

Estudio de Transiciones de Fase en un Material Ferrimagnético.

*Eduardo Misael Honoré, Pablo Daniel Mininni.
Laboratorio 4- Dpto. de Física -FCEyN- UBA-1996.*

Diferentes características del comportamiento de un material ferrimagnético frente a la temperatura fueron obtenidas a partir del estudio del ciclo de histéresis para temperaturas entre -170°C y 170°C . Se utilizó una muestra de ferrita toroidal con dos bobinados. Se determinó la temperatura de Curie de la muestra ($T_c=130^{\circ}\text{C}$ con error del 4 %) y se realizaron gráficos de magnetización remanente y fuerza coercitiva en función de la temperatura.

I. INTRODUCCIÓN

El estudio del ciclo de histéresis de un material provee la información acerca del comportamiento del mismo frente a campos magnéticos. Usualmente se conoce esta curva para temperaturas fijas. El objetivo de este trabajo es mostrar el comportamiento de una muestra de ferrita a diferentes temperaturas, y la determinación de la temperatura de Curie (T_c) a través de la observación de los ciclos de histéresis.

Los materiales ferromagnéticos y ferrimagnéticos a temperaturas menores que la temperatura de Curie presentan una estructura de dominios microscópicos ($\approx 10^{-5}$ cm) con una magnetización espontánea \mathbf{M} . Los materiales ferrimagnéticos presentan en cada dominio una estructura de spin ordenada que contiene tanto componentes de spin hacia arriba como hacia abajo, a diferencia del ferromagnético en el cual el spin está casi alineado¹.

Cuando se les aplica un campo de intensidad magnética \mathbf{H} los dominios se reordenan produciendo un campo magnético macroscópico que no desaparece al suprimirse el campo. Esto da origen al fenómeno de histéresis. La estructura de estos dominios depende de la temperatura, anulándose \mathbf{M} para temperaturas mayores a T_c .

II. ARREGLO EXPERIMENTAL

Utilizamos un transformador con núcleo toroidal de ferrita con dos devanados de cobre de 100 (N_1) y 200 (N_2) vueltas cada uno. Se conectó el circuito primario a un transformador aislador conectado a red. Sobre la resistencia R_1 se midió una caída de tensión V_1 proporcional al \mathbf{H} . Notar que

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = NI = N \frac{V}{Z} \quad (1)$$

En el secundario se conectó un circuito integrador (ver figura 1).

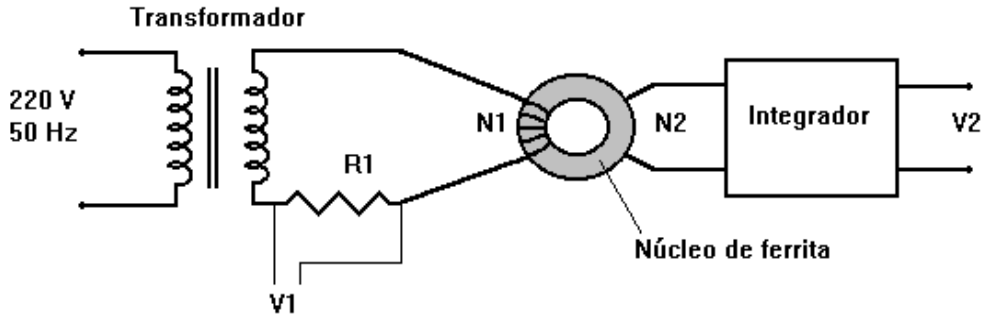


Figura 1: Arreglo experimental

La tensión variable sobre el primario induce una fem (ε) en el secundario proporcional a la variación del flujo (ϕ) según la ley de Faraday

$$\varepsilon = -N_2 \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (2)$$

Así, al integrar la tensión sobre el secundario se obtiene el flujo ϕ que es proporcional a \mathbf{B} y al área de la espira.

Con el fin de obtener la curva de histéresis del núcleo de ferrita para temperaturas mayores que la ambiental sumergimos el núcleo en un baño de aceite. La temperatura del aceite se elevó utilizando un calentador eléctrico hasta 170°C.

Midiendo las tensiones sobre R1 y sobre la salida del integrador se obtuvo la curva de histéresis. Se utilizó un osciloscopio digital para tomar 80 mediciones por ciclo, lo que da un intervalo de tiempo entre muestras de 0,25 ms. Este valor fue tomado como orden de error de las mediciones del tiempo.

Luego se dejó enfriar el aceite repitiendo las mediciones para temperaturas fijas a intervalos regulares, de acuerdo al siguiente esquema:

- intervalos de 5°C: entre los 170°C y los 30°C
- intervalos de 10°C: entre los 100°C y los 30°C

Para temperaturas inferiores a la del ambiente sumergimos el núcleo en aire líquido ($T \approx -170^\circ\text{C}$). En la superficie del aire líquido existe un gradiente de temperatura. Aprovechando este hecho se ubicó el toro de ferrita en diferentes alturas sobre la interfase hasta completar las mediciones a intervalos de 10°C.

III. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En las figura 2 y 3 se observan las curvas de histéresis obtenidas para temperatura ambiente y para $T=100^\circ\text{C}$.

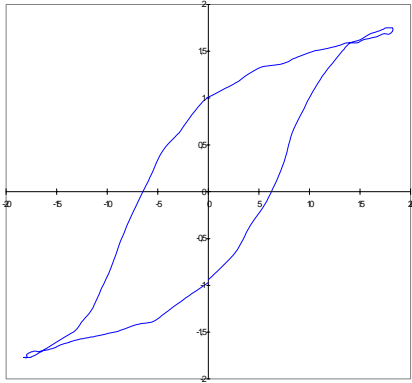


Fig. 1: Curva de histéresis para temperatura ambiente.

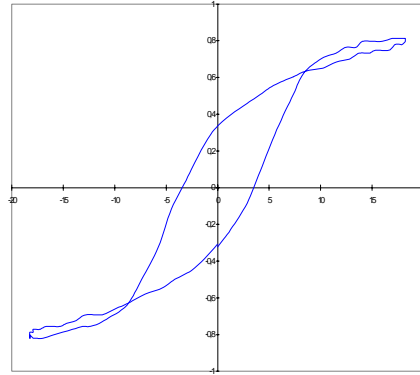


Fig. 2: Curva de histéresis para T=100°C

En ambas curvas puede apreciarse un *loop* en sus extremos. Interpretamos este fenómeno como un desfase entre las señales del primario y el secundario. El desfase encontrado en las mediciones para las diferentes temperaturas puede observarse en la figura 4*. El máximo desfase (≈ 1 ms) se observa para temperaturas mayores que el ambiente, mientras que en las bajas temperaturas no hay desfase apreciable. Debe recordarse que el error en la medición del tiempo es de 0.25 ms.

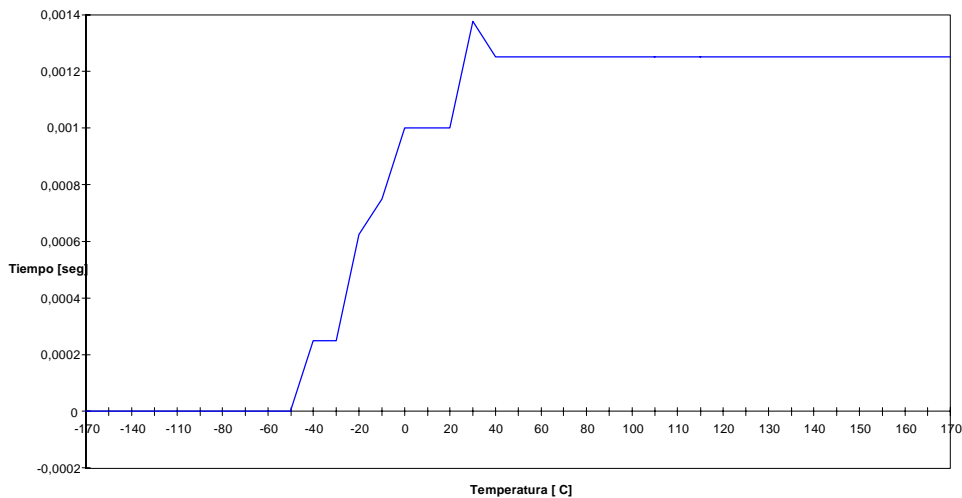


Fig. 4: Desfase en función de la temperatura

Además existe una componente continua en la salida del integrador que no se encuentra en la salida del secundario. Esta componente es agregada por el integrador, y se eliminó calculando la transformada rápida de Fourier de la señal.

Eliminando la componente continua y antitransformando se puede obtener la señal filtrada; sin embargo este método podría inducir errores difíciles de acotar. Por ello se antitransformó solo la componente continua y se la restó a la señal original..

El desfase se eliminó desplazando las mediciones de tensión V1 respecto a las de V2 en sentido contrario y con módulo igual al desfase calculado para cada temperatura.

* Para los detalles sobre el cálculo del desfase para cada temperatura ver el Apéndice.

En las figuras 5 a 8 se observan los ciclos de histéresis para las diferentes temperaturas*

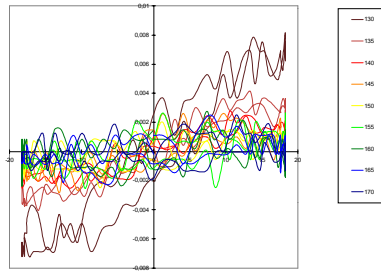


Fig. 5: Curvas de histéresis para $T=170^{\circ}\text{C}$ hasta $T=130^{\circ}\text{C}$. Se observa el aumento del campo B al disminuir la temperatura.

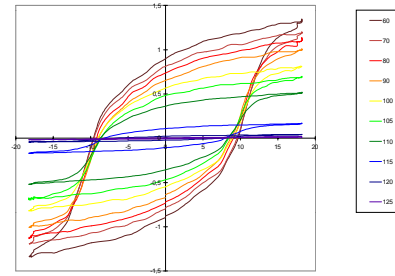


Fig. 6: Curvas de histéresis para $T=125^{\circ}\text{C}$ hasta $T=60^{\circ}\text{C}$. B aumenta al disminuir la temperatura.

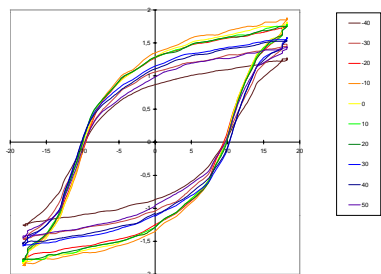


Fig. 7: Curvas para $T=50^{\circ}\text{C}$ hasta $T=-40^{\circ}\text{C}$. B alcanza un máximo y luego decrece con la temperatura.

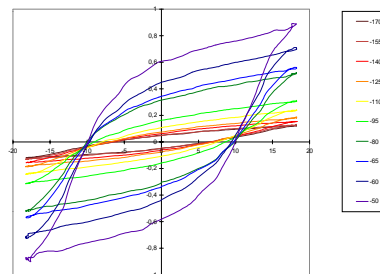


Fig. 8: Curvas para $T=-50^{\circ}\text{C}$ a $T=-170^{\circ}\text{C}$. B decrece con T .

Se condensó toda la información obtenida en un gráfico HBT donde se representa la ‘superficie de histéresis’² generada por la parte superior del ciclo en función de la temperatura (figura 9). Puede notarse que para las temperaturas extremas la intensidad

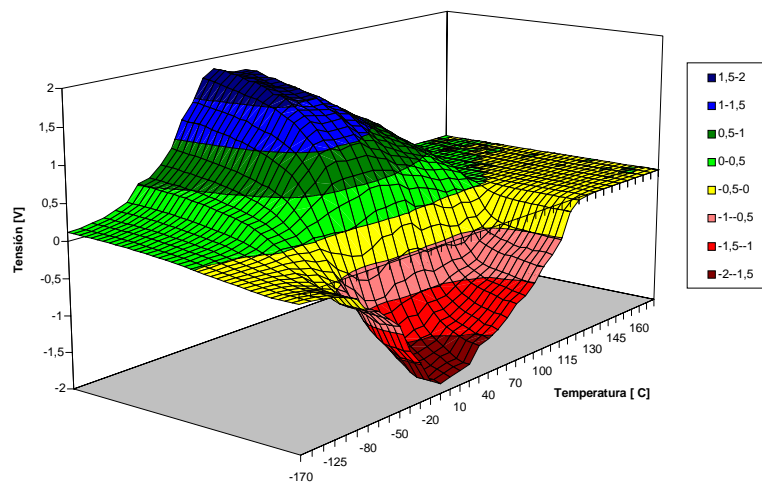


Figura 9: Superficie HBT

* No tenemos mediciones en el rango de temperaturas de $T=-70^{\circ}\text{C}$ a $T=-160^{\circ}\text{C}$ por hallarse dichas temperaturas fuera del rango de la termocupla.

del campo \mathbf{B} disminuye sensiblemente.

Se define la magnetización remanente como el valor del campo magnético \mathbf{B} en el material cuando \mathbf{H} se anula. En la figura 10 se observa la magnetización remanente en función de la temperatura. En estos gráficos se distingue una temperatura para la cual el campo \mathbf{B} cae abruptamente. Esta es la temperatura de Curie.

Se determinó la temperatura de Curie $T_c = (130 \pm 5)^\circ\text{C}$. Para temperaturas más altas no se distingue el ciclo de histéresis (ver fig. 4) y la ferrita se comporta como un material paramagnético. Para temperaturas menores el magnetismo remanente es no nulo, y la ferrita se comporta como un imán permanente en ausencia de campos externos.

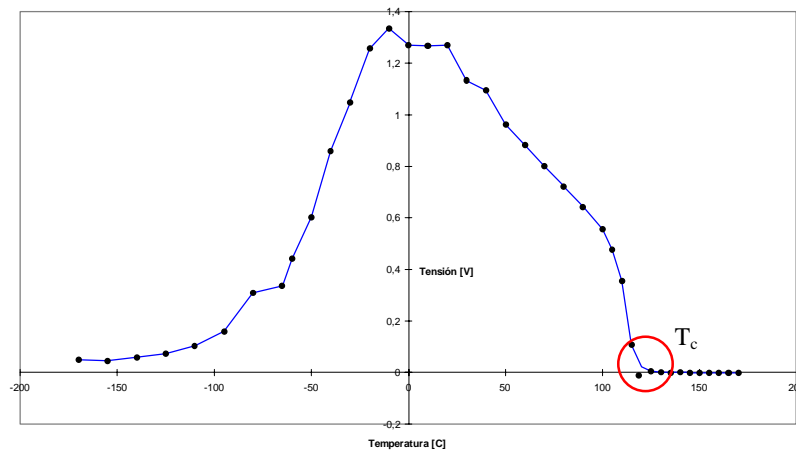


Figura 10: Magnetización remanente en función de la temperatura.

IV. CONCLUSIONES

El desfase observado entre la tensión de entrada y de salida depende de la temperatura como se observa en la figura 4. Esto nos conduce a pensar que el desfase no es causado por el circuito integrador sino que está relacionado con el comportamiento de la ferrita. Una explicación simple puede obtenerse sabiendo que el núcleo de ferrita introduce una componente resistiva R_n que varía con la temperatura, comportándose en forma lineal para temperaturas cercanas a T_c y disminuyendo con la temperatura³. Así, la tensión medida en el primario no está dada por

$$I = \frac{V}{R + j\omega L} \quad (3)$$

sino por

$$I = \frac{V}{R + R_n(T) + j\omega L} \quad (4)$$

El error en la escala de tiempos no permite una apreciación más detallada del desfase en función de la temperatura (ver figura 4).

En las figuras 8 y 9 puede observarse un comportamiento diferente de la ferrita respecto al esperado para materiales ferromagnéticos en las bajas temperaturas. En estos la

magnetización aumenta al disminuir la temperatura, teniendo un valor máximo no nulo en los 0°K ⁴. Para las ferritas se observa que la intensidad del campo **B** disminuye apreciablemente al bajar la temperatura.

Para examinar el comportamiento de R_n y del desfase podría repetirse el experimento para diferentes frecuencias. Además esto puede brindar información respecto a los tiempos característicos de alineación de los dominios y su dependencia con la temperatura.

También se podría variar la tensión en el primario para incluir en el estudio el comportamiento en la región de saturación.

Otra forma alternativa de medir la temperatura de Curie es midiendo la resistividad de la muestra en función de la temperatura³. Esto brindaría información adicional para verificar la hipótesis realizada acerca del desfase.

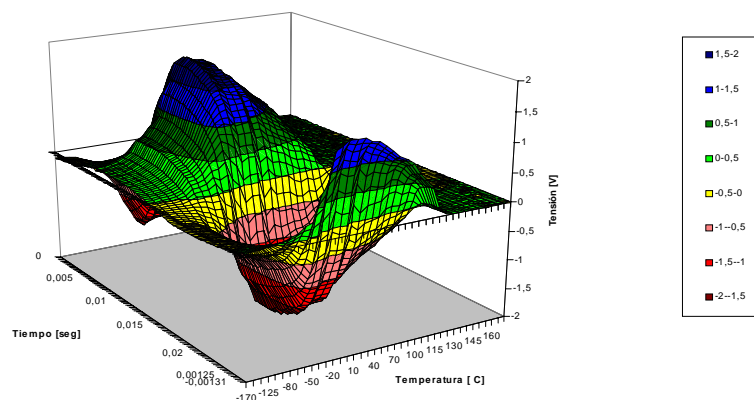
Bibliografía

- 1 Reitz, Milford y Christy, *Fundamentos de la teoría electromagnética*, Addison Wesley, Tercera edición, 1986.
- 2 Barnes G., *The three-dimensional hysteresis surface for nickel*, Am. J. Phys., Vol 56, No 1, January 1988 Pages 45-48.
- 3 Fox J. N., Gaggini N., Eddy J., *A study of the phase transition of a ferromagnetic material*, Am. J. Phys., Vol 54, No. 8, August 1986 Pages 723-726.
- 4 Kittel, *Introduction to Solid State Physics*.

APÉNDICE: Determinación del Desfase

Para encontrar el desfase para cada temperatura se utilizaron dos criterios:

- (i) En las curvas de histéresis no debería observarse el *loop* en los extremos.
- (ii) Para temperaturas menores que la de Curie la función $\mathbf{B}=\mathbf{B}(\mathbf{H},\mathbf{T})$ o la función $\mathbf{V}2(\mathbf{T},\mathbf{t})$ (ver figura) debería ser suave.



Utilizando (i) se calculó una primera aproximación al desfase, introduciendo un desfase con sentido contrario (múltiplo del intervalo entre las mediciones: 0,25 ms) hasta que el *loop* desapareciera.

Luego se realizó un ajuste más fino utilizando (ii) con el mismo procedimiento. El desfase obtenido para cada temperatura se puede observar en la figura 4.