



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLÁN**

***“Determinación de la permeabilidad magnética inicial y
Temperatura de Curie de materiales ferromagnéticos
suaves mediante la técnica de anillo de Rowland”***

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADO EN TECNOLOGÍA

P R E S E N T A:

LUIS ENRIQUE CERVANTES MENESES

A S E S O R:

DRA. MARÍA HERLINDA MONTIEL SÁNCHEZ

CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

U. N. A. M.
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLÁN
ASUNTO: VOTO APROBATORIO

M. en C. JORGE ALFREDO CUÉLLAR ORDAZ
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE

ATN: M. en A. ISMAEL HERNÁNDEZ MAURICIO
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán.

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos **La Tesis:**

DETERMINACIÓN DE LA PERMEABILIDAD MAGNÉTICA INICIAL Y TEMPERATURA DE CURIE DE MATERIALES FERROMAGNÉTICOS SUAVES MEDIANTE LA TÉCNICA DE ANILLO DE ROWLAND

Que presenta el pasante: **LUIS ENRIQUE CERVANTES MENESES**
Con número de cuenta: **41007712-6** para obtener el Título de: **Licenciado en Tecnología**

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO**.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"
Cuautitlán Izcalli, Méx. a 10 de agosto de 2015.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	M. en I. Ramón Osorio Galicia	
VOCAL	M.A.I. Pedro Guzmán Tinajero	
SECRETARIO	Dra. María Herlinda Montiel Sánchez	
1er SUPLENTE	Dr. Oscar Ibáñez Orozco	
2do SUPLENTE	Dr. José Luis Velázquez Ortega	

NOTA: Los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).
En caso de que algún miembro del jurado no pueda asistir al examen profesional deberá dar aviso por anticipado al departamento.
(Art 127 REP)
IHM/ntm*

DEDICATORIAS

A MIS PADRES:

Por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como de la vida, por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo.

Porque creyeron en mí y porque me sacaron adelante, dándome ejemplos dignos de superación y entrega, porque en gran parte gracias a ustedes, hoy puedo ver alcanzada mi meta, ya que siempre estuvieron impulsándome en los momentos más difíciles de mi carrera, y porque el orgullo que sienten por mí, fue lo que me hizo ir hasta el final. Va por ustedes, por lo que valen, porque admiro su fortaleza y por lo que han hecho de mí.

Gracias por ser los principales promotores de mis sueños, gracias madre por estar dispuesta a acompañarme cada larga y agotadora noche de estudio, agotadoras noches en las que su compañía y la llegada de sus cafés y tortas eran para mí como agua en el desierto; gracias a mi padre por siempre apoyarme y anhelar siempre lo mejor para mi vida, gracias por darme lo mejor.

Todo este trabajo ha sido posible gracias a ustedes.

A MI FAMILIA:

A mis hermanos, tíos, primos, abuelos y amigos. Gracias por haber fomentado en mí el deseo de superación y el anhelo de triunfo en la vida. Porque son parte importante en mi vida.

A MIS COMPAÑEROS:

Porque con ustedes viví muchas experiencias dentro del salón de clases, compartimos risas, angustias, alegrías.

A MI ASESORA:

Dra. Herlinda usted un día me dijo que era como mi madre en la escuela, y así fue, siempre estuvo al pendiente de mí, le agradezco sinceramente su apoyo, dedicación y sus consejos, por haberme brindado la oportunidad de recurrir a su capacidad y conocimiento científico, así como también haberme tenido toda la paciencia para guiarme desde el primer día que me uní a su equipo de investigación hasta finalizar con esta tesis.

Usted es parte importante de este trabajo, mi éxito es uno más de sus éxitos como Dra. Muchas gracias.

A MI ALMA MATER:

La vida se encuentra plagada de retos, y uno de ellos es la universidad. Tras verme dentro de ella, me he dado cuenta que más allá de ser un reto, es una base no solo para mi entendimiento del campo en el que me he visto inmerso, sino para lo que concierne a la vida y mi futuro.

Gracias UNAM, por brindarme un espacio dentro de tus aulas, por abrirme tus brazos y cobijarme de tu conocimiento.

A MI JURADO:

Por darse tiempo de leer y darme sus opiniones acerca de esté trabajo, gracias.

A UNA PERSONA ESPECIAL:

Nadia sabes que eres parte importante en mi vida, y que gracias a tu amor y apoyo tuve el aliento y las ganas de continuar con esto, te agradezco por todo el tiempo que me has regalado. Gracias, te quiero mucho.

"La vida es y siempre seguirá siendo una ecuación incapaz de resolver, pero tiene ciertos factores que conocemos".

NIKOLA TESLA

ÍNDICE

RESUMEN	8
OBJETIVOS	10
HIPÓTESIS	10
METODOLOGÍA	11
Método de muestreo	11

Capítulo I

MAGNETISMO	13
Campo magnético e inducción magnética.....	13
Ley de Ampere	14
Ley de inducción de Faraday	17
Magnetización.....	18
Dominios magnéticos.....	18
Ciclo de magnetización inicial	20
FERRITAS	21
MATERIALES MAGNÉTICOS AMORFOS	23
¿QUÉ ES UNA BOBINA TOROIDAL?	24
TRANSFORMADORES TOROIDALES	25
DESVENTAJAS Y VENTAJAS	26
USOS	26

Capítulo II

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	27
Anillo de Rowland	27
Ferritas	29
Aleación amorfa	33

Capítulo III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35
FERRITAS	
F50-AF	36
F50A-J	55
F50A-43	69
F50-AW	84
Aleación amorfa	98
VITROVAC 60-30	98

Capítulo IV

CONCLUSIONES	111
REFERENCIAS	113

RESUMEN

Hoy en día los materiales magnéticos son importantes para el desarrollo de aplicaciones tecnológicas, por lo que es de gran relevancia el estudio y caracterización de sus propiedades magnéticas, como es el caso de la determinación de la permeabilidad inicial (μ_i) que se obtiene a partir de la curva de magnetización inicial. A partir de esta curva se determina el comportamiento lineal del material magnético en función de la inducción magnética ($\mu = \frac{B}{H}$). En este trabajo de tesis se presenta una metodología basada en la técnica del anillo de Rowland para determinar la permeabilidad inicial de 4 ferritas suaves y una cinta magnética amorfa, así como la determinación de la Temperatura de Curie para cada uno de estos materiales.

Para la determinación de la permeabilidad inicial los materiales fueron caracterizados con diversos embobinados, para el caso de las ferritas se ocuparon relaciones de 15-5, 15-10 y 15-15 para embobinado primario y secundario respectivamente. Mientras que para la cinta magnética amorfa se ocuparon relaciones de 30-15. A cada relación de embobinados se trató con voltajes de 1, 2, 5, 7 y 10 V. Así mismo cada uno de estos voltajes fue medido con las siguientes frecuencias 5, 10, 15, 20, 22, 24, 26, 28 y 30 kHz para el caso de las ferritas. Por otro lado los voltajes empleados en la cinta magnética amorfa fueron 0.5 y 1 V con frecuencias de 10, 12, 15, 17, 18, 20, 21, 22, 23, 25, 27, 30, 32, 35, 37, 40, 45 y 50 kHz.

Las variables de medición tales como voltaje de excitación y frecuencia permiten determinar la región de comportamiento lineal entre la inducción (ó magnetización) y el campo magnético aplicado (H). Con la ayuda del software de control y medición, se obtienen curvas de voltajes de excitación contra voltajes de inducción de un circuito magnético cerrado. La relación lineal entre los voltajes de excitación e inducción permite calcular el valor de la permeabilidad inicial a partir de la pendiente. Las variables de medición tales como voltaje de excitación y frecuencia permiten determinar la región de comportamiento lineal. La importancia

de establecer estas condiciones experimentales durante la medición es que solo se puede determinar la permeabilidad inicial cuando el comportamiento de la inducción con respecto al campo es lineal.

En esta región lineal es posible establecer la dependencia de la permeabilidad magnética inicial (μ_i) con la temperatura hasta alcanzar la temperatura de transición de Curie. La temperatura de Curie es una transición magnética del orden ferromagnético (para ferritas es el orden ferrimagnético) al estado paramagnético, es decir una transición de orden-desorden magnético. Por lo tanto la segunda parte de este trabajo se concentra en la determinación de la temperatura de Curie de las mismas ferritas y cinta magnética amorfa a las cuales se les determino su permeabilidad inicial. La medición de la Temperatura de Curie se realizó con diferentes condiciones eléctricas y térmicas con la finalidad de establecer la dependencia de estas variables con la dinámica de la transición de Curie.

OBJETIVOS

Determinar las propiedades magnéticas intrínsecas tales como permeabilidad magnética inicial (μ_i) en ferritas y una cinta magnética suave empleando el método del anillo de Rowland. Estableciendo los parámetros adecuados de medición como lo son voltaje de excitación y frecuencia para obtener un valor de permeabilidad cercano o igual al reportado por los fabricantes y con ello demostrar que la técnica y el equipo de medición utilizado generan resultados adecuados.

Medir la temperatura de Curie con los parámetros determinados a partir de la curva de magnetización inicial tanto para las ferritas como para la cinta magnética amorfa. En particular para el caso de la cinta magnética se establecieron las diferentes etapas de la dinámica de la nanocrystalización en función del tiempo de tratamiento térmico a distintos intervalos e incrementos de temperatura y de esta manera determinar la influencia de la temperatura sobre las propiedades magnéticas de la cinta.

HIPÓTESIS

Empleando en las ferritas un voltaje de excitación de 1V y un rango de frecuencias de 15 kHz a 23 kHz, se obtiene la permeabilidad magnética inicial (μ_i) y con ella, una medición de la temperatura de Curie confiable.

Con un voltaje de excitación máximo de 0.5 V y un rango de frecuencias de 35 kHz a 45 kHz se obtiene la permeabilidad magnética inicial (μ_i) y la temperatura de Curie para la cinta magnética.

METODOLOGÍA

La información necesaria para la presente tesis es obtenida por medio del reporte técnico interno CCADET-UNAM No. II- TECC- 2009-014, 2011, realizado por H. Montiel, B. Valera, E. Mata, que presenta un análisis sobre la técnica del anillo de Rowland para la determinación de la permeabilidad magnética en ferritas.

Es por ello que para la realización de la determinación de la permeabilidad magnética y medición de la temperatura de Curie en las ferritas y en la cinta amorfa se ha propuesto hacerlo por esta técnica ya que se considera que satisface las necesidades de nuestra investigación.

Como uno de los objetivos del trabajo es determinar la permeabilidad magnética inicial (μ_i), se necesita establecer parámetros adecuados de medición como lo son voltaje de excitación y frecuencia para obtener un valor de permeabilidad cercano o igual al reportado por los fabricantes con el fin de demostrar que la técnica genera resultados adecuados.

Método de muestreo

Para la obtención de los valores de la permeabilidad inicial se usara el método no probabilístico, dado que no todos los elementos de la población pueden formar parte de la muestra, se trata de seleccionar a los parámetros siguiendo determinados criterios procurando que la muestra sea representativa. Es decir, los elementos de la muestra son seleccionados por procedimientos al azar o con probabilidades conocidas de selección.

Como se conocen las limitantes del equipo con el que se determinaran las permeabilidades, se ha optado por realizar la investigación utilizando diversos embobinados, para el caso de las ferritas se ocuparon relaciones de 15-5, 15-10 y

15-15 para embobinado primario y secundario respectivamente. Mientras que para la cinta se ocuparon relaciones de 30-15. A cada relación de embobinados se trato con voltajes de 1, 2, 5, 7 y 10 V. Asi mismo cada uno de estos voltajes fue medido con las siguientes frecuencias 5, 10, 15, 20, 22, 24, 26, 28 y 30 kHz para el caso de las ferritas. Por otro lado los voltajes empleados en las cintas amorfas fueron 0.5 y 1 V con frecuencias de 10, 12, 15, 17, 18, 20, 21, 22, 23, 25, 27, 30, 32, 35, 37, 40, 45 y 50 kHz.

Para los resultados se utilizará el muestreo de juicio, dado que el investigador toma la muestra seleccionando los elementos que le parezcan representativos o típicos de la población, por lo que depende del criterio del investigador. En este caso: se tomaran como muestra las gráficas donde se vea un comportamiento lineal y que el cálculo de la permeabilidad sea coherente con el reportado por el fabricante de las ferritas y cinta magnética.

Capítulo I

MAGNETISMO

Campo magnético e inducción magnética

El campo magnético se origina cuando una carga eléctrica está en movimiento. Por lo que cuando una corriente eléctrica circula a través de una bobina con n vueltas, se genera un campo magnético H . La intensidad de campo magnético está dada, como $H = \frac{ni}{l}$; donde n es el número de vueltas, i es la corriente en Amperes (A) y l es la longitud de la bobina en metros (m). Al aplicar un campo magnético en el vacío se inducen líneas de flujo magnético. El número de líneas de flujo por unidad de volumen es conocido como densidad de flujo o inducción magnética B y es definido como: $B = \mu_0 H$. En muchos materiales B es una función lineal de H y μ_0 es constante y corresponde a la permeabilidad magnética en el vacío. Al colocar un material dentro de un campo magnético Figura 1.1, la inducción magnética se determina por la interacción de los momentos magnéticos del material con el campo magnético externo aplicado. B y H están relacionados como: $B = \mu H$, donde μ , ahora es una constante y representa la permeabilidad del material [1].

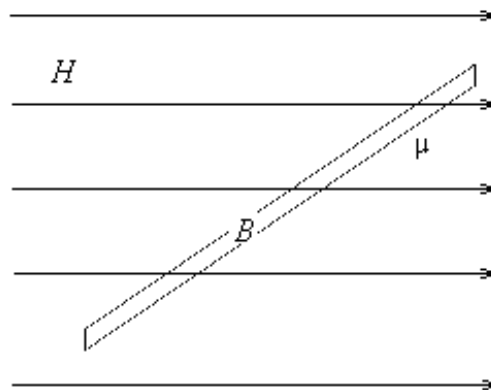


Figura 1.1.- Un material con permeabilidad (μ) inmerso en un campo magnético externo aplicado H (mediante polos de un electroimán, por ejemplo) se induce un campo magnético B (campo de inducción). Fuente D. Jiles.

Ley de Ampere

La ley de Ampere es útil para el cálculo de campos magnéticos creados por determinadas distribuciones de corriente.

La ley de Ampere establece que: "La circulación de un campo magnético a lo largo de una línea cerrada es igual al producto de μ_0 por la intensidad neta que atraviesa el área limitada por la trayectoria".

Que podemos expresar tal y como se muestra en la Ecuación 1.1.

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 i \quad (1.1)$$

Tenemos que tener en cuenta que esto se cumple siempre y cuando las corrientes sean continuas, es decir, que no comiencen o terminen en algún punto finito.

- Aplicada a un toroide

Elegimos como camino cerrado una circunferencia de radio r , cuyo centro está en el eje del toroide, y situada en su plano meridiano. De esta forma el campo magnético B es tangente a la circunferencia de radio r y tiene el mismo módulo en todos los puntos de dicha circunferencia.

Aplicaremos la ley de Ampère y calcularemos la intensidad para los siguientes valores de r :

- Fuera del núcleo con $r < r_i$
- En el interior del núcleo $r_i < r < r_e$
- Fuera del núcleo con $r > r_e$

Fuera del núcleo con $r < r_i$

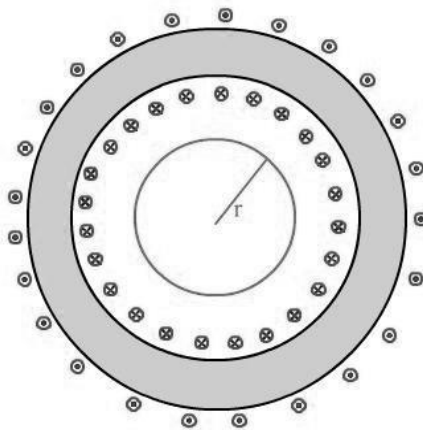


Figura 1.2.- Intensidad de campo magnético fuera del núcleo cuando $r < r_i$. Fuente página web el físico loco.

Como se puede observar en la figura 1.2 la intensidad que atraviesa la circunferencia de radio r es cero, por lo tanto aplicando Ampere:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \oint \vec{B} d\vec{l} \cos(\varphi) = B (2\pi r) = \mu_0 N i = \mu_0 N(0) = 0$$

$$B(2\pi r) = 0; \Rightarrow B = 0 \quad (1.2)$$

En el interior del núcleo $r_i < r < r_e$

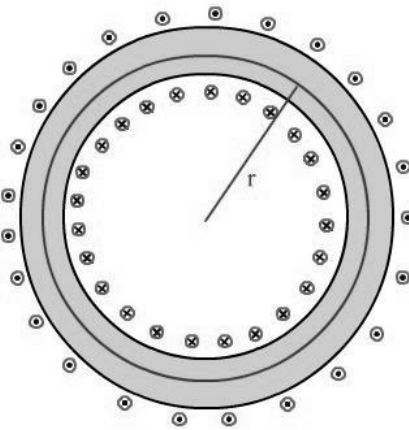


Figura 1.3.- Intensidad de campo magnético en el interior del núcleo $r_i < r < r_e$. Fuente página web el físico loco.

En la figura 1.3 cada espira del toroide atraviesa una vez el camino cerrado la intensidad será $N \cdot i$, siendo N el número de espiras e i la intensidad que circula por cada espira, con lo cual:

$$\oint \vec{B} \cdot \vec{dl} = \oint \vec{B} \vec{dl} \cos(\varphi) = B (2\pi r) = \mu Ni$$

$$B (2\pi r) = \mu Ni$$

$$B = \frac{\mu Ni}{2\pi r} \quad (1.3)$$

Fuera del núcleo: $r > r_e$

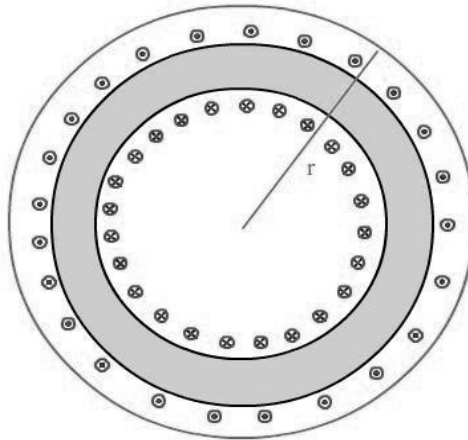


Figura 1.4.- Intensidad de campo magnético fuera del núcleo con $r > r_e$. Fuente página web el físico loco.

Cada espira del toroide atraviesa dos veces el camino cerrado transportando intensidades de sentidos opuestos. La intensidad neta es $N \cdot i - N \cdot i = 0$, y $B = 0$ en todos los puntos del camino cerrado. Por lo tanto:

$$\oint \vec{B} \cdot \vec{dl} = \oint \vec{B} \vec{dl} \cos(\varphi) = B (2\pi r) = \mu Ni$$

$$B(2\pi r) = \mu N(I)$$

$$B = 0 \tag{1.4}$$

De los cálculos anteriores se deduce que el campo magnético generado por un toroide queda confinado en el interior del mismo.

Ley de inducción de Faraday

Como la corriente eléctrica continua que circula por un alambre produce un campo magnético alrededor del mismo, inicialmente Faraday pensó que un campo estacionario podía producir una corriente, Faraday utilizó un montaje como se ve en figura 1.5.

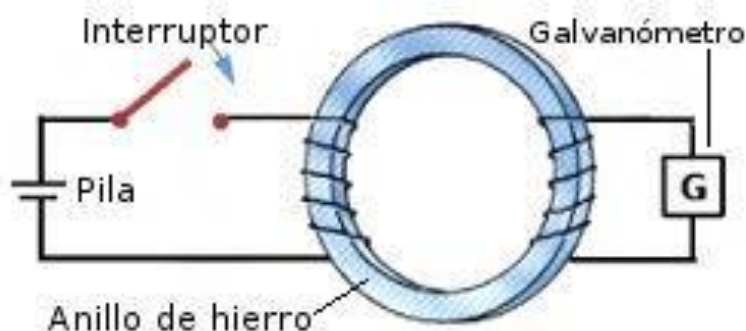


Figura 1.5.- Anillo de Faraday. Fuente página web sabelotodo.org.

En este montaje la corriente que pasa por la bobina produce un campo magnético que se concentra en el anillo de hierro, mientras que la bobina de la derecha está conectada a un galvanómetro. Cuando el campo magnético generado por la bobina izquierda es estacionario no aparecía corriente inducida en la bobina derecha. Sin embargo aparecía una corriente momentánea en el instante en que se cerraba el interruptor S de la bobina izquierda, cuando se abría de nuevo volvía a observarse una corriente inducida momentáneamente en la bobina derecha y esta tenía sentido contrario a la primera. Por lo tanto únicamente existía corriente inducida cuando el campo magnético producido por la bobina estaba cambiando.

Magnetización

Se define la magnetización \vec{M} , como el momento magnético total por unidad de volumen:

$$\vec{M} = \frac{\vec{m}}{V}. \quad (1.5)$$

La inducción magnética B en un material es: $B = \mu_0(H + M)$, donde $\mu_0 H$ es la inducción generada por el campo magnético H en el vacío y $\mu_0 M$ es la inducción adicional debida a la presencia del material magnético [2].

Dominios magnéticos

La estructura de dominios de un material magnético está determinada por varias clases de energías. La estructura más estable se alcanza cuando la energía magnética total es un mínimo. Las energías involucradas en el sistema son [3]:

- Energía de Intercambio
- Energía de Anisotropía
- Energía Magnetoestática

De acuerdo a la teoría de Weiss [4], todo material magnético está formado por pequeñas regiones llamadas *Dominios magnéticos*. Cada dominio magnético posee momentos magnéticos \vec{m} , los cuales están orientados en una dirección preferencial, a esta dirección se le llama *Dirección fácil*. Puesto que la magnetización se define como $\vec{M} = \frac{\vec{m}}{V}$, entonces cada dominio posee un \vec{M} total. Las fronteras que separan un dominio de otro se llaman paredes de dominios magnéticos.

En la figura 1.6 se muestra la pared magnética, la cual está compuesta por la inversión de la dirección del vector de magnetización \vec{M} de un dominio hacia la

dirección del vector de magnetización \vec{M} del dominio vecino [5]. El ancho de la pared (δ_w) está determinado por la interacción de intercambio y por la anisotropía.

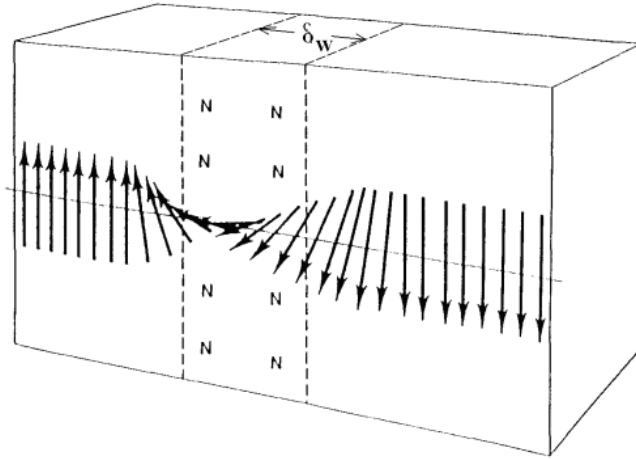


Figura 1.6 Pared de dominio magnético. Fuente B. D. Cullity.

En un material ferromagnético los dominios están orientados en diferentes direcciones y al aplicarles un campo magnético intenso \vec{H} , los dominios magnéticos se orientan en la dirección de este campo. Cuando todos los dominios se orientan en la dirección del campo, se dice que es un monodominio, con una magnetización de saturación máxima. Las flechas indican los vectores de magnetización. La figura 1.7 muestra una estructura de dominios magnéticos.

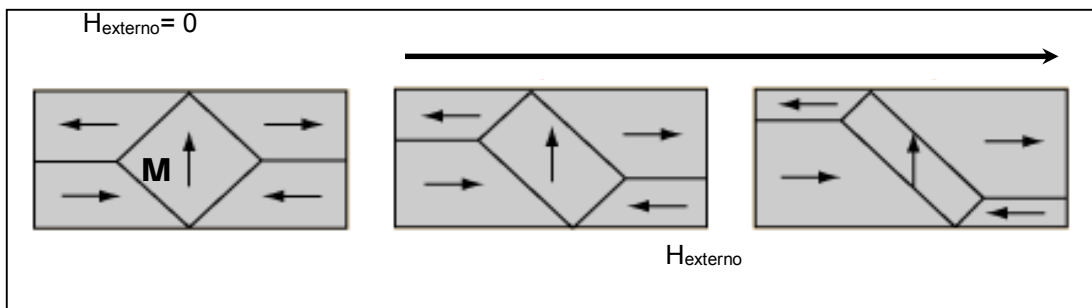


Figura 1.7 Se muestran los dominios magnéticos en un material ferromagnético. Donde en cada uno de los dominios magnéticos los vectores de magnetización se alinean en una dirección dada por las flechas. Fuente B. D. Cullity.

Ciclo de magnetización inicial

En un proceso de magnetización se pueden distinguir tres mecanismos desde $H = 0$ hasta el campo de saturación H_{Sat} , dependiendo de la magnitud de H :

Proceso 1. $H < H_P$; donde H_P es el campo crítico de propagación. En esta región la orientación de los espines en la dirección del campo, véase figura 1.8, es resultado de la deformación elástica o abombamiento de la pared de los dominios magnéticos, sin que ocurra un desplazamiento, a esto se le denomina, proceso de magnetización reversible (de la pared magnética).

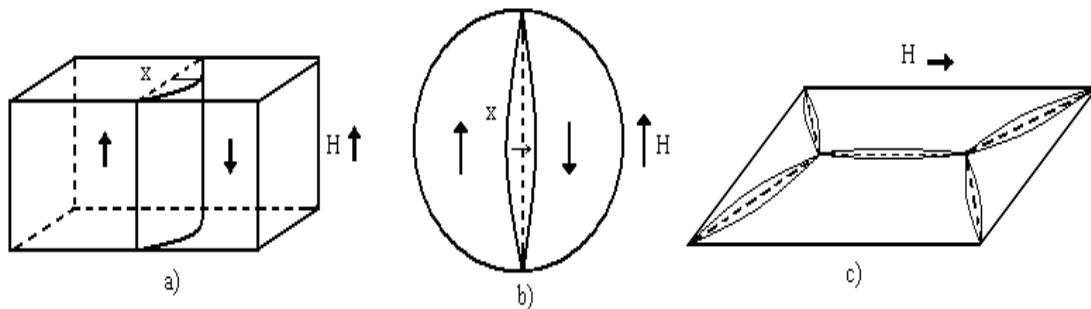


Figura 1.8.- Abombamiento de pared en a) Pared rectangular, b) Grano esférico y c) cinta amorfa.

Fuente B. D. Cullity

En esta región lineal, la permeabilidad es constante $\mu_i = \frac{B}{H}$ y se le llama permeabilidad inicial (μ_i), y el punto donde el campo cambia de pendiente se le conoce como campo crítico o de propagación (H_P).

Proceso 2. $H \geq H_c$; se corren los puntos de anclaje dando lugar al desplazamiento, mecanismo mediante el cual suceden cambios drásticos en la inducción B para pequeños incrementos de campo ΔH . Los dominios en la dirección del campo externo H crecen a expensas de los otros.

Proceso 3. $H \gg H_c$; para lograr el estado de saturación, se requiere orientar los dominios restantes en la dirección del campo aplicado, para lograr esto se

requiere un mecanismo de rotación de espines para su reorientación, el cual ocurre a valores altos de campo aplicado, ver figura 1.9.

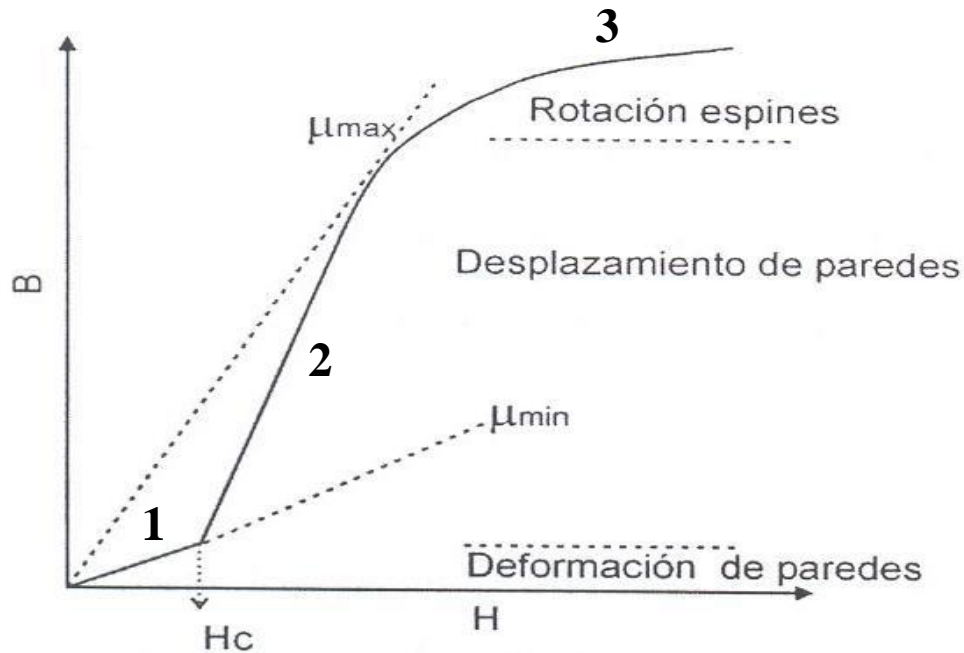


Figura 1.9.- Procesos de magnetización típico de un material magnético. Fuente B. D. Cullity

FERRITAS

Las ferritas blandas en su mayoría cristalizan en el sistema cúbico centrado en el cuerpo (BCC) y tiene propiedades magnéticas. Las ferritas son materiales cerámicos ferrimagnéticos, compuestos por hierro y oxígeno.

Las ferritas tienen una alta permeabilidad magnética, lo cual les permite almacenar campos magnéticos con más fuerza que el hierro. Las ferritas se producen a menudo en forma de polvo, con el cual se pueden producir piezas de gran resistencia y dureza, previamente moldeadas por presión y luego calentadas, sin llegar a la temperatura de fusión, dentro de un proceso conocido

como sinterización. Mediante este procedimiento se fabrican núcleos para transformadores, inductores/bobinas y otros elementos eléctricos.

Las ferritas se pueden clasificar en blandas y duras, y son óxidos cerámicos con composición general $M^{II}O \cdot Fe_2O_3$.

Hoy en día conocemos gran cantidad de materiales magnéticos blandos con la composición $M^{II}O \cdot Fe_2O_3$ donde M puede ser Ni, Co, Mn, Mg, Cu, Ti, Cd o Zn. Algunas aplicaciones típicas de las ferritas blandas son:

- Material básico para inductores y transformadores en electrónica
- Antenas de ferrita en radio, televisión y tecnología de telecomunicaciones
- Cabezales magnéticos para audio o amplificadores magnéticos
- Núcleos de ferrita para memores de núcleo magnético para equipamiento electrónico de proceso de datos
- Elementos de conexión en ingeniería de hiperfrecuencias.

Desde su introducción en los tempranos años 50, los imanes cerámicos de ferritas permanentes han ido ganando en importancia. Son los materiales magnéticos más extendidos y económicos. Algunas de las ferritas duras más importantes son ferrita de bario, ferrita de estroncio y ferritas combinadas de bario-estroncio. Algunas aplicaciones típicas para las ferritas duras se encuentran en:

- Electrónica industrial
- Tecnología de sensores
- Tecnología de televisión y radio
- Imanes para altavoces
- Pinzas magnéticas, imanes adhesivos o imanes de juguete

- Imanes de anillo o de segmentos en motores y generadores para embragues magnéticos
- Industria e ingeniería del automóvil
- Industria relojera
- Aplicaciones para el hogar, juntas para neveras
- Rotores para motores de corriente directa

MATERIALES MAGNÉTICOS AMORFOS

Un sólido cristalino se caracteriza por poseer un arreglo estructural periódico de largo alcance. Sin embargo, los materiales reales siempre presentan imperfecciones debidas a dislocaciones, defectos estructurales, impurezas, que complican el estudio de éstos. Los metales amorfos no tienen periodicidad de largo alcance (Figura 1.10), ni orden atómico, por lo que son diametralmente diferentes a los cristalinos.

Las aleaciones amorfas magnéticas han sido consideradas como excelentes materiales magnéticos suaves, debido a su falta de periodicidad estructural, lo que resulta en valores muy bajos de H_c , consecuencia directa de anisotropías muy pequeñas.

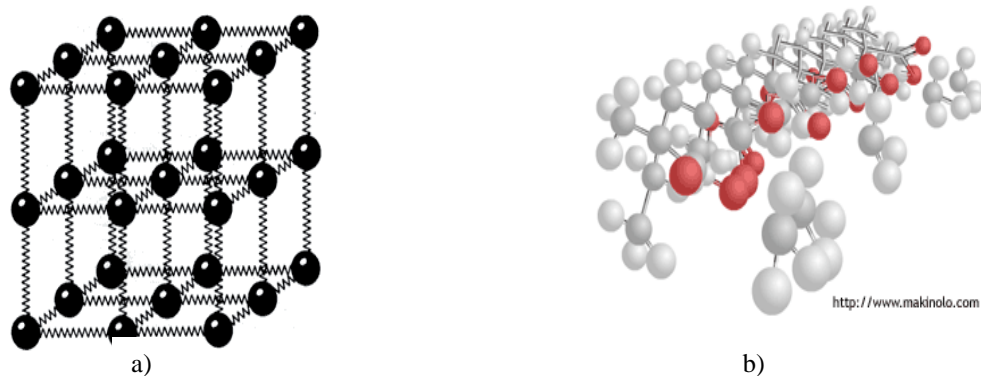


Figura 1.10.- a) cristal b) amorfa. Fuente B. D. Cullity

Existen diferentes métodos para obtener materiales amorfos y dependiendo del método de preparación las muestras amorfas pueden ser películas delgadas, discos, hilos o cintas, en general estos métodos son:

- a) Evaporación térmica.
- b) Sputtering.
- c) Solidificación ultra-rápida [6].

Las aleaciones amorfas magnéticas se clasifican como:

- (MT-M): MT son metales de transición, M metaloides (B, Si).
- (TR-MT): TR son tierras raras, las cuales generan una alta anisotropía, en consecuencia los materiales que se obtienen son imanes permanentes [7].

Las aleaciones más importantes del tipo MT-M son:

- ❖ Aleaciones de Fe. Poseen los valores más grandes de inducción de saturación, ver tabla I, y valores altos de magnetostricción ($\lambda_s = 30 * 10^{-6}$).
- ❖ Aleaciones de Fe-Ni. El contenido de níquel controla la formación amorfa, reduciendo la magnetostricción ($\lambda_s \approx 10^{-6}$).
- ❖ Aleaciones de Co. Tienen las mejores características como materiales suaves, magnetostricciones pequeñas, permeabilidades altas y campos coercitivos bajos.

¿QUÉ ES UNA BOBINA TOROIDAL?

Un solenoide es un electroimán formado a partir de un cable que lleva la corriente. Los electroimanes tienen campos magnéticos creados por corrientes. El alambre de un solenoide se forma a menudo en una bobina helicoidal, y una pieza de metal, generalmente hierro, se inserta en el interior. Cuando un solenoide está doblado en la forma de un círculo o anillo, se le llama toroide.

Un toroide tiene un campo magnético en el interior de sí mismo que forma una serie de círculos concéntricos. Fuera de él, el campo es nulo. La fuerza de este campo magnético depende del número de espiras que el toroide tiene en su cuerpo. El campo no es uniforme: es más fuerte cerca de la parte interior del anillo y más débil cerca de la parte exterior. Esto significa que si r es el radio del transformador, el campo magnético disminuye a medida que r se hace más grande.

Los toroides son valiosos porque, como todos los solenoides, son inductores. Los inductores pueden inducir o causar corrientes que se crean en bobinas cercanas. Fueron inventadas en agosto de 1831 por el físico Inglés Michael Faraday. Fue Faraday quien descubrió que un campo magnético variable puede inducir una tensión en un cable cercano, y esto se llama la Ley de Inducción de Faraday. Los toroides también presentan auto-inductancia, que es un tipo de resistencia. El toroide resiste los cambios en su propia corriente, ya sea para hacerla más grande o más pequeña. La fuerza de la auto-inductancia depende del número de bobinas del toroide y de la fuente de CA.

TRANSFORMADORES TOROIDALES

Los transformadores se hacen con un par de solenoides envueltos alrededor de un núcleo de metal, que es por lo general una ferrita. Los transformadores toroidales son dos bobinas envueltas alrededor de un metal, ferrita o acero de silicio, en forma de anillo. Las bobinas están bien envueltas en diferentes áreas o colocadas una sobre otra. Son preferentemente usados para RF o transformadores de frecuencia de radio, y se emplean para aumentar o disminuir las tensiones de las fuentes de energía, y para aislar las diferentes partes en un circuito. Los transformadores de RF se utilizan también para la adaptación de impedancia, lo que significa que ayudan a conectar partes de entrada y de salida de los diferentes circuitos.

DESVENTAJAS Y VENTAJAS

Los toroides tienen algunas desventajas más que los solenoides regulares. Son más difíciles de bobinar y también de sintonizar. Sin embargo, son más eficientes en la producción de inductancias necesarias. Para la misma inductancia que un solenoide regular, un toroide requiere menos vueltas, y puede hacerse más pequeño en tamaño. Otra ventaja es que, dado que el campo magnético está confinado en el interior, los toroides y transformadores toroidales se pueden colocar cerca de otros componentes electrónicos sin preocupación acerca de las interacciones inductivas no deseadas.

USOS

Los toroides se utilizan en las telecomunicaciones, dispositivos médicos, instrumentos musicales, amplificadores, balastos y más. Un tokamak es un dispositivo de fusión nuclear que emplea un campo magnético para confinar el plasma. El plasma es un gas que contiene electrones libres e iones, y aparece sólo a altas temperaturas. El confinamiento del plasma en un tokamak se hace con el uso de un toroide.

Capítulo II

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Anillo de Rowland

Para la determinación de la permeabilidad inicial y la Temperatura de Curie de las ferritas comerciales y la cinta magnética amorfa, se utilizó la técnica denominada anillo de Rowland Figura 2.1, ya que genera buenas mediciones de la permeabilidad.

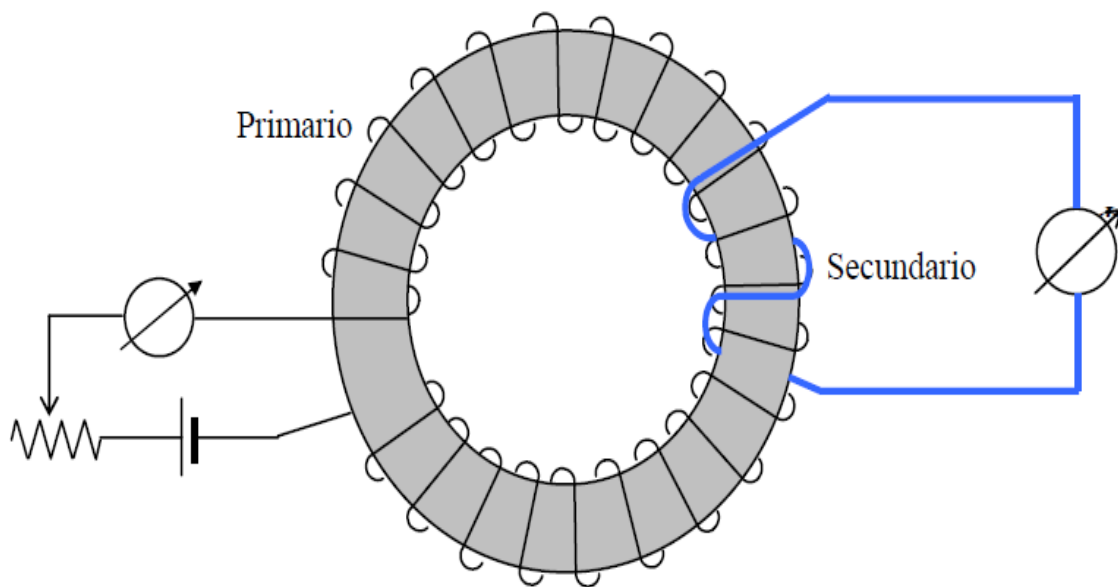


Figura 2.1.- Anillo de Rowland. Fuente B. D. Cullity

En este arreglo experimental el toroide es un material magnético envuelto de un embobinado primario que permite magnetizarlo y un embobinado secundario que permite determinar la inducción de flujo magnético. La corriente eléctrica en el embobinado primario genera un campo magnético de excitación, H , en el material, el cual está asociado con el voltaje de excitación (v_1). El campo magnético del v_1 genera una inducción de flujo magnético (B) dentro del material por lo que un

embobinado secundario permite medir el voltaje de inducción (v_2) asociado al flujo magnético dentro del anillo que es proporcional al campo de inducción magnética B .

En el presente trabajo de tesis el arreglo experimental del anillo de Rowland que se implementa para obtener las mediciones de la μ_i y la T_C integra un sistema de medición empleando técnicas de procesamiento digital de señales sobre la base de una PC y la tarjeta de adquisición NI USB-6211 con interfaz USB.

Para la determinación de la permeabilidad magnética inicial se apoya en la inducción de Faraday, cuyo principio básico consiste en excitar un material magnético con una corriente alterna mediante un embobinado primario para obtener la respuesta del flujo magnético a través de un embobinado secundario. En este caso la señal de los embobinados primario y secundario se captura en los canales A y B de un osciloscopio. La respuesta de los ciclos es delimitada por elipses cuya magnitud de los ejes mayor y menor dependen del voltaje y frecuencia del primario y su respuesta en el material a través de la corriente inducida en el secundario, que permiten evaluar de forma indirecta la curva de magnetización inicial. La primer parte de esta curva delimita la región en donde los procesos de magnetización son reversibles y se caracteriza por la respuesta lineal de la inducción magnética del material contra el campo aplicado. En esta región, la permeabilidad es constante y se le conoce como permeabilidad inicial (μ_i).

Con este sistema se pueden elegir intervalos de operación en voltaje de 0.5 a 10 V_{CA} para rangos de frecuencias entre 0.1 y 50 kHz, con lo cual se puede medir una amplia gama de materiales magnéticos suaves hasta ferritas semi-duras.

Para determinar la región lineal se deben utilizar los parámetros adecuados tanto de voltaje de excitación, número de vueltas en los embobinados y frecuencia, los cuales varían por material.

El arreglo experimental del anillo de Rowland está diseñado para restringir la corriente en función de la frecuencia, es decir si se aplica una frecuencia muy baja, se llega rápido al estado de saturación (Aumentando de forma importante el consumo de corriente). Por el contrario, si se aplica una frecuencia muy alta, aparecen las pérdidas en el núcleo. Las pérdidas en el núcleo se dan por el calor producido por el campo magnético, y eso varía de acuerdo al material del núcleo.

A partir de un software de control y medición [8], se obtienen curvas de voltajes de excitación (voltaje del embobinado primario) contra voltajes de inducción (voltaje del embobinado secundario) de un circuito magnético cerrado, que permiten calcular posteriormente el valor de la permeabilidad inicial a partir de la pendiente en la zona lineal de dichas curvas.

La determinación de la permeabilidad inicial provee información acerca del comportamiento de materiales frente a campos magnéticos. El objetivo de este trabajo es mostrar el comportamiento magnético de cuatro ferritas y una cinta amorfa al variar la temperatura y modificar los parámetros de incremento de cambio de la temperatura, voltaje de excitación y frecuencia, con la finalidad de establecer la dependencia de la transición de Curie (T_C) con estos parámetros de medición.

Ferritas

Se emplearon cuatro toroides de ferrita comercial del mismo proveedor y de diferente composición, en la Tabla 2.1 se muestran las dimensiones de las ferritas utilizadas.

Ferritas	Radio ext. (mm)	Radio interno (mm)	Altura (mm)
F50A-J	6.72	3.34	6.44
F50A-43	6.40	3.72	6.46
F50A-W	6.72	3.48	6.46
F50A-F	6.70	3.42	6.42

Tabla 2.1.- Medidas de las ferritas utilizadas

Se emplearon distintas relaciones entre el embobinado primario con respecto al embobinado secundario para cada ferrita 15-5, 15-10 y 15-15 respectivamente, debido a que se requiere de un alto campo de excitación para generar un voltaje de inducción que sea medible, y que es independiente para cada material.

Cada una de estas relaciones se midió a frecuencias distintas (1, 5, 10, 15, 20, 22, 24, 26, 28 y 30 kHz) y en cada una de las frecuencias se varió el voltaje (1, 2, 5, 7 y 10 V).

Para cada medición se realizó una gráfica, con el fin de analizar para qué voltaje y frecuencia se obtuvo la mejor respuesta de la permeabilidad inicial de cada ferrita.

El método para calcular la permeabilidad inicial consiste en graficar el voltaje aplicado al embobinado primario, v_1 , contra el voltaje inducido en el embobinado secundario, v_2 . La amplitud promedio (RMS) se usa para calcular la pendiente de la curva donde su comportamiento es lineal. El sistema de medición empleado para evaluar ambos voltajes se desarrolla mediante la técnica de procesamiento digital de señales empleando una tarjeta de adquisición NI USB-6211 con interfase USB a una PC.

El voltaje a través de cada embobinado está dado por:

$$v_1 = N_1^2 \frac{\mu A}{l} \frac{di_1}{dt} - N_1 N_2 \frac{\mu A}{l} \frac{di_2}{dt} \quad (2.1)$$

$$v_2 = N_1 N_2 \frac{\mu A}{l} \frac{di_1}{dt} + N_2^2 \frac{\mu A}{l} \frac{di_2}{dt} \quad (2.2)$$

Donde l es la longitud media del núcleo, A es la sección transversal, μ es la permeabilidad, $N_1^2 \frac{\mu A}{l}$ y $N_2^2 \frac{\mu A}{l}$ corresponden a las autoinductancias de cada embobinado, y $N_1 N_2 \frac{\mu A}{l}$ es la inductancia mutua originada del flujo magnético común que relaciona a los dos embobinados. La corriente que circula por el embobinado del primario, crea un campo magnético, que induce un flujo magnético en el toroide que es resultado de la interacción del material con el campo magnético, el cual produce un voltaje en las terminales del segundo embobinado; este voltaje es proporcional a la razón de variación de la corriente que circula por embobinado del primario.

Debido a que el circuito del embobinado secundario se encuentra abierto (es decir, tiene una impedancia de salida muy alta), la corriente i_2 es cero y el voltaje a través de la segunda bobina se puede reescribir como:

$$v_2 = N_1 N_2 \frac{\mu h}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1} \frac{d}{dt} \left(\frac{v_1}{\sqrt{R_p^2 + (\omega L_p)^2}} \cos \left(\omega t - \tan^{-1} \frac{\omega L_p}{R_p} \right) \right) \quad (2.3)$$

Donde la corriente en el embobinado primario se calcula al resolver el circuito RL en serie:

$$i_1(t) = \frac{v_1}{\sqrt{R_p^2 + (\omega L_p)^2}} \cos \left(\omega t - \tan^{-1} \frac{\omega L_p}{R_p} \right) \quad (2.4)$$

Sustituyendo la derivada de la corriente $\left(\frac{di_1(t)}{dt} \right)$ y considerando solo el modulo se obtiene la expresión del voltaje inducido en el segundo embobinado, que es

función de la corriente que circula en el circuito primario. Por otro lado, la amplitud de la corriente i_1 se puede medir directamente a partir de la caída de potencial en la resistencia R_p ($i_1 = \frac{v_{1p}}{R_p}$), por tanto la ecuación (2.3) se puede escribir como sigue:

$$v_2 = N_1 N_2 \frac{\mu h}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1} \frac{\omega}{R_p} v_{1p} \quad (2.5)$$

Donde se puede definir un factor constante:

$$G = N_1 N_2 \frac{h}{2\pi R_p} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \quad (2.6)$$

Como $\omega = 2\pi f$, entonces $f = \frac{\omega}{2\pi}$ por lo tanto la ecuación (2.5) queda de manera simplificada con la siguiente expresión:

$$v_2 = \mu f N_1 N_2 \frac{h}{R_p} \ln \frac{r_2}{r_1} v_{1p} \quad (2.7)$$

Esta ecuación nos indica que para una frecuencia (f) dada, el voltaje de salida es proporcional al voltaje de entrada, donde:

$$m = \mu f N_1 N_2 \frac{h}{R_p} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (2.8)$$

Esta es la pendiente entre los voltajes, y por lo tanto al despejar μ se obtiene:

$$\mu = \frac{m}{f N_1 N_2 \frac{h}{R_p} \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2.9)$$

Y con esta ecuación es posible calcular la permeabilidad relativa inicial.

Posteriormente la temperatura de Curie para las cuatro ferritas se midió con los parámetros que se muestran en la Tabla 2.2:

Tabla 2.2.- Parámetros para mediciones de la temperatura de Curie

Ferrita	Voltaje	Frecuencia	Inc
F50A-F	1 V	5 kHz	5
F50A-F	1 V	15 kHz	5
F50A-F	1 V	15 kHz	10
F50A-J	2 V	20 kHz	5
F50A-J	1 V	24 kHz	5
F50A-J	1 V	15 kHz	5
F50A-J	1 V	15 kHz	10
F50A-43	1V	24kHz	5
F50A-43	1V	24kHz	10
F50A-43	1V	30kHz	5
F50A-43	1V	30kHz	10
F50A-W	1V	28kHz	5
F50A-W	1V	28kHz	10
F50A-W	1V	30kHz	5
F50A-W	1V	30kHz	10

Aleación amorfa

Después se utilizó una cinta magnética denominada VITROVAC 6030 cuya composición es $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Si}_{15}\text{B}_5\text{Cu}_{10}$, que se le dio forma toroidal, en la Tabla 2.3 se muestran sus dimensiones:

Tabla 2.3.- Medidas de la cinta utilizada

Cinta Magnética	Radio externo (mm)	Radio interno (mm)	Altura (mm)
VITROVAC 6030	0.013012	0.013	0.00836

Para el cálculo de la permeabilidad se utilizó el mismo mecanismo que se usó en las ferritas.

La temperatura de Curie se midió con los parámetros que se muestran en la Tabla 2.4:

Tabla 2.4.- Parámetros para mediciones de la permeabilidad inicial y temperatura de Curie en la VITROVAC 6030

Voltaje	Frecuencia	Inc	N₁	N₂
0.5 V	35 kHz	3	60	30
0.5 V	40 kHz	3	60	30

Para el cálculo de la permeabilidad se utilizó el mismo mecanismo que se usó en las ferritas.

Capítulo III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presentaran primero los resultados del cálculo de la permeabilidad inicial y medición de la temperatura de Curie de las ferritas comerciales y como segunda parte el cálculo de la permeabilidad inicial de la cinta magnética amorfa.

1) Ferritas comerciales

Los datos del voltaje de excitación (v_1) y voltaje de inducción (v_2) se obtienen del archivo ASCII que proporciona el equipo. En la Figura 3.1 se observa la curva de magnetización inicial que se genera en los materiales ferromagnéticos, donde se puede observar a diferentes procesos de magnetización.

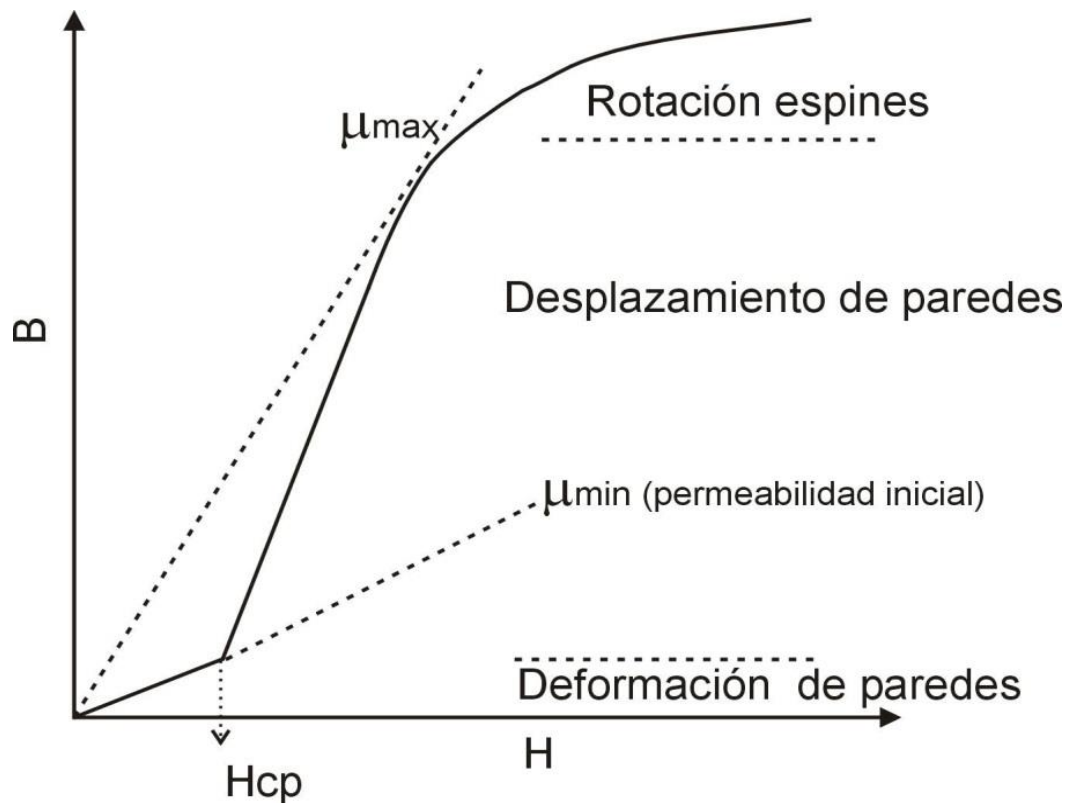


Figura 3.1.- Curva de magnetización inicial típica de materiales ferromagnéticos, donde se observan los procesos de magnetización involucrados. Fuente B. D. Cullity

F50-AF

La primera ferrita que se analizara será la F50-AF, en la figura 3.2 se muestra la gráfica que corresponde a la curva de magnetización inicial donde se pueden observar las diferentes regiones de comportamiento magnético, la primera región la cual está señalada por el círculo de color rojo delimita la región en donde los procesos de magnetización son reversibles y se caracteriza por la respuesta lineal de la inducción magnética del material contra el campo aplicado, en esta región la permeabilidad es constante esto es particularmente de gran importancia ya que de aquí se obtiene el valor de la permeabilidad magnética inicial del material, para esta ferrita se observa que la permeabilidad inicial se encuentra entre el rango de 0 a 1V en el voltaje de excitación y de 0 a 3.5V en el voltaje de inducción; la segunda región comienza donde hay un cambio de pendiente, esta segunda región está delimitada entre 1 y 4V en el voltaje de excitación y de 3.5 a 5.5V en el voltaje de inducción; la última región que es la saturación se encuentra entre los rangos de 4 a 7.5V en el voltaje de excitación y 5.5 a 6V en el voltaje de inducción.

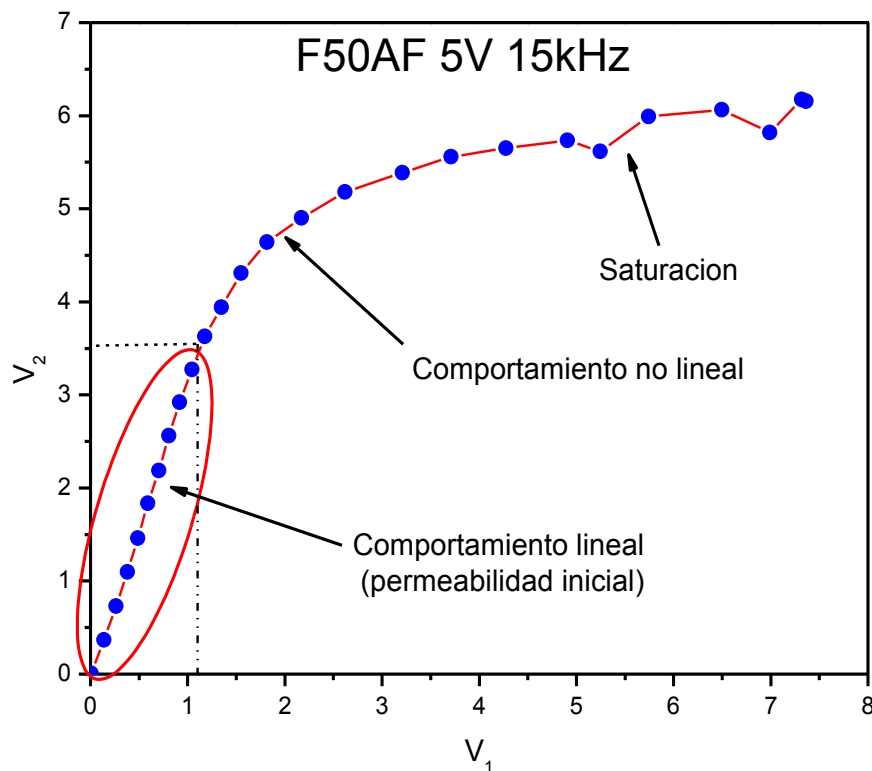


Figura 3.2.- Curva de magnetización inicial de la ferrita F50A-F. Fuente propia.

Para la determinación de la permeabilidad inicial se requiere obtener una respuesta lineal por lo que se cambia la frecuencia y el voltaje para restringir la corriente y en consecuencia el campo aplicado, es por eso que se realizaron diversos análisis con voltajes, frecuencia y embobinados. Tras estos análisis se observó que el embobinado que presentó mejores resultados fue el de 15 y 10 vueltas en el embobinado primario y secundario respectivamente.

En la siguiente serie de imágenes se muestra la dependencia de la variación de estos parámetros con la respuesta magnética del material. En donde se observa que para voltajes pequeños y altas frecuencias la respuesta de la inducción de flujo de magnético comienza a ser lineal con respecto al campo magnético originado por el V_1 , esto indica que el proceso de magnetización que origina esta respuesta es de naturaleza reversible, lo cual es necesario y suficiente para la determinación de la permeabilidad inicial.

La imagen 3.3 muestra que con un voltaje de 1V y a partir de una frecuencia de 15 kHz se empieza a observar un comportamiento lineal.

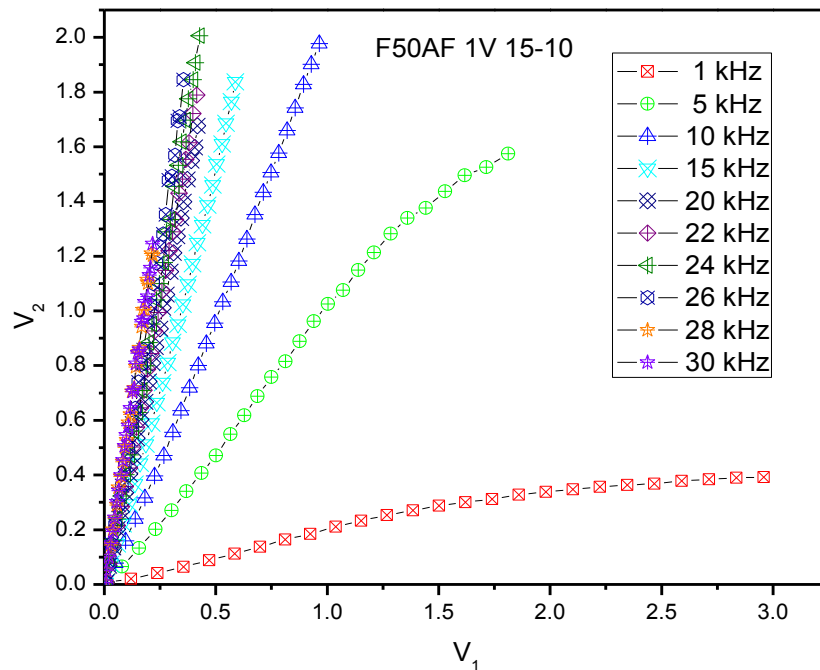


Figura 3.3.- Dependencia de la variación de la frecuencia en la ferrita F50A-F para un voltaje de 1V. Fuente propia.

Por otro lado cuando el voltaje de excitación se eleva en este caso al doble, es decir a 2V, el comportamiento lineal que se presentaba a la frecuencia de 15kHz ya no es lineal y al final de la curva presenta un cambio en su pendiente, esto es originado porque entre más voltaje de excitación sobre el material, este se magnetiza más rápido y es por eso que se observan estos cambios que se aprecian en la figura 3.4.

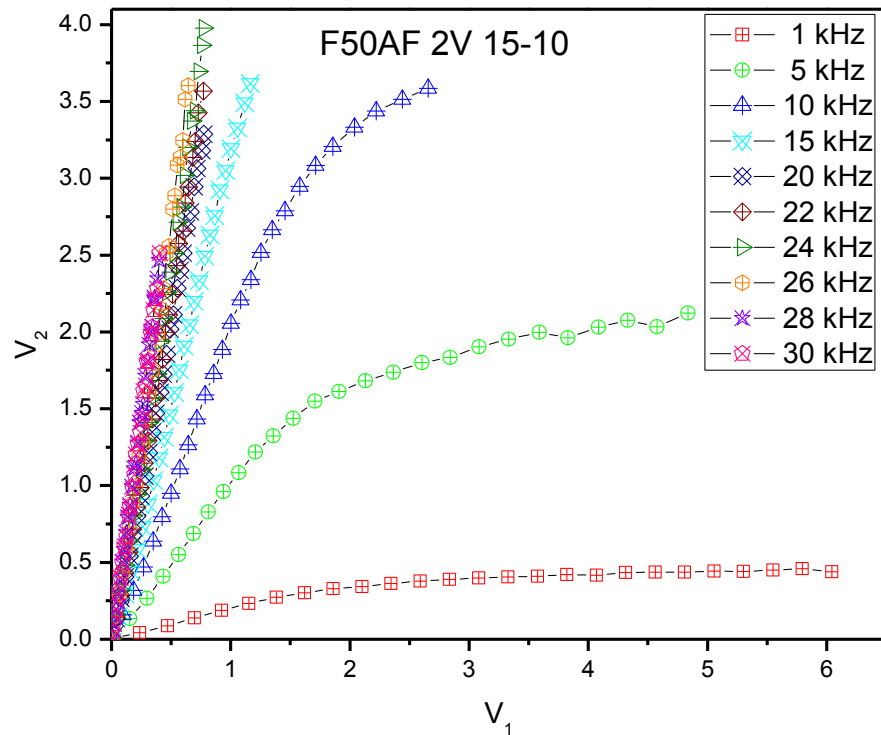


Figura 3.4.- Dependencia de la variación de la frecuencia en la ferrita F50A-F para un voltaje de 2V. Fuente propia.

Cuando se somete la F50-AF a un voltaje de excitación más grande, como lo es a 5V el material se magnetiza más rápido y por lo tanto ya no es tan visible un comportamiento lineal y se genera una saturación que se puede observar en la siguiente figura.

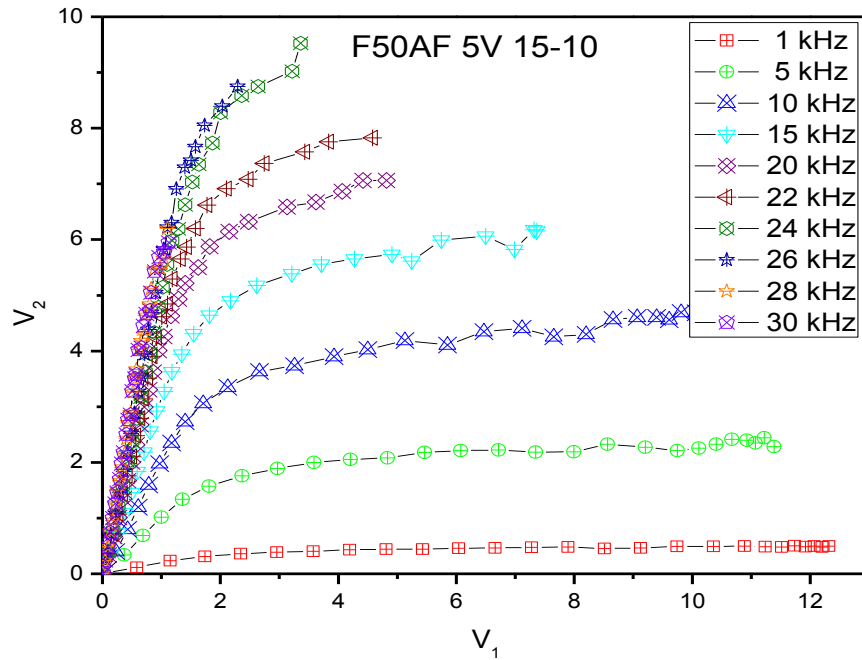


Figura 3.5.- Dependencia de la variación de la frecuencia en la ferrita F50A-F para un voltaje de 5V. Fuente propia

Al incrementar más el voltaje de excitación, es decir a 7V y 10V la ferrita F50-AF presenta una magnetización casi inmediata, llegando a una saturación rápida, como se observa en las imágenes 3.6 y 3.7.

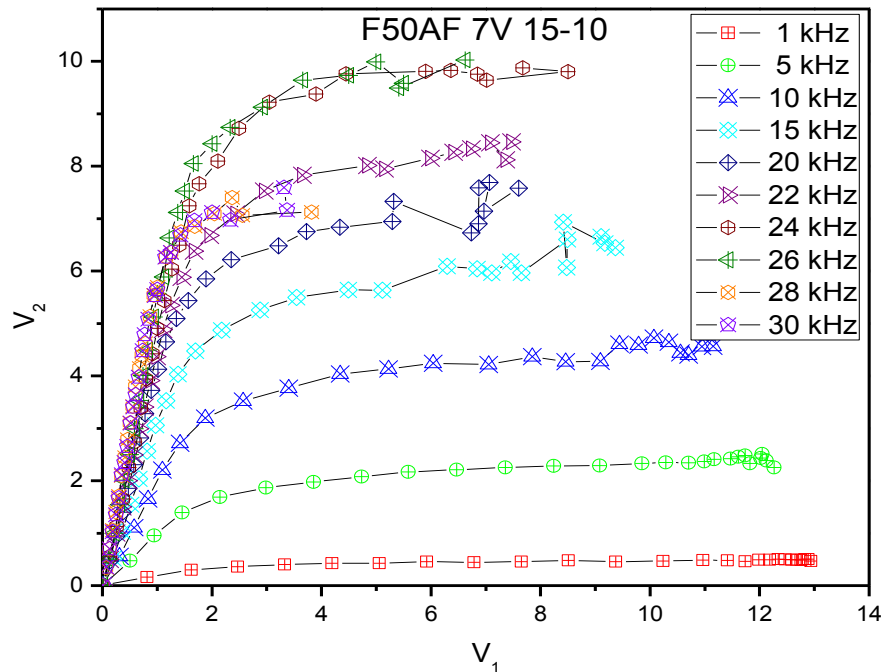


Figura 3.6.- Dependencia de la variación de la frecuencia en la ferrita F50A-F para un voltaje de 7V. Fuente propia

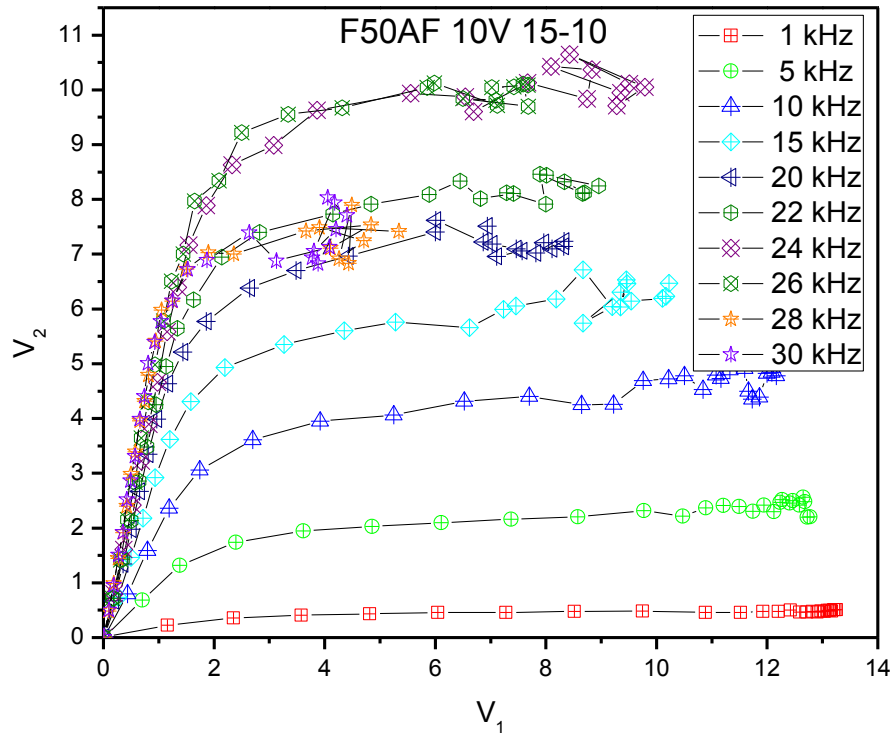


Figura 3.7.- Dependencia de la variación de la frecuencia en la ferrita F50A-F para un voltaje de 10V. Fuente propia

Aunque la zona de interés se encuentra a voltajes cercanos a 1V, se tomaron lecturas a voltajes mayores para caracterizar el comportamiento de la ferrita F50-AF a voltajes altos. Las condiciones óptimas de voltaje y frecuencia son distintas para cada tipo de ferrita y para encontrar estas condiciones se realizaron varios ensayos.

Como se apreció en la imagen 3.3, cuando la F50-AF se somete a un voltaje de excitación de 1V se observan los mejores comportamientos lineales, en la figura 3.8, 3.9 y 3.10 se presentan la graficas que se obtuvieron a diversas frecuencias, respetando 1V de excitación y 15 y 10 vueltas en los embobinados primario y secundario respectivamente. En la figura 3.8 se observa un comportamiento muy lineal usando 15kHz para analizar la gráfica se empleó el software OriginPro8 con el cual se determinó la zona del comportamiento lineal y se realizó un ajuste de mínimos cuadrados con el cual se obtuvo el valor de la pendiente. El valor de esta pendiente es de 3.14 y este es usado para calcular la permeabilidad relativa inicial

utilizando la ecuación 10. Posteriormente ese valor se divide entre la permeabilidad del vacío ($\mu_0=4\pi\times 10^{-7}$) obteniéndose de esta forma la permeabilidad inicial del material.

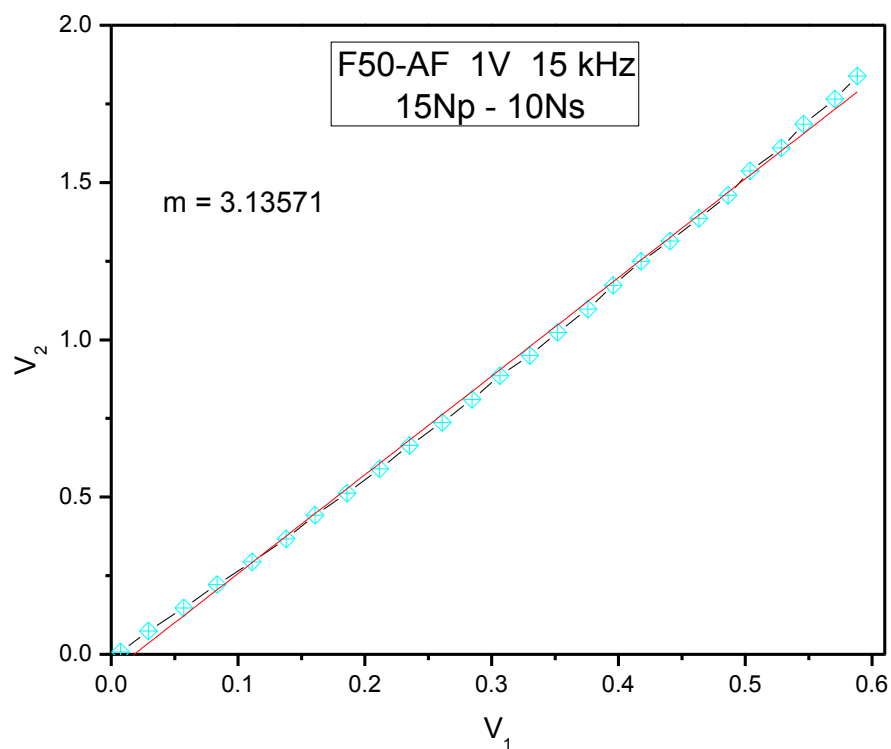


Figura 3.8.- Ferrita F50A-F con un voltaje aplicado de 1V a una frecuencia de 15kHz. Fuente propia

En la figura 3.9, se observa la gráfica obtenida para la ferrita F50A-F con una frecuencia de 20kHz, donde también se aprecia un comportamiento lineal, al analizar la gráfica de la misma forma que la de la figura 3.8, se obtiene un valor de 4.04 para la pendiente, con este valor se calcula la permeabilidad inicial la cual es de 2480.41.

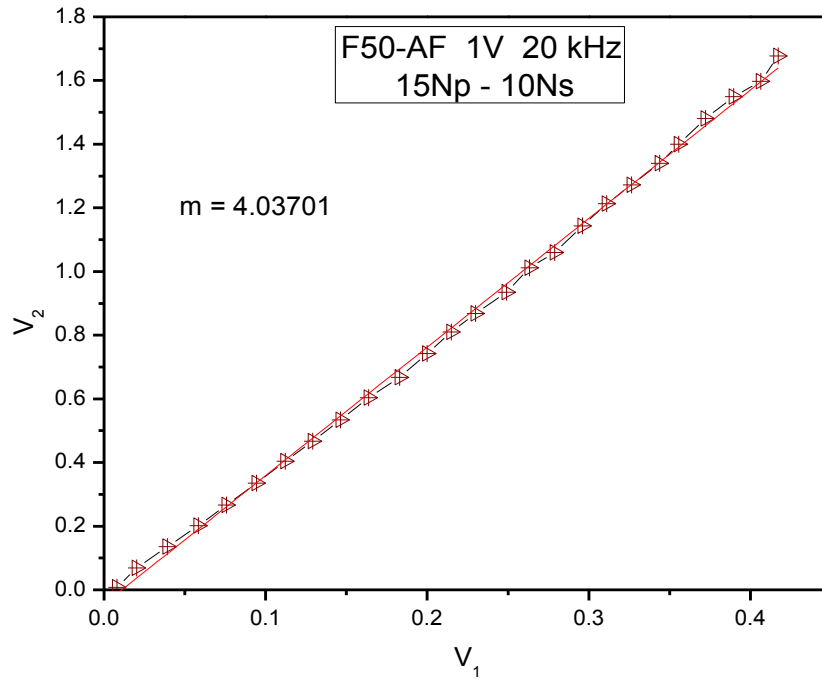


Figura 3.9.- Ferrita F50A-F con un voltaje aplicado de 1V a una frecuencia de 20kHz. Fuente propia

Se puede apreciar en la figura 3.10 que también al utilizar 24kHz existe un comportamiento lineal, el valor de la pendiente para este caso es de 4.78 y el de la permeabilidad inicial es de 2447.07.

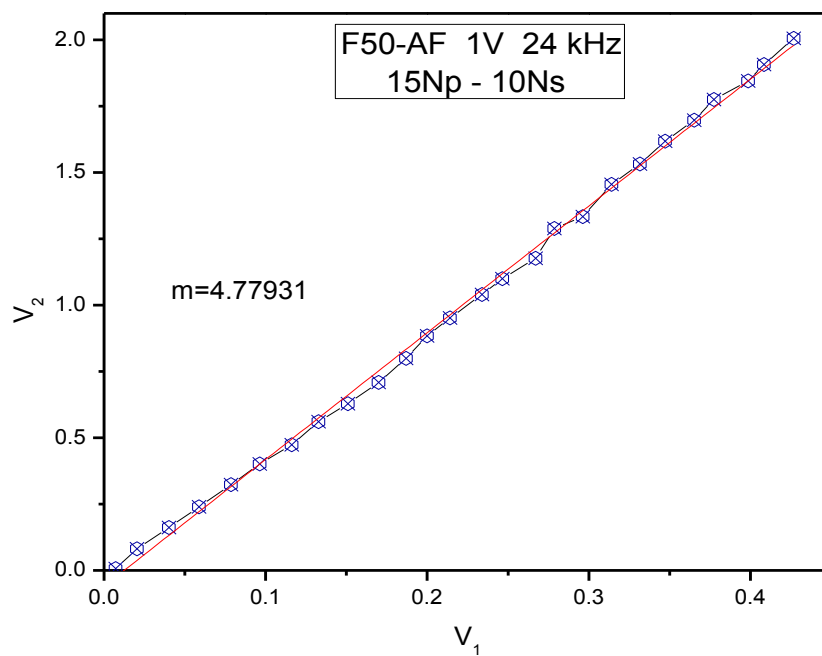


Figura 3.10.- Ferrita F50A-F con un voltaje aplicado de 1V a una frecuencia de 24kHz. Fuente propia

En la tabla 3.1 se muestran los valores de la permeabilidad inicial calculadas para la ferrita F50A-F utilizando 1V y diversas frecuencias con 15 y 10 vueltas en los embobinados primario y secundario respectivamente. En esta tabla se señala con verde la μ_i obtenida con 15kHz ya que esta fue la que obtuvo el mejor resultado teniendo un error relativo del 14.37%.

Tabla 3.1.- Permeabilidad inicial de la ferrita F50A-F calculada a diferentes voltajes y frecuencias

Frecuencia	μ_i	E_R %
15kHz	2568.84	-14.37
20kHz	2480.41	-17.32
24kHz	2447.07	-18.43

Como ya se mencionó al utilizar diferentes voltajes de excitación el material se magnetiza con mayor rapidez, para el caso de la F50-AF a partir de 5V se observa una saturación. En la siguiente serie de imágenes se podrá observar el análisis del comportamiento de la F50-AF a diversos voltajes conservando la frecuencia que para este caso es de 15kHz y el número de vueltas que es de 15 y 10.

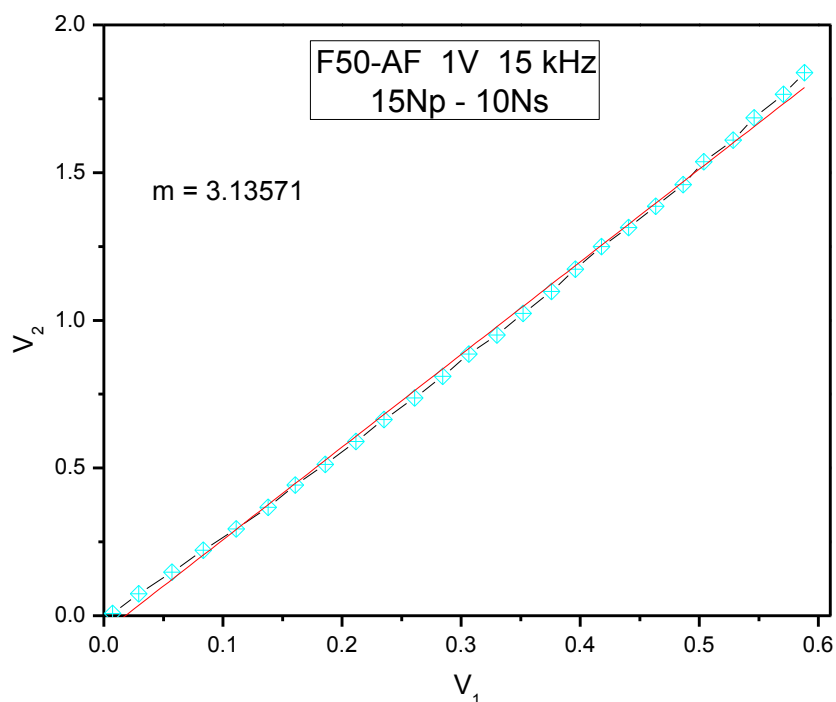


Figura 3.8.- Ferrita F50A-F con un voltaje aplicado de 1V a una frecuencia de 15kHz. Fuente propia

Se hace uso de la figura anterior la imagen 3.8, para empezar el análisis desde un voltaje de excitación de 1V, como ya se indicó su pendiente es de 3.14 y el valor de su permeabilidad es de 2568.84.

Al aplicar un voltaje de 2V la pendiente cambia, esto se debe a la excitación que produce un mayor voltaje, este cambio en la pendiente origina por consiguiente una valor distinto al realizar el cálculo de la permeabilidad inicial, en la gráfica de la figura 3.11 se puede observar que el valor de la pendiente es de 3.23 y el de la permeabilidad inicial es de 2648.94.

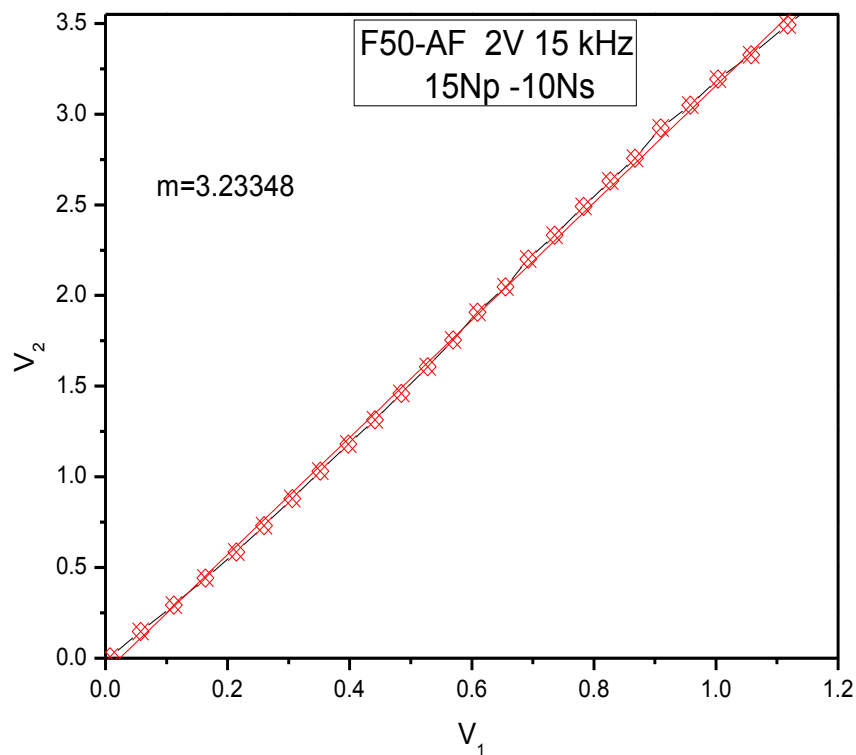


Figura 3.11.- Ferrita F50A-F con un voltaje aplicado de 2V a una frecuencia de 15kHz. Fuente propia

Mientras se incrementa el voltaje aplicado la F50-AF se produce una magnetización saturada y esto origina que sea más difícil realizar el cálculo de la pendiente, sin embargo se pueden tomar solo los puntos donde se aprecie una linealidad constante, tal es el caso de la siguiente grafica que se aprecia en la

figura 3.12, cuando se aplica un voltaje de excitación de 5V se tiene un valor de la pendiente de 3.2 y una permeabilidad de 2617.61.

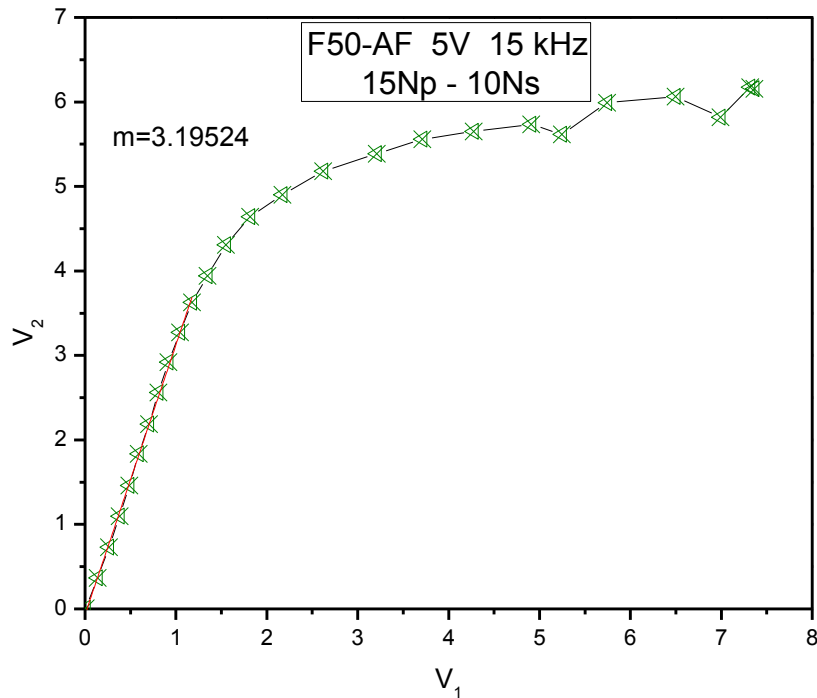


Figura 3.12.- Ferrita F50A-F con un voltaje aplicado de 5V a una frecuencia de 15kHz. Fuente propia

Cuando se aplican voltajes de excitación de 7 y 10V se pueden apreciar que las curvas de magnetización presentan las tres regiones de comportamiento, sin embargo la parte lineal es muy corta aun así se pueden medir sus pendientes, como se puede observar en la figura 3.13 y 3.14; para la primera gráfica se tienen 7 puntos y para la segunda solo 5 puntos, no obstante se aprecia que el comportamiento lineal se encuentran en la misma zona sin embargo sus pendientes difieren para un voltaje de 7V el valor es de 3.21 y para 10V es de 3.16 y las permeabilidades calculados son de 2631.91 y 2591.82.

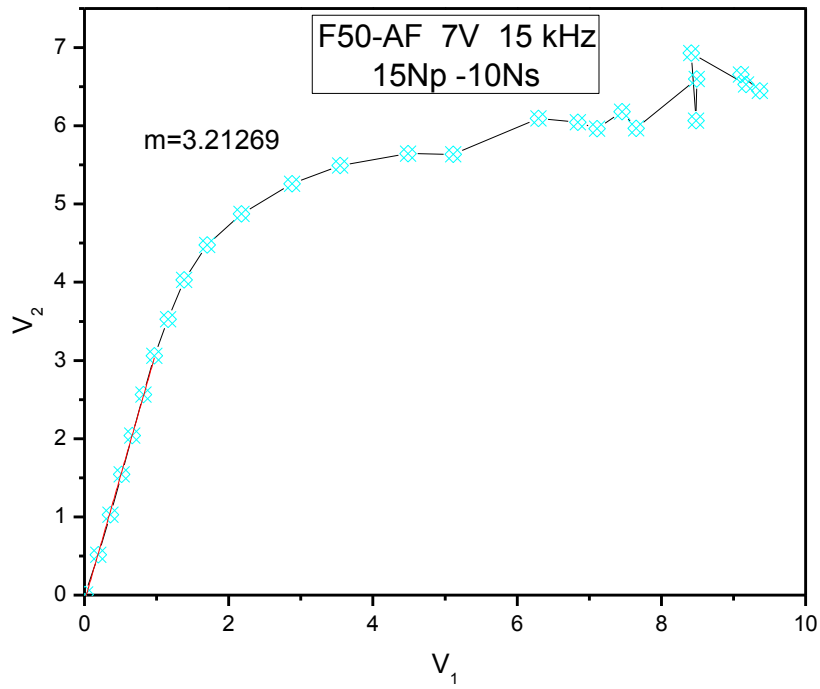


Figura 3.13.- Ferrita F50A-F con un voltaje aplicado de 7V a una frecuencia de 15kHz. Fuente propia

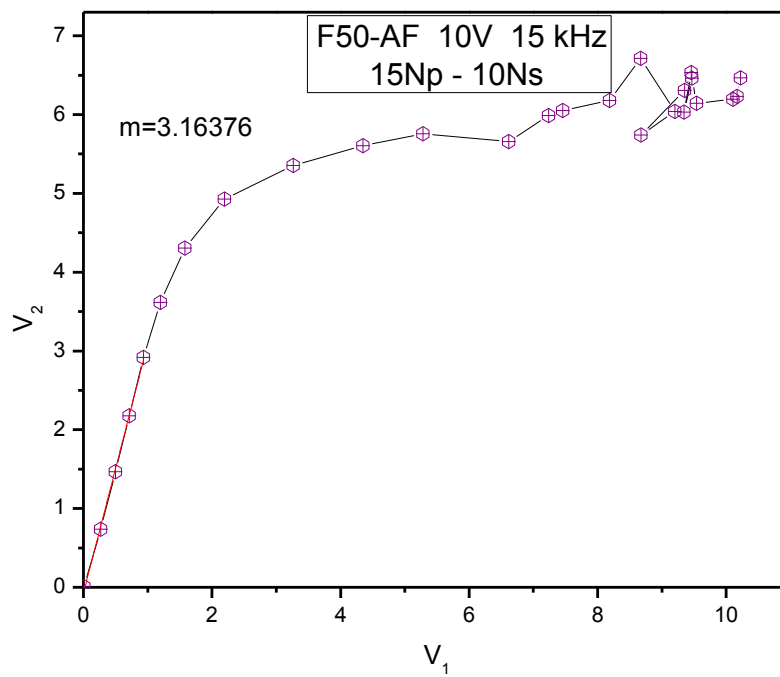


Figura 3.14.- Ferrita F50A-F con un voltaje aplicado de 10V a una frecuencia de 15kHz. Fuente propia

En la tabla 3.2 se muestran los valores de la permeabilidad inicial calculadas para la ferrita F50A-F aplicando distintos voltajes y una frecuencia constante de 15 kHz con 15 y 10 vueltas en los embobinados primario y secundario respectivamente.

Tabla 3.2.- Permeabilidad inicial de la ferrita F50A-F calculada a diferentes voltajes y una frecuencia constante de 15kHz

Voltajes	μ_i	E_R %
1V	2568.84	14.37
2V	2648.94	11.70
5V	2617.61	12.75
7V	2631.91	12.27
10V	2591.82	13.61

En la anterior tabla se puede ver que las permeabilidades obtenidas con voltajes de excitación mayores a 1V presentan un porcentaje de error menor comparado al que se obtuvo con 1V a pesar de que se obtienen menos puntos que presentan comportamiento lineal cada que se incrementa el voltaje aplicado. Sin embargo para el posterior estudio que es sobre la medición de la T_c se necesita limitar a la ferrita con un voltaje pequeño para que no se sature magnéticamente el material y así poder hallar la T_c .

Ya que se analizó la ferrita F50-AF con un voltaje constante y distintas frecuencias, y también se analizó con voltajes diferentes y una frecuencia constante respetando el número de vueltas en los embobinados en los dos casos, ahora se realizara el estudio con un voltaje y frecuencia constantes pero variando el número de vueltas en los embobinados para observar el comportamiento del material y observar que tanto varia el valor de su permeabilidad inicial. En la siguiente sucesión de figuras se puede observar el comportamiento de la F50-AF a un voltaje de 1V y diversas frecuencias con los embobinados de 15-5, 15-10 y 15-15, en donde se observa que las 3 graficas son muy parecidas a excepción del rango del voltaje que se induce en el material, este comportamiento se debe a que entre más vueltas en el embobinado secundario se induce un

mayor flujo magnético en el material y esto provoca que el rango sea mayor a pesar de aplicar un voltaje de excitación igual.

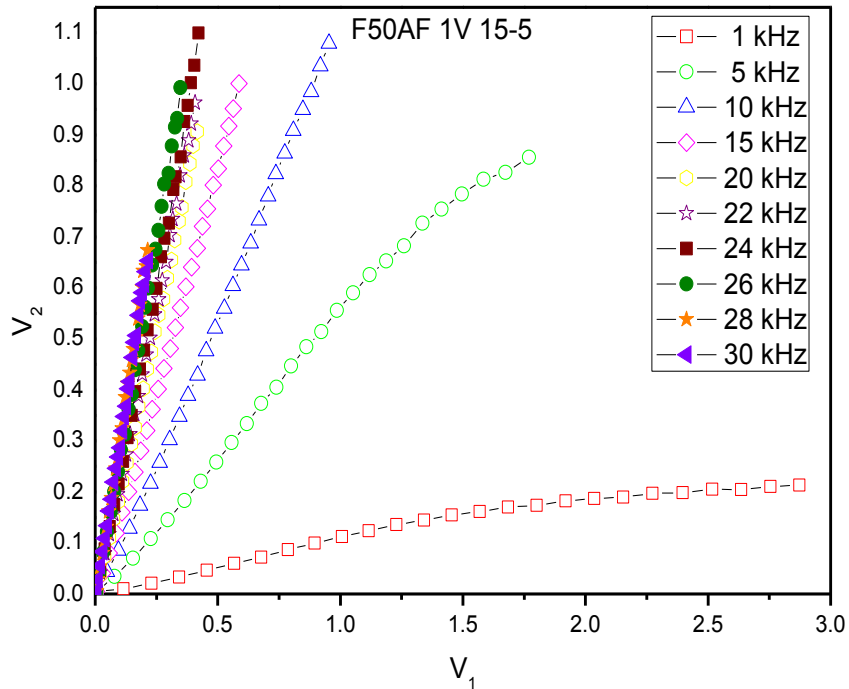


Figura 3.3.- Dependencia de la variación de la frecuencia en la ferrita F50A-F para un voltaje de 1V. Fuente propia

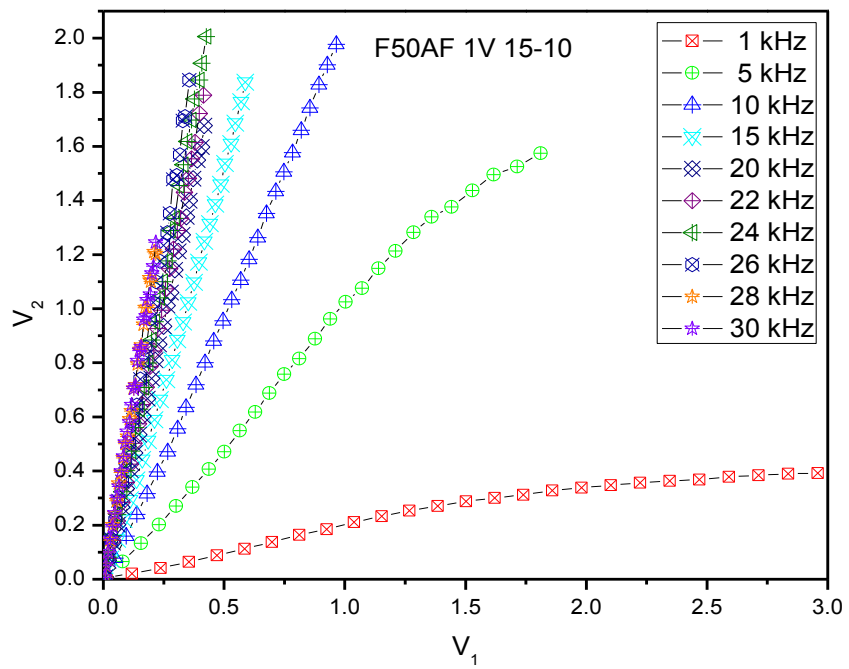


Figura 3.15.- Dependencia de la variación de la frecuencia en la ferrita F50A-F para un voltaje de 1V. Fuente propia

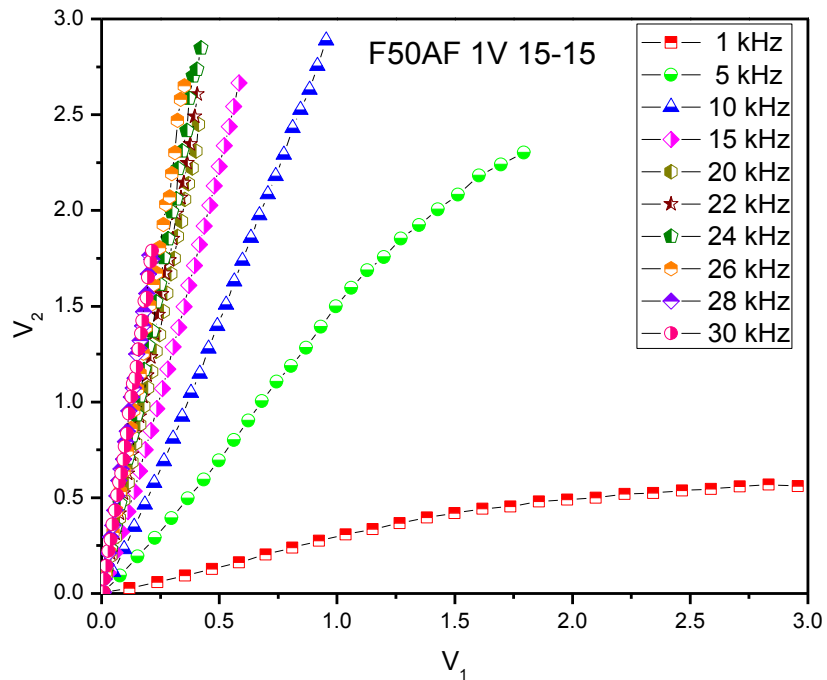


Figura 3.16.- Dependencia de la variación de la frecuencia en la ferrita F50A-F para un voltaje de 1V. Fuente propia

Para observar más claro el comportamiento de este evento, se analizaran tres gráficas para un voltaje de 1V y una frecuencia de 15kHz pero con los distintos embobinados.

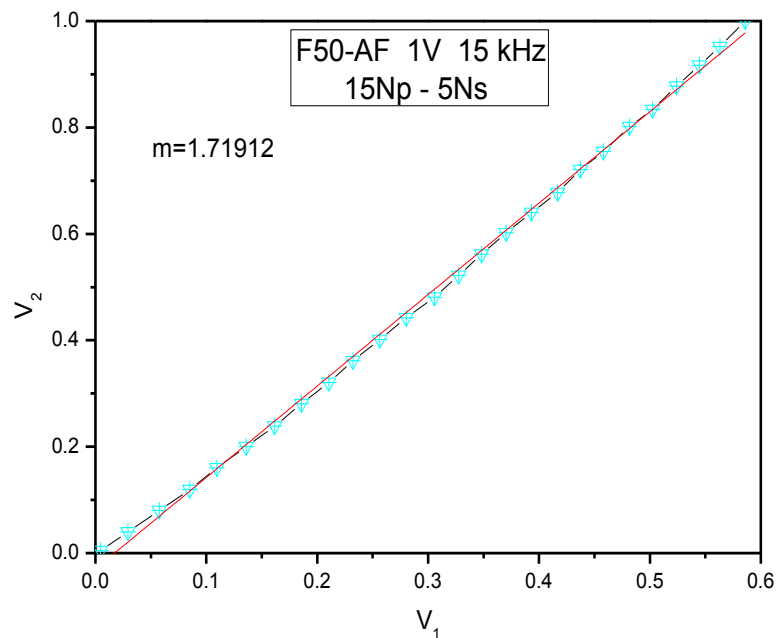


Figura 3.17.- Ferrita F50A-F con un voltaje aplicado de 1V a una frecuencia de 15kHz. Fuente propia

En la anterior figura se observa en la gráfica una pendiente de 1.72 y con ella se obtuvo una permeabilidad inicial de 2816.68.

Por otro lado en la siguiente grafica la cual se observa en la figura 3.8, como anteriormente se había mencionado presenta una pendiente con valor de 3.14 y con este valor se obtiene una permeabilidad inicial de 2568.84.

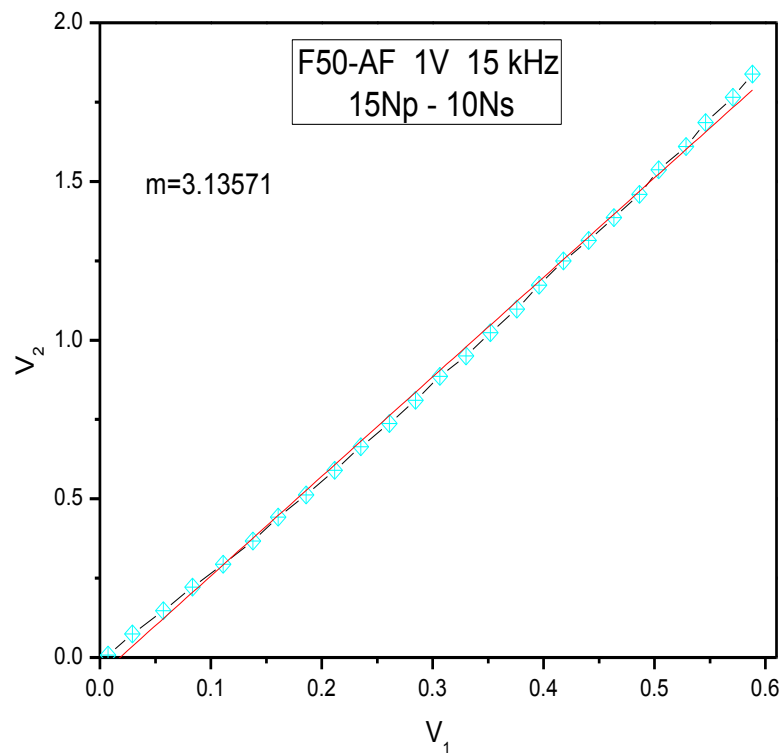


Figura 3.8.- Ferrita F50A-F con un voltaje aplicado de 1V a una frecuencia de 15kHz. Fuente propia

Y por último en la figura 3.18 se aprecia la gráfica con 15 y 15 vueltas en los dos embobinados, donde el valor de la pendiente obtenida es de 4.61 y una permeabilidad de 2519.34.

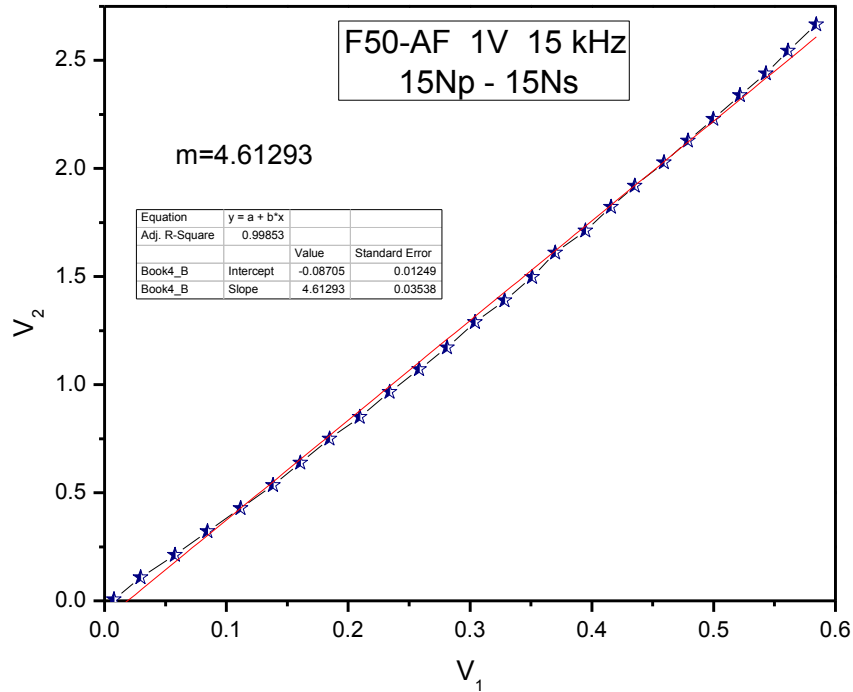


Figura 3.18.- Ferrita F50A-F con un voltaje aplicado de 1V a una frecuencia de 15kHz. Fuente propia.

Como se puede ver las tres graficas son muy afines y a simple vista pareciera que son iguales, pero analizando de manera más detallada se observa que la inducción magnética del material va en ascenso conforme se aumenta el número de vueltas en el embobinado secundario, esto es lo que origina una mayor inducción de flujo magnético en el material y provoque una pendiente con un valor más grande, debido al incremento en el permeabilidad magnética.

A pesar de que las tres graficas presentan una linealidad continua, solo una es con la que se puede realizar el cálculo de la permeabilidad ya que como se ha mencionado las tres pendientes son diferentes.

En la siguiente tabla se presentan los valores de la permeabilidad calculada para cada una de las gráficas anteriores, en la cual se observa como difieren los valores.

Tabla 3.3.- Permeabilidad inicial de la ferrita F50A-F calculada a diferentes relaciones de embobinados.

Relación	μ_i	E_R
15-5	2516.68	16.11
15-10	2568.84	14.37
15-15	2519.34	16.02

Es muy importante encontrar los parámetros adecuados en los cuales el material no solo presente un comportamiento lineal, sino que se obtenga una permeabilidad efectiva, y con esos parámetros posteriormente medir la temperatura de Curie que es la segunda parte de este estudio.

La medición de la temperatura de Curie se realizó en dos formas, para observar el comportamiento de la F50-AF.

1) Con los parámetros donde la relación $\mu_i = \frac{B}{H}$ ya no corresponde, donde ya no se garantiza estar en la región lineal y con parámetros donde se presenta una excelente respuesta lineal y con ella se obtiene la permeabilidad inicial.

Para este primer caso se observa en la parte superior de la figura 26 una transición magnética de Curie con un voltaje de excitación de 1V y una frecuencia de 5kHz donde se sabe con anterioridad que con esos parámetros no existe una respuesta lineal, por ende se observa una transición poco clara donde la permeabilidad disminuye gradualmente con la temperatura, hasta decaer completamente. Por otro lado en la parte inferior de la figura 26 se hace un comparativo de la medición de la Tc con los parámetros impropios 1V y 5kHz (inciso A) y con los parámetros adecuados 1V y 15 kHz (inciso B) donde se sabe que existe una respuesta lineal y por consiguiente se manifiesta la transición típica esperada en ferritas suaves donde la permeabilidad se incrementa en función de la temperatura hasta que alcanza el punto de transición o punto de Curie. Cabe señalar que en las 2 graficas exactamente en los 238°C la F50-AF pierde sus propiedades magnéticas y pasa a ser paramagnética, sin embargo en la gráfica

roja no se puede dar un valor correcto de la T_c ya que presenta varios puntos de inflexión, por otro lado en la gráfica azul se puede dar un valor aproximado que se sitúa en el rango de los 200 y 238°C.

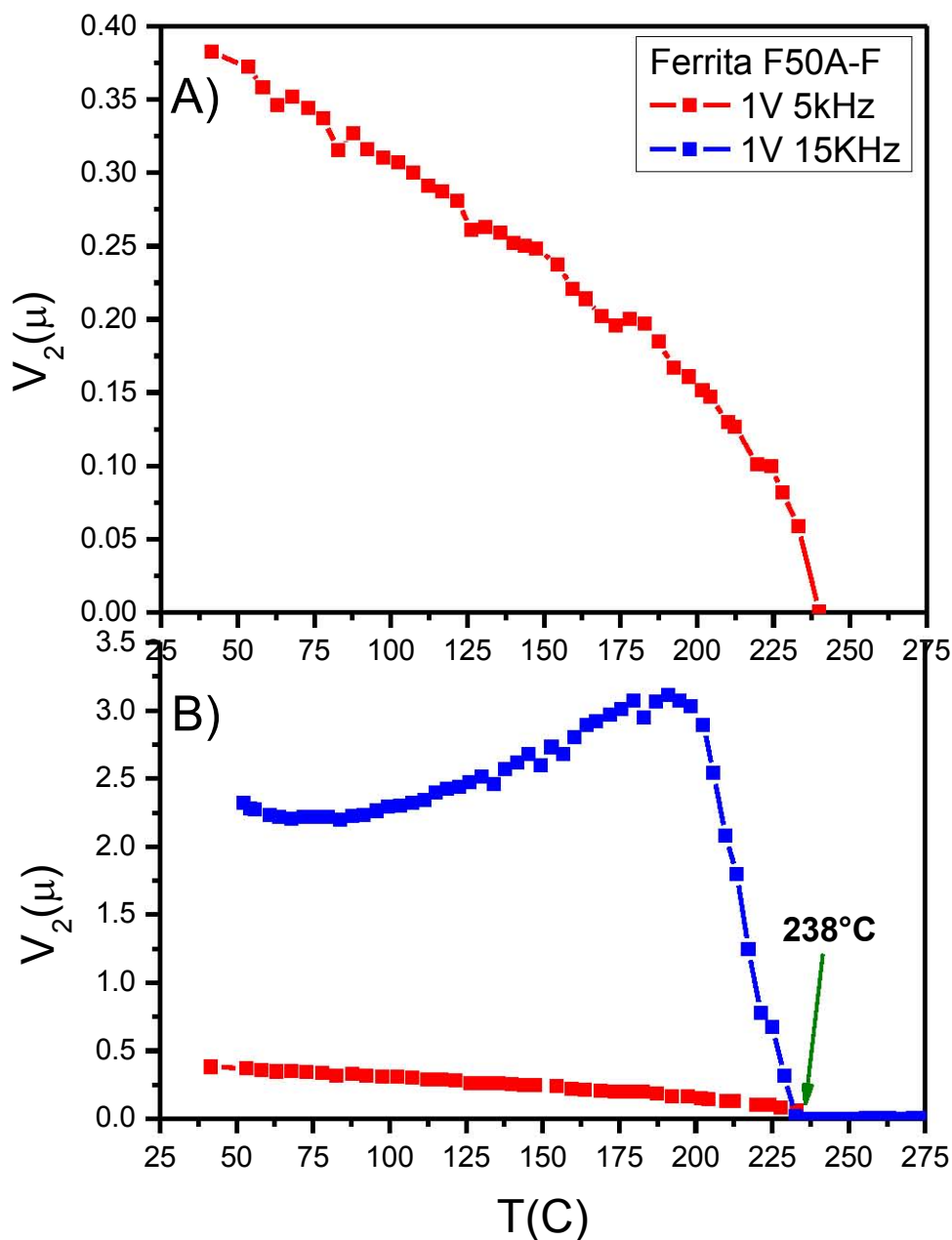


Figura 3.19.- Transiciones de T_c de la F50A-F con distintos parámetros. Fuente propia

2) Con los parámetros a la cual se obtiene la permeabilidad inicial pero con diferentes incrementos de temperatura.

Para este segundo análisis se usaron los parámetros apropiados 1V y 15kHz, solo que en esta ocasión se varió el intervalo de cambio de la temperatura y con esto observar que es lo que sucede.

Al variar el incremento con el cual se van adquiriendo los datos la gráfica cambia, así mientras más corto sea el incremento más exactitud existe en la medición de la T_c , esto es originado por la razón de cambio en la temperatura, pues entre menos se varié la temperatura y existan cambios de manera cuasiestáticos el material presentara menos cambios y con eso se obtiene una mayor precisión en las mediciones.

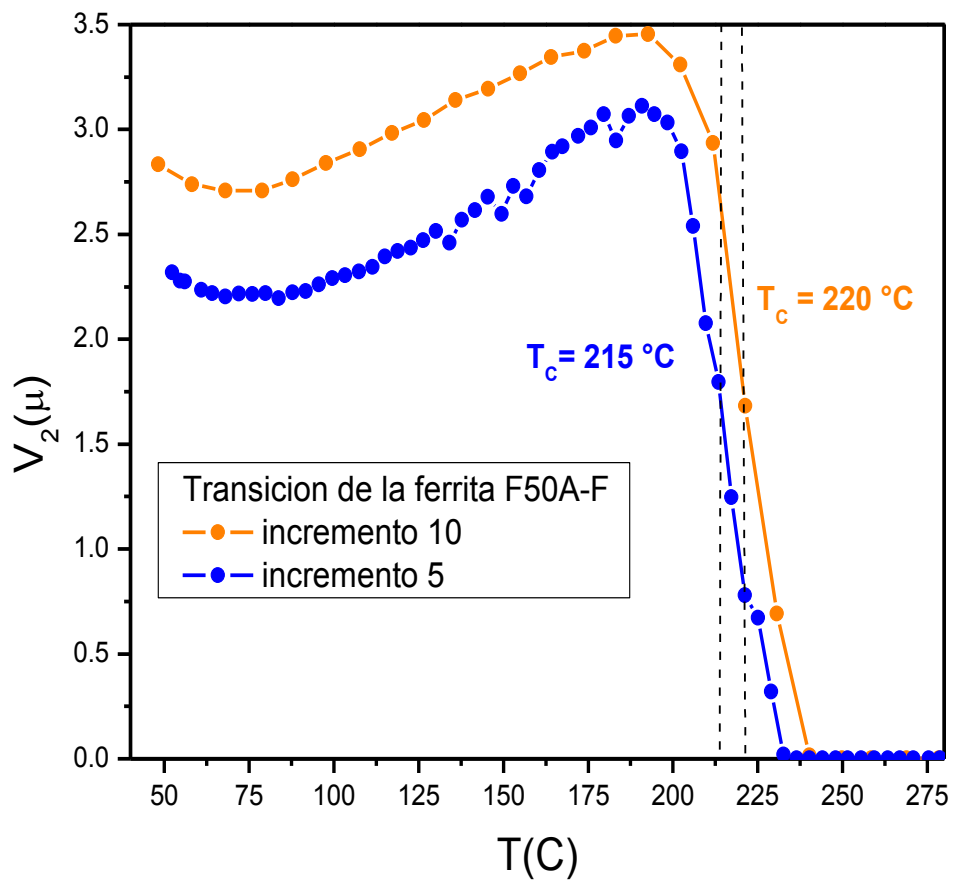


Figura 3.20.- Transiciones de T_c de la F50A-F con distintos incrementos. Fuente propia

F50A-J

De la misma forma se analizó la ferrita F50A-J, en la Figura 3.21 se observa la curva de magnetización inicial, donde al igual que en la anterior ferrita se pueden observar las diferentes regiones de comportamiento magnético, en el círculo se señala la región lineal, cuya región como ya se ha mencionado es de vital importancia para la medición de la permeabilidad magnética inicial.

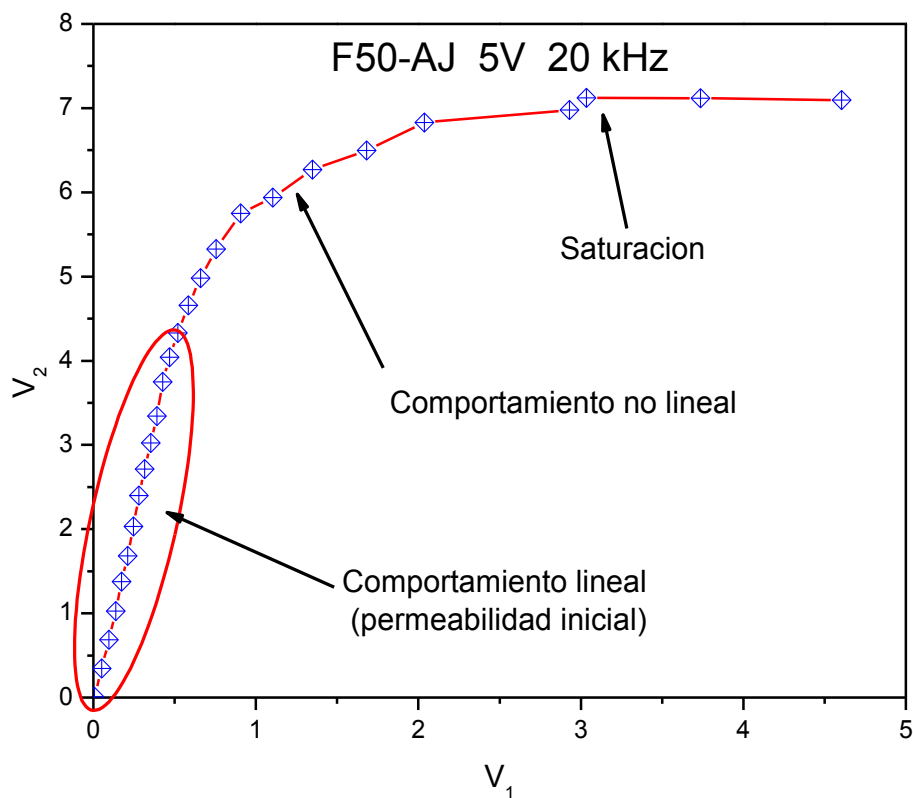


Figura 3.21.- Curva de magnetización inicial de la ferrita F50A-J. Fuente propia

A partir de esta ferrita ya no se realizara el análisis de la dependencia de la frecuencia a distintos voltajes como en la F50-AF, ya que su comportamiento es muy similar pues a voltajes pequeños y altas frecuencias se obtiene un comportamiento lineal originado por el flujo de inducción magnética provocado al

excitar el material al aplicar un voltaje. Mientras se aplican voltajes mayores ya no solo se observa la región lineal, sino que ahora se observan las otras 2 regiones.

En la Figura 3.22 se muestra la dependencia de la variación de la frecuencia para un voltaje de excitación de 1V en la ferrita F50A-J.

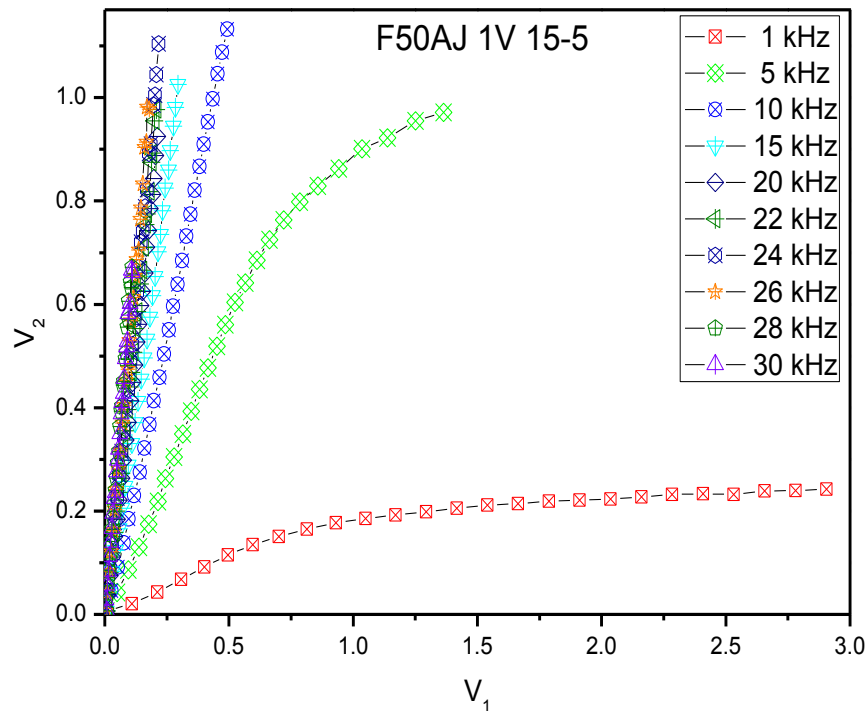


Figura 3.22.- Dependencia de la variación de la frecuencia en la ferrita F50A-J para un voltaje de 1V. Fuente propia

Para determinar la permeabilidad inicial de la ferrita F50-AJ se sigue la misma metodología con la cual se obtuvieron las permeabilidades de la F50-AW. Se determinaron varias permeabilidades cada una apoyada de su respectiva gráfica, de modo que se vea que tanto varían los valores de permeabilidad modificando la frecuencia.

A continuación se presenta en la figura 3.23 la gráfica obtenida para la ferrita F50A-J con la cual se determina la permeabilidad inicial cuando se aplica 1V y

15kHz, la cual tiene una pendiente de 3.50 y por tanto el valor de la permeabilidad inicial para este caso es de 5472.35.

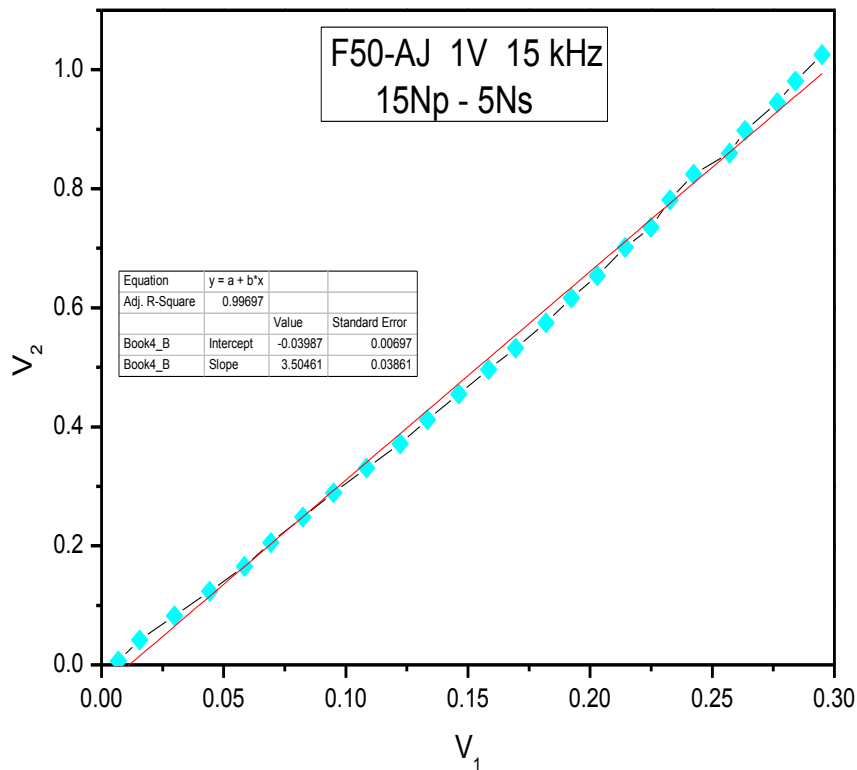


Figura 3.23.- Ferrita F50A-J con un voltaje aplicado de 1V a una frecuencia de 15kHz. Fuente propia

Cuando se aplican frecuencias más altas de 15kHz las pendientes cambian y con ello el valor de la permeabilidad, conforme se aumenta la frecuencia el valor de la pendiente incrementa, en las siguientes graficas se puede observar este cambio.

Al aplicar una frecuencia de 20kHz la pendiente que se origina es de 4.4 y con ella se obtiene una permeabilidad de 5150.66, como se aprecia en la figura 3.24.

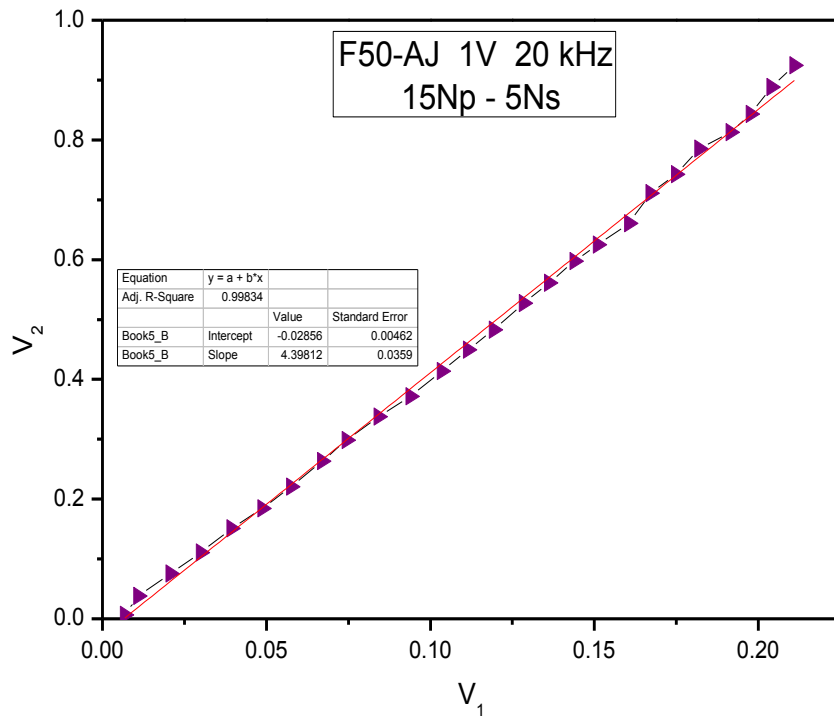


Figura 3.24.- Ferrita F50A-J con un voltaje aplicado de 1V a una frecuencia de 20kHz. Fuente propia

En la figura 3.25 al aplicar un voltaje de 1V y una frecuencia de 24kHz, se obtiene una pendiente de 5.12 y por consiguiente una permeabilidad de 4993.57.

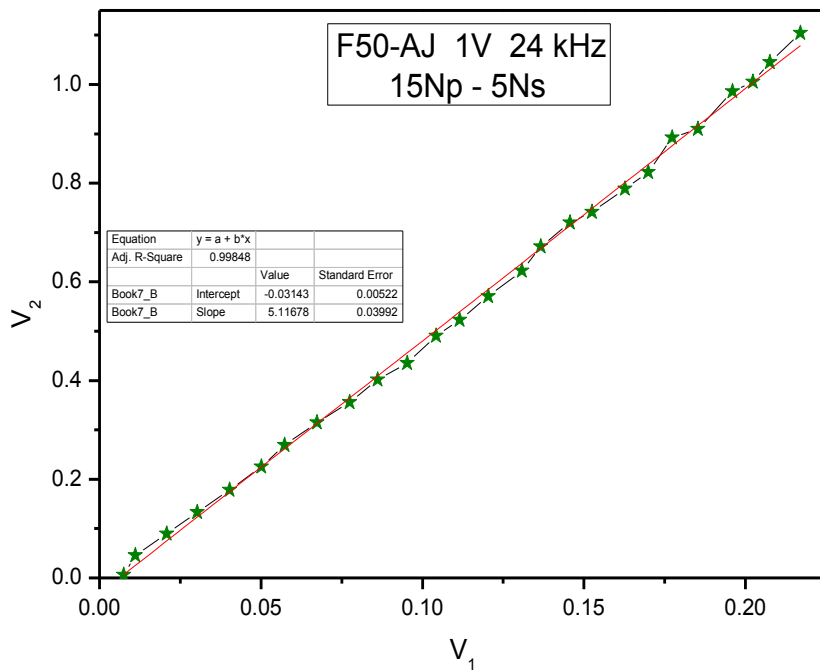


Figura 3.25.- Ferrita F50A-J con un voltaje aplicado de 1V a una frecuencia de 24kHz. Fuente propia

Si se usa una frecuencia aún más alta de 24kHz, es decir se ocupa una de 30kHz se sigue generando una respuesta lineal, pero la pendiente de la gráfica tiene un valor más grande en este caso de 6.11 y en consecuencia la permeabilidad es de 4768.24.

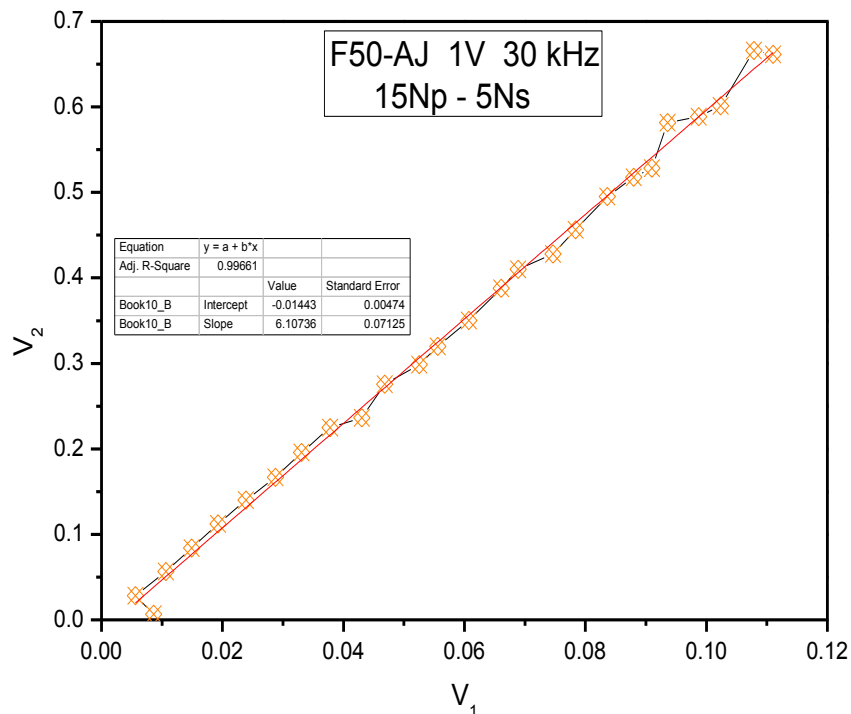


Figura 3.26.- Ferrita F50A-J con un voltaje aplicado de 1V a una frecuencia de 30kHz. Fuente propia

En la tabla 3.4 se muestran los valores de la permeabilidad inicial calculadas para la ferrita F50A-J, donde se puede notar que al usar una frecuencia de 24kHz se obtuvo el mejor cálculo de la permeabilidad ya que solo existe un error relativo de 0.13 por ciento en comparación con la permeabilidad que el fabricante marca que es de 5000.

Tabla 3.24.- Permeabilidad inicial de la ferrita F50A-J calculada

Frecuencia	μ_i	E_R %
15	5472.35	9.45
20	5150.66	3.01
24	4993.57	0.13
26	4768.24	4.64

A continuación se presenta el análisis de la F50-AJ cuando se mantiene constante la frecuencia ideal y se varía el voltaje aplicado.

En la figura 3.25 se puede observar la gráfica que anteriormente ya se ha analizado y la cual presenta un comportamiento lineal, el valor de la pendiente es de 5.12 y el de su permeabilidad de 4993.57.

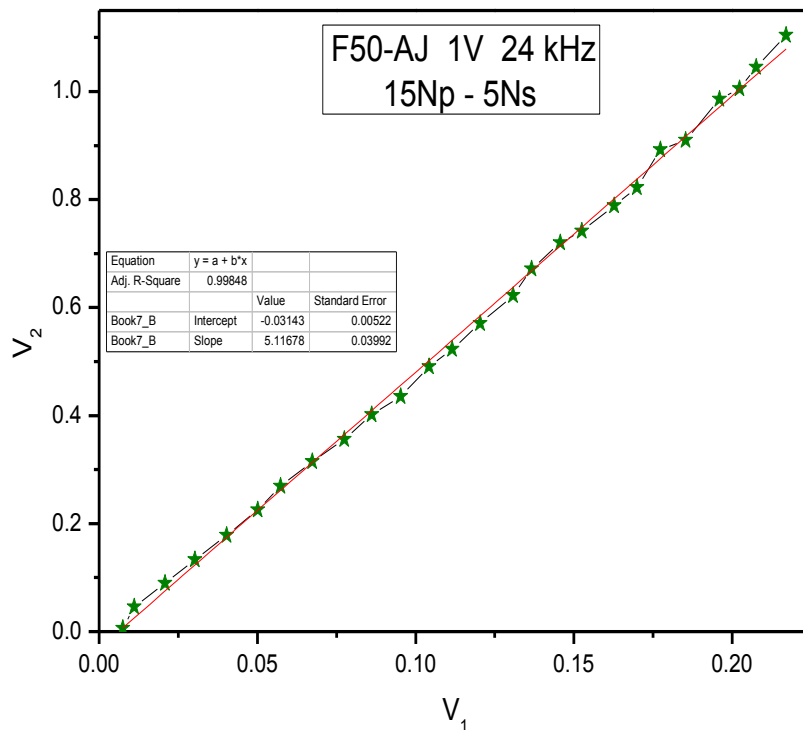


Figura 3.25.- Ferrita F50A-J con un voltaje aplicado de 1V a una frecuencia de 24kHz. Fuente propia

Cuando se aplican de 2V aún se logra observar por toda la gráfica un comportamiento lineal, sin embargo la pendiente de esta grafica es de 5.68 y por lo tanto también el valor de la permeabilidad difiere al valor que se obtuvo con 1V, en este caso la permeabilidad es 5542.65.

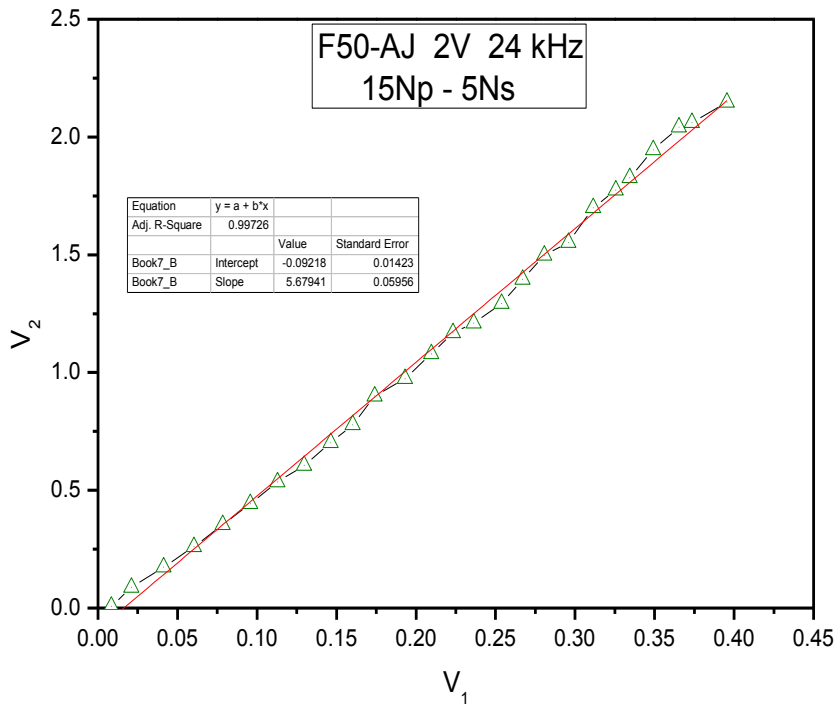


Figura 3.27.- Ferrita F50A-J con un voltaje aplicado de 2V a una frecuencia de 24kHz. Fuente propia

Al someter la F50-AJ con 5V se observa la saturación magnética del material, sin embargo aún se nota una región lineal cuya pendiente tiene un valor de 5.83 y una permeabilidad de 5693.

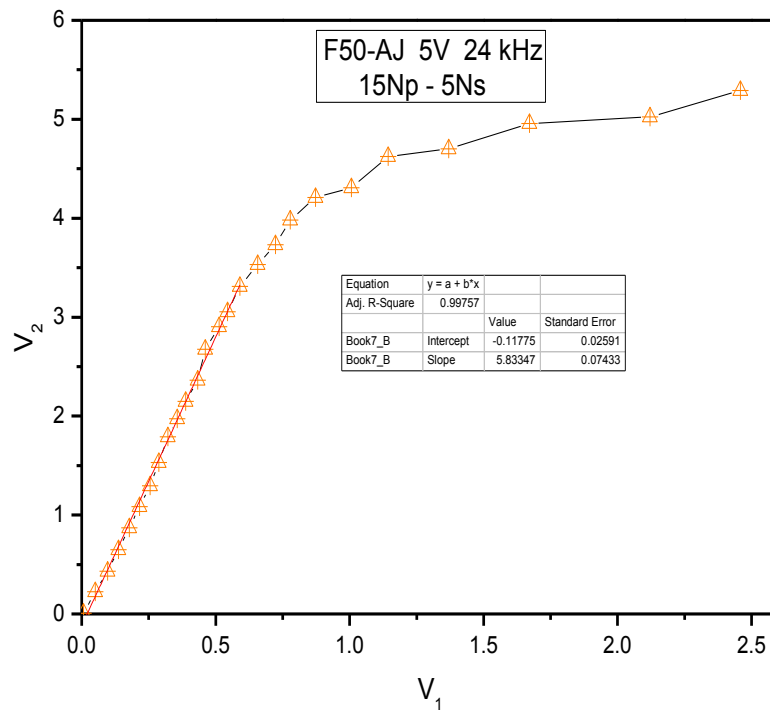


Figura 3.28.- Ferrita F50A-J con un voltaje aplicado de 5V a una frecuencia de 24kHz. Fuente propia

Al incrementar el voltaje aplicado se induce un mayor flujo magnético el cual provoca que se sature el material y se puedan observar en una gráfica las tres regiones de comportamiento magnético de una curva de magnetización inicial, sin embargo a la parte lineal de esta curva se le puede calcular su pendiente, cuyo valor es de 5.67 y con ella obtener un valor de permeabilidad de 5536.26.

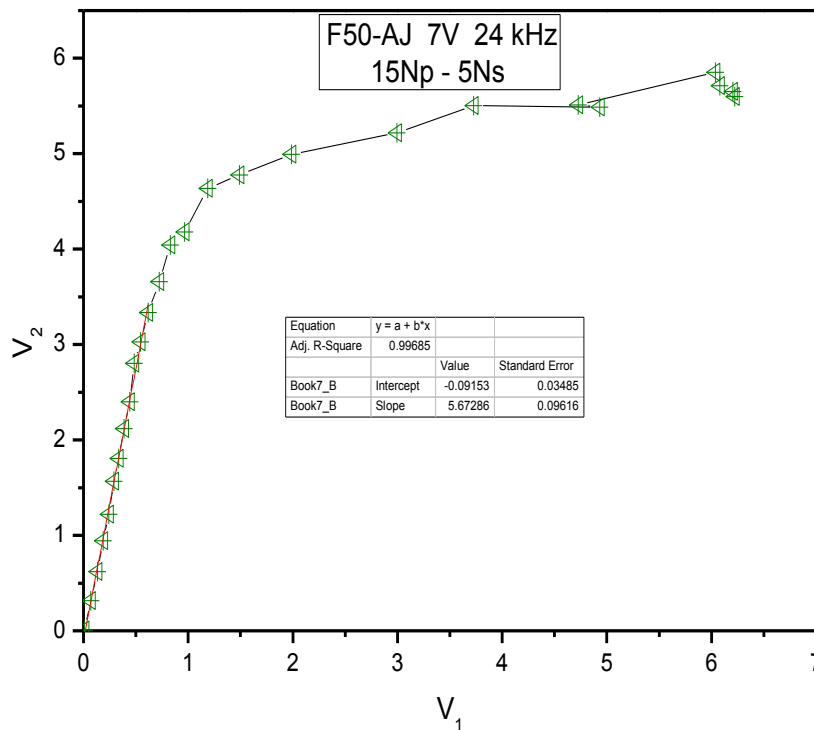


Figura 3.29.- Ferrita F50A-J con un voltaje aplicado de 7V a una frecuencia de 24kHz. Fuente propia

Si se incrementa a 10V el voltaje aplicado se induce aún más el flujo magnético y esto provoca que se sature más rápido la F50-AJ como se aprecia en la figura 3.30, a pesar de esto se sigue observando una región lineal y por lo tanto se puede obtener el cálculo de una pendiente, que en este caso es de 5.52 y por ende una permeabilidad de 5385.75.

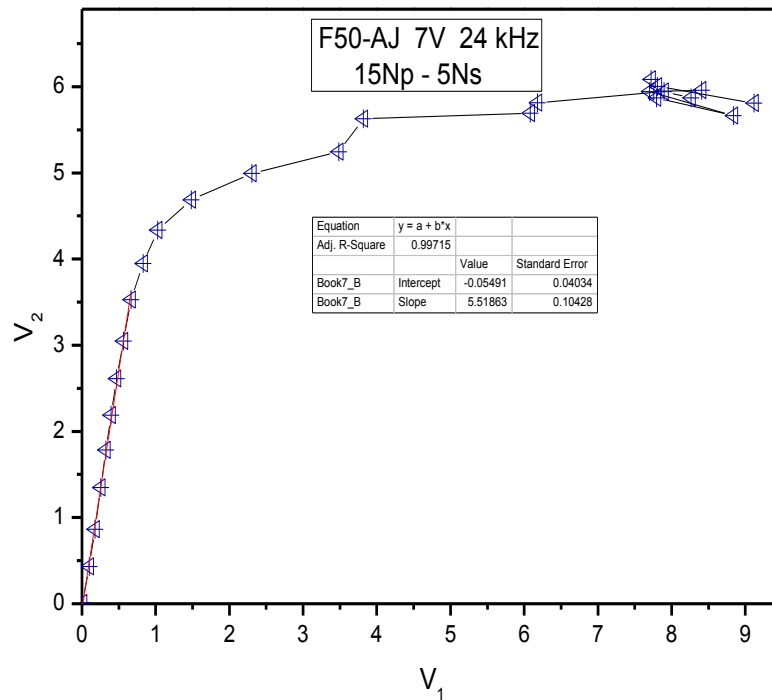


Figura 3.30.- Ferrita F50A-J con un voltaje aplicado de 10V a una frecuencia de 24kHz. Fuente propia

En la tabla 3.5 se muestran los valores de la permeabilidad inicial calculadas para la ferrita F50A-J a diferentes voltajes y una frecuencia constante de 24kHz con una relación de 15-10 en los embobinados. Se puede notar que mientras el voltaje aumenta el error del cálculo de la permeabilidad también aumenta.

Tabla 3.5.- Permeabilidad inicial de la ferrita F50-AJ calculada con 24kHz

Voltajes	μ_i	E_R %
1V	4993.57	0.13
2V	5542.65	10.85
5V	5693	13.86
7V	5536.26	10.73
10V	5385.75	7.71

A continuación se presenta el comportamiento de la F50-AJ, cuando se mantiene un voltaje constante de 1V y una frecuencia de 24kHz, pero variando el número de vueltas en el embobinado secundario. Como se puede observar en la figura 3.25

cuando se ocupa una relación de embobinados 15-5, al aplicar un voltaje de 1V se induce aproximadamente 1V y se observa una línea recta, la cual tiene una pendiente de 5.12 y por lo tanto se obtiene una permeabilidad de 4993.57

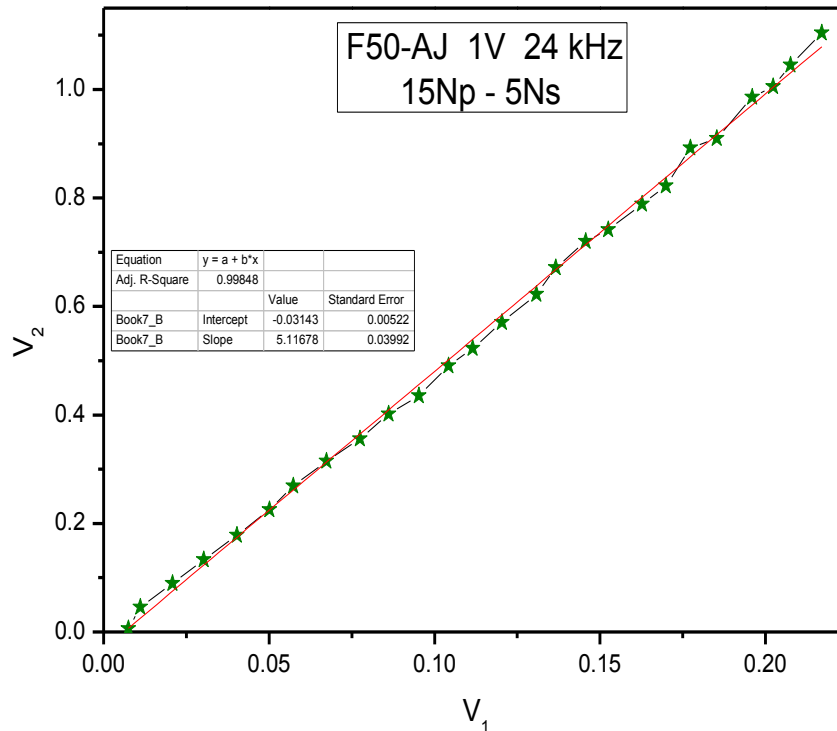


Figura 3.25.- Ferrita F50A-J con un voltaje aplicado de 1V a una frecuencia de 24kHz. Fuente propia

Cuando se utiliza una relación de 15-10 en los embobinados, al aplicar 1V se inducen aproximadamente 2V y en consecuencia esto genera que la pendiente de esta nueva grafica sea diferente a la anterior y por tanto difiera el cálculo de la permeabilidad. Para esta grafica la pendiente es de 9.24 y la permeabilidad de 4508.91.

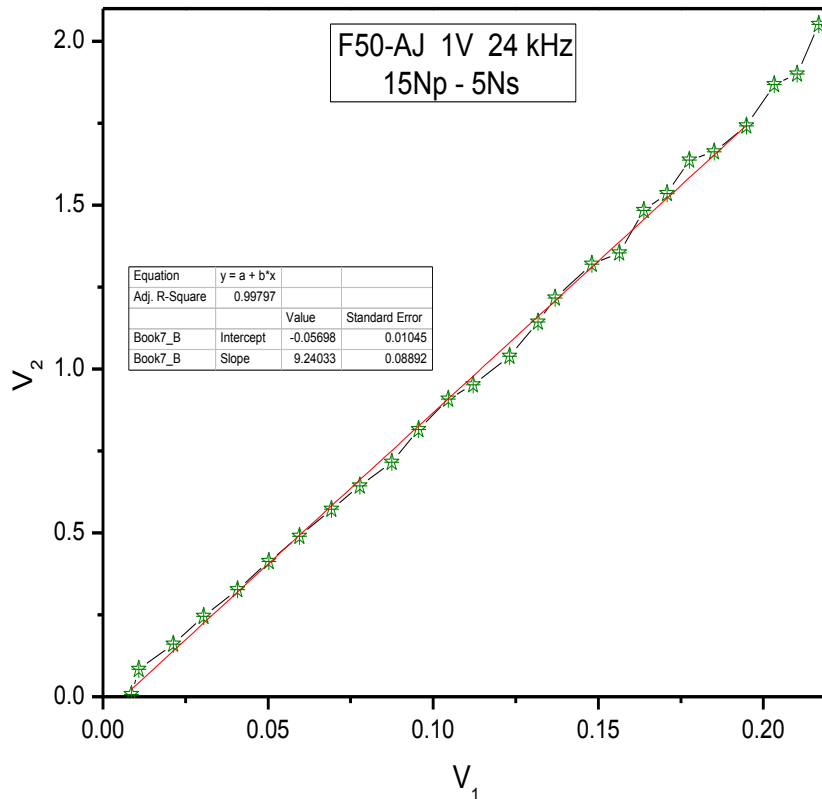


Figura 3.31.- Ferrita F50A-J con un voltaje aplicado de 1V a una frecuencia de 24kHz. Fuente propia.

Si ahora se utiliza una relación de 15-15 y al seguir aplicando 1V esta vez se inducen 3V aproximadamente, es decir que conforme se aumenta el número de vueltas en el embobinado secundario se produce una mayor inducción en el material, para la F50-AJ se puede señalar que la relación en el número de vueltas es proporcional a la inducción que se producirá, es decir cuando se tienen 5 vueltas en el secundario y se aplica 1V se induce igual 1V, cuando se incrementa al doble el número de vueltas (10) se induce el doble (2V) y cuando se aumenta al triple se induce el triple (3V). Y en consecuencia esto ocasiona que las permeabilidades sean diferentes para cada caso, debido al cambio de pendiente.

En la figura 3.32 se observa la gráfica con la relación 15-15, donde la pendiente es de 13.47 y la permeabilidad 4380.8.

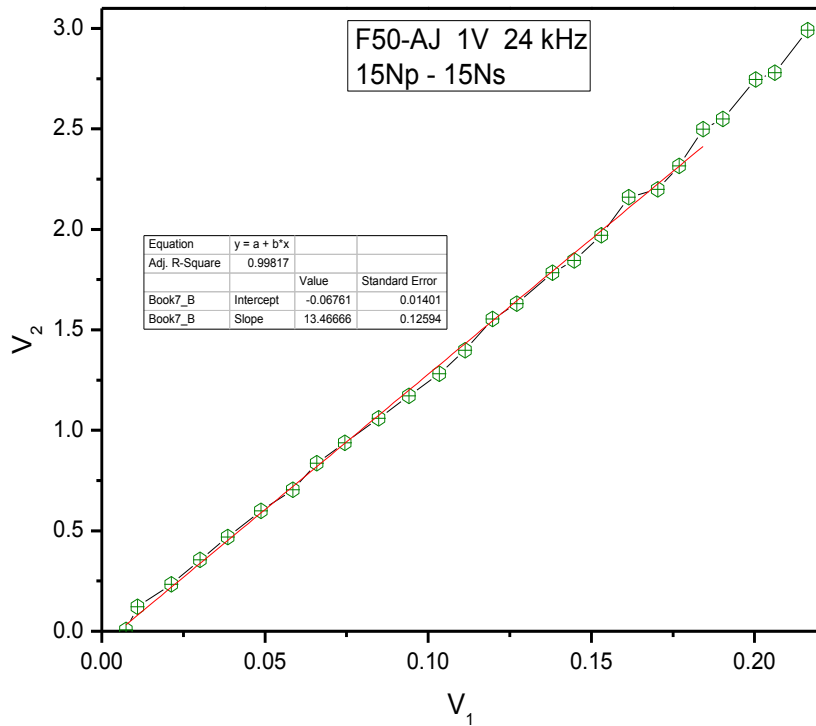


Figura 3.32.- Ferrita F50A-J con un voltaje aplicado de 1V a una frecuencia de 24kHz. Fuente propia.

En la tabla 3.6 se muestran los valores de la permeabilidad inicial calculadas para la ferrita F50A-J a 1V y 24kHz generadas con distintas relaciones en los embobinados donde se puede observar que varían mucho los resultados.

Tabla 3.6.- Permeabilidad inicial de la ferrita F50-AJ calculada con 1V y 24kHz con diferentes relaciones en los embobinados

Relación	μ_i	E_R %
15-5	4993.57	0.13
15-10	4508.91	9.82
15-15	4380.8	12.38

Igual que la ferrita anterior, la medición de la temperatura de Curie para la F50-AJ se realizó de la misma forma.

1) Con los parámetros inadecuados con los que ya no se garantiza estar en la región lineal y con parámetros donde se presenta una excelente respuesta lineal y con ella se obtiene la permeabilidad inicial.

2) Con los parámetros a la cual se obtiene la permeabilidad inicial pero con diferentes incrementos de temperatura.

Para el primer caso se utilizó 1V y 24kHz cuyos parámetros garantizan estar en la región lineal, y por otro lado 2V y 20kHz que no generan una respuesta lineal. En la figura 40 se pueden observar estos 2 casos, de color rojo se observa cómo afecta no utilizar los parámetros adecuados y que la transición presenta varios puntos de inflexión que no permiten dar una medición correcta. Por otro lado, de color azul se aprecia una excelente transición donde la permeabilidad se incrementa en función de la temperatura hasta que alcanza un punto máximo donde decae y se puede dar una medición aceptable de la temperatura de Curie de la F50-AJ, que en este caso es de 137°C.

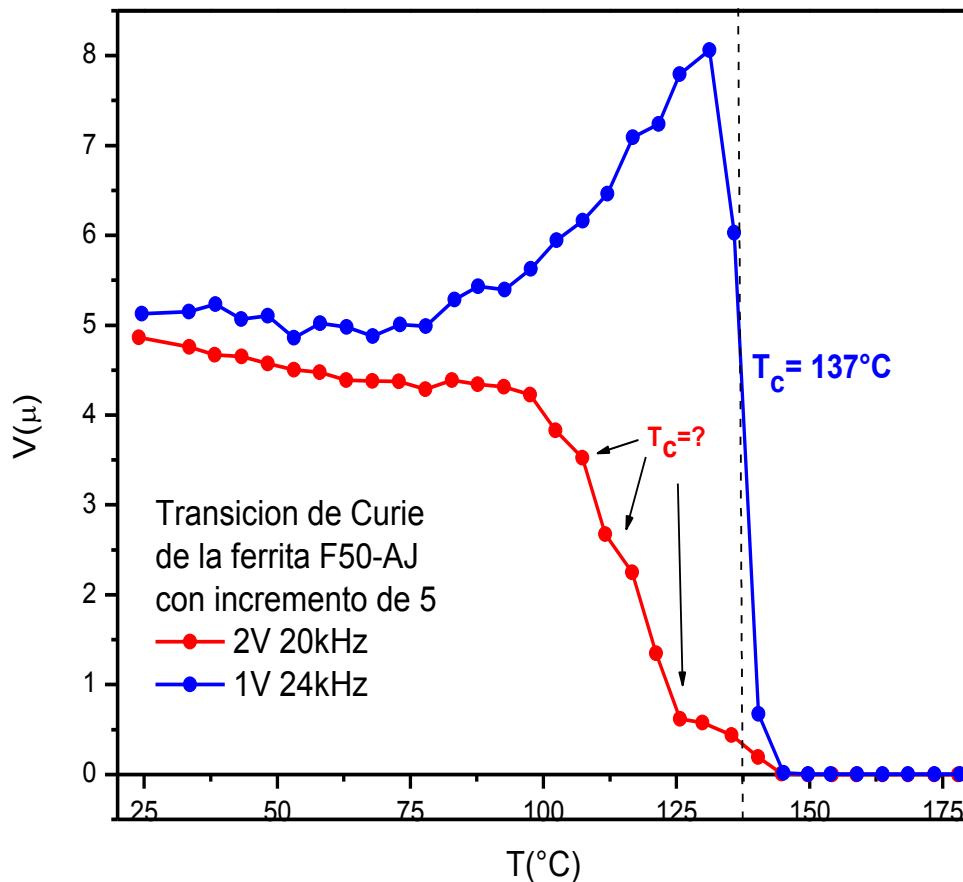


Figura 3.33.- Medición de la T_C en la F50-AJ conservando constante el incremento de la temperatura. Fuente propia.

En el segundo caso se realizó la comparación de 2 mediciones distintas, en las cuales se varió únicamente el tiempo de calentamiento de la F50-AJ, es decir se utilizaron diferentes incrementos de temperatura. En la figura 3.34 se observan estos 2 comportamientos, de color azul se presenta la transición originada con un incremento de 5°C en la cual se puede estimar una temperatura de Curie cerca de los 137°C, por otro lado de color rojo se muestra la transición ocasionada por un incremento de 10°C donde se puede obtener una medición de 135°C aproximadamente para la temperatura de Curie.

Como en la anterior ferrita el intervalo con el cual se calienta la F50-AJ afecta en la medición de la temperatura de Curie, siendo más exacta conforme se acorta el intervalo de calentamiento. Aunque las 2 mediciones no difieren mucho ya que entre las 2 solo existen 2°C de diferencia, es de vital importancia dar la mejor medición posible, se puede decir que la medición sería más exacta si se usara un incremento de 3 o 2°C, sin embargo con estos resultados ya expuestos basta.

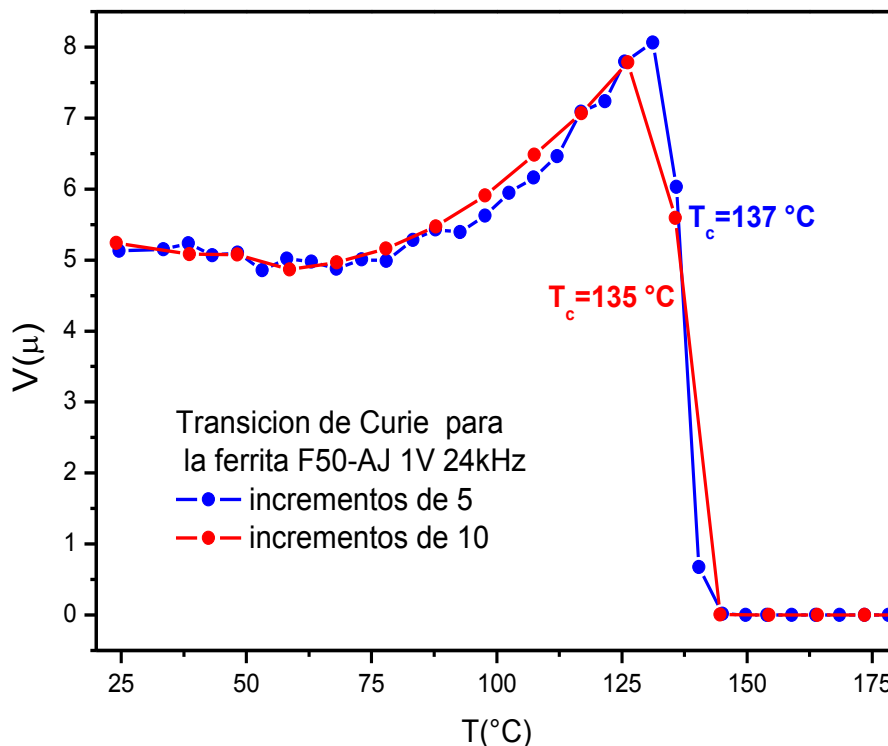


Figura 3.34.- Medición de la T_C en la F50-AJ conservando constante el voltaje de excitación y la frecuencia. Fuente propia.

F50A-43

De la misma forma se analizó la ferrita F50A-43, en la figura 3.35 se observa la curva de magnetización inicial, donde al igual que en las anteriores ferritas se pueden observar las diferentes regiones de comportamiento magnético. En el círculo rojo se marca la región que presenta un comportamiento lineal, y que es de suma importancia para la medición de la permeabilidad magnética inicial.

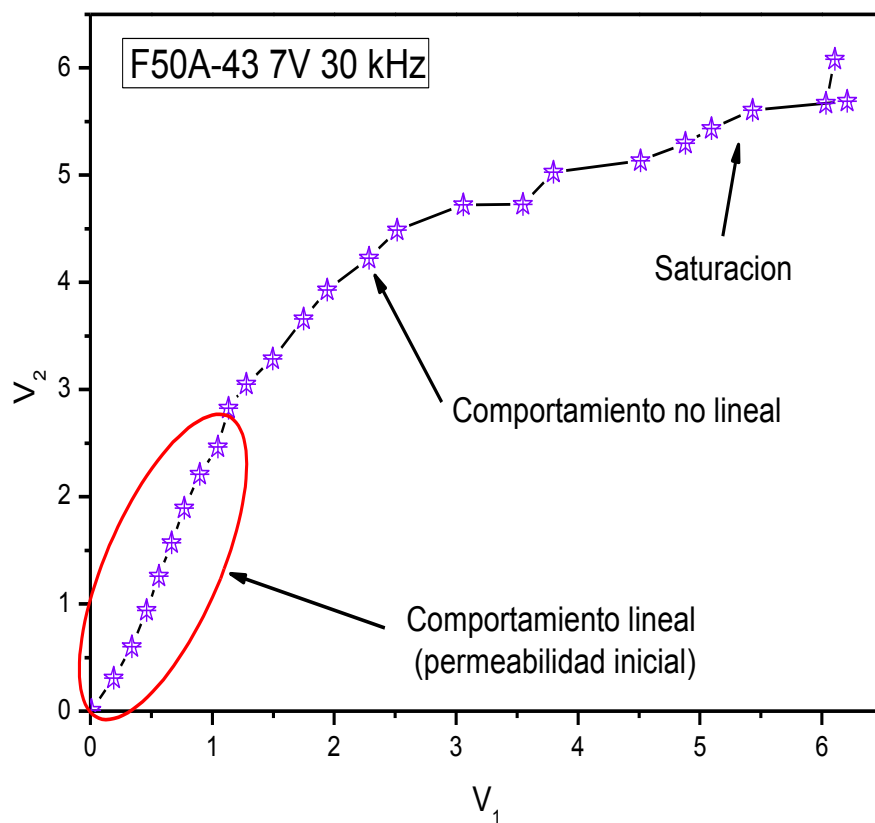


Figura 3.35.- Curva de magnetización inicial de la ferrita F50A-43. Fuente propia.

Como se ha venido realizado en las anteriores ferritas, en la figura 3.36 se muestra la dependencia de la variación de la frecuencia para un mismo voltaje de excitación de la ferrita F50A-43. En el cual se observa que al igual que en los anteriores análisis al aplicar 1V y frecuencias mayores de los 15kHz se obtienen

buenos resultados observándose una respuesta lineal y con ello realizarse el cálculo de la permeabilidad para esta ferrita.

La relación de embobinados que mejor resultados arrojó fue la de 15-10 en el primario y secundario respectivamente.

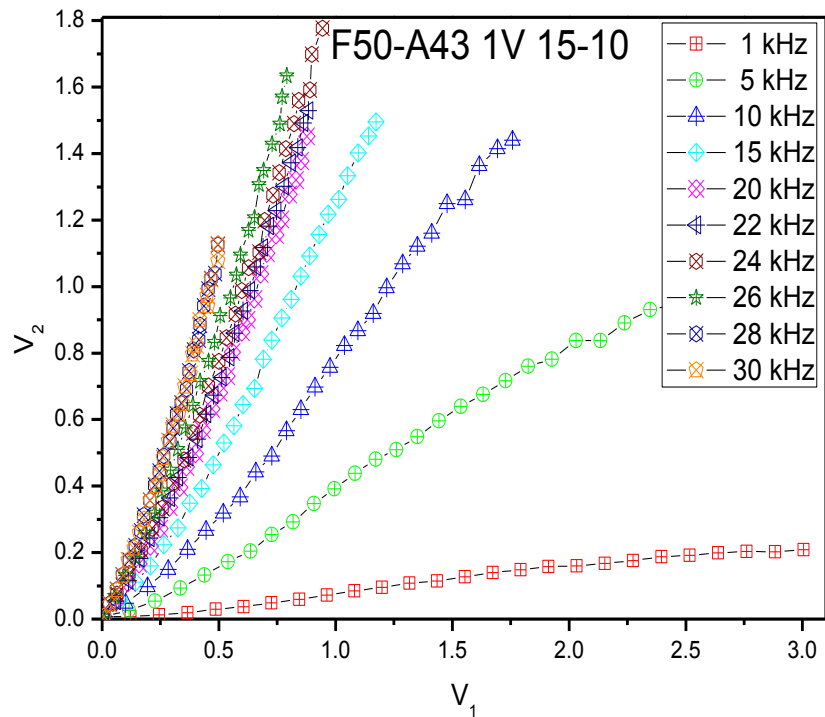


Figura 3.36.- Dependencia de la variación de la frecuencia en la ferrita F50A-43 para un voltaje de 1V. Fuente propia.

Como ya se mencionó la relación 15-10 fue la que generó la mejor respuesta lineal aplicando 1V y frecuencia arriba de los 15kHz, en la siguiente serie de imágenes se presentarán las gráficas que ostentaron el mejor comportamiento lineal y realizar el análisis de la F50A-43 utilizando la mejor relación de embobinados.

El primer análisis se hará a la gráfica que se obtuvo cuando se aplicó una frecuencia de 20kHz la cual se puede ver en la figura 3.37, la pendiente de esta gráfica es de 1.28 y por ende el valor de la permeabilidad inicial es de 968.35.

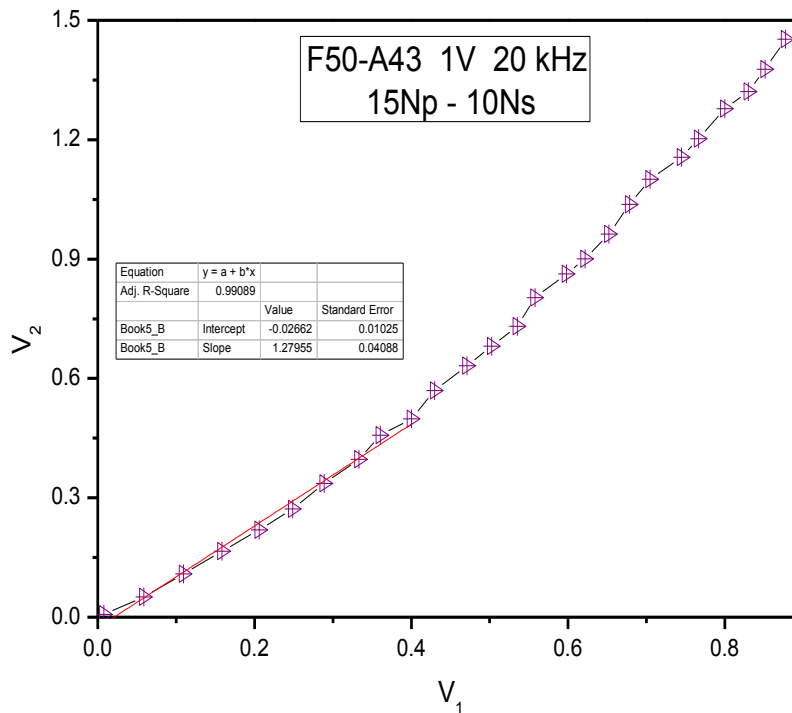


Figura 3.37.- Ferrita F50-A43 con un voltaje aplicado de 1V a una frecuencia de 20kHz. Fuente propia.

Cuando se aplican 24kHz conservando 1V de excitación la gráfica causa una pendiente con valor de 1.34 como se puede ver en la figura 3.38 y por tanto la permeabilidad para este caso es de 847.72.

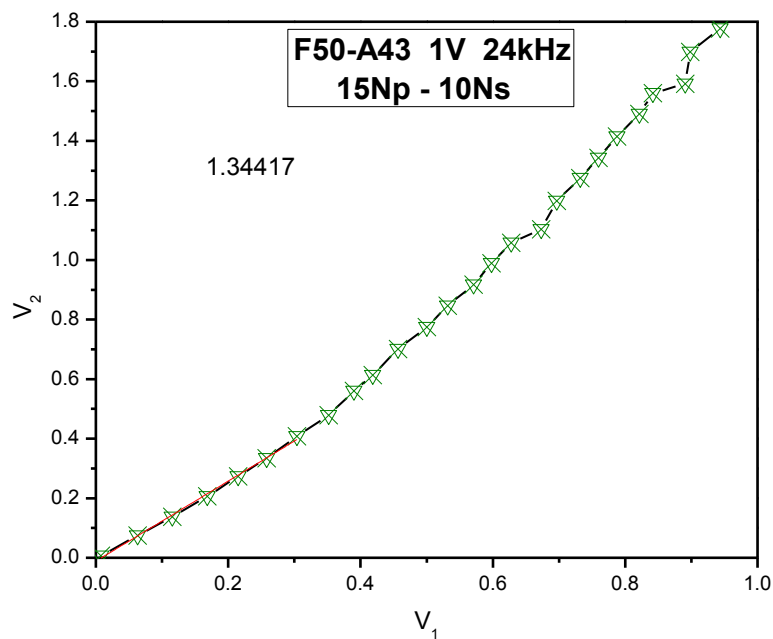


Figura 3.38.- Ferrita F50-A43 con un voltaje aplicado de 1V a una frecuencia de 24kHz. Fuente propia.

Al utilizar una frecuencia de 26kHz la gráfica que se obtiene genera una pendiente con valor de 1.59 como se puede notar en la figura 3.39, posteriormente con esta referencia se calcula la permeabilidad inicial que es de 925.2.

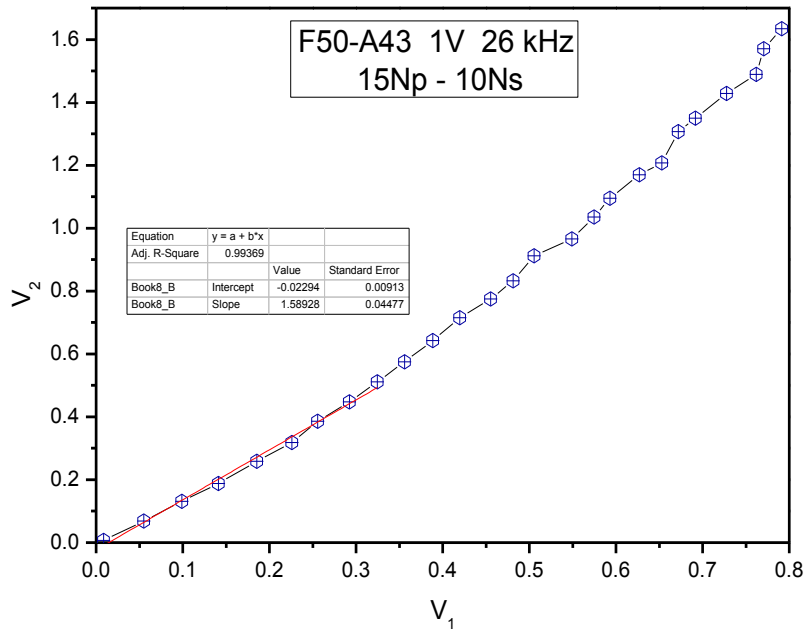


Figura 3.39.- Ferrita F50-A43 con un voltaje aplicado de 1V a una frecuencia de 26kHz. Fuente propia.

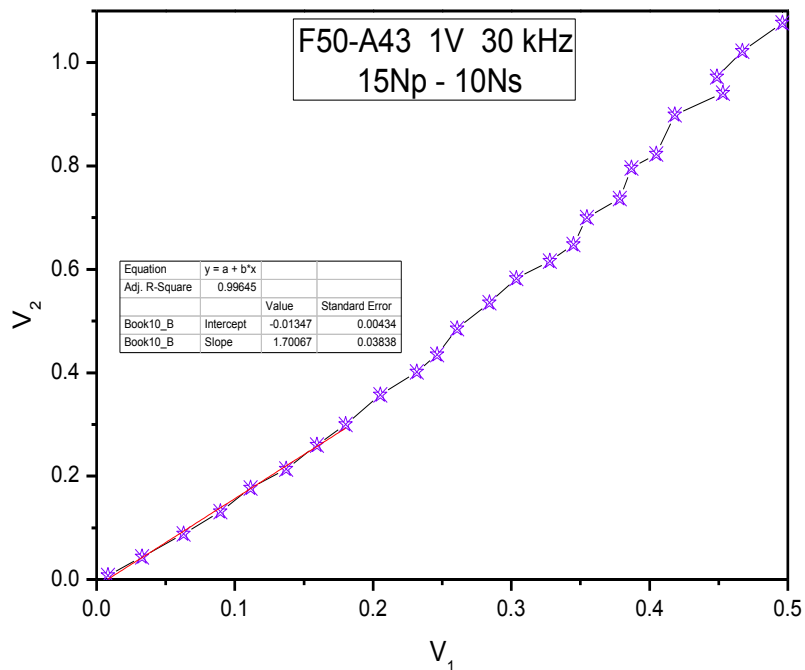


Figura 3.40.- Ferrita F50-A43 con un voltaje aplicado de 1V a una frecuencia de 30kHz. Fuente propia.

En la figura 3.40 se observa la gráfica que se produce cuando se aplica una frecuencia de 30kHz, la cual forma una pendiente de 1.7 y se obtiene una permeabilidad inicial de 858.04

Como se pudo observar al variar la frecuencia se generan distintas graficas que a pesar de generar una región lineal amplia, sus pendientes varían a causa de la frecuencia, para analizar con más detalle este comportamiento en la tabla 3.7 se muestran los valores de la permeabilidad inicial calculadas para la ferrita F50-A43 cuando se aplicó un voltaje de excitación de 1V y una relación 15-10 en los embobinados, donde se nota que al usar 24kHz se obtiene el mejor resultado ya que solo existe un error del 0.27 % respecto al real.

Tabla 3.7.- Permeabilidad inicial de la ferrita F50-A43 calculada con 1V y una relación de 15-10 en los embobinados a diferentes frecuencias

Frecuencia	μ_i	E_R %
20kHz	968.35	13.92
24kHz	847.72	0.27
26kHz	925.2	8.85
30kHz	858.04	0.95

Ya que se ha analizado la F50-A43, ahora se realizara el estudio del comportamiento de dicha ferrita variando el voltaje de excitación y conservando la frecuencia optima con la cual anteriormente se obtuvo el mejor cálculo de la permeabilidad inicial, así con este estudio se dará a conocer que tanto varía el cálculo de la permeabilidad mientras más voltaje se aplique y por ende exista menos región lineal.

Para comenzar este análisis se hará uso nuevamente de la figura 3.38 que ya se había utilizado para el análisis anterior, donde se sabe que tiene una pendiente de 1.34 y una permeabilidad inicial con valor de 847.72.

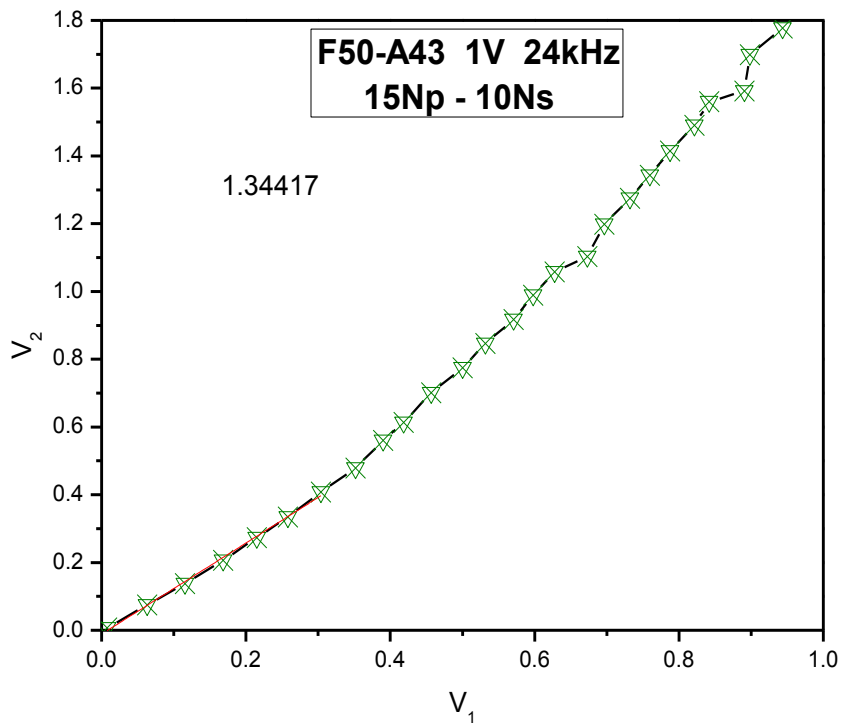


Figura 3.38.- Ferrita F50-A43 con un voltaje aplicado de 1V a una frecuencia de 24kHz. Fuente propia.

A continuación la figura 3.41 muestra la gráfica que se origina al usar un voltaje de excitación de 2V y 24kHz, donde la pendiente que se obtiene es de 1.39 y por tanto se obtiene una permeabilidad inicial de 874.05.

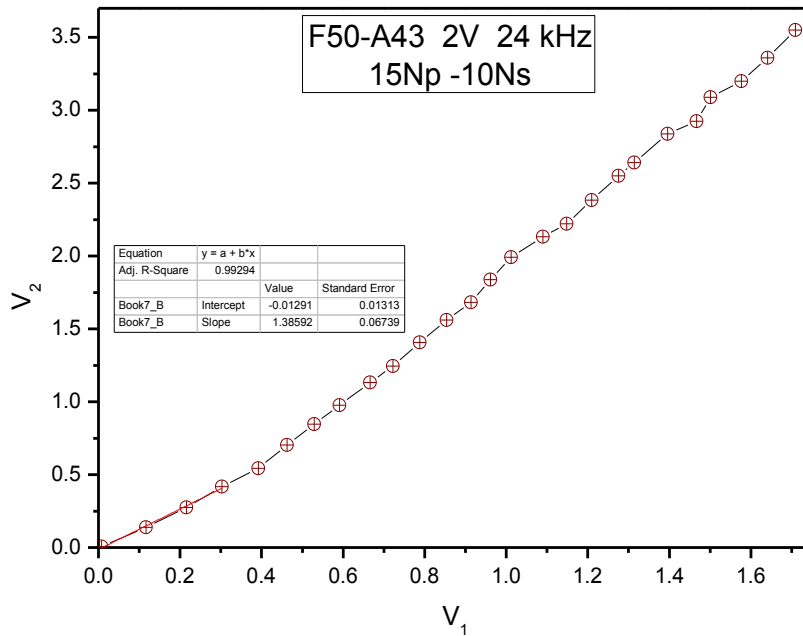


Figura 3.41.- Ferrita F50-A43 con un voltaje aplicado de 2V a una frecuencia de 24kHz. Fuente propia.

Cuando se aumenta el voltaje de excitación a 5V como en las otras ferritas, en la F50-A43 se empieza a manifestar la saturación magnética lo cual ocasiona que exista poca región lineal y por lo tanto pocos puntos con los cuales obtener la pendiente, sin embargo aun así se puede obtener un valor de la pendiente de la región lineal como se observa en la figura 3.42, que para este caso es de 2.08 y por consiguiente la permeabilidad inicial tiene un valor de 1311.1.

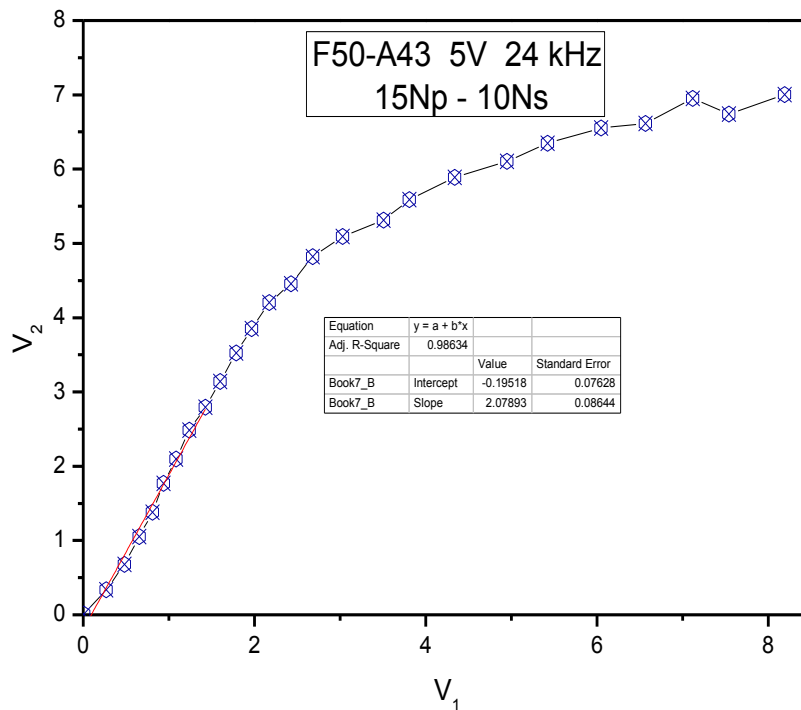


Figura 3.42.- Ferrita F50-A43 con un voltaje aplicado de 5V a una frecuencia de 24kHz. Fuente propia.

En la figura 3.43 se observa la gráfica que se genera cuando se aplica un voltaje de 7V, a pesar de que existe poca región lineal se puede calcular la pendiente de esta grafica la cual tiene una valor de 2.07 y por consiguiente se obtiene una permeabilidad inicial de 1305.21.

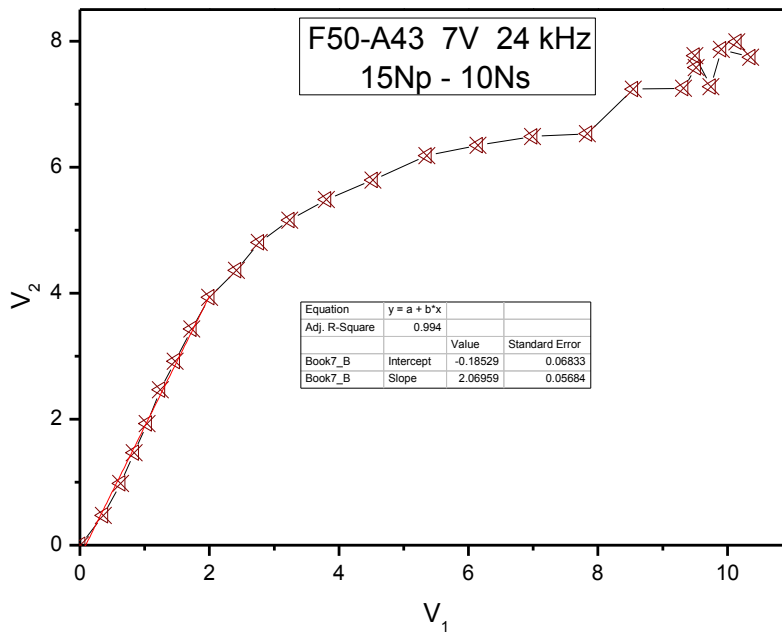


Figura 3.43.- Ferrita F50-A43 con un voltaje aplicado de 7V a una frecuencia de 24kHz. Fuente propia.

Cuando se aplican 10V a la F50-A43 se genera una gráfica que contiene pocos datos que forman una línea recta como se puede ver en la figura 3.44, sin embargo aun con estos escasos puntos se puede realizar obtener la pendiente, que en este caso tiene un valor de 2.06 y en consiguiente se realiza el cálculo de la permeabilidad inicial que es de 1296.06.

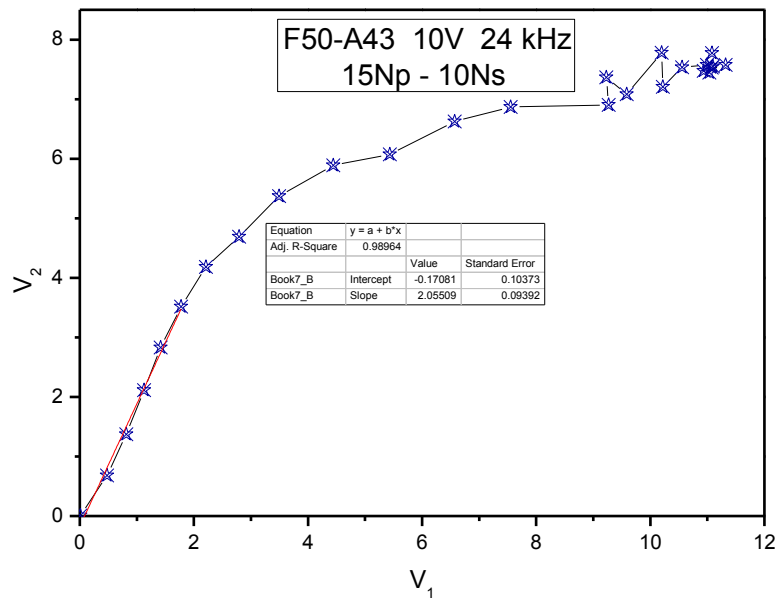


Figura 3.44.- Ferrita F50-A43 con un voltaje aplicado de 10V a una frecuencia de 24kHz. Fuente propia.

En la tabla 3.8 se muestran los valores de la permeabilidad inicial calculadas para la ferrita F50-A43 a diferentes voltajes y una frecuencia constante de 24kHz.

Tabla 3.8.- Permeabilidad inicial de la ferrita F50-A43 calculada con 24kHz

Voltajes	μ_i	E_R %
1V	847.72	0.27
2V	874.05	2.83
5V	1311.1	54.25
7V	1305.21	53.55
10V	1296.06	52.48

Para terminar con la F50-A43 se realizara el análisis con diferentes relaciones de vueltas en los embobinados respetando los parámetros con los cuales se determinó el mejor valor de la permeabilidad inicial, y con esto observar que tanto varía la respuesta lineal y por ende el cálculo de la permeabilidad.

En la figura 3.45 se presenta la gráfica obtenida cuando se ocupó una relación de 15-5 en los embobinados y se aplicaron 24kHz y un voltaje de excitación de 1V, como se puede notar no toda la gráfica es lineal, pues a partir del noveno punto presenta una ligera inclinación, sin embargo la recta que se produce con estos primeros 9 puntos genera una pendiente de 0.79 y por tanto una μ_i de 994.67.

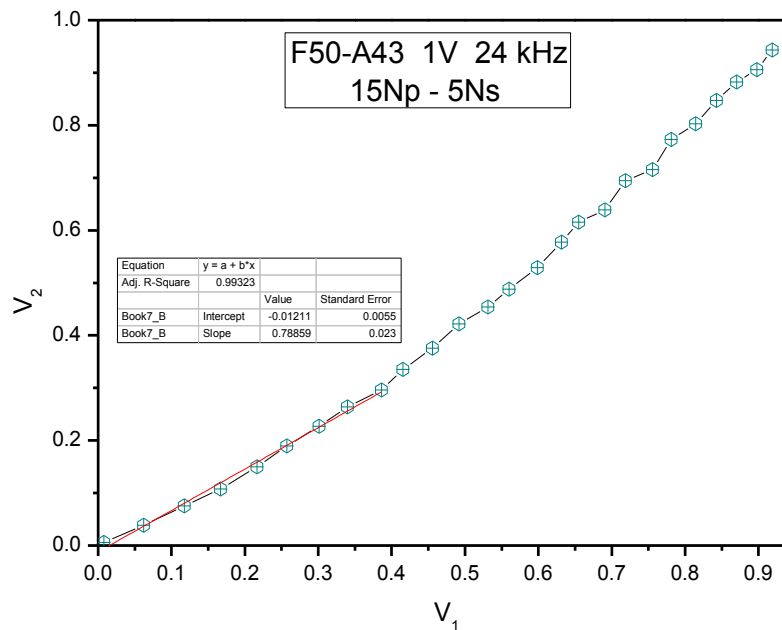


Figura 3.45.- Ferrita F50-A43 con un voltaje aplicado de 1V a una frecuencia de 24kHz. Fuente propia.

Cuando se utiliza una relación 15-10 se obtiene una gráfica con más puntos que forman una línea recta y que generan una pendiente de 1.34 como se observa en la figura 3.38 que ya se había utilizado anteriormente y por tanto se obtiene una permeabilidad de 847.72.

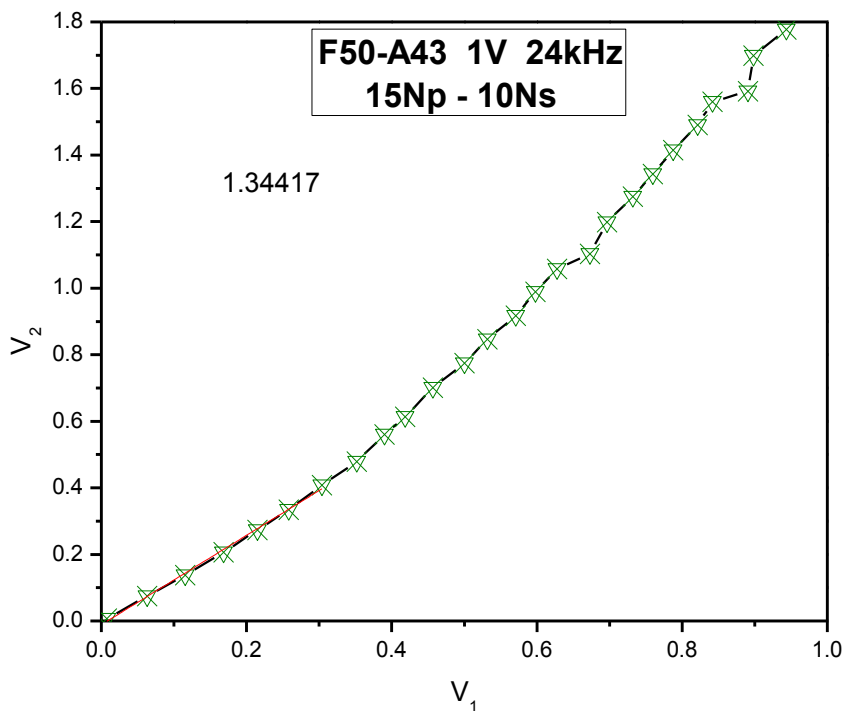


Figura 3.38.- Ferrita F50-A43 con un voltaje aplicado de 1V a una frecuencia de 24kHz. Fuente propia.

Al utilizar una relación de 15-15 en los embobinados la gráfica que se obtiene es la mostrada en la figura 3.46, en donde se obtiene una pendiente de 2.08 y con este valor se obtiene una permeabilidad inicial de 873.13.

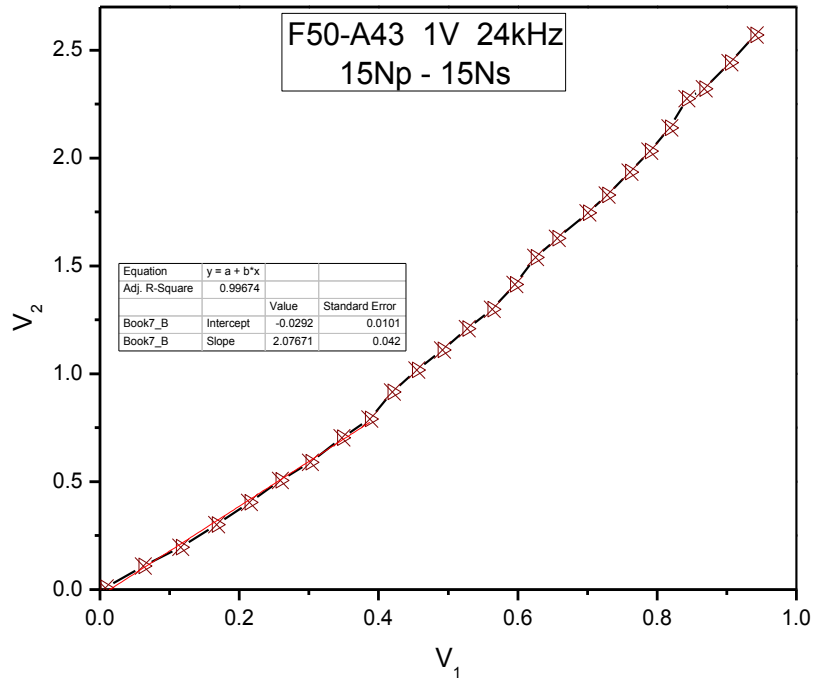


Figura 3.46.- Ferrita F50-A43 con un voltaje aplicado de 1V a una frecuencia de 24kHz. Fuente propia.

En la tabla 3.9 se muestran los valores de la permeabilidad inicial calculadas para la ferrita F50-A43 a 1V y 24kHz con diferentes relaciones en los embobinados.

Tabla 3.9.- Permeabilidad inicial de la F50-A43 calculada con 1V y 24kHz

Relación	μ_i	E_R %
15-5	994.67	17.02
15-10	847.72	0.27
15-15	873.13	2.72

Con las anteriores graficas se puede decir que la relación en las vueltas de los embobinados es parte fundamental para la determinación de la permeabilidad inicial, conforme se aumenta el número de vueltas en el embobinado secundario se induce mayor flujo magnético y esto provoca la diferencia en la pendiente de cada gráfica.

Para el estudio de la temperatura de Curie se realizó un análisis con diferentes parámetros que aseguran generar un comportamiento lineal, con el fin de observar el comportamiento de la F50-A43 y ver que tanto varía la medición.

En la figura 3.47 se observan 2 transiciones en las cuales se ocuparon los mismos parámetros 1V y 24kHz, lo único que se varió fue el intervalo de incremento en la temperatura, lo cual ocasiono que las 2 mediciones fueran diferentes.

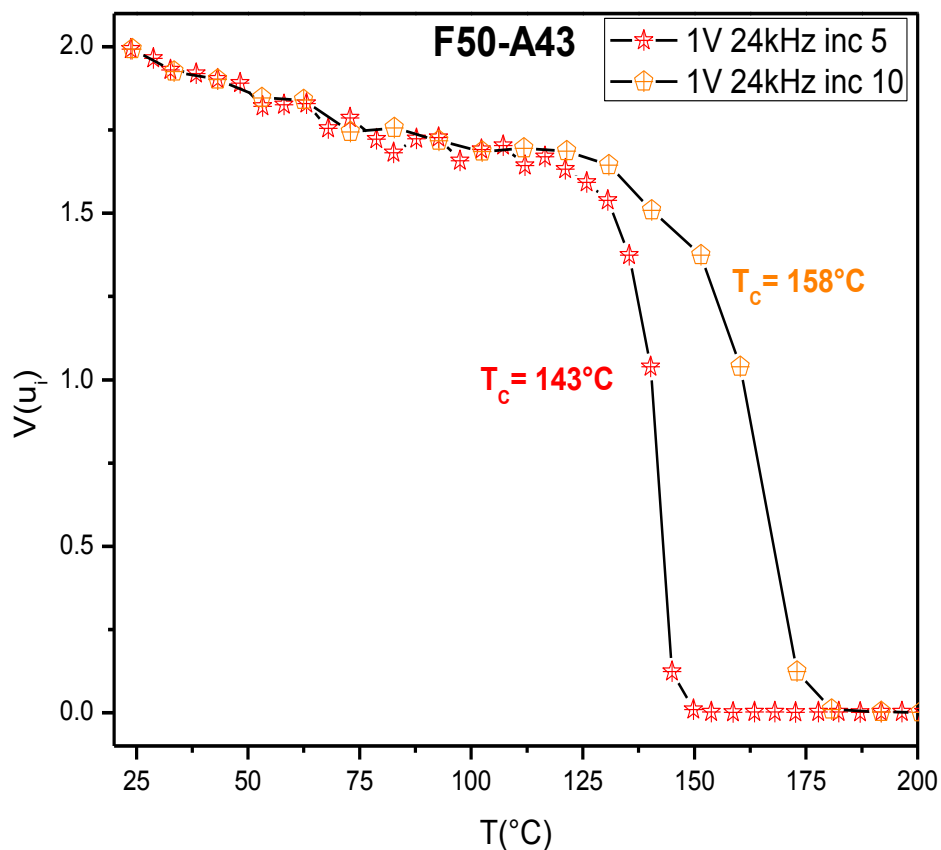


Figura 3.47.- Medición de la T_c en la F50-A43 conservando constante el voltaje de excitación de 1V y la frecuencia aplicada de 24kHz. Fuente propia.

Cuando se utiliza un incremento de 10°C la muestra se calienta más rápido y esto ocasiona que la medición no sea tan exacta en este caso es de 158°C ; por otro lado cuando se recurre a un incremento de 5°C la medición es más exacta al valor

real de la T_C señalada por el fabricante cuyo valor es de 130°C , pues la ferrita se calienta más lentamente garantizando una mayor homogeneidad, es decir entre menos cambio de temperatura es menos el cambio en sus propiedades magnéticas y así se obtiene que la T_C es de 143°C aproximadamente. La diferencia de grados centígrados entre estas 2 transiciones es de 15°C , y la diferencia entre el valor dado por el fabricante y la mejor medición con estos parámetros es de 13°C .

En la figura 3.48 se observan 2 transiciones como en la figura anterior, solo que esta ocasión se utilizaron los parámetros con los cuales se obtuvo el cálculo más exacto de la permeabilidad inicial que fueron 1V y 30kHz .

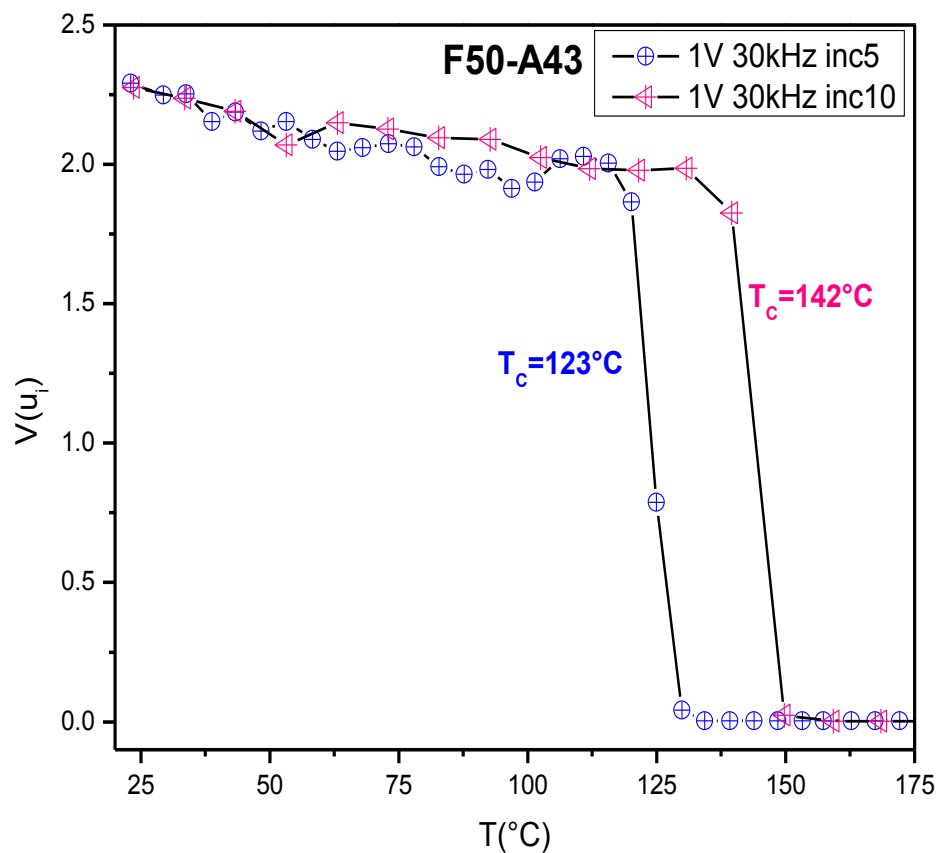


Figura 3.48.- Medición de la T_C en la F50-A43 conservando constante el voltaje de excitación de 1V y la frecuencia aplicada de 30kHz . Fuente propia.

Al igual que en el análisis anterior se usaron 2 diferentes intervalos de incrementos de temperatura. De color rosa se observa la transición con un incremento de 10°C en la cual la medición de la temperatura de Curie es de 142°C; y de color azul se puede ver una transición con un incremento de 5°C, el cual al ser más corto origina que la ferrita se caliente más lentamente y esto genere una medición más exacta, que en este caso es de 123°C. La diferencia entre estas dos mediciones es de 19°C, que comparando con la discrepancia del anterior análisis es más grande, sin embargo la diferencia entre el valor real y el obtenido con el incremento de 5° es más corto siendo de 7°C y por tanto se puede decir que utilizando estos parámetros se obtiene una mejor medición.

Para observar con más detalle lo que sucede al variar la frecuencia, se utilizara la figura 3.49 donde se pueden ver las 2 transiciones medidas con incrementos de 10°C.

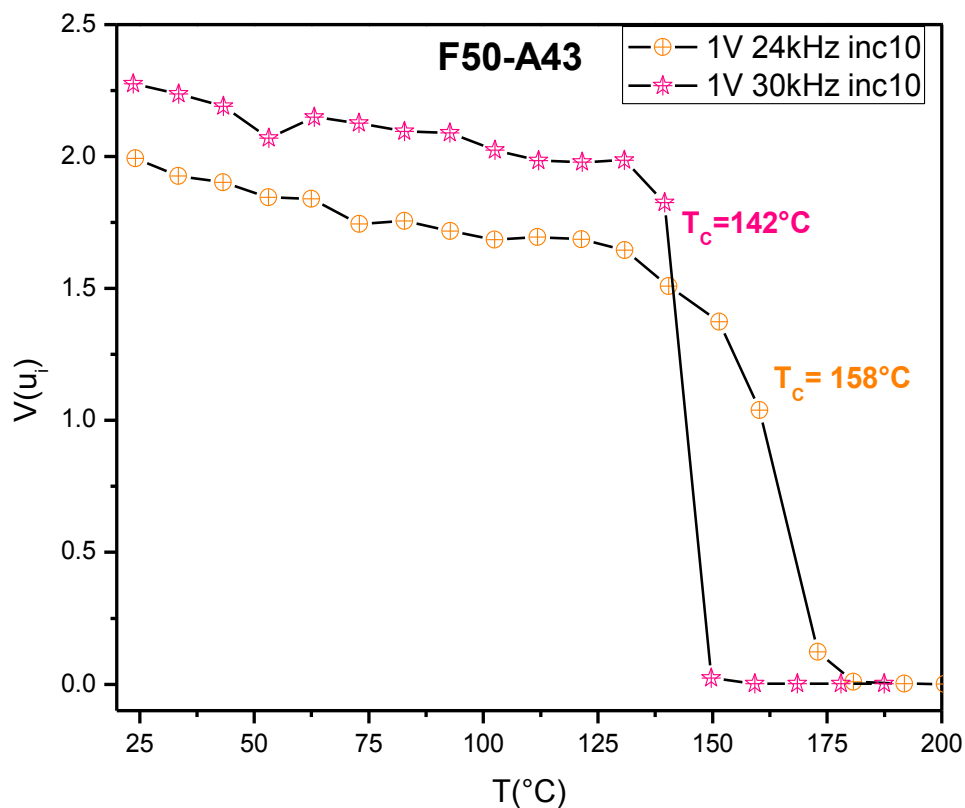


Figura 3.49.- Comparación de la T_c en la F50-A43 conservando constante el voltaje de excitación de 1V y con un incremento de la temperatura de 10. Fuente propia.

En la figura anterior se mostró la variabilidad en la medición al cambiar la frecuencia, observándose que aplicando 30kHz se consiguen mejores resultados, sin embargo esas mediciones no garantizan ser las más correctas pues la forma de calentamiento es rápida y entre más rápida se pierden sus propiedades magnéticas con más celeridad, es por eso que el siguiente análisis es de la comparación de las mediciones obtenidas con las mismas frecuencias pero con aumentos de temperatura más cortos.

Se pueden observar las transiciones a incrementos de 5° en la figura 3.50, donde se nota que la transición de color azul es mejor ya que presenta una mejor caída.

La variación en la medida de la T_c al usar incrementos distintos se debe a que el material se calienta con diferente velocidad y en consecuencia el volumen de la muestra se calienta a incrementos de temperatura diferentes.

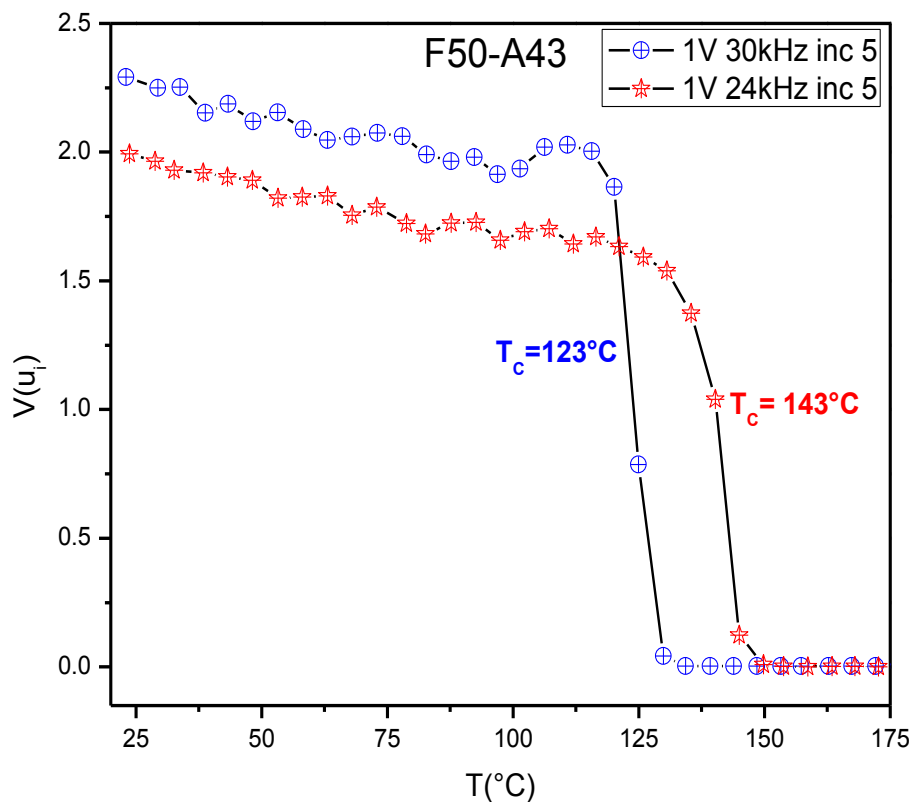


Figura 3.50.- Comparación de la T_c en la F50-A43 conservando constante el voltaje de excitación de 1V y con un incremento de la temperatura de 5. Fuente propia.

F50-AW

Para finalizar con el análisis con respecto a las ferritas, se realizara a continuación el análisis de la ferrita F50-AW, en la figura 3.51 se muestra la curva de magnetización inicial de esta ferrita donde se señalan las diferentes regiones de comportamiento magnético dentro del círculo rojo se marca la región que presenta un comportamiento lineal.

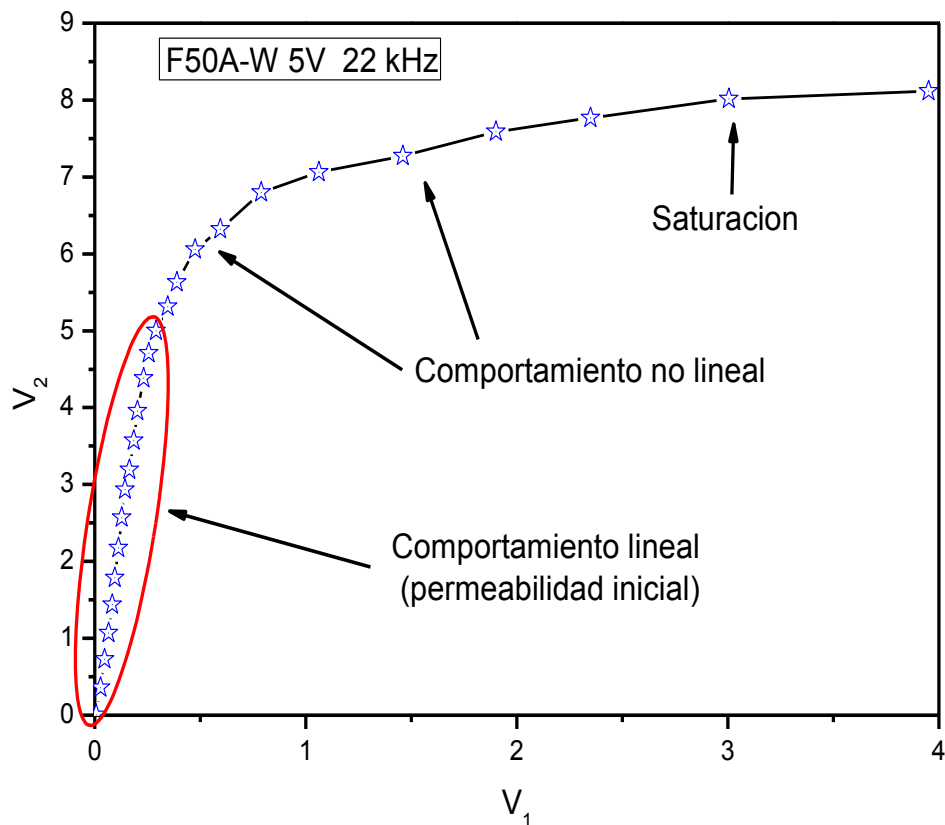


Figura 3.51.- Curva de magnetización inicial de la ferrita F50-AW. Fuente propia.

La figura 3.52 muestra el comportamiento de la F50-AW cuando se varía la frecuencia y se aplica 1V, se nota que a partir de 10kHz presenta un comportamiento muy lineal, con lo cual se puede decir que la muestra es ultrablanda.

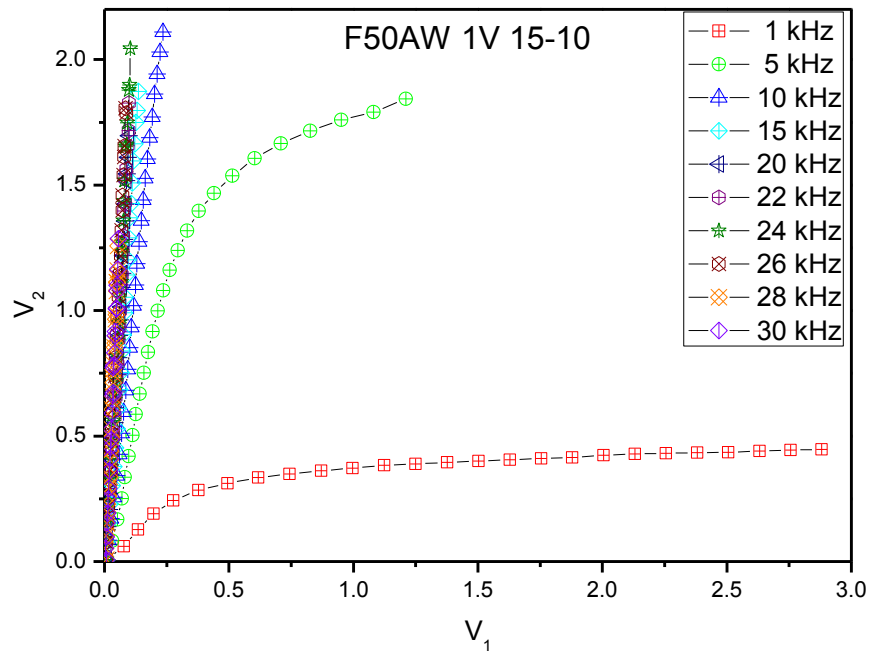


Figura 3.52.- Dependencia de la variación de la frecuencia en la ferrita F50-AW a un voltaje de 1V. Fuente propia.

Para la determinación de la permeabilidad inicial se realizaron varios análisis con los cuales se llegó a la conclusión de que la mejor relación de vueltas en los embobinados es la de 15-10 para obtener las mejores graficas con comportamiento lineal.

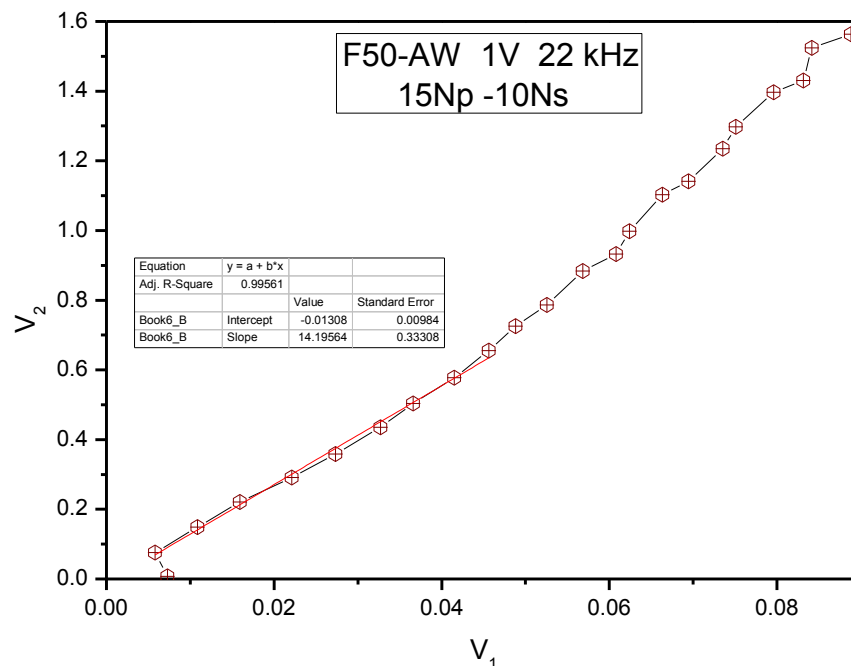


Figura 3.53.- Ferrita F50-AW con un voltaje aplicado de 1V a una frecuencia de 22kHz. Fuente propia.

La figura anterior muestra la gráfica obtenida cuando se aplica 1V y 22kHz, donde se genera una pendiente con valor de 14.2 y por lo tanto una permeabilidad de 8052.6.

Cuando se aplican 24kHz la gráfica que se genera es la de la figura 3.54 la cual presenta una pendiente de 16.82 y una μ_i de 8746.62.

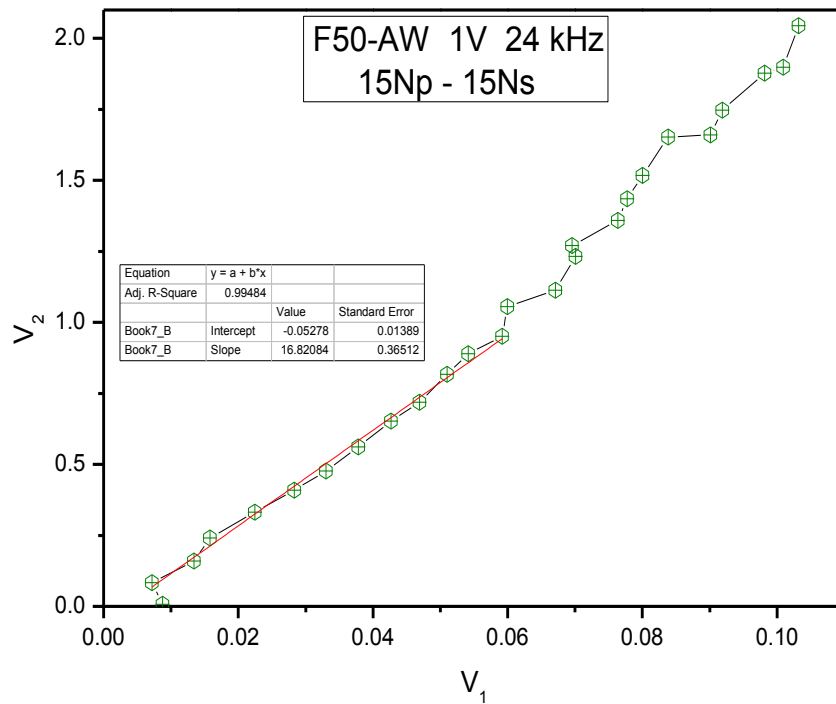


Figura 3.54.- Ferrita F50-AW con un voltaje aplicado de 1V a una frecuencia de 24kHz y relación 15-15 en los embobinados. Fuente propia.

Cuando se utilizan 28kHz se genera una gráfica cuya pendiente es de 21.82 que se puede observar en la figura 3.55, con este valor se determina la permeabilidad inicial que es de 9724.61.

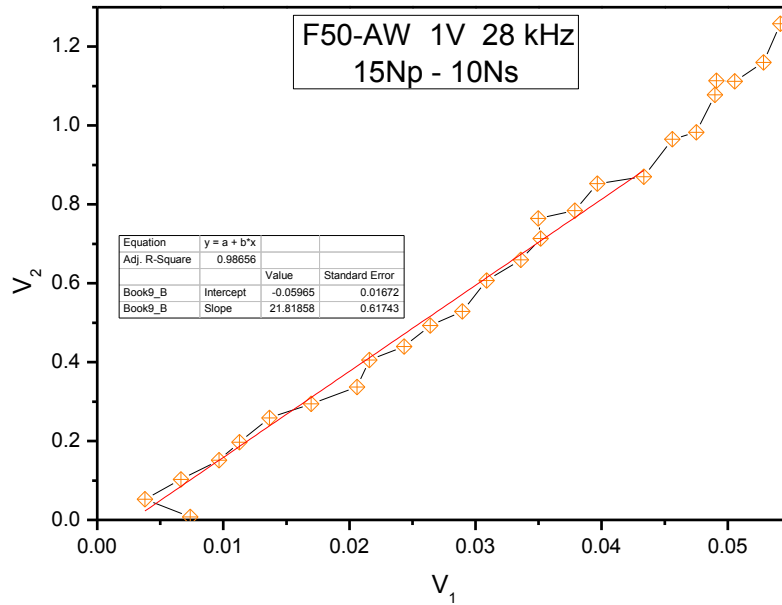


Figura 3.55.- Ferrita F50-AW con un voltaje aplicado de 1V a una frecuencia de 28kHz. Fuente propia.

Al aplicar 30kHz se obtiene la gráfica de la figura 3.56 que genera una pendiente de 20.62 y por lo tanto una permeabilidad de 8579.6.

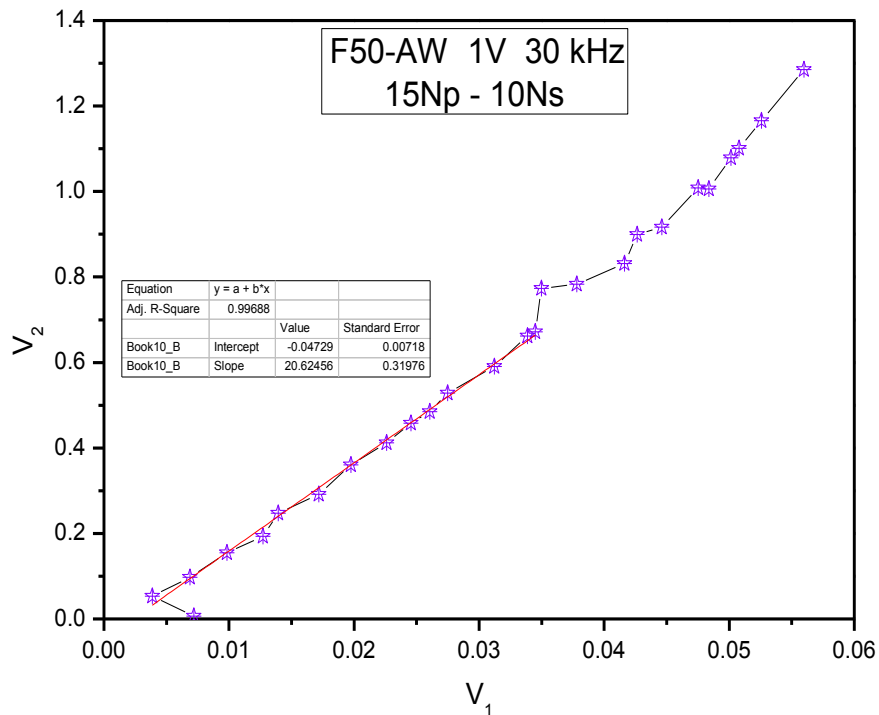


Figura 3.56.- Ferrita F50-AW con un voltaje aplicado de 1V a una frecuencia de 30kHz. Fuente propia.

En la tabla 3.10 se observan las permeabilidades obtenidas con distintas frecuencias y un voltaje constante de 1V con una relación 15-10 en los embobinados.

Tabla 3.10.- Permeabilidad inicial de la F50-AW calculada con 1V y diferentes frecuencias

Frecuencia	μ_i	E_R %
22kHz	8,052.6	19.47
24kHz	8,746.62	12.53
28kHz	9,724.61	2.75
30kHz	8,579.6	14.20

La tabla anterior muestra 4 permeabilidades determinadas con las diferentes frecuencias utilizadas, en donde se observa que con 28kHz se tiene el mejor calculo pues solo existe un error del 2.75% respecto al valor dado por el fabricante.

Es por eso que el siguiente análisis se realiza respetando la frecuencia de 28kHz y la relación en las vueltas de los embobinados variando únicamente el voltaje aplicado para observar con ello como se modifican los valores de las pendientes y con ello el cálculo de la permeabilidad inicial.

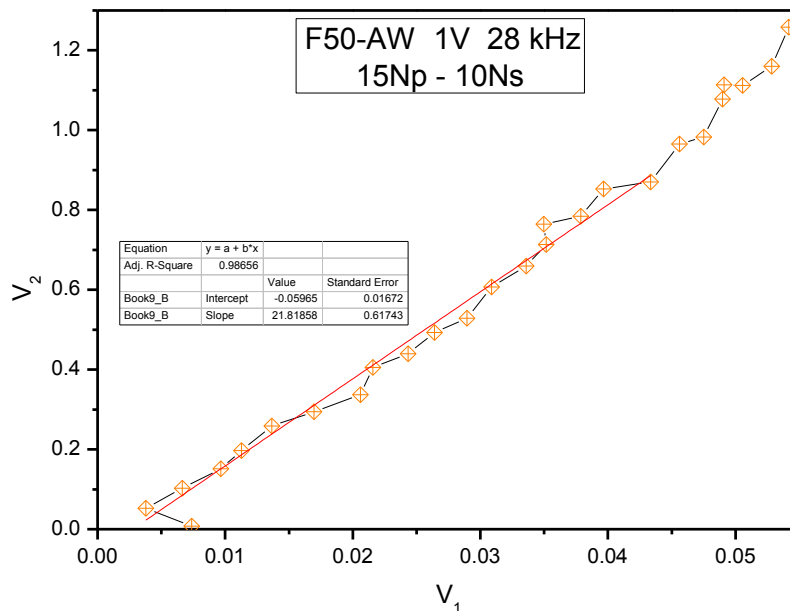


Figura 3.55.- Ferrita F50-AW con un voltaje aplicado de 1V a una frecuencia de 28kHz. Fuente propia.

Para empezar con este análisis se hace uso nuevamente de la figura 3.55 donde se tiene una pendiente de 21.82 y con ella se obtuvo una permeabilidad inicial de 9724.61.

Al aplicar un voltaje de excitación de 2V se genera una gráfica cuya pendiente difiere a la anterior, para este caso el valor es de 23.42 lo que ocasiona que el cálculo de la permeabilidad sea de 10439.48.

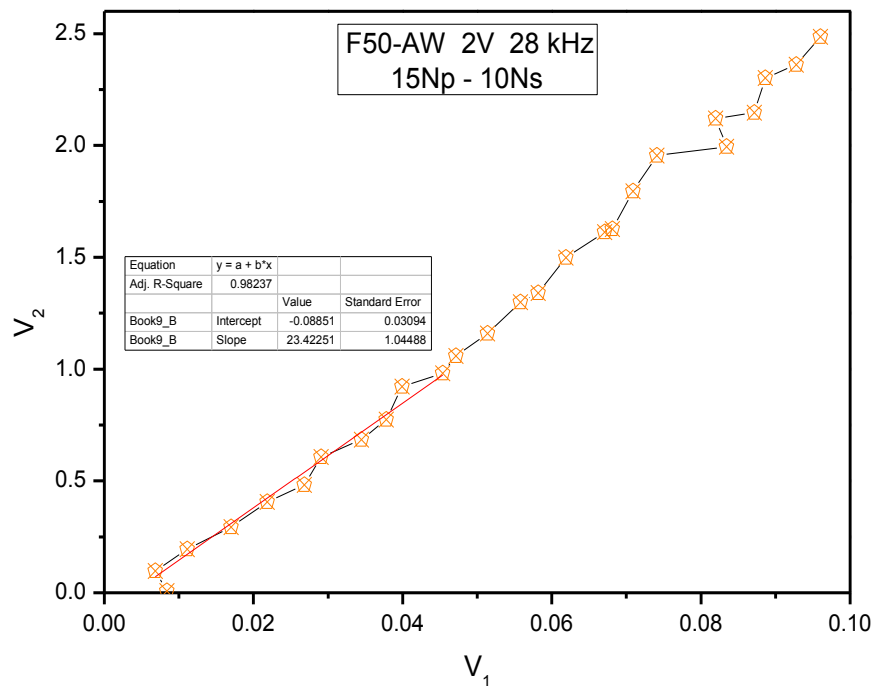


Figura 3.57.- Ferrita F50-AW con un voltaje aplicado de 2V a una frecuencia de 28kHz. Fuente propia.

La figura 3.58 muestra la gráfica de la F50-AW cuando se excita con 5V, donde se observa que al ampliar el voltaje aplicado se puede observar que la ferrita comienza a saturarse, a pesar de que ya no es tan lineal la gráfica se puede obtener una pendiente, cuyo valor es de 28.13 y con este dato se puede calcular la permeabilidad que es de 12,539.24.

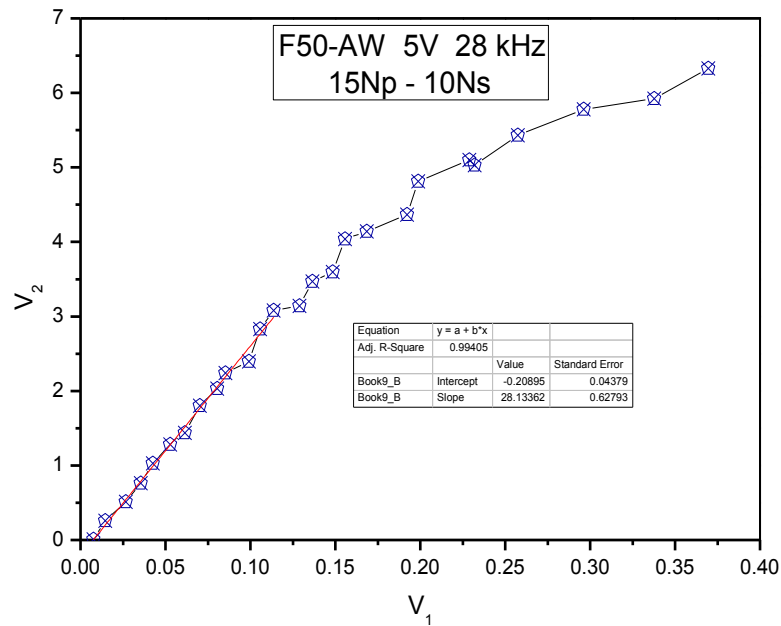


Figura 3.58.- Ferrita F50-AW con un voltaje aplicado de 5V a una frecuencia de 28kHz. Fuente propia.

Cuando se aplican voltajes más grandes se observa que la F50-AW se satura y por tal motivo ya no es tan fácil observar la región lineal, sin embargo a pesar de contar con pocos puntos como se observan en la figuras 3.59 y 3.60, se puede obtener la pendiente de cada una de las gráficas y con ellas hallar la permeabilidad inicial, el valor de las pendientes es de 27.83 y 25.21 para 7 y 10V respectivamente y por lo tanto al calcular la permeabilidad de cada una se obtienen los siguientes resultados 12,403.08 y 11,236.07.

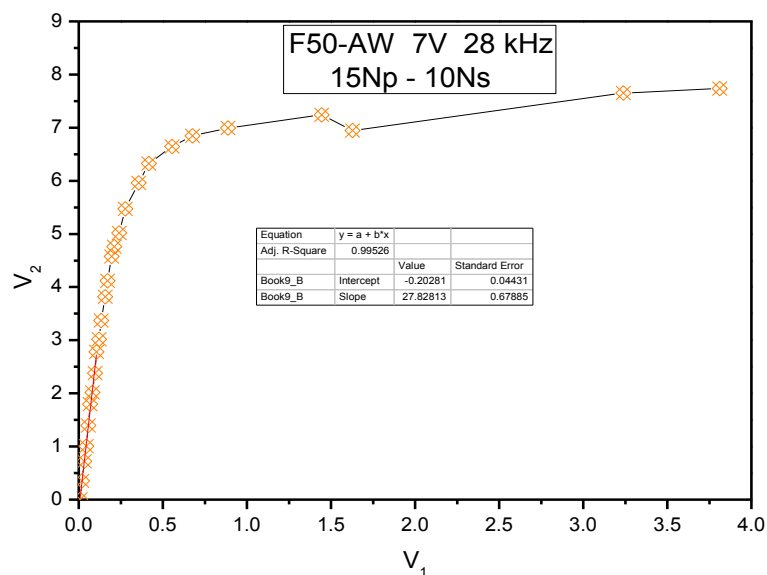


Figura 3.59.- Ferrita F50-AW con un voltaje aplicado de 7V a una frecuencia de 28kHz. Fuente propia.

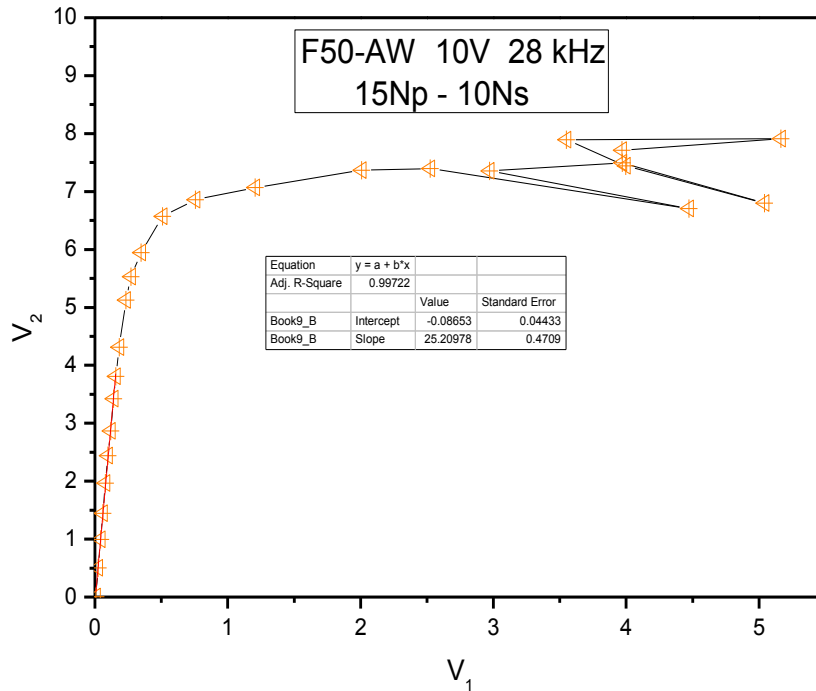


Figura 3.60.- Ferrita F50-AW con un voltaje aplicado de 10V a una frecuencia de 28kHz. Fuente propia.

El análisis anterior muestra como al variar el voltaje con el que se excita la F50-AW la ferrita se va magnetizando, cuando se usa 1V se obtiene una gráfica con un comportamiento muy lineal ya que se está limitando el campo magnético y entre más se limite se obtienen mejores resultados ya que se están generando demasiados puntos alrededor de la primer etapa de magnetización, cuando se usan 10V la ferrita se magnetiza por completo y llega a saturarse lo que provoca menos puntos en la región lineal. En la tabla 3.11 se muestran las permeabilidades obtenidas con los distintos voltajes, donde se observa que al ir incrementando el voltaje incrementa el error en el cálculo de la μ_i .

Tabla 3.11.- Permeabilidad inicial de la F50-AW calculada con 28kHz y diferentes voltajes

Voltaje	μ_i	E_R %
1V	9,724.61	2.75
2V	10,439.48	4.39
5V	12,539.24	25.39
7V	12,403.08	24.03
10V	11,236.07	12.36

El siguiente análisis es sobre el comportamiento que ocurre cuando se varían las relaciones en el número de vueltas en los embobinados. Como se dijo al principio del análisis a la F50-AW, la relación que obtuvo mejores resultados es la de 15-10, sin embargo se presentaran las tres distintas relaciones utilizando parámetros de voltaje y frecuencia constantes para observar que tanto varía el cálculo de la permeabilidad.

El usar distinta relación en los embobinados implica que existirá una mayor inducción de flujo magnético cuando se utilice mayor número de vueltas en el embobinado primario, esto se puede observar en las figuras 3.61, 3.55 y 3.62 cuando se utiliza una relación 15-5 se inducen 0.7V, con 15-10 alrededor de 1.2V y con 15-15 más o menos 1.8V esto provoca que la pendiente de cada grafica sea diferente y por tal motivo el cálculo de la μ_i varié. Para 15-5 se tiene una pendiente de 10.14, con 15-10 una de 21.81858 y con 15-15 una pendiente con valor de 28.58.

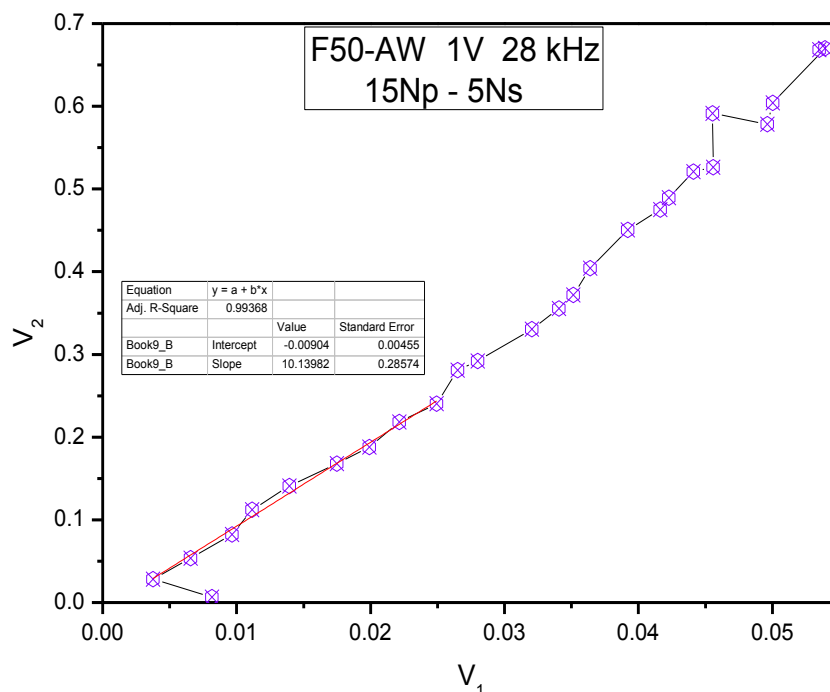


Figura 3.61.- Ferrita F50-AW con relación en embobinados 15-5 a 1V Y 28kHz. Fuente propia.

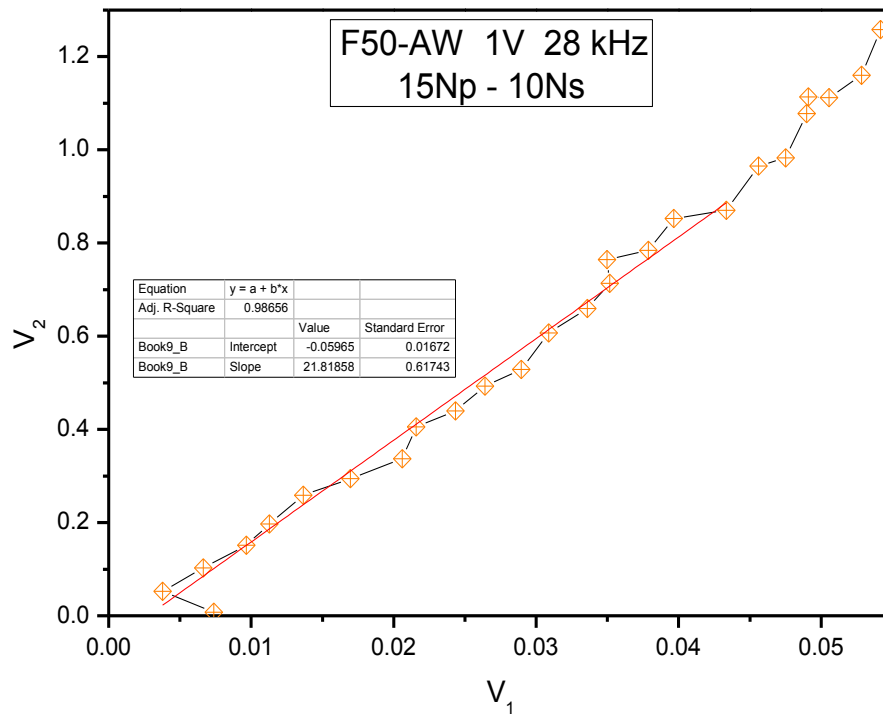


Figura 3.55.- Ferrita F50-AW con relación en embobinados 15-10 a 1V Y 28kHz. Fuente propia.

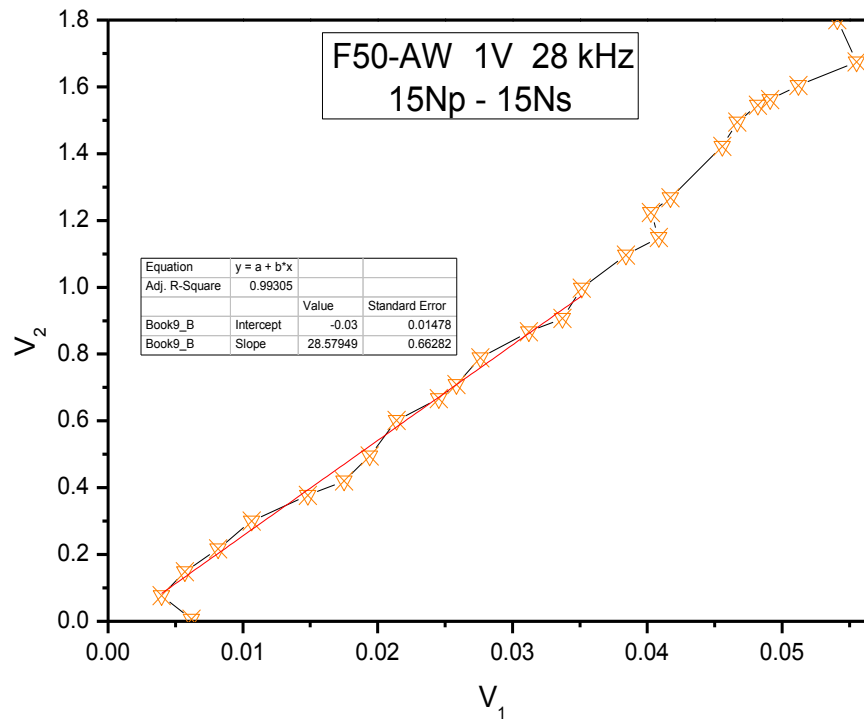


Figura 3.62.- Ferrita F50-AW con relación en embobinados 15-15 a 1V Y 28kHz. Fuente propia.

A continuación en la tabla 3.11 se presentan las permeabilidades calculadas con las pendientes obtenidas en las anteriores gráficas, donde se puede observar el error que existe entre las permeabilidades calculadas y la real, notándose que mientras mayor número de vueltas en el embobinado secundario se induce un mayor flujo y esto ocasiona que el valor calculado de la permeabilidad varié.

Tabla 3.11.- Permeabilidad inicial de la F50-AW calculada con 1V y 28kHz con distintas relaciones en los embobinados

Relación	μ_i	E_R %
15-5	9,038.7	9.61
15-10	9,724.61	2.75
15-15	8,491.98	15.08

Para el estudio de la temperatura de Curie se realizó un análisis con distintos parámetros que presentan en su mayoría una región lineal con el fin de apreciar la variación en la medición de la T_C de la F50-AW. Las figuras 3.63 y 3.64 presentan las transiciones que se obtienen cuando se utilizan parámetros constantes y variando únicamente la rapidez con la cual se calienta la ferrita.

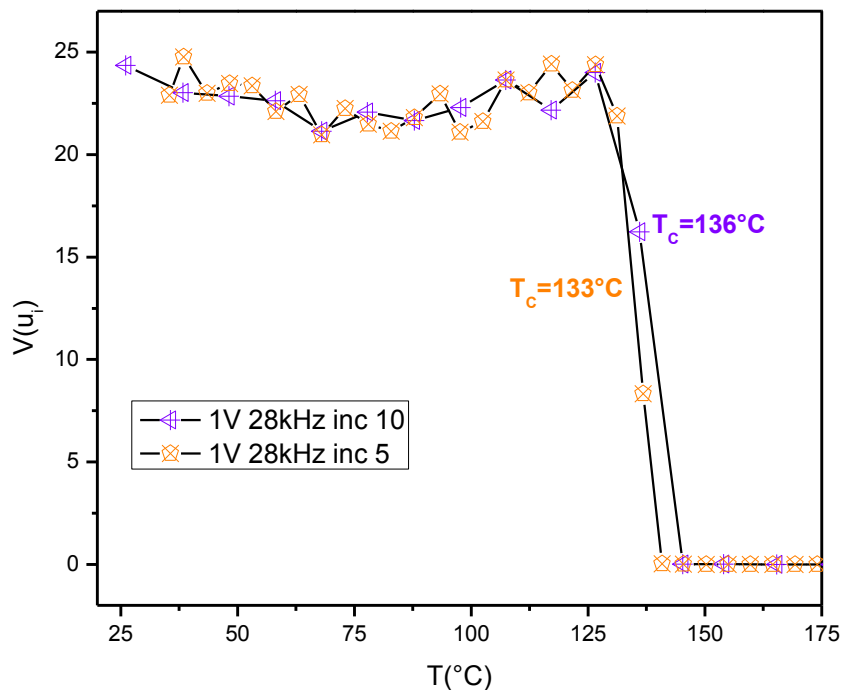


Figura 3.63.- Medición de la T_C en la F50-AW conservando constante el voltaje de excitación de 1V y la frecuencia aplicada de 28kHz a distintos incrementos de temperatura. Fuente propia.

En la figura 3.63 se aplicaron 1V y 28kHz con relación de 15-10 en los embobinados, de color morado se observa la transición con incrementos de 10°C en la que se obtiene una medición de 136°C para la T_c , por otro lado de color anaranjado se tiene la transición que se obtiene cuando se utilizan 5°C entre cada incremento en donde se logró una medición de 133°C.

En la figura 3.64 se muestran las transiciones originadas cuando se utilizaron 1V y 30 kHz con la relación 15-10. De color rosa se tiene la transición a incrementos de 10°C donde se obtuvo una medición de 131°C, mientras que la medición con la transición de color azul donde se ocuparon incrementos de 5°C da como resultado 133°C.

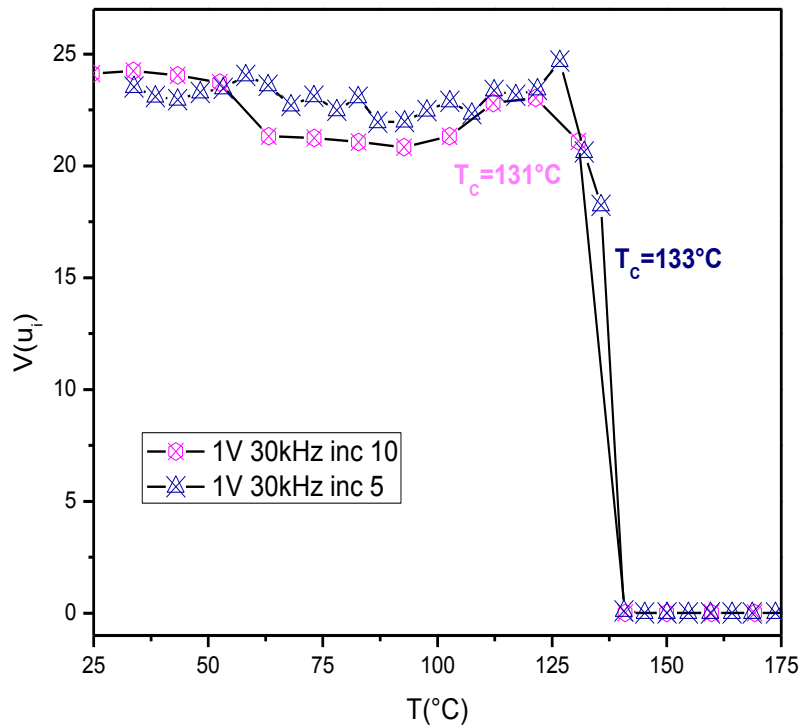


Figura 3.64.- Medición de la T_c en la F50-AW conservando constante el voltaje de excitación de 1V y la frecuencia aplicada de 30kHz a distintos incrementos de temperatura. Fuente propia.

Las figuras anteriores mostraron que la rapidez en el calentamiento de la ferrita es un factor importante para la medición de la T_c . A continuación se presentan 2

nuevas figuras en las cuales se comparan las transiciones a iguales incrementos utilizando los 2 distintos parámetros.

En la figura 3.65 se tienen las transiciones a 10°C, las mediciones entre ellas solo varían 5°C, sin embargo la transición de color rosa es la que presenta una mejor caída y sobre todo un valor más cercano al reportado por el fabricante que es de 130°C.

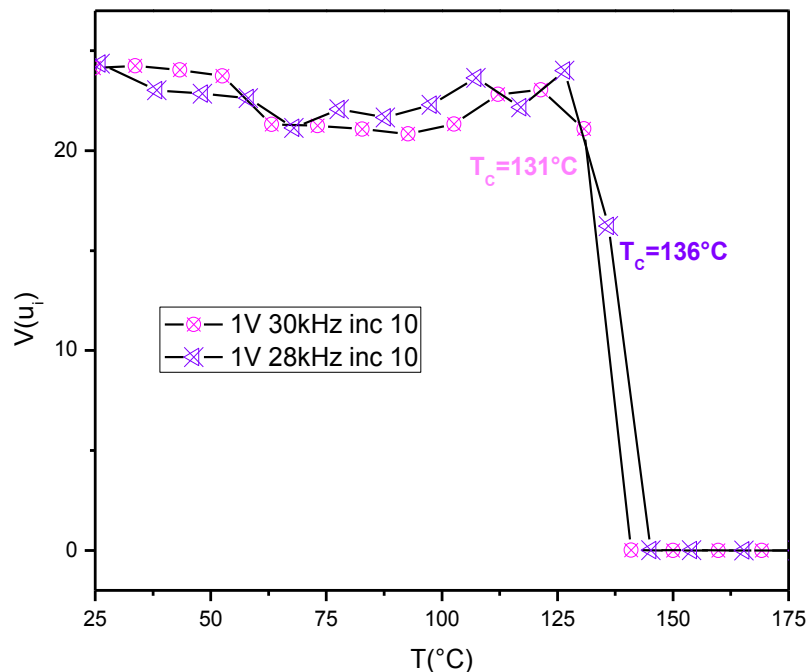


Figura 3.65.- Comparación de la T_c en la F50-AW a diferentes frecuencias conservando constante el voltaje de excitación de 1V y el incremento de temperatura de 10°. Fuente propia.

Por otro lado la figura 3.66 presenta las transiciones obtenidas a incrementos de 5°C. A pesar de utilizar diferente frecuencia las 2 transiciones son muy parecidas tal que la medición de la T_c para las 2 es de 133°C, sin embargo como ya se mencionó al utilizar 28kHz se obtiene el mejor cálculo de la permeabilidad inicial y esto provoca que en la medición de la T_c la transición obtenida con esta frecuencia sea la mejor.

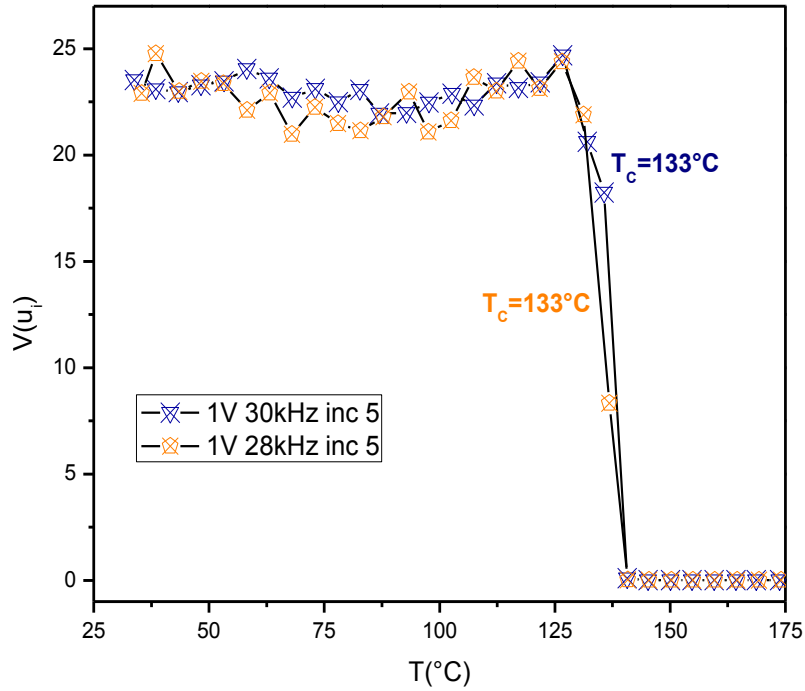


Figura 3.66.- Comparación de la T_c en la F50-AW a diferentes frecuencias conservando constante el voltaje de excitación de 1V y el incremento de temperatura de 5°. Fuente propia.

Para terminar con las ferritas a continuación se muestra la tabla 3.12 donde se comparan las permeabilidades calculadas y las reportadas.

Tabla 3.12.- Comparación de resultados obtenidos con los reales en las ferritas

Ferrita	Permeabilidad reportada	Permeabilidad calculada
F50A-F	3000	2,568.84
F50A-J	5000	4,993.57
F50A-43	850	847.72
F50A-W	10000	9,724.61

2) Aleación amorfa

VITROVAC 60-30

Para la determinación de la permeabilidad inicial en la VITROVAC 60-30 se usó la misma metodología, al igual que en las ferritas para esta cinta se realizaron diversos estudios con diferentes parámetros de voltaje, frecuencia y relación de embobinados.

Los mejores resultados se obtuvieron con la relación 30-15 en los embobinados y aplicando 0.5V. Las siguientes figuras muestran las 2 graficas que presentaron la mayor respuesta lineal.

La figura 3.67 muestra la gráfica que se obtuvo aplicando 0.5V y 35kHz en la cual se observa que más o menos la tercera parte presenta un comportamiento lineal, a esta región se le determina su pendiente que es de 0.34 y con ella se calcula la permeabilidad inicial que para este caso es de 22,129,111.97.

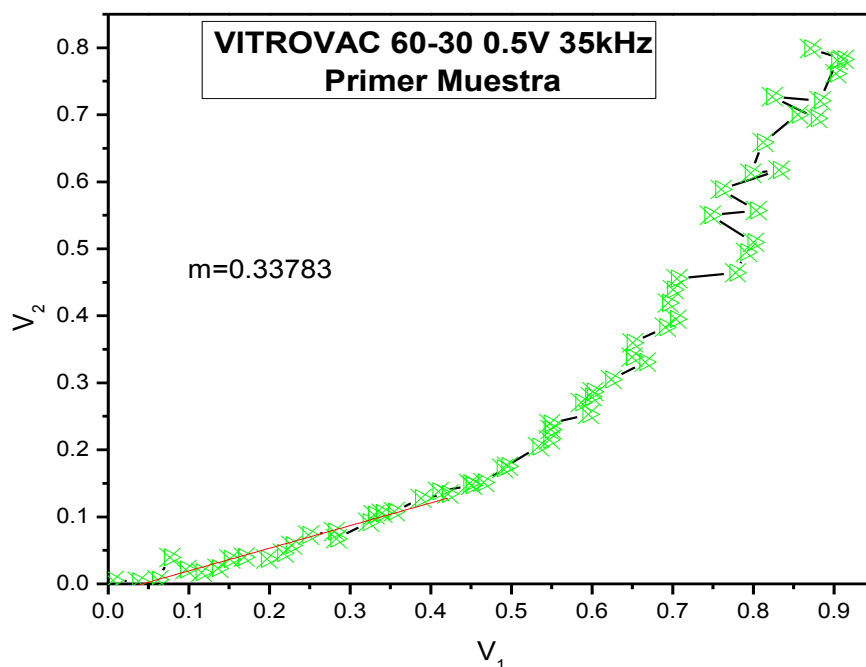


Figura 3.67.- Pendiente obtenida aplicando 0.5V y 35kHz. Fuente propia.

Por otro lado, la figura 3.68 muestra la gráfica que se originó al aplicar 0.5V y 40kHz, en comparación con la anterior se puede notar que esta grafica presenta una mayor región lineal, el valor de la pendiente es de 0.37 y el resultado de la permeabilidad con este dato es de 21,260,123.64.

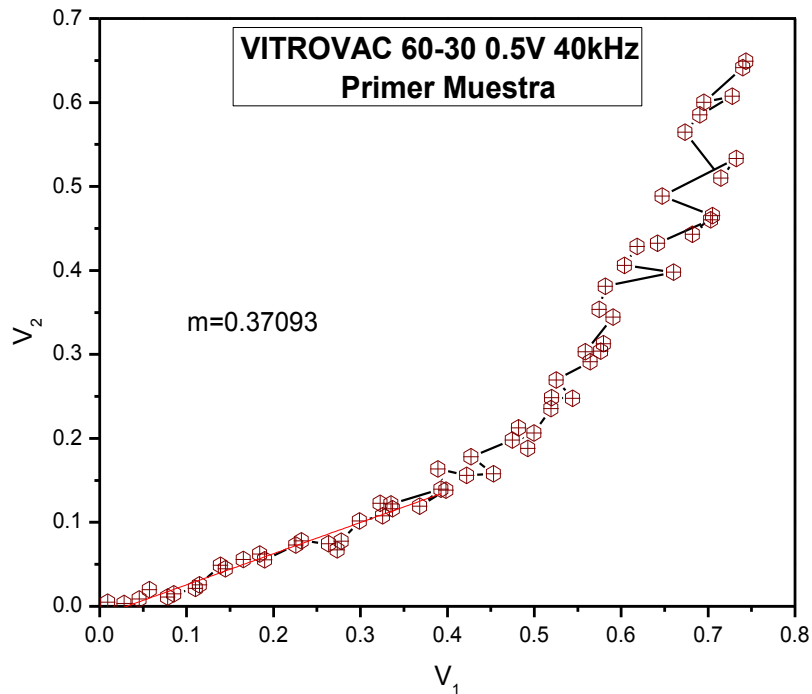


Figura 3.68.- Pendiente obtenida aplicando 0.5V y 40kHz. Fuente propia.

En la tabla 3.13 se presentan las permeabilidades calculadas para la VITROVAC 60-30, donde se observa que con la frecuencia de 40kHz se tiene el valor más cercano al reportado por el fabricante que es de 20,000,000.

Tabla 3.13.- Permeabilidad inicial de la VITROVAC 60-30 calculada con 0.5V con una relación 30-15 en los embobinados

Frecuencia	μ_i
35kHz	22,129,111.98
40kHz	21,260,123.64

Con los parámetros 0.5V, 40kHz y relación 15-10 se realizó la medición de la T_C , cabe destacar que en diferencia a las ferritas los materiales amorfos cambian su estructura al sufrir cambios de temperatura y por ende cambian sus propiedades magnéticas. Esto quiere decir que la T_C será distinta conforme sufra tratamientos térmicos. Es por eso que el siguiente análisis mostrara lo que ocurre con la cinta al someterse a 2 tratamientos térmicos utilizando un intervalo de 30 a 370°C y un incremento de 3°C.

La figura 3.69 muestra la transición que se produce en el primer tratamiento térmico, donde se observa que existen 2 transiciones y por tanto 2 mediciones de la T_C ; la primera es la propia del material amorfo señalada en 172°C aproximadamente, como se dijo al principio al sufrir cambios de temperatura la muestra cambia sus propiedades es por eso que se observa una segunda transición señalada más o menos por los 314°C, esta última se trata tal vez de la T_C del material al pasar de amorfo a nanocristalino.

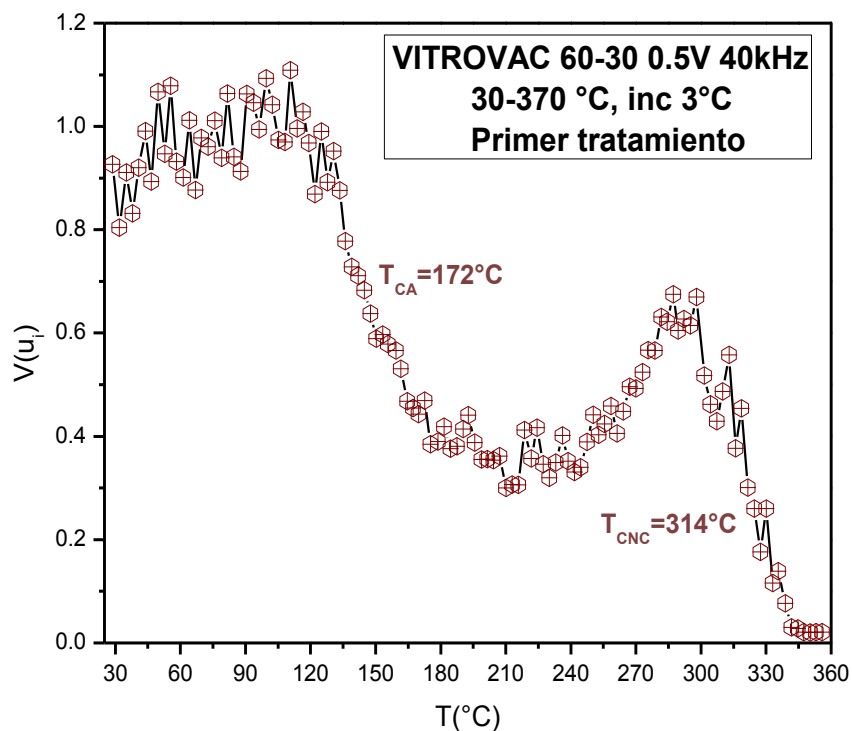


Figura 3.69.- Transición que se produce en el primer tratamiento térmico. Fuente propia.

Para observar lo que ocurre al realizarle un segundo tratamiento térmico a la misma muestra se presenta a continuación la figura 3.70, solo que en esta ocasión solo se usó un intervalo más pequeño que va de los 30 a 300°C respetando los anteriores parámetros, ya que se pensaba que al reducir el intervalo se podría notar como desaparecía la parte amorfa y se incrementaba la parte nanocrystalina del material, sin embargo no sucedió lo que se esperaba. Lo que ocurrió fue que la parte amorfa y nanocrystalina posiblemente se hayan unido y por eso se generó una sola transición y por tanto la medición de la T_c fue la intermedia de las 2 transiciones que se presentaron en la figura 3.69. Para esta transición se obtuvo una medición de la T_c alrededor de los 250°C que comparando con la mitad de las 2 transiciones de la figura anterior solo varía por 7°C.

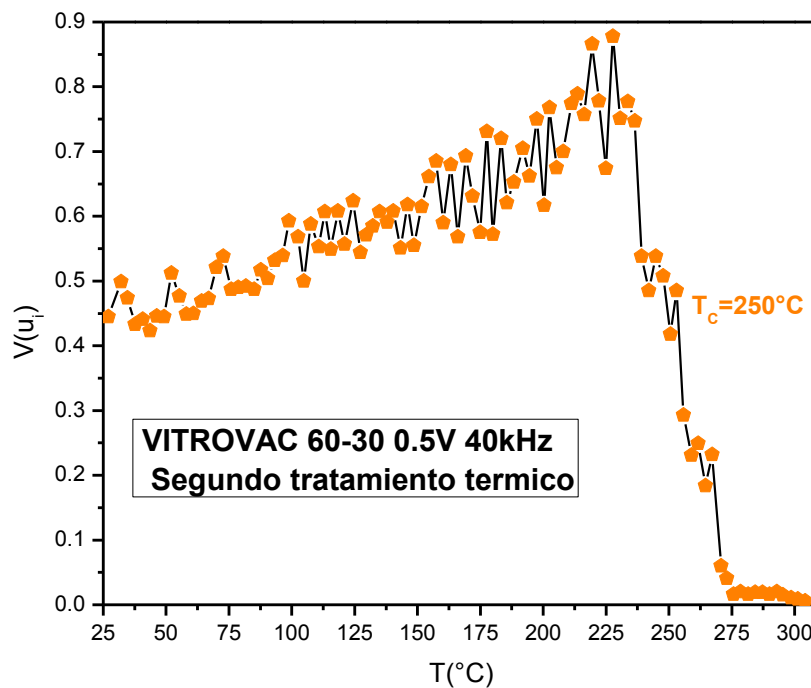


Figura 3.70.- Transición que se produce en el segundo tratamiento térmico. Fuente propia.

Como ya se observó en las anteriores figuras la cinta cambia por completo sus transiciones al pasar por varios tratamientos térmicos. Es por eso que el siguiente

análisis es para observar como varia la permeabilidad inicial al someterse por continuos tratamientos térmicos y al ocurrir esto las mediciones de la T_c serán distintas.

La figura 3.71 muestra la gráfica que se obtiene antes de realizarse un primer tratamiento térmico donde se utilizaron los mismos parámetros, esta grafica es muy parecida a la de la figura 3.68, sin embargo en esta se origina una pendiente de 0.33 que es un poco diferente a la de esa figura, sin embargo con ella se calcula la permeabilidad inicial que es de 18,812,741.98.

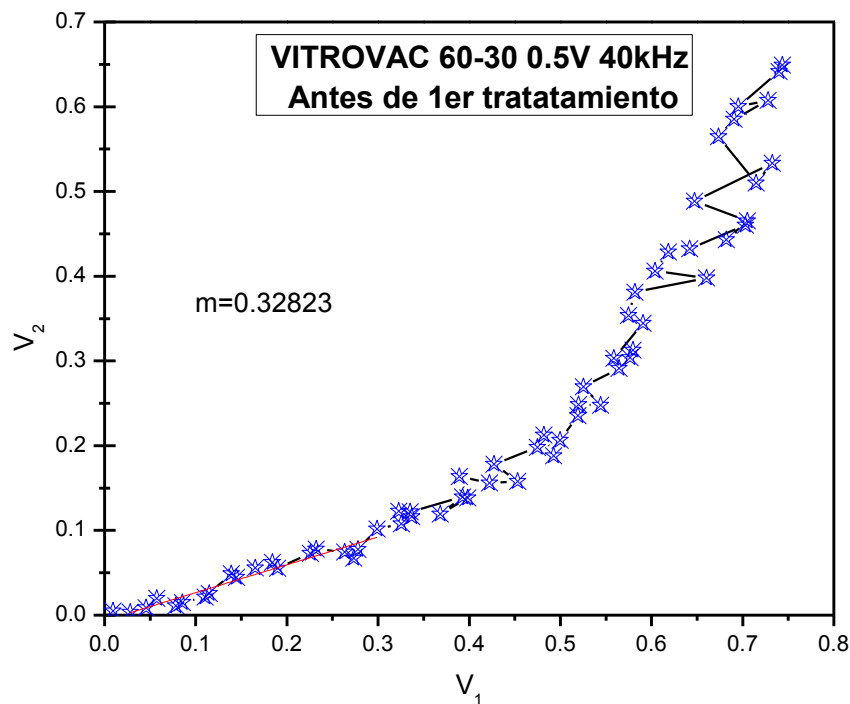


Figura 3.71.- Pendiente obtenida antes de realizarse el primer tratamiento térmico a la nueva muestra. Fuente propia.

La transición que se origina al someterse a cambios de temperatura es la que se presenta en la figura 3.72, en esta ocasión se utilizó un intervalo de 25 a 260°C para garantizar que solo se obtendrá la medición de la T_c cuando el material aún sigue siendo completamente amorfo.

Lo que se planteó al empezar el análisis se cumplió pues solo se generó una sola transición en la cual se comenzó a incrementar la permeabilidad inicial en función de la temperatura hasta que comenzó a tener una caída alrededor de los 136°C y decayó completamente aproximadamente por los 210°C, y con estos valores se obtuvo que más o menos por los 173°C se tiene la T_c .

Al comparar este resultado con el de la figura 76 se tiene que son muy semejantes pues la medición de la T_c para esa transición es de 172°C.

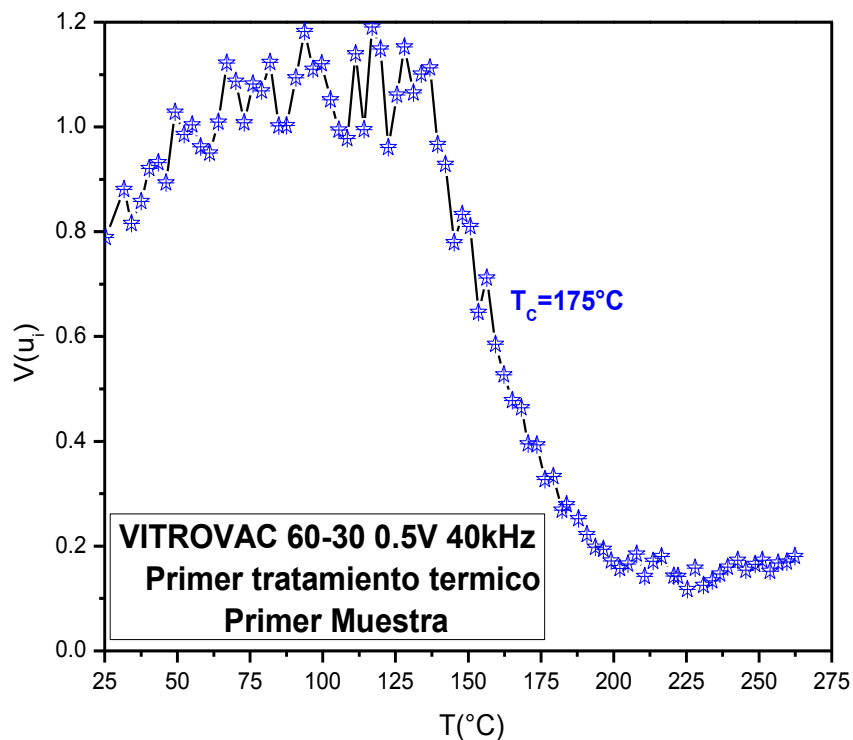


Figura 3.72.- Transición que se produce en el primer tratamiento térmico de la nueva muestra.
Fuente propia.

La figura 3.73 muestra la gráfica que se obtiene después de que la cinta pasó por un primer tratamiento térmico, donde se genera una pendiente de 0.022 que comparando con el valor de la pendiente de la figura 3.71 es mucho más pequeño, lo que quiere decir que la cinta se empezó a endurecer, lo que significa que en

realidad la VITROVAC 60-30 sufrió cambios, la permeabilidad que se obtuvo con esta pendiente es de 1,260,946.05.

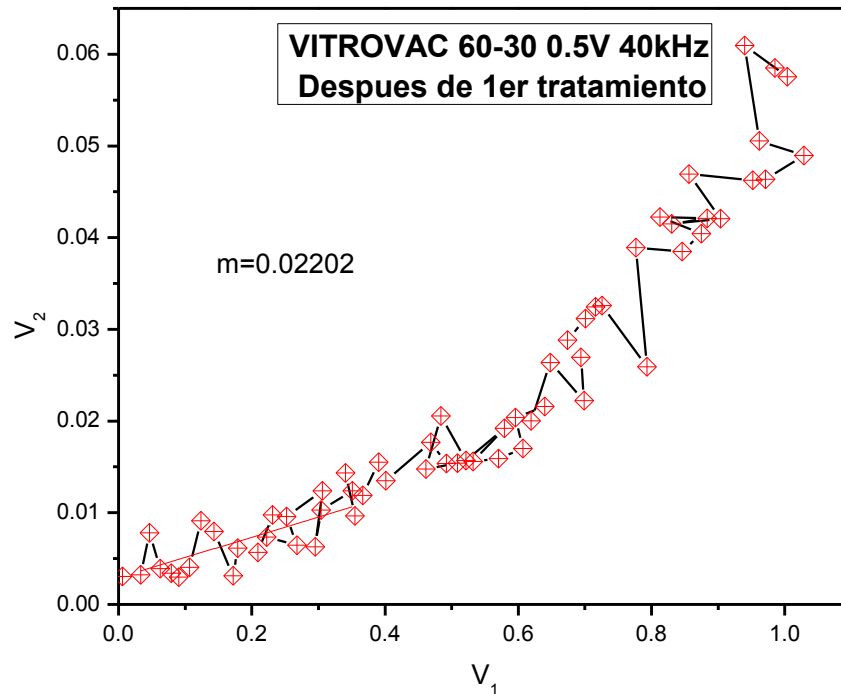


Figura 3.73.- Pendiente obtenida después de realizarse el primer tratamiento térmico a la nueva muestra. Fuente propia.

La transición que se genera al pasar por un segundo tratamiento térmico es la que se muestra en la figura 3.74, para esta medición se utilizó nuevamente un intervalo de 25 a 260°C ya que como en el primer análisis se pensó que al solo limitar la temperatura a 260°C se observaría como empieza a desaparecer la parte amorfo y comienza la parte nanocristalina, sin embargo eso no sucedió.

Lo que ocurrió fue que ya no se observó una caída señalando la T_c de la parte amorfa, sino que la permeabilidad se fue incrementando más y más conforme se aumentaba la temperatura, pero como el límite eran los 260°C ya no se pudo observar la caída de la permeabilidad al llegar a la temperatura máxima.

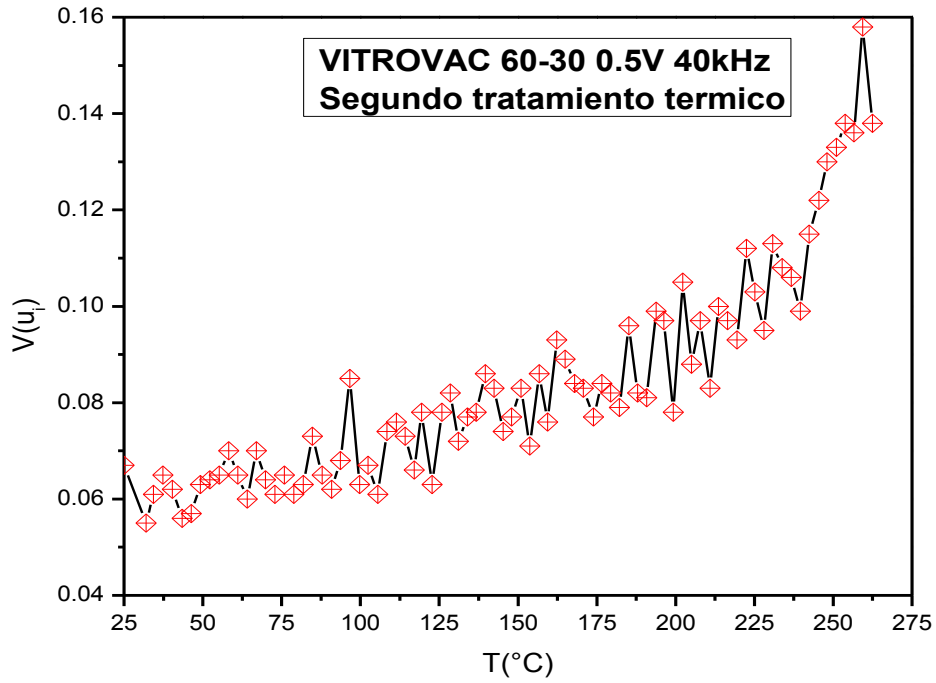


Figura 3.74.- Transición que se produce en el segundo tratamiento térmico de la nueva muestra.
Fuente propia.

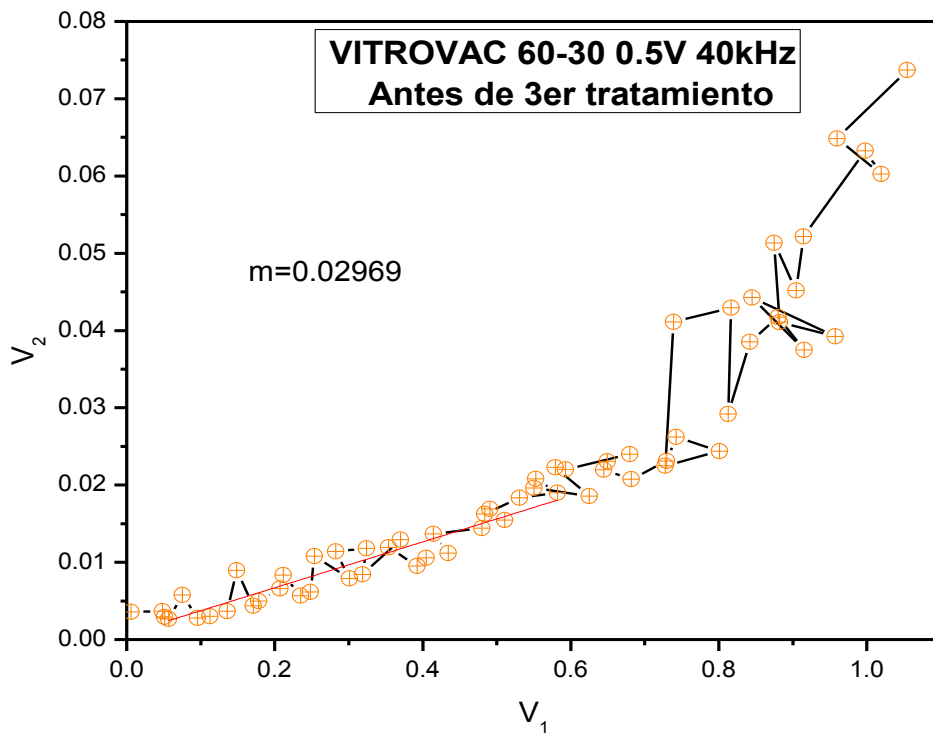


Figura 3.75.- Pendiente obtenida después de realizarse el segundo tratamiento térmico a la nueva muestra. Fuente propia.

Sin embargo se realizó un tercer estudio para observar lo que ocurría al someterse a un tercer tratamiento térmico. Antes de someterse al tratamiento se realizó la determinación de la μ_i después del segundo tratamiento térmico. En la figura 3.75 se muestra la gráfica que se obtuvo la cual generó una pendiente de 0.03 que es muy similar al valor que se obtuvo en la gráfica de la figura 3.73 lo que significa que la cinta ha cambiado por completo sus propiedades originales. Para este análisis la permeabilidad que se calcula tiene un valor de 1,701,704.02.

Posteriormente se realizó el tercer tratamiento térmico el cual generó la transición que se observa en la figura 3.76, donde se midió aproximadamente que la T_c se encuentra por los 353°C.

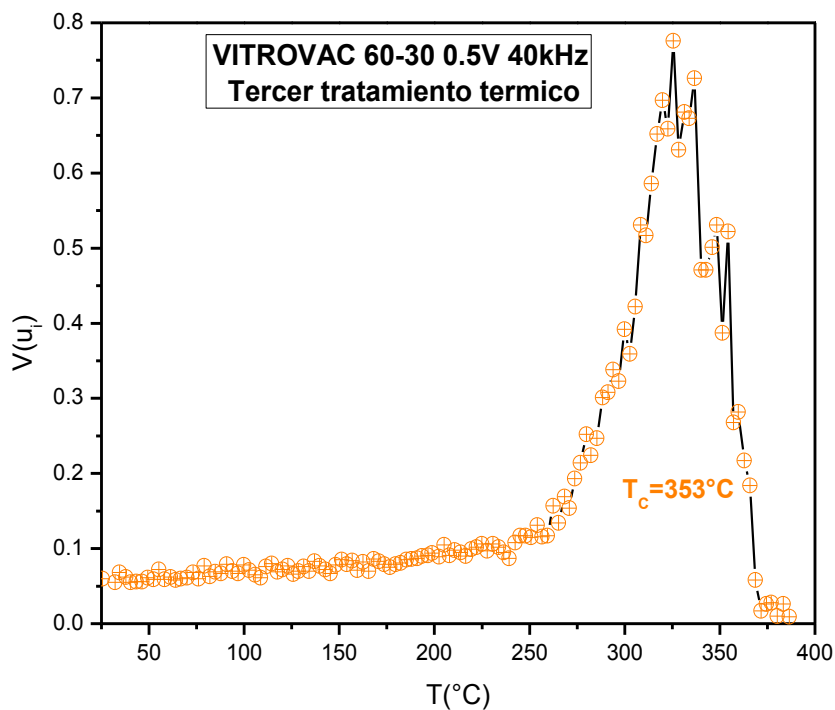


Figura 3.76.- Transición que se produce en el tercer tratamiento térmico de la nueva muestra.
Fuente propia.

Como se observó en los anteriores análisis se restringía el intervalo de temperatura con el fin de observar como desaparecía la parte amorfa del material,

sin embargo se observó que no se notaron esos cambios y que la cinta pierde sus propiedades originales desde los 260°C. Es por eso que en el siguiente análisis se usara un intervalo de 30 a 400°C en los tratamientos térmicos para observar el comportamiento del material y ver si las mediciones concuerdan con las mediciones anteriores y las reales.

Antes de realizarse el primer tratamiento térmico se realizó la determinación de la permeabilidad inicial, donde la gráfica que resulta al usar los parámetros ya utilizados anteriormente es la de la figura 3.77 y origina una pendiente de 0.27 y con este valor se logra calcular la permeabilidad que es de 15,544,599.07.

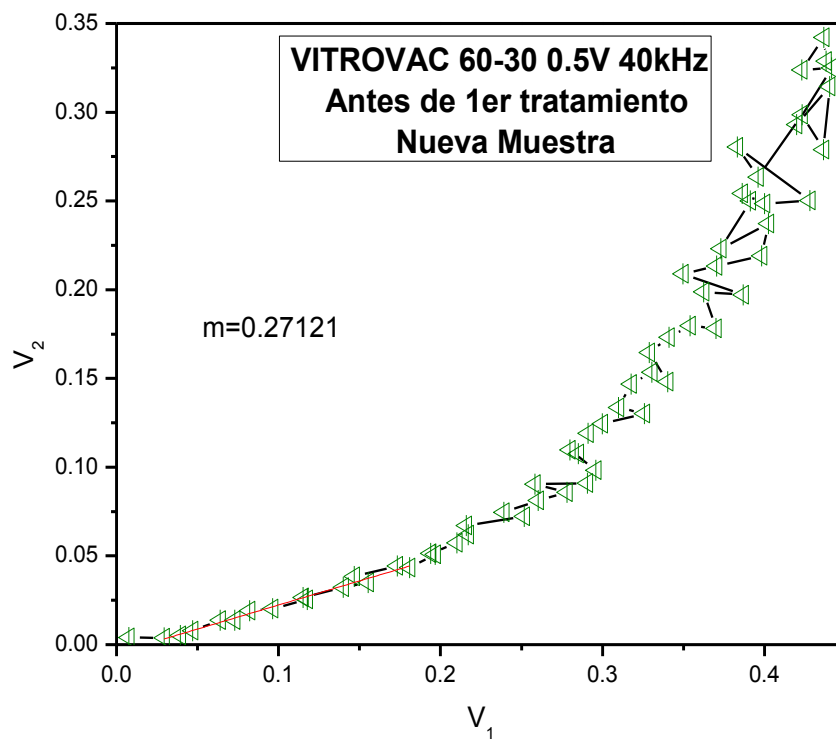


Figura 3.77.- Pendiente obtenida en una nueva muestra antes de realizarle un primer tratamiento térmico. Fuente propia.

La transición que se genera al utilizar este intervalo es la de la siguiente figura, donde se aprecian 2 transiciones que aunque no se ven como las de la figura 3.69

se pueden observar 2 mediciones de T_c , la primera que corresponde a la parte amorfa que esta aproximadamente en los 178°C y la segunda se encuentra por los 328°C . Estas 2 mediciones son muy parecidas a las que se obtuvieron en la figura 3.69.

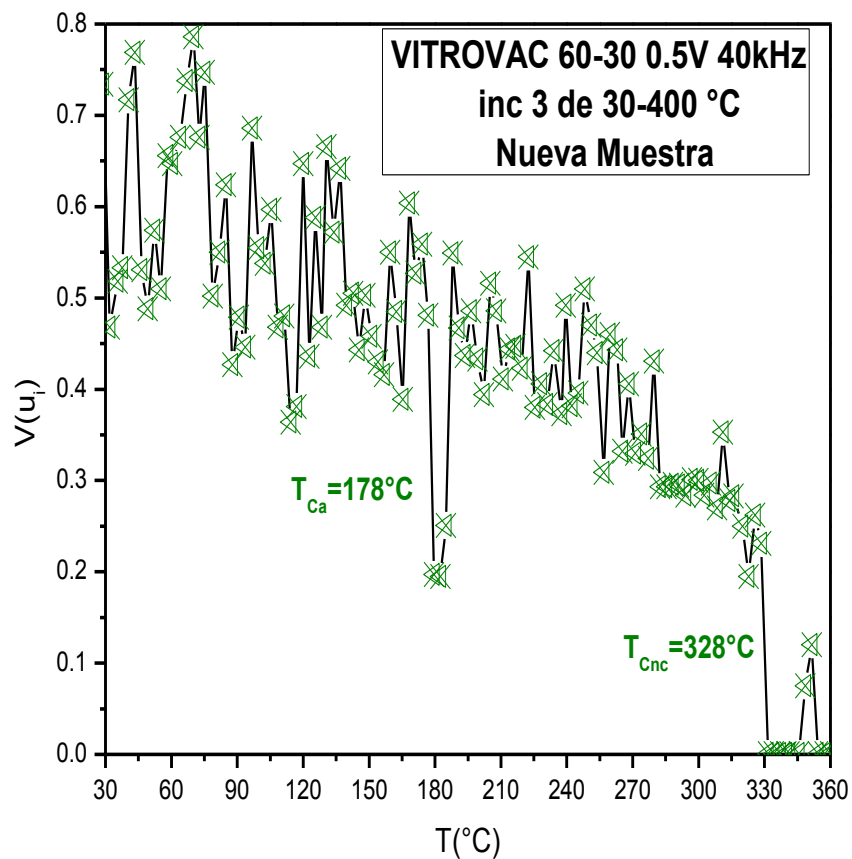


Figura 3.78.- Primer transición que se produce en la nueva muestra. Fuente propia.

Finalmente para colaborar la información de las anteriores mediciones se realizó un segundo tratamiento térmico, pero antes de eso se realizó la determinación de la permeabilidad inicial de la VITROVAC 60-30 después del primer tratamiento térmico.

La grafica que se obtuvo fue la de la figura 3.79 donde se obtiene una pendiente con valor de 0.098 de la región lineal y con ella se calculó la permeabilidad inicial que es de 5,661,647.78.

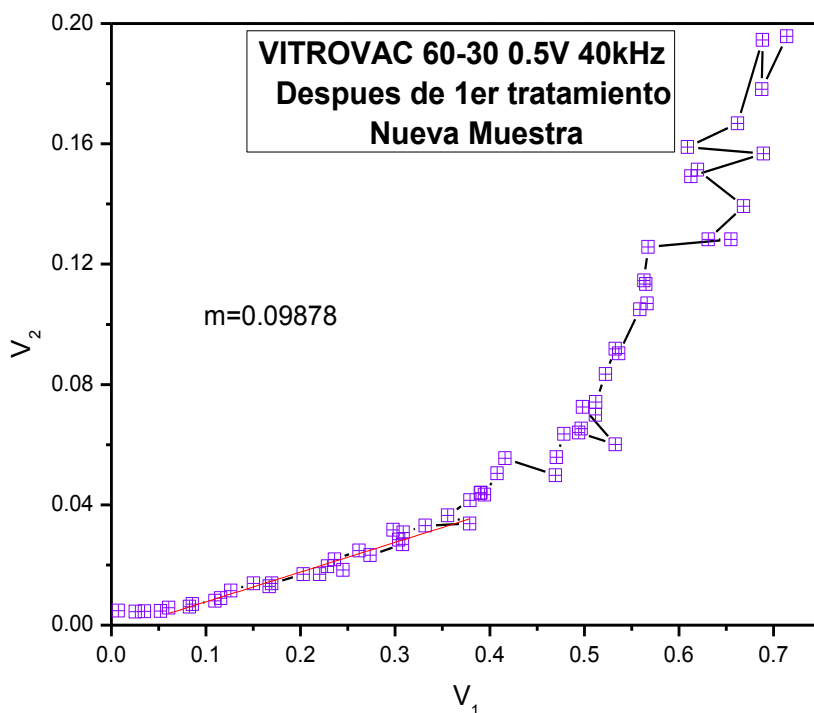


Figura 3.79.- Pendiente obtenida después del primer tratamiento térmico. Fuente propia.

Por último se volvió a tratar térmicamente la muestra para colaborar con el anterior análisis y se obtuvo la transición que se observa en la figura 3.80 donde se puede apreciar que alrededor de los 307°C la cinta pierde sus propiedades ferromagnéticas.

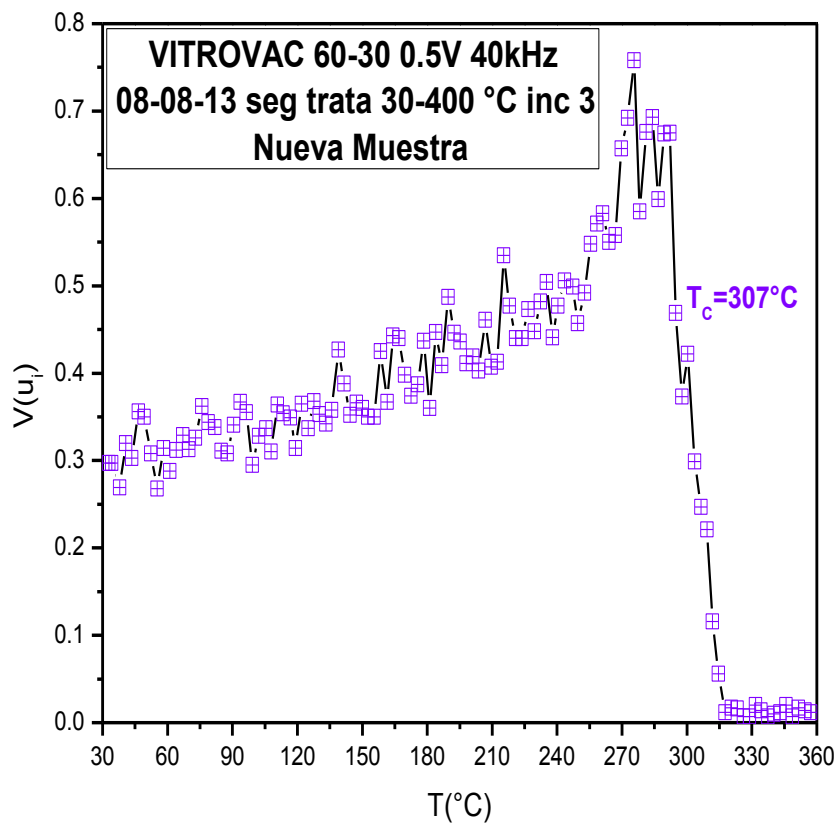


Figura 3.80.- Transición de la tercer muestra de la VITROVAC 6030 en su segundo tratamiento térmico. Fuente propia.

CONCLUSIONES

En esta tesis se determinó la permeabilidad inicial de 4 ferritas comerciales suaves, utilizando la técnica del anillo de Rowland. Los valores de permeabilidad inicial calculados son muy cercanos a los reportados por el fabricante lo cual muestra que el equipo es de alta sensibilidad para determinar la permeabilidad inicial.

Los diferentes parámetros de medición tal como voltaje de excitación y frecuencia pueden dar mayor aproximación al valor real de la permeabilidad inicial. La obtención de la curva de magnetización inicial es una caracterización de gran importancia para los materiales magnéticos suaves dado que brinda información sobre la homogeneidad magnética, la posibilidad de calcular la permeabilidad inicial y en consecuencia determinar si el material magnético es suave o duro.

Con los valores encontrados para determinar la permeabilidad inicial se midió la temperatura de Curie y se encontró que variando los parámetros eléctricos se afecta la transición en el comportamiento de la permeabilidad en función de la temperatura y a diferentes incrementos se cambia el valor de la temperatura de transición. Por lo tanto es de gran importancia el establecer las condiciones experimentales en las cuales se determina la μ_i , para restringir la respuesta en frecuencia de los materiales estudiados a procesos de magnetización reversibles, donde no hay pérdidas de energía. Y establecer si los cambios originados durante la transición son debidos a la muestra o a las condiciones de medición.

El cálculo de la permeabilidad inicial en la cinta magnética amorfa fue complicado, ya que la cinta es magnéticamente más suave y como consecuencia hay una fuerte dependencia de la permeabilidad inicial con el campo de excitación, lo cual implica que se requieren campos magnéticos muy pequeños para lograr una alta magnetización, por lo que con las condiciones que cuenta el equipo se magnetiza

rápidamente el material y no se detecta el comportamiento lineal, empleándose voltajes pequeños de 0.5-1V.

Sin embargo se logró obtener la medición de la temperatura de Curie, la VITROVAC 6030 al ser un material amorfo se cristaliza al pasar por un tratamiento térmico y esto significa que sus propiedades magnéticas cambian. Es de vital importancia saber la temperatura de Curie puesto que de esta propiedad dependen los usos que se le den al material.

Las permeabilidades obtenidas en la aleación amorfa son mucho mayores a las obtenidas en ferritas, cabe señalar que ambos materiales son comerciales.

REFERENCIAS

- [1] D. Jiles, "Introduction to Magnetism and Magnetic Materials" Ed. Chapman and Hall, (1991).
- [2] Valenzuela R. Chemistry of Solid State Materials No. 4 "Magnetic Ceramics", Ed. Cambridge, (1994).
- [3] B. D. Cullity, "Introduction to Magnetic Materials", Ed. Addison-Wesley Publishing Company, (1972).
- [4] P. Weiss, "La variation du Ferromagétisme avec la temperature", Compt. Rend., 143 (1906) 1136-1139.
- [5] C. Kittel, "Introduction to Solid State Physic", Ed. John Wiley and Sons, Nueva York, (1996).
- [6] J. Israel Betancourt, Tesis de Maestría "Propiedades magnéticas en aleaciones nanoestructuradas", IIM-UNAM, (1997).
- [7] H. Montiel, "Nanocrystalización y Estudio a Frecuencia de Microondas en aleaciones Amorfes Ricas en Co", Tesis de Doctorado, IIM-UNAM, México (2004).
- [8].- H. Montiel, B. Valera, E. Mata, Reporte técnico interno CCADET-UNAM No. II-TECC- 2009-014, 2011.
- [9] H. Morrish, "The Physical Principles of Magnetism", Ed. John Wiley and Sons, Inc, (1965).
- [10] R. Hasegawa. J. Mag. Mat. 125-216 (2000) 240-245.