

Correlación del RMB y el ciclo de histéresis en aceros al Si

Correlation of the MBN and the hysteresis cycle in Si steels

Presentación: 21/08/2024

M. R. Neyra Astudillo

Facultad Regional Delta, Universidad Tecnológica Nacional (UTN), San Martín 1171, Campana, Buenos Aires, Argentina.
Dpto. Coordinación Proyecto ICES, Desarrollo Tecnológico y Proyectos Especiales, Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), Buenos Aires, Argentina.
neyra@cnea.gov.ar

A. Melini

Facultad Regional Delta, UTN, San Martín 1171, Campana, Buenos Aires, Argentina.
amellini@frd.utn.edu.ar

M. Gómez

Facultad Regional Delta, UTN, San Martín 1171, Campana, Buenos Aires, Argentina.
Dpto. Coordinación Proyecto ICES, Desarrollo Tecnológico y Proyectos Especiales, CNEA, Buenos Aires, Argentina.
mpgomez@cnea.gov.ar

Resumen

En la actualidad los aceros al Si también llamados aceros eléctricos, son usados por ejemplo en motores y transformadores, de forma de aprovechar su calidad magnética, manufacturabilidad y bajo costo. En particular, la denominada “calidad magnética” está referida a las propiedades magnéticas que se demandan de dichos materiales, tales como una alta permeabilidad y una baja histéresis magnética. En este trabajo se estudió la correlación de la técnica del ruido magnético Barkhausen (RMB) y el ciclo de histéresis en aceros eléctricos. Para ello, se ensayaron tres chapas de aceros al Si de grano orientado (M4, M5 y M6, según el sistema europeo EN). Se encontró la respuesta del valor RMS es inversa al campo coercitivo. Cuando aumenta el espesor de la muestra aumenta las pérdidas de energía y disminuye el valor RMS del RMB.

Palabras clave: RMB, acero eléctrico, ciclo de histéresis.

Abstract

Currently, Si steels, also called electrical steels, are used, for example, in motors and transformers, in order to take advantage of their magnetic quality, manufacturing capacity and low cost. In particular, the so-called “magnetic quality” refers to the magnetic properties that are demanded from said materials, such as high permeability and low magnetic hysteresis. In this work, the correlation of the magnetic Barkhausen noise (MBN) technique and the hysteresis cycle in electrical steels was studied. For this, three grain-oriented Si steel sheets were tested (M4, M5 and M6, according to the European EN system). The response of the RMS value was found to be inverse to the coercive field. When the thickness of the sample increases, the losses increase. Of energy and decreases the RMS value of the MBN

Keywords: MBN, electrical steel, hysteresis loop.

Introducción

El Ruido Magnético Barkhausen (RMB) es una técnica no destructiva para el ensayo de materiales ferromagnéticos. Es una técnica muy sensible a la microestructura, impurezas y otros defectos de los aceros, lo que permite investigar el estado de los mismos, incluyendo su orientación cristalográfica. Esta técnica ocurre cuando las paredes del dominio interactúan con heterogeneidades microestructurales como los bordes de grano, inclusiones, precipitados, etc. Los llamados “saltos de Barkhausen” en materiales magnéticos pueden deberse a efectos microscópicos debido al movimiento irregular de paredes de dominio bien definidas o a escala fina debido al movimiento microscópico estocástico de segmentos de paredes, aunque ambos son estrechamente dependientes (Cullity and Graham, 2009; Stefanita, 2008).

Las pérdidas magnéticas se dividen tradicionalmente en componentes de histéresis, corrientes parásitas y exceso de pérdidas. La pérdida de histéresis se genera cuando las paredes del dominio se fijan y liberan debido a faltas de homogeneidad en un material (Cullity and Graham, 2009; Stefanita, 2008). Generalmente se cree que la pérdida de histéresis por ciclo es independiente de la frecuencia de magnetización, aunque los primeros trabajos todavía arrojan dudas sobre esta suposición. Sin embargo, se supone ampliamente que existe una estrecha correlación entre RMB y el fenómeno de histéresis, aunque el exceso de pérdidas también está relacionado con los saltos de Barkhausen (Dlala, et al., 2010).

En este trabajo se estudió la correlación de la técnica del RMB y el ciclo de histéresis en aceros eléctricos de grano orientado (GO). Para ello, se ensayaron tres chapas de aceros al Si de GO (M4, M5 y M6, según el sistema europeo). Para las muestras menores de 0.35mm de espesor, se encontró una relación inversa entre el valor cuadrático medio (RMS) y campo coercitivo.

Desarrollo

Materiales

Se estudiaron placas de acero al Si, proporcionadas por la Empresa Electropart Córdoba S.A. En la Figura 1 se muestra una de las fotografías de las placas estudiadas, con una flecha la dirección de laminación (DL) indicada por el fabricante. Las dimensiones de las probetas para la placa de GO son 25.5 cm x 17 cm x 0.23 cm. En la Tabla 1 se indica Estándares de rendimiento electromagnético.



Figura 1. Fotografía de la placa de acero al Si de GO

| Calidad | Espesor (mm) | Pérdidas 1.7 T, 50 Hz (W/kg) |
|---------|--------------|------------------------------|
| M4 | 0,27 | 1,24 |
| M5 | 0,30 | 1,4 |
| M6 | 0,35 | 1,5 |

Tabla 1. Estándares de rendimiento electromagnético, Electropart Córdoba S.A.

Medición del RMB

Para estudiar la correlación entre los parámetros del RMB y el ciclo de histéresis, en aceros al Si se generó el campo de excitación del yugo con una tensión sinusoidal de 10 Hz y una amplitud de 1 V, producida por un generador, que luego era amplificada. La bobina sensora del RMB estaba colocada en el centro del yugo. El amplificador de esta bobina sensora tiene una banda de paso de 5 kHz a 200 kHz. El yugo fue ubicado sobre la dirección 0°-180° de una circunferencia dibujada sobre la probeta, de modo que la dirección de laminación y las líneas del campo coincidieran con la dirección 0°-180°. Luego se variaba la dirección del campo girando el yugo a 0°, 45° y 90°. Se midieron 10 repeticiones por cada ángulo. Todas las señales fueron registradas en un osciloscopio digital PicoScope 5000 Series. En la Figura 2 se muestra la fotografía del sistema de medición del RMB.



Figura 2. Fotografía del Sistema Experimental del RMB.

Medición del ciclo de histéresis

Para medir el ciclo de histéresis se usaron las mismas condiciones del RMB. El campo de excitación se generó mediante una bobina colocada en una de las patas del yugo, con una frecuencia de 10 Hz y una amplitud de 1 V. La bobina sensora se ubicó en la otra pata del yugo. El yugo fue orientado inicialmente sobre la dirección 0°-180° de una circunferencia dibujada sobre la probeta, respecto de la dirección de laminación, tal como se midió el RMB. Luego se rotó el yugo en los mismos ángulos que en el RMB: 0°, 45° y 90°. Todas las señales fueron registradas en un osciloscopio digital PicoScope 5000 Series. En la Figura 3 se muestra la fotografía del sistema de medición del ciclo de histéresis.



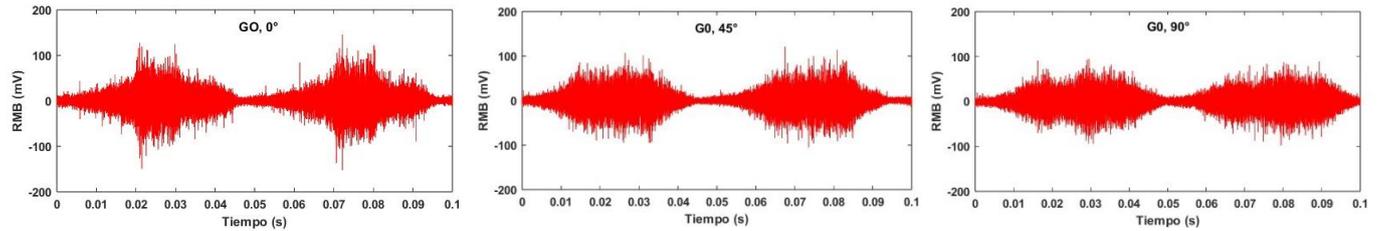
Figura 3. Fotografía del Sistema Experimental del ciclo de histéresis.

Resultados y discusión

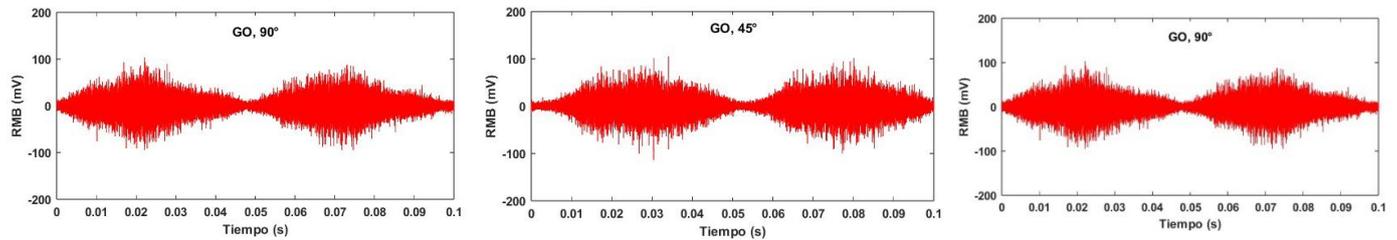
Análisis del RMB

Se llevaron a cabo mediciones en los 3 aceros M4, M5 y M6, en 3 orientaciones diferentes: 0° , 45° y 90° . Por cada orientación se midieron 10 repeticiones. La frecuencia de muestreo de la señal fue de 500 kHz/s. En la Figura 4, se muestran las señales de RMB de los 3 aceros medidos y para las diferentes orientaciones. Se observa que la forma de la señal de RMB cambia según el tipo de acero y el ángulo medido. Además, se ve que la amplitud del RMB disminuye con el aumento del espesor. La mayor amplitud en los 3 aceros es para el ángulo de 0° coincidiendo con la DL.

M4



M5



M6

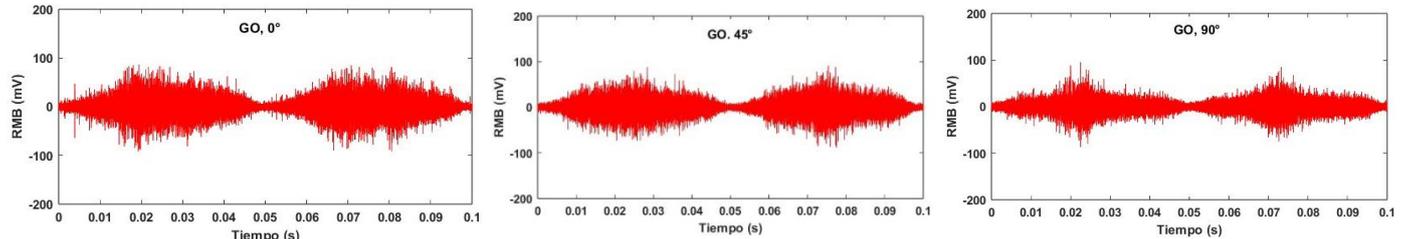


Figura 3. Señales de RMB a) M4, b) M5 y c) M6, para los ángulos: 0° , 45° y 90°

En la Figura 4 se muestra el valor RMS del RMB de M4, M5 y M6 vs. los ángulos: 0° , 45° y 90° . La señal de RMB mostró ser mayor en la dirección de laminación (DL), coincidiendo con la dirección del eje de fácil magnetización. (Campos et. al, 2011). Además, se ve que para el acero M6 de mayor espesor el valor RMS es menor.

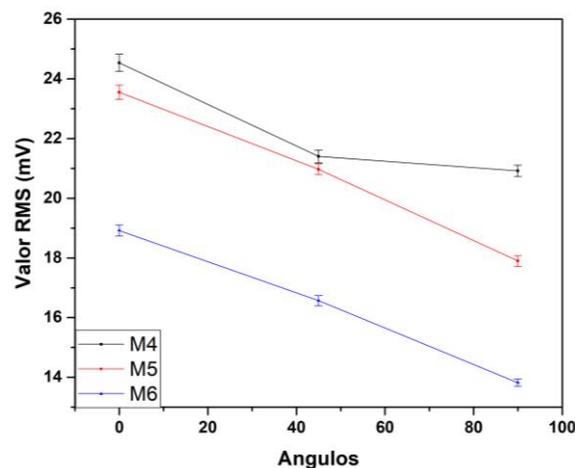


Figura 4. Valor RMS del RMB de M4, M5 y M6 vs. ángulos: 0° , 45° y 90° .

Análisis del ciclo de histéresis

Para correlacionar con la respuesta del RMB se midió el ciclo de histéresis con las mismas condiciones de excitación. En la Figura 5 se muestra la superposición de los ciclos de histéresis del acero al Si con GO: M4, M5 y M6. Se observa que a medida que aumenta el espesor de la muestra aumenta la saturación de magnetización, se produce una rotación del ciclo de histéresis en el sentido anti horario. Desde la muestra de menor espesor M4 (0.27 mm), M5 (0.30 mm) y M6 (0.35 mm)

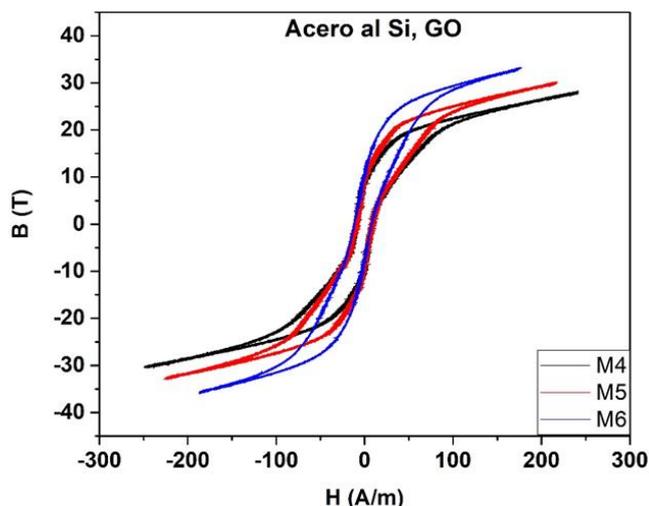


Figura 5. Superposición de las curvas del ciclo de histéresis para los aceros al Si de GO: M4, M5 y M6.

En la Figura 6 a) se muestra una ampliación del ciclo de histéresis y b) campo coercitivo en función de sus ángulos: 0°, 45° y 90°, para los aceros M4, M5 y M6. Para los aceros al Si de GO mencionados anteriormente, se observa que el campo coercitivo aumenta para los ángulos de 45° y 90°. Además, se ve que para el acero M6 de mayor espesor el campo coercitivo es mayor por lo consiguiente tiene mayores pérdidas de energía, tal como se observa en la Tabla 1.

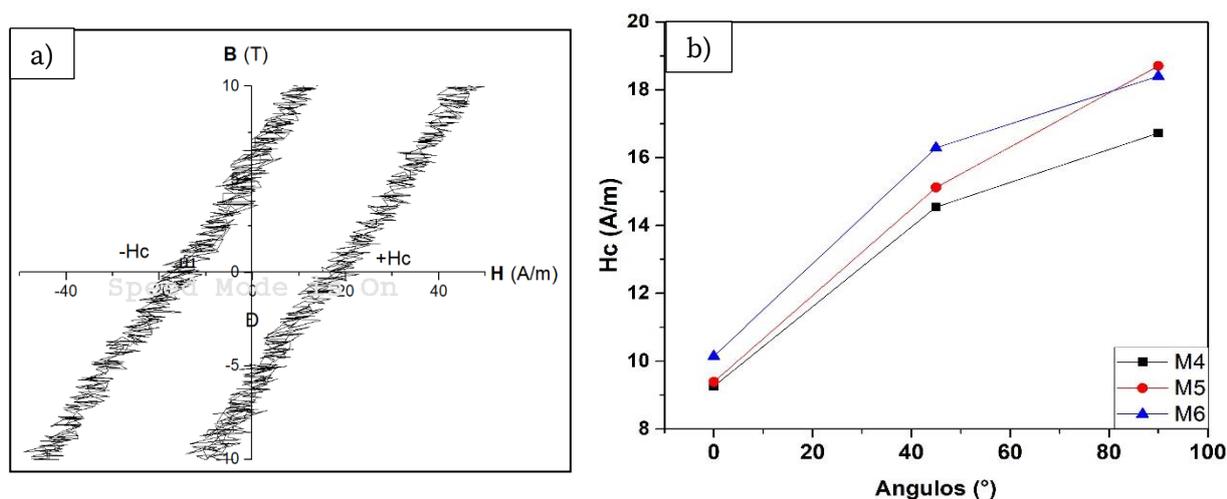


Figura 6. a) Ampliación del ciclo de histéresis y b) Campo coercitivo vs. ángulos: 0°, 45° y 90°, para los aceros estudiados.

En la Figura 7 se muestra el valor RMS del RMB, el campo coercitivo para cada placa de acero al Si. Se observa que el valor RMS tiene un comportamiento inverso con el campo coercitivo. A medida que aumenta el espesor de la muestra aumenta el campo coercitivo por lo tanto aumenta las pérdidas de energía (Ver Tabla 1) y el valor RMS del RMB disminuye. Esto se podría deber a los efectos de amortiguación de las corrientes parásitas que afectan a muestras menores de 0.35mm (Birsan et al., 1996; Chukwuchekwa, 2011).

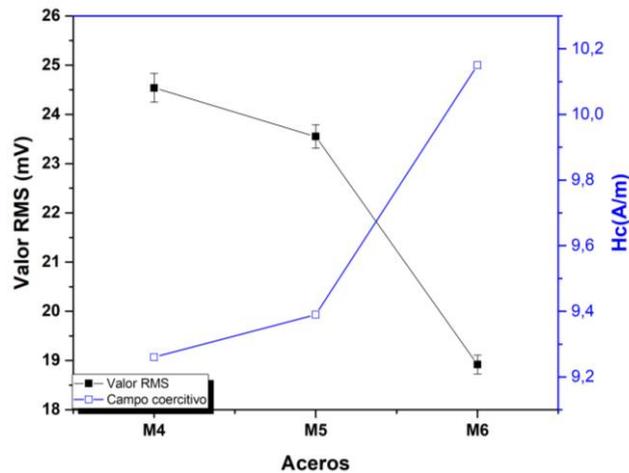


Figura 7. Valor RMS del RMB, y el campo coercitivo vs. aceros estudiados.

Conclusiones

Se ensayaron tres chapas de aceros al Si de GO (M4, M5 y M6, según el sistema europeo EN). Se estudió la correlación entre los parámetros magnéticos del ciclo de histéresis y el RMB.

Se observa que para las muestras con un espesor menor que 0.35mm, existe correlación inversa entre la amplitud, el valor RMS del RMB y campo coercitivo del ciclo de histéresis.

Mediante los valores RMS del RMB en función del ángulo de medición sobre la placa, se pudo revelar la existencia de una anisotropía magnética en el acero de GO. La señal de RMB mostro ser mayor en la dirección de laminación (DL), coincidiendo con la dirección del eje de fácil magnetización.

Las mediciones de RMB permitirían comparar fácilmente las pérdidas de energía de aceros al Si de grano orientado diferente y así conocer la calidad del acero.

Referencias

Birsan M., Szpunar J. A., Krause T. W., and Atherton D. L. (1996), Correlation between the Barkhausen noise power and the total power losses in 3% Si- Fe, *Journal of Applied Physics* 79, 6042 (1996); doi: 10.1063/1.362084.

Campos, M. F., Campos, M. A., Landgraf, F. J. G., and Padovese L. R. (2011), "Anisotropy study of grain oriented steels with Magnetic Barkhausen Noise", *Journal of Physics: Conference Series*, 303, 1-6.

Cullity B. D, Graham C. D. (2009), *Introduction to Magnetic Materials*, 2da Edition, Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, United States, 164-165.

Dlala, E., Belahcen A., Pippuri J., and Arkkio A., Interdependence of Hysteresis and Eddy-Current Losses in Laminated

Magnetic Cores of Electrical Machines, *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, VOL. 46, NO. 2, FEBRUARY 2010.

Stupakov O, Perevertov O., Stoyka V. and Wood R. (2010), "Correlation Between Hysteresis and Barkhausen Noise Parameters of Electrical Steels," in *IEEE Transactions on Magnetics*, 46, , 517-520,

Stefanita C. G. (2008), "From Bulk to Nano. The Many Sides of Magnetism, *Springer Series in Materials Science*, 19-38.

Nkwachukwu Chukwuchekwa, (2011), Investigation of magnetic properties and Barkhausen noise of electrical steel, A thesis submitted to the Cardiff University in candidature for the degree of Doctor of Philosophy Wolfson Centre for Magnetism Cardiff School of Engineering Cardiff University, United Kingdom.