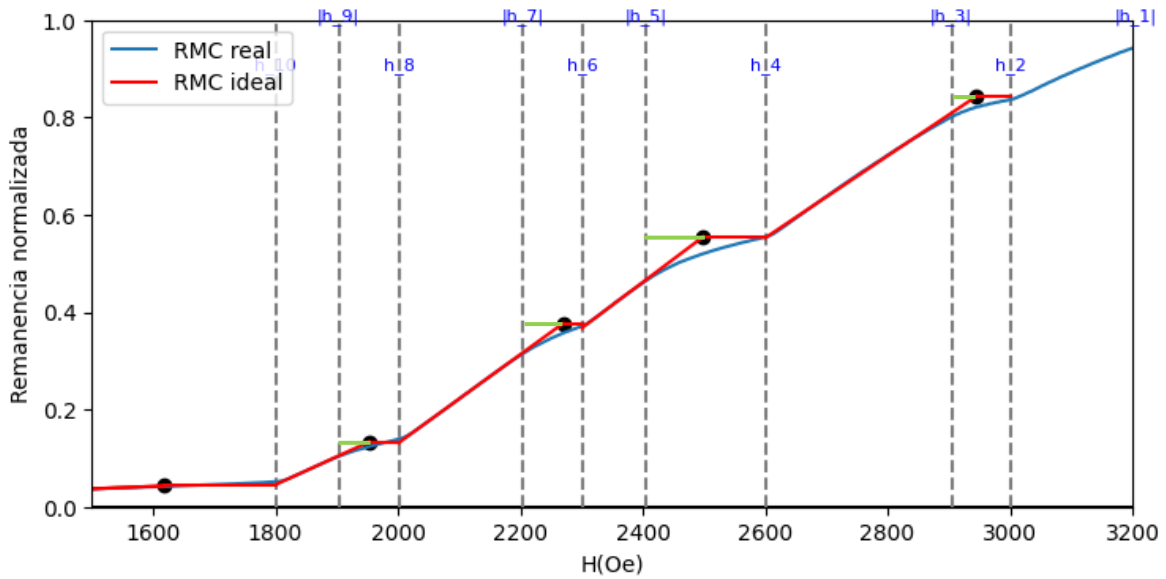


Figura 13: La distancia remarcada por la línea verde puede dar indicios de los efectos de la interacción dipolar.

Una vez que se obtuvieron todas las diferencias remarcadas por la línea verde en la figura anterior, se registraron y se realizó una regresión lineal de los datos —con motivación e la ecuación (3). Los datos se muestran en la figura 14.

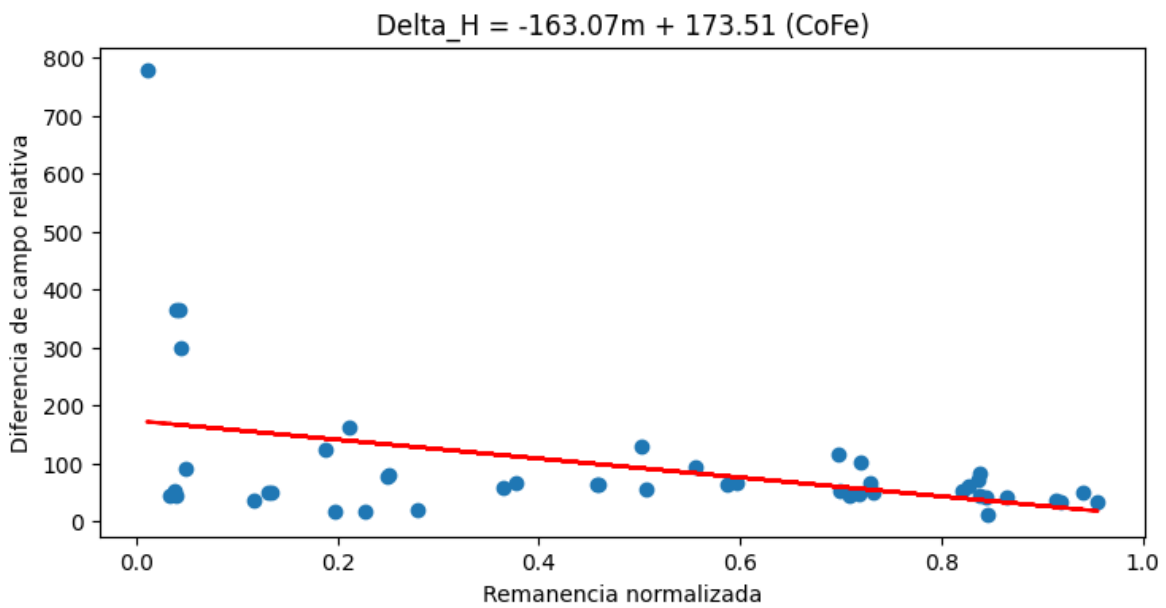


Figura 14: Diferencias de H graficadas contra su valor de remanencia normalizada respectiva

- Semana 7:

Dado que los resultados obtenidos en la semana 6 no tuvieron una interpretación directa, se buscaron datos de otras muestras cada una con sus respectivas secuencias grabadas para poder comparar resultados con otras muestras. Se consiguieron datos de muestras de Co66, Co20 y NiFe. Con ellos se hizo el mismo procedimiento que con los de CoFe. Se obtuvo su IMD de la misma forma (ver tabla 3), se calcularon, para cada una de sus secuencias, las diferencias entre sus RMC reales y sin interacción.

Además, se hizo una normalización de las diferencias calculadas para que no surgieran problemas con el análisis por diferencia en los tamaños de los intervalos de cada secuencia. La normalización consistió en lo siguiente: dividir la diferencia entre RMC real y sin interacción (línea verde en figura 13) entre el tamaño total del intervalo —la diferencia entre el campo positivo y el negativo.

Una vez que se transformaron los datos, se realizaron las regresiones lineales de los mismos. En la figura 14 se muestran los datos graficados junto con su modelo lineal de la muestra de CoFe —que es la que se ha utilizado de ejemplo hasta ahora.

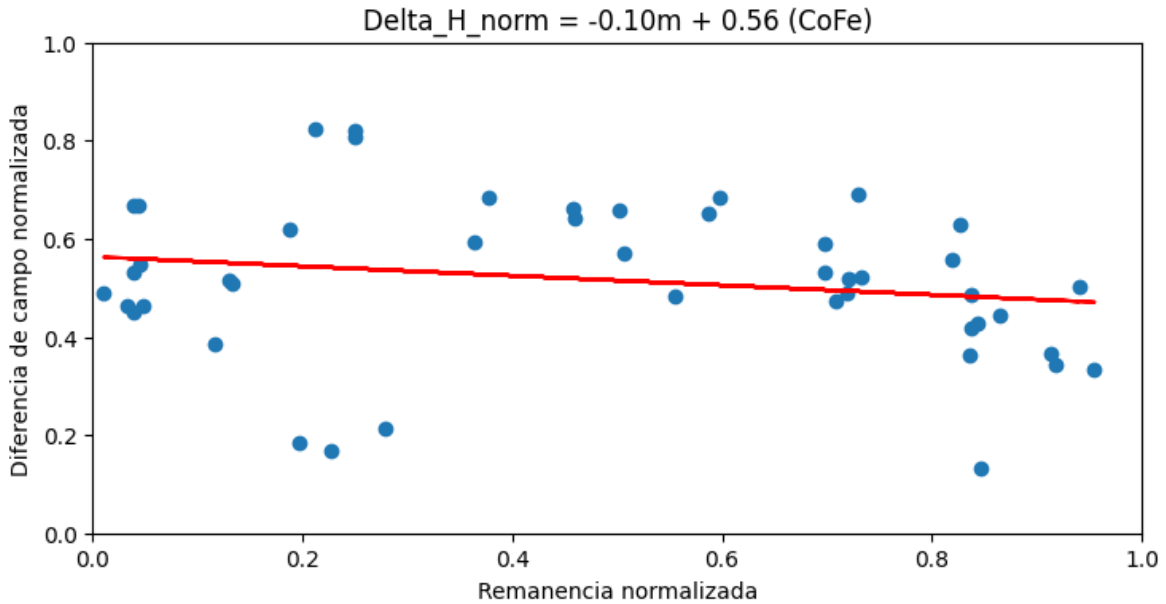


Figura 14: Datos normalizados y modelo lineal

Por último, se hizo un análisis de las medias de las distribuciones de la diferencia de campo normalizada —es decir, media de los valores en el eje Y— para investigar si se pudiese encontrar algo dentro de las distribuciones de puntos y comparar los resultados entre muestras comparándolos con sus respectivas alfas. Además, se obtuvo el error cuadrático medio (ECM) de cada una de las distribuciones de puntos a su modelo lineal para, también, poder comparar los resultados entre muestras. En la tabla 2 se muestran los resultados.

Tabla 2: Cálculo de la media y el ECM de cada una de las muestras además del valor de su IMD

Muestra	IMD	Media	ECM
CoFe	663.4040	0.5169	0.0242
Co66	203.0740	0.1439	0.0012
Co20	200.6368	0.5287	0.0154
NiFe	82.3600	0.4841	0.0041

3. Resultados del trabajo profesional

En la tabla 3 se muestra el conglomerado de valores obtenidos para cada muestra. Como se puede ver, la muestra de CoFe es la que presenta la mayor magnitud de en su IMD, seguido están las muestras de Co con pH's distintos, pero con IMD muy

similares y en último lugar se encuentra la muestra de NiFe con una magnitud de su IMD muy por debajo de la muestra de CoFe. Es importante resaltar que se puede percibir claramente de los datos una relación lineal entre la porosidad y el IMD confirmando la intuición de que a mayor cercanía mayor interacción entre cuerpos.

Tabla 3: Todos los valores obtenidos de cada una de las muestras a partir del análisis y síntesis.

Muestra	IMD	pH	P(%)	Media	ECM
CoFe	663.4040	-	12	0.5169	0.0242
Co66	203.0740	6.6	3	0.1439	0.0012
Co20	200.6368	2.0	3	0.5287	0.0154
NiFe	82.3600	-	1	0.4841	0.0041

Por otro lado, es importante el análisis cualitativo de las curvas de remagnetización de las cuatro muestras para poder observar la manera en la que afecta el valor de la IMD a la geometría de la RMC. En la figura 15 se observan curvas de las cuatro muestras. Aunque no representan a la misma secuencia, es interesante observar la diferencia en lo “escalonada” de las RMC a medida que disminuye la interacción. La diferencia se nota especialmente entre la curva de CoFe y la de NiFe —la muestra con mayor y menor interacción, respectivamente. LA RMC de la muestra de CoFe, aunque con escalones pequeños similares a los de la muestra de NiFe, se muestra con un comportamiento mucho más suave que la muestra de menor interacción. Tal situación da un indicio de que, a medida que aumenta la IMD, la curva pierde el comportamiento escalonado deseado.

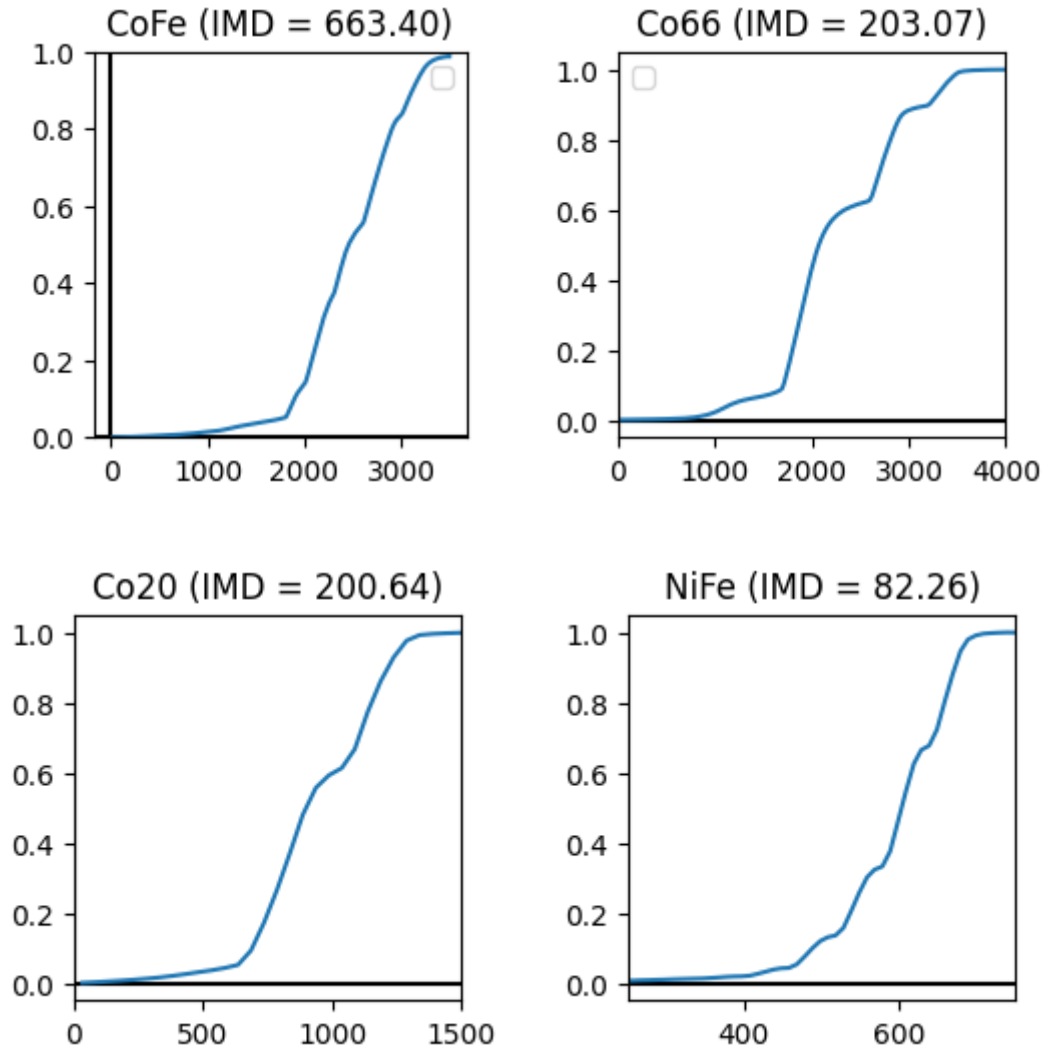


Figura 15: Ejemplos de RMC para cada una de las muestras en orden descendente de IMD.

Ahora bien, en la figura 16 se muestran los datos de diferencia de campo —entre la RMC ideal y la RMC sin interacción— normalizados para la muestra CoFe junto con el modelo lineal que los representa. Se puede ver que los datos tienen una tendencia negativa, se ven centrados respecto al eje Y y presenta una distribución homogénea a lo largo de la recta. Por otro lado, parecen muy dispersos respecto al modelo lineal.

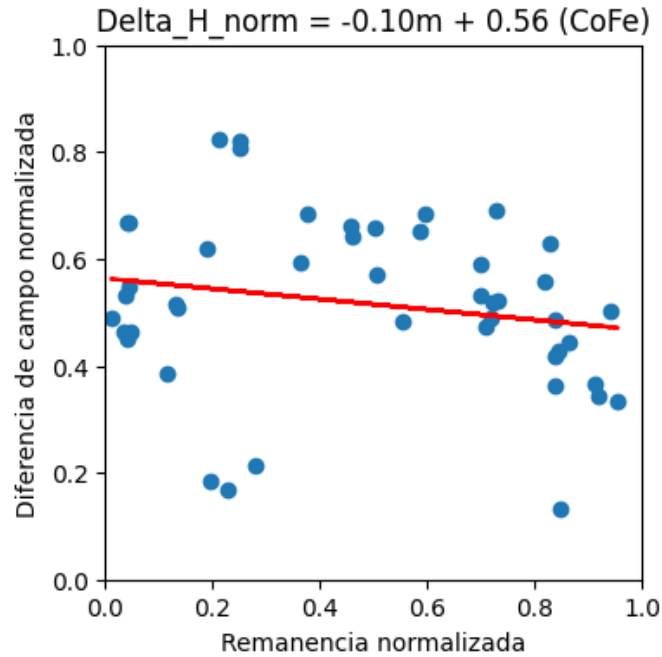


Figura 16: Distribución de las diferencias de campo normalizadas y su modelo lineal para la muestra de CoFe.

En la figura 17 se muestra el mismo gráfico, pero para la muestra de Co66. Aunque se mantiene un comportamiento negativo e, inclusive, un mucho mejor ajuste de la curva a los datos, no muestra una distribución uniforme a lo largo del modelo. Parece haber una mayor densidad de datos a medida que los valores se acercan a la remanencia máxima y las diferencias se van reduciendo hasta llegar a valores de cero.

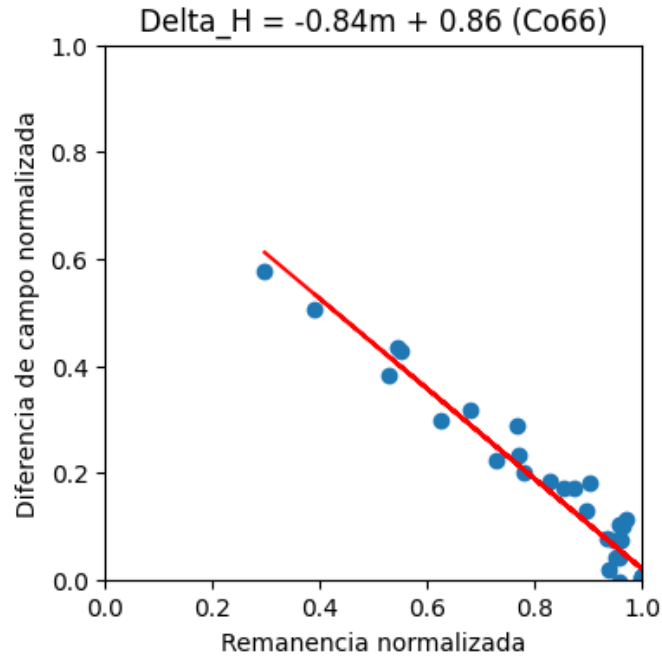


Figura 17: Distribución de las diferencias de campo normalizadas y su modelo lineal para la muestra de Co66.

Continuando, en la figura 18 se muestra la distribución de mediciones, pero para la muestra Co20. Esta muestra tenía menos secuencias de las cuáles hacer su análisis. Aún así, mantiene el comportamiento general que se analizó en la muestra de CoFe. Una pendiente negativa y una distribución homogénea de datos sobre el modelo lineal.

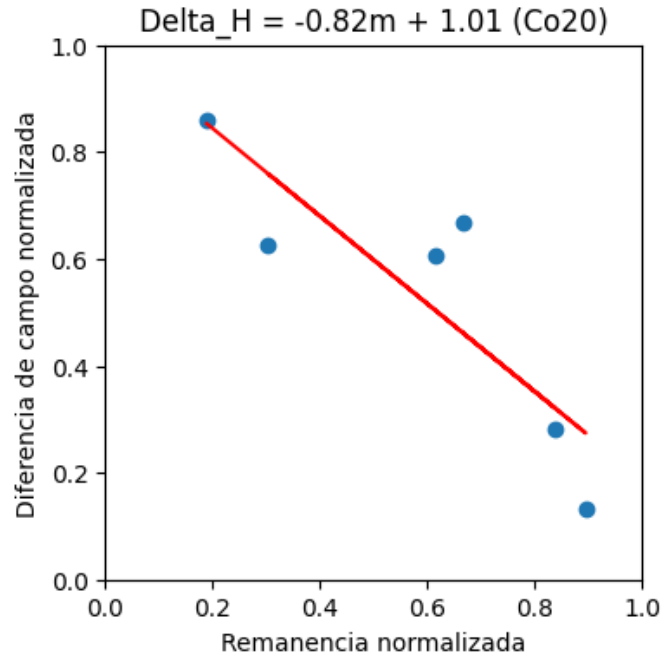


Figura 18: Distribución de las diferencias de campo normalizadas y su modelo lineal para la muestra de Co20.

Como última muestra, se analizaron los datos obtenidos de las secuencias de la muestra de NiFe —figura 19. Las propiedades de esta muestra son acordes a las anteriores. Aún así, se puede observar una acumulación de los datos al inicio de la curva —en valores bajos de remanencia. Este fenómeno podría verse explicado por que los datos analizados son pocos y poca uniformidad es esperable en tales condiciones.

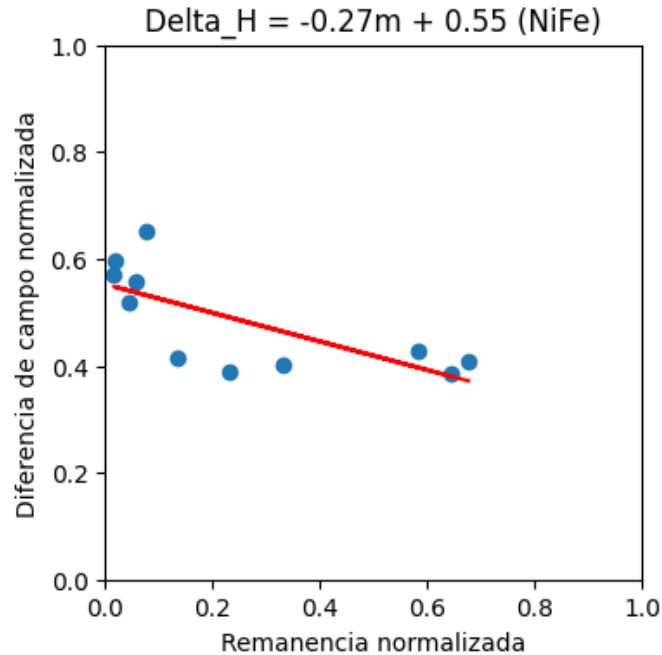


Figura 19: Distribución de las diferencias de campo normalizadas y su modelo lineal para la muestra de NiFe.

Una manera en la que se pueden interpretar estos resultados es relacionándolo con la RMC. Una pendiente negativa de los datos se refiere a que, a medida que aumenta la remanencia, la discrepancia entre la RMC sin interacción y la RMC ideal disminuye. Esto es, a niveles de remanencia altos, se pierde el efecto de la interacción.

Después, se hizo un análisis de las medias de estas diferencias y se graficaron los resultados encontrándolos con su valor de interacción —figura 20. Es de resaltar que todas las muestras, a excepción de la muestra de Co66 coinciden en un valor medio muy cercano al 0.5. Esto sugiere una invarianza de la distribución de diferencias respecto al valor de la IMD

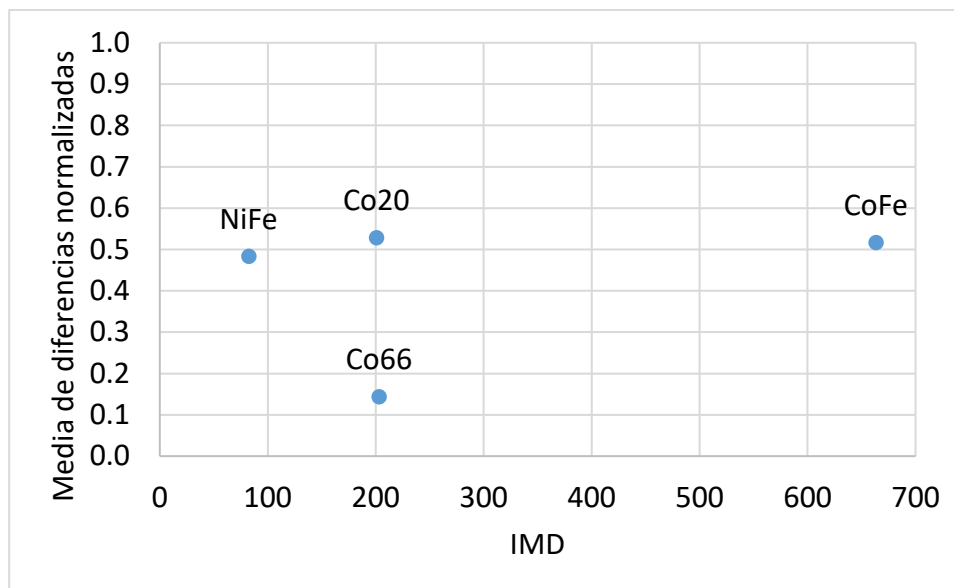


Figura 20: Medias de diferencias de campo de las cuatro muestras comparadas respecto a su IMD

Este resultado puede verse complementado con las figuras de las distribuciones y modelos lineales de cada muestra analizadas anteriormente. De generarse más experimentos en los que se mantienen las mismas relaciones encontradas en este proyecto, se podría aproximar la distribución de cualquier muestra como un modelo lineal con pendiente $p < 0$ de la siguiente forma:

$$\Delta H_{norm} \approx p \left(m - \frac{1}{2} \right) + \frac{1}{2} \quad (5)$$

Dada la situación en la que los datos estén uniformemente distribuidos a lo largo de un modelo con esta forma, se cumpliría que la media se encuentra en 0.5 y es invariante respecto a la IMD. Lo único que parecería variar en estas distribuciones sería la dispersión de los datos en función de la IMD, pues al graficar ECM de tales distribuciones con respecto a su modelo lineal apuntan a tener un comportamiento positivo —figura 21. Es decir, a medida que la interacción aumenta, la dispersión de los datos también.

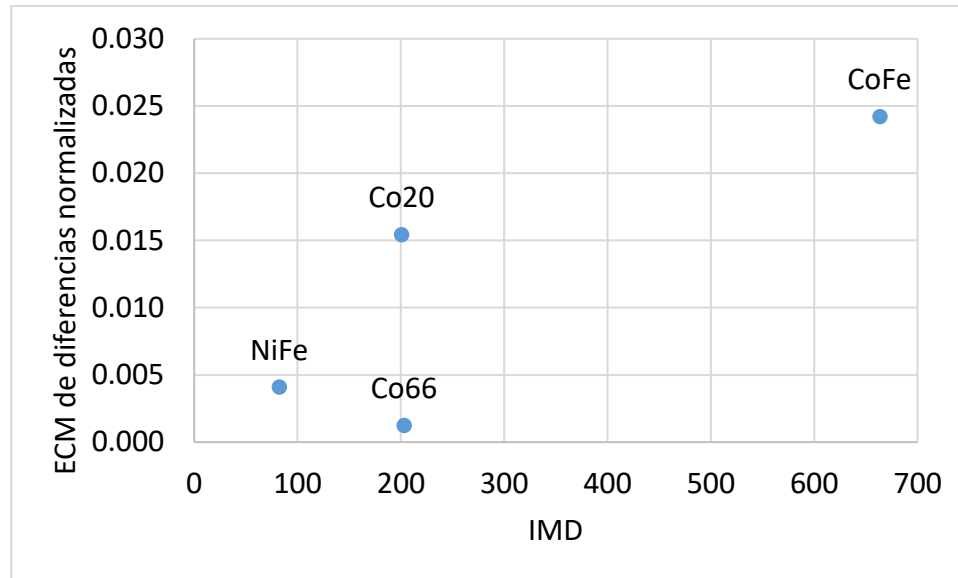


Figura 21: ECM de diferencias de campo de las cuatro muestras respecto a su modelo lineal comparadas con su IMD.

Por último, se tratará específicamente con los resultados de la muestra de Co66 pues parecen no seguir el comportamiento de las otras tres. Una explicación que se le puede dar a la situación es debido a que, como se expuso en el marco teórico, las anisotropías magneto cristalinas se ven eliminadas a valores de pH bajos. Esta muestra presenta un valor de pH de 6.6, lo que es prácticamente la mitad del espectro de pH y no podría considerarse un valor bajo. Las anisotropías dentro de la muestra parecen estar restando a la magnitud de la IMD eliminando la diferencia entre RMC ideal y sin interacción. Dicho lo anterior, es importante el análisis de más datos, además de que se registren con la intención de hacerlos comparables entre muestras para que no sea un resultado que está dependiendo de las secuencias específicas grabadas en el sistema en lugar de que sea un fenómeno físico relevante.

4. Reflexiones del alumno o alumnos sobre sus aprendizajes, las implicaciones éticas y los aportes sociales del proyecto

- Aprendizajes profesionales

En la realización de este proyecto tuve la oportunidad desarrollar y crear nuevas competencias profesionales. Pude mejorar mis habilidades de programación al haber hecho todo el análisis de los datos en código de Python. También, pude repasar conceptos teóricos respecto de materiales magnéticos de una manera más práctica al ver aplicaciones reales de ellos en los dispositivos que trata el presente reporte. Específicamente, tengo un concepto más claro de el concepto de ciclo de histéresis y cómo se ve modificado por el tipo de material con el que se esté tratando. Por otro lado, tengo una mejor comprensión de cómo la estructura interna de un material (o sistema) afecta sus propiedades magnéticas. Pues la efectividad del sistema de nanoalambres trabajado depende del método de síntesis y la porosidad de la membrana en donde están los nanoalambres.

Por último, actualmente trabajo en una empresa de analítica de datos y este proyecto puso a prueba todas aquellas competencias desarrolladas en mi trabajo. Además, disfruté poner a prueba mis habilidades en un ámbito de investigación en ciencia y tecnología, pues es a lo que quiero dedicar mi vida. Todas las intuiciones estadísticas y de programación que he desarrollado en el trabajo me fueron de uso para proponer soluciones o hipótesis en el análisis de resultados. Por ejemplo, los análisis de regresión, los análisis de las medias y los análisis del error cuadrático medio.

- Aprendizajes sociales

Al ser un PAP muy técnico y sin una aplicación social directa, no me parece ver que, de manera inmediata, haya afectado la realidad social de alguien más. Aún así, las nuevas tecnologías de almacenamiento de información son necesarias y serán cada vez más importantes en la vida de todos. Aquellas personas que no puedan tener acceso a tecnologías de la información se verán alienadas del desarrollo social y económico de su región, país y del mundo.

Por esta razón es que considero importante que, en un mercado en el que cada vez los productos de tecnología de la información (computadoras, consolas, televisiones, productos con internet de las cosas, etc.) son más costosos, se creen nuevas tecnologías más baratas y de mejor rendimiento para que no se limite su consumo a las clases sociales altas que puedan costearlo.

Tal situación, en una época en la que la mayoría de los trabajos utilizan computación además de una inminente e incierta aplicación generalizada de la inteligencia artificial, generará una mayor segregación de las clases más pobres de la sociedad a menos de que se encuentre una manera de integrarlas al mercado laboral moderno.

- Aprendizajes éticos

No tuve muchos aprendizajes éticos nuevos, pero sí reforcé ciertas actitudes que ya consideraba importantes. Al tener reuniones semanales con la doctora Yenni, me parecía importante ser claro en mis dudas y comentarios para respetar su tiempo y hacer las interacciones lo más concisas posibles. También, muchas veces me resulta fácil tender a preguntar “de más” en lugar de buscar la información por mi cuenta limitando mi aprendizaje. Por esta razón procuré limitar mis preguntas priorizando la investigación personal.

Aunque actualmente no estoy interesado en áreas de investigación que tienen aplicaciones directas a la sociedad, sí estoy interesado en generar productos y conocimiento de valor para la sociedad que vayan de la mano de principios ecológicos y de igualdad social. Aún no lo tengo muy claro, pero me gustaría aplicar la nanotecnología en esa parte de mis intereses pues me parece que posibilidades para generar cambios radicales en ciencia de materiales y en el combate contra el cambio climático.

- Aprendizajes en lo personal

Tanto este PAP como el anterior los trabajé de manera individual. Ambos fueron proyectos ambiciosos y analíticamente intensos. Me ha servido para corroborar mis intereses en el acercamiento a la ciencia desde el punto de vista matemático y analítico en lugar de uno experimental y el hecho de que haya desarrollado estos dos proyectos sin compañeros estudiantes me enorgullece y me parece satisfactorio haberlo hecho de esta manera ya que me pude demostrar a mí mismo que vale la pena hacer lo que mi interés y gusto me indican en lugar de hacer lo que me implicaría menor carga de trabajo y responsabilidad.

Por otro lado, la nanotecnología nunca me ha convencido lo suficiente como para pasar a un posgrado en ella. Este trabajo me permitió darle una oportunidad a la disciplina desde un ámbito que me interesa, el análisis y las matemáticas. Aún así, no me siento muy atraído hacia la disciplina y pienso que puedo tomar una decisión más informada respecto a lo que quiero dedicar mis próximos años de estudio habiendo tenido esta experiencia.

5. Conclusiones

Aunque originalmente se esperaba poder encontrar una expresión matemática que relacionara a la interacción magnetostática con la magnetización o el campo aplicado —una relación más directa a lo encontrado—, se pudieron encontrar ciertas cualidades de cómo esta interacción afecta la distribución de diferencias entre campos respecto de las RMC ideales y RMC sin interacción. Paradójicamente, parece que el resultado encontrado es que no afecta a tales distribuciones —a su media, específicamente. Es decir, sin importar el valor de la interacción, la media de la distribución se mantendrá en 0.5. En lo que sí parece tener un impacto sustancial, es en la dispersión de los datos. Pues aumenta a medida que la interacción también lo hace.

A continuación, se proponen pasos que se consideran pertinentes para continuar con el proyecto:

- Estudiar la relación que se tiene entre la dispersión de los datos y la interacción. Pues parece tener un claro comportamiento positivo.
- Estudiar la relación entre los rangos de los valores de las diferencias de campo normalizadas —el rango del modelo lineal en Y. En este proyecto se hizo solo el análisis de la media de tal rango, pero podrían hacerse otros. Desviación estándar, por ejemplo.
- Realizar mediciones con la comparabilidad en mente. Esto es, grabar las mismas secuencias en cada una de las muestras para poder hacer comparables los resultados. Dentro de este punto también está el procurar que las distribuciones de campos en las grabaciones sean homogéneas para garantizar que no haya sesgos de la distribución de los datos hacia ningún rango de los valores de la remanencia.
- Por último, de ser posible, utilizar más muestras procurando que sean muestras en las que las anisotropías son eliminadas. Esto con el fin de confirmar la relación de invarianza de las medias, así como la relación ascendente con el error cuadrático medio.

6. Bibliografía

- A. Encinas, L. V. (2007). Configurable multiband microwave absorption states prepared by field cycling in arrays of magnetic nanowires. *Nanotechnology*.
- Darques, M. (2004). Controlled changes in the microstructure and magnetic anisotropy in arrays of electrodeposited Co nanowires induced by the solution pH. *Journal of Physics*, 1411-1416.
- J. M. Martínez Huerta, e. a. (2012). Self consistent measurement and removal of the dipolar interaction field in magnetic particle assemblies and the determination of their intrinsic switching field distribution. *Journal of Applied Physics*.
- Kou, X. (2011). Memory Effect in Magnetic Nanowire Arrays. *ADVANCED MATERIALES*, 1393-1397.

- Lotnyk, A. (2019). Phase change thin films for non-volatile memory applications. *Nanoscale Advances*, 3836-3857.
- Makarov, A. (2012). Modeling Emerging Non-volatile Memories: Current Trends and Challenges. *Physics Procedia*, 99-104.
- Medina, J. D. (2005). Anisotropía Magnética y Estados Monodominio en Redes de Nanoalambres de Cobalto. San Luis Potosí, México: INSTITUTO DE FÍSICA "MANUEL SANDOVAL VALLARTA" Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Y. Velázquez, A. E. (s.f.). Bistable Magnetic Nanowires: A New Approach to Non-Volatile Memory with Single Readout and Automatic Deletion.