

# Caracterización de aceros API-5L por medio de la medición de ruido magnético Barkhausen

P. Martínez-Ortiz<sup>1\*</sup>

J. H. Espina-Hernández<sup>1</sup>

J. M. Hallen<sup>2</sup>

R. Linares y Miranda<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Sección de Estudios de Posgrado e Investigación (Electrónica), Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Zacatenco, Instituto Politécnico Nacional. Unidad Profesional 'Adolfo López Mateos', Col. Lindavista, CP 07738, México DF. MÉXICO.

<sup>2</sup>Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas, Instituto Politécnico Nacional. Unidad Profesional 'Adolfo López Mateos', Col. Lindavista, CP 07738, México DF. MÉXICO.

Correo electrónico pmartinezo0200@ipn.mx

Recibido el 15 de junio de 2009; aceptado el 28 de enero de 2010.

## 1. Resumen

En este trabajo se presenta la caracterización de aceros API-5L (grado X52, X56, X60) a través de ruido magnético Barkhausen. Un campo magnético sinusoidal de 10 Hz de frecuencia e intensidad de 5.2 kA/m se aplicó a las muestras de acero API-5L. Se demostró que cada acero genera una señal de ruido magnético Barkhausen propia que depende de su composición química y microestructura. Se comprobó la anisotropía magnética de los aceros a través de la señal de ruido magnético Barkhausen. Se procesó la señal de ruido magnético Barkhausen y se obtuvieron tres parámetros: la envolvente de la señal, el valor RMS y la energía de la señal, los cuales pueden ser utilizados para caracterizar a los aceros API-5L.

**Palabras clave:** ruido magnético Barkhausen, aceros, anisotropía.

## 2. Abstract (Characterization of API-5L Steels by Using the Magnetic Barkhausen Noise)

In this work the characterization of API-5L (grade X52, X56, X60) steels by using the magnetic Barkhausen noise is presented. A sinusoidal magnetic field of 10 Hz of frequency with intensity of 5.2 kA/m was applied to the API-5L steel samples. During the magnetization process the magnetic Barkhausen noise signal is generated and measured. It is demonstrated that the magnetic Barkhausen noise signal is unique for each steels, depending on the material chemical composition and microstructure. The magnetic anisotropy of the studied steels was verified through the magnetic Barkhausen noise signal. This signal was processed and three parameters were extracted: the signal envelope, the RMS value and the energy of the signal which can be used to characterize the API-5L steels.

**Key words:** magnetic Barkhausen noise, steels, anisotropy.

## 3. Introducción

El acero se utiliza ampliamente para la fabricación de estructuras utilizadas en proyectos de gran escala en muchas áreas de la industria tales como la petrolera, la ferroviaria y la construcción, entre otras. La aplicación del acero en tantas áreas de la industria se debe a que este material posee buena elasticidad, plasticidad y alta resistencia mecánica [1]. En tales aplicaciones alguna avería en las estructuras de acero puede causar serios accidentes provocando pérdidas humanas, económicas e incluso daños ecológicos. Por estos motivos, los aceros utilizados en los ductos de petróleo o gas son tema de investigación en la actualidad.

El acero es un material magnético que se clasifica como magnéticamente suave dentro de los materiales ferromagnéticos. Los aceros son materiales que tienen anisotropía magnetocristalina [1], la cual puede ser descrita por sus ejes de magnetización llamados eje de fácil magnetización (EFM) y eje de difícil magnetización (EDM) los cuales son perpendiculares entre sí. El material se satura magnéticamente con una intensidad de campo magnético menor a lo largo de la dirección del EFM comparado con el EDM.

La Evaluación No-Destructiva (END) de estructuras de aceros utilizando métodos magnéticos permite de manera indirecta evaluar su integridad mecánica teniendo en cuenta el principio de medición utilizado.

En 1919 el físico Alemán Heinrich Barkhausen realizó las primeras observaciones del proceso de magnetización descubriendo que éste no es continuo [1, 2], sino de forma discreta a causa de pequeños saltos abruptos en la magnetización. La medición del ruido magnético Barkhausen (RMB) se basa en la detección de impulsos eléctricos de corta duración por medio de una bobina. Estos impulsos son el resultado de los saltos abruptos en la magnetización del material cuando se le aplica un campo magnético externo variante en el tiempo. Este fenómeno demostró experimentalmente la presencia de dominios magnéticos en un material ferromagnético.

Durante el proceso de magnetización ocurren dos eventos principales, la rotación del momento magnético de los dominios para orientarse en la dirección del campo magnético externo aplicado, y el movimiento de las paredes de dominio [1, 2]. El movimiento de las paredes de dominio es la causa de los saltos abruptos en la magnetización del material. Las mediciones de RMB se pueden utilizar como un método de END para la caracterización de materiales ferromagnéticos debido a que la microestructura del material modula el desplazamiento de las paredes de dominio durante el proceso de magnetización.

La señal de RMB tiene un espectro de frecuencias que va desde la frecuencia de la señal del campo magnético de excitación hasta 1 MHz. La amplitud de las componentes de alta frecuencia de la señal de RMB se amortigua exponencialmente debido a las pérdidas por corrientes de remolino durante el movimiento de las paredes de dominios [1,3].

Estudios realizados particularmente en aceros han demostrado que la señal de RMB no sólo es sensible a la microestructura del material sino también a diferentes propiedades físicas. El análisis del RMB proporciona información de los niveles de esfuerzo y deformación plástica y elástica [3-7], de las transformaciones metalúrgicas debido a tratamientos térmicos [8, 9], del contenido de carbono [10, 11] y de la dureza del material [4, 12].

Esta técnica magnética ha ganado aceptación en el área del desarrollo de métodos de END de materiales teniendo en cuenta las potencialidades señaladas. Desde el punto de vista tecnológico, contar con un método de END que permita la detección de cualquier anomalía en las estructuras de acero y la evaluación de propiedades magnéticas de los aceros, tiene un gran impacto industrial en la mayoría de las áreas económicas en donde se utiliza este material.

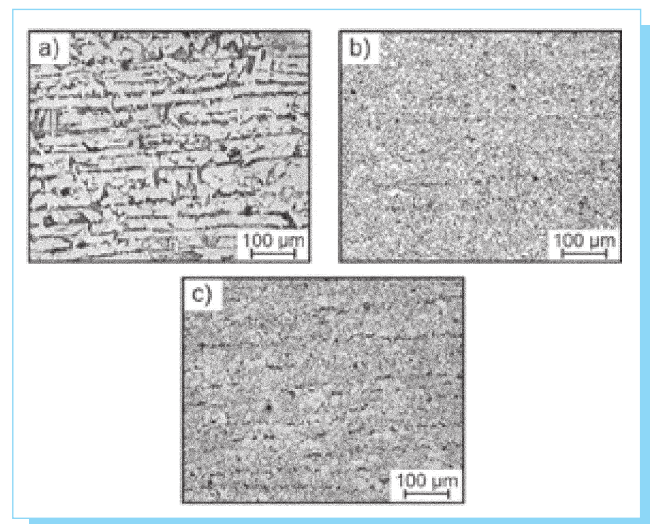
El objetivo de este trabajo es demostrar que las mediciones de RMB pueden ser utilizadas para caracterizar aceros API - 5L. Se estudiaron tres tipos de aceros: grado X52, X56, y X60. Las muestras utilizadas fueron obtenidas de secciones retiradas de ductos de transporte de hidrocarburos en PEMEX Región Sur. Se demuestra que a partir de los parámetros extraídos de la señal de RMB, como son el valor RMS, la energía de la señal, y su envolvente, se puede diferenciar entre el EFM y el EDM del ducto.

## 4. Desarrollo

### 4.1. Materiales

Los ductos de petróleo y gas son fabricados de acero magnéticamente anisotrópico, donde los ejes de fácil (EFM) y difícil (EDM) magnetización se encuentran en la dirección longitudinal y transversal del tubo, respectivamente. Las muestras de acero API-5L grado X52, X56 y X60 se maquinaron obteniendo piezas cuadradas de 75 mm x 75 mm con espesor de 3 mm.

La tabla 1 muestra la composición química de los aceros API-5L grado X52, X56 y X60. En la Fig. 1 se muestra la microestructura típica de las muestras de acero estudiadas, con el EFM (dirección de laminado) de forma horizontal. El acero grado X52 presenta una microestructura de dos fases distintamente visible (ferrita y perlita) sobresaliendo a lo largo de la dirección de laminado. La microestructura de los aceros grado X56 y X60 consiste también de dos fases las cuales son insignificantes en comparación con la del acero grado X52.



**Fig. 1.** Comparación de la microestructura (el EFM es horizontal) de las muestras de los aceros API-5L grado a) X52, b) X56, y c) X60.

**Tabla 1.** Composición química (wt%) de las muestras de los aceros investigados. El resto al 100% es Fe.

Elemento	X52	X56	X60
C	0.210	0.100	0.080
Mn	1.210	1.510	1.090
Si	0.050	0.310	0.260
P	0.021	0.014	0.010
S	0.019	0.002	0.004
Cr	0.020	0.030	0.010
Ni	0.020	0.020	0.020
V	0.000	0.000	0.080
Ti	0.000	0.020	0.000
Cu	0.050	0.010	0.300

La tabla 2 muestra los valores de la polarización remanente ( $J_R$ ) y el valor de la coercitividad ( $H_C$ ) de estos materiales a lo largo de las direcciones del EFM y del EDM [13]. Como se puede apreciar, los valores de  $J_R$  y  $H_C$  siempre son mayores y menores, respectivamente, en la dirección del EFM para cada material. Estas diferencias muestran claramente la presencia de anisotropía magnética en estos aceros.

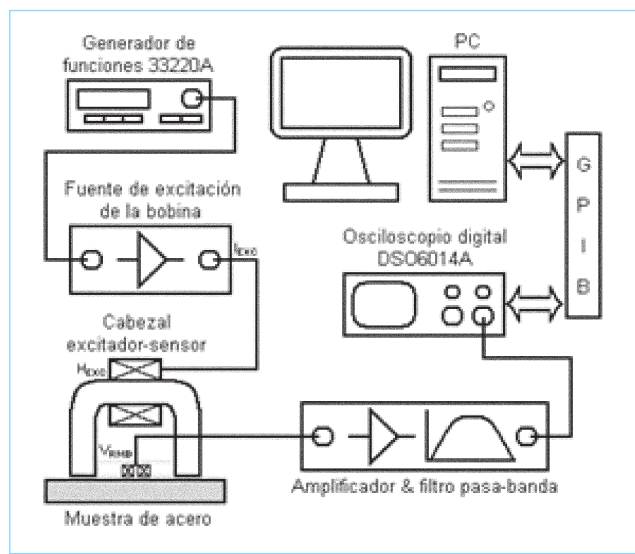
#### 4.2. Sistema experimental

La Fig. 2 muestra el diagrama de bloques del sistema experimental para la medición de la señal de RMB en aceros. La parte principal del sistema lo constituye el cabezal excitador-sensor que se utiliza para magnetizar las muestras de acero y detectar la señal de RMB. Este cabezal, como se muestra en la Fig. 3, está formado por una herradura de Fe-Si con permeabilidad diferencial máxima  $\mu' \sim 50\ 000$ , una bobina de campo magnético con 1 000 vueltas distribuidas en 27 capas, y el sensor de RMB.

El sensor de RMB es una bobina de inducción comercial tipo FS100/2 con un área efectiva  $A_{ef} = 112\text{ cm}^2$ , obtenida de la

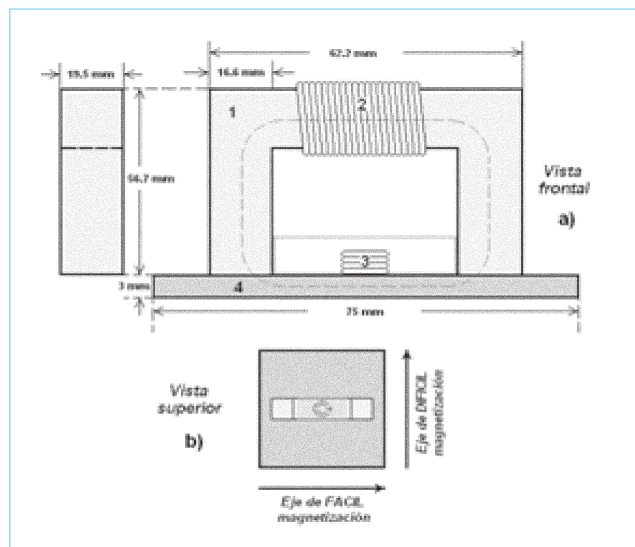
**Tabla 2.** Valores de  $J_R$  y  $H_C$  de los aceros estudiados en las direcciones de los EFM y EDM [13].

Acero	$H_C$ (A/m)	$J_R$ (T)
X52-EFM	614	0.85
X52-EDM	708	0.54
X56-EFM	855	1.05
X56-EDM	982	0.69
X60-EFM	578	0.88
X60-EDM	620	0.70



**Fig. 2.** Diagrama de bloques del sistema experimental para la medición del RMB.

compañía Magnet-Physik Dr. Steingroover GmbH [14]. El cabezal excitador-sensor se conecta a dos secciones electrónicas diferentes. Por un lado el amplificador de potencia se utiliza para suministrar una corriente alterna de 10 Hz de



**Fig. 3.** a) Esquema del cabezal excitador-sensor de RMB, 1) Núcleo de hierro, 2) Bobina de campo magnético, 3) Bobina de detección de RMB, 4) Muestra de acero; b) Representación esquemática de la posición del cabezal cuando se mide a lo largo del eje de fácil magnetización.

hasta 1A a la bobina de campo magnético para que genere una intensidad de campo magnético máximo de 5.2 kA/m.

El generador de funciones tipo Agilent 33200A se utiliza para seleccionar los parámetros de amplitud y frecuencia del campo magnético de excitación. Al aplicar el campo magnético se produce la magnetización en la muestra de acero y se generan los pulsos eléctricos que componen la señal de RMB. La segunda sección electrónica es la de acondicionamiento formado por un amplificador con ganancia 1000 y un filtro pasa-banda con frecuencias de corte  $f_{inferior}=1$  kHz y  $f_{superior}=500$  kHz. La frecuencia de corte inferior permite eliminar la componente de frecuencia del campo magnético de excitación. La frecuencia de corte superior se seleccionó tomando en cuenta la característica amplitud-frecuencia del amplificador utilizado, donde su frecuencia de 3 dB está alrededor de los 975 kHz. La señal de RMB se registra por medio del osciloscopio digital tipo Agilent DSO6014A. El osciloscopio está conectado vía interfase GPIB a una computadora personal para la transferencia y el procesamiento de la señal. La descripción detallada del amplificador y el filtro pasa-banda se puede encontrar en [15, 16].

Al colocar el cabezal excitador-sensor sobre una muestra de acero, la herradura y la muestra de acero forman un circuito magnético cerrado [1, 17]. En la Fig. 3 se muestra la configuración del cabezal excitador-sensor y la dirección de los ejes de fácil y difícil magnetización de la muestra.

La bobina de detección de RMB al estar colocada sobre la superficie de la muestra tiene su eje de sensibilidad normal a ella. A partir del análisis de las condiciones de contorno de la densidad de flujo magnético  $B$  se cumple que las componentes de  $B$  son continuas a través de la interfase entre dos medios [17], siendo:

$$\vec{B}_{n-aire} = \vec{B}_{n-acero} \quad (1)$$

La magnetización y la densidad de flujo magnético están directamente relacionadas por medio de [1, 17]:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \quad (2)$$

donde  $\mu_0$  es la permeabilidad en el vacío,  $H$  la intensidad de campo magnético y  $M$  la magnetización del material. Teniendo en cuenta que la dirección del campo magnético aplicado es perpendicular al eje de sensibilidad de la bobina de detección, el voltaje inducido en la bobina está directamente relacionado con la magnetización.

Durante el procesamiento de la señal de RMB se obtienen tres parámetros: la envolvente de la señal, el valor RMS

(RMS) y el valor de energía (Energía) de la señal de RMB. Estos parámetros pueden ser relacionados con las propiedades de los aceros API-5L.

Los parámetros extraídos de la señal son: el valor RMS,

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V^2(t) dt} \quad (3)$$

el valor de energía de la señal,

$$Energía = \sum_i^n \left[ \int_0^{T_i} V_i^2(t) dt \right] \quad (4)$$

y la envolvente de la señal de RMB,

$$Env_{RMB} = RMS_{\Delta T}(t) \quad (5)$$

que se compone de 100 puntos obtenidos para cada  $\Delta T = 1$  ms sobre el periodo  $T = 0.1$  s de la señal de RMB.

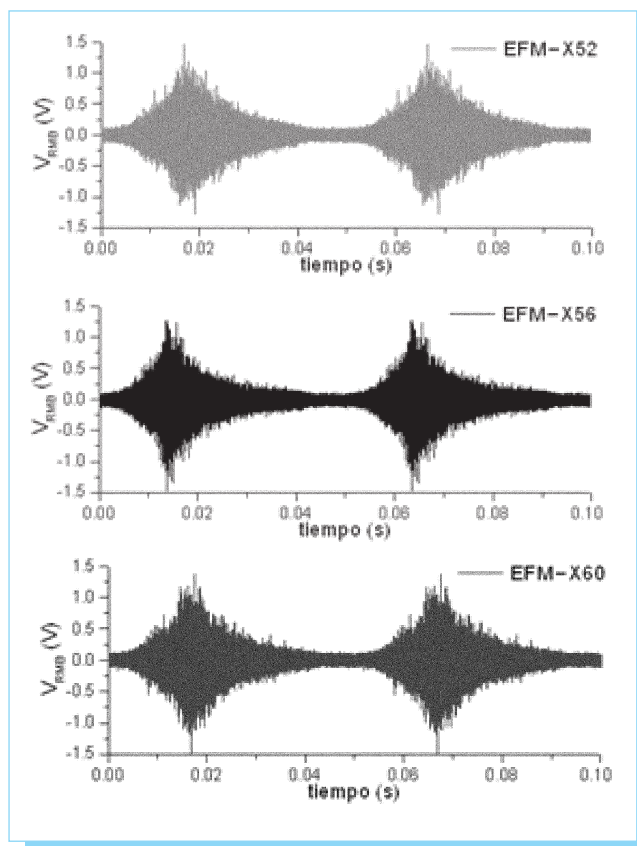
El método de medición para la detección del RMB en las muestras de acero utilizando una herradura para aplicar el campo magnético externo es ampliamente utilizado en aplicaciones industriales en donde no es posible obtener muestras para su correspondiente análisis [1, 14, 18].

### 4.3. Resultados y discusión

Las Fig. 4 (a-c) y Fig. 5 (a-c) muestran las señales de RMB para cada acero (X52, X56, X60) obtenidas en las direcciones del EFM y el EDM, respectivamente.

A partir de un análisis cualitativo, en la Fig. 4 (a-c) se puede apreciar que existen diferencias en la forma entre las señales de los tres aceros para cuando se realizó la medición a lo largo del EFM. Lo mismo ocurre para el caso del EDM aunque de manera menos pronunciada, véase la Fig. 5 (a-c). Sin embargo, cuando hacemos una comparación entre las dos direcciones analizadas de cada acero (EFM y EDM) como se muestran en las Fig. 4 a) y Fig. 5 a) para el X-52, Fig. 4 b) y Fig. 5 b) para el X56, y Fig. 4 c) y Fig. 5 c) para el X60, se puede apreciar que no sólo las señales cambian su forma dependiendo de la dirección del campo aplicado. El valor máximo de las señales en la dirección del EFM es mayor que 1 V mientras que el valor máximo en la dirección del EDM es menor que esta cifra. Esto se relaciona directamente con la anisotropía magnética del material como se mostró en la tabla 2. Este hecho nos permite asegurar que es posible determinar cada tipo de acero por la forma de la señal, y al mismo tiempo diferenciar entre el EFM y el EDM para un mismo material por simple inspección de la señal de RMB.



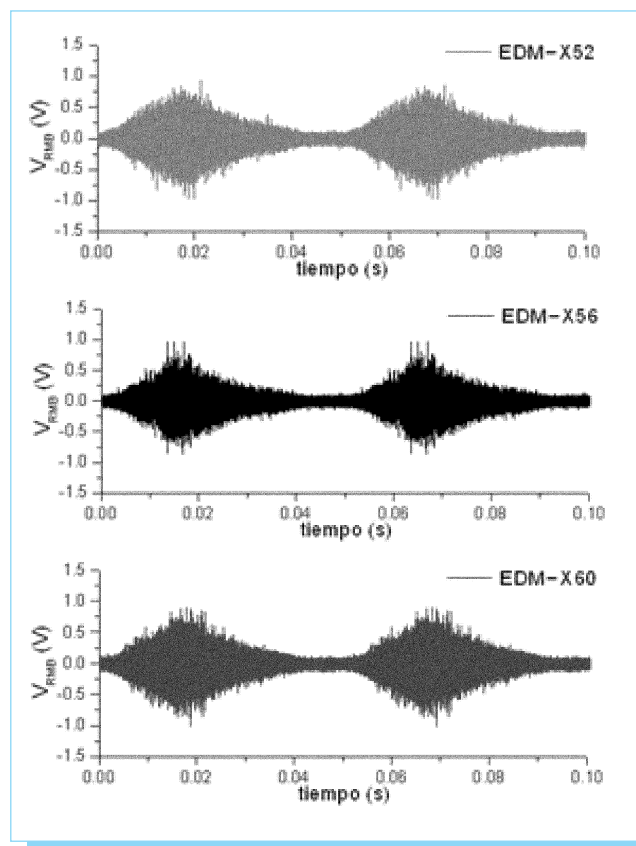


**Fig. 4.** Señales de RMB obtenidas en la dirección del EFM para los aceros API-5L grado a) X52, b) X56, y c) X60.

Este análisis cualitativo tiene la desventaja de que no permite cuantificar sus diferencias para poder relacionar las señales con las propiedades de los materiales.

En las Fig. 6 (a-c) y Fig. 7 (a-c) se muestran las señales de la envolvente de RMB obtenidas utilizando la expresión (5) en el EFM y en el EDM de cada acero, respectivamente. Se observa que existe una diferencia más notable en la forma de la señal envolvente de RMB en el EFM respecto al EDM de cada acero.

El valor máximo de la envolvente de la señal de RMB se reporta en cada una de las gráficas. Se puede apreciar que siempre se cumple que este valor es mayor para el caso de la medición en el EFM con respecto al EDM. Los valores máximos de la señal envolvente para los aceros X52 y X60 son iguales, pero las envolventes son ligeramente diferentes. Este hecho está relacionado con el proceso de promediación al obtener la envolvente que hace que se pierdan detalles como es el valor máximo. Por ejemplo, el valor de  $H_C$  de los aceros X52 y X60 en las direcciones del EFM y del EDM difieren en un 6 y 12%, respectivamente. Si hacemos la misma compa-

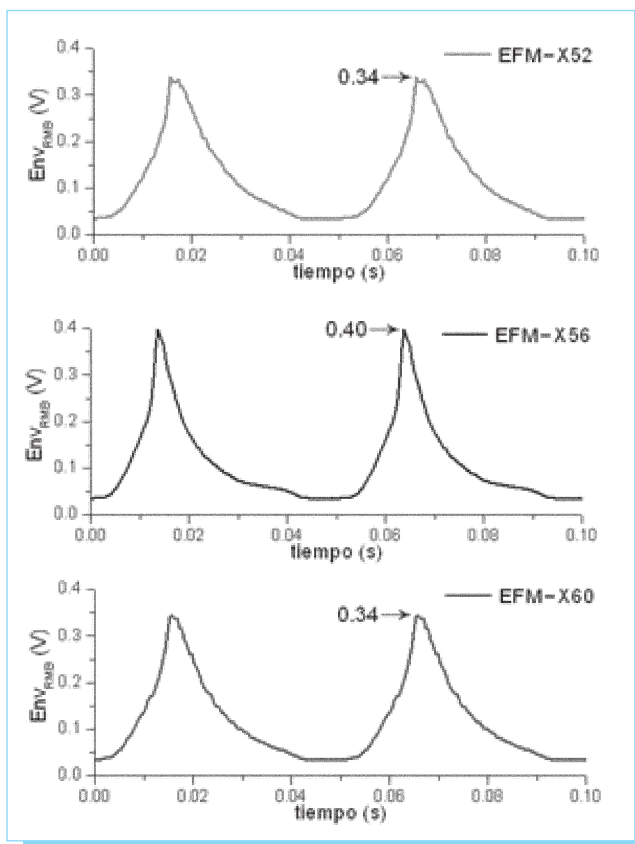


**Fig. 5.** Señales de RMB obtenidas en la dirección del EDM en los aceros API-5L grado a) X52, b) X56, y c) X60.

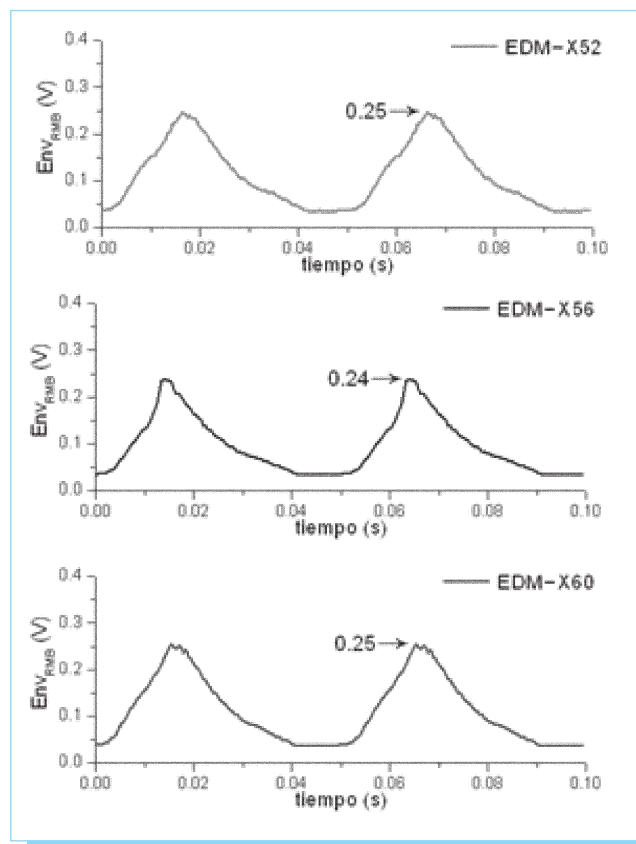
ración, para el caso de los aceros X56 y X52, notamos que la diferencia es del orden del 28%. Al comparar los valores máximos de la envolvente para los aceros X56 y X52 en el caso del EFM podemos ver que la diferencia entre ellos se reduce al 15%. Esto nos indica claramente que el efecto del suavizado durante el proceso de obtención de la envolvente de la señal reduce la posibilidad de diferenciar entre dos aceros con características magnéticas similares como es el caso de los aceros X52 y X60.

Está demostrado que la mejor manera de caracterizar los materiales utilizando las mediciones de RMB es partir del valor RMS y la energía de la señal [19, 20].

En la tabla 3 se muestra una relación de los valores RMS y de energía calculados a partir de las ecuaciones (3) y (4), respectivamente. Ambos valores fueron obtenidos para cada uno de los aceros estudiados a lo largo de los dos ejes de magnetización y promediados sobre diez mediciones. La desviación estándar fue de 0.8 y 1.5% para los valores RMS y de energía, respectivamente.



**Fig. 6.** Señales envolventes de RMB obtenidas en la dirección del EFM en los aceros API-5L grado a) X52, b) X56, y c) X60.



**Fig. 7.** Señales envolventes de RMB obtenidas en la dirección del EDM en los aceros API-5L grado a) X52, b) X56, y c) X60.

La tabla 3 nos muestra la diferencia en % que existe entre los valores RMS y de energía de la señal entre ambos ejes para un mismo material. Se puede ver que la diferencia es mayor en ambos casos para el acero X56. Eso está directamente relacionado con la diferencia de los valores de  $J_R$  y  $H_C$  entre el EFM y el EDM (véase la tabla 2). Para el caso de los aceros X52 y X60, los valores RMS y de energía de la señal presentan diferencias similares entre los dos ejes, lo que está relacionado con

sus propiedades magnéticas. Este hecho demuestra que las mediciones de RMB se deben utilizar para estudiar un solo material, como puede ser las variaciones del contenido de carbono, el cambio de fases al someterlo a tratamientos térmicos, etc.

A partir de los valores de la tabla 3 se puede afirmar que el acero X56 tiene una anisotropía magnética mayor que los aceros X52 y X60. Así también, podemos obtener la ubicación del EFM y del EDM de manera cuantitativa ya que como se muestra en la tabla 3 el valor de los parámetros es muy diferente en ambos ejes para los tres aceros.

**Tabla 3.** Valores RMS y de energía de la señal de RMB de los aceros grado X52, X56 y X60.

Muestra	RMS (mV)			Energía (mV <sup>2</sup> .s)		
	EFM	EDM	%	EFM	EDM	%
X52	148	128	13	1100	827	25
X56	142	113	20	1012	642	36
X60	147	130	11	1084	846	22

### 5. Conclusiones

Las conclusiones de este trabajo son:

1. Se demostró que la señal de ruido magnético Barkhausen es diferente para cada tipo de acero debido a la diferencia en la composición química y microestructural.
2. Se comprobó que se pueden detectar los ejes de fácil y difícil magnetización a partir de los parámetros RMS y de

energía de la señal de ruido magnético Barkhausen.

3. La envolvente de la señal de ruido magnético Barkhausen permite detectar la posición de los ejes de fácil y difícil magnetización, pero no es suficiente para diferenciar materiales que tienen propiedades magnéticas similares.
4. Los valores RMS y de energía de la señal permiten detectar la posición de los ejes de magnetización pero tampoco permiten diferenciar materiales con propiedades magnéticas similares.
5. Se demuestra que con las mediciones de ruido magnético Barkhausen es muy difícil poder diferenciar o caracterizar aceros con propiedades magnéticas similares.

### Agradecimiento

P. Martínez-Ortiz agradece al CONACYT y a la SIP-IPN por las becas otorgadas. Este trabajo fue parcialmente financiado por el proyecto SIP-20101027.

### 6. Referencias

- [1] Jiles, D. (1991). *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials*. Chapman&Hall, 2-6 Boundary Row, London SE1 8HN.
- [2] Willcox M.&Mysak T. (2000). *An Introduction to Barkhausen Noise and Its Applications*, Insight NTD Equipment Ltd.
- [3] A. Flammini, D. Marioli, E. Sisinni and A. Taroni, 'Instrumentation and Signal Conditioning for Barkhausen Noise Measurement', *Proceedings of XVII IMEKO 2003*, June 22-27 2003, pp. 645-649.
- [4] T. Garstka, 'The influence of product thickness on the measurements by Barkhausen Noise method', *JAMME* Volume 27, Issue 1, March 2008, pp. 47-50
- [5] Ping WANG, Shougao ZHU, Gui Yun TIAN, Haitao WANG and Xin WANG, 'Stress measurement using magnetic Barkhausen noise and metal magnetic memory testing', *17th World Conference on Nondestructive Testing*, 2008 Shanghai, China.
- [6] M. Alberteris Campos, et al. 'Characterization of the elastic-plastic region in AISI/SAE 1070 steel by the magnetic Barkhausen noise', *NDT&E Int* (2008), doi:10.1016/j.ndteint.2008.03.003.
- [7] J. A. Pérez-Benitez, J. Capó-Sánchez, J. Anglada-Rivera and L. R. Padovese, 'A study of plastic deformation around a defect using the magnetic Barkhausen noise in ASTM 36 steel', doi: 10.1016/j.ndteint.2006.12.002.
- [8] A Hug-Amalric and P. Meilland, 'Magnetic Barkhausen noise measurement potentialities for metallurgical transformations. Characterization in multi-phase high strength steel', *ECNDT 2006-Mo.2.2.3*.
- [9] J. Grum and B. Penik, *Calibration of Various Sensor Units by Using Different Parameters of the Magnetic Barkhausen Noise*, Faculty of Mechanical Engineering Ljubljana, Slovenia.
- [10] V. Augutis and Z. Nakutis, 'Barkhausen noise measurement and its applications', *Insight* Vol. 43 No. 6 June 2001.
- [11] J. A. Pérez-Benitez and J. Capó-Sánchez, 'Modeling of the Barkhausen jump in low carbon steel', *J. Appl. Phys.*, doi:10.1063/1.2840058, 2008.
- [12] V. Augutis, R. Ramanauskas and J. Vilys, 'Determination of metal surface hardened layer depth using magnetic Barkhausen noise', *Materials Science*, Vol. 12, No. 1. 2006.
- [13] R. Grössinger, F. Keplinger, N. Mehmood, J. H. Espina-Hernández, J. Araujo, C. Eisenmenger, K Poppenberger and J. M. Hallen, 'Magnetic and Microstructural Investigations of Pipeline Steels', *IEEE Trans. Magn.*, vol. 44, no. 11, pp. 3277-3280, 2008.
- [14] <http://www.magnet-physik.de/>
- [15] P. Martínez-Ortiz, J. H. Espina-Hernández y E. Ramírez-Pacheco, 'Desarrollo de un sistema de medición de ruido magnético barkhausen en materiales ferromagnéticos', *Memorias del Congreso Internacional CIINDET 2009*, octubre de 2009.
- [16] P. Martínez-Ortiz, J. H. Espina-Hernández y J. M. Hallen, 'Sistema de Medición de Ruido Magnético Barkhausen para la Caracterización de Aceros API-5L', *Memorias del Congreso CNIES 2009*, noviembre de 2009.
- [17] Martin A. Plonus. (1994). *Electromagnetismo Aplicado*. Reverte S.A., España, pp. 362-364.
- [18] Don E. Bray, Roderic K. Stanley. (1996). *Nondestructive Evaluation: A tool in Design, Manufacturing, and Service*. Taylor&Francis Group, USA.
- [19] L. Clapham, C. Heald, T. Krause, D. L. Atherton, P. Clark 'Origin of a magnetic easy axis in steel', *J. App. Phys.*, vol. 86, no. 3, pp. 1574-1580, 1999.
- [20] S. White, T. Krause, L. Clapham, 'Control of flux in magnetic circuits for Barkhausen noise measurements', *Meas. Sci. Technol.*, vol. 18, pp. 3501-3510, 2007.

### Periódica

Índice de Revistas Latinoamericanas en Ciencias  
<http://www.dgbiblio.unam.mx/>