

# Determinación de la temperatura de Curie del monel

Sofía Correa\*, Juan Octavio Castro\*\*

Laboratorio 4 - Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (UBA)

## Resumen

Se analizó el comportamiento de un material ferromagnético al someterlo a un campo magnético externo a partir del estudio del ciclo de histéresis para temperaturas entre 84 K y 276 K. Además, se estudió la magnetización remanente en función de la temperatura para determinar la temperatura de Curie.

## 1 INTRODUCCIÓN

---

Los objetivos de este trabajo fueron mostrar el comportamiento de la magnetización de un material ferromagnético (se usó una muestra de monel) en un rango de temperaturas entre 84 K y 276 K, y determinar la temperatura de Curie ( $T_c$ ) a través de la observación de los ciclos de histéresis para distintas temperaturas.

Los materiales ferromagnéticos a temperaturas menores que  $T_c$  presentan una estructura en la que pequeñas regiones de volúmenes tienen sus dipolos alineados, como se muestra en la primera imagen de la figura 1. Cada una de estas regiones, llamadas dominios, se comportan como un imán permanente. Si no hay campo magnético externo estos dominios tienen en general orientaciones al azar cancelándose de esta manera los efectos magnéticos microscópicos.

En presencia de un campo magnético externo los dominios de un material ferromagnético se orientan en la misma dirección que el campo aplicado,

---

\*soficorrea98@gmail.com

\*\*joctavio287@gmail.com

como se puede observar en la figura 1. Si se remueve el campo externo, los dominios no vuelven a su estado original sino que permanecen con una magnetización remanente  $M_r$ , dando lugar al fenómeno de histéresis. A su vez, el valor de  $M_r$  cambia según la temperatura y se anula para temperaturas mayores a  $T_c$ . Es decir, para temperaturas mayores a la de Curie el material ferromagnético pierde su magnetización.

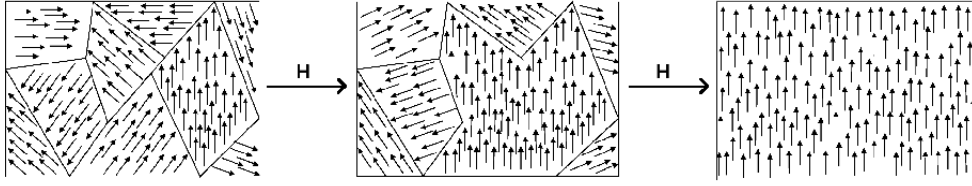


Figura 1: dominios de un material ferromagnético alineándose debido a la presencia de un campo magnético externo  $H$ . [5]

La curva de histéresis se construye con el campo externo  $H$  en el eje horizontal y el campo magnético  $B$  en el eje vertical. Estas dos magnitudes se relacionan entre sí a través de la ecuación 1. Notar que cuando  $H$  es cero, el campo magnético  $B$  queda proporcional a la magnetización remanente  $M_r$ .

$$H = \frac{B}{\mu_0} - M \implies M_r = \frac{B_r}{\mu_0} \quad (1)$$

Para obtener el valor de la temperatura de Curie del monel se utilizó que para temperaturas menores a  $T_c$  el valor de la magnetización remanente  $M_r$  tiene un comportamiento que puede describirse por la siguiente relación empírica.

$$M_r(T) \propto |T - T_c|^g. \quad (2)$$

## 2 DESARROLLO EXPERIMENTAL

---

El dispositivo experimental utilizado para caracterizar el monel fue un transformador diferencial que consistía en un bobinado primario dentro del cual se colocaron dos bobinados secundarios en serie y en contrafase. La muestra de monel se introducía en una de estas bobinas. El hecho de que estas estuvieran conectadas en contrafase hacía que el campo magnético fuera

cero en ausencia del material ferromagnético.

Para recrear la curva de histéresis del material, era necesario medir el campo externo  $H$  y el campo magnético  $B$  dado en la ecuación 1. Al alimentar el primario con una tensión variable (corriente alterna) se generaba un campo  $H$ . Este campo resultaba proporcional a la corriente que pasaba por el primario ( $I_1$ ), debido a la ley de Ampere, y a su vez a la caída de tensión ( $V_1$ ), por la ley de Ohm

$$H \propto I_1 \propto V_1.$$

Al mismo tiempo el campo  $H$  inducía una  $fem$  en el secundario que resultaba proporcional a la variación del flujo del campo magnético  $B$

$$fem \propto \frac{d\phi_B}{dt}.$$

A partir de esta relación se puede ver que la integral de la  $fem$  resulta proporcional al campo magnético  $B$ .

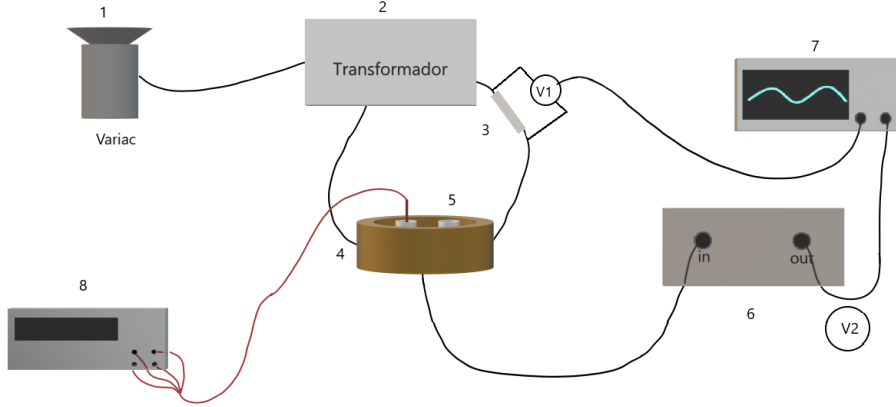


Figura 2: esquema del armado experimental utilizado. 1) Autotransformador variac, 2) Transformador reductor aislado de relación 220-36 V, 3) Resistencia de  $(2,3 \pm 0,1)\Omega$  sobre la cual se mide la caída de tensión  $V_1$ , 4) Bobina del primario, 5) Bobinas del secundario dispuestas en contrafase, 6) Circuito integrador del cual sale la señal  $V_2$ , 7) Osciloscopio Tektronix TDS 1002B, 8) Multímetro de banco (Agilent HP 34401A) conectado a una resistencia de platino Pt100 en contacto con la muestra de monel.

El armado experimental se puede ver en la figura 2. Para alimentar al primario se utilizó la tensión de línea pero no directamente. Primero, se conectó un variac, que permitió regular el voltaje de entrada. Este a su vez estaba conectado a un transformador reductor aislado de relación 220-36 V.

Para obtener la señal  $V_1$  se midió la caída de tensión de una resistencia conectada en serie con el transformador utilizando el canal 1 del osciloscopio. Al mismo tiempo se conectó el circuito integrador a la salida del secundario, para así obtener una señal  $V_2$  que fuera proporcional a  $B$ , que se registró en el canal 2 del osciloscopio. De manera que graficando las tensiones del canal 1 y 2 se pudo representar la curva de histéresis.

Para la determinación de la temperatura de la muestra de monel se la colocó en contacto térmico con una resistencia comercial de platino (PT100) cuyo valor se midió con el método de cuatro terminales utilizando el multímetro de banco.

El proceso de medición consistió en colocar la muestra de monel dentro de nitrógeno líquido para que su temperatura estuviera por debajo de la temperatura de Curie. Inmediatamente después se ubicaba la muestra dentro de una de las bobinas del secundario y se la dejaba en reposo mientras su temperatura aumentaba. Durante este proceso se registró las caídas de tensión de ambos canales y la temperatura del monel para graficar las curvas de histéresis y, así determinar la magnetización remanente.

### 3 PROCESAMIENTO DE DATOS Y RESULTADOS

---

A lo largo de todo el fenómeno de transición del material se tomaron mediciones sobre la temperatura (entre 84 K y 276 K) y las tensiones del primario ( $V_1$ ) y el secundario ( $V_2$ ) del transformador. A cada temperatura le fue asociada una captura de las señales de ambos canales registradas por el osciloscopio (tensión en función del tiempo). Para cada una de estas temperaturas se graficó la tensión del primario contra la tensión del secundario asumiendo que el desfase entre ambas señales era despreciable. En la figura 3 se puede ver la construcción de la curva de histéresis para la medición asociada a 96 K.

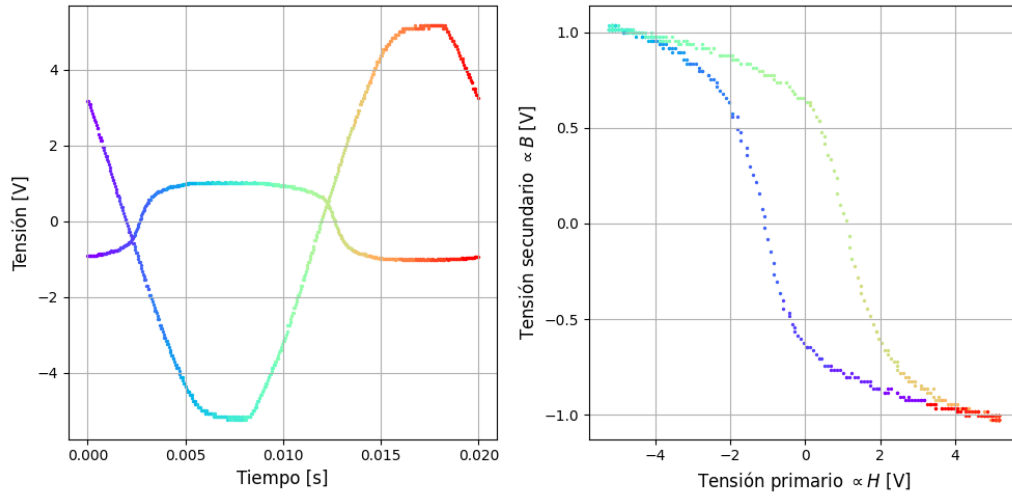


Figura 3: construcción de la curva de histéresis para 96 K. Del lado izquierdo se ven las señales del primario y el secundario (ésta última de menor amplitud). Del derecho se ven ambos canales, el primero en el eje horizontal y el segundo en el eje vertical. El código de colores indica cómo se construye la curva de histéresis.

Sobre cada medición se realizó un proceso de suavizado aplicando un filtro Savitzky–Golay de orden cero. La aplicación de este filtro fue utilizada debido a que las mediciones del canal del secundario no tenían la resolución suficiente como para construir una curva de histéresis que este bien definida.

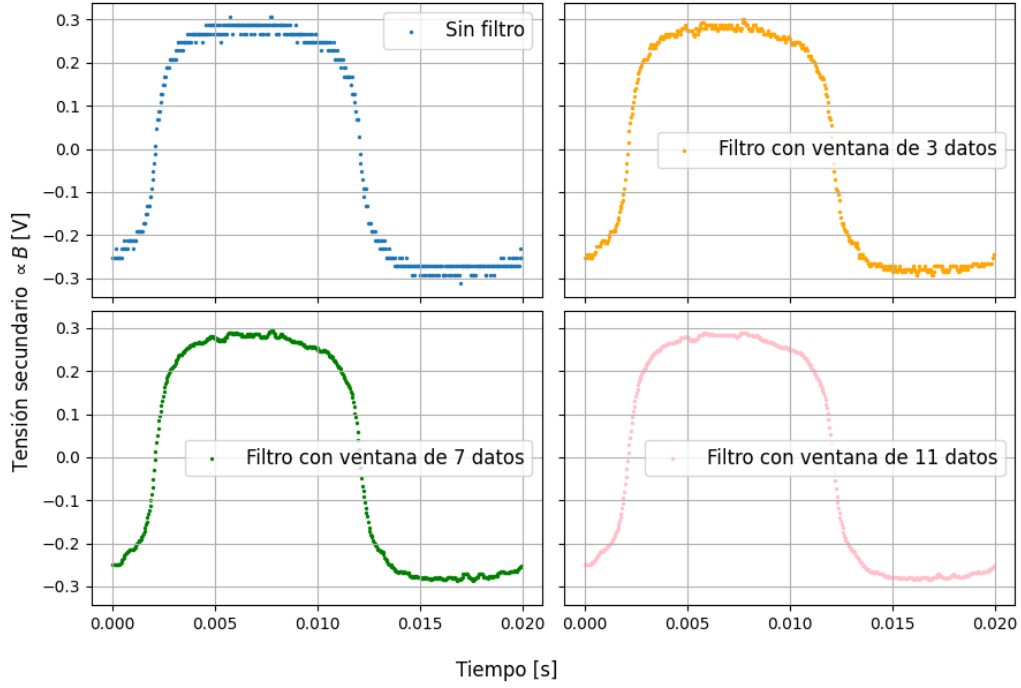


Figura 4: aplicación del filtro Savitzky–Golay sobre la señal del secundario para 251 K. De izquierda a derecha la ventana de promediado aumenta.

Un hiperparámetro de este filtro es la ventana de datos sobre la cual se promedia cada punto de la señal. Por ejemplo, una ventana de tamaño  $n$  implica promediar sobre los  $n$  datos que se encuentran inmediatamente a la derecha y a la izquierda del dato en cuestión. El tamaño de la ventana se determinó en base a una observación visual de la curva de histéresis (ver figuras 4 y 5).

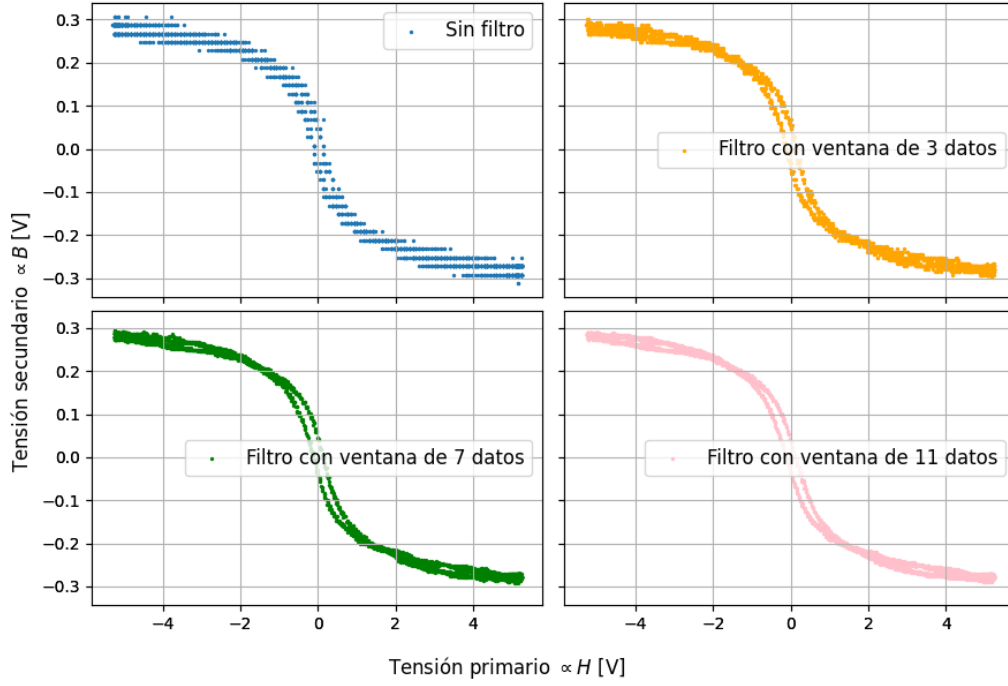


Figura 5: aplicación del filtro Savitzky–Golay para ambos canales en la medición tomada a 251 K. De izquierda a derecha la ventana de promediado aumenta.

El proceso de suavizado antes descrito se realizó sobre todas las mediciones. En la figura 6 se puede ver cómo varía la curva de histéresis conforme aumenta la temperatura del monel. Cuando la temperatura aumenta, la curva de histéresis se aplanan, lo cual indica que el material pierde sus propiedades magnéticas. En el caso culmine el campo B, que es proporcional a la tensión del secundario, es prácticamente nulo.

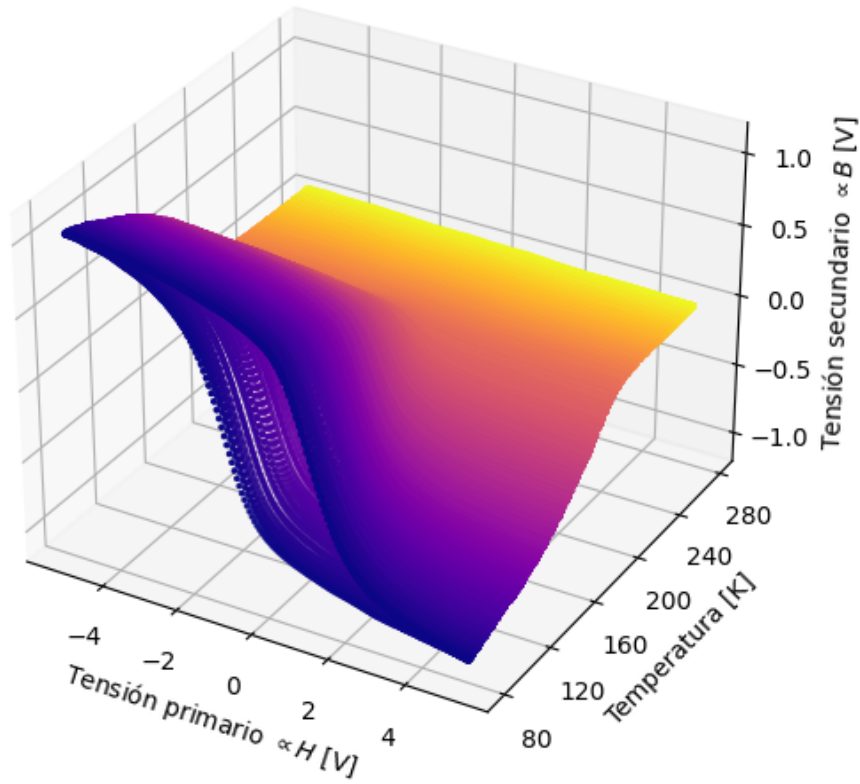


Figura 6: variación de la curva de histéresis conforme aumenta la temperatura.

En la figura 7 se puede ver cómo se determinó la magnetización remanente. Acorde a la ecuación 1, cuando la tensión del primario se anula, la magnetización es proporcional al campo remanente ( $B_r$ ) que es a su vez, proporcional a la tensión del secundario.



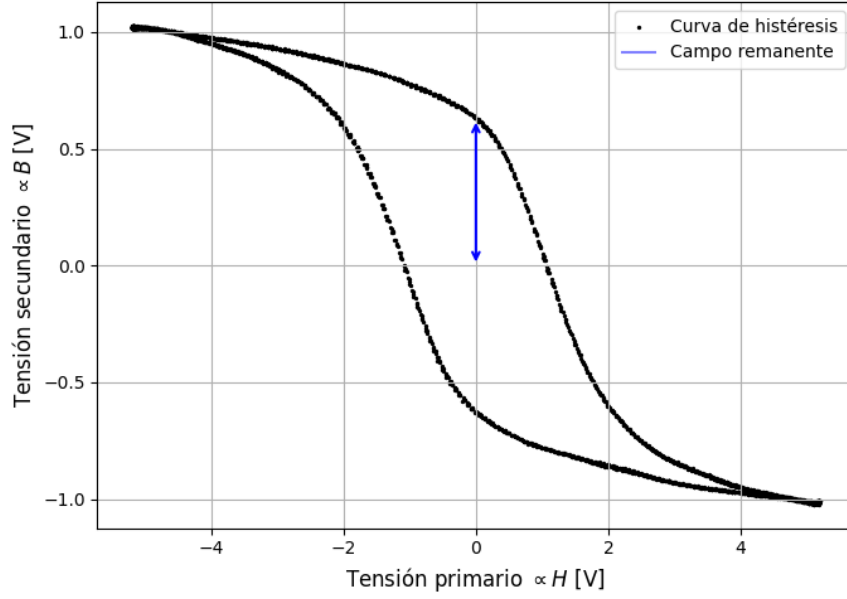


Figura 7: campo remanente para la curva de histéresis a 96 K.

Una vez obtenida la magnetización remanente para cada una de las temperaturas se realizó un gráfico con el fin de determinar, por medio de un ajuste no lineal, la temperatura de Curie.

La función utilizada para determinar las cantidades de interés fue la siguiente

$$M_r(T) = \begin{cases} C & \text{si } T \geq T_C \\ A|T - T_C|^g + C & \text{si } T < T_C \end{cases} \quad (3)$$

donde  $A$ ,  $C$ ,  $T_C$  y  $g$  fueron los parámetros determinados por el ajuste. Al modelo propuesto en la ecuación 2 se le sumó un off-set  $C$  que se puede apreciar en los datos que se muestran en la figura 8. Éste off-set pudo deberse a que las últimas mediciones de la tensión del secundario eran comparables con el error. Inclusive, para temperaturas mayores a los 256 K, las mediciones tienen errores relativos todavía mayores a uno, es decir, que los errores son más grandes que las mismas mediciones.

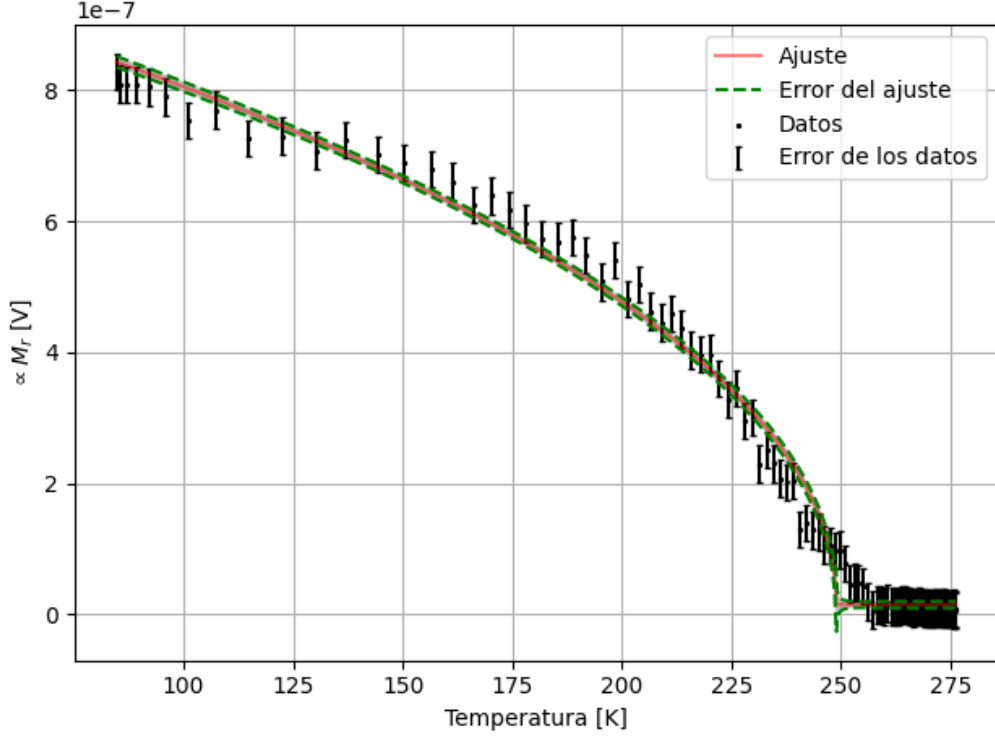


Figura 8: magnetización remanente en función de la temperatura. El ajuste de los datos fue realizado acorde a la función 3. El coeficiente de determinación del ajuste es  $R^2 = 0,99$ . Los valores estimados por el modelo son:  $T_C = (248,9 \pm 0,4) K$ ;  $A = (7,1 \pm 0,4) 10^{-8}$ ;  $g = (0,48 \pm 0,01)$  y  $C = (1,5 \pm 0,4) 10^{-8} V$ .

En la figura 8 se puede observar que el modelo ajusta considerablemente bien los datos ya que  $R^2 = 0,99$ . Sin embargo, esta no es información suficiente para garantizar que el modelo planteado sea consistente con los datos obtenidos. Por esta razón, con el fin de aumentar el nivel de confianza en el ajuste, se realizó un test de hipótesis bajo la asunción de que los datos siguen una distribución normal cuya esperanza viene dada por la función 3. Para ello se seleccionó el siguiente estadístico

$$T = \sum_{i=1}^{N=100} \frac{y_i - f(x_i)}{\sigma_i} \quad (4)$$

que, bajo la hipótesis nula antes propuesta, sigue una distribución  $\chi^2_{N-4}$  cuya esperanza y sigma vienen dadas por

$$E[T] = N - 4 = 96 \quad \sigma_T = \sqrt{2 * (N - 4)} = 13,85.$$

El valor experimental obtenido para el estadístico fue de  $T_{exp} = 95,68$  que se encuentra considerablemente cerca del valor esperado. En base a dicho estadístico y teniendo en cuenta que el valor obtenido se encuentra por debajo de la esperanza (ver figura 9), se calculó el p-valor a cola izquierda, es decir, la probabilidad de obtener un valor igual o menor al medido

$$p_{valor} = \int_0^{T_{exp}} f_T(t') dt' = 0,51.$$

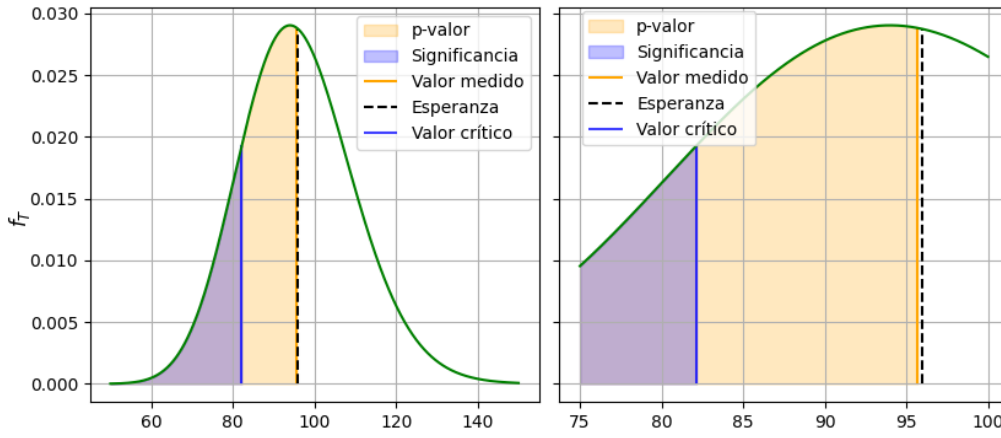


Figura 9: distribución del estadístico de la ecuación 4. Se puede apreciar que el valor medido se encuentra dentro de los valores esperados.

En base a los resultados obtenidos, si se fija un valor crítico en  $E[T] - \sigma_T$ , la significancia resulta 0,16 por lo que al ser el p-valor mayor que éste la evidencia no es suficiente como para rechazar la hipótesis nula.

## 4 CONCLUSIONES

Luego de analizar suficientes mediciones se concluye que se puede determinar la temperatura de Curie a partir del análisis del ciclo de histéresis a lo largo de un rango de temperaturas entre 84 K y 276 K.

Es importante notar que a la hora de suavizar las señales adquiridas por medio del filtro Savitzky-Golay se estimó únicamente la ventana de promediado a través de una estimación visual. Sería conveniente utilizar un criterio más riguroso para determinar la ventana de promediado y el orden polinómico del filtro (que en este caso estaba fijo en 0).

Por último, algo que podría llegar a mejorar la resolución del canal secundario, prescindiendo así del filtro, sería tomar mediciones del mismo sin hacerlas pasar por un circuito integrador; sino integrando la señal numéricamente después de haberla adquirido. De esta manera, la amplitud de la señal sería comparable con la del primario la cual tenía una resolución considerablemente mejor.

## 5 REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] P. Feynman, R. B. Leighton y M. Sands, The Feynman Lectures on Physics, Vol. 2, ed. bilingüe, Fondo Educativo Interamericano, E.E.U.U (1972). Cap. 37.
- [2] C. Kittel, Introduction to Solid State Physics, 6a edición, John Wiley and Sons, New York (1986).
- [3] W. D. Callister, Materials Science and Engineering, J. Wiley and Sons, New York (1994).
- [4] C. S. Lue, A Direct Method for Viewing Ferromagnetic Phase Transition, The Physics Teacher 32 (1995) 304.
- [5] Imagen obtenida de <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dominios.png>. Preparada por Jose Lloret y Alicia Forment, y liberada bajo la GFDL.

## 6 AGRADECIMIENTOS

---

Se agradece a María José Godas Willems y a Joaquín Nahuel Bravo que brindaron los datos de las mediciones para realizar el análisis experimental a partir del cual se realizó este trabajo.