

**RESPUESTA DE IMPEDANCIA DE LAS CINTAS
AMORFAS $\text{Fe}_{70}\text{Nb}_{10}\text{B}_{20}$ Y $[(\text{Fe}_{50}\text{Co}_{50})_{75}\text{B}_{20}\text{Si}_5]_{96}\text{Nb}_4$
OBTENIDA POR MEDIO DE LA RESONANCIA DE UN
PEQUEÑO SOLENOIDE**

**IMPEDANCE RESPONSE OF THE AMORPHOUS RIBBONS
 $\text{Fe}_{70}\text{Nb}_{10}\text{B}_{20}$ AND $[(\text{Fe}_{50}\text{Co}_{50})_{75}\text{B}_{20}\text{Si}_5]_{96}\text{Nb}_4$ OBTAINED BY
RESONANCE OF A SMALL SOLENOID**

Manuel A. Clavijo^{*}, Andrés Rosales, Nicolás A. Salazar

Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Laboratorio de Magnetismo y Materiales Avanzados, Sede Manizales, Colombia.

(Recibido: feb./2024. Aceptado: ene./2025)

Resumen

En este trabajo, presentamos un estudio de la respuesta de la impedancia longitudinal de muestras de los vidrios metálicos $\text{Fe}_{70}\text{Nb}_{10}\text{B}_{20}$ y $[(\text{Fe}_{50}\text{Co}_{50})_{75}\text{B}_{20}\text{Si}_5]_{96}\text{Nb}_4$ mediante el uso de la resonancia de un solenoide pequeño. Las medidas de impedancia longitudinal en función de la frecuencia se realizaron en el rango de $0 < f < 30$ MHz para campos magnéticos de $H_{DC} = 0, 5, 10, 20, 30$ y 40 Oe a temperatura ambiente. Las curvas obtenidas presentan incrementos en la amplitud de los picos de impedancia en torno a la región de resonancia del solenoide. Con base en esto, se propone un circuito equivalente y un ajuste polinómico generado por inteligencia artificial (IA) para modelar la respuesta de impedancia de estos sistemas.

Palabras clave: materiales magnéticos blandos, vidrios metálicos, impedancia, efecto piel, resonancia ferromagnética.

* maclavijoc@unal.edu.co

doi: <https://doi.org/10.15446/mo.n71.112866>

Abstract

In this work, we present a study of the longitudinal impedance response of samples of the metallic glasses Fe₇₀Nb₁₀B₂₀ and [(Fe₅₀Co₅₀)₇₅B₂₀Si₅]₉₆Nb₄ by using the resonance of a small solenoid. Longitudinal impedance measurements as a function of frequency were performed in the range $0 < f < 30$ MHz for DC magnetic fields $H_{DC} = 0, 5, 10, 20, 30$ and 40 Oe at room temperature. The curves obtained show increases in the amplitude of the impedance peaks around the solenoid resonance region. Based on this, an equivalent circuit and a polynomial adjustment generated by artificial intelligence (AI) are proposed to model the impedance response of these systems.

Keywords: soft magnetic materials, metallic glasses, impedance response, skin effect, ferromagnetic resonance.

1. Introducción

Desde la década del 90 se ha observado experimentalmente que algunos materiales magnéticos blandos basados en aleaciones del grupo de transición, como los denominados vidrios metálicos, presentan un gran aumento en la impedancia (hasta 600 % de cambio relativo para frecuencias cercanas a 1 MHz) cuando por ellos fluye una corriente AC y son expuestos a pequeños campos magnéticos DC del orden de 10–100 Oe. Este fenómeno fue denominado magneto impedancia gigante (GMI, por sus siglas en inglés) [1–3], y se ha investigado ampliamente en diferentes materiales magnéticos blandos debido a su posibilidad de aplicación para desarrollar sensores magnéticos de alta precisión y sensores magneto-biológicos [4].

La permeabilidad magnética, el campo magnético DC aplicado, y la frecuencia de la corriente AC aplicada son parámetros clave que condicionan el fenómeno GMI. Para frecuencias en el rango de hasta 20 MHz, en el cual el efecto GMI se origina desde el efecto piel debido a la alta permeabilidad del material magneto-impedativo, se ha usado de manera rutinaria la técnica de cuatro puntas para medir

la respuesta de magneto-impedancia. En este modo de medida, una corriente AC es aplicada a la muestra, y el voltaje resultante es colectado en los extremos de la misma. El campo magnético AC resultante que es aplicado a la muestra es circular o transversal (es decir, si la muestra es en forma de hilo ese campo cae en la dirección radial, y en el caso de que la muestra sea en forma de cinta ese campo cae transversal a la muestra).

Otro modo de medir la respuesta de magneto-impedancia, aunque se ha empleado muy poco comparado con el modo de cuatro puntas, es por medio de la resonancia de un pequeño solenoide [5, 6].

Estudios teóricos de la década del 90 han mostrado rigurosamente la equivalencia [7] entre medidas de impedancia y resonancia ferromagnética. Este modo de medida de resonancia se ha empleado en el presente trabajo con el fin de no usar contactos eléctricos sobre la muestra que pueden inducir voltajes “espurios” en ella, que a veces no son fáciles de controlar ni de eliminar. Básicamente, en este modo de medida, la muestra en forma de cinta se colocó dentro del solenoide pequeño, con su eje longitudinal posicionado a lo largo del eje longitudinal del pequeño solenoide y, este conjunto a su vez se dispuso en el centro de una bobina de Helmholtz.

El trabajo experimental y análisis de datos se desarrolló siguiendo el siguiente protocolo:

(1) Se caracterizó el conjunto formado por el solenoide pequeño más el porta-muestras, con el fin de tener un “*background* o referencia” para efectos de comparación con los resultados obtenidos con la muestra; (2) se colocó la muestra objeto de estudio dentro del interior del conjunto solenoide más porta-muestras; (3) se analizó el conjunto de medidas, respectivo, y se ajustaron a través de un circuito equivalente, además de aplicar conceptos básicos de inteligencia artificial para analizar los ajustes. Las muestras estudiadas fueron los vidrios metálicos $Fe_{70}Nb_{10}B_{20}$ y $[(Fe_{50}Co_{50})_{75}B_{20}Si_5]_{96}Nb_4$ fabricados por el método de Melt Spinning y se designan aquí como Fe_{70} y $(FeCo)_{75}$.

2. Métodos experimentales y teóricos

2.1. Preparación de las muestras

Las muestras de $\text{Fe}_{70}\text{Nb}_{10}\text{B}_{20}$ y $[(\text{Fe}_{50}\text{Co}_{50})_{75}\text{B}_{20}\text{Si}_5]_{96}\text{Nb}_4$ empleadas en el estudio fueron preparadas mediante el método llamado enfriamiento rápido continuo –Melt Spinning. En este método, la aleación fundida constituida por los materiales de interés, es expulsada con la ayuda de la presión de un gas inerte (por ejemplo, argón) desde una boquilla de 2–3 mm de diámetro de un tubo de cuarzo y depositada rápidamente sobre la superficie de una rueda de metal que gira a alta velocidad y está a temperatura de 20 °C. El alto gradiente de temperatura existente entre la boquilla de expulsión de la aleación y su depósito en la rueda giratoria (que está a una distancia de milímetros), tiene como resultado que la aleación se solidifica a una velocidad alta de enfriamiento de 10^5 a 10^6 grados por segundo. Esto lleva a que los átomos de la aleación fundida no disponen de tiempo suficiente para formar una estructura cristalina, pero sí un estado estructural, en general, con características amorfas. Las muestras fueron preparadas en el Laboratorio de Sólidos Amorfos de la Universidad de Buenos Aires, donde se verificó su estado amorfo por difracción de rayos-X.

2.2. Tratamiento estadístico de datos

En el tratamiento de datos, realizamos un estudio estadístico usando el coeficiente de variación (σ/μ) de la familia de curvas para cada frecuencia puntual, es decir, para cada valor de frecuencia registrada de manera experimental ($0 < f < 30$ MHz). En la anterior expresión para coeficiente de variación, σ significa la desviación estándar de los valores de impedancia (magnitud y ángulo de fase) para los diferentes valores de campos magnéticos en que se realizaron los experimentos ($H_{DC} = 0, 5, 10, 20, 30$ y 40 Oe), y μ es el valor promedio de la impedancia para cada uno de esos campos.

De esta forma, se puede obtener un comportamiento de la variabilidad del experimento para la familia de curvas en función

de la frecuencia. Cabe mencionar que este es un tratamiento puramente estadístico que involucra toda la familia de curvas para $H_{DC} = 0, 5, 10, 20, 30$ y 40 Oe (y, por tanto, no una sola curva/campo en particular) para cada valor puntual de frecuencia.

2.3 Caracterización del sistema Solenoide-Porta muestra

Se realizan mediciones a diferentes campos magnéticos DC para el solenoide descrito anteriormente, luego se procede a medir bajo las mismas condiciones el sistema compuesto por solenoide + porta-muestras. Posteriormente, se realiza un tratamiento estadístico de los datos en función de la frecuencia para los valores de campo magnético externo (H_{DC}) y se obtuvo un promedio de 0.3 % de variación (punto a punto en el dominio de la frecuencia). Esto permite concluir que este conjunto se corresponde con una familia de curvas con una variación atribuible a la precisión del instrumento de medida.

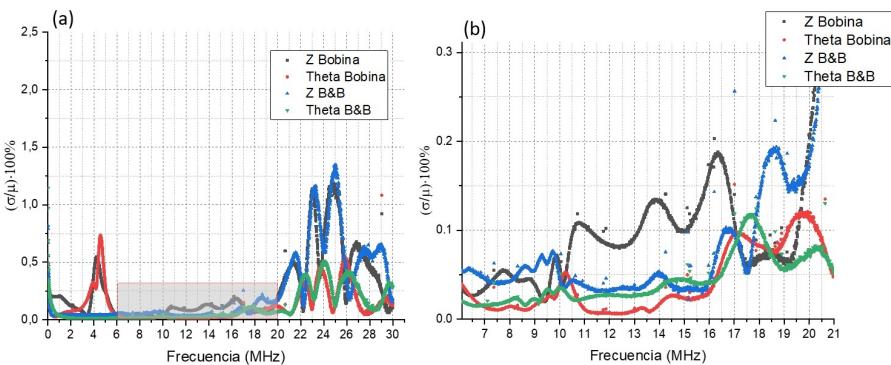


FIGURA 1. *Variación de la familia de curvas de magnitud de impedancia y ángulo de fase en función de la frecuencia de los sistemas solenoide, solenoide más porta-muestra (baquela) para los campos externos 0 – 40 Oe. (b) Magnificación de región de frecuencia 6 MHz – 20 MHz. En la expresión anterior las variables σ y μ no corresponden a permitividad ni conductividad, las definiciones se especifican en 2.2*

Para su posterior comparación con las muestras, se genera una sola curva de respuesta de impedancia (hasta 20 MHz) para el sistema

compuesto por solenoide pequeño más porta-muestra sometido a cualquier campo magnético DC entre [0 a 74 Oe], ya que la respuesta del solenoide es muy débil al campo externo (con una variación $\leq 1\%$ en un intervalo cercano al de resonancia) en el experimento.

Se propone el circuito equivalente de la figura 2 para intentar representar las características de los presentes experimentos, usando la expresión de la impedancia en función de la frecuencia angular ($\omega = 2\pi f$):

$$Z(\omega) = \frac{R\omega^2 l^2}{R^2(1 - \omega^2 l C)^2 + \omega^2 l^2} + i \left(\frac{R^2 \omega l (1 - \omega^2 l C)}{R^2(1 - \omega^2 l C)^2 + \omega^2 l^2} + \omega L \right)$$

Debido a la presencia de elementos capacitivos e inductivos en el circuito, se puede inferir que existe una condición de resonancia (y anti resonancia) proveniente del acoplamiento de las reactancias capacitiva e inductiva asociadas a estos elementos.

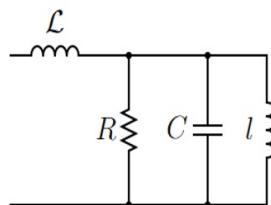


FIGURA 2. Circuito equivalente propuesto para el sistema objeto de estudio

3. Resultados

3.1 Análisis de medidas de las cintas basadas en hierro (Fe)

Se realizaron las medidas correspondientes de los vidrios metálicos estudiados, los cuales al ser magnéticamente blandos presentan una rápida respuesta al campo magnético DC externo: desde la influencia sobre el movimiento orbital de los electrones de conducción hasta la tendencia de alineación de los momentos magnéticos con el campo externo, dando lugar a fenómenos de

magneto-transporte, lo que permite investigar sus propiedades eléctricas por medio de la impedancia compleja.

Como se comentó en la subsección de tratamiento estadístico de datos, a continuación, se presenta los resultados obtenidos en las muestras de Fe_{70} y $(FeCo)_{75}$, a las que se les aplicó el mismo tratamiento estadístico.

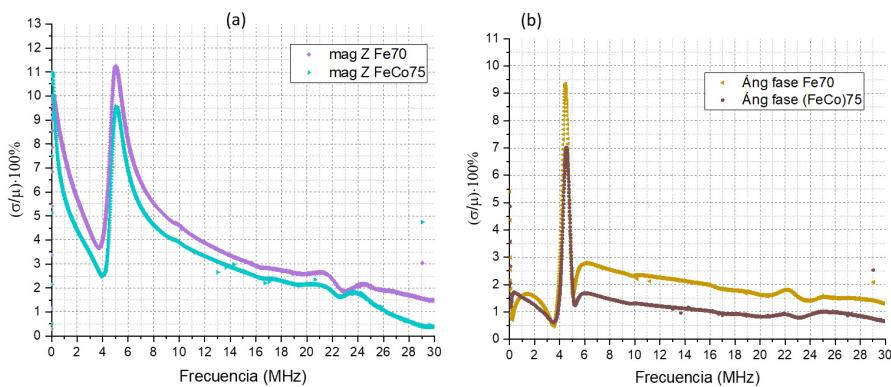


FIGURA 3. Variación de magnitud de impedancia y ángulo de fase en función de la frecuencia de las muestras de (a) Fe_{70} y (b) $FeCo_{75}$ para los campos externos 0 – 40 Oe

Las figuras 1 y 3 corresponden al comportamiento del coeficiente de variación (σ/μ) de la familia de curvas para cada frecuencia puntual, es decir que para cada valor de frecuencia registrada de manera experimental ($0 < f < 30$ MHz) se calcula el promedio μ y la desviación estándar σ de los valores de impedancia (magnitud y ángulo de fase) para los campos $H_{DC} = 0, 5, 10, 20, 30$ y 40 Oe. En otras palabras, se presenta el comportamiento de la variabilidad del experimento para la familia de curvas en función de la frecuencia. Cabe resaltar que este es un tratamiento puramente estadístico que involucra toda la familia de curvas $H_{DC} = 0, 5, 10, 20, 30$ y 40 Oe y (por tanto no una sola curva/campo en particular) para cada valor puntual de frecuencia, el cual nos permite concluir que hasta el valor de frecuencia analizado para el ajuste en el artículo ($f \leq 20$ MHz) se evidencia un cambio en la variabilidad de $0 < \sigma/\mu < 0.75\%$ para el sistema sin muestra (Fig. 1)

en contraste con una variabilidad de $2 < \sigma/\mu < 11\%$ para el sistema con muestra (Fig. 3). Al comparar las familias de curvas del experimento con y sin muestra, se puede observar de manera clara un cambio máximo de 0.75% a 11% en el coeficiente de variación para la magnitud y el ángulo de fase de la impedancia, es decir, se obtiene un incremento hasta de 14 veces en la respuesta de impedancia al introducir las muestras. Estos vidrios metálicos presentan temperatura crítica cercana a la temperatura ambiente [8], lo que permite, en particular, correlacionar las propiedades y procesos eléctricos con los procesos magnéticos para temperaturas cercanas al punto crítico [9]. La intensidad de la interacción de intercambio en este tipo de materiales es fuerte, mientras que comparativamente la intensidad de la interacción espín-órbita es débil [8, 9].

A continuación, en las figuras 4 y 5, se presentan los resultados de impedancia en función de la frecuencia para diferentes campos magnéticos mantenidos constantes para las muestras de Fe₇₀Nb₁₀B₂₀ y [(Fe₅₀Co₅₀)₇₅B₂₀Si₅]₉₆Nb₄, junto con las curvas de calibración del solenoide.

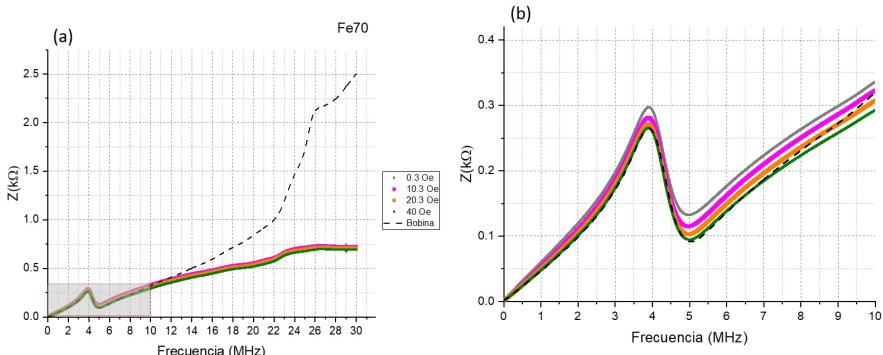


FIGURA 4. (a) Familia de curvas superpuestas de magnitud de impedancia en función de la frecuencia de la muestra Fe₇₀. (b) En el recuadro se incluye el intervalo de resonancia del solenoide

Se observa, que ambos vidrios metálicos tienen una respuesta predominantemente inductiva, en concordancia con el hecho que la magnitud de la impedancia es estrictamente creciente, a excepción,

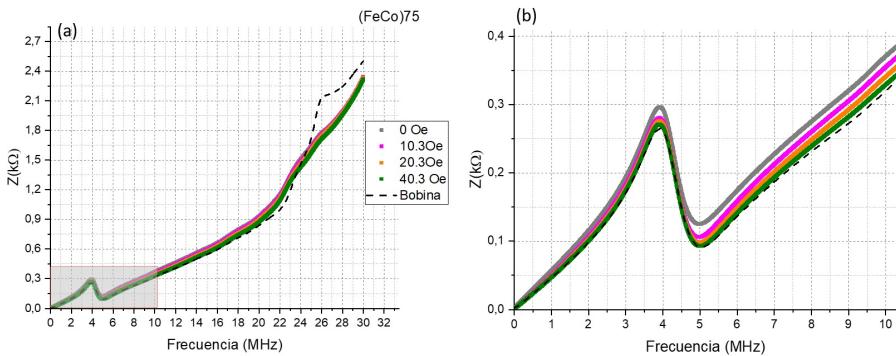


FIGURA 5. (a) Familia de curvas superpuestas de la magnitud de la impedancia en función de la frecuencia de la muestra (FeCo)₇₅. (b) En el recuadro se incluye el intervalo de resonancia del solenoide

en un pequeño intervalo de frecuencia, luego del primer pico de resonancia, recuperando el comportamiento inductivo hasta 20 MHz.

A continuación, en la fig. 6, se presentan las curvas simuladas a través de las expresiones real (eje de la abcisa) e imaginaria (eje de la ordenada) de la impedancia de este circuito equivalente que se propone tomando los siguientes valores para los parámetros inductancias, capacitancia y resistencia:

$$\mathcal{L} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ H}$$

$$l = 1.57 \cdot 10^{-3} \text{ H}$$

$$C = 5 \cdot 10^{-7} \text{ F}$$

$$R = 250 \Omega$$

Se observa que este circuito describe bien la respuesta de impedancia de las muestras Fe₇₀ y (FeCo)₇₅ en el rango de frecuencia donde se presenta la resonancia principal (en el presente caso entre $0 \leq \omega \leq 5 \cdot 10^7$ rad/s). Se presenta la comparación con la muestra Fe₇₀ en la figura 7. La búsqueda de un circuito equivalente es una tarea que esencialmente se realiza por ensayo y error. Es bien conocida la falencia de esta búsqueda ya que 2 circuitos diferentes pueden tener la misma respuesta de impedancia.



FIGURA 6. Simulación de componentes real e imaginaria del circuito equivalente propuesto para el sistema usando los valores (empíricos) indicados

En el presente artículo, el criterio de búsqueda del circuito equivalente se ha apoyado en la experiencia y analogías eléctricas de los componentes utilizados en el experimento. Con esto en mente, se puede argumentar que el circuito equivalente obtenido, puede describir de manera confiable y reproducible los resultados experimentales, debido a que las respuestas de las componentes real e imaginaria de la impedancia en ambos casos presentan tendencias similares, según se puede inferir de la comparación entre las figuras 5, 6, y 7.

Cabe resaltar que las muestras aquí estudiadas no han sido sometidas a ningún tratamiento térmico [8–10] luego de sus síntesis por la técnica Melt Spinning; se pueden encontrar estudios de materiales magnéticos blandos basados en hierro, en donde se efectúa el mismo experimento que en el presente trabajo, salvo el recocido de las muestras posterior a su síntesis [5, 6]. En los mencionados estudios se evidencia un realce de amplitud en los picos de resonancia, proporcionales al campo magnético aplicado, el cual fue atribuido a un efecto de resonancia magneto-elástica de los materiales [6].

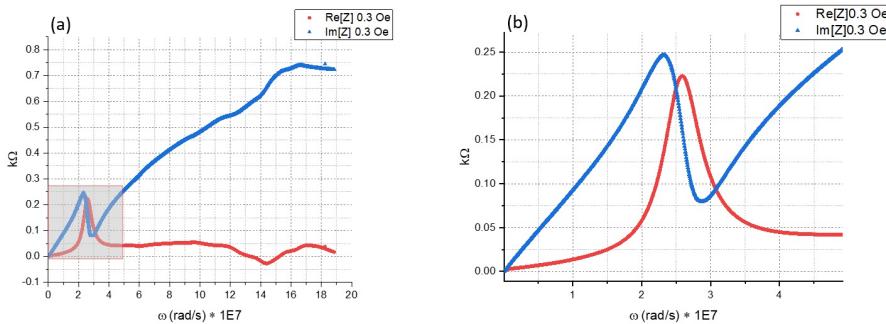


FIGURA 7. (a) Componentes real e imaginaria de la muestra Fe₇₀. (b) Recuadro que incluye el intervalo de resonancia.

3.2 Ajuste de los resultados de impedancia por medio de IA

Se pueden realizar curvas de ajuste del experimento mediante el diseño de una red neuronal que aprenda de los datos experimentales de impedancia. Para esto, utilizamos una red de tipo WASD [11] con polinomios de Euler como funciones de activación, con la cual se obtiene un polinomio en términos de la frecuencia (frecuencia angular $\omega = 2\pi f$). El ajuste mediante IA se ha efectuado en experimentos de magneto-impedancia gigante [11–13], mostrando ser una herramienta viable para ajustar de manera numérica este fenómeno.

Aquí, se presenta un caso específico de ajuste en el intervalo de resonancia para la curva promedio del pequeño solenoide. En la figura 8 se presentan los resultados de ajuste dando como resultado un error de 0.5056 ($10^2 \Omega$)² (error cuadrático acumulado).

Conclusiones

Se observa que los vidrios metálicos objeto de estudio responden de manera esencialmente diferente luego de superar la región de resonancia: la muestra de Fe₇₀ tiende a disminuir su respuesta de impedancia, mientras que la muestra de FeCo₇₅ continúa de manera incremental atenuando una condición de resonancia subsidiaria alrededor de los 26 MHz. Esta interpretación es coherente con

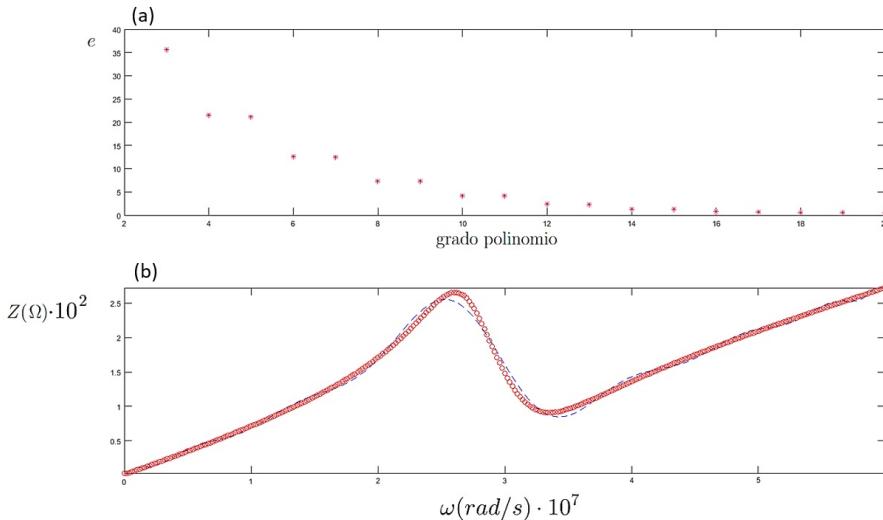


FIGURA 8. (a) Error obtenido (error cuadrático medio) en el ajuste en función del grado del polinomio de ajuste. (b) Respuesta ajustada de impedancia del pequeño solenoide. Los puntos rojos circulares son datos de impedancia obtenidos experimentalmente y la curva discontinua es la gráfica del polinomio de grado 18

resultados de efecto Hall [8, 9] que revelaron que la concentración de portadores de carga para el $(\text{FeCo})_{75}$ es menor que para la muestra Fe_{70} (siendo la primera del orden de 10^{26} m^{-3} y la segunda del orden de 10^{26} m^{-3}). El método de resonancia de un pequeño solenoide permite estudiar de manera confiable y reproducible la respuesta de magneto-impedancia de los vidrios metálicos anteriormente mencionados. Los datos obtenidos con IA describen cualitativamente bien los resultados experimentales.

Agradecimientos

A. Rosales Rivera agradece al Laboratorio de Sólidos Amorfos de la Universidad de Buenos Aires que en una fructífera colaboración donó las muestras para nuestro estudio, en el Laboratorio de Magnetismo y Materiales Avanzados. Agradecemos a la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Sede Manizales de la Universidad Nacional por su apoyo en la realización de este trabajo.

References

- [1] A. Antonov, S. Gadetskii, and et al., Phys. Met. Metallogr. **83**, 612 (1997).
- [2] F. L. A. Machado, C. S. Martins, and S. M. Rezende, Phys. Rev. B **51**, 3926 (1995).
- [3] L. V. Panina and K. Mohri, Appl. Phys. Lett. **65**, 1189 (1994).
- [4] M. Vázquez, J. Magn. Magn. Mater. **226-230**, 693 (2001).
- [5] Z. C. Wang, F. F. Gong, and et al., J. Appl. Phys. **87**, 4819 (2000).
- [6] Z. Wu, L. Liu, and et al., Physica B: Condens. Matter. **405**, 327 (2010).
- [7] A. Yelon, D. Ménard, and et al., Appl. Phys. Lett. **69**, 3084 (1996).
- [8] A. Rosales-Rivera, Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales **46**, 656–674 (2022).
- [9] A. Rosales R., R. F. González S., and et al., IEEE T. Magn. **57**, 1 (2021).
- [10] D. F. Gómez Montoya, Estudio de las propiedades magneto - eléctricas de materiales magnéticamente blandos en forma de cintas, basados en hierro (Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia (2015).
- [11] Y. Zhang, D. Chen, and C. Ye, *Toward Deep Neural Networks: WASD Neuronet Models, Algorithms, and Applications* (2019).
- [12] O. Caylak and N. Derebasi, J. Optoelectronics Adv. Mat. **10**, 2916 (2008).
- [13] N. Derebasi, J. Supercond. Nov. Magn. **26**, 1075 (2013).