

Desarrollo de un sistema para la caracterización de materiales magnéticos blandos a partir de la Instrumentación virtual

J.A. Moya¹⁻² | S. Gamarra Caramella¹ | C. Berejnoi³

Resumen

En este trabajo se presentan los avances en el desarrollo de un sistema de medición de propiedades magnéticas blandas con el uso no de equipos analógicos tradicionales sino por medio de la instrumentación virtual. Para ello se emplea una Plataforma para Diseño y Generación de Prototipos, Elvis II+, de National Instruments, a modo de placa adquisidora de datos (DAC, de 8 o 16 bits de resolución según el instrumento usado) controlada por una PC y el programa de gestión de instrumentos y procesamiento de datos Labview™.

El primero de los instrumentos virtuales está destinado a la realización de ciclos de histéresis magnéticos cuasiestáticos en donde la obtención de los datos del flujo magnético se realiza a partir de la integración digital del voltaje inducido en las bobinas sensoras. El otro, es desarrollado para la determinación de la permeabilidad en frecuencias; para ello se emplea la técnica del amplificador Lock-in desarrollado a partir de las librerías del programa Labview, usando como entradas la DAC del osciloscopio (8 bits y 100 MS/s) que, junto con el generador de funciones integrado a la tarjeta, permiten resolver frecuencias de hasta 5 MHz. El funcionamiento del Lock-in virtual es confrontado con el de un Lock-in tradicional (SR830), obteniéndose valores comparables hasta una resolución mínima de ~ 10 mV. Ambos instrumentos virtuales son evaluados con materiales magnéticos blandos y sus resultados comentados.

La instrumentación virtual desarrollada resulta una excelente opción de equipamiento de laboratorio cuando, entre otras razones, no se dispone de recursos económicos suficientes, contando siempre con la posibilidad de mejorar la sensibilidad del equipamiento ya sea con la adquisición de DAC de mayor resolución o con la incorporación de un preamplificador en las señales de entrada.

Palabras clave: instrumentación virtual, ciclos de histéresis, permeabilidad magnética.

¹ Facultad de Ingeniería e Informática de la Universidad Católica de Salta.

² Conicet.

³ Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Salta.

Introducción y estado del arte

La caracterización de materiales magnéticos blandos incluye, entre otras propiedades, la determinación de su campo coercitivo e imanación a saturación en frecuencia cuasiestáticas como así también la permeabilidad y las pérdidas magnéticas en frecuencias que pueden llegar comúnmente hasta los cientos de kHz o algunos MHz. Esto requiere una cierta diversificación de instrumentos tales como generador de señales, fuentes de corrientes, fluxómetro, un osciloscopio, un analizador de impedancias o un amplificador Lock-in y, si se quiere automatizar la medición, hará falta también una PC y una tarjeta para adquirir datos, por ejemplo. La instrumentación virtual presenta grandes ventajas en relación con la instrumentación tradicional, entre ellas, la posibilidad de personalizar el instrumento agregándole mayor funcionalidad y flexibilidad, la rápida incorporación de nuevas tecnologías y menores costos de adquisición y bajos costos de mantenimiento. No obstante, se debe tener en cuenta que la progra-

mación y las funciones de análisis y procesamiento de señales pueden resultar muy fáciles o muy complejas.

Un instrumento virtual consta esencialmente de una computadora equipada con software especial y una tarjeta de adquisición de datos con acondicionamiento de señales. También, son necesarios otros elementos como transductores, cables conectores, en algunos casos amplificadores de bajas señales, etc. Se trata, por lo tanto, de instrumentos basados en programas poderosos que requieren de hardware económico. Una de las principales ventajas de la instrumentación virtual (VI) respecto a la instrumentación tradicional reside en la versatilidad que presentan los primeros al estar basados en un software, diferenciándose de esta manera de los instrumentos de medición convencionales, sustentados en el hardware que se encuentra predefinido por el fabricante y no puede ser modificado por los usuarios. El instrumento virtual desarrollado puede modificarse y complementarse prácticamente sin límites de acuerdo a los requerimientos que surjan de su aplicación. En la Fig. 1 se muestra un esquema constitutivo de la VI

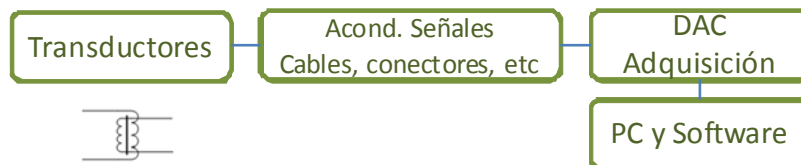


Fig. 1: Esquema constitutivo de la instrumentación virtual.

Antecedentes de la instrumentación virtual [1,2]

La instrumentación tradicional se remonta al desarrollo de la tecnología eléctrica, en el siglo XIX. Los instrumentos consistían fundamentalmente en dispositivos de medición de potencia, compuestos por sensores, transductores y un visor. Si bien fueron evolucionando a instrumentos más pequeños que requerían cada vez menos potencia para su funcionamiento, su utilización se limitaba a la conexión de los cables, la selección de un rango determinado y la lectura de los datos obtenidos. El procesamiento de la información no formaba parte de las funcionalidades de los instrumentos.

En el siglo XX se produjeron importantes avances en el desarrollo de la instrumentación, debidos, entre otras cosas, al surgimiento de la ingeniería electrónica y al crecimiento de la informática. A su vez, el campo del control industrial requirió ya no sólo la realización de lecturas de los parámetros físicos, sino su utilización para controlar los procesos.

Más adelante, en los años setenta las computadoras fueron capaces de soportar, almacenar y procesar información. Esto hizo posible su conexión a sensores, para adquirir señales por medio de convertidores analógicos-digitales. Hasta este momento, de todas formas, las PCs eran equipos lentos, por lo que se trataba más bien de instrumentos fuera de

línea. Sólo a partir de los años ochenta, con el aumento de la velocidad y potencia de cálculo de las computadoras, se hizo posible su utilización para realizar mediciones en tiempo real.

La instrumentación virtual al presente

En la actualidad, donde las computadoras y el procesamiento de señales forman una unidad básica tanto en los campos de la tecnología como el de la investigación, la VI está ganando terreno y fabricantes de instrumentos convencionales desarrollan sus primeros híbridos entre un instrumento virtual y uno convencional, con la producción de plaquetas adquisidoras de datos diseñadas con hardware específico del instrumento analógico y en donde el uso de la PC y programas de gestión son imprescindibles.

En este trabajo, se presentan los avances logrados en el desarrollo de dos instrumentos virtuales orientados a la conformación de un sistema de medición de propiedades magnéticas blandas en materiales: un instrumento para la obtención de ciclos de histéresis cuasiestáticos y otro para la determinación de la permeabilidad en frecuencias de hasta 5 MHz. Como tarjeta de adquisición de datos se usó la Plataforma para Diseño y Generación de Prototipos, ELVIS II+, junto con el software Labview™, ambos de National Instruments (NI).

Materiales e instrumentos

La Plataforma Educativa para Diseño y Generación de Prototipos, ELVIS II+, de NI, además de poseer varias opciones para la adquisición de datos, incorpora, entre otros, un generador analógico de funciones (FGEN) con un máximo de generación de onda sinodal de 5 MHz y cinco fuentes de baja potencia (entre variables y fijas). Presenta dos tipos de entradas analógicas, de 8 y 16 bits. Entre los instrumentos virtuales prediseñados en el software, destacamos los que usamos para la lectura de las señales: un multímetro digital (DMM) con resolución de $5 \frac{1}{2}$ y un osciloscopio (OSC) con resolución de 8-bits y una velocidad de muestreo de 100 MS/s. El software usado fue LabVIEW 2010 Full Development System.

Resultados y discusión

Para la obtención de los ciclos de histéresis, se usó el método inductivo con bobinado secundario compensado por aire. En los ensayos tradicionales, la señal del bobinado inducido (i.e. bobinado secundario) es integrada de forma analógica en un equipo denominado fluxómetro para obtener la densidad de flujo magnético del material a ensayar. Con el advenimiento de la instrumentación virtual, se ha propuesto el reemplazo de dicho instrumento por algún algoritmo de integración digital con o sin tratamiento previo de la señal [3,4]. Esta implementación trae como ventaja la erradicación del efecto negativo del «voltaje de deriva» que presentan los fluxómetros y acarrea algunos inconvenientes a las medidas [5,6]. En nuestro caso, la función integración que se empleó fue el método de suma Riemann izquierdo y en esta primera etapa del desarrollo no se emplea ningún tipo de tratamiento de la señal.

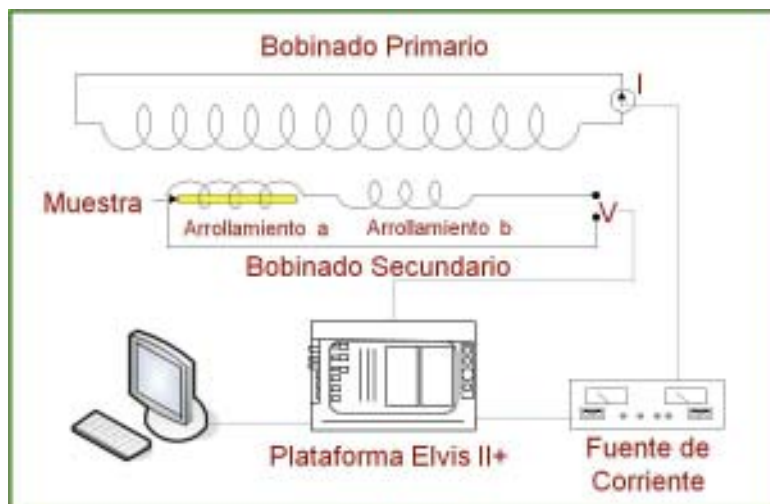


Fig. 2: Esquema del sistema de medición de ciclos de histéresis.

En la Fig. 2 se aprecia un esquema del sistema de medición de ciclos de histéresis. Para la generación de la inducción se programó una función matemática que permite una distribución no homogénea de puntos experimentales a adquirir con la posibilidad de ajustar su concentración en cualquier región de la curva. Una salida analógica de la ELVIS envía esta información a una fuente programable de corriente la cual alimenta la bobina primaria.

El voltaje inducido en la bobina secundaria es introducido a la ELVIS mediante el DDM que permite la lectura de voltajes de $\sim 1\text{mV}$. Los ciclos fueron tomados en forma cuasiestática a fre-

cuencias menores de 50 mHz. En la Fig. 3 se observan algunas gráficas del panel frontal del programa de ciclos de histéresis: M vs. H , H vs. tiempo y dB/dt vs. tiempo.

Para la determinación de la permeabilidad magnética en frecuencia, también se usó el método inductivo con una disposición semejante al de la Fig. 2, salvo que no se hace uso de la fuente de potencia, ni se debe integrar el voltaje inducido. Para la generación del campo inductor se usó el FGEN de la ELVIS con onda sinodal y para la determinación de la amplitud y la fase del voltaje inducido en el secundario se utilizó la técnica del amplificador Lock-in [7].

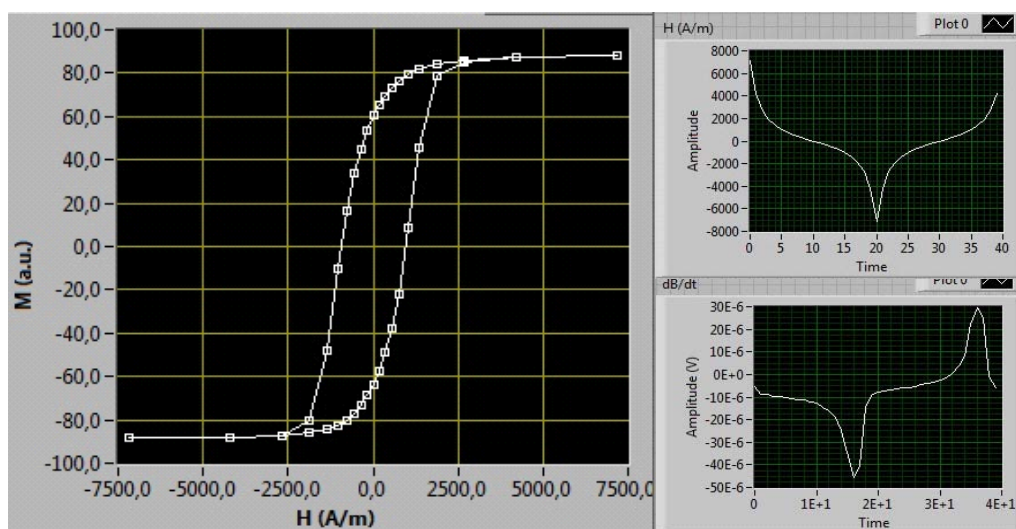


Fig. 3: Gráficas del panel frontal del programa de ciclos de histéresis.

Existen en la literatura antecedentes recientes de diseño de amplificadores Lock-in virtuales implementados con el programa de gestión de instrumentos y procesamiento de datos Labview™ [8,9], el cual ha desarrollado unas librerías destinadas al tratamiento de señales. Dichas rutinas se encargan de la determinación de frecuencia y fase de la señal de referencia, del mezclado de la referencia y señal de entrada y de la extracción de las componentes de la señal de entrada cuya frecuencia y fase fueron especificadas por la señal de referencia. En todos los casos, estas librerías se deben adaptar no sólo al hardware que uno posee (la ELVIS, por ejemplo) sino a las necesidades de la medición en sí. En nuestro caso, las librerías de una aplicación de NI [10] fueron adaptadas de manera que tanto la señal de referencia como la de medición sean adquiridas por la DAC del OSC. En la Fig. 4 se muestra una imagen del panel frontal del programa de determinación de la permeabilidad y en la Fig. 5 se observa el diagrama de bloques del amplificador virtual Lock-in.

La evaluación y puesta a punto del amplificador Lock-in virtual fue llevada a cabo mediante varias series de medidas a distintas frecuencias en el circuito magnético usado para la medición de la permeabilidad magnética (secundario en vacío) y con la confrontación con un equipo analógico SR850 (Stranford Research). En la Fig. 6.a se observan las curvas obtenidas en las series de frecuencias más bajas, donde la potencia de la señal evaluada es más

baja: 1, 5 y 10kHz.

Inicialmente, se cargó el circuito primario (inductor) con un voltaje del orden de los μV (pico a pico) aumentando luego hasta los 10 V. A su vez, se registró el voltaje en el circuito secundario (inducido) en valores de μV (pico) a medida que aumenta el voltaje del primario. En todos los casos, se obtuvo una respuesta lineal del valor del voltaje inducido respecto del aplicado, como señala la teoría, salvo para valores de voltaje inducido menores de 70 o 100 μV donde existe cierta incertidumbre (ver Fig. 6.b). Se supone que esto último es debido al ruido electromagnético del ambiente que impide detectar con nuestro sistema la señal inducida cuando ésta es menor que dicho ruido. En la Fig. 7 se registró el ruido presente en los bobinados primario y secundario a generador apagado con un resultado de 27.5 y 3.5 $\mu\text{Vp-p}$ respectivamente. No obstante, el equipo es capaz de resolver valores de 10 μV , como se observa ya en las medidas mayores a 100 μV .

Estos resultados son importantes ya que la resolución de 8-bits del OSC sólo permitiría detectar cambios de voltaje de 156 μV . Sin embargo, las librerías del Lock-in realizan un promedio de los valores, lo que permite detectar señales menores que las cuantificadas por la DAC. De los resultados obtenidos se observó que la sensibilidad del equipo, como era de esperar, depende mucho de la calidad de la señal, que a la vez depende entre otros factores de la calidad del transductor y calidad y longitud de los cables que portan las señales.

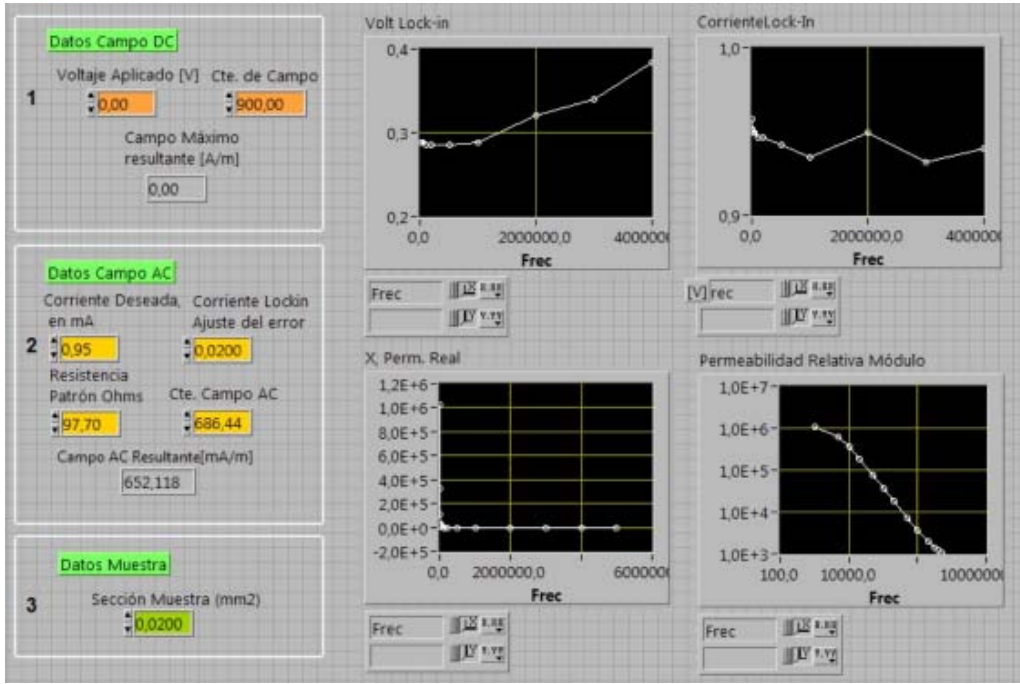


Fig. 4: Panel Frontal del programa de determinación de la permeabilidad.

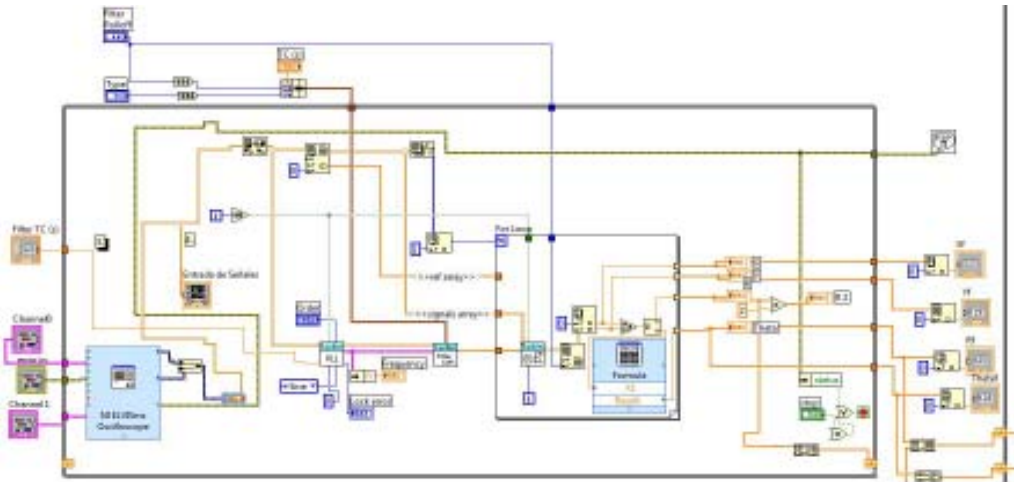


Fig. 5: Diagrama de bloques del amplificador Lock-in.

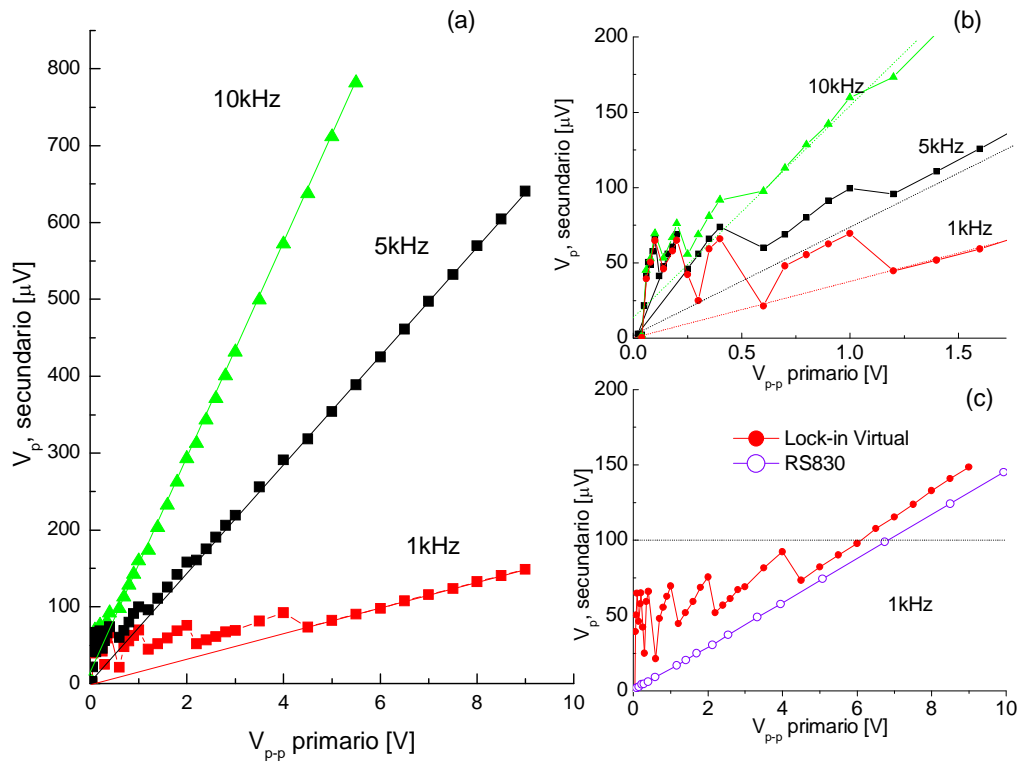


Fig. 6: Respuesta del Lock-in virtual en función de la amplitud de la señal. a) para frecuencias de 1, 5 y 10 kHz. b) Ídem, detalle bajas amplitudes. c) Comparación entre la curva obtenida por el instrumento virtual y la obtenida por el instrumento analógico.

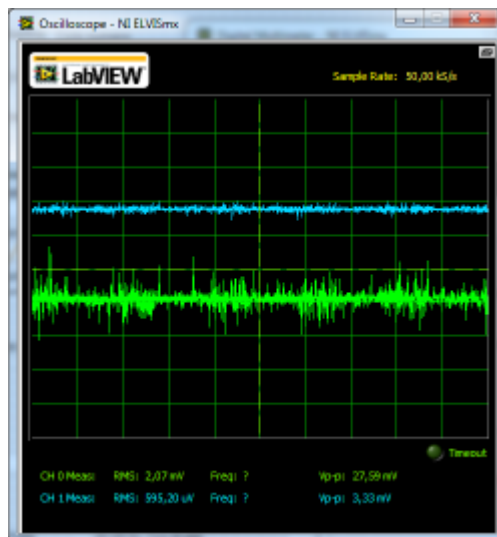


Fig. 7: Ruido ambiente presente en los bobinados.

En la Fig. 6.c se comparan las mediciones obtenidas a 1kHz con el Lock-in virtual (condición desfavorable por el bajo valor de la señal a esas frecuencias) y las obtenidas con el SR830. Se observa efectivamente la excelente respuesta del equipo analógico (preparado para detectar nV) en los valores bajos de inducción, en donde nuestro Lock-in virtual pierde la exactitud. A valores mayores a los 70 mV ambos equipos comparten una misma pendiente, separados apenas por una constante de aproximadamente 20 mV debida, tal vez, a algún error de calibración de alguno de los instrumentos.

En la Fig.8 se muestran los ciclos de histéresis obtenidos en una varilla de acero inoxidable AISI 420 (dimensiones de la varilla: 1mm de diámetro y 200mm de largo) mediante un secundario de 2000 vueltas. Durante el proceso de imanación se llegó hasta la saturación del material. Con este ciclo se obtuvo un valor del campo coercitivo de 820 A/m que concuerda con los valores en la literatura [11]. En la misma figura también se pueden ver otros ciclos realizados a valores menores de campos inducidos para observar la respuesta del equipo y su sensibilidad

Verificación experimental

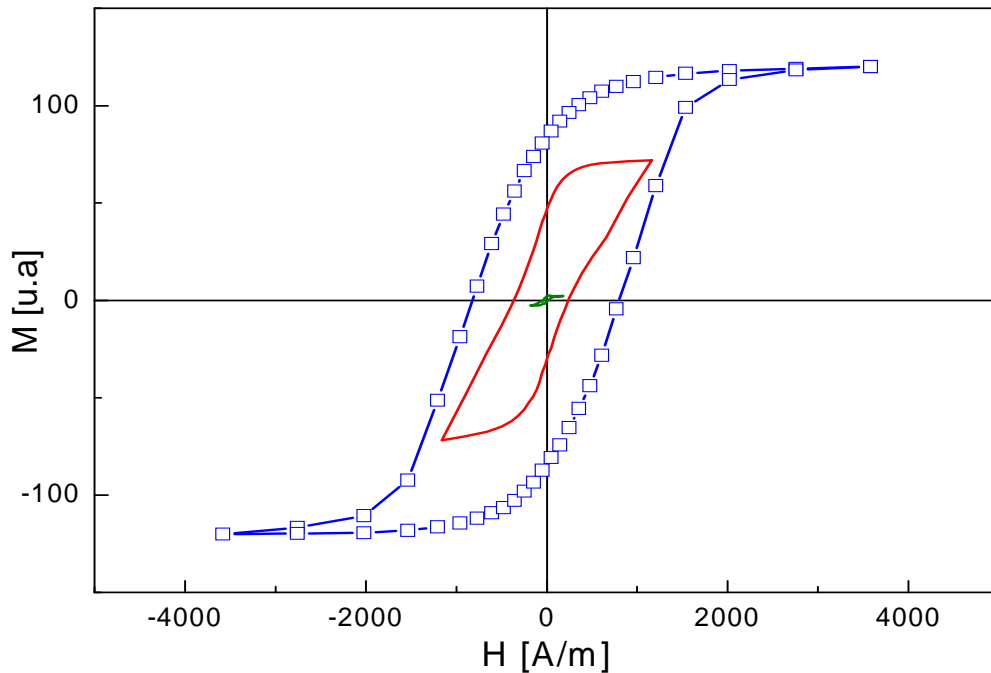


Fig. 8: Ciclos de histéresis correspondiente a una varilla de acero inoxidable.

En la Fig. 9 se observan las medidas obtenidas de permeabilidad inicial, m_i , sobre una cinta nanocristalina (dimensiones $0,7 \times 0,025 \text{ mm}^2$ de sección y 10 cm de largo) de composición $\text{Fe}_{73,5}\text{Si}_{14,5}\text{B}_8\text{Cu}_1\text{Nb}_3$ (tipo FINEMET™) recocida a $540 \text{ }^\circ\text{C}$. El valor del campo

oscilante aplicado sobre la muestra fue de $0,47 \text{ A/m}$ (rms). Tanto los valores de m_i como el comportamiento en frecuencia concuerdan con los datos de la literatura y con experimentos realizados con equipos analógicos tradicionales [12].

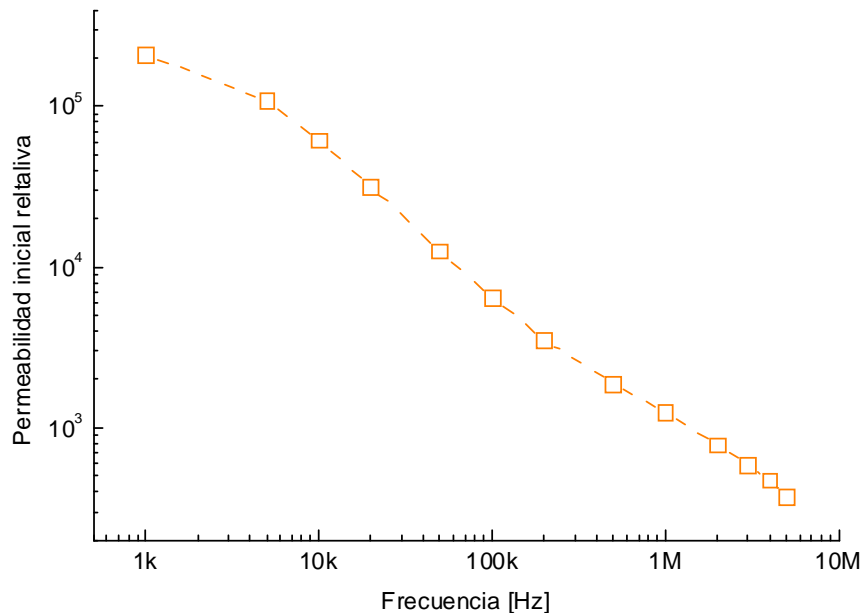


Fig. 9: Variación de la permeabilidad inicial en función de la frecuencia en cintas nanocristalinas.

Conclusión

Con un mismo equipo de bajo costo se ha logrado desarrollar un sistema de mediciones de propiedades magnéticas blandas de buena precisión.

Para la medición de los ciclos de histéresis se usó, además, una fuente de corriente programable para llegar a

campos aplicados mayores. No obstante, es posible usar las fuentes variables incorporadas a la ELVIS con menor campo efectivo (500 mA máx.)

Para la determinación de la permeabilidad, basta sólo con el instrumento local, mientras que la aplicación de un campo DC superpuesto puede hacerse ya sea con las fuentes antes men-

cionadas o sumándole la componente DC al campo generado por el FGEN.

Para incrementar la sensibilidad del sistema, especialmente en la detección de ciclos cuasiestáticos, puede añadirse un amplificador de bajo ruido entre el secundario y la DAC, o bien adquirirse una DAC de mayor resolución.

También, es posible agregar un tratamiento de la señal por software (transformada de Fourier) para eliminar ruidos en las mediciones de los ciclos.

El dispositivo presentado constituye una excelente solución cuando el equipamiento disponible en el laboratorio es escaso.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a los doctores Marco Coisson y Fausto Fiorillo, del Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM), Torino, por la valorable y pronta ayuda durante la realización del equipo para medir permeabilidad magnética.

Referencias

1. H. Goldberg, «What is virtual instrumentation?» *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, vol. 3, págs. 10-13, Dic. 2000.
2. A. Manuel, *Instrumentación virtual: adquisición, procesado y análisis de senales*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2001.
3. M. Butta, G. Infante, P. Ripka, G. A. Badini-Confalonieri, y M. Vaizquez, «M-H loop tracer based on digital signal processing for low frequency characterization of extremely thin magnetic wires», *Review of Scientific Instruments*, vol. 80, n.º. 8, pág. 083906, 2009.
4. P. Kis, «Hysteresis measurement in LabView», *Physica B: Condensed Matter*, vol. 343, n.º. 1-4, págs. 357-363, Ene. 2004.
5. V. Franco, J. Ramos-Martos, y A. Conde, «Autocalibrating quasistatic M-H hysteresis loop tracer with negligible drift», *Review of Scientific Instruments*, vol. 67, n.º. 12, pág. 4167, 1996.
6. J. A. Garcia y M. Rivas, «A quasi-static magnetic hysteresis loop measurement system with drift correction», *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 42, n.º. 1, págs. 15-17, Ene. 2006.
7. G. V. Duong, R. Groessinger, M. Schoenhart, y D. Bueno-Basques, «The lock-in technique for studying magnetoelectric effect», *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 316, n.º. 2, págs. 390-393, Sep. 2007.
8. J. Lu, D.-A. Pan, B. Yang, y L. Qiao, «Wideband magnetoelectric measurement system with the application of a virtual multi-channel lock-in amplifier», *Measurement Science and Technology*, vol. 19, n.º. 4, pág. 045702, Abr. 2008.
9. M. Mandaji, T. Backup, R. Rech, R. Correia, y T. Kist, «Performance of a sound card as data acquisition system and a lock-in emulated by software in capillary electrophoresis», *Talanta*, vol. 71, n.º. 5, págs. 1998-2002, Mar. 2007.
10. «Multi Channel Count Lock-In Amplifier

- with NI-4472 and DAQmx - Developer Zone - National Instruments». [Online]. Available: <http://zone.ni.com/devzone/cda/epd/p/id/4532>. [Accessed: 22-Nov-2011].
11. P. Oxley, J. Goodell, y R. Molt, «Magnetic properties of stainless steels at room and cryogenic temperatures», *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 321, págs. 2107-2114, Jul. 2009.
 12. G. Bertotti, E. Ferrara, F. Fiorillo, y P. Tiberto, «Magnetic properties of rapidly quenched soft magnetic materials», *Materials Science and Engineering A*, vol. 226-228, págs. 603-613, Jun. 1997.