

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO CRÍTICO DE MATERIALES MAGNÉTICOS
NANOESTRUCTURADOS MEDIANTE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL**

**CARLOS ALBERTODUQUE GARCIA
MARIO ADOLFOTORO OSORIO
MARIA ALEJANDRATOVAR VALENCIA**

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
MANIZALES
2016**

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO CRÍTICO DE MATERIALES MAGNÉTICOS
NANOESTRUCTURADOS MEDIANTE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL**

**CARLOS ALBERTODUQUE GARCIA
MARIO ADOLFOTORO OSORIO
MARIA ALEJANDRATOVAR VALENCIA**

Estudio del comportamiento crítico de materiales magnéticos nanoestructurados
mediante simulación computacional.

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
MANIZALES
2016**

AGRADECIMIENTOS

En nombre de los participantes de este proyecto como coinvestigadores queremos expresar nuestros más sinceros agradecimientos, primero que todo a Dios por permitirnos estar cada día de pie para afrontar los nuevos retos, a todos nuestros familiares quienes nos han acompañado y apoyado en este largo camino de formación.

Agradecimientos muy especiales al profesor Helver Augusto Giraldo Daza magister en ciencias –física quien ha sido nuestro tutor y guía no solo en el desarrollo de este proyecto sino también en nuestra formación universitaria y personal, sus conocimientos, su orientación, su persistencia y paciencia han sido fundamental para nuestra labor, toda nuestra gratitud por su tiempo y dedicación.

También queremos expresar nuestro agradecimiento a la Universidad de Manizales por el apoyo brindado durante nuestra formación, la oportunidad de vincularnos al proyecto y el acompañamiento en todo momento, al Ingeniero Alejandro Cardona por su buena disposición para la ejecución del proyecto.

Agradecimientos al Profesor Luis Fernando Mulcú Nieto, Magister en ciencias-Física, quien estuvo presto a compartir sus conocimientos y experiencias en los temas tratados.

Finalmente damos gracias a nuestros amigos quienes han sido una compañía en todo este proceso de formación, muchas gracias por su tiempo.

CRÉDITOS

Las personas que participaron en este proyecto fueron las siguientes:

NOMBRE COMPLETO	FUNCIÓN EN EL PROYECTO	DIRECCIÓN DE CONTACTO	CORREO ELECTRÓNICO
Helver Augusto Giraldo Daza	Investigador principal	Carrera 9ª # 19-03- Campo Hermoso	hdaza@umanizales.edu.co
Luis Carlos Correa Ortiz	Docente coinvestigador	Carrera 9ª # 19-03- Campo Hermoso	lcco@umanizales.edu.co
Mª Alejandra Tovar Valencia	Estudiante coinvestigador	Km 7 Vía al magdalena.	maleja2408@gmail.com
Mario Adolfo Toro Osorio	Estudiante coinvestigador	Calle 100c Nro 33b-32	mario-648@hotmail.com
Carlos Alberto Duque Garcia	Estudiante coinvestigador	Calle 100ª Nro 32-38	carlos.7054@hotmail.com

PÁGINA DE ACEPTACIÓN

<NOMBRE COMPLETO>
EVALUADOR

<NOMBRE COMPLETO>
EVALUADOR

<NOMBRE COMPLETO>
EVALUADOR

Manizales, <día> de <mes> de <año>

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	14
1. ÁREA PROBLEMÁTICA.....	15
2. OBJETIVOS.....	16
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
3. JUSTIFICACIÓN.....	17
4. MARCO TEÓRICO.....	18
4.1 HISTORIA DE LOS MATERIALES MAGNÉTICOS.....	18
4.2 TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN.....	24
4.3. DEFINICIÓN Y CALCULO DE EXPONENTES CRÍTICOS.....	25
4.3.1 MODELOS TEÓRICOS.....	26
4.3.1.1 TEORÍA DE CAMPO MEDIO.....	26
4.3.1.2 TEORÍA DE HEINSENBERG.....	26
4.4 SIMULACIÓN COMPUTACIONAL: MÉTODO DE MONTECARLO.....	27
4.5 ANTECEDENTES.....	28
5. METODOLOGÍA.....	30
5.1 TIPO DE TRABAJO.....	30
5.2 PROCEDIMIENTO.....	30
5.2.1 Fase 1. REVISIÓN DOCUMENTAL.....	30
5.2.2 Fase 2. SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE PROPIEDADES MAGNÉTICAS EN MATERIALES NANOESTRUCTURADOS.....	30

5.2.3 Fase 3. REDACCIÓN Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS FINALES.....	30
6. RESULTADOS.....	31
6.1 DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS.....	30
6.2 DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	37
7. CONCLUSIONES.....	40
8. RECOMENDACIONES.....	41
BIBLIOGRAFÍA.....	42
ANEXOS.....	46

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ciclo de Histéresis.....	18
Figura 2. Material Ferromagnético dividido por dominios.....	19
Figura 3. Material Ferromagnético con tendencia a alineación de espines.....	19
Figura 4 Material Ferromagnético con todos sus espines alineados.....	19
Figura 5. Material Paramagnético.....	21
Figura 6. Curva de temperatura de Curie.....	21
Figura 7. Transición de fase ferromagnética-Paramagnética en un material inhomogéneo.....	23
Figura 8 Ley de Faraday.....	24
Figura 9 Laso de histéresis.....	24
Figura 10 Magnetización en función de temperatura para la muestra número 8 con 40 ciclos.....	32
Figura 11 Magnetización en función de temperatura para la muestra número 16 con 40 ciclos.....	33
Figura 12 Magnetización en función de temperatura para la muestra número 24 con 40 ciclos.....	34
Figura 13 Magnetización en función de temperatura para la muestra número 8 con 80 ciclos.....	35
Figura 14 Magnetización en función de temperatura para la muestra número 16 con 80 ciclos.....	36
Figura 15 Magnetización en función de temperatura para la muestra número 24 con 80 ciclos.....	37

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla1. Temperatura de Curie.....	22
Tabla2. Exponentes críticos para algunos sistemas tanto teóricos como prácticos.....	26
Tabla 3 Resultados de muestras con Delta T 40.....	36
Tabla 4 Resultados de muestras con Delta T 80.....	36

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Muestra 8 con Delta T 40.....	44
ANEXO B. Muestra 8 con Delta T 80.....	45
ANEXO C.Muestra 16 con Delta T 40.....	47
ANEXO D.Muestra 16 con Delta T 80.....	50
ANEXO E.Muestra 24 con Delta T 40.....	52
ANEXO F.Muestra 24 con Delta T 80.....	54

GLOSARIO

Átomo: La partícula más pequeña de un elemento que puede tomar parte en una reacción.

Campo magnético: Campo de fuerzas que ocupa el espacio alrededor de todo imán o alambre que conduce corriente.

Espín: Momento angular intrínseco de una partícula subatómica, caracterizado por su movimiento de rotación.

Física: Ciencia que investiga los conceptos fundamentales de materia, energía y espacio y las relaciones entre ellos. utilizando operaciones matemáticas.
frecuencia - el número de ondas o ciclos por segundo.

Galvanómetro: Instrumento de precisión utilizado para la medida de corrientes eléctricas de pequeña intensidad.

Histéresis: En física, fenómeno que presentan ciertos materiales en los que la variación de alguna de sus propiedades no sigue de forma reversible la variación del parámetro que la origina, como por ejemplo la imanación con respecto a la intensidad de campo magnético.

Imán: En física, sustancia que, por condición natural o adquirida, tiene la propiedad de atraer al hierro.

Kelvin: Es una de las unidades del Sistema Internacional de Unidades y corresponde a una fracción de $1/273,16$ partes de la temperatura del punto triple del agua. Se representa con la letra K, es la unidad de temperatura de la escala creada por William Thomson, Lord Kelvin, en el año 1848.

Magnetismo: Conjunto de fenómenos atractivos y repulsivos producidos por los imanes y las corrientes eléctricas.

Magnitudes Físicas: Son todas las propiedades de los cuerpos que pueden ser medidas directamente o con instrumentos calibrados.

Medir: Es el proceso científico que permite cuantificar una observación utilizando un marco de referencia.

Modelo científico: Es el conjunto armonioso de principios y leyes que permiten explicar y predecir el comportamiento de la realidad estudiada.

Método Andreas Berger : Método para calcular exponentes críticos en materiales inhomogéneos

RESUMEN

El presente informe da cuenta de cómo se realizó un estudio de las propiedades magnéticas de materiales nanoestructurados mediante técnicas de simulación computacional, con ellas, se espera reproducir el comportamiento crítico de materiales magnéticos nanoestructurados y predecir su comportamiento a diferentes cambios de temperatura. De igual manera las condiciones de frontera periódicas debieron tenerse en cuenta para lograr estados más realistas. Cambios en los parámetros de forma en estas nano-estructuras revelaría propiedades con posibles aplicaciones tecnológicas. Análisis de la evolución de momentos magnéticos en función de la temperatura y el campo externo, al interior de cada partícula y del conjunto permitieron indagar en la fenomenología granular de las nanoestructuras.

Se desarrolló el proyecto en tres fases, iniciando con la búsqueda y selección de material bibliográfico, seguido de la simulación computacional de propiedades magnéticas en materiales nano-estructurados y finalmente los resultados obtenidos como producto de dichas simulaciones, fueron analizados y modelados para obtener parámetros como exponentes críticos.

A partir de la magnetización vs temperatura se determinaron los exponentes críticos (β) para determinar cómo están alineados los espines al igual que el comportamiento de la región crítica (ΔT).

PALABRAS CLAVES:

Magnetismo, temperatura, espín, región crítica, simulación, Ley de Curie.

ABSTRACT

This report describes how a study of the magnetic properties of nanostructured materials was performed using computer simulation techniques with them, it is expected to play the critical behavior of nanostructured magnetic materials and predict their behavior to different temperature changes. Similarly periodic boundary conditions must be taken into account to achieve more realistic conditions, changes in the parameters of how these nano structures would reveal properties with potential technological potential. Analysis of the evolution of magnetic moments in function of temperature and external field, within each particle and the assembly allowed investigate the granular phenomenology of nanostructures.

The project was developed in three phases, starting with the search and selection of bibliographical material, followed by computer simulation of magnetic properties in nanostructured materials and finally the results achieved from these simulations were analyzed and modeled to obtain parameters as critical exponents .

From the magnetization vs temperature critical exponents (β) they were determined to determine how the spins are aligned like the behavior of the critical region (DT).

KEY WORDS:

Magnetism, temperature, spin, critical region, simulation, Law Curie.

INTRODUCCIÓN

El siglo veinte fue sin duda el de mayor avance tecnológico de la humanidad; sin embargo, el hombre busca día a día, continuar con esta evolución dando nuevos usos a los elementos que se encuentran en su entorno. Para cumplir con este objetivo se busca generar nuevo conocimiento y fabricar todo tipo de aparatos o dispositivos que mejoren la calidad de vida, cada día los materiales magnéticos tienen un mayor auge y aplicaciones en el área tecnológica. El magnetismo es un fenómeno natural por el cual un objeto ejerce una fuerza de repulsión o atracción sobre otro material, existen algunos materiales muy conocidos como el hierro, cobalto y níquel que tienen propiedades magnéticas fácilmente detectables.

Es importante comprender la terminología utilizada en el campo de la física enfocado a los materiales magnéticos, al igual que las formulas y sus orígenes, esto garantiza dominio en el tema tratado y la calidad de la información recolectada y actividades realizadas.

En este trabajo se presenta un estudio de investigación sobre un material magnético bajo simulación computacional, buscando predecir el comportamiento de éste frente a una temperatura aplicada. Se han observado varios fenómenos en este tipo de materiales, en los cuales las variaciones de las propiedades magnéticas permiten dar usos diferentes y aplicaciones varias al material en relación con su comportamiento.

Una vez investigado el tema, y con el conocimiento apropiado se realizaran simulaciones computacionales con el fin de predecir comportamientos magnéticos de algunos materiales, haciendo aportes significativos a los estudios que se vienen realizando sin necesidad de realizar muestreos físicos que impliquen altos costos de ejecución.

1. ÁREA PROBLEMÁTICA

¿Bajo principios de la física de materiales magnéticos y por medio de simulaciones computacionales, es posible reproducir el comportamiento crítico de materiales magnéticos nano-estructurados y predecir su comportamiento a diferentes cambios estructurales?

El estudio de propiedades magnéticas de los materiales, es un tema de gran importancia a nivel nacional e internacional, ya que aporta significativamente al desarrollo científico y tecnológico; siendo más fuerte, en los últimos años, debido al desarrollo de materiales nano-estructurados y con ellos el surgimiento de la nanotecnología.

Actualmente en Colombia, son varios los grupos de investigación, que están trabajando en este campo. Entre ellos, el grupo de investigación de Magnetismo y Simulación de la Universidad de Antioquia en Medellín, PCM Computacional Applications de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, Magnetismo y Materiales Avanzados, de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, el grupo de propiedades magnéticas y magneto-ópticas de nuevos materiales, de la Universidad Tecnológica de Pereira, línea de investigación en Nanomagnetismo de Cali, entre otros. Muchos de estos grupos se dedican a la investigación experimental, otros, al campo de la simulación, los cuales proveen un conocimiento teórico-práctico en materiales nano-estructurados.

La investigación en el campo experimental requiere de equipos de medición altamente costosos así como la ejecución de muestras y su tratamiento. Además de lo anterior, también se generan costos adicionales por manutención y la necesidad de espacios físicos. Una alternativa menos costosa y muy valiosa, es la simulación computacional, que permite obtener información relevante de un sistema físico, aportando sin duda, al campo experimental y teórico.

Sin embargo, en lo relacionado con el área de las simulaciones de nanoestructuras granulares, se han tratado de reproducir y predecir diferentes comportamientos magnéticos a nanoescala y microescala, encontrando que estos modelos no han sido totalmente correctos para toda la gama de valores que pueden tomar las variables. Tales situaciones no han sido estudiadas en detalle y son indudablemente de gran importancia para los futuros desarrollos tecnológicos.

La clave de este proyecto es intentar observar de una manera más clara los diferentes efectos locales que suceden en el interior, la frontera y el conglomerado de las partículas.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Describir y predecir el comportamiento magnético de materiales nanoestructurados en la región crítica, mediante simulaciones computacionales.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar el comportamiento magnético a partir de curvas de magnetización por sitio en función de la temperatura y el tamaño de partícula, obtenidas por simulación bajo la elección de dimensiones acorde con costos computacionales accesibles.
- Calcular los exponentes críticos de transiciones de fase magnética de un estado paramagnético a un estado ferromagnético en materiales nanoestructurados a partir de simulaciones computacionales.

3. JUSTIFICACIÓN

Con el presente proyecto se busca adquirir y afianzar conocimiento de la clasificación, características y comportamiento de materiales magnéticos nanoestructurados realizando simulaciones computacionales basadas en el método de Montecarlo que busca predecir el comportamiento de estos materiales a diferentes cambios estructurales.

Con la ejecución de este proyecto se realizarán simulaciones a bajo costo sin la necesidad de recurrir a un muestreo físico para identificar el comportamiento de ciertos materiales ferromagnéticos, adicional a esto, realizar aportes y experiencias a los estudios que actualmente se vienen realizando.

Identificar claramente el comportamiento de materiales ferromagnéticos da una idea amplia de sus posibles aplicaciones teniendo en cuenta sus características principales y la variación de estas al incluir factores externos.

Como factor externo se incluirá la temperatura y con el apoyo de la Ley de Curie observar el comportamiento de los materiales magnéticos al aplicar ciertas temperaturas.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 HISTORIA MATERIALES MAGNETICOS

En sus inicios el magnetismo se relacionaba con los imanes pero en 1820 Hans Christian Oersted descubrió una relación entre la electricidad y el magnetismo al poner a circular corriente por un hilo conductor y observar el movimiento que se producía en una aguja imantada que se encontraba en la inmediatez de este. (Begoña Blasco Laffón, 2007, pág. 244)

En el año 1925 , tres investigadores Ralph Kronig, Goudsmit y Uhlenbeck, introdujeron el espín como una propiedad física de las partículas elementales y partieron de la idea de que el electrón que orbita alrededor del núcleo atómico es similar a la tierra en su movimiento alrededor del sol pero en el caso del electrón no se puede calcular el momento angular de rotación en función de la masa pero se sabe que el electrón posee un carga eléctrica negativa y al girar sobre su propio eje genera una fuerza o campo magnético que se le denomino espín, el espín proporciona una medida del momento angular de toda partícula. (A. P French, 1982)

Los materiales magnéticos se clasifican en dos grandes grupos, materiales blandos y duros, esta clasificación se da dependiendo de las propiedades de cada material, los materiales magnéticos blandos son aquellos que una vez magnetizados hasta su punto de saturación y eliminado el campo aplicado pierden su magnetización con facilidad, es decir que la desimantación resulta fácil en estos materiales, al contrario los materiales magnéticos duros se comportan como un imán permanente ya que conservan sus propiedades magnéticas a un en ausencia del estímulo o campo magnético aplicado, estos materiales son difícilmente desimantados aun en presencia de campos magnéticos de sentido contrario, a esta propiedad se le conoce como histéresis (Figura1)

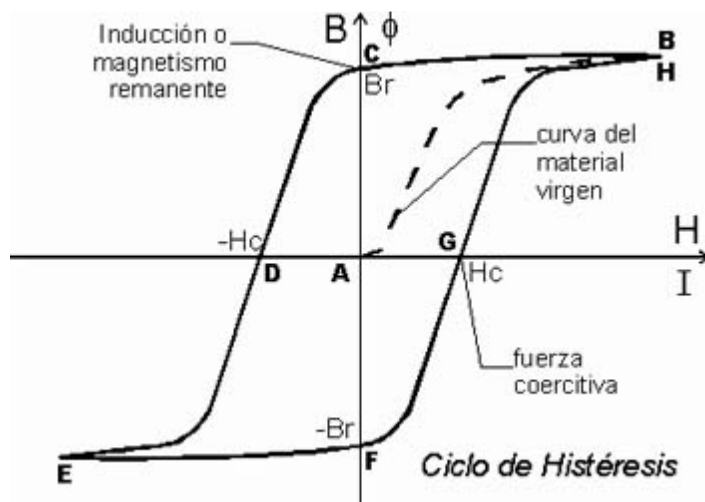


Figura1 Ciclo de Histéresis. (Paul & Gene, 2005, pág. 817)

En los materiales ferromagnéticos existe la presencia de dominios o zonas, estos dominios son un sector del materiales que poseen unas características en particular, los dominios son pequeñas zonas en las cuales todos los espín están apuntando en una misma dirección y son divididos por las paredes de Bloch que son los limites que separan un dominio de otro (Plonus, 1994, pág. 440), en pocas palabras es una parte del material que se encuentra magnetizado o en su punto de saturación, esto no significa que el material tenga un alto grado de magnetismo ya que es muy posible que la suma de los totales de los diferentes dominios del material se anulen entre sí.

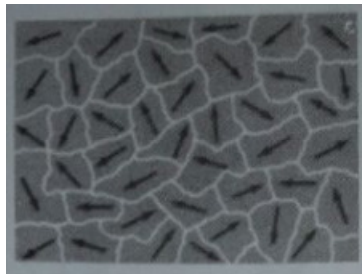


Figura 2 Material Ferromagnético Dividido por dominios. (Serway, 1997, pág. 225)

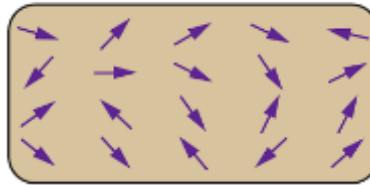


Figura 3 Material Ferromagnético Alineación de espines. (Martín, 2012, pág. 13)

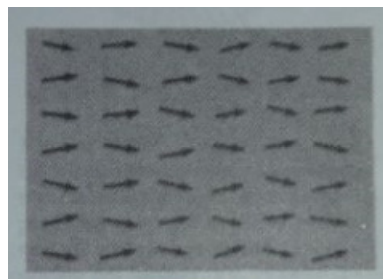


Figura 4 Material Ferromagnético con todos sus espines alineados. (Serway, 1997, pág. 225)

En la figura 2 se puede observar claramente las divisiones que se presentan en la primera imagen, podemos apreciar las flechas de cada grupo o dominio apuntando en una dirección, estas flechas representan los espines, es decir que si tomamos solo el dominio estaríamos en presencia de un imán o material magnético con un alto grado de magnetismo.

Al aplicar un campo magnético externo los espines de los diferentes dominios tienen a alinearse en un mismo sentido (Figura 3), es muy probable que todos los espines de los dominios no se encuentren alineados sin embargo aplicando un campo magnético externo más fuerte tienden a alinearse todos los espines, el valor magnético del material tiende a aumentar hasta que todos los espines de los diferentes dominios estén apuntando en una misma dirección, cuando esto sucede se dice que el material se encuentra en su punto de saturación magnética, aun aplicando un campo magnético más fuerte el material no podrá aumentar su magnetismo, este comportamiento se puede observar en la (Figura 4)

En la figura 1 ciclo de histéresis se observa de cierta forma el comportamiento anteriormente nombrado, la imagen muestra una relación entre un campo magnético aplicado y el magnetismo del material, una vez los materiales magnéticos estén magnetizados o en su punto de saturación es posible que algunos conserven esta propiedad como se nombró anteriormente y obtienen la clasificación de materiales magnéticos duros, si observamos la imagen vemos desde el punto A hasta el punto B como el material se vuelve magnético a medida que el campo magnético aplicado aumenta, el aumento del magnetismo del material es exponencial hasta cierto punto, este punto es el punto de saturación, podemos observar que en el punto B el material ha tomado un comportamiento lineal pues todos sus espines ya se encuentran correctamente alineados y no es posible que su campo magnético interno aumente más.

Si se observa el punto B-C se verá que el material aún conserva un alto grado de magnetismo (Casi un 100%) a pesar que el estímulo (Campo Magnético Externo) se ha retirado en su totalidad Punto B este valor es conocido como campo magnético remanente.

Para desmagnetizar el material es necesario aplicar un campo magnético opuesto (punto C-D) en el cual podemos observar como progresivamente disminuye el campo magnético del material hasta llegar a cero Punto D, la intensidad del campo magnético aplicado para la desmagnetización es conocido como Fuerza coercitiva, la fuerza coercitiva o fuerza de coercitividad es la intensidad del campo que es necesario para volver a desmagnetizar completamente un imán.

Si se aplica un campo magnético opuesto el material será magnetizado nuevamente y sus espines se alinearán en torno al campo aplicado Punto E, el comportamiento se repite nuevamente según lo explicado, el material conserva su magnetismo aun cuando el estímulo es retirado Punto F.

Aplicando un campo magnético opuesto se puede observar que es posible que el material ferromagnético pierda sus propiedades magnéticas llevando este a 0, sin embargo existe otra forma demostrada en el cual el material deja de ser ferromagnético y pasa a ser paramagnético, los materiales paramagnéticos se caracterizan por tener un comportamiento magnético muy débil, debido a que sus espines no se encuentran alineados, por el contrario todos los espines se encuentran desordenados y apuntando en una dirección diferente Figura 5.

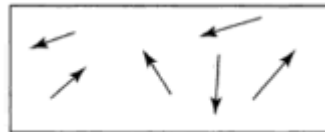


Figura 5. Material Paramagnético. (Poole & Owens, 2007, pág. 180)

Pierre Curie, un físico francés, en 1880 descubrió junto a su hermano Jacques la piezoelectricidad que consistía en comprimir un cristal de cuarzo que generaba un potencial eléctrico (Santos, 2010), poco tiempo después, en 1895 descubrió que algunos materiales al ser sometidos a una temperatura en particular dejan de ser ferromagnético, en este caso la temperatura era inversamente proporcional al magnetismo del material ya que al someter a los materiales a una temperatura estos dejaban de ser ferromagnético y pasaban a ser paramagnéticos, como se puede observar en la Figura 6.

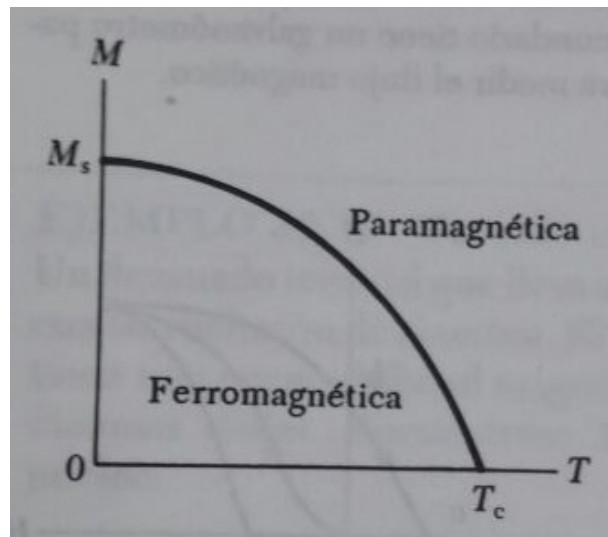


Figura 6. Curva de temperatura de Curie. (Serway, 1997, pág. 228)

En la anterior (figura 6) se puede observar como disminuye progresivamente la magnetización del material a medida que aumenta la temperatura, en la tabla.1 vemos las temperaturas ya definidas para algunos materiales los cuales dejan de ser ferromagnético pasando a ser paramagnéticos.

Los materiales paramagnéticos tienen una susceptibilidad magnética pequeña, la imantación que adquieren estos materiales con la presencia de un campo magnético externo se puede llegar a perder con facilidad, sin embargo si existe un campo externo constante se puede cumplir la Ley de Curie aplicando temperatura a este.

TABLA 30.3 Temperatura de Curie para algunas sustancias ferromagnéticas

Sustancia	T_c (K)
Hierro	1043
Cobalto	1394
Níquel	631
Gadolinio	317
Fe_2O_3	893

Tabla1 Temperatura de Curie. (Serway, 1997, pág. 229)

En la figura 7 se observa un punto denominado temperatura de Curie o región de transición en la cual el material deja de ser ferromagnético, antes de llegar a este punto el material tiene un desplome significativo en su magnetización, esto es conocido como la región crítica y está plenamente identificada para algunos materiales pues el desplome es claramente evidente sin embargo cuando se realizan aleaciones de materiales es posible que la región crítica varíe notablemente dependiendo de las características de los materiales que hacen parte de la aleación.

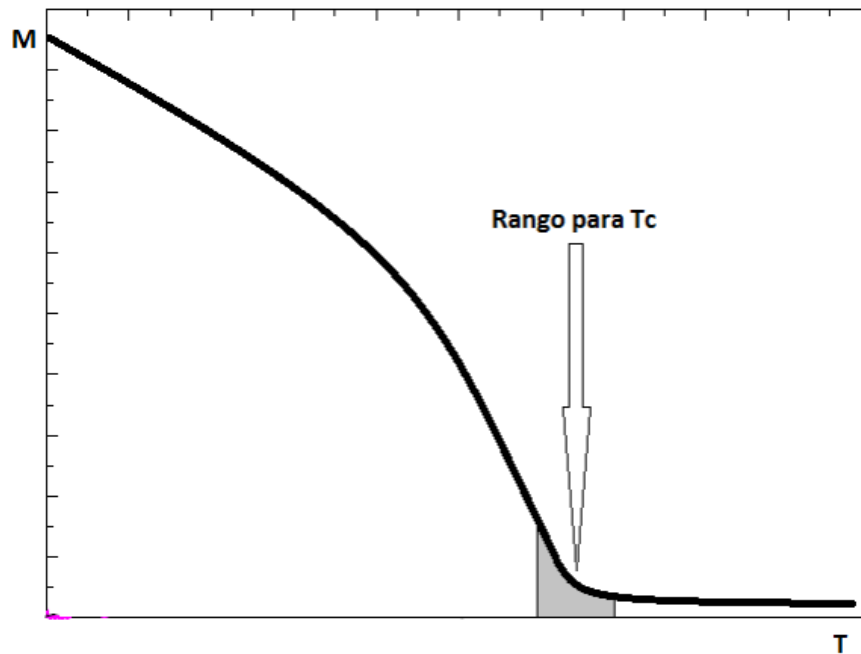


Figura 7 Transición de fase ferromagnética-Paramagnética en un material inhomogéneo. (Nieto, 2012, pág. 10)

El movimiento de las cargas eléctricas pueden producir un campo magnético y viceversa por lo tanto una corriente eléctrica podría ser inducida en un circuito por un campo magnético variable, este fue un gran aporte que hizo Michael Faraday, autor de la Ley de Inducción de Faraday, para sus experimentos Faraday utilizó un galvanómetro el cual es un instrumento que sirve para determinar el sentido y la intensidad de una corriente eléctrica observada en una aguja magnética que posee el galvanómetro, Faraday observó que al mover un imán hacia un círculo de alambre conectado al galvanómetro se producía un movimiento en la aguja en el mismo sentido del movimiento del imán de igual forma si el imán se alejaba del círculo de alambre entonces la aguja se movía nuevamente en este sentido (ver figura 8) gracias a esto se determinó que una corriente eléctrica puede ser producida por cambios en el campo magnético nunca por un campo magnético estable (Serway, 1997).



Figura 8 Ley de Faraday. (Bautista, 2000)

Todos los avances que se han presentado a través de la historia han servido para darles nuevos usos a los materiales magnéticos, uno de los usos más comunes y que ha generado una gran riqueza para algunas compañías ha sido en medios de almacenamiento basados en magnetismo.

4.2 TECNICAS DE CARACTERIZACION EXPERIMENTALES.

Técnica de VSM (Magnetometría de Muestra Vibrante)

Con esta técnica se puede estudiar las propiedades magnéticas con relación al campo magnético y la temperatura (ver figura 9), la cual es una de las más utilizadas en diferentes laboratorios de producción y análisis de materiales magnéticos. La técnica permite encontrar las curvas de histéresis de los diferentes materiales y así determinar algunas aplicaciones

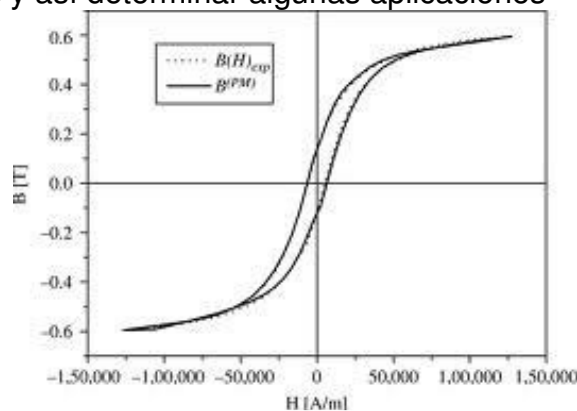


Figura 9 Lazo de histéresis (Chapman, 1993)

La funcionalidad de un magnetómetro consiste en medir el momento magnético de una muestra cuando está en un campo magnético estático, donde se determina la magnetización y susceptibilidad magnética. Siendo uno de las mejores técnicas ya que proporciona resultados muy precisos. (Rivera, Restrepo, Sanin, & Patiño, 2006)

4.3 DEFINICION Y CALCULO DE EXPONENTES CRÍTICOS

La fase de transición de los materiales ferromagnéticos a paramagnéticos en función de una temperatura aplicada es un estudio que se ha venido realizando durante un largo periodo de tiempo, debido a la importancia de estas aplicaciones que se le pueden dar a los materiales según sus características, como se mencionó en el capítulo 4.1 los materiales ferromagnéticos poseen una temperatura llamada o definida temperatura de Curie en la cual el material cambia del estado ferromagnético a paramagnético, se espera que en un material ideal o perfecto esta temperatura este claramente marcada por una caída abrupta de la magnetización en función de la temperatura $M(T)$, sin embargo esto por lo general no sucede con las muestras nano-estructuradas ya que no se encuentra un material perfecto en la naturaleza, por este motivo no se tiene una temperatura marcada y por el contrario se tiene una región en la cual se identifica la caída o disminución de la magnetización en función de la temperatura, a esta región se le conoce como región crítica.

Para determinar los exponentes críticos existen varios métodos ya definidos que se pueden aplicar en algunas ocasiones, ya que cada método o técnica fue desarrollada bajo ciertas restricciones, el método empleado en la simulación de los materiales magnéticos nano-estructurados llevada a cabo se basa inicialmente en el método de Andreas Berger descrito en la ecuación 1, este se puede utilizar en materiales con algún grado de inhomogeneidad y se basa en medidas de magnetización en función de la temperatura. (Campillo, y otros, 2001)

$$M(T, T_c) = \frac{m_0}{\sqrt{2\pi}} \int_{T_c} \left(\frac{T_c - T}{T_c} \right)^\beta \theta(T_c - T) \left[\frac{1}{\Delta T_c} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(T_c - T_{aver})^2}{\Delta T_c^2} \right) \right] dT_c$$

Ecuacion 1. Modelo De Adreas Berger (Daza, 2015)

Realizando una regresión no lineal por mínimos cuadrados, se obtiene un ajuste de las muestras tomadas de un material magnético nano-estructurado desarrollado bajo simulación computacional con el cual se calculan los parámetros m_0, β, T_{aver} y ΔT_c de la ecuación 1

La siguiente (tabla 2) nos permite contrastar los exponentes críticos obtenidos de forma simulada con los hallados mediante métodos teóricos y así saber cuál de estos modelos teóricos se ajusta más al Hamiltoniano del sistema.

Sistema	α'	β	γ'	ν'	α	γ	ν
Sistemas magnéticos							
<i>Ni</i>	-0.3	0.42			0	1.35	
<i>EuS</i>	-0.15	0.33			0.05		
<i>CrBr₃</i>		0.368				1.215	
Modelos resueltos							
Clásico	0	1/2	1	1/2	0	1	1/2
Modelo esférico (d=3)		1/2			-1	2	1
Modelo de Ising (d=2)	0	1/8	~ 7/4	1	0	~ 7/4	1
Aproximaciones							
Modelo de Ising (d=3)	~ 1/8		~ 5/4				
Modelo de Heisenberg		~0.345			~ -0.1	~ 1.3	~0.70

Tabla 2. Exponentes críticos para algunos sistemas tanto teóricos como prácticos (Avita, Vianey, Moukarzel, Romero, & Aldo, 2006)

4.3.1 MODELOS TEORICOS

4.3.1.1 TEORIA DE CAMPO MEDIO

En la teoría de campo medio, el comportamiento de la magnetización con la temperatura sigue una ley exponencial que tiene la siguiente forma: $M \propto (T_C - T)^{\frac{1}{2}}$. En los sistemas reales se puede comprobar que la magnetización se comporta como $(T_C - T)^{\beta}$ cercano a la transición de fase, este exponente da información importante acerca de la naturaleza de la transición de fase.

En esta teoría se asume que todos los espines “sienten” un campo promedio idéntico producido por todos sus vecinos, el cual es proporcional a la magnetización (Blundell, 2001).

Se pueden definir otros dos exponentes (δ y γ) y a este conjunto se le denomina exponentes críticos, debido a que rigen el comportamiento de algunos parámetros macroscópicos cerca de la región crítica donde ocurre la transición de fase.

4.3.1.2 TEORICA DE HEINSENBURG

Un enfoque alternativo para comprender el comportamiento magnético de estos materiales consiste en considerar modelos particulares microscópicos de

interacciones magnéticas. El modelo de Heisenberg tiene en cuenta las interacciones de los vecinos más cercanos y tiene un Hamiltoniano con la siguiente forma:

$$\hat{H} = - \sum_{\langle ij \rangle} J S_i \cdot S_j$$

Donde la constante J es la integral de intercambio y el símbolo $\langle ij \rangle$ debajo de la sumatoria representa la suma sobre los vecinos más cercanos. Los espines S_i se tratan como vectores tridimensionales ya que pueden apuntar en cualquier dirección del espacio. Sin embargo la suma se puede tomar en una, dos o tres dimensiones. Es importante diferenciar entre la dimensión de la red (d) donde se encuentran los espines y la dimensión de los espines (D) como tal (Blundell, 2001). (Daza, 2015)

4.4 SIMULACIÓN COMPUTACIONAL: MÉTODO DE MONTECARLO

El método Montecarlo es un método numérico que permite resolver problemas físicos y matemáticos de alta complejidad mediante la simulación de variables aleatorias. El método Montecarlo fue bautizado así por su clara analogía con los juegos de ruleta de los casinos, el nombre de Monte Carlo proviene de la famosa ciudad de Mónaco, donde abundan los casinos de juego y donde el azar, la probabilidad y el comportamiento aleatorio conforman todo un estilo de vida.

Este importante método es una técnica que combina conceptos estadísticos es decir muestreos aleatorios repetitivos que busca dar respuesta o aproximaciones estadísticas a problemas que tienen difícil solución por métodos exclusivamente analíticos o numéricos, actualmente es una técnica muy utilizada pues gracias al avance de los ordenadores que son la herramienta fundamental para generar números pseudo-aleatorios y automatizar cálculos, hoy en día se presenta este método como asequible para la resolución de ciertos problemas en numerosas áreas como la informática, física, empresarial, económica, industrial e incluso social.

Las primeras aplicaciones a gran escala se dieron en las cabezas lectoras de los discos duros las cuales utilizan materiales magnéticos de alta permeabilidad alrededor del cual pasa una corriente por un alambre (Poole & Owens, 2007), recordemos que la permeabilidad en un material magnético se define como la capacidad de una sustancia o medio para atraer y hacer pasar a través de ella campos magnéticos, cambiando la dirección se puede magnetizar diferentes regiones del disco por lo tanto se puede obtener en este un código binario esto permite que la información sea grabada y borrada las veces que sean necesarias, esta aplicaciones se han tenido que realizar últimamente a niveles nanoscópicos debido a la necesidad de miniaturizar todos los dispositivos electrónicos, el control del magnetismo interno de un material mediante el paso de corriente eléctrica

permite fabricar nuevas memorias magnéticas, nano-osciladores y dispositivos para electrónica digital, Los trenes también se han visto beneficiado con la aplicación de los materiales magnéticos, en la actualidad ya existen algunos trenes, como es el tren de MAGLEV, el tren levita sobre los rieles gracias al campo magnético formado en el carril guía, con esta tecnología se pueden desarrollar altas velocidad pues elimina fricción con el medio, en la nasa actualmente también se trabaja en un proyecto que busca diseñar lanzamiento de aeronaves espaciales impulsadas inicialmente por un campo magnético. (Poole & Owens, 2007)

4.5 ANTECEDENTES

Limitaciones tecnológicas en almacenamiento magnético de información

Aunque Bean y Livingston iniciaron el estudio del superparamagnetismo en la década de los 50's (Bean & Livingston, 1959) solo hasta fines del siglo XX con las limitaciones impuestas por el efecto superparamagnético (ESPM) se ha mostrado real importancia por parte de la comunidad científica, dadas las consecuencias desagradables para el almacenamiento de información. Antes del límite impuesto por el ESPM la preocupación se centraba en aumentar la capacidad de almacenamiento disminuyendo las dimensiones del sensor de lectura y la capacidad mecánica de barrido sobre el disco. Posteriormente basados en el fenómeno demagneto-resistencia MR y su evolución a magneto-resistencia gigante GMR, se consiguió de forma paralela aumentar densidad y tiempos de lectura. En posteriores modificaciones se necesitó grabar sometiendo el material a aumentos de temperatura por la incidencia de un láser sobre el punto de escritura (HAMR) (Pan & Bogy, 2009). La idea consiste en utilizar materiales de alta temperatura de transición de manera que permitan grabar fácilmente con el calentamiento para que a temperatura ambiente el dominio magnético se oponga con mayor resistencia al ESPM.

Arreglos de nano-partículas.

Es posible obtener sólidos con partículas ultrafinas por una gran variedad de métodos tales como reducción química, deposición por vapor, sputtering, Melt-spinning, electrodeposición, aleaciones mecánicas, etc. (Hadjipanayis & Prinz, 1990) (Dormann & Fiorani, Magnetic properties of fine particles, 1991). La estructura final puede ser conseguida por hornos convencionales o calentamiento Joule. Naturalmente es también posible encontrar nano partículas magnéticas en algunos animales o bacterias (Lee & Jeong, 2005) (Muller, Runge, Ravelli, Mehnert, Thünemann, & Souto, 2006) (Kuempel, Tran, Castranova, & Bailer, 2006) (A. Jordan, Bruhn, Neumann, Thiesen, von Deimling, & von Deimling, 2006.). Para presentar un enfoque sobre los materiales magnéticos nanoestructurados con un especial énfasis en sólidos magnéticos granulares, es de especial interés entender como una plataforma el comportamiento magnético de arreglos de nano partículas (Baldomir, y otros, 2007). Para una mejor aproximación es absolutamente necesario considerar las interacciones magnéticas entre partículas.

Una gran cantidad de reportes experimentales bajo diferentes técnicas han mostrado evidencia importante de esta influencia (Allia, Knobel, Tiberto, & F., 1995) (Mørup & Tronc, 1994) (Dormann, y otros, 1996.) (El-Hilo, Chantrell, & O'Grady, 1998.).

Materiales nano-granulares

Existen una gran cantidad de materiales que tienen una naturaleza granular a nanoescala y cuyas propiedades magnéticas son sorprendentemente diferentes con sus contrapartes en bulk (Gleiter, 1989) y fenómenos correlacionados con sus propiedades mecánicas (Yip, 1998). Mientras materiales ferromagnéticos como Fe, Ni y Co, son en general magnéticamente blandos en bulk, se transforman magnéticamente duros cuando aparecen en forma de partículas no interactuantes a nanoescala. La razón es que la magnetización se vuelve uniforme en dimensiones tan pequeñas como el ancho de una pared de dominio (Wernsdorfer, y otros, 1997) (Thirion, Wernsdorfer, & Mailly, 2003.).

5. METODOLOGÍA

5.1 TIPO DE TRABAJO

La metodología de la presente propuesta de investigación se realizará en tres fases, describiendo cada una de las actividades necesarias y sus responsables, con el fin de cumplir con los objetivos propuestos.

5.2 PROCEDIMIENTO

5.2.1 Fase 1. Revisión Documental.

En esta fase se realizará la búsqueda, lectura y selección de la información pertinente para la ejecución del proyecto. Todos los participantes estarán constantemente haciendo la revisión bibliográfica. Esta primera fase consta de las siguientes actividades:

Actividad 1.1. Búsqueda y descarga de artículos científicos desde las bases de datos, relacionados con la simulación computacional de materiales nanoestructurados, comportamiento crítico de materiales magnéticos, simulación Monte Carlo, entre otros.

Actividad 1.2. Lectura, selección y discusión de la información bibliográfica pertinente para el presente proyecto.

5.2.2 Fase 2. Simulación computacional de propiedades magnéticas en materiales nanoestructurados.

Se realizará una serie de simulaciones utilizando MatLab® como entorno de programación.

Las actividades que se llevaran a cabo en esta fase son:

Actividad 2.6. Calculo de los exponentes críticos a partir de las simulaciones obtenidas. Se hace a partir de los resultados obtenidos de las simulaciones.

5.2.3 Fase 3. Redacción y presentación de resultados finales.

En esta fase se analizan e interpretan los resultados finales y se redactará un informe final.

Actividad 3.1. Se entregará un informe final con todos los resultados de las muestras trabajadas

6. RESULTADOS

6.1 DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados de un material nano-estructurado desarrollado bajo simulación computacional, se trabajaron diferentes muestras del material variando el espesor del mismo y determinando en cada muestra el exponente crítico, M_0 , ΔT_C , β .

A partir de las muestras obtenidas experimentalmente en el Laboratorio de Física del plasma de la Universidad Nacional, se tomanen una tabla de temperaturas relacionadas con el M_0 correspondientes a cada una de ellas, estas temperaturas están en el intervalo de los 280 a 350 grados Kelvin.

Bajo simulación computacional se determinó los exponentes críticos para cada una de las muestras realizando este cálculo mediante un software diseñado por los profesores Lucero Álvarez Miño y Luis Fernando Mulcue, este código fue ejecutado con la herramienta MatLab®, el cual permite graficar el comportamiento de la magnetización vs temperatura y ajustar este resultado a los valores de la muestra desarrollada computacionalmente.

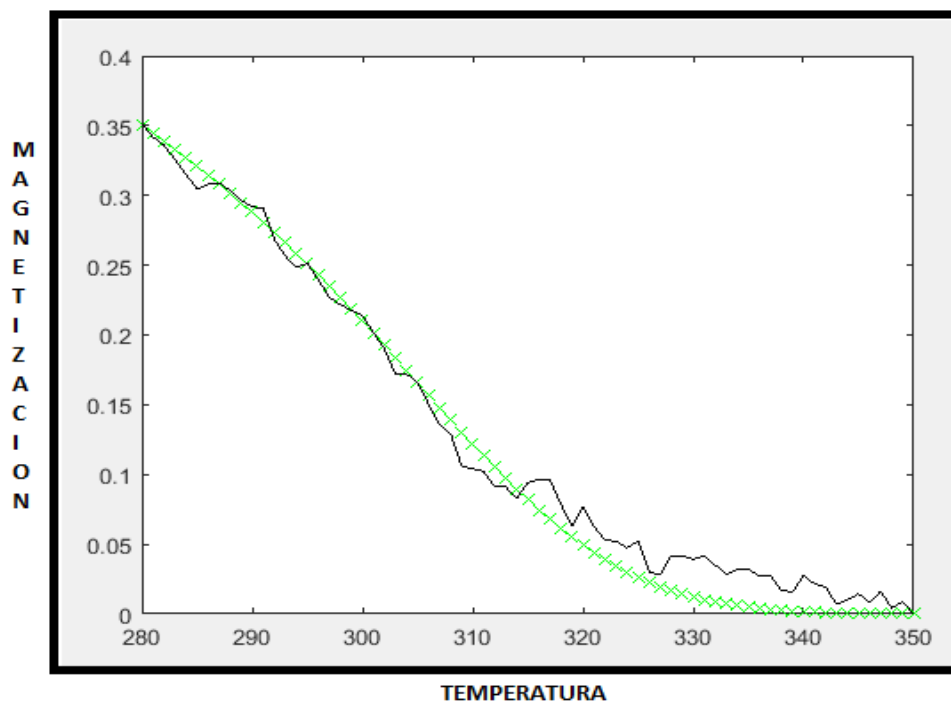


Figura N^o 10 Magnetización en función de temperatura para la muestra número 8 con 40 ciclos.

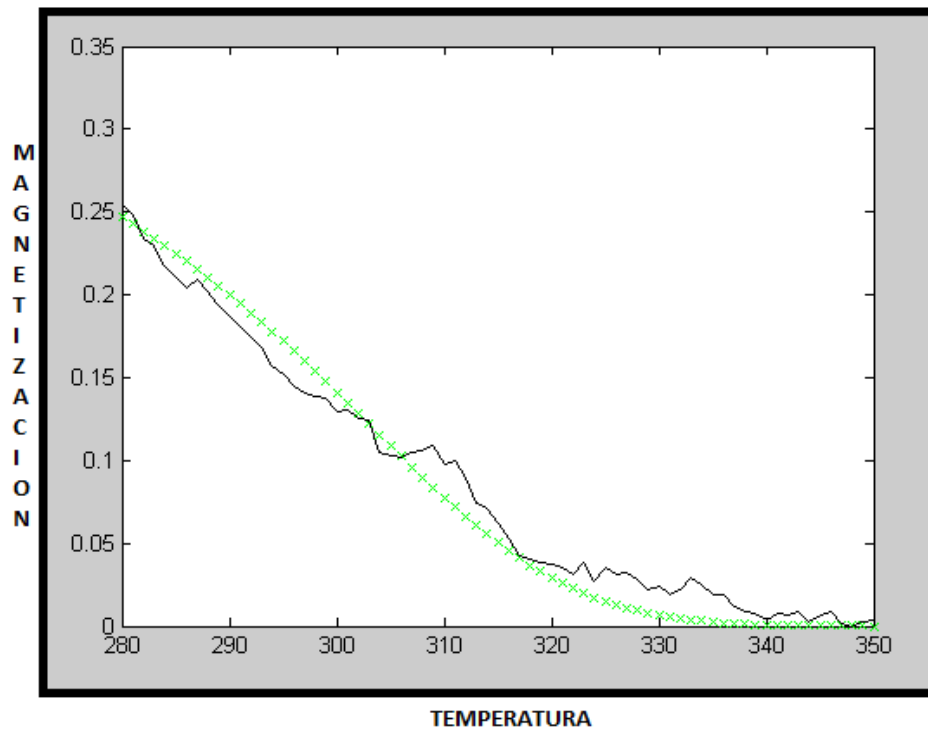


Figura 11. Magnetización en función de temperatura para la muestra número 16 con 40 ciclos.

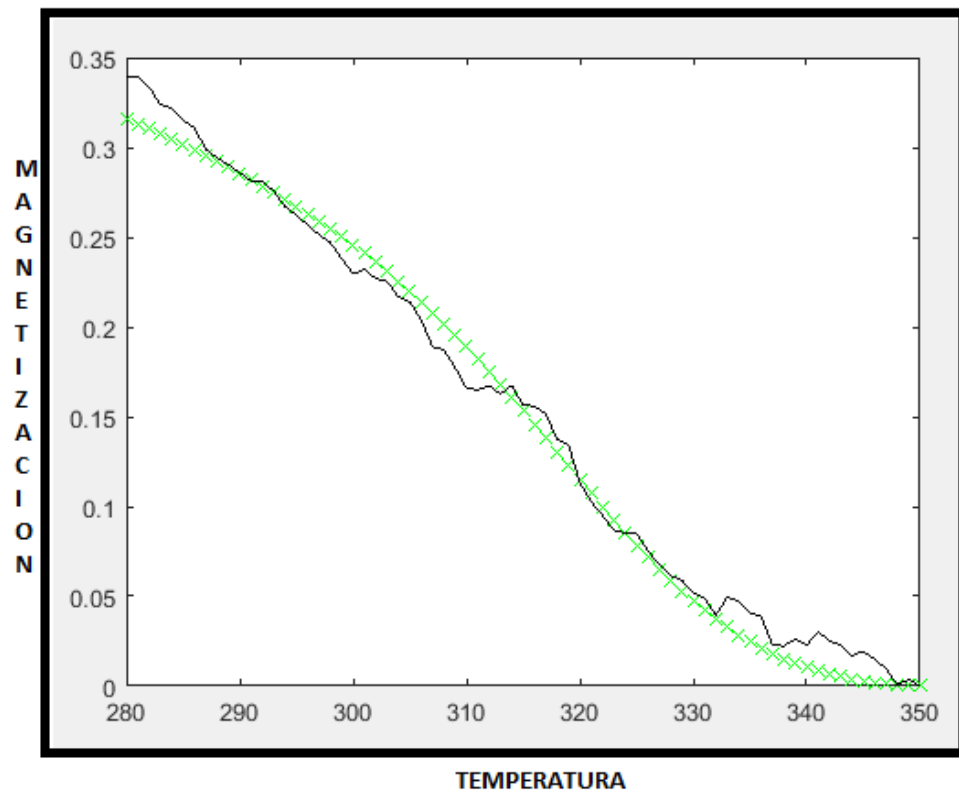


Figura 12. Magnetización en función de temperatura para la muestra número 24 con 40 ciclos.

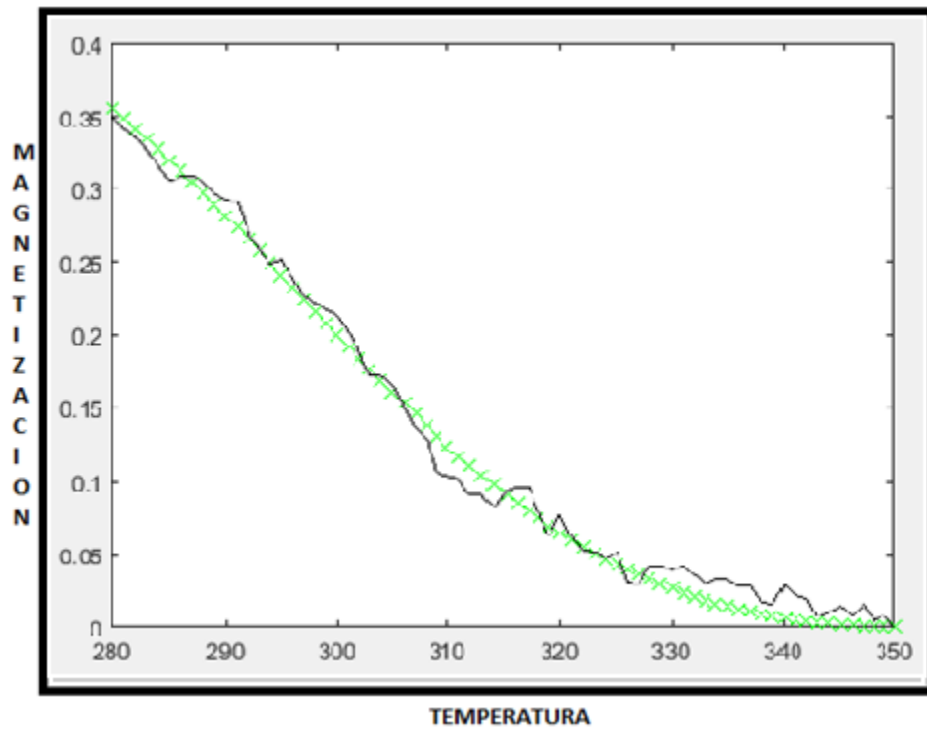


Figura 13. Magnetización en función de temperatura para la muestra número 8 con 80 ciclos.

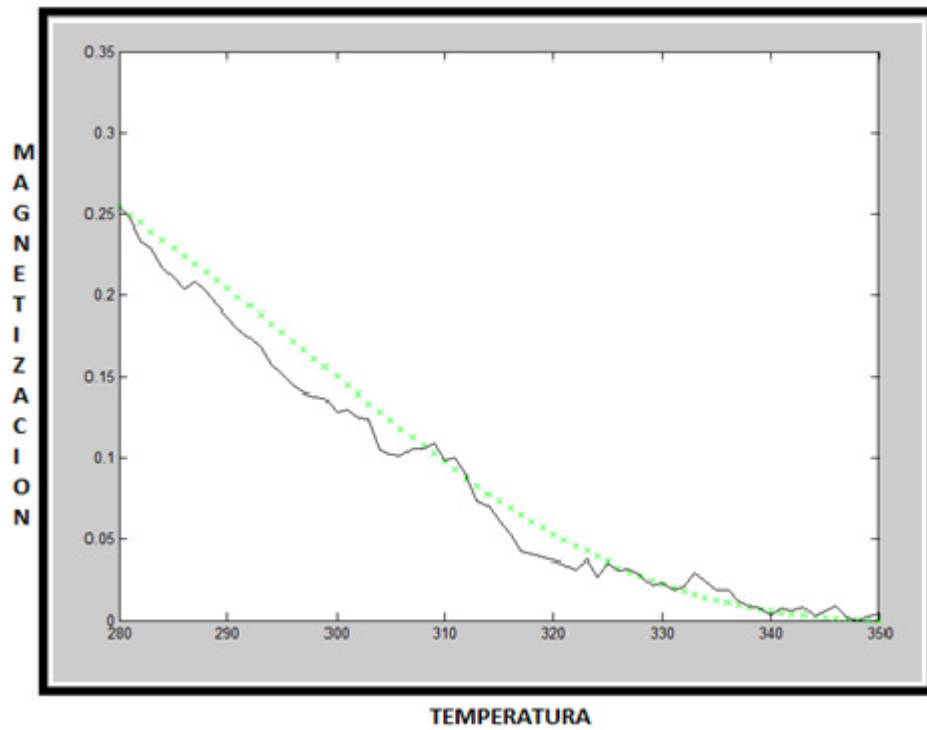


Figura 14. Magnetización en función de temperatura para la muestra números 16 con 80 ciclos.

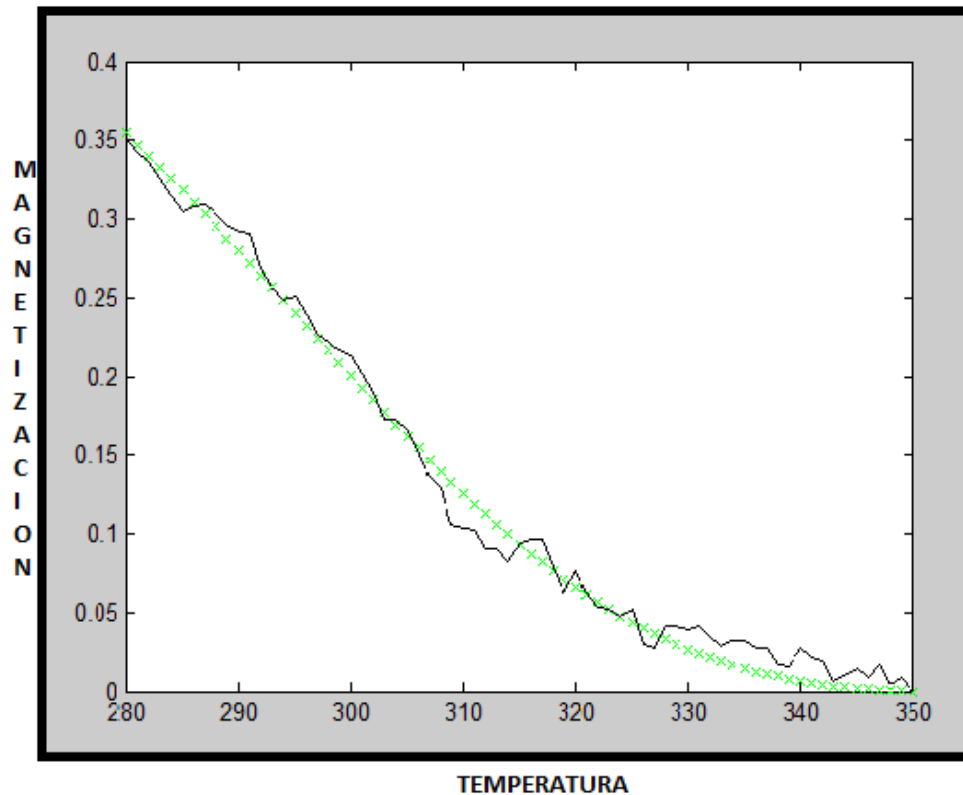


Figura15. Magnetización en función de temperatura para la muestra número 24 con 80 ciclos.

6.2 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En las figuras 10, 11, 12, 13, 14 y 15 se aprecia la magnetización en función de la temperatura, tanto para los resultados de las muestras simuladas (línea negra) como los resultados numéricos obtenidos usando el código implementado en MatLab® (línea verde) correspondiente a las muestras 8, 16, y 24. En los resultados se puede observar que existe un buen ajuste a los datos simulados con un factor R^2 de 0.9 para cada muestra.

La forma que toman las curvas de magnetización cercanas a cero cuando se incrementa la temperatura es un indicador de que existe una transición de fase de ferromagnético a paramagnético, lo cual ocurre a una temperatura amorfa de Curie T_C , la cual puede ser determinada al igual que el exponente crítico (β) asociado a esta transición.

Inicialmente los cálculos se realizaron en MatLab® utilizando 40 ciclos para ΔT_C obteniendo un valor límite para este parámetro de 12, por lo tanto se

decidió aumentar los ciclos a 80 permitiendo de esta forma obtener un valor más preciso sin limitar el cálculo de ΔT_C . Al realizar esta modificación mejora notablemente el ajuste en las gráficas 13, 14 y 15 en comparación con las gráficas 10, 11 y 12.

Al realizar el ajuste teórico con las muestras simuladas se obtuvieron parámetros como exponente crítico β , ΔT_C , M_0 y temperatura crítica T_C . Para obtener estos resultados se realizaron numerosas iteraciones para cada muestra hasta obtener el V_{min} en el cual se identifica la temperatura crítica

Inicialmente se realizó el cálculo con una temperatura de 315.0 grados Kelvin y un M_0 aleatorio el cual se fue ajustando progresivamente, una vez obtenido el valor del M_0 que más se ajusta al modelo, se varió la temperatura hasta llegar al valor mínimo de V_{min} en el cual se determinó la temperatura crítica, esta variación se realizó en escala de 0.1 grado kelvin.

En las tablas 3 y 4 se presentan los resultados para cada una de las muestras para 40 y 80 ciclos.

Delta 40 ciclos					
Muestra/Espesor	Delta T	B	V_Min	Temperatura	M_0
Muestra 8	12	0.5100	0.0166	314.8 K	1,1025
Muestra 16	12	0.5100	0.0130	313.0 K	0.797701
Muestra 24	12	0.3640	0.0098	324.8 K	0.6705936

Tabla 3 Resultados de muestras con Delta T 40

Delta 80 ciclos					
Muestra/Espesor	Delta T	B	V_Min	Temperatura	M_0
Muestra 8	20	0.4880	0.00874754	311.5 K	1.2220
Muestra 16	20	0.5100	0.00445757	311.2 K	0.8835590
Muestra 24	20	0.3080	0.00401842	324.8 K	0.71583534

Tabla 4 Resultados de muestras con Delta T 80

Según la tabla 2 los valores teóricos del exponente crítico β en el modelo clásico o de campo medio corresponde a 0.5 mientras que el modelo de Heisenberg tiene un valor de 0.345, los valores de β obtenidos en las muestras 8 con 40 ciclos fue de 0.5100 y para 80 ciclos un valor de 0.4880 al igual que para la muestra 16 en la cual se obtuvo un valor de 0.5100 para 40 ciclos y de 0.5100 para 80 ciclos. Este resultado puede indicar que estas dos muestras corresponden al modelo teórico clásico o de campo medio mientras que la muestra 24 posiblemente corresponde

al modelo de Heisenberg ya que los valores obtenidos en la simulación con 40 y 80 ciclos fue de 0.3640 y 0.3080 respectivamente.

Adicional a esto se pudo observar un comportamiento diferente de la temperatura de la muestra 24 con respecto a la muestra 8 y 16, posiblemente este comportamiento este asociado al modelo teórico que rige cada uno de estos sistemas.

7. CONCLUSIONES

Se realizó el cálculo del exponente crítico β para cada una de las muestras 6, 8, 16, 18, 20, 22 y 24 lo cual permitió asociar cada muestra a un modelo teórico como el de campo medio y modelo de Heisenberg.

Se observó un comportamiento similar de la temperatura crítica en las muestras 8 y 16 las cuales corresponden a un β aproximado de 0.50, relacionado con el modelo teórico de campo medio. Para la muestra 24 el comportamiento en la temperatura crítica fue mayor a las dos anteriores, con un β de 0.3080 el cual corresponde al modelo de Heisenberg

Se determinó que al realizar la simulación con un ΔT de 40 ciclos los cálculos se limitaban y no se alcanzaban los valores requeridos por lo cual fue necesario realizar nuevo cálculos con un ΔT de 80 ciclos, lo cual permitió observar que el comportamiento de las gráficas variaba y se acoplaban en mayor proporción que en el ciclo de ΔT a 40.

La simulación computacional permitió predecir el comportamiento de la magnetización con la temperatura de un material nano-estructurado, sin la necesidad de realizar mediciones físicas que implican altos costos.

8. RECOMENDACIONES

Se sugiere realizar mejoras al código de forma que sea más dinámico al momento de recolectar los cálculos realizados y que sea un poco más eficiente la forma de modificar cada una de sus variables

También sería importante explorar otros tipos de materiales, ejemplo películas delgadas, microhilos, nano-tubos entre otros, dado que realizando bajo simulación computacional los costos no son tan altos.

Bibliografía

A. Jordan, R. S.-H., Bruhn, H., Neumann, F., Thiesen, B., von Deimling, A., & von Deimling, A. (2006.). The effect of thermotherapy using magnetic nanoparticles on rat malignant glioma. *J. Neuro-Oncology* , 78, 7-14.

A. P French, E. F. (1982). *Introducción a la física cuántica*. Barcelona: Reverte.
Alaily, T., M.K, E.-N., S.A, S., M.M, K., T.M, M., & S.T, A. (2015). Construction and calibration of a low cost and fully automated vibrating sample magnetometer. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* , 25-30.

Allia, P., Knobel, M., Tiberto, P., & F., V. (1995). Magnetic properties and giant magnetoresistance of melt-spun granular $\text{Cu}_{1-x}\text{Co}_x$ alloys. *Phys. Rev. B* , 52, 15398-15411.

Ashcroft, N. W., & Mermin, N. D. (1976). *Solid State Physics*. San Diego: College Edition.

Avita, B., Vianey, M., Moukarzel, R., Romero, C. F., & Aldo, H. (2006). *Estudio de transiciones de fase en redes con interacciones de largo alcance*. Mexico: Instituto potosino de investigación ciencia y tecnología.

B. Schwarz, N. Mattern, Q. Luo, & J. Eckert. (2012). Magnetic properties and magnetocaloric effect of rapidly quenched Gd–Co–Fe–Al alloys. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials-ELSEVIER* , 1581–1587.

Baldomir, D., Rivas, J., Serantes, D., Pereiro, M., Arias, J., Buján-Núñez, M., y otros. (2007). Magnetic field dependence of the magnetocaloric effect in magnetic nanoparticle systems: A Monte Carlo simulation. *Journal of Non-Crystalline Solids* , 353, 793–795.

Bautista, L. (01 de 05 de 2000). *Fisicanet*. Recuperado el 1 de 10 de 2016, de http://www.fisicanet.com.ar/fisica/electrodinamica/ap15_induccion_electromagnetic_a.php

Bean, C., & Livingston, J. (1959). Superparamagnetism. *J.Appl.Phys* , 30 (4), 120-129.

Begoña Blasco Laffón, E. B. (2007). *Fundamentos físicos de la Edificación II*. Madrid: Delta Publicaciones.

Blundell, S. (2001). *Magnetism in condensed Matter*. New York: Oxford.

- Campillo, G., Berger, A., Osorio, J., Pearson, J., Bader, S., Baca, E., y otros. (2001). Substrate dependence of magnetic properties of La_{0.67}Ca_{0.33}MnO₃ films. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* , 61-68.
- Campostrini, N., Pelissetto, A., Rossi, P., & Vicari, E. (1999). *Phys. Rev. Phys. Rev* .
- Chapman, S. J. (1993). *Maquinas Electricas segunda edicion*. McGraw-Hill.
- Daza, H. A. (2015). *Comportamiento crítico y fenómenos de magneto transporte en vidrios metálicos basados en hierro y cobalto*. Manizales.
- Dormann, J. L., & Fiorani, D. (1991). Magnetic properties of fine particles.
- Dormann, J. L., D’Orazio, F., Lucari, F., Tronc, E., Prené, P., Jolivet, J. P., y otros. (1996.). Thermal variation of the relaxation time of the magnetic moment of γ -Fe₂O₃ nanoparticles with interparticle interactions of various strengths. *Phys. Rev. B* , 53, 14291-14297.
- El-Hilo, M., Chantrell, R. W., & O’Grady, K. (1998.). A model of interaction effects in granular magnetic solids. *J. Appl. Phys* , 84, 5114-5122.
- Garcia, J. M. (28 de 10 de 2013). *El Mundo*. Obtenido de www.elmundo.es
- García, J., Carrizo, j., Elbaile, L., Lago-Cachón, D., Rivas, M., Castrillo, D., y otros. (2014). Magnetic anisotropy and magnetostriction in nanocrystalline Fe–Al alloys obtained by melt spinning technique. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials-ELSEVIER* , 27-32.
- Gleiter, H. (1989). Introduction to nanocrystalline solids origins. *Prog. Mater. Sci* , 33, 223-230.
- Goncalves, L., Soares, J., Machado, F., & Rodrigues, A. (2006). Hall and giant magnetoimpedance effects in the Co₇₀Fe₅ metallic glass. *Journal of Non-Crystalline Solids-ELSEVIER* , 3659–3662.
- Griffiths, D. J. (1999). *Introductio to Electrodynamics*. New Jersey: Prentice Hall .
- Guida, R., & Zinn-Justin, J. (1998). *J.Phys. J.Phys* .
- Hadjipanayis, G., & Prinz, G. (1990). Science and Technology of Nanostructured Magnetic Materials.
- J.C , L., & J., Z.-J. (1980). *Phys. Rev. Lett. Phys. Rev. B*21 , 39-95.
- Knobel, K., & Pirota, K. (2002). Giant magnetoimpedance: concepts and recent progress. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials- Elsevier* , 33-40.

- Kuempel, E., Tran, C., Castranova, V., & Bailer, A. J. (2006). Lung Dosimetry and Risk Assessment of Nanoparticles: Evaluating and Extending Current Models in Rats and Humans. *Inhalation Toxicology* , 18, 717–724.
- Lee, H., & Jeong, S. (2005). Bacteriostasis and Skin Innoxiousness of Nanosize Silver Colloids on Textile Fabrics. *Textile Research Journal* , 75, 551-556.
- Londoño, O. M. (2008). Influencia del contenido de boro en las propiedades Magnéticas, Térmicas y Estructurales de aleaciones amorfas basadas en hierro. Manizales.
- Martín, J. C. (2012). *Máquinas eléctricas*. Madrid: Editex.
- Martínez, R. S. (2001). CARACTERIZACIÓN DE ALEACIONES BASE NI-TI PRODUCIDAS POR SOLIDIFICACIÓN RÁPIDA (MELT-SPINNING). *Memoria presentada para optar al grado de Doctor en Ciencias (especialidad Física) por la Universitat de les Illes Balears* . Palma.
- Mørup, S., & Tronc, E. (1994). Superparamagnetic relaxation of weakly interacting particles. *Phys. Rev. Lett* , 72, 3278-3281.
- Muller, R., Runge, S., Ravelli, V., Mehnert, W., Thünemann, A., & Souto, E. (2006). Oral bioavailability of cyclosporine: Solid lipid nanoparticles (SLN®) versus drug nanocrystals. *J. Pharm* , 317, 82-89.
- Nebot Pedrós, A., & Medina, J. A. (2015). TIC. Recuperado el 30 de 05 de 2015, de TIC:
<https://tictecnologiasinformacionycomunicacion.wikispaces.com/2.4.+Curva+de+hist%C3%A9resis>
- Nieto, L. F. (2012). *Determinación de exponentes críticos en películas delgadas. Aplicación en Cr-Gd-Cr*. Manizales.
- Pan, L., & Bogy, D. (2009). Data storage: Heat-assisted magnetic recording. *News Views Nature Photonics* , 3, 189-190.
- Paul, T. A., & Gene, M. (2005). *Física para la ciencia y la tecnología, Volume 2*. Reprint.
- Plonus, M. A. (1994). *Electromagnetismo aplicado*. Reverte.
- Poole, C. P., & Owens, F. J. (2007). *Introducción a la nanotecnología*. Barcelona: Reverte.
- Quintero, J. J. (2011). Diseño y Construcción de un Sistema de Medidas de Efecto Hall DC y AC. Manizales.

Rivera, A. R., Restrepo, J. A., Sanin, M. A., & Patiño, O. E. (01 de 10 de 2006). DESARROLLO DE UN MAGNETÓMETRO DE MUESTRA VIBRANTE. *REVISTA COLOMBIANA DE FÍSICA*, , 77.

Rosales-Rivera, A., Gomez, M., & Pineda-Gomez, P. (2009). Estudio de las Propiedades Magnéticas de Aleaciones Amorfas Magnéticas Blandas de FeBSi. *Revista Colombiana de Fisica* , 281-284.

Rosales-Rivera, A., Restrepo, J., Sanin, M., & Patiño, O. (2006). Desarrollo de un Magnetometro de muestra vibrante. *Revista Colombiana de Fisica* , 77-80.
Rosales-Rivera, A., Salazar, N., Hovorka, O., Idigoras, O., & Berger, A. (2012). Determination of critical exponents of inhomogeneous Gd films. *ELSEVIER* , 3141-3143.

Rosales-Rivera, A., Valencia, V., & Pineda-Gomez, P. (2007). Three-peak behavior in giant magnetoimpedance effect in Fe_{73.5}Cr_xNb₃Cu₁Si_{13.5}B₉ amorphous ribbons. *ELSEVIER* , 252-255.

Salazar, A. A. (2009). Diseño y desarrollo de la tecnica de Susceptibilidad Magnetica AC: Aplicacion al estudio de cintas magneticamente blandas. Manizales.

Santos, S. E. (2010). *La Historia Del Sistema Periódico*. UNED.

Serna, V. H. (2004). ESTUDIO DEL FENÓMENO DE MAGNETOIMPEDANCIA GIGANTE MIG EN CINTAS MAGNETICAMENTE BLANDAS DE ALEACIONES Fe_{73.5-x}Cr_xNb₃Cu₁Si_{13.5}B₉ CON $0 \leq x \leq 10$. Manizales.

Serway, R. A. (1997). *Electricidad y Magnetismo*. Mexico: McGRA W-HILL INTERAMERICANA EDITORES S.A.

Skomski, R. (2008). *Simple Models of Magnetism*. New York: Oxford.

Thirion, B., Wernsdorfer, W., & Mailly, D. (2003.). Switching of magnetization by nonlinear resonance studied in single nanoparticles. *Nat. Mater* , 2, 524 - 527.

Warlimont, H. (2001). Amorphous Metal Driving Materials and process Innovations. *Materials Science and Engineering A304-306* , 61-67.

Wernsdorfer, W., Bonet Orozco, E., Hasselbach, K., Benoit, A., Barbara, B., Demoncey, N., y otros. (1997). Experimental Evidence of the Néel-Brown Model of Magnetization Reversal. *Phys. Rev. Lett* , 78, 1791-1794.

Yip, S. (1998). Nanocrystals: The strongest size. *Nature* , 391, 532-533.

ANEXO A

Muestra 8

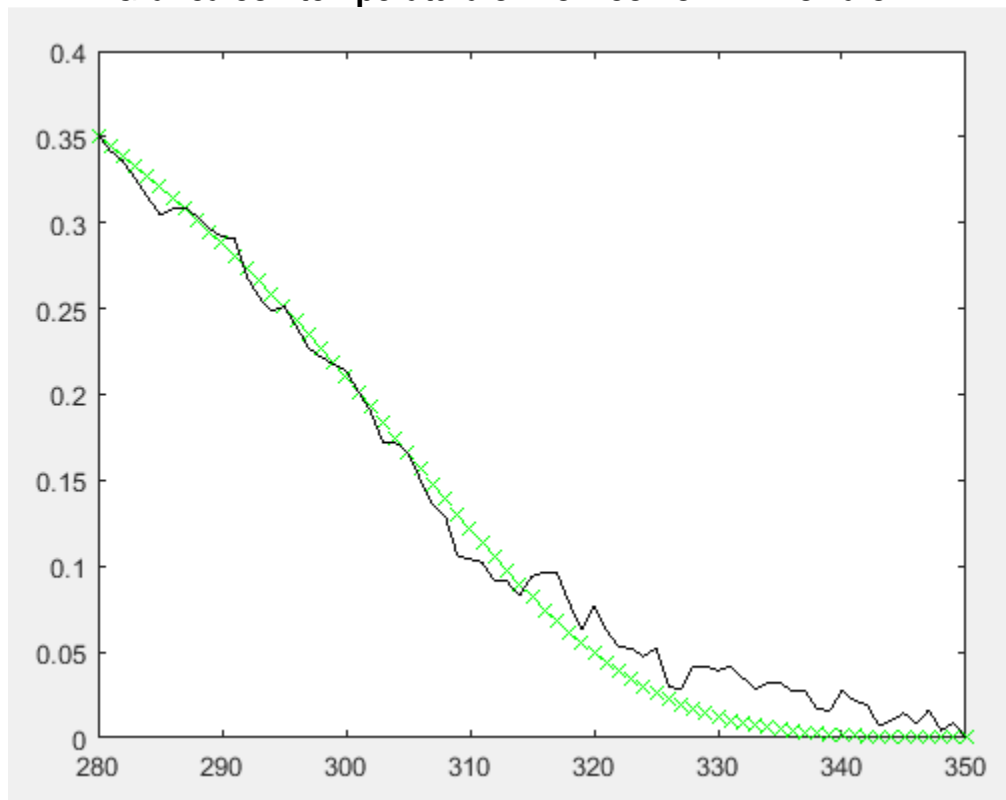
Amplitud: 0,3828

mo= 1,1025

Tabla de resultados

TC PROM	DELTA T 40	β	V MIN	
314.3 K	12	0.5080	0.0172	
314.4 K	12	0.5090	0.0170	
314.5 K	12	0.5100	0.0169	
314.6 K	12	0.5100	0.0168	
314.7 K	12	0.5100	0.0167	
314.8 K	12	0.5100	0.0166	Este
314.9 K	12	0.5100	0.0166	Este
315.0 K	12	0.5100	0.0167	
315.1 K	12	0.5100	0.0167	
315.2 K	12	0.5100	0.0169	
315.3 K	12	0.5100	0.0170	
315.4 K	12	0.5100	0.0172	

Grafica con temperatura 314.8 k como mínimo valor



ANEXO B

Muestra8

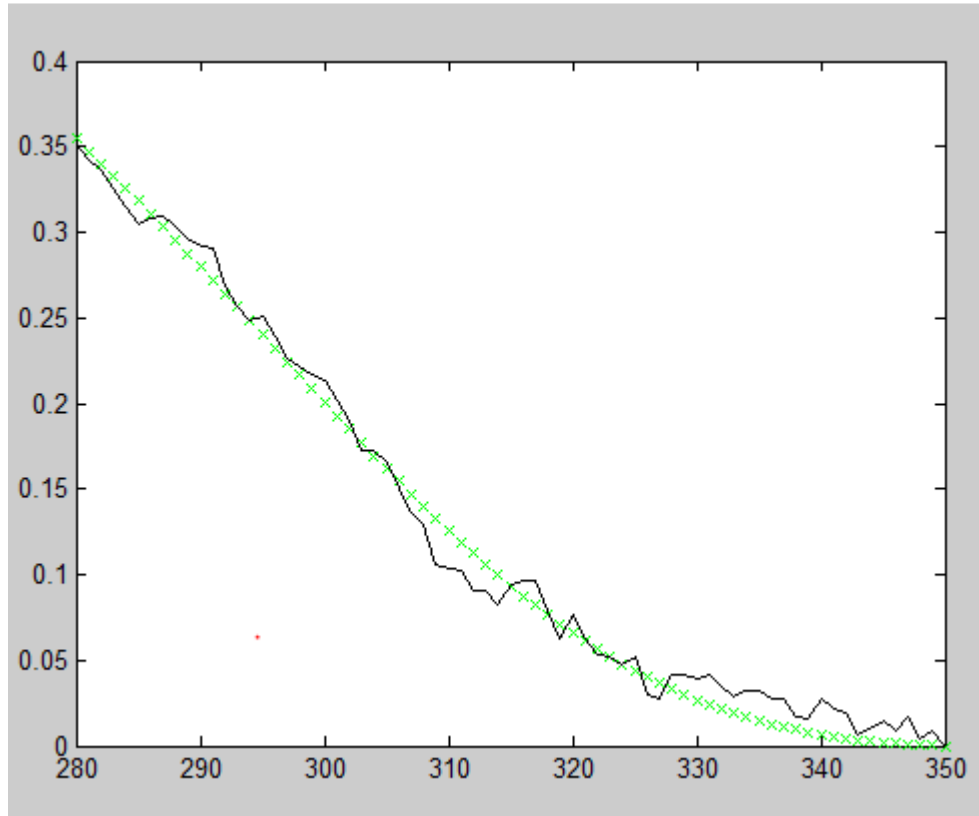
Amplitud:0,3828

mo=1.2220

Tabla con resultados

TC PROM	DELTA T 80	β	V MIN	
310.0 k	20	0.4730	0.009013822033185	
310.5 k	20	0.4780	0.008863775411555	
310.6 k	20	0.4790	0.008840910073766	
310.7 k	20	0.4800	0.008820717424058	
310.8 k	20	0.4810	0.008803160975004	
310.9 k	20	0.4820	0.008787734156531	
311.0 k	20	0.4830	0.008774978175832	
311.1 k	20	0.4840	0.008764430650950	
311.2 k	20	0.4850	0.008756680922384	
311.3 k	20	0.4860	0.008751207784271	
311.4 k	20	0.4870	0.008748087029542	
311.5 k	20	0.4880	0.008747540476326	ESTE
311.6 k	20	0.4880	0.008748439807127	
311.7 k	20	0.4890	0.008750684844841	
311.8 k	20	0.4900	0.008755501608286	
311.9 k	20	0.4910	0.008762624965704	
312.0 k	20	0.4920	0.008772598460790	
312.5 k	19.6	0.4990	0.008840171503473	
313.0 k	19.2	0.5060	0.008925567349921	
313.5 k	19.2	0.5100	0.009035403222177	
314.0 k	19.6	0.5100	0.009366561490091	
314.5 k	20	0.5100	0.009935928490132	

Grafica con temperatura 311.5 k como mínimo valor



ANEXO C

Muestra16

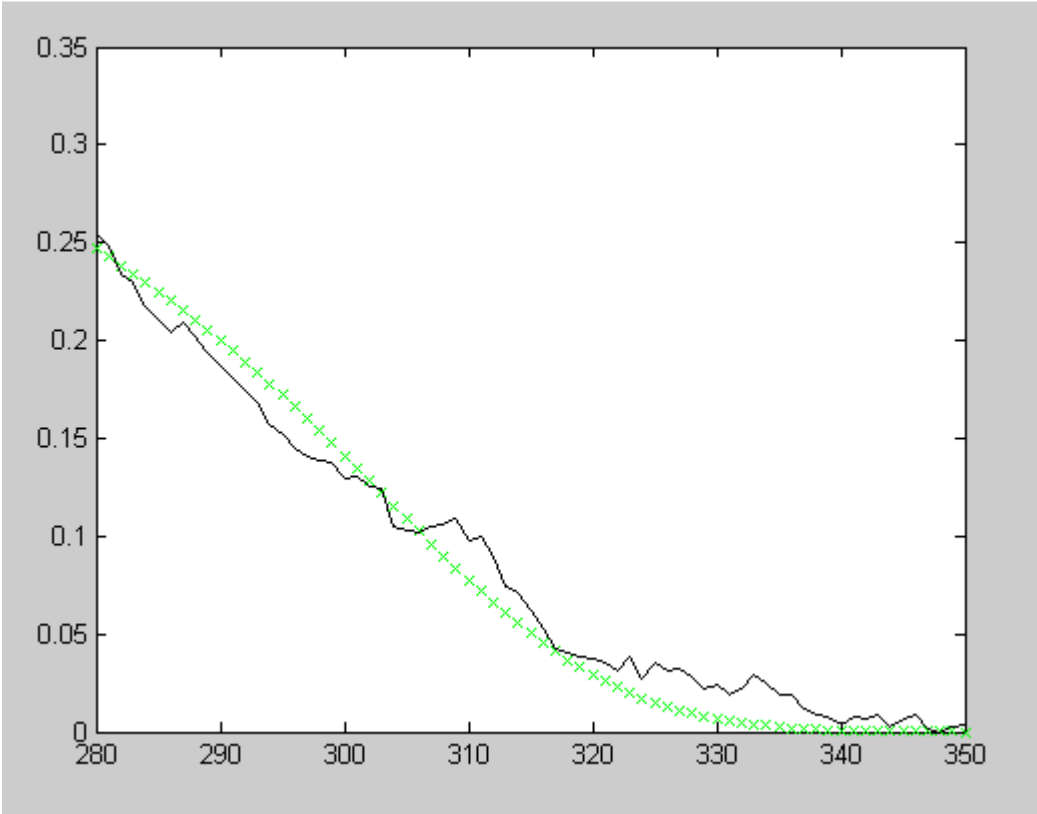
Amplitud:0,2828

mo=0.797701

Tabla de resultados

TC PROM	DELTA T40	β	V MIN	
312.2 k	12	0.5100	0.0137	
312.3 k	12	0.5100	0.0135	
312.4 k	12	0.5100	0.0134	
312.5 k	12	0.5100	0.0133	
312.6 k	12	0.5100	0.0132	
312.7 k	12	0.5100	0.0131	
312.8 k	12	0.5100	0.0131	
312.9 k	12	0.5100	0.0130	
313.0 k	12	0.5100	0.0130	ESTE
313.1 k	12	0.5100	0.0130	
313.2 k	12	0.5100	0.0130	
313.3 k	12	0.5100	0.0131	
313.4 k	12	0.5100	0.0132	
313.5 k	12	0.5100	0.0132	
313.6 k	12	0.5100	0.0134	
313.7 k	12	0.5100	0.0135	
313.8 k	12	0.5100	0.0136	
313.9 k	12	0.5100	0.0138	
314.0 k	12	0.5100	0.0140	
314.1 k	12	0.5100	0.0142	
314.2 k	12	0.5100	0.0144	
314.3 k	12	0.5100	0.0147	
314.4 k	12	0.5100	0.0150	
314.5 k	12	0.5100	0.0153	
314.6 k	12	0.5100	0.0156	
314.7 k	12	0.5100	0.0159	
314.8 k	12	0.5100	0.0163	
314.9 k	12	0.5100	0.0166	
315.0 k	12	0.5100	0.0170	
315.1 k	12	0.5100	0.0175	

Grafica con la temperatura 313.0 k como mínimo valor



ANEXO D

Muestra16 Delta T80

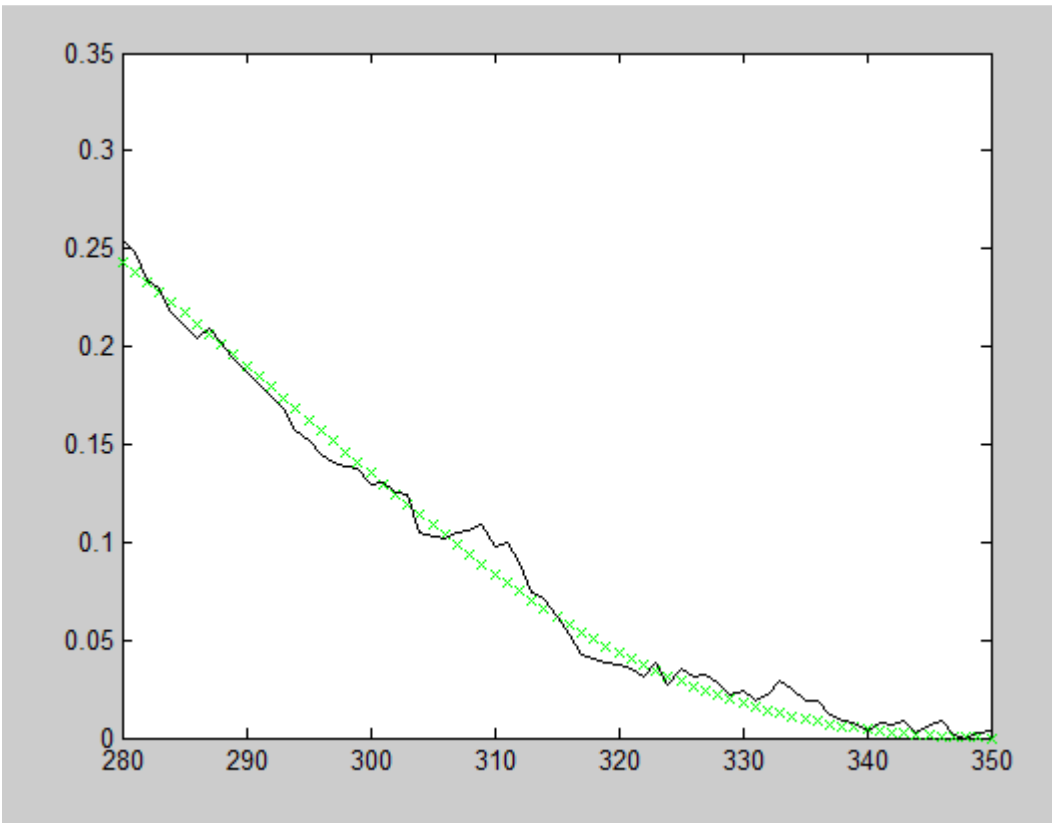
Amplitud:0,2828

mo=0.8835590

Tabla de resultados

TC PROM	DELTA T 80	β	V MIN	
310.5 K	20	0.5050	0.004573202597308	
310.6 K	20	0.5060	0.004552419852939	
310.7 K	20	0.5070	0.004532688696406	
310.8 K	20	0.5070	0.004513790595288	
310.9 K	20	0.5080	0.004495682583780	
311.0 K	20	0.5090	0.004478583284828	
311.1 K	20	0.5100	0.004462465316952	
311.2 K	20	0.5100	0.004457570914673	ESTE
311.3 K	20	0.5100	0.004465050585382	
311.4 K	20	0.5100	0.004484739042778	
311.5 K	20	0.5100	0.004516605622025	
311.6 K	20	0.5100	0.004560582337224	
311.7 K	20	0.5100	0.004616590426168	
312.0 K	20	0.5100	0.004855946382747	
313.0 K	20	0.5100	0.006402607652028	
314.0 K	20	0.5100	0.009032051350549	
314.5 K	20	0.5100	0.010722032748423	
315.0 K	20	0.5100	0.012644287489983	
315.5 K	20	0.5100	0.014784658351243	

Grafica con la temperatura 311.2 k como mínimo valor



ANEXO E

Muestra 24

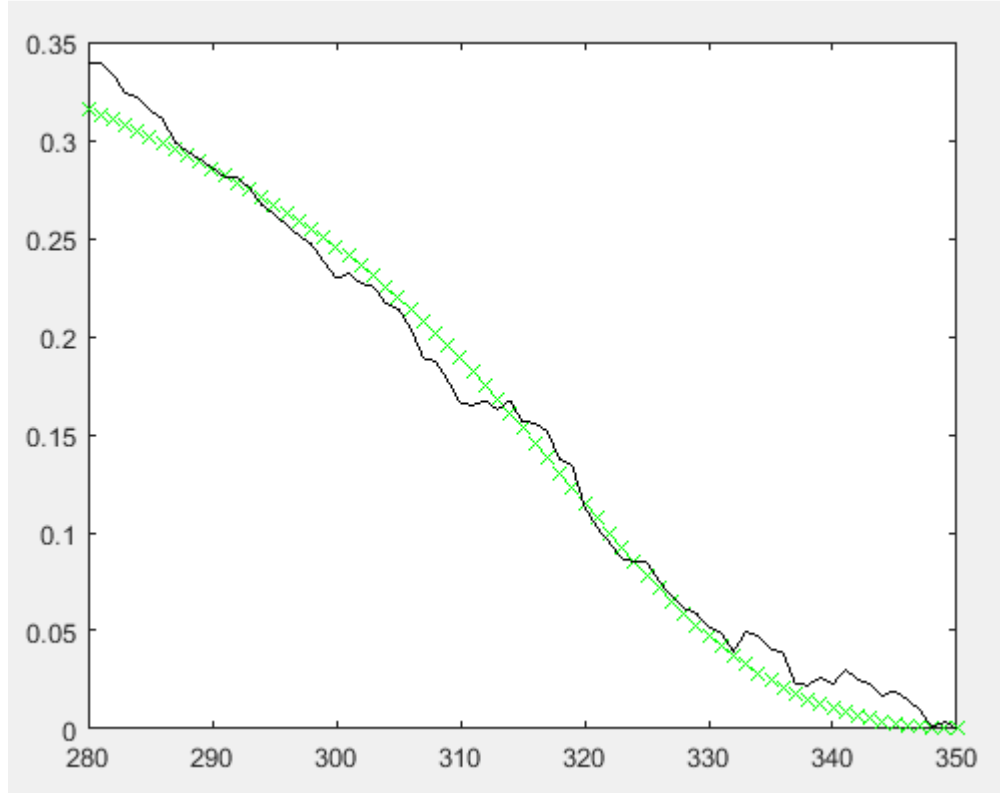
Amplitud:0,37767

mo=0.6705936

Tabla de resultados

TC PROM	DELTA T40	β	V MIN	
319.5 K	12	0.3260	0.0214	
320.0 K	12	0.3300	0.0193	
320.5 K	12	0.3340	0.0173	
320.9 K	12	0.3370	0.0160	
321.0 K	12	0.3370	0.0156	
321.5 K	12	0.3410	0.0142	
322.0 K	12	0.3450	0.0129	
322.5 K	12	0.3480	0.0119	
323.5 K	12	0.3550	0.0105	
324.0 K	12	0.3590	0.0101	
324.1 K	12	0.3590	0.0100	
324.2 K	12	0.3600	0.0100	
324.3 K	12	0.3610	0.0099	
324.4 K	12	0.3610	0.0099	
324.5 K	12	0.3620	0.0099	
324.6 K	12	0.3630	0.0098	
324.7 K	12	0.3630	0.0098	
324.8 K	12	0.3640	0.0098	Este
324.9 K	12	0.3650	0.0098	
325.0 K	12	0.3650	0.0098	
325.1 K	12	0.3660	0.0098	
325.2 K	12	0.3660	0.0099	
325.3 K	12	0.3670	0.0099	
325.4 K	12	0.3680	0.0099	
325.5 K	12	0.3680	0.0100	
325.6 K	12	0.3690	0.0100	
325.7 K	12	0.3690	0.0101	

Grafica con temperatura 324.8 k como mínimo valor



ANEXO F

Muestra 24

Amplitud:0,37767

mo=0.71583534

TC PROM	DELTA T 80	β	V MIN	
317.5 K	19	0.3010	0.01051381	
318.0 K	19.2	0.3010	0.00893172	
318.5 K	19.4	0.3010	0.00762735	
319.5 K	19.8	0.3010	0.00572162	
320.0 K	20	0.3010	0.00506441	
320.5 K	20	0.3010	0.00459760	
321.5 K	20	0.3050	0.00414231	
321.8 k	20	0.3060	0.00407100	
322.0 K	20	0.3070	0.00404060	
322.1 K	20	0.3070	0.00403031	
322.2 K	20	0.3080	0.00402518	
322.3 k	20	0.3080	0.00401842	ESTE
322.4 k	20	0.3080	0.00401940	
322.5 K	20	0.3090	0.00402184	
322.6 k	20	0.3090	0.00402604	
322.7 k	20	0.3090	0.00403785	

Tabla de resultados Delta T = 80

322.8 K	20	0.3100	0.00404832	
322.9 k	20	0.3100	0.00406311	

Grafica con temperatura 322.3 k como mínimo valor

