



---

---

**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA  
MECÁNICA Y ELÉCTRICA**

SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

“Sistema de medición de ruido magnético Barkhausen en aceros”

TESIS

Que para obtener el Grado de:  
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA

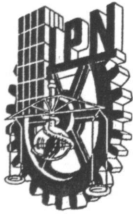
PRESENTA:

Ing. Pedro Martínez Ortiz

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. José Hiram Espina Hernández

MÉXICO, D.F. JULIO 2010.



# INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO

## ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de México, D. F. siendo las 09:30 horas del día 28 del mes de julio del 2010 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de E.S.I.M.E. ZAC. para examinar la tesis de grado titulada:

**“SISTEMA DE MEDICIÓN DE RUIDO MAGNÉTICO BARKHAUSEN EN ACEROS”**

Presentada por el alumno:

**MARTÍNEZ**

Apellido paterno

**ORTIZ**

materno

**PEDRO**

nombre(s)

Con registro: 

B	0	8	1	6	5	4
---	---	---	---	---	---	---

aspirante al grado de:

**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

### LA COMISIÓN REVISORA

Director de tesis

DR. JOSÉ HIRAM ESPINA HERNÁNDEZ

Presidente

DR. JOSÉ MANUEL DE LA ROSA VÁZQUEZ

Segundo Vocal

DR. RAÚL PEÑA RIVERO

Tercer Vocal

DR. ARGEO VÁZQUEZ MARTÍNEZ

Secretario

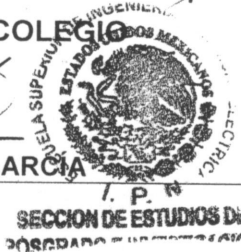
DR. ROBERTO LINARES Y MIRANDA

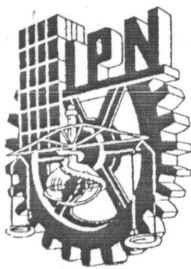
Suplente

DR. FRANCISCO JAVIER CALLEGOS FUNES

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

DR. JAIME ROBLES GARCÍA





**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

*CARTA CESIÓN DE DERECHOS*

En la Ciudad de México el día 28 del mes Julio del año 2010, el que suscribe Pedro Martínez Ortiz alumno (a) del Programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica con número de registro B081654, adscrito a Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME Unidad Zacatenco, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. José Hiram Espina Hernández y cede los derechos del trabajo intitulado Sistema de medición de ruido magnético Barkhausen, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección pmartinezo0200@ipn.mx, jhespina@gmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Pedro Martínez Ortiz

Nombre y firma



---

---

## Dedicatoria

A Elvia, mi esposa amada y a mi querido hijo Fabián, quienes siempre me ofrecen amor y confianza. El apoyo y ánimo que me proporcionaron han sido fundamentales para la realización de mis ideas.

A mi familia, a la querida familia de mi esposa, por el amor y apoyo incondicional que siempre han mostrado con el fin de que logre mis objetivos, dedico este trabajo.



## Resumen

En este trabajo se reporta el desarrollo de un sistema de medición de ruido magnético Barkhausen (RMB) en aceros. Se implementó la configuración típica de excitación-detección y se utilizó, además, un sensor Hall para la medición del campo magnético aplicado. Se diseñó e implementó el sistema electrónico para el funcionamiento del cabezal excitador-sensor y se caracterizaron los dispositivos que lo conforman para analizar su influencia en los parámetros extraídos de la señal de RMB: el valor RMS, el valor de Energía, y la envolvente de la señal. Se estudiaron tres tipos de aceros API-5L grado X52, X56 y X60. Las mediciones de RMB se realizaron en cada acero para los ejes de fácil magnetización y de difícil magnetización. Se comprobó la capacidad de las mediciones de RMB para diferenciar entre los ejes de fácil y difícil magnetización de los aceros. Se estudió la influencia de la intensidad de campo magnético de excitación en los parámetros extraídos y se determinó la condición óptima de excitación para obtener una mayor diferencia entre los parámetros de los ejes de magnetización. Se estudió la influencia del valor de la frecuencia de corte del filtro pasa-bajas en los parámetros de la señal y se determinó el mínimo contenido espectral de la señal de RMB para obtener resultados satisfactorios. Se estudió el efecto de tener la frecuencia de resonancia de la bobina de detección dentro de la banda de paso del amplificador y se determinó que solo ayuda a aumentar los valores de los parámetros obtenidos con respecto al caso en que la frecuencia de resonancia se encuentra fuera de la banda de paso del amplificador.



## Abstract

A magnetic Barkhausen noise (MBN) measurement system in steel is developed. The typical configuration of the excitation – detection head was implemented and, additionally, a Hall probe was attached to the head for measuring the applied magnetic field intensity. The electronic circuits of the excitation – detection head were designed and implemented, and the devices for signal conditioning were characterized to understand their influence on the signal extracted parameters: the RMS value, the Energy of the signal, and the envelope. Three types of API-5L steels, grade X52, X56, and X60, were studied. The MBN measurements were performed along the magnetic easy and hard axes for each material. The influence of the applied magnetic field intensity on the extracted parameters was studied, and the best case to obtain the biggest difference between those values for each magnetic axis was determined. The influence of the low-pass filter cutoff frequency is studied, and the minimum signal spectrum to obtain good results was determined. The effect of the natural frequency of the detection coil on the parameters when it is within the amplifier band-pass frequency, as compared with the case when it is not, shows that it only helps to amplify the parameters values.



## Acrónimos y Abreviaturas

- A: Área  
AC: Corriente alterna  
 $A_{ef}$ : Área efectiva de una bobina de inducción  
AWG: Medida del calibre de un alambre de cobre  
A/D: Conversión análogo-digital  
B: Densidad de flujo magnético o la magnitud del vector de inducción magnética expresada en unidades de Tesla [T]  
BC: Sistema formado por la bobina de detección de RMB y un capacitor conectado en paralelo  
BD: Bobina de detección sin cable  
BDC: Bobina de detección con cable  
 $B_r$ : Densidad de flujo magnético remanente  
C: Parámetro eléctrico de la capacidad distribuida de una bobina de inducción  
CAFr: Característica amplitud-frecuencia  
CFFr: Característica fase-frecuencia  
CMRR: Siglas del inglés *Common Mode Rejection Ratio*, definiendo el rechazo en modo común de un amplificador  
 $C_p$ : Capacitor conectado en paralelo con la bobina de detección de RMB para formar el sistema BC  
d: Diámetro del alambre de una bobina  
D: Diámetro medio de una bobina  
DC: Corriente directa  
EDM: Eje de difícil magnetización  
EFM: Eje de fácil magnetización  
END: Evaluación no destructiva  
Energía: Valor de la energía de una señal de RMB expresada en unidades de milivolt cuadrado segundo [ $mV^2 \cdot s$ ]  
Env: Envolvente de una señal de RMB  
 $Env_{m\acute{a}x}$ : Valor máximo de la envolvente de una señal de RMB  
f: Frecuencia  
 $f_c$ : Frecuencia de corte del filtro digital pasa-bajas  
 $f_{cFPA}$ : Frecuencia de corte del filtro pasa-altas  
 $f_r$ : Frecuencia de resonancia  
FCC: Fuente de corriente constante  
FDPB: Filtro digital pasa-bajas  
FFT: Siglas del inglés *Fast Fourier Transform*, definiendo la transformada rápida de Fourier  
FPA: Filtro pasa-altas  
G: Ganancia nominal del amplificador de señal de RMB  
GPIB: Siglas del inglés *General Purpose Interface Bus*, protocolo de comunicación  
GWB: Producto ganancia-ancho de banda  
H: Intensidad de campo magnético expresada en unidades de [A/m]  
 $H_c$ : Coercitividad de un material magnético



- $H_{CB}$ : Campo coercitivo para la densidad de flujo magnético  
 $H_{CJ}$ : Campo coercitivo para la polarización magnética  
 $H_N$ : Campo magnético equivalente de ruido  
 $H_T$ : Campo magnético tangencial en la muestra de acero  
 $I$ : Intensidad de corriente eléctrica expresada en unidades de Amperes [A]  
 $I_{FCC}$ : Corriente de salida de la fuente de corriente constante  
 $J$ : Polarización magnética o intensidad de magnetización  
 $J_r$ : Polarización remanente  
 $k$ : Coeficiente de anisotropía magnética  
 $k_B$ : Constante de Boltzmann  
 $L_s$ : Parámetro eléctrico de la inductancia de una bobina de inducción  
 $m$ : Momento magnético  
 $M$ : Magnetización  
 $M_e$ : Magnetización espontánea  
 $N$ : Número de vueltas de una bobina  
 $N_p$ : Numero de puntos para obtener la envolvente de una señal de RMB  
PC: Computadora personal  
 $R$ : Radio del par de bobinas de Helmholtz  
 $R_{DC}$ : Resistencia en corriente directa  
RMB: Ruido magnético Barkhausen  
RMS: Valor de la raíz cuadrática media de una señal de RMB expresada en unidades de Volts [V]  
 $R_s$ : Parámetro eléctrico de la resistencia de una bobina de inducción  
 $S_0$ : Sensibilidad de una bobina de inducción  
 $S_H$ : Sensibilidad del sensor de efecto Hall  
SH: Sensor de efecto Hall  
SNR: Siglas del inglés *signal-to-noise ratio*, definiendo la relación señal a ruido  
 $t$ : tiempo  
 $T$ : Temperatura  
T: Periodo  
 $U_N$ : Voltaje de ruido a la salida de una bobina ideal  
 $V$ : Volumen  
 $V$ : Volts  
 $V_0$ : Voltaje pico de salida de una bobina de inducción  
 $V_H$ : Voltaje de salida del sensor de efecto Hall  
 $V_{ind}$ : Voltaje inducido  
 $V_N$ : Voltaje de ruido térmico  
 $\Delta$ Energía : Diferencia entre el valor de Energía obtenido de la señal de RMB en el eje de fácil magnetización respecto al valor obtenido en el eje de difícil magnetización de un acero  
 $\Delta Env_{máx}$  : Diferencia entre el valor máximo de la envolvente obtenida de la señal de RMB en el eje de fácil magnetización respecto al valor obtenido en el eje de difícil magnetización de un acero  
 $\Delta f$  : Banda de frecuencia de ruido  
 $\Delta H_c$  : Diferencia entre la coercitividad de los ejes de magnetización (EFM y el EDM) de un acero





$\Delta J_r$  : Diferencia entre la magnetización remanente de los ejes de magnetización (EFM y EDM) de un acero

$\Delta RMS$  : Diferencia entre el valor RMS obtenido de la señal de RMB en el eje de fácil magnetización respecto al valor obtenido en el eje de difícil magnetización de un acero

$\Delta T$  : Periodo de promediación para obtener la envolvente de una señal de RMB

$\mu$  : Permeabilidad magnética

$\mu_0$  : Permeabilidad en el vacío

$\mu_r$  : Permeabilidad relativa

$\mu'$  : Permeabilidad diferencial máxima del núcleo de Fe-Si en forma de herradura

$\rho$  : Resistividad específica de un material conductor

$\rho_c$  : Resistividad específica del cobre

$\sigma$  : Conductividad específica de un material conductor

$\sigma_s$  : Desviación estándar

$\phi$  : Flujo magnético

$\phi_{máx}$  : Flujo magnético pico

$\omega$  : Frecuencia angular

$\Omega$  : Ohm, unidad de resistencia eléctrica



# Índice General

<b>Justificación</b> .....	1
<b>Introducción</b> .....	2
<b>Capítulo 1: Estado del arte y revisión bibliográfica</b> .....	6
1.1 Introducción .....	6
1.2 Campo magnético, densidad de flujo magnético y magnetización .....	6
1.3 Sensores inductivos .....	7
1.4 Circuito eléctrico equivalente .....	10
1.5 Lazo de histéresis .....	10
1.6 El efecto Barkhausen .....	12
1.7 Dominios Magnéticos .....	13
1.8 Rotación de los Dominios y Movimiento de las Paredes de Dominios .....	14
1.9 Mediciones de Ruido Magnético Barkhausen .....	14
<b>Capítulo 2: Sistema experimental y materiales</b> .....	18
2.1 Introducción .....	18
2.2 Sistema de medición de ruido magnético Barkhausen en aceros .....	18
2.3 Cabezal excitador-sensor de ruido magnético Barkhausen .....	19
2.3.1 La bobina de excitación de campo magnético .....	21
2.3.2 Etapa de sensado del cabezal excitador-sensor .....	21
2.3.2.1 La bobina de detección de ruido magnético Barkhausen .....	21
2.3.2.2 El sensor de efecto Hall .....	22
2.4 Sistema electrónico para el cabezal excitador-sensor .....	23
2.4.1 Fuente de excitación de la bobina .....	23
2.4.1.1 Fuente básica de excitación de la bobina .....	24
2.4.1.2 Fuente comercial de excitación de la bobina .....	24
2.4.2 Acondicionamiento de la señal de salida de la bobina de detección de ruido magnético Barkhausen .....	26
2.4.3 Fuente de corriente constante del sensor de efecto Hall .....	27
2.5 Programa de control, adquisición y procesamiento de la señal de ruido magnético Barkhausen .....	28
2.6 Materiales .....	30
2.7 Resultados del capítulo .....	33
<b>Capítulo 3: Caracterización del sistema de medición de ruido magnético Barkhausen</b> .....	34
3.1 Introducción .....	34
3.2 Medición de la impedancia de la bobina de detección de ruido magnético Barkhausen .....	34
3.2.1 Simulación eléctrica de la bobina de detección .....	35
3.3 Ganancia y fase en función de la frecuencia del amplificador de señal de ruido magnético Barkhausen .....	37



3.4	Característica amplitud-frecuencia de la bobina de detección y la ganancia del amplificador de ruido magnético Barkhausen . . . . .	41
3.5	Amplitud y fase en función de la frecuencia del filtro pasa-altas . . . . .	41
3.6	Caracterización del sensor de efecto Hall . . . . .	43
3.6.1	Estabilidad del voltaje de salida del sensor CYJ411 . . . . .	43
3.6.2	Sensibilidad del sensor CYJ411 . . . . .	44
3.7	Resultados del capítulo . . . . .	46
<b>Capítulo 4: Mediciones de ruido magnético Barkhausen en aceros API-5L . . . . .</b>		<b>48</b>
4.1	Introducción . . . . .	48
4.2	Medición de la señal de RMB en aceros API-5L y parámetros de la señal . . . . .	48
4.3	Influencia de la intensidad de campo magnético de excitación en los parámetros de la señal de RMB . . . . .	53
4.4	Influencia de la frecuencia de corte del filtro pasa-bajas en los parámetros de la señal de RMB . . . . .	56
4.5	Influencia del efecto resonante de la bobina de detección en los parámetros de la señal de RMB . . . . .	61
4.6	Resultados del capítulo . . . . .	68
<b>Conclusiones</b>		<b>70</b>
<b>Trabajo a futuro</b>		<b>71</b>
<b>Apéndice A</b>		<b>72</b>
<b>Apéndice B</b>		<b>74</b>
<b>Bibliografía</b>		<b>78</b>
<b>Trabajo publicado</b>		<b>81</b>
<b>Agradecimientos</b>		<b>85</b>



# Índice de Figuras

1.1.	Geometría de la bobina de inducción con núcleo de aire. Tomado de [5] . . . .	8
1.2.	Circuito equivalente de: a) Un inductor y b) Una bobina de inducción con voltaje de salida. Tomado de [4, 5, 12] . . . . .	10
1.3.	Lazo de histéresis de una ferrita de bario tipo HF8/22. Tomado de [14] . . . . .	11
1.4.	a) Esquema del experimento de Barkhausen, b) Discontinuidades Barkhausen a lo largo de la curva de magnetización inicial observada tomando una pequeña porción de la curva. Tomado de [1] . . . . .	12
1.5.	Estructura de dominios en un material ferromagnético policristalino. Tomado de [3] . . . . .	13
1.6.	Representación esquemática del comportamiento de los dominios en un material ferromagnético durante el proceso de magnetización. La sección ampliada de la línea muestra el efecto Barkhausen. Tomado de [3] . . . . .	13
1.7.	Arreglo experimental típico utilizado para realizar mediciones de ruido magnético Barkhausen . . . . .	14
1.8.	Diagrama de bloques de un sistema experimental típico para la medición de la señal de RMB . . . . .	15
2.1.	Diagrama de bloques del sistema de medición de RMB en aceros . . . . .	18
2.2.	Esquema del cabezal excitador-sensor de RMB : 1) Núcleo de Fe-Si, 2) Bobina de excitación de campo magnético, 3) Bobina de detección de RMB, 4) Sensor de efecto Hall y 5) Muestra de acero . . . . .	20
2.3.	Fotos de a) los polos de la herradura del cabezal excitador-sensor, nótese el reflejo de la moneda en uno de los polos que demuestra el pulido tipo espejo, b) la bobina de campo enrollada en la parte superior del núcleo en forma de herradura . . . . .	21
2.4.	Foto de la bobina de inducción utilizada para la detección de la señal de RMB . . . . .	22
2.5.	a) Foto del sensor de efecto Hall, b) Esquema de la placa del sensor Hall y c) Foto del sensor Hall montado en la placa universal de circuitos electrónicos . . . . .	23
2.6.	Fotos del soporte de acrílico con los sensores montados: a) Cara superior del soporte y b) Cara inferior del soporte con la tira transparente de 0.04 mm de espesor . . . . .	23
2.7.	Fuente básica de excitación de la bobina de campo magnético empleando un par de amplificadores de potencia LM4701T en configuración tipo puente: a) Diagrama eléctrico y b) Foto del circuito electrónico . . . . .	24
2.8.	a) Diagrama eléctrico del amplificador de potencia MP39CL en configuración inversor con ganancia $G = 10$ . Tomado de [22] y b) Esquema del par de fuentes de laboratorio empleadas para alimentar al amplificador de potencia comercial MP39CL, en el cual se indica el voltaje y corriente máximos que pueden suministrar . . . . .	25



2.9.	Foto del amplificador de potencia comercial MP39CL fabricado por APEX Microtechnology: a) Circuito electrónico y b) Esquema de montaje del amplificador en el kit de evaluación EK59. Tomado de [22] . . . . .	26
2.10.	Diagrama eléctrico de acondicionamiento de la señal de RMB: a) Amplificador de señal de RMB y b) Filtro de señal de RMB . . . . .	26
2.11.	Diagrama eléctrico de la fuente de corriente constante del sensor de efecto Hall empleando el dispositivo LM394H . . . . .	27
2.12.	Pantallas del sistema de medición de RMB. a) Panel frontal de la aplicación de control, adquisición, transferencia y almacenamiento de las señales de RMB, b) Panel frontal de la aplicación de procesamiento de la señal de RMB, y c) Panel frontal de la aplicación para la obtención del valor RMS y de Energía de las señales de RMB procesadas . . . . .	29
2.13.	Fotos del sistema de medición de ruido magnético Barkhausen en aceros . . .	30
2.14.	Fotos de a) Sección retirada de un ducto de transporte de hidrocarburos de PEMEX Región Sur y b) Muestra maquinada de los aceros API-5L, con una marca que identifica el tipo de acero y la dirección del eje longitudinal (L) del acero . . . . .	31
2.15.	Comparación de la microestructura (el EFM es horizontal) de las muestras de los aceros API-5L grado a) X52, b) X56, y c) X60. Tomado de [26] . . . .	32
2.16.	Lazos de histéresis obtenidos en la dirección del EFM (L-dirección longitudinal) y en la dirección del EDM (T-dirección transversal) de los aceros API-5L grado a) X52, b) X56, y c) X60. Tomado de [26] . . . . .	32
3.1.	Gráficas de magnitud y fase de las impedancias medidas por medio de un analizador de redes HP 4195A para: a) la bobina de detección sin cable (bobina BD) y b) la bobina de detección con cable (bobina BDC) . . . . .	35
3.2.	Circuito eléctrico equivalente de una bobina de inducción . . . . .	36
3.3.	Características de amplitud y fase en función de la frecuencia simuladas con el software NI Multisim a partir de los valores obtenidos del analizador de redes HP 4195A para el circuito equivalente de: a) la bobina BD y b) la bobina BDC . . . . .	37
3.4.	Diagrama de bloques del sistema de medición de la ganancia y la fase del amplificador de señal de RMB . . . . .	38
3.5.	Ganancia del amplificador en función de la frecuencia, la cual fue medida utilizando un osciloscopio digital Agilent DSO6014A . . . . .	39
3.6.	Fase del amplificador en función de la frecuencia medida utilizando el osciloscopio digital Agilent DSO6014A . . . . .	40
3.7.	Característica amplitud-frecuencia de la bobina de detección de RMB y ganancia en función de la frecuencia del amplificador de RMB . . . . .	41
3.8.	a) Amplitud y b) fase, del filtro pasa-altas . . . . .	42
3.9.	Diagrama de bloques del sistema empleado para determinar la variación de la corriente de la fuente de corriente-constante y la estabilidad del voltaje de salida del sensor de efecto Hall . . . . .	43
3.10.	Medición de la corriente y del voltaje de salida de la FCC y del sensor de efecto Hall, respectivamente . . . . .	44



3.11. Esquema del par de bobinas de Helmholtz con el sensor de efecto Hall con su eje de sensibilidad paralelo a la dirección axial del par de bobinas . . . . .	45
3.12. Curvas de: a) La respuesta de la bobina de Helmholtz ante distintas intensidades de corriente $I$ , y b) Calibración del sensor de efecto Hall CYJ411 . . . . .	46
4.1. Representación esquemática de la posición del cabezal excitador-sensor de RMB cuando se mide a lo largo del eje de fácil magnetización . . . . .	48
4.2. Señales de RMB obtenidas en la dirección del EFM en los aceros API-5L grado: a) X52, b) X56 y c) X60 . . . . .	49
4.3. Señales de RMB obtenidas en la dirección del EDM en los aceros API-5L grado: a) X52, b) X56 y c) X60 . . . . .	49
4.4. Espectro de frecuencia de la señal de RMB del EFM del acero X52 . . . . .	49
4.5. Señales envolventes de RMB obtenidas en la dirección del EFM en los aceros API-5L grado: a) X52, b) X56 y c) X60 . . . . .	51
4.6. Señales envolventes de RMB obtenidas en la dirección del EDM en los aceros API-5L grado: a) X52, b) X56 y c) X60 . . . . .	51
4.7. Curvas del valor RMS en función de la intensidad de campo magnético aplicado del acero: a) X52, b) X56 y c) X60 . . . . .	54
4.8. Curvas del valor de la Energía en función de la intensidad de campo magnético aplicado del acero: a) X52, b) X56 y c) X60 . . . . .	54
4.9. Curvas de la diferencia entre los ejes de magnetización de: a) el valor RMS y b) el valor de la Energía, en función de la intensidad de campo magnético aplicado en los aceros X52, X56 y X60 . . . . .	55
4.10. Señales envolventes obtenidas al eliminar componentes de frecuencia de la señal de RMB del: a) EFM y del b) EDM del acero X56 para cada frecuencia de corte $f_c$ del FDPB . . . . .	57
4.11. Curvas de: a) el valor RMS, b) el valor de la Energía y c) el valor máximo de la envolvente, de la señal de RMB del EFM y del EDM del acero X56; y d) Curvas de la diferencia en porcentaje entre los ejes de magnetización para los valores RMS, de Energía y del valor máximo de la envolvente . . . . .	58
4.12. Curvas de los valores obtenidos de la resta entre la diferencia en porcentaje de los parámetros obtenidos empleando todo el espectro de la señal de RMB con los obtenidos a medida que se eliminaron componentes de frecuencia de la señal de RMB para el acero X56 . . . . .	60
4.13. a) Esquema del circuito eléctrico equivalente del sistema BC, se observa que se agregó el capacitor $C_p$ en paralelo con la bobina de detección de RMB, b) Curvas de la magnitud y la fase de la impedancia del sistema BC en donde se muestra su valor de frecuencia de resonancia; y c) Espectro de frecuencia de una señal de RMB obtenida del EFM del acero X56 . . . . .	62
4.14. Señales envolventes obtenidas al eliminar componentes de frecuencia de la señal de RMB que esta influenciada por el efecto resonante del sistema BC para el: a) EFM y el b) EDM del acero X56 para cada frecuencia de corte $f_c$ del FDPB . . . . .	64



4.15. Curvas de: a) el valor RMS, b) el valor de la Energía y c) el valor máximo de la envolvente de las señales de RMB influenciadas por el efecto resonante del sistema BC para el EFM y el EDM del acero X56; y d) Curvas de la diferencia en porcentaje entre los ejes de magnetización para los valores RMS, de Energía y del valor máximo de la envolvente . . . . .	65
4.16. Curvas de la diferencia en porcentaje entre los ejes de magnetización para los valores RMS, de Energía y el valor máximo de la envolvente obtenidos para cuando se tiene la $f_r$ fuera de la banda de paso del amplificador de señal de RMB y para el caso en el que si se tiene el efecto resonante en la banda de paso del amplificador . . . . .	68
B.1. Espectros de frecuencia de las señales de RMB obtenidas en la dirección del EFM en los aceros API-5L grado: a) X52, b) X56 y c) X60 . . . . .	74
B.2. Espectros de frecuencia de las señales de RMB obtenidas en la dirección del EDM en los aceros API-5L grado: a) X52, b) X56 y c) X60 . . . . .	74



# Índice de Tablas

2.1.	Composición química (wt%) de las muestras de acero X52, X56 y X60). El resto al 100% es Fe. Tomado de [26] . . . . .	31
2.2.	Valores $H_c$ y $J_r$ de los aceros estudiados en las direcciones de los EFM y EDM. Tomado de [26] . . . . .	33
3.1.	Valores de $L_s$ , $R_s$ y $C$ obtenidos del analizador de redes HP 4195A para las bobinas BD y BDC . . . . .	36
3.2.	Valores estadísticos del comportamiento de la corriente de la FCC y del voltaje de salida del sensor de efecto Hall . . . . .	44
4.1.	Parámetros (RMS, Energía y valor máximo de la envolvente) de las señales de RMB obtenidas a lo largo del EFM y del EDM de los aceros API-5L grado X52, X56 y X60 . . . . .	52
4.2.	Parámetros obtenidos a partir de las señales de RMB con todo su espectro de frecuencia permitido por el amplificador de RMB para los ejes de fácil y difícil magnetización del acero X56. Y diferencias en magnitud y en por ciento de cada parámetro entre los ejes de magnetización . . . . .	56
4.3.	Valores resultantes de la resta entre las diferencias en por ciento de los parámetros obtenidos empleando todo el espectro de las señales de RMB con los obtenidos conforme se eliminaron componentes de frecuencia en las señales de RMB del acero X56 . . . . .	60
4.4.	Parámetros (RMS, Energía y valor máximo de la envolvente) de las señales de RMB bajo la influencia del efecto resonante del sistema BC y diferencias en magnitud y en por ciento de cada parámetro entre los ejes de magnetización del acero X56 . . . . .	63
4.5.	Valores de diferencia en por ciento de los parámetros de las señales de RMB del acero X56 obtenidos para cuando: i) se tiene todo el espectro de frecuencia permitido por el amplificador de RMB y ii) las señales de RMB bajo la influencia del efecto resonante del sistema BC . . . . .	66
A.1.	Valores de ganancia y fase en función de la frecuencia medidos a la salida del amplificador de señal de RMB, para un intervalo de frecuencias desde 1 Hz hasta 1.5 MHz . . . . .	72
A.2.	Valores de amplitud y fase en función de la frecuencia medidos a la salida del filtro pasa-altas, para un intervalo de frecuencias desde 100 Hz hasta 1.5 MHz . . . . .	73
A.3.	Valores del campo magnético $H$ generado por el par de bobinas de Helmholtz para cada intensidad de corriente $I$ . Y valores del voltaje de salida $V_H$ del sensor de efecto Hall para cada intensidad de campo magnético $H$ . . .	73
B.1.	Valores $\overline{RMS}$ y $\overline{Energía}$ del EFM y del EDM del acero X52 para cada valor de intensidad de campo magnético $H$ . . . . .	75





B.2.	Valores $\overline{RMS}$ y $\overline{Energía}$ del EFM y del EDM del acero X56 para cada valor de intensidad de campo magnético $H$ . . . . .	75
B.3.	Valores $\overline{RMS}$ y $\overline{Energía}$ del EFM y del EDM del acero X60 para cada valor de intensidad de campo magnético $H$ . . . . .	76
B.4.	Valores $\Delta\overline{RMS}$ y $\Delta\overline{Energía}$ del acero X52, X56 y X60 para cada valor de intensidad de campo magnético $H$ . . . . .	76
B.5.	Valores RMS, de Energía y máximo de la envolvente del EFM y del EDM, y diferencia en por ciento $\Delta RMS$ , $\Delta Energía$ y $\Delta Env_{máx}$ entre el EFM y el EDM, respectivamente. Obtenidos de las señales de RMB del acero X56 para cada frecuencia de corte $f_c$ del FDPB . . . . .	77
B.6.	Valores RMS, de Energía y máximo de la envolvente del EFM y del EDM, y diferencia en por ciento $\Delta RMS$ , $\Delta Energía$ y $\Delta Env_{máx}$ entre el EFM y el EDM, respectivamente. Obtenidos de las señales de RMB del acero X56 bajo la influencia del efecto resonante del sistema BC para cada frecuencia de corte $f_c$ del FDPB . . . . .	77



## Justificación

El acero es considerado, económicamente, uno de los más importantes bienes industriales. El acero se utiliza ampliamente para la fabricación de estructuras de alto esfuerzo utilizadas en proyectos de gran escala en muchas áreas de la industria tales como: la petrolera, la ferroviaria y la construcción, entre otras. La detección de averías en las estructuras de acero es de vital importancia ya que se pueden prevenir pérdidas económicas, humanas e incluso daños ecológicos dependiendo del área industrial donde ocurriera el siniestro. La detección de averías en aceros mediante técnicas de evaluación no destructiva utilizando las propiedades magnéticas de los aceros es un tema que ha ganado interés en los últimos años. La técnica de medición del ruido magnético Barkhausen en aceros es un método mediante el cual se puede estimar desde defectos hasta esfuerzos residuales en las estructuras de acero.

En este trabajo se desarrolla un sistema de medición de ruido magnético Barkhausen en aceros. Se caracterizan aceros grado tubería API-5L mediante parámetros obtenidos de las señales de ruido magnético Barkhausen y se analiza la influencia que tienen las características del sistema experimental en los resultados de las mediciones de la señal de ruido magnético Barkhausen.

El presente trabajo sienta las bases para el desarrollo de las investigaciones relacionadas con el ruido magnético Barkhausen como herramienta para la caracterización y evaluación de materiales.

Este trabajo de tesis es el primero de su tipo en la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, demostrando la viabilidad de la nueva línea de investigación enfocada al desarrollo de sistemas de evaluación no destructiva de materiales. Este trabajo fortalece las bases para la creación de un laboratorio de evaluación no destructiva de materiales empleando técnicas electromagnéticas.



## 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. Los accidentes pueden ser evitados monitoreando el estado de la estructura de acero para detectar a tiempo las averías que pudieran causar las fallas de estas estructuras de acero.

En la actualidad existe una necesidad tecnológica para la inspección no destructiva de estructuras de acero. Con el paso de los años han surgido métodos de evaluación no destructiva (END), con alto impacto industrial debido al beneficio económico que brindan. La rentabilidad de solo retirar los componentes defectuosos y la posibilidad de evitar fallas potencialmente catastróficas monitoreando el estado de las estructuras de acero, son solo algunas de las posibilidades que proporcionan los métodos de evaluación no destructiva.

Los métodos de evaluación no destructiva más comunes se basan o utilizan radiación ionizante, ultrasonido, líquidos penetrantes, entre otros. Algunos de los métodos de END pueden ser utilizados en aceros pero presentan el inconveniente de que no son rentables e incluso puede que no sean prácticos para usarse en instalaciones industriales. La limitación de estos métodos para detectar fatiga o degradación termomecánica ha llegado a ser un factor importante para el desarrollo de nuevos métodos de evaluación no destructiva en aceros basados en métodos magnéticos.

Los métodos magnéticos de evaluación no destructiva son únicos porque utilizan las propiedades magnéticas del acero y pueden ser empleados para: detectar defectos en las estructuras de acero y evaluar las propiedades magnéticas del material. El desarrollo de métodos magnéticos de evaluación no destructiva requiere de un conocimiento profundo acerca de los fenómenos físicos involucrados. Hay que añadir que el un gran número de aceros diferentes hacen que la información sea muy dispersa y genere problemas en su análisis. A causa de lo anterior los métodos magnéticos no han sido completamente explotados, en comparación por ejemplo, con los métodos ultrasónicos.



La potencialidad de los métodos magnéticos para evaluar desde defectos hasta esfuerzos residuales en las estructuras de acero, han permitido que estos métodos ganen interés por parte de la industria, por lo cual ahora es uno de los campos en desarrollo de evaluación no destructiva de materiales más importante [1, 2].

El ruido magnético Barkhausen es un fenómeno que ocurre en los materiales ferromagnéticos. Heinrich Barkhausen observó por primera vez en 1919 el fenómeno de cambios discontinuos en la magnetización de un material ferromagnético al aplicarle una intensidad de campo magnético  $H$  variante en el tiempo [1]. Los cambios discontinuos en la magnetización producen una señal que parece ruido que se le conoce, en honor a su descubridor, como ruido magnético Barkhausen (RMB). Sin embargo, no fue hasta muchos años después de su descubrimiento que se comprendió su potencial como una herramienta de evaluación no destructiva, la cual se utiliza para investigar las propiedades magnéticas y mecánicas de los materiales ferromagnéticos. Los primeros intentos para usar el ruido magnético Barkhausen para determinar esfuerzos en estructuras de acero fueron hechos por Leep en 1967. Pero, no fue hasta que Pasley mostró distintas variaciones en la amplitud de la señal de ruido magnético Barkhausen debido a los esfuerzos residual y aplicado que el método comenzó a ganar aceptación como un método de evaluación no destructiva [1].

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 presente trabajo de tesis propone un sistema de medición de ruido magnético Barkhausen en aceros.

El objetivo general de este trabajo es: *“Desarrollar un sistema de medición de ruido magnético Barkhausen para la caracterización de aceros API-5L”*.

Para darle cumplimiento al objetivo general se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- 1- Diseñar e implementar los módulos del sistema experimental: el cabezal excitador-sensor de RMB, el sistema electrónico para el cabezal excitador-sensor y el programa de control, adquisición y procesamiento de la señal de RMB.



- 2- Caracterizar el sistema de medición de ruido magnético Barkhausen: los sensores y la etapa de acondicionamiento del cabezal excitador-sensor.
- 3- Caracterizar los aceros API-5L mediante los parámetros obtenidos de la señal de ruido magnético Barkhausen.
- 4- Analizar la influencia de las características del sistema experimental en los parámetros de la señal de ruido magnético Barkhausen.

La tesis está estructurada en resumen, justificación, introducción y cuatro capítulos. El primer capítulo introduce al lector en la temática, brindando los fundamentos básicos de las bobinas de inducción, del magnetismo relacionado con las mediciones de ruido magnético Barkhausen y se presenta una síntesis de investigaciones recientes acerca del ruido magnético Barkhausen. El segundo capítulo está relacionado con el primer objetivo específico, y presenta las partes implementadas del sistema de medición propuesto y la descripción de las características de los aceros API-5L estudiados. El capítulo tres le da cumplimiento al segundo objetivo específico por medio del cual se conocen las limitaciones del sistema de medición. El capítulo cuatro está en correspondencia con los objetivos específicos tres y cuatro. A través de los resultados obtenidos en este capítulo se demuestra la aplicabilidad del sistema de medición como un método de evaluación no destructiva. En este capítulo se demuestra que la señal de RMB es diferente para cada tipo de acero y por medio de los parámetros obtenidos de la señal de RMB se puede diferenciar de forma cuantitativa entre los tres tipos de aceros estudiados. Se demuestra la anisotropía magnética de los aceros API-5L por medio de las mediciones de RMB a lo largo de los ejes de fácil y difícil magnetización. Además, se determinan las características óptimas y mínimas del sistema experimental que permiten obtener información satisfactoria de las mediciones de ruido magnético Barkhausen en aceros.

Es importante resaltar que el presente trabajo de tesis es el primero de su tipo que se realiza en el naciente grupo de trabajo dirigido por el director de la presente tesis en el área de sistemas de evaluación no destructiva de materiales y particularmente en el estudio de aceros. Este trabajo de tesis tiene el mérito de abrir las puertas a muchas interrogantes que no pueden ser abordadas, todas, en el mismo. Se destaca que parte de los resultados de esta tesis fueron presentados en el Congreso Internacional CIINDET 2009, en el Congreso



Nacional CNIES 2009, y publicados en un artículo de la Revista CIENTÍFICA de ESIME<sup>1</sup>. Además, es bueno recalcar que gran parte de los resultados de este trabajo de tesis no han sido publicados aún y serán sometidos a una revista internacional especializada de alto impacto.

---

<sup>1</sup> Publicado en el volumen 14, número 2, abril-junio de 2010.



# Capítulo 1: Estado del arte y revisión bibliográfica

## 1.1 Introducción

En este capítulo se plantean los fundamentos básicos del magnetismo relacionado con las mediciones de ruido magnético Barkhausen. Se describe el fenómeno de ruido magnético Barkhausen y el método de medición más utilizado. Se analizan las características de las bobinas de inducción como sensor magnético. Además, se presenta una síntesis de investigaciones recientes donde se utiliza o aplica la medición de ruido magnético Barkhausen.

## 1.2 Campo magnético, densidad de flujo magnético y magnetización

El campo magnético ( $H$ ) está asociado con el movimiento de las cargas eléctricas, lo que significa que este solo se produce en presencia de corrientes eléctricas. Los imanes permanentes son otra fuente de campo magnético donde no intervienen corrientes eléctricas. En el caso de los imanes permanentes el campo magnético se produce por el giro (spín) de los electrones. El “spín” del electrón es un efecto mecánico – cuántico. El electrón girando alrededor de su propio eje se puede considerar como una espira de corriente con un momento magnético  $m = I \cdot A$ , donde  $I$  y  $A$  son la corriente equivalente y el área de la espira, respectivamente.

Si consideramos un cuerpo sólido bajo la influencia de un campo magnético externo, entonces la magnetización se define como el momento magnético por unidad de volumen del sólido:

$$M = \frac{m}{V} \quad [\text{A/m}] \quad (1.1)$$

La densidad de flujo magnético ( $B$ ) se define como el flujo magnético ( $\phi$ ) por unidad de área:

$$B = \frac{\phi}{A} \quad [\text{T}] \quad (1.2)$$



Existe una relación entre  $H$ ,  $M$ , y  $B$  en el interior de un cuerpo magnetizado que se expresa como:

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (1.3)$$

donde  $\mu_0 = 1,257 \times 10^{-6}$  H/m es la permeabilidad en el vacío.

La ecuación (1.3) se cumple siempre [1, 3]. La permeabilidad magnética  $\mu$ , expresada en unidades de [H/m], de un material se define como la relación  $\mu = \frac{B}{H}$ . Además,  $\mu = \mu_0 \mu_r$ , donde  $\mu_r$  es la permeabilidad relativa.

### 1.3 Sensores inductivos

Una bobina (sensor inductivo) es posiblemente el sensor magnético más antiguo y más conocido. Su función de transferencia  $V = f(B)$  es resultado de la ley de inducción de Faraday [1, 4, 5]:

$$V_{\text{ind}} = -N \frac{d\phi}{dt} = -NA \frac{dB}{dt} = \mu NA \frac{dH}{dt} \quad (1.4)$$

donde  $N$  es el número de vueltas de la bobina,  $A$  es el área, y  $\mu$  es la permeabilidad magnética. En caso de que las mediciones se realicen en el vacío (o el aire,  $\mu_r = 1$ )  $\mu = \mu_0$ . Al producto  $NA$  se le denomina área efectiva ( $A_{\text{ef}}$ ) de la bobina.

El voltaje de salida de una bobina depende de la razón de cambio de  $B$  en el tiempo, lo que significa que se necesita de un integrador si se desea conocer la magnitud de  $B$ . Además, la sensibilidad depende directamente de la frecuencia de  $B$ , del número de vueltas y del área de la bobina.

En la figura 1.1 se muestra la geometría de una bobina con núcleo de aire. Una bobina de inducción con núcleo de aire tiene una característica lineal en amplitud y sus parámetros son muy estables en el tiempo.



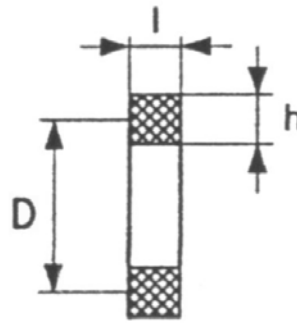


Figura 1.1: Geometría de la bobina de inducción con núcleo de aire. Tomado de [5].

El voltaje pico (máximo) de salida  $V_0$  de una bobina de inducción debido a la variación de un flujo magnético sinusoidal  $\phi = \phi_{m\acute{a}x} \cos(\omega t)$  es [4, 5]:

$$V_0 = \omega \cdot N \cdot \phi_{m\acute{a}x} = \frac{\pi^2}{2} \cdot N \cdot D^2 \cdot f \cdot B \quad (1.5)$$

donde  $\omega$  es la frecuencia angular expresada en rad/s,  $D$  es el diámetro medio de la bobina y  $f$  es la frecuencia, expresada en Hz, de la densidad de flujo magnético  $B$  detectada.

Se ha establecido en la literatura científica utilizar el producto frecuencia-densidad de flujo magnético para expresar la sensibilidad de una bobina solo en términos de sus características físicas.

El voltaje de salida de la bobina de inducción depende de las propiedades de la bobina como son su diámetro medio y el número de vueltas, y es proporcional al producto frecuencia-densidad de flujo magnético  $f \cdot B$ . La sensibilidad de la bobina se define como:

$$S_0 = \frac{V_0}{f \cdot B} = \frac{\pi^2 \cdot N \cdot D^2}{2} \quad (1.6)$$

La sensibilidad de la bobina de inducción está limitada por el ruido Johnson. El ruido Johnson es un voltaje de ruido térmico provocado por la resistencia en DC de la bobina y está definido como [4, 5]:



$$V_N = \sqrt{4 \cdot k_B \cdot T \cdot R_{DC} \cdot \Delta f} \quad [\text{V}] \quad (1.7)$$

donde  $k_B$  es la constante de Boltzmann,  $T$  es la temperatura absoluta de la bobina en grados Kelvin,  $\Delta f$  es la banda de frecuencia en la que opera la bobina expresada en Hz, y  $R_{DC}$  es la resistencia de la bobina expresada en  $\Omega$ .

La relación señal a ruido ( $SNR$ , por sus siglas en inglés) es otro de los factores que caracteriza la sensibilidad de una bobina de inducción, y esta dado por (para un  $\Delta f = 1 \text{ Hz}$ ) [4, 5]:

$$SNR = \frac{\pi^2}{8 \cdot \sqrt{2 \cdot k_B \cdot T}} \cdot d \cdot (\sigma \cdot N \cdot D^3)^{1/2} \cdot f \cdot B \quad (1.8)$$

donde  $d$  es el diámetro del alambre y  $\sigma$  es la conductividad específica del material conductor.

La  $SNR$  es proporcional a la frecuencia  $f$  del campo magnético detectado. De la ecuación (1.8) se puede apreciar que la  $SNR$  decrece cuando decrece la frecuencia de la densidad de flujo magnético detectado.

Para comparar diferentes tipos de bobina se utiliza el campo magnético equivalente de ruido ( $H_N$ ). El campo magnético  $H_N$  genera un voltaje de ruido  $U_N$  a la salida de una bobina ideal (bobina libre de ruido). El campo magnético equivalente de ruido  $H_N$  indica el mínimo campo magnético detectable por una bobina. Esto quiere decir que  $H_N$  representa la máxima resolución que se puede obtener con una bobina.  $H_N$  se expresa como [4, 5]:

$$\frac{H_N}{\sqrt{\Delta f}} = \frac{8 \cdot \sqrt{k_B \cdot T} \cdot \sqrt{\rho}}{\pi^2 \cdot \mu_0 d \cdot \sqrt{N \cdot D^3} \cdot f} \quad (1.9)$$

Se observa en (1.9) que  $H_N$  es inversamente proporcional a la frecuencia, lo que significa que la detectabilidad de la bobina aumenta para valores mayores de frecuencia.

## 1.4 Circuito eléctrico equivalente

El voltaje de salida de una bobina de inducción se puede calcular con la ecuación (1.5) solo para las bajas frecuencias. Para altas frecuencias la impedancia de AC de la inductancia ( $L_s$ ), la resistencia ( $R_s$ ) y la capacidad distribuida ( $C$ ) son parámetros eléctricos que hay que considerar. En la figura 1.2 (a) se muestra el circuito equivalente de un inductor [6, 7, 8, 9, 10, 11]. Un inductor puede ser empleado como una bobina de inducción para la cual su circuito eléctrico equivalente es el que se muestra en la figura 1.2 (b) [4, 5, 12].

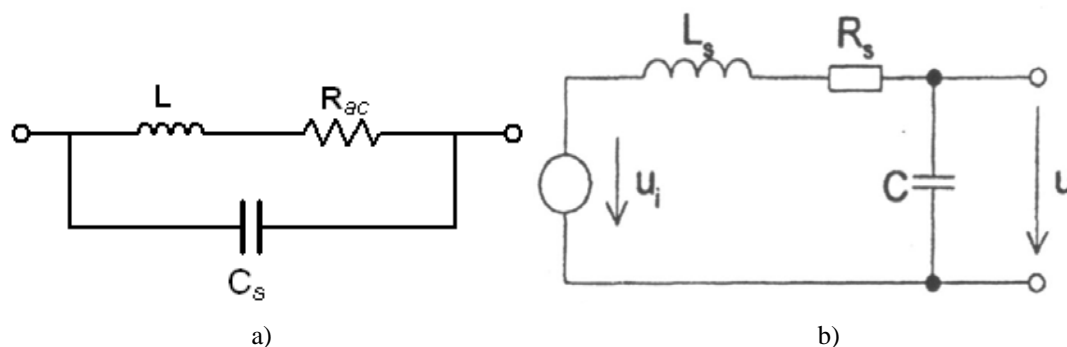


Figura 1.2: Circuito equivalente de: a) Un inductor y b) Una bobina de inducción con voltaje de salida. Tomado de [4, 5, 12].

La inductancia y la capacidad distribuida de una bobina con núcleo de aire dependen de la geometría del enrollado y del número de espiras [4]. La capacidad distribuida de un inductor sin núcleo puede variar solamente en la vecindad de la frecuencia de resonancia [13]. Un criterio práctico es que la bobina puede ser utilizada sin especial cuidado hasta valores de frecuencias cercanos a  $f_r/5$  [5].

## 1.5 Lazo de histéresis

Un material magnético puede ser representado de manera simple como un ensamblaje de momentos magnéticos permanentes de origen mecánico – cuántico. Los materiales ferromagnéticos exhiben una magnetización espontánea ( $M_e$ ) elevada para valores pequeños de intensidades de campo magnético debido a que los momentos magnéticos no son independientes entre sí. Dentro del material existen regiones llamadas dominios magnéticos. La diferencia entre el estado desmagnetizado y el estado magnetizado de un material ferromagnético radica en la configuración de los dominios dentro del material.

La forma más común de representar las propiedades magnéticas (permeabilidad, coercitividad, remanencia, pérdidas por histéresis) de un material ferromagnético es por medio de su lazo de histéresis. El lazo de histéresis se obtiene al graficar la densidad de flujo magnético  $B$  o la magnetización  $M$  para diferentes valores de intensidad de campo magnético  $H$ . La figura 1.3 muestra los lazos de histéresis ( $B$  y  $M$ ) de una ferrita de bario tipo HF8/22, donde se representan los parámetros más importantes. Los físicos usan generalmente el lazo  $J$ , mientras que los ingenieros utilizan el lazo  $B$ .  $H_{cJ}$  y  $H_{cB}$  se refieren al campo coercitivo de cada lazo, respectivamente.  $J_r$  y  $B_r$  representan la remanencia del material. Los materiales ferromagnéticos se clasifican como blandos o duros dependiendo del valor del campo coercitivo.

El origen del proceso de histéresis en los materiales magnéticos recae en la existencia de imperfecciones, tanto en forma de dislocaciones o impurezas en el material que incrementan las pérdidas energéticas durante el proceso de magnetización. La anisotropía magnetocristalina es otro de los mecanismos que ayudan en el proceso de histéresis. En los sólidos anisotrópicos, determinados ejes cristalográficos en el material favorecen a la orientación de los momentos magnéticos a lo largo de esas direcciones, lo que conlleva a un estado de menor energía y por lo tanto más estable. El resultado de este proceso es la rotación discontinua e irreversible de los momentos magnéticos que induce a cierta conmutación o salto [14].

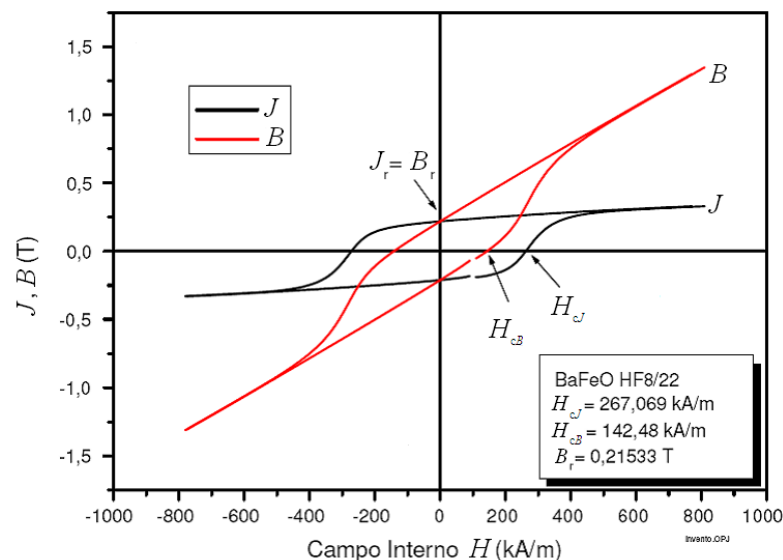


Figura 1.3: Lazo de histéresis de una ferrita de bario tipo HF8/22. Tomado de [14].

## 1.6 El efecto Barkhausen

El efecto Barkhausen fue descubierto en 1919 por el físico Alemán Heinrich Barkhausen [1]. El efecto Barkhausen es un fenómeno que se aprecia como cambios discontinuos en la densidad de flujo magnético  $B$  dentro de un material ferromagnético cuando el campo magnético  $H$  varía en el tiempo. Este fenómeno fue observado por primera vez utilizando una pieza de hierro con una bobina enrollada a su alrededor que se conectó a una bocina como se muestra la figura 1.4 (a). A la pieza de hierro se le aplicó un campo magnético  $H$  que se incrementó lentamente. El efecto de este experimento se apreció cuando se escucharon una serie de crujidos en la bocina. Los crujidos están asociados a pequeños pulsos de voltaje inducidos en la bobina enrollada alrededor del hierro. Los pulsos de voltaje son provocados por el efecto de la ley de inducción electromagnética, causados por pequeños cambios discontinuos en la densidad de flujo magnético  $B$  y de la magnetización  $M$ , detectados a través de la bobina [1], como se observa en la figura 1.4 (b).

Las discontinuidades en la densidad de flujo magnético  $B$  se atribuyen inicialmente a la rotación discontinua de la dirección del momento magnético dentro de un dominio. Este mecanismo se conoce como rotación de dominio. Sin embargo, el factor que más contribuye en las emisiones Barkhausen es el movimiento discontinuo de las paredes de dominio [1].

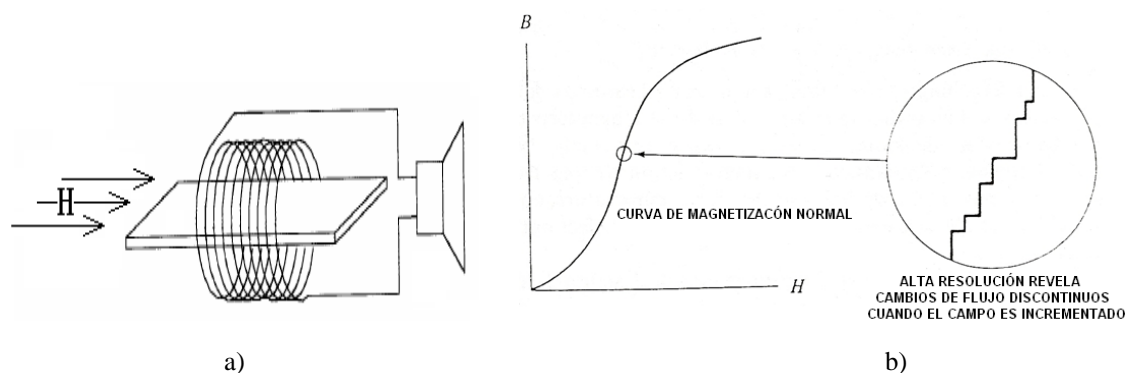


Figura 1.4: a) Esquema del experimento de Barkhausen, b) Discontinuidades Barkhausen a lo largo de la curva de magnetización inicial observada tomando una pequeña porción de la curva. Tomado de [1].

Las emisiones de ruido magnético Barkhausen (RMB) son afectadas por cambios en la microestructura del material, el esfuerzo aplicado y las deformaciones, lo que permite utilizar el RMB como una técnica de evaluación no destructiva de materiales.

## 1.7 Dominios Magnéticos

Weiss postuló, en 1906, que existe un poderoso campo molecular interno que actúa sobre los espines de los electrones individuales de las moléculas. El campo molecular orienta los espines paralelos entre sí en pequeños volúmenes llamados *dominios*. Los dominios tienen dimensiones del orden de  $10^{-3}$  a  $10^{-6}$  m o volúmenes del orden de  $10^{-9}$  a  $10^{-18}$  m<sup>3</sup>. Como resultado del fuerte campo molecular, hay una orientación bien definida de los espines dentro de cada dominio. La orientación dentro del dominio es espontánea, es decir, no se necesita aplicar campos externos [3].

Todos los materiales ferromagnéticos no son imanes permanentes, aunque los imanes moleculares se orientan espontáneamente dentro de cada dominio. Los dominios están orientados al azar uno respecto al otro, lo que hace que en la muestra aparezcan paredes de dominios, como se muestra en la figura 1.5.



Figura 1.5: Estructura de dominios en un material ferromagnético policristalino. Tomado de [3].

Otra propiedad peculiar pero extremadamente útil de los materiales ferromagnéticos es que la aplicación de un campo magnético  $H$  produce una orientación de los dominios. En un material ferromagnético la intensidad de campo magnético  $H$  aplicada solo orienta los momentos magnéticos de los dominios en el material dando como resultado una gran magnetización, ver figura 1.6.

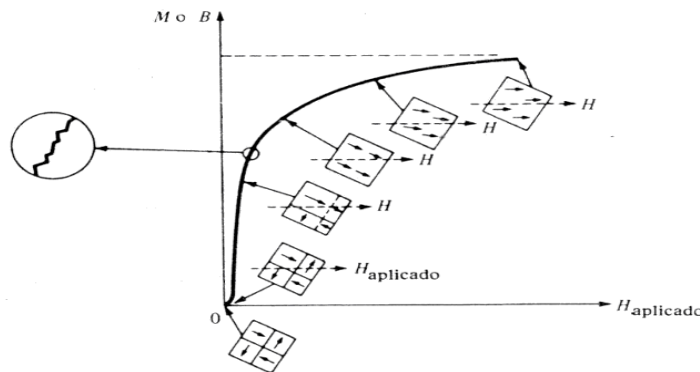


Figura 1.6: Representación esquemática del comportamiento de los dominios en un material ferromagnético durante el proceso de magnetización. La sección ampliada de la línea muestra el efecto Barkhausen. Tomado de [3].

## 1.8 Rotación de los Dominios y Movimiento de las Paredes de Dominios

Cuando se aplica un campo magnético  $H$  a un material ferromagnético, ocurre un cambio en la magnetización  $M$ . Los cambios en la magnetización son debido a la rotación de los dominios y al movimiento de las paredes de dominio. Para que un dominio rote, los momentos magnéticos tienen que pasar por orientaciones desfavorables que existen a lo largo de la dirección de magnetización. Al aumentar el campo magnético  $H$ , las paredes de dominios empiezan a encontrar varios obstáculos microscópicos tales como inhomogeneidades, imperfecciones, impurezas y huecos. Estos obstáculos actúan como sitios de anclaje para las paredes de dominios cuando estas se mueven debido a la influencia del campo magnético aplicado. Tal movimiento de las paredes va acompañado de bruscos cambios discontinuos de la magnetización llamados *saltos* Barkhausen. Estos saltos aparecen en la curva de magnetización como pequeños escalones, como se aprecia en la región ampliada de la curva de magnetización de las figuras 1.6 y 1.4 (b).

## 1.9 Mediciones de Ruido Magnético Barkhausen

Para realizar mediciones de ruido magnético Barkhausen se utiliza un arreglo experimental típico [2] como el que se muestra en la figura 1.7. Este arreglo experimental está formado por una herradura de un material magnético suave con alta permeabilidad que tiene una bobina para producir un campo magnético de excitación, y un sensor inductivo colocado sobre la muestra o placa de material ferromagnético que se quiere estudiar.

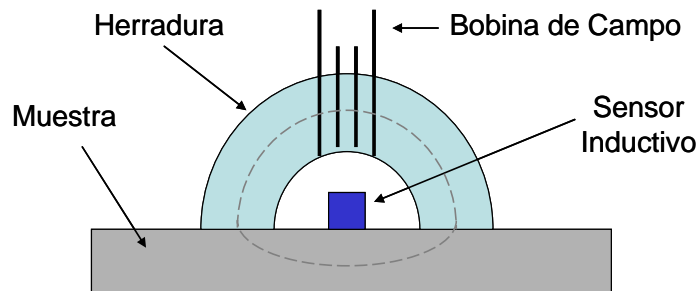


Figura 1.7: Arreglo experimental típico utilizado para realizar mediciones de ruido magnético Barkhausen.

La herradura y la muestra forman un circuito magnético cerrado como se aprecia en la figura 1.7. El flujo magnético producido por la bobina de campo estará contenido en el interior de la herradura y la muestra. Esto se cumple por la alta permeabilidad magnética que tienen la herradura y la muestra de material ferromagnético con respecto al aire.

Esta técnica de medición tiene grandes potencialidades como herramienta para la evaluación no destructiva de materiales ferromagnéticos, principalmente el acero, pero su aplicación práctica está limitada por el acoplamiento magnético entre los polos de la herradura y la superficie del material que se utiliza como muestra. La calidad de este acoplamiento magnético garantiza una buena sensibilidad. Para valores pequeños de separación entre los polos de la herradura y la superficie de la muestra, ocurren grandes cambios o variaciones en la permeabilidad del circuito magnético.

La figura 1.8 muestra en diagrama de bloques un sistema experimental típico para la medición de RMB. La forma de onda del campo magnético de excitación y su intensidad se seleccionan por medio de un generador de funciones. La fuente bipolar permite suministrar la corriente necesaria para producir el campo magnético deseado. El sensor inductivo se conecta a un pre-amplificador y posteriormente a un filtro pasa-bandas. Se conoce que el espectro de la señal de RMB va desde la frecuencia del campo magnético de excitación hasta aproximadamente 1 MHz [15]. Por lo general la frecuencia de corte del filtro pasaltas se selecciona por encima de los 500 Hz para garantizar la eliminación de posibles componentes de ruido eléctrico asociado a la señal de excitación y la red de alimentación de AC. Por otro lado, la frecuencia de corte del filtro pasa-bajas se selecciona dependiendo de las características del sistema de medición utilizado.

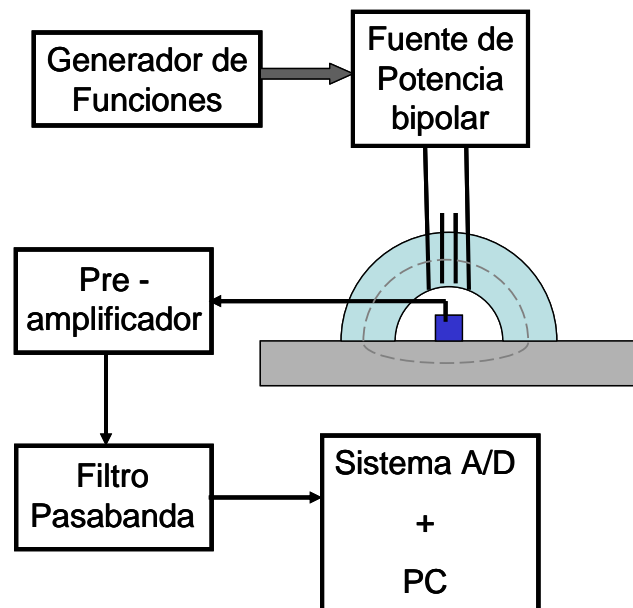


Figura 1.8: Diagrama de bloques de un sistema experimental típico para la medición de la señal de RMB.





La señal de RMB obtenida de un material ferromagnético por el sistema experimental comúnmente se procesa para obtener algunos parámetros cuantitativos y cualitativos que son empleados para relacionar sus valores con las propiedades del material. Los parámetros más comunes son el valor RMS, el valor de la energía y la envolvente de la señal de RMB [2]:

Los parámetros cuantitativos son el valor RMS y de energía y se definen como:

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V_{\text{RMB}}^2(t) dt} \quad [\text{V}] \quad (1.10)$$

donde  $T$  es el período de la señal de RMB y se denota a la señal de RMB por  $V_{\text{RMB}}(t)$  como una función del tiempo.

$$\text{Energía} = \sum_i^n \left( \int_0^{T_i} V_i^2(t) dt \right) \quad [\text{V}^2 \cdot \text{s}] \quad (1.11)$$

donde  $n$  es el número de saltos Barkhausen que forman la señal de RMB e  $i$  indica el salto Barkhausen [30].

La forma de la envolvente es un parámetro cualitativo que forma una curva y se define como:

$$\text{Env}(j = 1, \dots, N_p) = \sqrt{\frac{1}{\Delta T} \int_{\Delta T \cdot (j-1)}^{\Delta T \cdot j} V_{\text{RMB}}^2(t) dt} \quad [\text{V}] \quad (1.12)$$

donde se obtienen  $N_p$  puntos obtenidos cada uno en  $\Delta T = \frac{T}{N_p}$  segundos sobre el período

$T$  de la señal de RMB.

El RMB se ha utilizado para estudiar el origen del eje de fácil magnetización en tuberías de acero que se utilizan para el transporte de hidrocarburos. Clapham et al [16] estudiaron la influencia de la textura cristalográfica, la microestructura, y la deformación plástica en la anisotropía magnética de aceros utilizados en tuberías. El filtro pasa-banda en el sistema de medición utilizado tiene frecuencias de corte de 3 y 200 kHz. El resultado de esta investigación reveló que el eje de fácil magnetización, que está a lo largo de la dirección



longitudinal del tubo, se origina debido a los esfuerzos y las deformaciones a la que es sometido el material durante las etapas de procesamiento en frío en la producción de las tuberías.

Una de las aplicaciones más importantes de las mediciones de ruido magnético Barkhausen es que permite caracterizar el estado de deformación de un material. Alberteris-Campos et al [17] caracterizaron las regiones de deformación plástica y elástica en un acero AISI/SAE 1070 utilizando el RMB. En este caso, el filtro pasa-banda tiene frecuencias de corte de 1 y 100 kHz. El resultado más importante de este trabajo es que a partir del coeficiente de anisotropía  $k$ , definido como la razón entre los valores de energía de la señal de RMB del eje de fácil magnetización (EFM) con respecto al mismo parámetro del eje de difícil magnetización (EDM), se logró definir exactamente cuando el material está deformado plásticamente.

En un trabajo reciente Capo-Sánchez y Padovese [18] proponen la utilización de la resonancia de la bobina de detección de RMB como una nueva técnica de evaluación no destructiva de materiales ferromagnéticos. En este estudio se utilizó un filtro pasa-bandas con frecuencias de corte de 1 y 150 kHz. Se utilizaron varias bobinas con diferente número de vueltas con el propósito de sintonizar el sistema de detección a un determinado rango de frecuencias dentro del espectro de emisión de la señal de ruido magnético Barkhausen de dos tipos de aceros comerciales, el ANSI/SAE 1050 y el 1070, que fueron sometidos a esfuerzos. Esta nueva técnica se propone como una herramienta para estudiar y caracterizar estructuralmente a los materiales ferromagnéticos tomando en consideración la relación que existe entre la frecuencia y el efecto pelicular. De esta manera se puede lograr hacer una caracterización magnética y estructural del material a diferentes profundidades, teniendo en cuenta la banda de frecuencias que se amplifica por el efecto resonante de la bobina de detección.

## Capítulo 2: Sistema experimental y materiales

### 2.1 Introducción

Este capítulo está en correspondencia con el primer objetivo específico de este trabajo: *diseñar e implementar los módulos del sistema experimental: el cabezal excitador-sensor de RMB, el sistema electrónico para el cabezal excitador-sensor y el programa de control, adquisición y procesamiento de la señal de RMB*. En este capítulo se describe el funcionamiento del sistema de medición de RMB en aceros utilizado en los experimentos reportados en este trabajo. Se describen los dispositivos utilizados para la implementación de los módulos que componen el sistema experimental y se describen las características de las muestras de acero utilizadas en las mediciones.

### 2.2 Sistema de medición de ruido magnético Barkhausen en aceros

El sistema de medición de ruido magnético Barkhausen en aceros esta representado por un diagrama de bloques el cual se muestra en la figura 2.1.

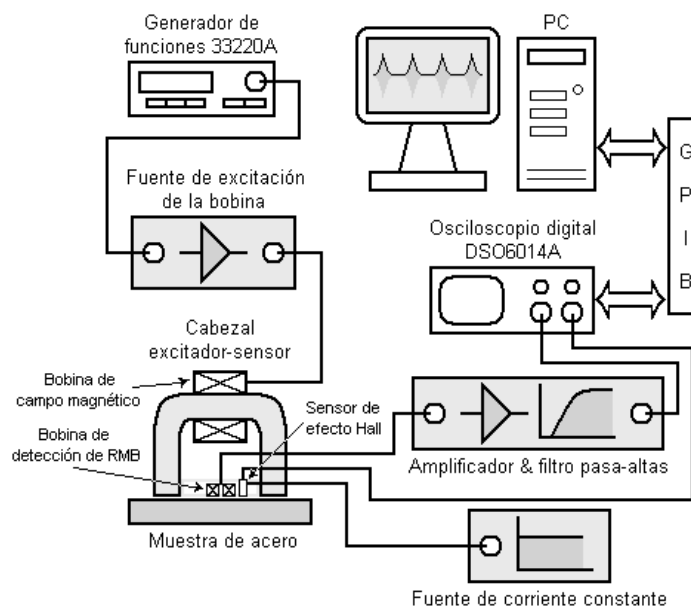


Figura 2.1: Diagrama de bloques del sistema de medición de RMB en aceros.

El elemento fundamental del sistema de medición de RMB en aceros es el módulo de excitación-detección que se utiliza para magnetizar las muestras de acero y detectar la señal



de RMB. El modulo de excitación-detección de RMB lo denominamos *cabezal excitador-sensor*. El cabezal excitador-sensor está formado por un núcleo en forma de herradura con una bobina de excitación de campo magnético, una bobina de detección de RMB y un sensor de efecto Hall para registrar el campo magnético aplicado. El cabezal excitador-sensor se conecta a dos secciones electrónicas diferentes. Por un lado a un amplificador de potencia (fuente de excitación de la bobina) que se utiliza para suministrar una corriente alterna de hasta 1 A a la bobina de campo magnético, la cual genera un campo magnético proporcional a la corriente. El generador de funciones tipo Agilent 33220A se utiliza para seleccionar la forma, 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 señal de RMB y el campo magnético aplicado en la muestra de acero son detectados a través de la bobina de detección de RMB y del sensor de efecto Hall, respectivamente. La segunda sección electrónica es la de acondicionamiento y alimentación de la señal de la bobina de detección de RMB y del sensor de efecto Hall, respectivamente. La señal de voltaje de salida de la bobina de detección de RMB se acondiciona por medio de un amplificador con ganancia nominal de 1000 y por un filtro pasa-altas activo de tercer orden con frecuencia de corte inferior de 1 kHz. El sensor de efecto Hall se alimenta con una fuente de corriente constante que suministra una corriente de 5 mA. Las señales de voltaje de salida de la etapa de acondicionamiento de la señal de RMB y del sensor de efecto Hall se registran por medio de un osciloscopio digital tipo Agilent DSO6014A. El osciloscopio está enlazado con una computadora personal (PC) por medio de una tarjeta de interfaz GPIB. Un programa desarrollado en LabVIEW 8.2 en ambiente LINUX gestiona la comunicación entre ambos dispositivos. El programa se encuentra almacenado en la PC y se ejecuta para el control de la adquisición, la transferencia y el procesamiento de las señales de los sensores de RMB y de campo magnético.

### **2.3 Cabezal excitador-sensor de ruido magnético Barkhausen**

La medición de la señal de RMB en aceros se realiza utilizando la configuración típica de excitación-detección de RMB que tiene como partes fundamentales un núcleo en forma de herradura, una bobina excitadora y una bobina detectora [2]. El cabezal excitador-sensor de

RMB se diseñó y construyó utilizando la configuración típica de medición. A esta configuración típica se le adicionó un sensor de efecto Hall para medir el campo magnético aplicado en la muestra de acero. En la figura 2.2 se muestra el esquema del cabezal excitador-sensor del sistema de medición de RMB en aceros.

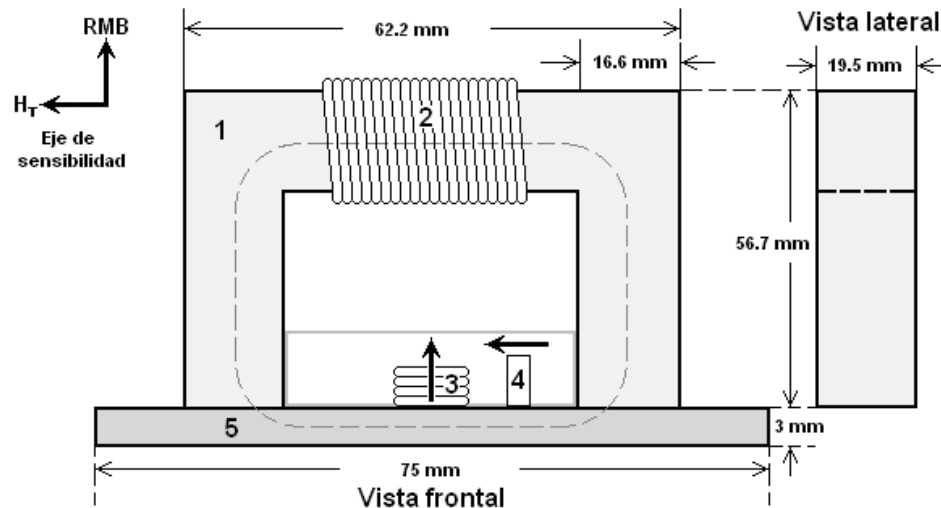


Figura 2.2: Esquema del cabezal excitador-sensor de RMB : 1) Núcleo de Fe-Si, 2) Bobina de excitación de campo magnético, 3) Bobina de detección de RMB, 4) Sensor de efecto Hall y 5) Muestra de acero.

El cabezal excitador-sensor de RMB está formado por una herradura de material magnético suave (Fe-Si) con permeabilidad diferencial máxima  $\mu_r \approx 50\,000$ , una bobina de excitación de campo magnético y un soporte de acrílico en el que se montaron los sensores de RMB y de efecto Hall. Al colocar el cabezal excitador-sensor sobre la muestra de acero, la herradura y la muestra de acero forman un circuito magnético cerrado (ver figura 2.2) debido a que la permeabilidad de los materiales ferromagnéticos (herradura y acero) es mucho mayor que la del vacío [1, 3]. La bobina de detección de RMB y el sensor de efecto Hall al estar colocados sobre la superficie de la muestra de acero tienen su eje de sensibilidad normal y tangencial a ella, respectivamente, como se muestra en la figura 2.2. Para reducir las pérdidas de flujo magnético debido a la separación entre la sección transversal de los polos de la herradura y la superficie de la muestra de acero, se pulió la sección transversal de los polos de la herradura hasta lograr una superficie tipo espejo, ver figura 2.3 (a). La superficie tipo espejo de los polos de la herradura sirve para mejorar el acoplamiento magnético entre la herradura y la placa de acero.

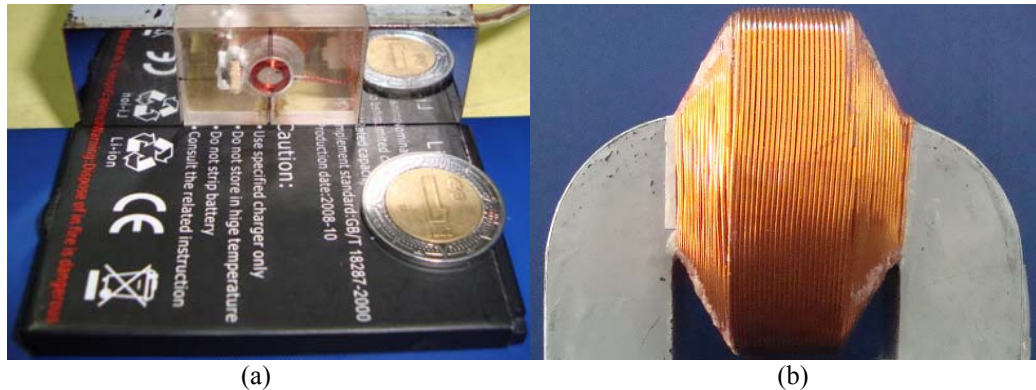


Figura 2.3: Fotos de a) los polos de la herradura del cabezal excitador-sensor, nótese el reflejo de la moneda en uno de los polos que demuestra el pulido tipo espejo, b) la bobina de campo enrollada en la parte superior del núcleo en forma de herradura.

### 2.3.1 La bobina de excitación de campo magnético

La bobina de excitación de campo magnético se diseñó y construyó con alambre de cobre calibre 24 (AWG), que soporta una corriente de 1.3 a 2 A para un margen de temperatura de entre 155 a 200 °C. El alambre de cobre tiene un diámetro de 0.511 mm y una resistividad específica  $\rho_c=1.76 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ . La bobina se encuentra enrollada en la parte superior de la herradura como se muestra en la figura 2.3 (b). Las características de la bobina son:

- sección transversal:  $323.7 \text{ mm}^2$  (16.6 mm x 19.5 mm)
- número total de vueltas: 1000
- número de capas: 27
- número de vueltas por capa: 51, 49, 48, ..., 25, 24
- resistencia<sup>1</sup> DC:  $9.2 \Omega$

### 2.3.2 Etapa de sensado del cabezal excitador-sensor

#### 2.3.2.1 La bobina de detección de ruido magnético Barkhausen

La figura 2.4 muestra una foto del sensor de RMB que es una bobina de inducción comercial tipo FS100/2, con  $R_{DC} = 225.3 \Omega$  y  $A_{ef} = 112.7 \text{ cm}^2$ , obtenida de la compañía alemana *MAGNET-PHYSIK Dr. Steingroever GmbH*. Su principal aplicación es para medir intensidad de campo magnético ( $H$ ) o densidad de flujo magnético ( $B$ ) [19]. La bobina de

<sup>1</sup> Los valores de resistencia en DC fueron medidos en todos los casos con un multímetro Agilent 34410A.

detección de RMB se coloca de manera equidistante entre los polos de la herradura con su eje de sensibilidad normal a la superficie de la muestra de acero (figura 2.2). La orientación del eje de sensibilidad de la bobina de detección de RMB es para medir la componente normal de la densidad de flujo magnético en la muestra de acero.

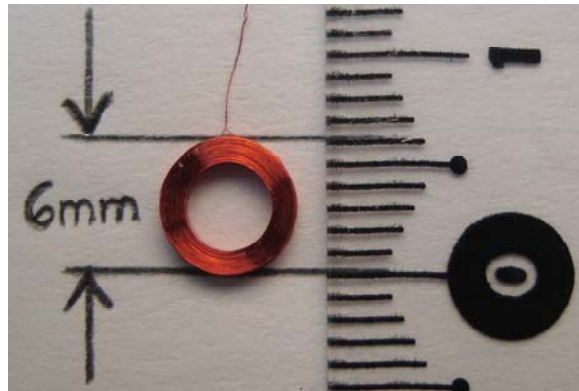


Figura 2.4: Foto de la bobina de inducción utilizada para la detección de la señal de RMB.

### 2.3.2.2 El sensor de efecto Hall

La configuración típica de medición de RMB se complementó adicionando un sensor de efecto Hall para medir el campo magnético en la muestra de acero. La figura 2.5 (a) muestra una foto del sensor de campo utilizado en el cabezal excitador-sensor, el cual es el circuito integrado CYJ411 de montaje superficial obtenido de la empresa China *ChenYang-Technologies-GmbH & Co. KG* cuya aplicación es para mediciones de campo magnético ( $H$ ) o como sensor de corriente ( $I$ ) [20]. El sensor tiene su eje de sensibilidad normal a la superficie del encapsulado. Se utilizó una placa universal para circuitos electrónicos de 17 mm de largo por 6 mm de ancho para soldar el sensor Hall como se muestra en el esquema de la figura 2.5 (b) de manera tal que pueda ser colocado lo más cerca de la superficie de la muestra de acero. El sensor de efecto Hall se coloca a un costado de la bobina de detección de RMB con su eje de sensibilidad paralelo a la superficie de la muestra de acero y orientado en dirección de los polos de la herradura para medir el campo magnético tangencial ( $H_T$ ) en la muestra de acero (ver figura 2.2).

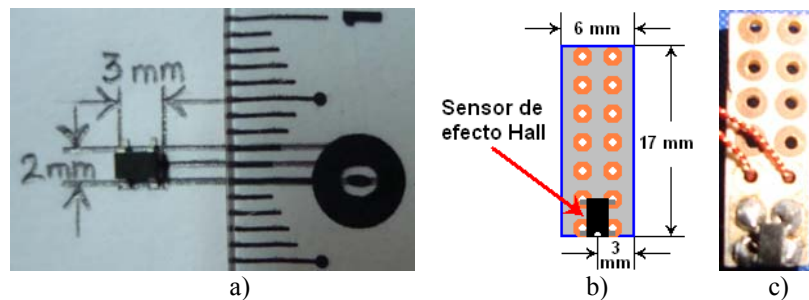


Figura 2.5: a) Foto del sensor de efecto Hall, b) Esquema de la placa del sensor Hall y c) Foto del sensor Hall montado en la placa universal de circuitos electrónicos.

La bobina de detección de RMB y el sensor de efecto Hall se encuentran fijos en un soporte de acrílico de 19.5 mm de ancho por 29 mm de longitud y 6 mm de espesor. Los sensores están aislados por medio de una tira de cinta transparente de 0.04 mm de espesor colocada en la parte inferior del soporte para evitar el contacto con la superficie de la muestra de acero, ver figura 2.6.

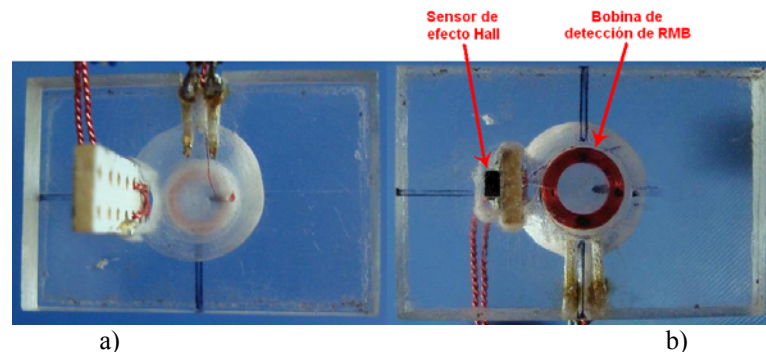


Figura 2.6: Fotos del soporte de acrílico con los sensores montados: a) Cara superior del soporte y b) Cara inferior del soporte con la tira transparente de 0.04 mm de espesor.

El soporte de acrílico con los sensores se montó entre los polos de la herradura para que los sensores estuviesen lo más cerca posible de la superficie de la muestra de acero y así maximizar la sensibilidad del sistema de detección.

## 2.4 Sistema electrónico para el cabezal excitador-sensor

### 2.4.1 Fuente de excitación de la bobina

La excitación de la bobina de campo magnético se realiza utilizando una de dos fuentes implementadas para este fin. La primera es una fuente de excitación que denominamos como fuente básica, diseñada e implementada en base a las notas de aplicación del



dispositivo LM4701 de *National Semiconductor* [21]. Este dispositivo está limitado en corriente y en frecuencia, por lo que se implementó una segunda fuente basada en un amplificador de potencia comercial MP39CL fabricado por la empresa estadounidense *APEX Microtechnology* [22].

#### 2.4.1.1 Fuente básica de excitación de la bobina

La fuente básica de excitación de la bobina de campo está formada por un par de amplificadores de potencia LM4701T conectados en una configuración tipo puente con ganancia  $G = 10$ . La salida de cada amplificador se conecta a una terminal de la bobina de campo magnético, con lo cual, se obtiene una corriente sinusoidal de 10 Hz de frecuencia con salida máxima de 1 A. En la figura 2.7 se muestra el diagrama eléctrico de la fuente básica de excitación.

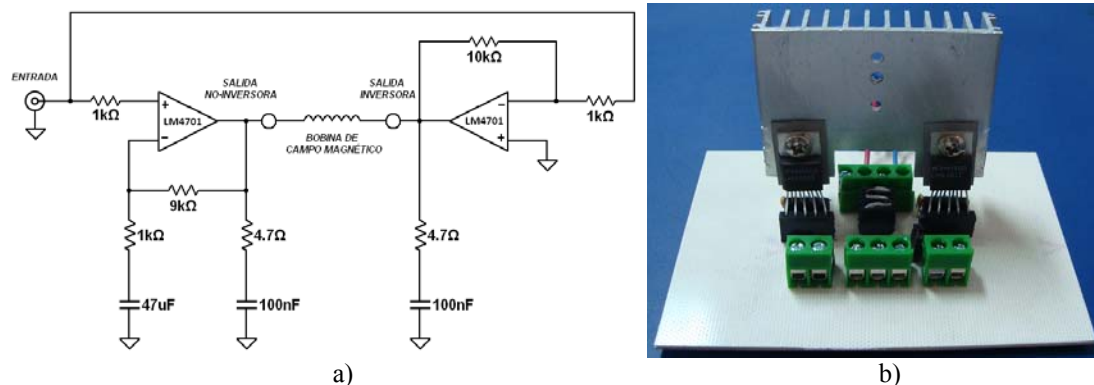


Figura 2.7: Fuente básica de excitación de la bobina de campo magnético empleando un par de amplificadores de potencia LM4701T en configuración tipo puente: a) Diagrama eléctrico y b) Foto del circuito electrónico.

El circuito de excitación de la bobina consta de dos fuentes de voltaje con salidas de voltaje idealmente de la misma magnitud y en contrafase, lo que aumenta la corriente en la bobina de campo y en consecuencia la potencia que se puede suministrar a dicha bobina.

#### 2.4.1.2 Fuente comercial de excitación de la bobina

La figura 2.8 (a) muestra el diagrama eléctrico del amplificador de potencia MP39CL empleado en la fuente comercial de excitación de la bobina de campo magnético cuyas características eléctricas son:

- potencia: 125 watts

- voltaje de alimentación: +/- 100 V (200 V)
- corriente máxima de salida: 10 A
- producto ganancia-ancho de banda (GWB): 2 MHz

El amplificador de potencia MP39CL se configuró en modo inversor con ganancia  $G=10$  para mantener el mismo factor de ganancia de la fuente básica de excitación de la bobina. El amplificador MP39CL se alimenta con un par de fuentes de laboratorio cuyas características eléctricas son iguales. Estas fuentes pueden suministrar un voltaje máximo de DC de 63 V y una corriente máxima de 3 A como se muestra en el esquema de la figura 2.8 (b). Los valores máximos de voltaje y corriente del par de fuentes de alimentación limitan la señal de salida del amplificador de potencia MP39CL, por lo cual el amplificador solo puede entregar a su salida una corriente sinusoidal máxima de 2.8 A para ser aplicada a la bobina de campo magnético.

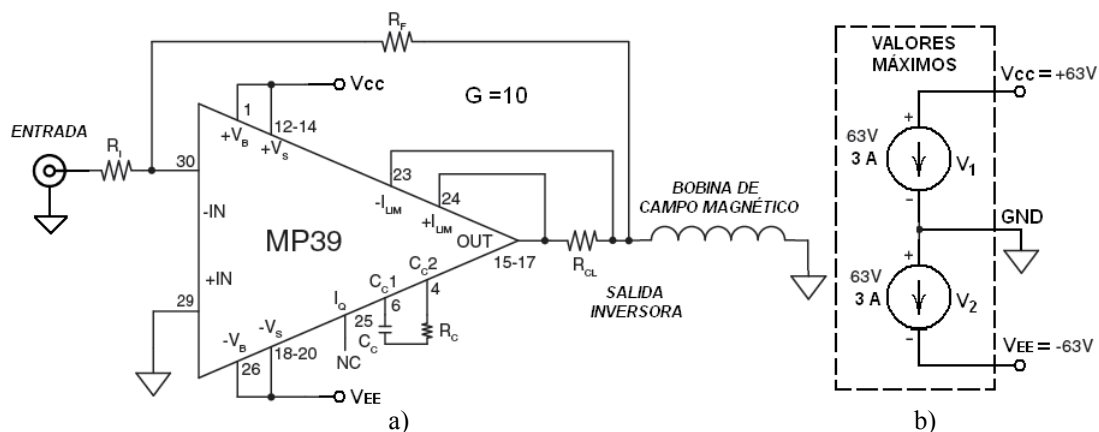


Figura 2.8: a) Diagrama eléctrico del amplificador de potencia MP39CL en configuración inversor con ganancia  $G=10$ . Tomado de [22] y b) Esquema eléctrico del par de fuentes de laboratorio empleadas para alimentar al amplificador de potencia comercial MP39CL, en el cual se indica el voltaje y corriente máximos que pueden suministrar.

En la figura 2.9 (a) se muestra la foto del circuito electrónico del amplificador comercial MP39CL. El amplificador se montó sobre el kit de evaluación EK59 fabricado por la misma compañía el cual dispone de los elementos necesarios para ponerlo en funcionamiento como se muestra en la figura 2.9 (b).

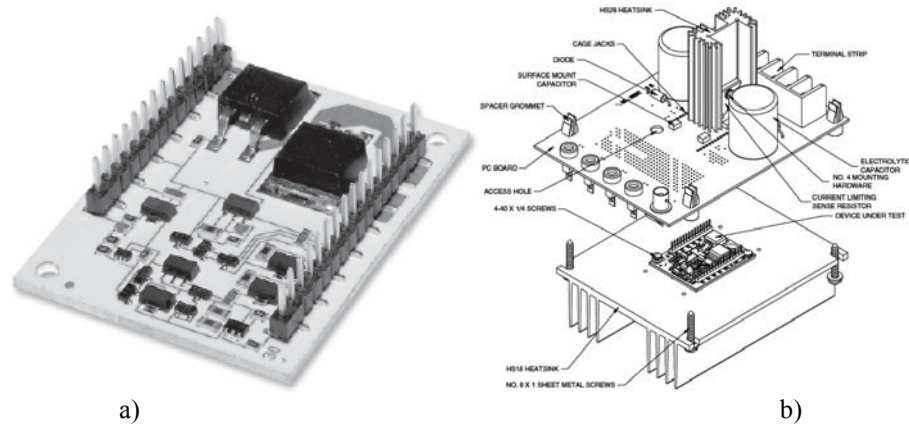


Figura 2.9: Foto del amplificador de potencia comercial MP39CL fabricado por APEX Microtechnology: a) Circuito electrónico y b) Esquema de montaje del amplificador en el kit de evaluación EK59. Tomado de [22].

#### 2.4.2 Acondicionamiento de la señal de salida de la bobina de detección de ruido magnético Barkhausen

El acondicionamiento de la señal de voltaje de salida de la bobina de detección de RMB se realiza utilizando dos etapas electrónicas, la de amplificación y la de filtrado. La figura 2.10 (a) muestra el diagrama eléctrico de la etapa de amplificación, la cual se diseñó para una bobina de inducción cuya frecuencia de resonancia es de alrededor de 1 MHz. Esta etapa amplifica el bajo nivel de voltaje de salida de la bobina de inducción que es del orden de unidades de milivolts.

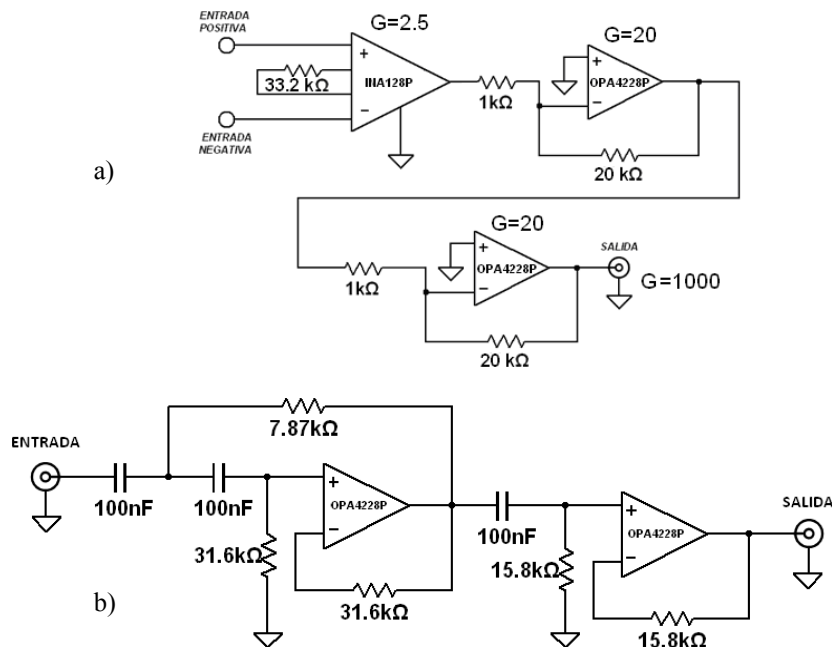


Figura 2.10: Diagrama eléctrico de acondicionamiento de la señal de RMB: a) Amplificador de señal de RMB y b) Filtro de señal de RMB.

La etapa de amplificación se implementó con los dispositivos INA128P y OPA4228P de *National Instruments* que tienen como características una densidad de voltaje de ruido a 1 kHz de  $8 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  y  $3 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ , una razón de rechazo en modo común (CMRR) de 120 dB y 138 dB, y un producto ganancia-ancho de banda (GWB) de 1.3 MHz y 33 MHz, respectivamente [23, 24]. La etapa de amplificación tiene una ganancia nominal  $G = 1000$  y una característica ganancia-frecuencia que es plana hasta los 977 kHz.

La figura 2.10 (b) muestra el filtro pasa-altas (FPA) activo implementado con el circuito integrado OPA4228P para eliminar la componente de frecuencia (10 Hz) del campo magnético de excitación y posibles componentes de ruido eléctrico asociado a la red de alimentación de AC que se encuentran en la señal de RMB detectada por la bobina de inducción. El FPA es de tipo Butterworth de tercer orden (60 dB/década) y tiene una frecuencia de corte (-3 dB) de  $f_{\text{cFPA}} \cong 1 \text{ kHz}$ .

### 2.4.3 Fuente de corriente constante del sensor de efecto Hall

La fuente de corriente constante (FCC) ha sido diseñada<sup>2</sup> utilizando el dispositivo LM394H que tiene un par de transistores acoplados en el mismo encapsulado. Las características eléctricas de este par de transistores están muy cercanas a las de un transistor teórico [25]. En la figura 2.11 se muestra el diagrama eléctrico de la FCC cuya configuración empleada es un espejo de corriente. Esta fuente fue diseñada para un sensor de efecto Hall CYJ411 que debe ser alimentado con una corriente constante de entre 5 y 10 mA [20]. La corriente de salida suministrada al sensor de efecto Hall por esta fuente es de  $5.08 \pm 0.02 \text{ mA}$ . La FCC garantiza una estabilidad de la corriente de 0.39 %.

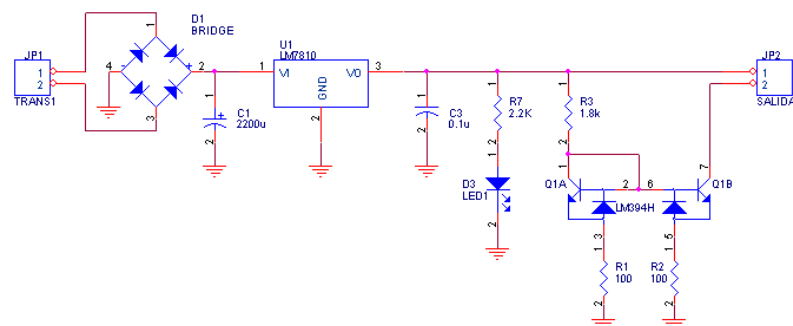


Figura 2.11: Diagrama eléctrico de la fuente de corriente constante del sensor de efecto Hall empleando el dispositivo LM394H.

<sup>2</sup> Fue diseñada por Saúl Mújica Ascencio estudiante de M. en C. en Ingeniería electrónica



## 2.5 Programa de control, adquisición y procesamiento de la señal de ruido magnético Barkhausen

El software del sistema de medición de RMB se desarrolló en LabVIEW 8.2 para el sistema operativo LINUX. El software se divide en tres aplicaciones independientes que se convertirán en subVIs en vista de mejorar en el futuro el sistema de medición desarrollado. La primera aplicación realiza el control, adquisición, transferencia y almacenamiento de las señales de RMB detectadas por el sistema de medición. La segunda aplicación realiza parte del procesamiento de las señales de RMB. La tercera aplicación obtiene los parámetros (RMS y Energía) cuantitativos de las señales de RMB procesadas y también realiza la estadística del conjunto de parámetros obtenidos de un grupo de señales.

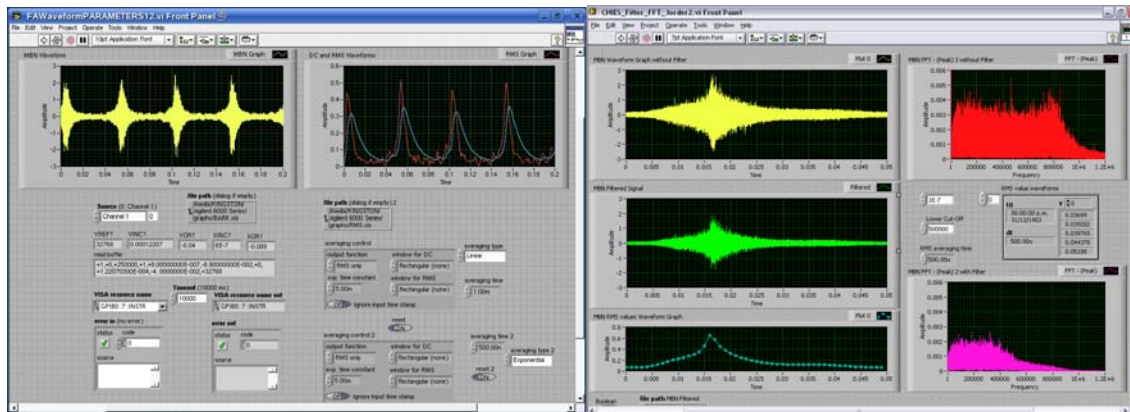
En la figura 2.12 (a) se muestra el panel frontal de la primera aplicación en la cual se grafica del lado izquierdo la señal de RMB registrada en el osciloscopio y del lado derecho su envolvente. Además tiene un grupo de opciones en las cuales se establecen los parámetros de configuración del osciloscopio como son el canal de adquisición, el tiempo por división, el voltaje por división, etc. Al correr la aplicación se lleva a cabo la adquisición y transferencia de la señal de RMB registrada en la pantalla del osciloscopio. Uno de los parámetros de configuración principales de esta aplicación es el número de puntos de la señal registrada que se transfieren desde el osciloscopio a la PC el cual para todos los casos es de 500,000 valores. La señal de RMB mostrada en la pantalla del osciloscopio tiene un período de 50 ms lo que implica que se pueden obtener componentes de frecuencia de hasta 5 MHz<sup>3</sup>. Sin embargo, el espectro de las señales de RMB se ve limitado por la característica ganancia-frecuencia del amplificador de señal de RMB. Los datos de cada señal se almacenan en un archivo .XLS para su futuro procesamiento.

En la figura 2.12 (b) se muestra el panel frontal de la segunda aplicación mediante la cual se procesan las señales de RMB. La señal de RMB sin procesar se grafica del lado superior izquierdo y su espectro de frecuencia obtenido por medio de la transformada rápida de Fourier (FFT) se encuentra del lado superior derecho. Como se hace un análisis de los parámetros de la señal de RMB eliminando componentes de frecuencia se emplea un filtro digital pasa-bajas (FDPB) tipo Butterworth de 3er orden para eliminar las componentes de

---

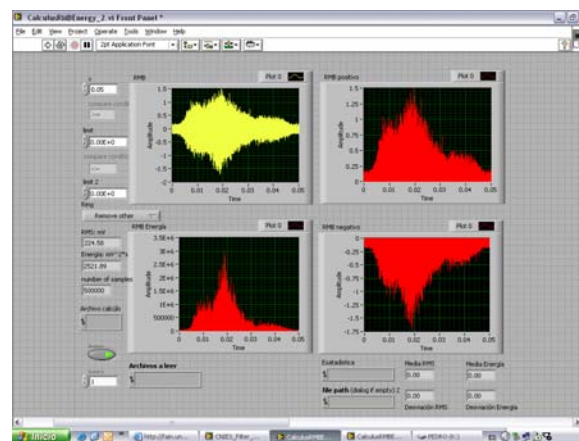
<sup>3</sup> El teorema de Nyquist plantea que la velocidad de muestreo debe ser al menos el doble de la frecuencia de la señal muestreada para que esta pueda ser reproducida correctamente.

alta frecuencia. Una vez filtrada la señal de RMB, esta se muestra bajo la gráfica de la señal de RMB original y se obtiene su espectro de frecuencia que se observa en la parte inferior derecha de la aplicación. Después se obtiene su envolvente (Env) por medio de la ecuación (1.12). Este es uno de los parámetros empleados para caracterizar a los aceros, el cual se grafica en la parte inferior izquierda de la aplicación. Ambas señales, la de RMB filtrada y su Env se almacenan en un par de archivos .XLS para su futuro análisis.



a)

b)



c)

Figura 2.12: Pantallas del sistema de medición de RMB. a) Panel frontal de la aplicación de control, adquisición, transferencia y almacenamiento de las señales de RMB, b) Panel frontal de la aplicación de procesamiento de la señal de RMB, y c) Panel frontal de la aplicación para la obtención del valor RMS y de Energía de las señales de RMB procesadas.

En la figura 2.12 (c) se muestra el panel frontal de la última aplicación del software del sistema de medición de RMB. Esta aplicación cuenta con una opción empleada para fijar un nivel mínimo de amplitud de la señal de RMB para discriminar el ruido de fondo de las señales de RMB y poder analizar solo la señal de interés. Por medio de esta aplicación se



obtienen los parámetros de la señal de RMB como son el valor RMS y de Energía por medio de las ecuaciones (1.10) y (1.11), respectivamente. Los parámetros de un conjunto de señales se almacenan en un archivo .XLS y por medio de esta misma aplicación se obtiene la media y la desviación estándar de esos parámetros.

La integración del cabezal excitador-sensor, de la sección electrónica para el cabezal excitador-sensor y el programa de control, adquisición y procesamiento de la señal de RMB en un todo, conforma el *Sistema de medición de ruido magnético Barkhausen en aceros* que se utiliza para caracterizar a los aceros API-5L grado X52, X56 y X60. En la figura 2.13 se muestra una foto de los equipos y los módulos desarrollados que conforman el sistema de medición.

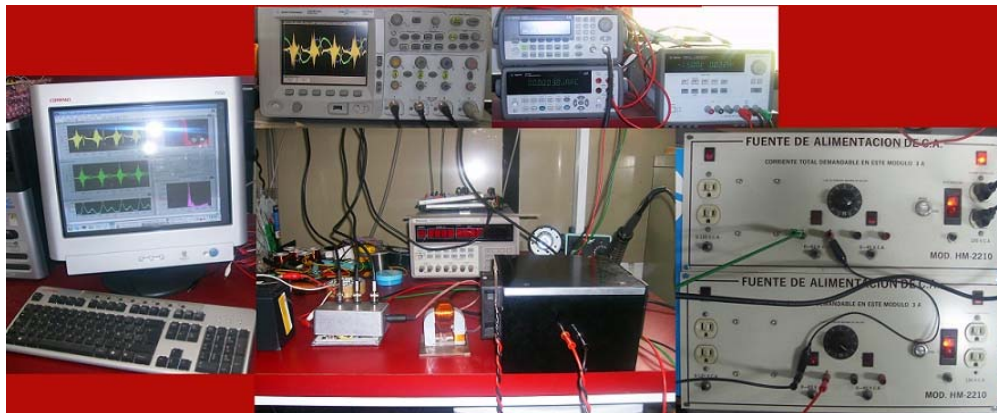


Figura 2.13: Fotos del sistema de medición de ruido magnético Barkhausen en aceros.

## 2.6 Materiales

Los materiales estudiados en este trabajo son los aceros API-5L grado X52, X56 y X60. Las muestras utilizadas fueron obtenidas de secciones retiradas de ductos de transporte de hidrocarburos en PEMEX Región Sur, ver figura 2.14 (a). Los ductos de petróleo y gas son fabricados de acero magnéticamente anisotrópico, donde los ejes de fácil y difícil 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  $\times$  75 mm con espesor de 2.5 mm, como se muestra en la figura 2.14 (b).



Figura 2.14: Fotos de a) Sección retirada de un ducto de transporte de hidrocarburos de PEMEX Región Sur y b) Muestra maquinada de los aceros API-5L, con una marca que identifica el tipo de acero y la dirección del eje longitudinal (L) del acero.

Las características de composición química, microestructura y propiedades magnéticas de estos aceros ya han sido estudiadas y descritas por Roland Grössinger et al. [26]. En la tabla 2.1 se muestra la composición química de los aceros API-5L (grado X52, X56 y X60). A partir de la tabla 2.1 se observa que los tres tipos de aceros API-5L difieren en su composición química, lo que los hace diferentes uno respecto a otro.

TABLA 2.1.  
COMPOSICIÓN QUÍMICA (wt%) DE LAS MUESTRAS DE ACERO X52, X56 Y X60. EL RESTO AL 100% ES Fe. TOMADO DE [26].

Elemento	X52	X56	X60
C	0.21	0.10	0.08
Mn	1.21	1.51	1.09
Si	0.05	0.31	0.26
P	0.021	0.014	0.010
S	0.019	0.002	0.004
Cr	0.02	0.03	0.01
Ni	0.02	0.02	0.02
V	0.00	0.00	0.08
Ti	0.00	0.02	0.00
Cu	0.05	0.01	0.30

En la figura 2.15 se muestra la microestructura típica de las muestras de acero estudiadas, con el EFM (dirección longitudinal del tubo) en la dirección horizontal. Se nota que el acero grado X52 (ver figura 2.15 (a)) presenta una microestructura de dos fases (ferrita y perlita) claramente visibles a lo largo de la dirección de laminado. La microestructura de



los aceros grado X56 y X60 (ver figura 2.15 (b-c)) consiste también de dos fases las cuales son insignificantes en comparación con la del acero grado X52.

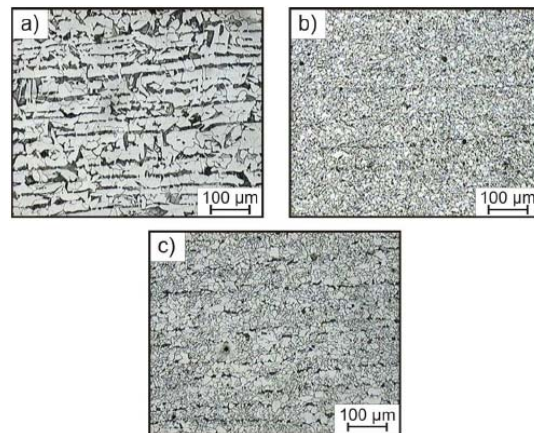


Figura 2.15: Comparación de la microestructura (el EFM es horizontal) de las muestras de los aceros API-5L grado a) X52, b) X56, y c) X60. Tomado de [26].

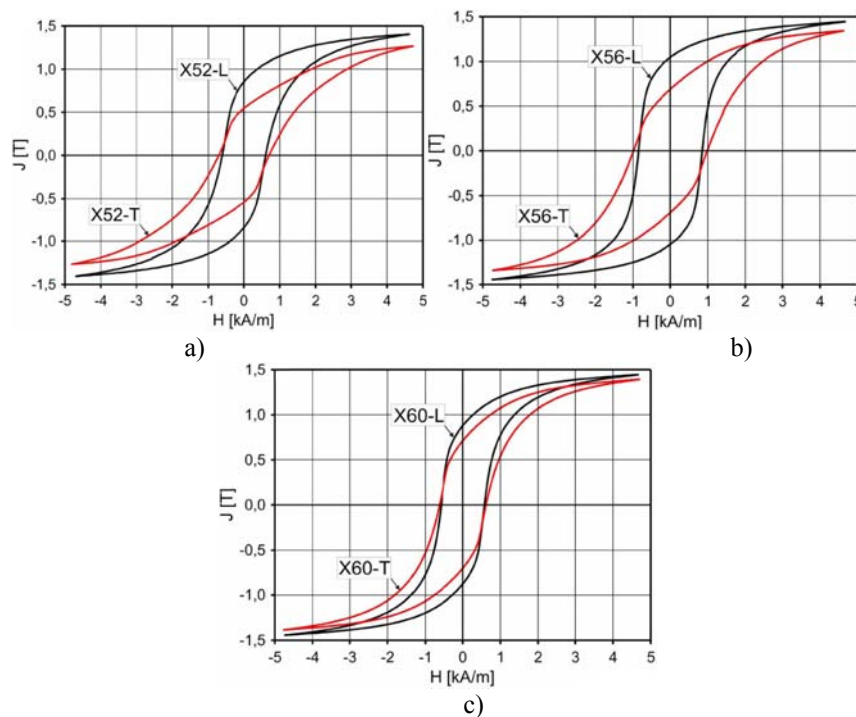


Figura 2.16: Lazos de histéresis obtenidos en la dirección del EFM (L-dirección longitudinal) y en la dirección del EDM (T-dirección transversal) de los aceros API-5L grado a) X52, b) X56, y c) X60. Tomado de [26].

Los lazos de histéresis de los cuales se obtienen los valores de la coercitividad ( $H_c$ ) y de la polarización remanente ( $J_r$ ) de los aceros API-5L grado X52, X56 y X60, se muestran en la figura 2.16. Para cada acero se muestra un par de lazos de histéresis obtenido a lo largo



de la dirección del EFM (L-dirección longitudinal) y del EDM (T-dirección transversal). En estas figuras se puede apreciar el cizallamiento de los lazos de histéresis en la dirección del EDM. Esto demuestra la anisotropía magnética de estos aceros.

En la tabla 2.2 se muestran los valores de coercitividad  $H_c$  y polarización remanente  $J_r$  obtenidos de los lazos de histéresis del EFM y del EDM. En la figura 2.16 se aprecia que los valores de  $J_r$  siempre son mayores en la dirección del EFM para cada material. Estas diferencias muestran claramente la anisotropía magnética de estos aceros.

TABLA 2.2.  
VALORES  $H_c$  Y  $J_r$  DE LOS ACEROS ESTUDIADOS EN LAS DIRECCIONES DE LOS EFM Y EDM. TOMADO DE [26].

Acero	$H_c$ [A/m]	$\Delta H_c$ [A/m]	$J_r$ [T]	$\Delta J_r$ [T]
X52-EFM	614	94	0.85	0.31
X52-EDM	708		0.54	
X56-EFM	855	127	1.05	0.36
X56-EDM	982		0.69	
X60-EFM	578	42	0.88	0.18
X60-EDM	620		0.70	

La tabla 2.2 muestra el valor  $\Delta H_c$  y  $\Delta J_r$ , que es la diferencia que existe entre los valores  $H_c$  y  $J_r$  entre ambos ejes (EFM y EDM) para un mismo material, respectivamente. Se puede ver que la diferencia es mayor en ambos casos para el acero X56, esto significa que tiene una mayor anisotropía magnética.

## 2.7 Resultados del capítulo

- 1- Se implementó el sistema típico de medición de ruido magnético Barkhausen adicionando un sensor de efecto Hall para medir el campo magnético que se aplica en la muestra de acero.
- 2- Se diseñó y construyó el cabezal excitador-sensor de ruido magnético Barkhausen.
- 3- Se diseñó y construyó el sistema electrónico del cabezal excitador-sensor.
- 4- Se diseñó e implementó el software del sistema de medición de ruido magnético Barkhausen.

De esta manera se le ha dado cumplimiento al primer objetivo específico de este trabajo.



## Capítulo 3: Caracterización del sistema de medición de ruido magnético Barkhausen.

### 3.1 Introducción

Este capítulo está en correspondencia con el segundo objetivo específico de este trabajo: *caracterizar el sistema de medición de RMB: los sensores y la etapa de acondicionamiento del cabezal excitador-sensor*. En este capítulo se analiza la respuesta en frecuencia de la bobina de detección de RMB y de la etapa de acondicionamiento de la señal de RMB (el amplificador y el filtro pasa-altas) y por último se caracteriza el sensor de efecto Hall utilizado para la detección del campo magnético aplicado en la muestra de acero.

### 3.2 Medición de la impedancia de la bobina de detección de ruido magnético Barkhausen

La respuesta en frecuencia de la bobina de inducción FS100/2 empleada para la detección de la señal de RMB se obtuvo utilizando un analizador de redes HP 4195A por medio del cual se midió la magnitud y la fase de la impedancia en función de la frecuencia. La medición de esas dos características de la bobina de detección se realizó para dos casos: i) para cuando solo se tiene la bobina de detección sin el cable de conexión con la etapa de acondicionamiento (bobina BD) y ii) para cuando se le incorpora el cable (bobina BDC). Los valores de magnitud y fase en función de la frecuencia se adquirieron del analizador de redes y se almacenaron en un archivo .XLS. En la figura 3.1 se muestran las mediciones de la magnitud y la fase de la impedancia de la bobina de detección para los casos BD y BDC.

En la figura 3.1(a) se muestra la medición de la impedancia de la bobina BD. Se observa que la bobina BD tiene un comportamiento lineal en su magnitud en función de la frecuencia hasta cerca de la frecuencia de resonancia  $f_r = 1.27$  MHz. También se aprecia el efecto dominante de la capacitancia distribuida de la bobina para frecuencias mayores a la  $f_r$  que se manifiesta con la disminución de la impedancia.

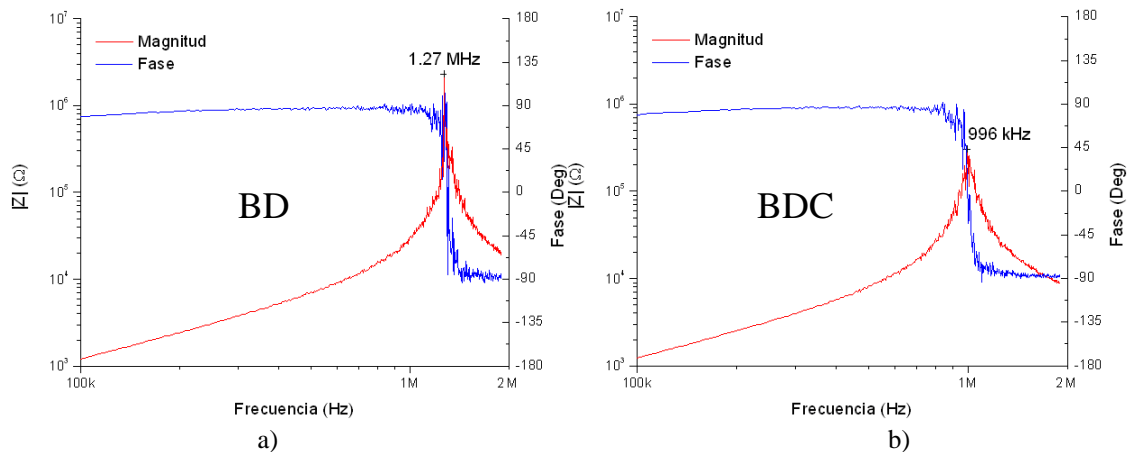


Figura 3.1: Gráficas de magnitud y fase de las impedancias medidas por medio de un analizador de redes HP 4195A para: a) la bobina de detección sin cable (bobina BD) y b) la bobina de detección con cable (bobina BDC).

Cuando se conecta a la bobina de detección el cable para la conexión con la etapa de acondicionamiento su impedancia cambia, los parámetros eléctricos ( $L_s$ ,  $R_s$  y  $C$ ) de la bobina se ven modificados debido a que se adicionan los parámetros eléctricos del cable. Los parámetros eléctricos del cable introducen valores de inductancia y resistencia que por la naturaleza de la bobina de detección no son significativos en comparación con los valores propios de la bobina. En cambio la capacidad distribuida del cable si tiene efectos significativos en la impedancia. En este caso ocurre un aumento de la capacidad distribuida de la bobina de detección provocada por la incorporación del cable lo que ocasiona que la  $f_r$  se traslade hacia las bajas frecuencias [4, 5].

En la figura 3.1 (b) se observa que para la bobina BDC la  $f_r = 996$  kHz, siendo menor en comparación con la frecuencia de resonancia de la bobina BD (ver figura 3.1 (a)). Esto nos indica que la frecuencia de resonancia depende inversamente con el valor de la capacidad distribuida de la bobina.

### 3.2.1 Simulación eléctrica de la bobina de detección

El analizador de redes HP 4195A cuenta con una opción en la que se selecciona el circuito eléctrico equivalente del dispositivo que se encuentra bajo prueba, en este caso la bobina de inducción, y mediante la medición de la magnitud y la fase de su impedancia obtiene sus parámetros eléctricos. Las características de amplitud y fase en función de la frecuencia de la bobina de inducción se pueden obtener utilizando su circuito eléctrico

equivalente. En la figura 3.2 se muestra el circuito eléctrico equivalente de una bobina de inducción el cual se emplea para simular las características de amplitud-frecuencia (CAFr) y fase-frecuencia (CFFr) de las bobinas BD y BDC, cuyos parámetros son la inductancia  $L_s$ , la resistencia  $R_s$  y la capacidad distribuida  $C$ .

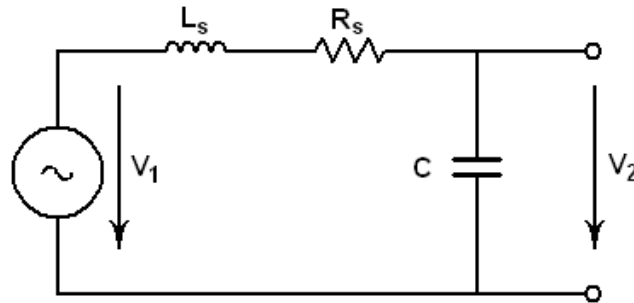


Figura 3.2: Circuito eléctrico equivalente de una bobina de inducción.

El comportamiento de la CAFr y CFFr de las bobinas BD y BDC se simularon con la ayuda del programa *NI Multisim (versión 10)* utilizando los parámetros eléctricos calculados por el analizador de redes. En la tabla 3.1 se muestran los valores de los parámetros del circuito eléctrico equivalente de ambas bobinas obtenidos con el analizador de redes.

TABLA 3.1.  
VALORES DE  $L_s$ ,  $R_s$  Y  $C$  OBTENIDOS DEL ANALIZADOR DE REDES HP 4195A PARA LAS BOBINAS BD Y BDC.

Bobina	$L_s$ (mH)	$R_s$ ( $\Omega$ )	$C$ (pF)
BD	1.1	238.3	14.3
BDC	1.2	263.8	20.9

En la figura 3.3 (a-b) se muestran las características de amplitud y fase en función de la frecuencia del circuito eléctrico de la figura 3.2 para los casos de las bobinas BD y BDC, respectivamente. La CAFr de ambos casos simulados tiene una respuesta plana hasta cerca de su  $f_r$ . Se observa que tanto para el caso medido (ver figura 3.1(a-b)) y el simulado, los valores de  $f_r$  son similares. La CFFr de las bobinas BD y BDC muestran que no existe desfasaje hasta cerca de su  $f_r$ , pero al rebasar este valor de frecuencia ocurre un cambio drástico de fase de 180 grado. El valor de la  $f_r$  y el comportamiento de la fase también

corresponden con los obtenidos de la medición de la impedancia (magnitud y fase) de ambas bobinas BD y BDC.

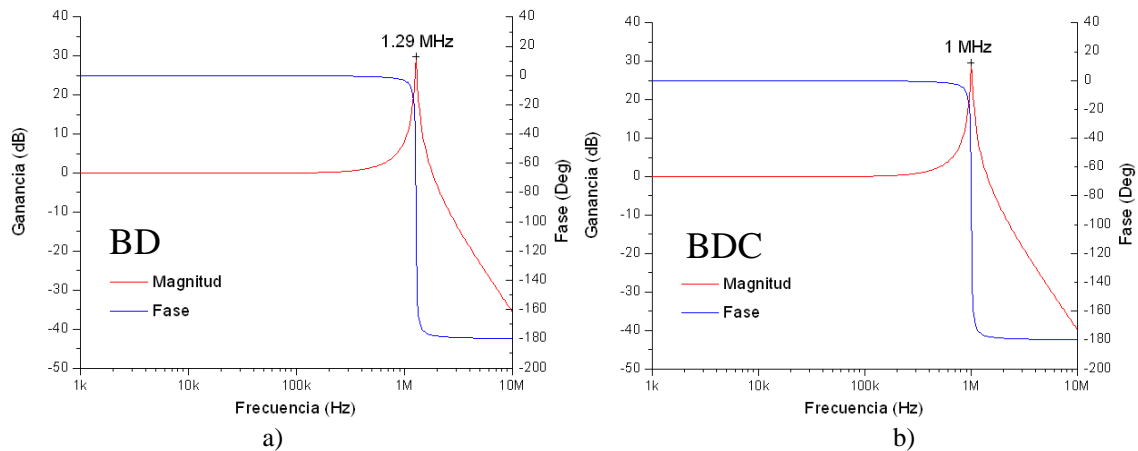


Figura 3.3: Características de amplitud y fase en función de la frecuencia simuladas con el software NI Multisim a partir de los valores obtenidos del analizador de redes HP 4195A para el circuito equivalente de: a) la bobina BD y b) la bobina BDC.

La bobina de detección se utiliza junto con el cable para la conexión con la etapa de acondicionamiento por lo cual se hará referencia más adelante a los datos de la bobina BDC la cual tiene una respuesta plana y sin cambio de fase de 180 grados, hasta valores cercanos a  $f_r \cong 1$  MHz. La medición y la simulación eléctrica se realizaron con el fin de demostrar que cualquier aumento en la capacidad distribuida C de la bobina de detección ocasiona que la  $f_r$  tenga valores de más baja frecuencia provocando que la bobina de detección disminuya su ancho de banda. Se hace aquí la demostración de este efecto ya que en el capítulo 4 se estudiará la influencia en los parámetros de la señal de RMB (valores RMS, de Energía, y envolvente) cuando la frecuencia de resonancia de la bobina de detección se encuentra dentro de la banda de paso del sistema electrónico de acondicionamiento de la señal de RMB.

### 3.3 Ganancia y fase en función de la frecuencia del amplificador de señal de ruido magnético Barkhausen

La respuesta en frecuencia de la ganancia y la fase del amplificador de señal de RMB con ganancia nominal  $G=1000$ , se obtuvo utilizando un osciloscopio digital Agilent DSO6014A el cual puede realizar mediciones de amplitud máxima, fase, y puede realizar la

transformada rápida de Fourier (FFT, por su siglas en ingles) [27]. La medición de la ganancia y fase del amplificador en función de la frecuencia se realizó con el fin de conocer el ancho de banda del amplificador. La medición de esas dos características del amplificador sirve para determinar a partir de qué frecuencia el amplificador incorpora desfasaje en las señales amplificadas y conocer los valores de desfasaje a ciertas frecuencias. También para determinar en qué valor de frecuencia la ganancia del amplificador disminuye provocando una atenuación de 3 dBV en la señal amplificada, que es a partir de este valor de frecuencia que el amplificador se comporta como un filtro pasabajas.

El procedimiento de medición de la ganancia del amplificador consistió en aplicar a la entrada del amplificador una señal sinusoidal utilizando un oscilador HP 652A en un intervalo de frecuencias desde 1 Hz hasta 1.5 MHz. La amplitud de la señal del oscilador se fijó a un valor de voltaje de  $1 \text{ mV}_{\text{RMS}}$ . El valor de  $1 \text{ mV}_{\text{RMS}}$  de la señal del oscilador se eligió así debido a que la ganancia del amplificador es  $G = 1000$ , con lo que se consigue una amplitud en la señal de voltaje de salida del amplificador de  $1 \text{ V}_{\text{RMS}}$ . El voltaje de  $1 \text{ V}_{\text{RMS}}$  de la señal de salida del amplificador fue necesario para normalizar la medición de la ganancia del amplificador. El osciloscopio se configuró de tal manera que se aplica la FFT a la señal amplificada y se mide la amplitud máxima de la FFT. La aplicación de la FFT para este osciloscopio toma como referencia  $1 \text{ V}_{\text{RMS}}$  que equivale a 0 dBV [27]. Al medir la amplitud máxima de la FFT de la señal amplificada se obtiene la medición de la ganancia normalizada que en 0 dBV nos indica la máxima ganancia del amplificador. La medición de la amplitud máxima de la FFT cuando el voltaje de la señal amplificada se atenúa 3 dBV proporciona una estimación de la frecuencia de corte del amplificador. La figura 3.4 muestra por medio de un diagrama de bloques el sistema de medición de la ganancia y la fase del amplificador.

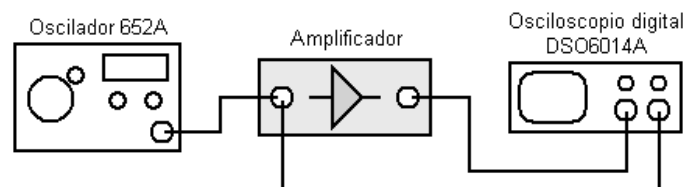


Figura 3.4: Diagrama de bloques del sistema de medición de la ganancia y la fase del amplificador de señal de RBM.

Los valores de ganancia a diferentes frecuencias de la señal aplicada al amplificador medidos utilizando el osciloscopio digital Agilent DSO6014A se encuentran en la tabla A.1 del apéndice A.

En la figura 3.5 se muestra la respuesta en frecuencia de la ganancia del amplificador. Se observa que hay pequeñas variaciones de la ganancia alrededor de los 0 dBV en el intervalo de 50 Hz a 50 kHz que son del orden de  $\pm 0.2$  dBV. A partir de los 100 kHz y hasta los 800 kHz se presentan dos picos positivos y uno negativo en el comportamiento de la ganancia del amplificador los cuales no sobrepasan el valor de 1 dBV. Después del segundo pico positivo la ganancia comienza a disminuir drásticamente y su respuesta en frecuencia nos indica que para una frecuencia de 977 kHz la ganancia ha disminuido 3 dBV. A partir de este valor de frecuencia es que el amplificador comienza a disminuir su ganancia en función de la frecuencia por lo que comienza a comportarse como un filtro pasa-bajas.

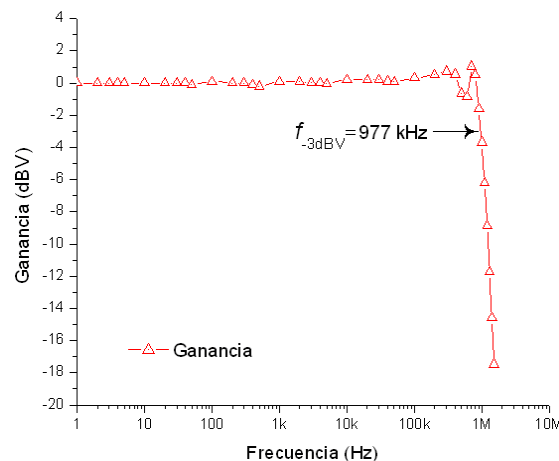


Figura 3.5: Ganancia del amplificador en función de la frecuencia, la cual fue medida utilizando un osciloscopio digital Agilent DSO6014A.

Es bien conocido que un filtro introduce desfases en las señales para valores de frecuencia cercanas a la frecuencia de corte del filtro. En el caso del amplificador de RMB dicho desfase en las señales amplificadas también ocurre. La medición de la respuesta en frecuencia de la fase se realizó utilizando el osciloscopio digital Agilent DSO6014A. El procedimiento de medición de la fase se realizó al mismo tiempo que la medición de la ganancia. Se utilizó la opción del osciloscopio que permite medir la fase de una señal respecto a una señal de referencia [27]. El osciloscopio toma como referencia la señal de



entrada del amplificador y como objeto de medición la señal de salida del amplificador para medir el desfase entre ambas.

En la tabla A.1 del apéndice A se encuentran los valores de fase medidos por el osciloscopio para cada frecuencia de la señal aplicada al amplificador. En la figura 3.6 se muestra la fase en función de la frecuencia del amplificador.

Al hacer un análisis del resultado de la medición de la fase del amplificador, se observa que no existe desfase hasta los 50 kHz (ver tabla A.1) y que por encima de esta frecuencia el amplificador introduce un desfase que se acentúa a medida que aumenta la frecuencia de la señal aplicada al amplificador.

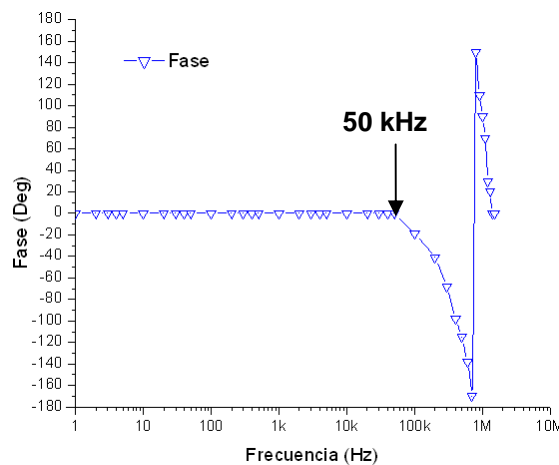


Figura 3.6: Fase del amplificador en función de la frecuencia medida utilizando el osciloscopio digital Agilent DSO6014A.

A partir de los resultados obtenidos de la medición de las características de ganancia y fase del amplificador en función de la frecuencia, se aprecia que puede ser empleado para amplificar señales, con una ganancia  $G = 1000$ , con componentes de frecuencia desde 1 Hz hasta alrededor de 977 kHz. Sin embargo, debido a su característica de fase frecuencia el amplificador introduce desfases en las componentes de frecuencia de la señal amplificada por arriba de los 50 kHz. Esto restringe el análisis de las señales de RMB que van a ser amplificadas por este dispositivo ya que tienen un amplio espectro de frecuencia [15], y debido al desfase introducido por el amplificador solo se puede hacer un análisis en amplitud de las señales de RMB.

### 3.4 Característica amplitud-frecuencia de la bobina de detección y la ganancia del amplificador de ruido magnético Barkhausen

La figura 3.7 muestra la CAFr de la bobina de detección de RMB simulada (bobina BDC) y la ganancia medida del amplificador de señal de RMB. Se observa que la frecuencia de resonancia de la bobina es de  $f_r \approx 1$  MHz, esto implica que las componentes de frecuencia de una señal detectada por la bobina, si están cercanas a la  $f_r$  se amplifican debido al efecto resonante de la bobina de detección de RMB. Sin embargo, la frecuencia de resonancia  $f_r$  de la bobina de detección de RMB se encuentra en la banda de rechazo del amplificador la cual se encuentra a partir de los 977 kHz. Esto implica que las componentes de frecuencia de la señal detectada que fueron amplificadas por el efecto resonante de la bobina de RMB al ser mayores que 977 kHz su amplitud se ve atenuada.

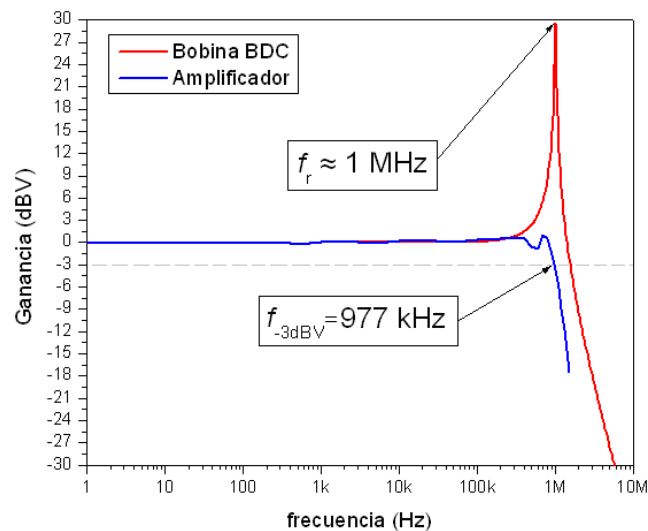


Figura 3.7: Característica amplitud-frecuencia de la bobina de detección de RMB y ganancia en función de la frecuencia del amplificador de RMB.

### 3.5 Amplitud y fase en función de la frecuencia del filtro pasa-altas

La respuesta en frecuencia del FPA se obtuvo empleando el método de medición descrito en la sección 3.3 para la ganancia y la fase del amplificador. El filtro es de tipo Butterworth lo que implica que su respuesta en amplitud en la banda de paso tiene un comportamiento plano y es de tercer orden por lo que la atenuación en la banda de rechazo es de 60 dB/década. La frecuencia de corte del filtro es de 1 kHz. Se utilizaron resistencias y

capacitores con tolerancias del  $\pm 1\%$  para la construcción de este filtro, el cual fue descrito en el capítulo 2 de esta tesis. La tolerancia en los dispositivos utilizados provocó un ligero aumento de 120 Hz en la frecuencia de corte del filtro, en consecuencia se tiene que la frecuencia de corte real es de  $f_{cFPA} = 1.12 \text{ kHz} \cong 1 \text{ kHz}$ .

En la tabla A.2 del apéndice A se encuentran los valores de la amplitud y la fase del filtro pasa-altas medidos utilizando el osciloscopio digital DSO6014A para diferentes valores de frecuencia en un intervalo desde 100 Hz hasta 1.5 MHz.

En las figuras 3.8 (a) y (b) se muestran las respuestas en frecuencia de la amplitud y la fase del filtro pasa-altas, respectivamente. En la figura 3.8 (a) se aprecia que en la banda de paso del filtro se tiene una respuesta plana en amplitud. También se aprecia que la frecuencia de corte está alrededor de 1 kHz ( $f_{cFPA} = 1.12 \text{ kHz}$ ) y que la atenuación en la banda de rechazo es de 60 dB/década. En la figura 3.8 (b) se observa que el filtro introduce desfase en las componentes de frecuencia de las señales filtradas hasta los 20 kHz y por encima de esta frecuencia ya no introduce ningún desfase.

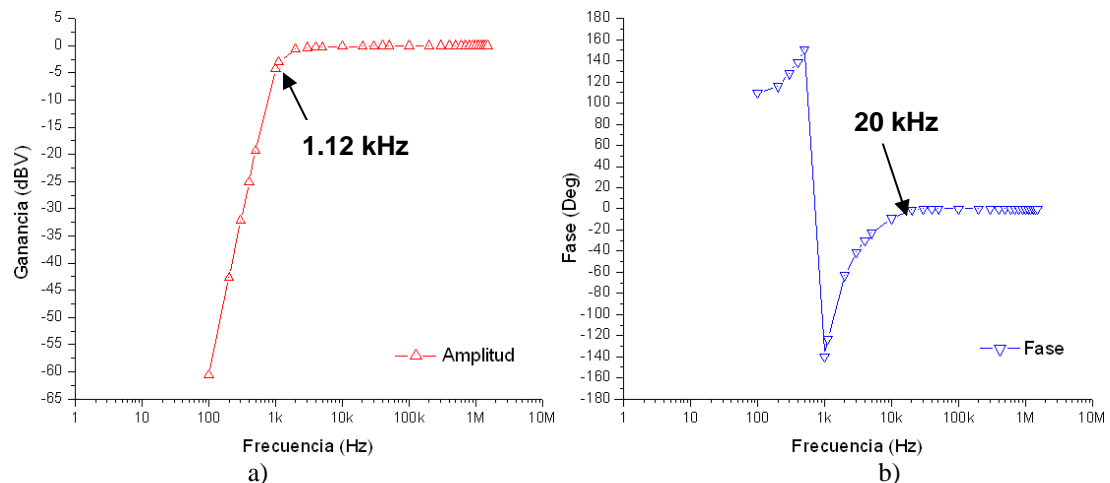


Figura 3.8: a) Amplitud y b) fase, del filtro pasa-altas.

El amplificador de RMB no solo contribuye al desfase de la señal de RMB que se desea acondicionar si no que el filtro pasa-altas también contribuye como se aprecia en la figura 3.8 (b), por lo cual se reafirma que no se puede hacer un análisis en fase de las señales que se acondicionan por el amplificador y el filtro.

## 3.6 Caracterización del sensor de efecto Hall

### 3.6.1 Estabilidad del voltaje de salida del sensor CYJ411

La estabilidad del voltaje de salida de un sensor de efecto Hall depende directamente de la variación de la corriente de la fuente de corriente constante (FCC) con que se alimente [1, 5, 28]. El sensor de efecto Hall CYJ411 que se utiliza para medir el campo magnético tangencial en la muestra de acero es alimentado con una FCC que tiene una estabilidad del 0.39 %. La variación del voltaje de salida del sensor CYJ411 cuando es alimentado por la FCC se obtuvo midiendo de forma simultánea la corriente  $I_{FCC}$  de alimentación y el voltaje de salida  $V_H$  del sensor de efecto Hall durante 480 segundos. En la figura 3.9 se muestra el diagrama de bloques del sistema empleado para la medición de  $I_{FCC}$  y  $V_H$ .

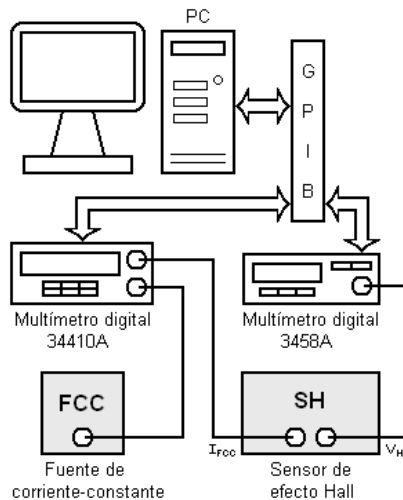


Figura 3.9: Diagrama de bloques del sistema empleado para determinar la variación de la corriente de la fuente de corriente-constante y la estabilidad del voltaje de salida del sensor de efecto Hall.

El sistema de medición consta de una PC, dos multímetros digitales Agilent 34410A y Agilent 3458A configurados como amperímetro y voltímetro, respectivamente, y una PC que se comunica con los multímetros a través de una interfaz GPIB. Un programa implementado<sup>1</sup> en *LabVIEW* 8.2 se utiliza para la adquisición y procesamiento de los valores de  $I_{FCC}$  y  $V_H$  que son almacenados en un archivo .XLS.

<sup>1</sup> El programa fue desarrollado por Eduardo Ramírez Pacheco estudiante de Doctorado en Comunicaciones y Electrónica.

En la figura 3.10 se muestran las curvas de  $I_{FCC}$  y  $V_H$  en función del tiempo. A partir de las cuales se obtuvieron sus valores máximo, mínimo y promedio con la desviación estándar que se muestran en la tabla 3.2.

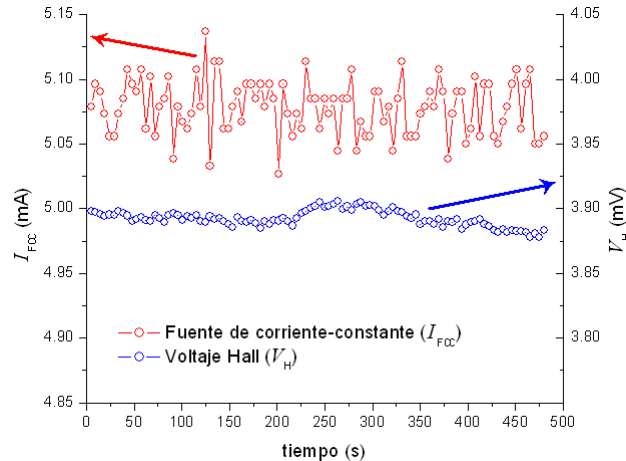


Figura 3.10: Medición de la corriente y del voltaje de salida de la FCC y del sensor de efecto Hall, respectivamente.

TABLA 3.2.

VALORES ESTADÍSTICOS DEL COMPORTAMIENTO DE LA CORRIENTE DE LA FCC Y DEL VOLTAJE DE SALIDA DEL SENSOR DE EFECTO HALL.

Variable	Máximo	Mínimo	Promedio	$\pm \sigma_s$
$I_{FCC}$ (mA)	5.14	5.03	5.08	0.02
$V_H$ (mV)	3.91	3.88	3.89	0.006

El valor promedio de la corriente de alimentación  $\overline{I_{FCC}}$  del sensor CYJ411 es de 5.08 mA y que para esta corriente el voltaje promedio  $\overline{V_H}$  a la salida del sensor sin presencia de campo magnético ( $H=0$ ) es de 3.89 mV, que es el voltaje de *offset* para este sensor. Los valores de la tabla 3.2 indican que cuando el sensor de efecto Hall es alimentado por la FCC con variaciones del 0.39 %, la variación de voltaje de salida  $V_H$  es del 0.15 %.

### 3.6.2 Sensibilidad del sensor CYJ411

La sensibilidad del sensor CYJ411 se determinó por medio de un par de bobinas de Helmholtz. Las bobinas de Helmholtz garantizan un campo magnético homogéneo en su centro gracias a sus características geométricas [5]. En la figura 3.11 se muestra el esquema de la configuración del par de bobinas de Helmholtz empleadas para obtener la sensibilidad

del sensor de efecto Hall. Las características del par de bobinas de Helmholtz utilizadas son:

- número total de vueltas del par de bobinas: 280 (140 por bobina)
- radio: 0.02 m

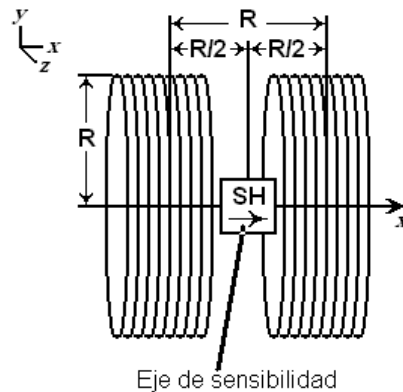


Figura 3.11: Esquema del par de bobinas de Helmholtz con el sensor de efecto Hall con su eje de sensibilidad paralelo a la dirección axial del par de bobinas.

La intensidad de campo magnético  $H$  en el centro del par de bobinas de Helmholtz se obtiene a partir de la ecuación [5]:

$$H = 0.7155 \frac{NI}{R} \text{ [A/m]} \quad (3.1)$$

donde  $N$  es el número de vueltas del par de bobinas,  $I$  es la corriente que circula por ambas bobinas y  $R$  es el radio de las bobinas.

En la tabla A.3 del apéndice A se encuentran los valores de intensidad de campo magnético  $H$  obtenidos a partir de la ecuación 3.1 para distintas intensidades de corriente  $I$ . En la figura 3.12 (a) se muestra la curva formada por los valores  $I$  y  $H$  de la tabla A.3, la cual representa la respuesta de las bobinas de Helmholtz ante las intensidades de corriente  $I$  aplicadas. Se observa que la intensidad de campo magnético  $H$  generado por el par de bobinas de Helmholtz es directamente proporcional a la intensidad de corriente  $I$  aplicada cuya constante de proporcionalidad tiene un valor de 10,018.

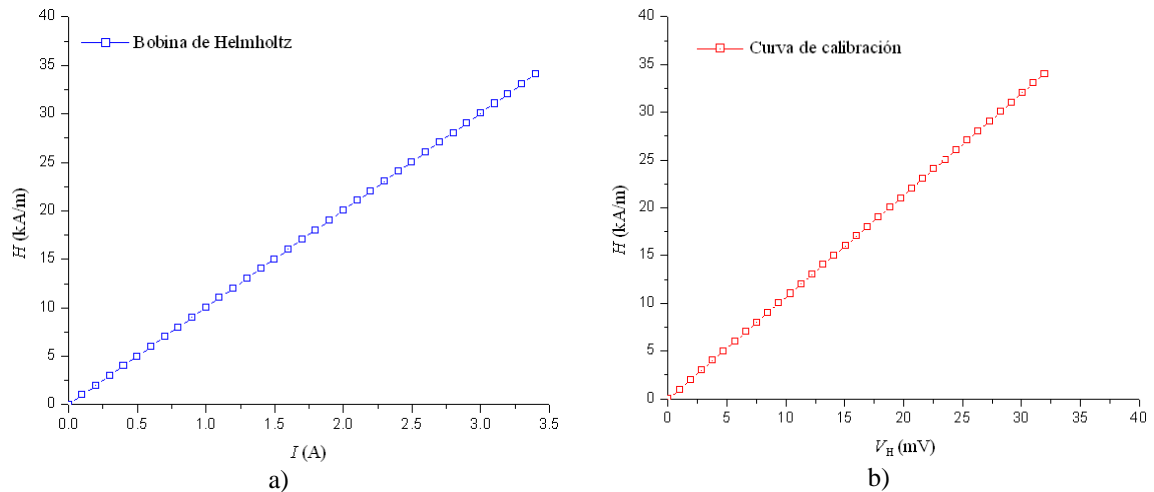


Figura 3.12: Curvas de: a) La respuesta de la bobina de Helmholtz ante distintas intensidades de corriente  $I$ , y b) Calibración del sensor de efecto Hall CYJ411.

El sensor de efecto Hall CYJ411 se colocó en la zona homogénea de intensidad de campo magnético  $H$  de las bobinas de Helmholtz con su eje de sensibilidad de forma paralela a lo largo del eje axial, ver figura 3.11. En la tabla A.3 del apéndice A también se muestran los valores de voltaje de salida  $V_H$  del sensor de efecto Hall medidos para cada intensidad de campo magnético  $H$  de las bobinas de Helmholtz. La figura 3.12 (b) muestra la curva de calibración del sensor de efecto Hall.

La sensibilidad de un sensor está dada por la magnitud de la señal de salida en relación con la señal de entrada y se expresa como la relación entre el incremento de la salida con respecto al incremento de la entrada. La sensibilidad se define como la pendiente de una curva de datos por lo que a partir de los datos de la curva de la figura 3.12 (b) se determinó la sensibilidad del sensor de efecto Hall ( $S_H$ ) CYJ411:

$$S_H = 1.066 \left[ \frac{kA/m}{mV} \right] \quad (3.2)$$

### 3.7 Resultados del capítulo

- 1- Se determinó que la frecuencia de resonancia de la bobina de detección con cable de conexión, la cual se empleará para las mediciones de las señales de ruido magnético Barkhausen, es de aproximadamente 1 MHz.



- 2- Se demostró que el valor de la frecuencia de resonancia de la bobina de detección de RMB es sensible a las variaciones de capacidad debido a la presencia del cable de conexión, y que depende inversamente con la capacidad. Y se determinó que el aumento de la capacidad distribuida de la bobina limita el ancho de banda de detección de la bobina.
- 3- Se determinó que el amplificador tiene ganancia estable hasta los 977 kHz y a partir de ese valor se comporta como un filtro pasa-bajas y tiene una característica fase-frecuencia que para frecuencias mayores a 50 kHz introduce un desfase que se acentúa a medida que aumenta la frecuencia.
- 4- Se determinó la respuesta en frecuencia de la amplitud y la fase del filtro pasa-altas por medio de las cuales se obtuvo que su frecuencia de corte real es de 1.12 kHz y que para frecuencias por arriba de los 20 kHz no introduce desfase.
- 5- Se mostró de forma gráfica que la frecuencia donde se encuentra el pico de resonancia de la bobina de detección de ruido magnético Barkhausen se encuentra en la banda de rechazo del amplificador.
- 6- Se determinó que el voltaje de offset es de 3.89 mV y la variación del voltaje de salida del sensor de efecto Hall CYJ411 es del 0.15% cuando se alimenta con una fuente de corriente constante de estabilidad del 0.39%.
- 7- Se obtuvo la curva de calibración del sensor de efecto Hall CYJ411 y se determinó que tiene una sensibilidad de  $1.066 \text{ kA/m} \cdot \text{mV}^{-1}$ .

De esta manera se le ha dado cumplimiento al segundo objetivo específico de este trabajo. El sistema de medición puede ser empleado para las mediciones de la señal de ruido magnético Barkhausen en aceros, con las restricciones de que solo se puede analizar las señales en amplitud y en un intervalo de frecuencias que va desde aproximadamente 1 kHz hasta 977 kHz.



# Capítulo 4: Mediciones de señal de ruido magnético Barkhausen en aceros API-5L

## 4.1 Introducción

Este capítulo está en correspondencia con los objetivos específicos tres y cuatro de este trabajo de tesis: *caracterizar aceros API-5L mediante los parámetros obtenidos de la señal de ruido magnético Barkhausen, y analizar la influencia de las características del sistema experimental en los parámetros de la señal de ruido magnético Barkhausen.* Se realizaron mediciones de la señal de ruido magnético Barkhausen en cada una de las muestras de acero API-5L tanto a lo largo del eje de fácil magnetización como del eje de difícil magnetización empleando el sistema de medición desarrollado.

## 4.2 Medición de la señal de RMB en aceros API-5L y parámetros de la señal

En la figura 4.1 se muestra esquemáticamente la posición del cabezal excitador-sensor de RMB sobre una muestra de acero cuando se mide a lo largo del EFM.

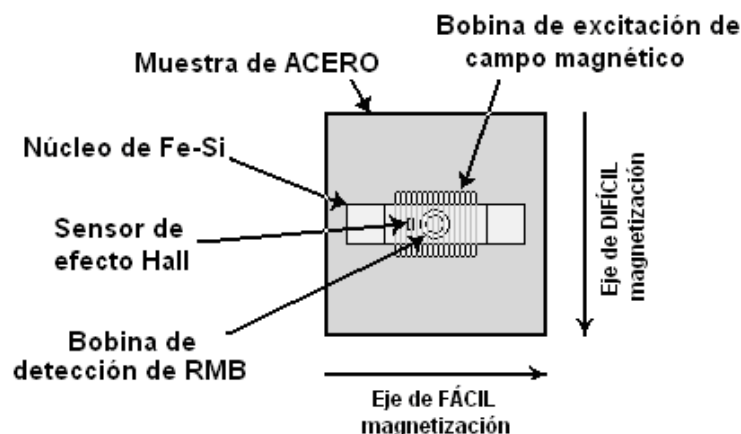


Figura 4.1: Representación esquemática de la posición del cabezal excitador-sensor de RMB cuando se mide a lo largo del eje de fácil magnetización.

Las mediciones de la señal de RMB se realizaron manteniendo las mismas condiciones de excitación. Las señales de RMB de los aceros API-5L se obtuvieron aplicando un campo

magnético sinusoidal de 10 Hz de frecuencia con una intensidad máxima de 5.3 kA/m. En las figuras 4.2 (a-c) y 4.3 (a-c) se muestran las señales de RMB para cada acero (X52, X56, X60) obtenidas en las direcciones del EFM y del EDM, respectivamente.

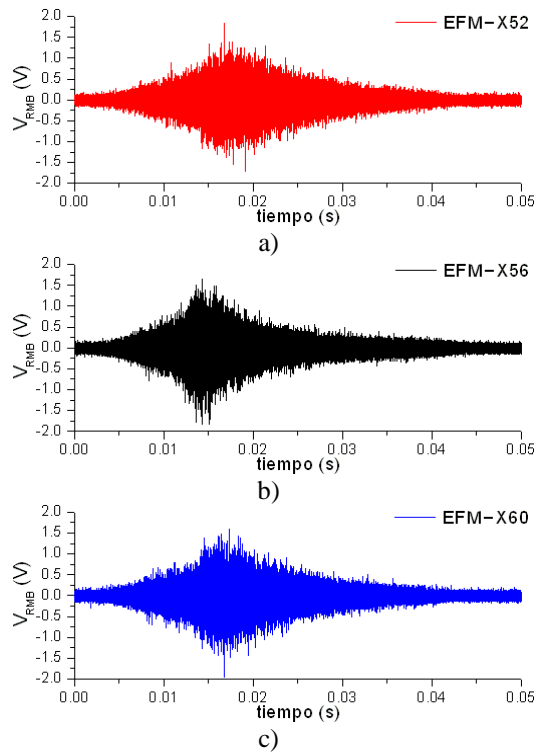


Figura 4.2: Señales de RMB obtenidas en la dirección del EFM en los aceros API-5L grado: a) X52, b) X56 y c) X60.

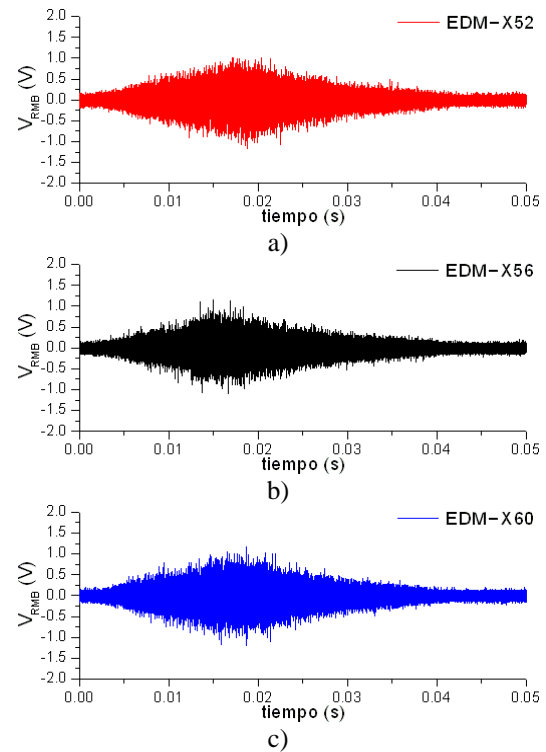


Figura 4.3: Señales de RMB obtenidas en la dirección del EDM en los aceros API-5L grado: a) X52, b) X56 y c) X60.

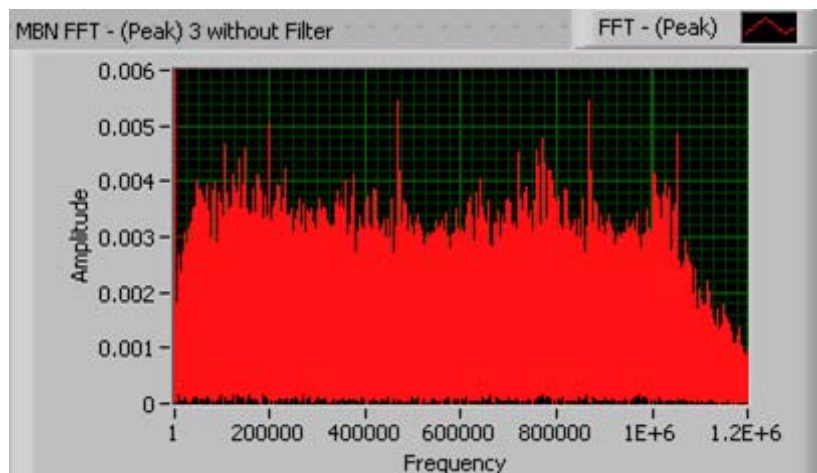


Figura 4.4: Espectro de frecuencia de la señal de RMB del EFM del acero X52.



En la figura 4.4 se muestra el espectro de frecuencia de la señal de RMB a lo largo del EFM del acero X52. Se observa un comportamiento plano en la forma del espectro y un contenido de frecuencias aproximadamente desde 1 kHz hasta 977kHz. La forma de los espectros de las señales de los aceros API-5L estudiados es similar, con componentes de frecuencia de entre 1 kHz hasta 977 kHz. Los espectros de frecuencia de cada una de las señales de RMB mostradas en las figuras 4.2 (a-c) y 4.3 (a-c) se muestran en las figuras B.1 (a-c) y B.2 (a-c) del apéndice B, respectivamente.

En la figura 4.2 (a-c) se puede apreciar que existen diferencias en la forma entre las señales de RMB 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, vea la figura 4.3 (a-c). Sin embargo, cuando hacemos una comparación entre las dos direcciones analizadas de cada acero (EFM y EDM) como se muestran en las figuras 4.2 a) y 4.3 a) para el X-52, figuras 4.2 b) y 4.3 b) para el X56, y figuras 4.2 c) y 4.3 c) para el X60, se puede apreciar que no solo 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 1.25 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 2.2. Este hecho nos permite asegurar de 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. 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 figuras 4.5 (a-c) y 4.6 (a-c) se muestran las señales de la envolvente de RMB obtenidas utilizando la expresión (1.12) a lo largo del EFM y del EDM de cada acero, respectivamente. Se observa que existe una diferencia más notable en la forma de la señal envolvente de RMB para 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 curvas de las figuras 4.5 y 4.6. 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 comparación, para el caso de los aceros X56 y X52, notamos que la diferencia es 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.

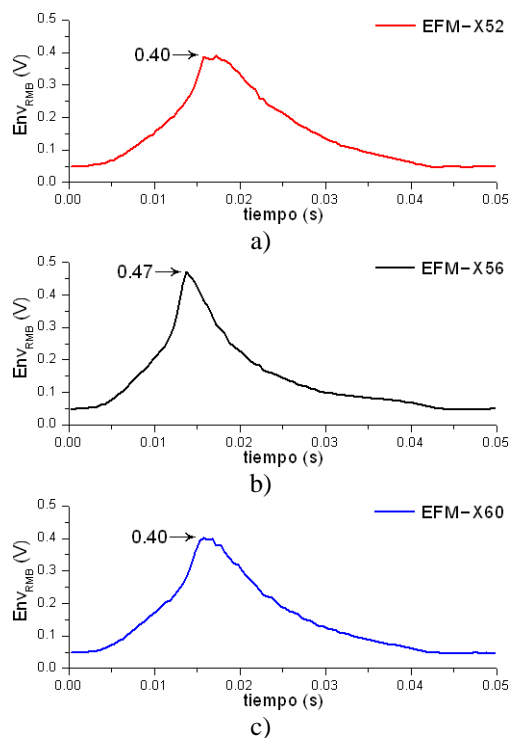


Figura 4.5: Señales envolventes de RMB obtenidas en la dirección del EFM en los aceros API-5L grado: a) X52, b) X56 y c) X60.

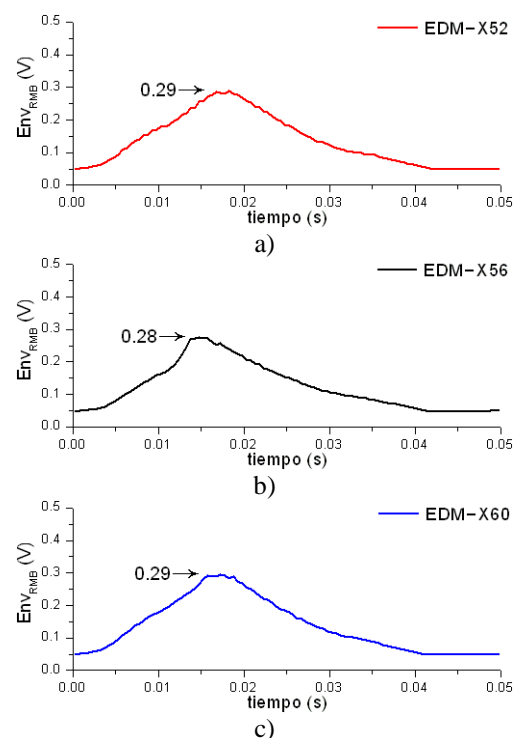


Figura 4.6: Señales envolventes de RMB obtenidas en la dirección del EDM en los aceros API-5L grado: a) X52, b) X56 y c) X60.

Está demostrado que la mejor manera de caracterizar los materiales utilizando las mediciones de RMB es a partir del valor RMS y la Energía de la señal [16, 29]. En la tabla 4.1 se muestra una relación de los valores RMS y de Energía calculados a partir de las ecuaciones (1.10) y (1.11), respectivamente, y del valor máximo de la envolvente de la señal de RMB. Los tres valores fueron obtenidos para cada uno de los aceros estudiados a



lo largo de los dos ejes de magnetización y promediados de cinco mediciones. La desviación estándar fue de 0.6%, 1.1% y 3.2% para los valores RMS, de Energía y máximo de la envolvente de RMB, respectivamente.

TABLA 4.1.  
PARÁMETROS (RMS, ENERGÍA Y VALOR MÁXIMO DE LA ENVOLVENTE) DE LAS SEÑALES DE RMB OBTENIDAS A LO LARGO DEL EFM Y DEL EDM DE LOS ACEROS API-5L GRADO X52, X56 Y X60.

Acero	RMS (mV)		$\Delta RMS$ (%)	Energía (mV <sup>2</sup> .s)		$\Delta Energía$ (%)	Env <sub>máx</sub> (V)		$\Delta Env_{máx}$ (%)
	EFM	EDM		EFM	EDM		EFM	EDM	
X52	181	155	<b>14</b>	1631	1204	<b>26</b>	0.40	0.29	<b>28</b>
X56	177	141	<b>20</b>	1572	993	<b>37</b>	0.47	0.27	<b>43</b>
X60	180	157	<b>13</b>	1617	1232	<b>24</b>	0.40	0.29	<b>28</b>

La tabla 4.1 nos muestra la diferencia en % que existe de los valores RMS, de Energía y del valor máximo de la envolvente de la señal entre ambos ejes de magnetización para un mismo material la cual se representa por  $\Delta RMS$ ,  $\Delta Energía$  y  $\Delta Env_{máx}$ , respectivamente. Se puede ver que la diferencia es mayor en los tres casos para el acero X56. Eso está directamente relacionado con la diferencia de los valores  $J_r$  y  $H_c$  entre el EFM y EDM (vea la tabla 2.2). Para el caso de los aceros X52 y X60, los valores RMS, de energía y máximo de la envolvente 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 las características en un solo material, como pueden 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 4.1 se puede afirmar que el acero X56 tiene una anisotropía magnética mayor que los aceros X52 y X60. Así también, podemos definir de manera cualitativa la dirección de los EFM y de EDM ya que como se muestra en la tabla 4.1 los valores de estos parámetros es muy diferente en ambos ejes para los tres aceros estudiados.



### 4.3 Influencia de la intensidad de campo magnético de excitación en los parámetros de la señal de RMB

Se realizaron mediciones de la señal de RMB a lo largo del EFM y del EDM de los aceros API-5L a distintas intensidades de campo magnético de excitación. Las mediciones fueron realizadas aplicando un campo magnético de excitación sinusoidal de 10 Hz de frecuencia con intensidades de campo magnético de: 1.1, 2.1, 3.2, 4.3, 5.3, 10.7, 21.3, 32, 42.6 y 53.3 kA/m. Los parámetros de las señales de RMB para cada valor de intensidad de campo magnético de excitación se obtuvieron para los tres aceros estudiados a lo largo de los dos ejes de magnetización. Se realizaron cinco mediciones para cada caso. En las tablas B.1, B.2 y B.3 del apéndice B se encuentran los valores de los parámetros de las señales de RMB de los aceros API-5L grado X52, X56 y X60 con sus respectivos valores medios y desviación estándar, respectivamente.

Las figuras 4.7 (a-c) y 4.8 (a-c) muestran la dependencia del valor RMS y de la Energía de la señal con el campo magnético aplicado para ambos ejes de magnetización de cada acero, respectivamente. En estas figuras se observa que siempre se cumple que los valores RMS y de Energía son mayores en el EFM en comparación con los mismos valores en el EDM de cada acero (ver figuras 4.7 y 4.8). También se aprecia que el valor de dichos parámetros de la señal de RMB en ambos ejes de magnetización para cada acero aumenta rápidamente para valores de intensidad de campo magnético hasta 5 kA/m. Para valores de intensidad de campo magnético mayores a 5 kA/m y menores a 30 kA/m continúa el incremento de estos parámetros pero de manera menos pronunciada. Para valores de intensidad de campo magnético mayores a 30 kA/m ocurre cierta saturación. Este hecho está relacionado con el movimiento de las paredes de dominio, el cual es el causante del ruido magnético Barkhausen [1, 3, 5]. El incremento rápido en el valor de los parámetros de la señal de RMB se debe a que la mayor actividad Barkhausen ocurre cuando se presenta el movimiento irreversible de las paredes de dominio [1, 3, 5]. El incremento menos pronunciado en el valor de los parámetros de la señal se debe a que el movimiento de las paredes de dominio durante el proceso de magnetización disminuye cuando el acero ha alcanzado la saturación magnética. A partir de 30 kA/m de intensidad de campo magnético aplicado el material está saturado magnéticamente y las paredes de dominio ya no existen

por lo que no hay más actividad Barkhausen que contribuya a la señal de RMB medida aunque se incremente la intensidad de campo magnético.

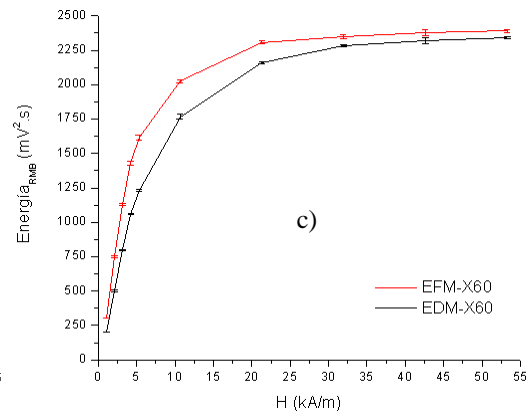
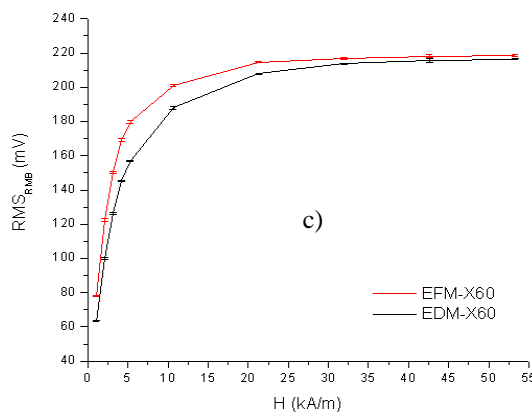
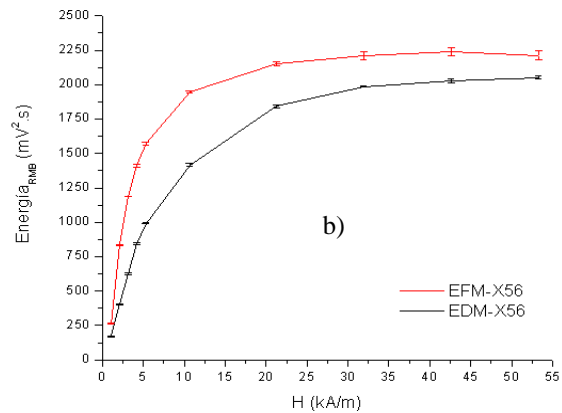
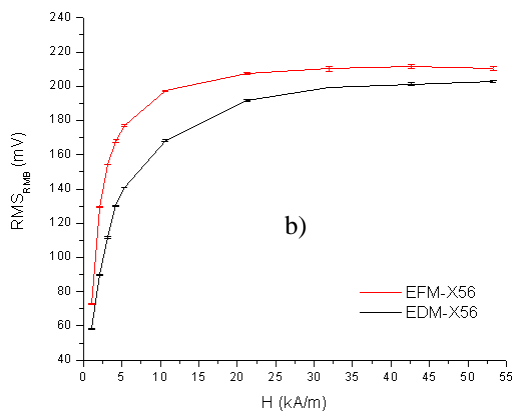
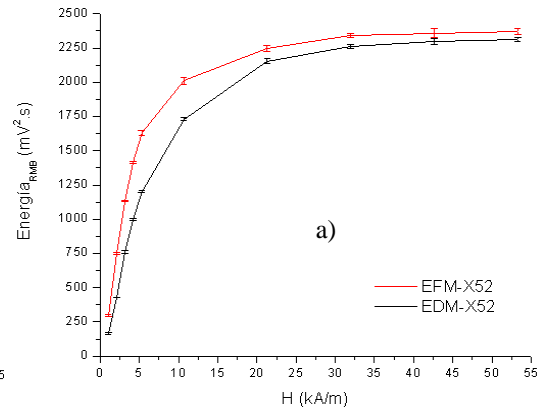
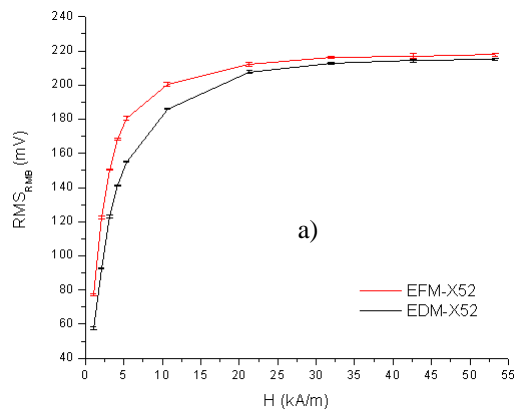


Figura 4.7: Curvas del valor RMS en función de la intensidad de campo magnético aplicado del acero: a) X52, b) X56 y c) X60.

Figura 4.8: Curvas del valor de la Energía en función de la intensidad de campo magnético aplicado del acero: a) X52, b) X56 y c) X60.

Se puede apreciar de las figuras 4.7 (a-c) y 4.8 (a-c) que cuando se obtiene el valor máximo de los parámetros (RMS y Energía) de las señales de RMB de ambos ejes (EFM y del EDM) para los tres aceros, no se garantiza que se obtenga la mayor diferencia entre sus

ejes de magnetización. Al hacer una comparación de los valores RMS y de Energía de la señal en el EFM respecto a los obtenidos de la señal en el EDM en cada acero, obtenemos un par de valores que representan su diferencia los cuales son  $\Delta RMS$  y  $\Delta Energía$ , respectivamente. Cuando hacemos la comparación de este par de valores obtenidos para cada intensidad de campo magnético en cada acero notamos que esos valores no son iguales para cada intensidad de campo magnético de excitación. Las figura 4.9 (a-b) muestran el comportamiento de los valores  $\overline{\Delta RMS}$  y  $\overline{\Delta Energía}$  para cada acero en función de la intensidad de campo magnético aplicado, respectivamente. Los valores  $\overline{\Delta RMS}$  y  $\overline{\Delta Energía}$  para cada acero junto con su desviación estándar se encuentran en la tabla B.4 del apéndice B.

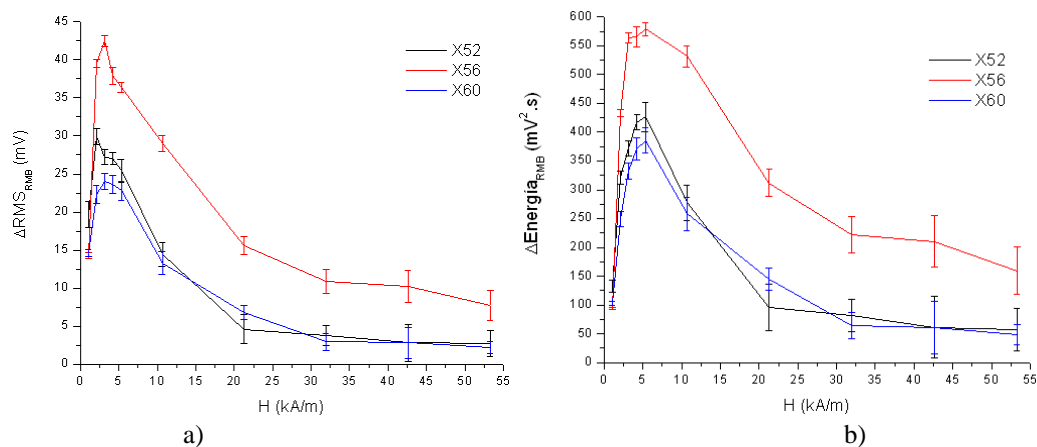


Figura 4.9: Curvas de la diferencia entre los ejes de magnetización de: a) el valor RMS y b) el valor de la Energía, en función de la intensidad de campo magnético aplicado en los aceros X52, X56 y X60.

En la figura 4.9 (a) se observa que las mayores diferencias  $\overline{\Delta RMS}$  para los aceros X52, X56 y X60 ocurren para intensidades de campo magnético de entre 2 y 5 kA/m y el orden de esas diferencias está entre los 23 y 42 mV. Mientras que para cuando se tiene una intensidad de campo magnético mayor que 30 kA/m las diferencias son mucho menores, entre los 3 y 11 mV. Para el caso del valor  $\overline{\Delta Energía}$  las mayores diferencias se encuentran para un campo magnético de alrededor de 5 kA/m (ver figura 4.9 (b)), y el orden de esas diferencia está entre los 385 y 579 mV<sup>2</sup>.s. Cuando se tiene una intensidad de campo magnético mayor que 30 kA/m las diferencias se reducen a valores entre 65 y 222 mV<sup>2</sup>.s. Esto indica que la intensidad de campo magnético de excitación óptima para caracterizar a





los aceros API-5L es de alrededor de 5 kA/m. En las curvas de la figura 4.9 (a-b) se aprecia aún mejor que el acero X56 tiene una mayor anisotropía magnética en comparación con los aceros X52 y X60. Así también se aprecia que se puede diferenciar los aceros X52 y X60 aún cuando son materiales con características magnéticas similares. La diferencia entre los aceros X52 y X60 se obtiene para cuando la intensidad de campo magnético es igual a 5 kA/m.

#### 4.4 Influencia de la frecuencia de corte del filtro pasa-bajas en los parámetros de la señal de RMB

El acero que se empleó para este análisis fue el acero X56 debido a que es el que presenta una mayor anisotropía magnética. El análisis se realizó a partir de 10 mediciones de RMB obtenidas a lo largo del EFM y del EDM las cuales se obtuvieron aplicando un campo magnético sinusoidal de 10 Hz de frecuencia con una intensidad de campo magnético máxima de 25 kA/m.

El espectro de las señales de RMB del acero X56 tienen componentes de frecuencia que van desde aproximadamente 1 kHz hasta 977 kHz (ver figuras B.1(b) y B.1(b)). En la tabla 4.2 se muestran los parámetros (valor RMS, de Energía y valor máximo de la envolvente) obtenidos de la señal de RMB con todo su espectro de frecuencias tanto del EFM como del EDM del acero X56. También se muestran los valores  $\Delta Energía$ ,  $\Delta RMS$  y  $\Delta Env_{m\acute{a}x}$  que se obtuvieron de la diferencia en magnitud y en % de los valores RMS, de Energía y del valor máximo de la envolvente entre los ejes de magnetización, respectivamente.

TABLA 4.2.  
PARÁMETROS OBTENIDOS A PARTIR DE LAS SEÑALES DE RMB CON TODO SU ESPECTRO DE FRECUENCIA PERMITIDO POR EL AMPLIFICADOR DE RMB PARA LOS EJES DE FÁCIL Y DIFÍCIL MAGNETIZACIÓN DEL ACERO X56. Y DIFERENCIAS EN MAGNITUD Y EN PORCIENTO DE CADA PARÁMETRO ENTRE LOS EJES DE MAGNETIZACIÓN.

EJES	RMS (mV)	$\Delta RMS$		Energía (mV <sup>2</sup> .s)	$\Delta Energía$		Env <sub>máx</sub> (mV)	$\Delta Env_{m\acute{a}x}$	
		(mV)	%		(mV <sup>2</sup> .s)	%		(mV)	%
EFM	222.91	14.71	6.59	2484.35	316.94	12.76	667.32	269.85	40.43
EDM	208.2			2167.41			397.47		

Para eliminar las componentes de alta frecuencia se emplea un filtro digital pasa-bajas (FDPB). La frecuencia de corte  $f_c$  del FDPB se fue cambiando para obtener una serie de

señales de RMB con cada vez menos componentes de frecuencia de las cuales se obtienen los parámetros bajo análisis. Los valores seleccionados para la frecuencia de corte del FDPB son: 20, 50, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700 y 800 kHz. Para cada valor de  $f_c$  se obtiene un espectro de la señal con componentes de frecuencia entre 1 kHz y la  $f_c$  del FDPB.

La figura 4.10 (a-b) muestra las envolventes de las señales de RMB obtenidas para cada valor de  $f_c$  del FDPB tanto del EFM como del EDM del acero X56.

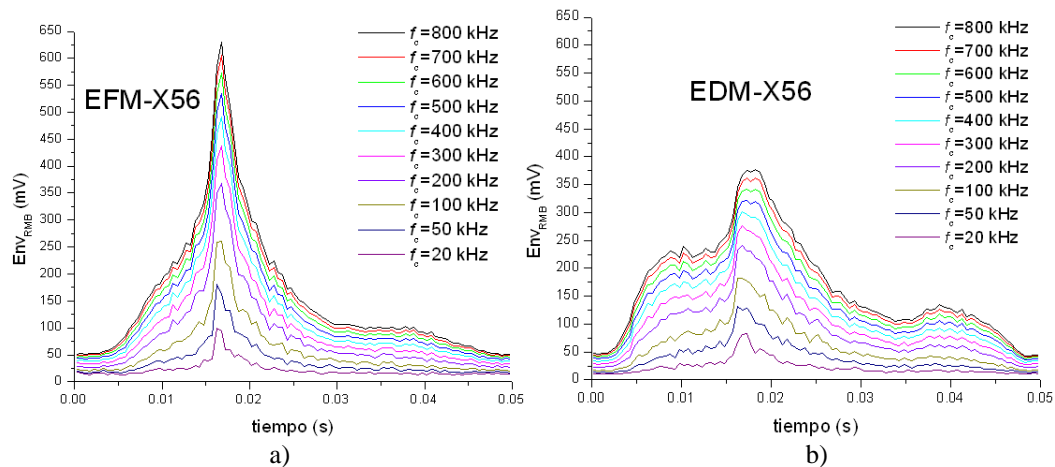


Figura 4.10: Señales envolventes obtenidas al eliminar componentes de frecuencia de la señal de RMB del: a) EFM y del b) EDM del acero X56 para cada frecuencia de corte  $f_c$  del FDPB.

En la figura 4.10 (a-b) se observa que al ir eliminando componentes de frecuencia de las señales de RMB por medio del FDPB sus respectivas envolventes en ambos ejes de magnetización disminuyen de amplitud y pierden detalles en cuanto a su forma. Por ejemplo, los hombros al inicio y al final de las curvas de ambos ejes de magnetización a medida que se van eliminando cada vez más componentes de frecuencia van disminuyendo en amplitud hasta desaparecer. Además, el valor máximo de la envolvente del EFM respecto al EDM siempre es mayor. Al comparar las formas de las envolventes obtenidas de las señales filtradas para cada  $f_c$  del FDPB entre los ejes de magnetización, se observa que el valor máximo de la envolvente del EFM respecto al EDM siempre es mayor.

En la figura 4.11 (a-c) se muestran las gráficas del valor RMS, de Energía y el valor máximo de la envolvente, respectivamente, en función de la frecuencia de corte  $f_c$  del FDPB para ambos ejes de magnetización. Se nota a simple vista que el valor máximo de la envolvente permite diferenciar con mayor facilidad entre los ejes de magnetización. Se

aprecia a partir de la figura 4.11 (a) y 4.11 (c) que el valor RMS y el valor máximo de la envolvente no disminuyen linealmente con la eliminación de componentes de frecuencia para ambos ejes de magnetización. En la figura 4.11 (b) se aprecia que para el caso de la Energía su valor sí disminuye linealmente con la eliminación de componentes de frecuencia para ambos ejes de magnetización. A partir de la figura 4.11 (a-c) se observa que los valores RMS, de Energía y el valor máximo de la envolvente del EFM respecto al EDM tienen un valor mayor, pero conforme se excluyen componentes de frecuencia en la señal de ambos ejes de magnetización ese efecto se va haciendo menos notable. Por lo tanto, la diferencia entre los valores de los parámetros del EFM respecto a los del EDM va siendo cada vez menor a medida que se eliminan componentes de frecuencia, hasta un punto en el cual no se logra apreciar diferencia entre los parámetros de ambos ejes de magnetización.

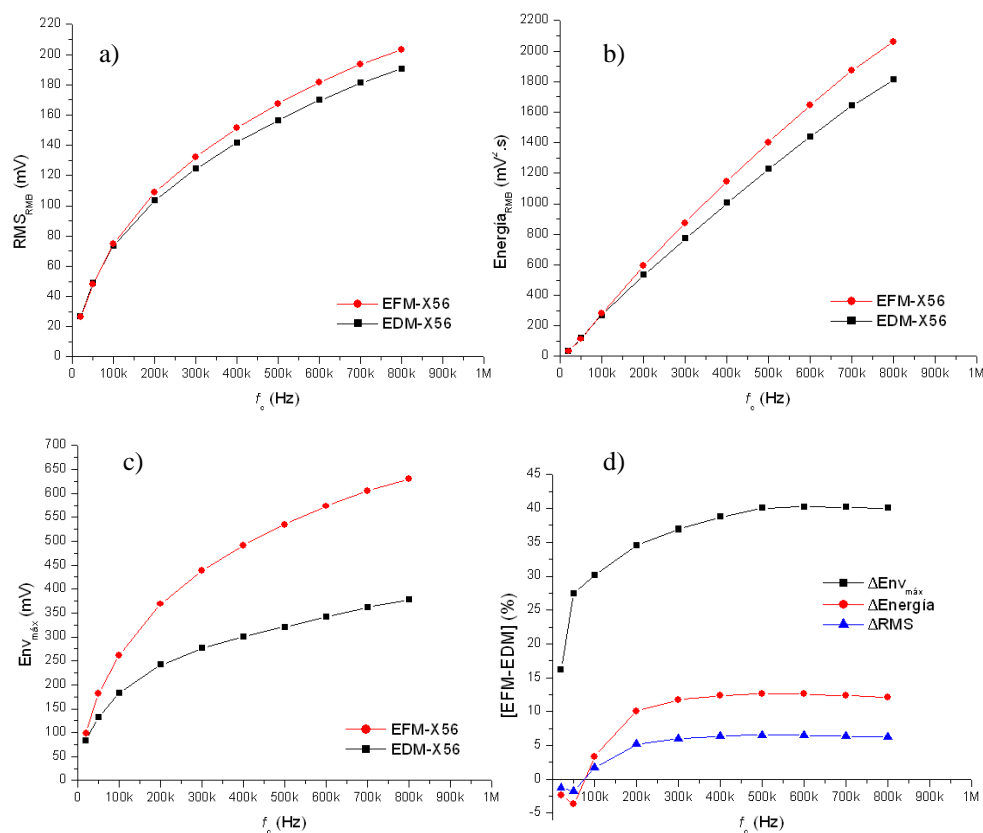


Figura 4.11: Curvas de: a) el valor RMS, b) el valor de la Energía y c) el valor máximo de la envolvente, de la señal de RMB del EFM y del EDM del acero X56; y d) Curvas de la diferencia en porcentaje entre los ejes de magnetización para los valores RMS, de Energía y del valor máximo de la envolvente.



En la figura 4.11 (d) se muestran las curvas de la diferencia en % de los valores RMS, de Energía y del valor máximo de la envolvente obtenidas de la comparación de dichos valores de las señales de RMB entre ambos ejes de magnetización para cada  $f_c$  del FDPB. Se observa que para el caso de los valores  $\Delta Energía$  y  $\Delta RMS$  su diferencia en % es constante hasta una frecuencia de corte  $f_c$  de 300 kHz. A partir de esa  $f_c$  al seguir eliminando componentes de frecuencia la diferencia en % de  $\Delta Energía$  y  $\Delta RMS$  comienza a disminuir, y al llegar a una  $f_c$  de aproximadamente 75 kHz no se nota diferencia alguna. Esto nos estaría indicando que el material no tiene anisotropía magnética cosa que no es verdad como se ha venido demostrando. Al continuar eliminando componentes de frecuencia ocurre un efecto de cambio de signo en la diferencia en % de los valores  $\Delta Energía$  y  $\Delta RMS$  lo que significa que ahora los valores RMS y de Energía del EDM son mayores en comparación con los del EFM. La causa de este efecto no es posible de determinar en estos momentos. Para el caso de la diferencia en % de  $\Delta Env_{máx}$  ocurre algo similar, ahora la  $f_c$  a partir de la cual la diferencia ya no es constante y comienza a disminuir es de 500 kHz, para este caso la diferencia en % de  $\Delta Env_{máx}$  nunca es cero ni ocurre el cambio de signo en este valor. Los valores RMS, de Energía y valor máximo de la envolvente, así como su diferencia en por ciento representados por  $\Delta Energía$ ,  $\Delta RMS$  y  $\Delta Env_{máx}$  para cada frecuencia de corte del FDPB se encuentran en la tabla B.5 del apéndice B, respectivamente.

En la tabla 4.3 se encuentran los valores obtenidos de la comparación de los valores de diferencia en % de los parámetros obtenidos de las señales de RMB filtradas para cada frecuencia de corte  $f_c$  respecto a los obtenidos con todo el espectro de frecuencia de las señales de RMB (vea tabla 4.2).

En la figura 4.12 se muestran las curvas resultantes de la comparación anterior donde se observa que cuando se eliminan componentes de frecuencia de la señal de RMB por medio de un filtro pasa-bajas hasta una frecuencia de corte  $f_c$  de 300 kHz los valores de diferencia en %  $\Delta RMS$  y  $\Delta Energía$  obtenidos de las señales filtradas son muy similares a los obtenidos empleando todo el espectro de frecuencia de la señal de RMB, excepto para  $\Delta Env_{máx}$  cuyo caso es hasta los 500 kHz.



TABLA 4.3.

VALORES RESULTANTES DE LA RESTA ENTRE LAS DIFERENCIAS EN PORCIENTO DE LOS PARÁMETROS OBTENIDOS EMPLEANDO TODO EL ESPECTRO DE LAS SEÑALES DE RMB CON LOS OBTENIDOS CONFORME SE ELIMINARON COMPONENTES DE FRECUENCIA EN LAS SEÑALES DE RMB DEL ACERO X56.

$f_c$ del FDPB (Hz)	$\Delta$ Parámetros (%)		
	$6.59 - \Delta RMS(f_c)$	$12.76 - \Delta Energía(f_c)$	$40.43 - \Delta Env_{máx}(f_c)$
800 k	<b>0.33</b>	<b>0.62</b>	<b>0.38</b>
700 k	<b>0.21</b>	<b>0.41</b>	<b>0.24</b>
600 k	<b>0.09</b>	<b>0.18</b>	<b>0.16</b>
500 k	<b>0.06</b>	<b>0.13</b>	<b>0.39</b>
400 k	<b>0.22</b>	<b>0.42</b>	1.68
300 k	<b>0.55</b>	<b>0.98</b>	3.51
200 k	1.43	2.70	5.92
100 k	4.89	9.39	10.28
50 k	8.39	16.40	12.99
20 k	7.77	15.09	24.22

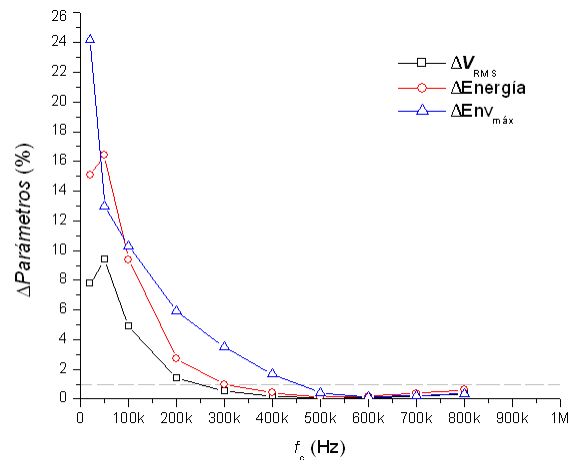


Figura 4.12: Curvas de los valores obtenidos de la resta entre la diferencia en porcentaje de los parámetros obtenidos empleando todo el espectro de la señal de RMB con los obtenidos a medida que se eliminaron componentes de frecuencia de la señal de RMB para el acero X56.

Los valores obtenidos de la comparación de  $\Delta RMS$ ,  $\Delta Energía$  y  $\Delta Env_{máx}$  para cada frecuencia de corte  $f_c$  desde 800 kHz hasta 300 kHz, excepto para  $\Delta Env_{máx}$  cuyo caso es hasta los 500 kHz nunca sobrepasan más de la unidad ni exceden el 8.35, 7.68 y 0.96 % de diferencia, respectivamente. Cuando se eliminan más componentes de frecuencia, es decir, para frecuencias de corte  $f_c$  del FDPB menores a 300 kHz, excepto para  $\Delta Env_{máx}$  cuyo caso son menores a 500 kHz, la diferencia resultante entre ambos casos es cada vez mayor,



como se observa en los valores de la tabla 4.3. En la figura 4.12 se observa mejor este comportamiento que indica que conforme se eliminan componentes de frecuencia llega un momento en el que se pierde información útil para caracterizar al acero.

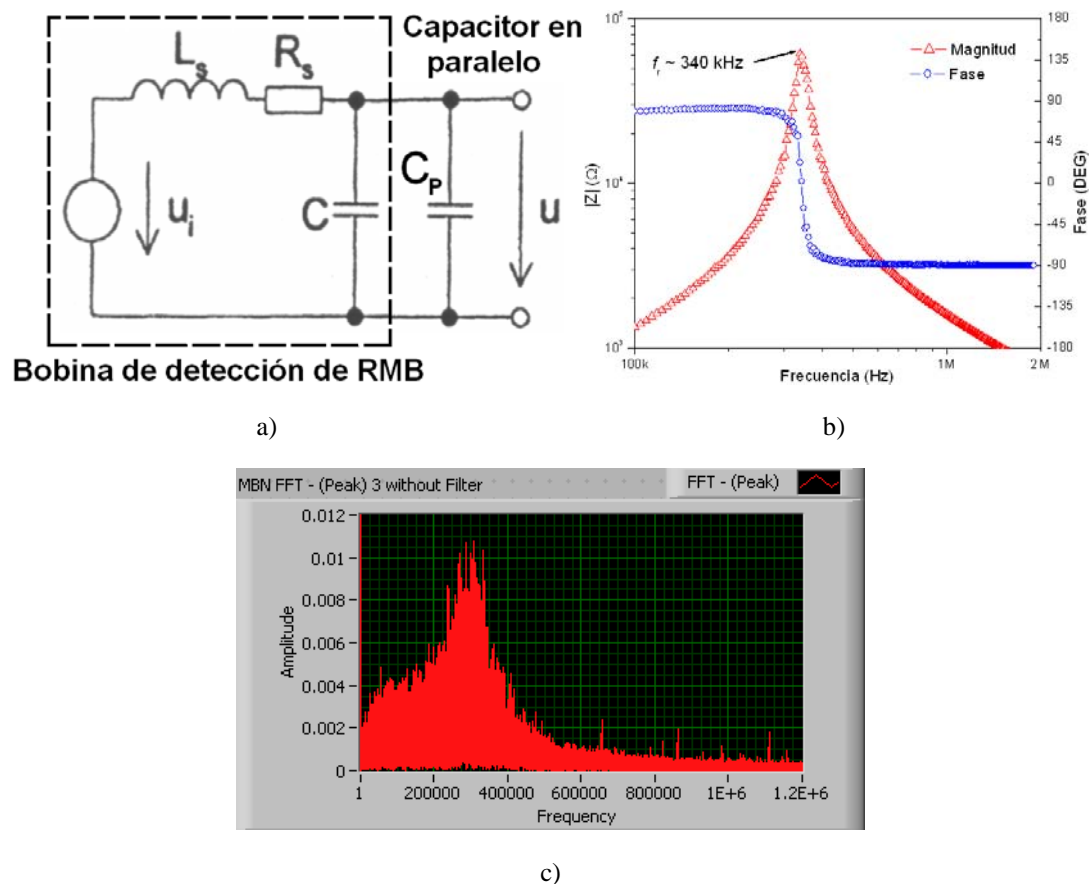
Esto demuestra que con solo incluir una parte del espectro de frecuencias de la señal de RMB se pueden obtener resultados satisfactorios de sus parámetros RMS, Energía y valor máximo de la envolvente. Este análisis también da una idea de las características mínimas de ancho de banda necesarias que debe tener una etapa de acondicionamiento y adquisición para un sistema de medición de RMB en aceros.

#### **4.5 Influencia del efecto resonante de la bobina de detección en los parámetros de la señal de RMB**

La respuesta en frecuencia de una bobina de detección está limitada por su frecuencia de resonancia. La capacidad distribuida de una bobina es la responsable de que el valor de la frecuencia de resonancia tenga un límite superior. La frecuencia de resonancia de la bobina con cable de conexión empleada para la medición de la señal de RMB es de alrededor de 1 MHz como se obtuvo en la simulación y medición discutida en el capítulo 2. Anglada y Padovese publican [18] un trabajo recientemente donde proponen la utilización de la resonancia de la bobina de detección de RMB como una nueva técnica de evaluación no destructiva. Para hacer un análisis de la influencia del efecto resonante en los parámetros de la señal de RMB de un acero, se disminuyó el valor de la frecuencia de resonancia  $f_r$  de la bobina de detección de RMB para tener el efecto resonante dentro de la banda de análisis permitida por el amplificador de señal de RMB. Para reducir el valor de la  $f_r$  de la bobina de detección de RMB se le conectó un capacitor  $C_p$  en paralelo con valor de 100 pF como se muestra en la figura 4.13 (a). La  $f_r$  disminuyó obteniendo un valor de 340 kHz como resultado del aumento de la capacidad del sistema de detección bobina-capacitor (sistema BC). En la figura 4.13 (b) se muestra la respuesta en frecuencia de la magnitud y la fase de la impedancia<sup>1</sup> de la bobina de detección de RMB con el capacitor en paralelo, en la cual se identifica la frecuencia de resonancia  $f_r$ .

---

<sup>11</sup> La medición fue realizada con un analizador de redes HP4195A



El análisis de la influencia del efecto resonante de la bobina de detección en los parámetros de la señal de RMB se realizó a partir de 10 mediciones de la señal de RMB obtenidas a lo largo de ambos ejes de magnetización (EFM y EDM) del acero X56. Las mediciones se obtuvieron aplicando un campo magnético sinusoidal de 10 Hz de frecuencia con una intensidad de campo magnético máxima de 25 kA/m. Nótese que tanto el tipo de acero como las condiciones de excitación son los mismos que se emplearon para hacer el análisis de la sección 4.4, con el fin de relacionar ambos resultados.

En la figura 4.13 (c) se muestra el espectro de frecuencia de una señal de RMB obtenida a lo largo del EFM, donde se puede apreciar que el pico de resonancia del sistema BC de detección de RMB se encuentra alrededor de la frecuencia de resonancia  $f_r$  de 340 kHz. Se



aprecia que existe un aumento en las amplitudes de las componentes de frecuencia de la señal de RMB cercanas a la frecuencia de resonancia del sistema BC. Este efecto de amplificación permanece constante y está presente en cada medición realizada de RMB tanto para el EFM como para el EDM. Para analizar la influencia de este efecto de amplificación en los parámetros obtenidos de la señal de RMB se filtraron las señales de RMB de igual forma que se realizó en la sección 4.4. Se obtuvieron señales con diferente contenido de frecuencias de las cuales se obtuvieron los parámetros de la señal de RMB. Para este análisis las frecuencias de corte del FDPB empleadas fueron: 20, 50, 100, 200, 300, 400 y 500 kHz, debido a que las señales de RMB obtenidas para este análisis tienen componentes de frecuencia aproximadamente desde 1 kHz hasta 400 kHz. Este hecho se debe al efecto resonante del sistema BC que limita el análisis hasta alrededor de la frecuencia de resonancia como se aprecia en la figura 4.13 (c).

En la tabla 4.4 se muestran los parámetros (valor RMS, de Energía y valor máximo de la envolvente) obtenidos de la señal de RMB bajo la influencia del efecto resonante del sistema BC que limita su espectro de frecuencia tanto para las mediciones en el EFM como en el EDM del acero X56. También se muestran los valores  $\Delta RMS$ ,  $\Delta Energía$  y  $\Delta Env_{m\acute{a}x}$ . Se observa que la magnitud de los parámetros de las señales de RMB de ambos ejes de magnetización es mayor en comparación con la magnitud de los parámetros obtenidos en la sección 4.4 (tabla 4.2). El aumento en la magnitud de los parámetros de las señales de RMB se atribuye a la amplificación introducida por el efecto resonante del sistema BC. Y se observa que los valores de diferencia en porcentaje de los parámetros de las señales de RMB entre los ejes de magnetización (EFM y EDM) se aproximan a los obtenidos en la sección 4.4 (tabla 4.2), sin embargo se abordara más adelante esta situación.

TABLA 4.4.  
PARÁMETROS (RMS, ENERGÍA Y VALOR MÁXIMO DE LA ENVOLVENTE) DE LAS SEÑALES DE RMB BAJO LA INFLUENCIA DEL EFECTO RESONANTE DEL SISTEMA BC Y DIFERENCIAS EN MAGNITUD Y EN PORCIENTO DE CADA PARÁMETRO ENTRE LOS EJES DE MAGNETIZACIÓN DEL ACERO X56.

EJES	RMS (mV)	$\Delta RMS$		Energía (mV <sup>2</sup> .s)	$\Delta Energía$		Env <sub>máx</sub> (mV)	$\Delta Env_{m\acute{a}x}$	
		(mV)	%		(mV <sup>2</sup> .s)	%		(mV)	%
EFM	265.77	18.46	7	3531.95	407.88	13.4	802.51	267.86	33.4
EDM	247.31			3058.07			534.65		



En la figura 4.14 (a) y 4.14 (b) se muestran las señales envolventes del EFM y del EDM para cada señal filtrada para diferentes frecuencias de corte  $f_c$  del FDPB, respectivamente.

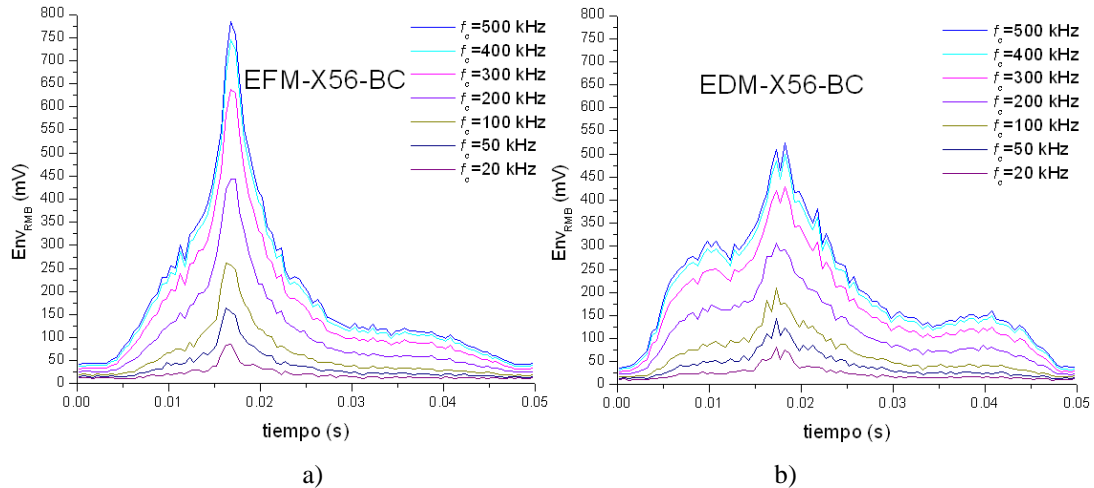


Figura 4.14: Señales envolventes obtenidas al eliminar componentes de frecuencia de la señal de RMB que está influenciada por el efecto resonante del sistema BC para el: a) EFM y el b) EDM del acero X56 para cada frecuencia de corte  $f_c$  del FDPB.

Al hacer un análisis cualitativo de la forma de las envolventes de la figura 4.14 (a) y (b) obtenidas de las señales filtradas para cada  $f_c$  tanto del EFM como del EDM, se destaca que para ambos ejes de magnetización el perfil de las envolventes es igual al obtenido en las figuras 4.10 (a) y (b), respectivamente. Se observa que la amplitud de las envolventes en ambos ejes de magnetización ha aumentado por influencia de la amplificación debido al efecto resonante del sistema BC. El valor máximo de las envolventes ahora es mayor que cuando se utilizó solo la bobina BDC en la sección 4.4 donde la frecuencia de resonancia no se encontraba dentro del espectro de las señales de RMB bajo análisis. Es evidente que aún bajo la influencia del efecto resonante del sistema BC en cada señal filtrada para cada frecuencia de corte  $f_c$  se aprecia que la amplitud máxima de las envolventes en el EFM respecto a las del EDM sigue siendo mayor.

En la figura 4.15 (a-c) se muestra el comportamiento del valor RMS, de la Energía y del valor máximo de la envolvente para el EFM y el EDM en función de la frecuencia de corte  $f_c$  del FDPB. Se aprecia que para ambos ejes de magnetización los tres parámetros de las señales de RMB tienden a tener un comportamiento constante para frecuencias de corte  $f_c$  del FDPB por arriba de los 300 kHz. Esto ocurre debido al efecto resonante del sistema BC

que provoca que las amplitudes de las componentes de frecuencia de las señales de RMB por arriba de la  $f_r$  de 340 kHz se atenúen rápidamente provocando un aumento en la magnitud de los parámetros de las señales de RMB muy ligero, como se aprecia en la figura 4.13 (c). Y conforme se eliminan componentes de frecuencia, es decir, para frecuencias de corte desde 300 kHz hacia abajo dichos parámetros de las señales disminuyen rápidamente.

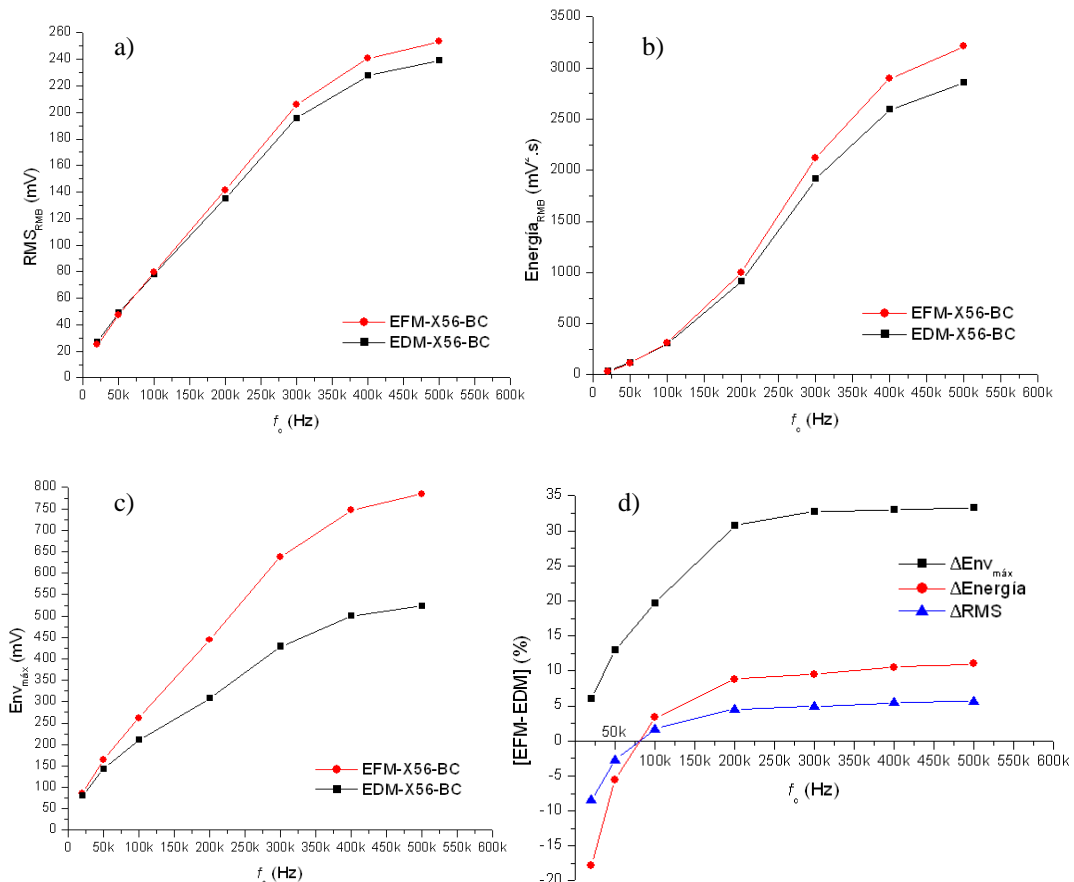


Figura 4.15: Curvas de: a) el valor RMS, b) el valor de la Energía y c) el valor máximo de la envolvente; de las señales de RMB influenciadas por el efecto resonante del sistema BC para el EFM y el EDM del acero X56; y d) Curvas de la diferencia en porcentaje entre los ejes de magnetización para los valores RMS, de Energía y del valor máximo de la envolvente.

Se observa en las figuras 4.15 (a) y 4.15 (c) que para ambos ejes de magnetización los valores RMS y máximo de la envolvente tienen un comportamiento casi lineal para frecuencias de corte  $f_c$  menores a 300 kHz. El valor de Energía tiene un comportamiento exponencial hasta la frecuencia de corte  $f_c$  de 300 kHz a causa de la amplificación debida al efecto resonante (ver figura 4.15 (b)). También se observa que para cada frecuencia de



corte  $f_c$  del FDPB la diferencia de los parámetros de las señales entre los ejes de magnetización disminuye conforme se eliminan componentes de frecuencia, hasta un punto en el que no es evidente la diferencia entre los ejes de magnetización.

En la figura 4.15 (d) se muestran las curvas de la diferencia en por ciento de los valores RMS, de Energía y valor máximo de la envolvente obtenidas de la comparación de dichos valores de las señales de RMB entre ambos ejes de magnetización para cada  $f_c$  del FDPB. Se observa que al eliminar componentes de frecuencia con el FDPB hasta una frecuencia de corte  $f_c$  de 300 kHz la diferencia en por ciento  $\Delta RMS$  y  $\Delta Energía$  es constante, tal como ocurre en el caso analizado de la sección 4.4 (ver figura 4.11 (d)). Sin embargo, la diferencia en por ciento  $\Delta Env_{m\acute{a}x}$  también tiene un comportamiento constante, pero en este caso a diferencia del analizado en la sección 4.4, hasta la frecuencia de corte de 300 kHz. Los valores RMS, de Energía y el valor máximo de las envolventes, así como su diferencia en por ciento representados por  $\Delta Energía$ ,  $\Delta RMS$  y  $\Delta Env_{m\acute{a}x}$  para cada frecuencia de corte del FDPB se encuentran en la tabla B.6 del apéndice B, respectivamente.

Al comparar los valores de diferencia en por ciento  $\Delta RMS$ ,  $\Delta Energía$  y  $\Delta Env_{m\acute{a}x}$  que se obtuvieron en la sección 4.4 para cuando se tiene todo el espectro de frecuencia de las señales de RMB del acero X56 permitido por el amplificador de RMB, respecto a los valores obtenidos con las señales de RMB bajo la influencia del efecto resonante del sistema BC, se obtuvo la tabla 4.5.

TABLA 4.5  
VALORES DE DIFERENCIA EN PORCIENTO DE LOS PARÁMETROS DE LAS SEÑALES DE RMB DEL ACERO X56 OBTENIDOS PARA CUANDO: I) SE TIENE TODO EL ESPECTRO DE FRECUENCIA PERMITIDO POR EL AMPLIFICADOR DE RMB Y II) LAS SEÑALES DE RMB BAJO LA INFLUENCIA DEL EFECTO RESONANTE DEL SISTEMA BC.

Resonancia	$\Delta RMS$ %	Diferencia absoluta	$\Delta Energía$ %	Diferencia absoluta	$\Delta Env_{m\acute{a}x}$ %	Diferencia absoluta
fuera	6.59	0.01	12.76	0.64	40.43	7.03
dentro	7.00		13.40		33.40	

En la tabla 4.5 se aprecia que los valores de diferencia en por ciento  $\Delta RMS$  y  $\Delta Energía$  de ambos casos analizados son muy similares ya que la diferencia entre ambos solo es del



0.14% y 4.8%, respectivamente. Sin embargo, para el caso de los valores de diferencia en por ciento  $\Delta Env_{m\acute{a}x}$  se observa que hay una mayor diferencia la cual es del 17.39%. Los resultados de la tabla 4.5 demuestran el análisis hecho de la tabla 4.3 y figura 4.12 de la sección 4.4. En donde se determinó que para tener resultados satisfactorios de los parámetros de las señales de RMB en el acero X56, ésta debe tener un espectro de frecuencia que abarque mínimo hasta los 300 kHz ó 500 kHz, dependiendo del parámetro analizado. Esto es, para los valores RMS y de Energía el espectro de frecuencia debe contener al menos componentes de frecuencia hasta los 300 kHz y para el valor máximo de la envolvente hasta los 500 kHz. Entonces la similitud de los valores de diferencia en por ciento  $\Delta RMS$  y  $\Delta Energía$  de ambos casos mostrados en la tabla 4.5 se debe a que para estos parámetros se cumple la condición de tener el mínimo espectro de frecuencia de la señal de RMB. Ya que como se ha demostrado el sistema BC tiene su frecuencia de resonancia  $f_r$  al rededor de los 340 kHz lo cual solo introduce amplificación en las señales y no influye en la diferencia en por ciento de los parámetros entre los ejes de magnetización. Sin embargo, para el caso del valor de diferencia en por ciento de  $\Delta Env_{m\acute{a}x}$  se observó en la tabla 4.5 que es muy diferente para ambos casos. Esto se debe a que el sistema BC atenúa la amplitud de las componentes de frecuencia mayores a su  $f_r$ . Por lo que la condición de tener al menos un espectro de frecuencia que abarque hasta los 500 kHz no se cumple y esta es la causa de que la diferencia en por ciento  $\Delta Env_{m\acute{a}x}$  en ambos casos de la tabla 4.5 no sea igual o similar.

La figura 4.16 muestra las curvas de la diferencia en por ciento  $\Delta RMS$ ,  $\Delta Energía$  y  $\Delta Env_{m\acute{a}x}$  en función de la frecuencia de corte  $f_c$  del FDPB empleado para eliminar componentes de frecuencia, para los casos en que el efecto resonante del sistema de detección se encuentra en la banda de paso del sistema de acondicionamiento de la señal y cuando este efecto resonante ocurre a frecuencias mayores que el ancho de banda del sistema de acondicionamiento. Se aprecia la similitud de las curvas  $\Delta RMS$  y  $\Delta Energía$ , y la gran diferencia de las curvas  $\Delta Env_{m\acute{a}x}$ , que es menor para una  $f_c$  de 300 kHz y mayor a medida que aumenta el valor de la  $f_c$  del FDPB.

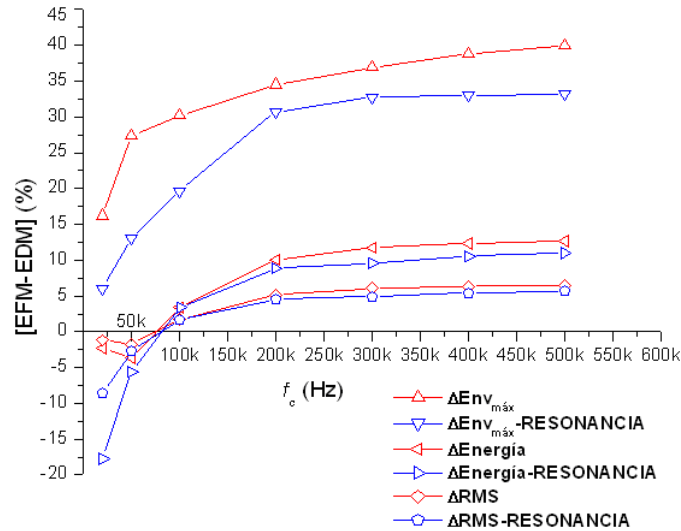


Figura 4.16: Curvas de la diferencia en porcentaje entre los ejes de magnetización para los valores RMS, de Energía y el valor máximo de la envolvente obtenidos para cuando se tiene la  $f_c$  fuera de la banda de paso del amplificador de señal de RMB y para el caso en el que si se tiene el efecto resonante en la banda de paso del amplificador.

## 4.6 Resultados del capítulo

- 1- Se demostró que la señal de RMB es diferente para cada tipo de acero API-5L debido a la diferencia en la composición química y microestructural de estos aceros.
- 2- Se comprobó que se pueden detectar los ejes de fácil y de difícil magnetización a partir de la señal de RMB y de su envolvente, pero no es suficiente para diferenciar entre materiales con propiedades magnéticas similares.
- 3- Se comprobó que se pueden detectar de forma cuantitativa los ejes de fácil y difícil magnetización a partir de los parámetros RMS, Energía y máximo de la envolvente de la señal de RMB.
- 4- Se demostró que los valores de los parámetros de la señal de RMB aumentan rápidamente para valores de intensidad de campo magnético hasta 5 kA/m y para valores mayores a 30 kA/m se obtienen los valores máximos de los parámetros.
- 5- Se determinó que con los valores máximos de los parámetros de la señal de RMB no se obtiene la mayor diferencia entre el EFM y el EDM, y que para un valor de



intensidad de campo magnético de alrededor de 5 kA/m se obtienen los valores de los parámetros que proporcionan la mayor diferencia entre los ejes de magnetización.

- 6- Se determinó que el acero X56 tiene una mayor anisotropía magnética. Para este acero con solo incluir en el análisis de la señal de RMB un espectro de frecuencia de hasta los 300 kHz se obtienen resultados satisfactorios para el análisis de los parámetros RMS y de Energía. Mientras que para el valor máximo de la envolvente se debe analizar una señal con espectro de frecuencia mínimo de hasta 500 kHz.
- 7- Se demostró que el efecto de resonancia de la bobina de detección de RMB aumenta la magnitud de los parámetros de la señal de RMB pero no tiene efectos significativos en la diferencia de los parámetros entre los ejes de magnetización, siempre y cuando se cumpla tener el mínimo espectro de frecuencia necesario para cada parámetro de la señal bajo análisis.
- 8- Se demostró por medio del análisis del efecto resonante y a través del valor máximo de la envolvente que al no contar con un espectro de frecuencia de la señal de RMB al menos de hasta 500 kHz la diferencia de este parámetro entre los ejes de magnetización disminuye.

A partir de estos resultados se le ha dado cumplimiento a los objetivos específicos tres y cuatro de este trabajo de tesis. Las mediciones de la señal de ruido magnético Barkhausen en aceros API-5L pueden brindar información satisfactoria por medio de sus parámetros al establecer las condiciones óptimas de excitación y con solo un mínimo contenido espectral de la señal de RMB.



## Conclusiones

- 1- Se diseñó e implementó el sistema de medición de ruido magnético Barkhausen en aceros.
- 2- Se caracterizó el sistema de medición de ruido magnético Barkhausen. Se determinaron las restricciones impuestas por las características del sistema de medición en el análisis de las señales de RMB medidas de los aceros. De tal manera se determinó que el análisis de las señales de RMB medidas solo puede hacerse en amplitud y en un intervalo de frecuencias que va desde aproximadamente 1 kHz hasta 977 kHz.
- 3- Se demostró por medio de la señal de RMB y sus parámetros obtenidos que los aceros API-5L grado X52, X56 y X60 son diferentes entre sí. Las mediciones a lo largo de los ejes de fácil y difícil de magnetización determinaron que los aceros API-5L tienen anisotropía magnética. Se determinó que los aceros X52 y X60 son aceros muy similares y que el acero X56 tiene una mayor anisotropía magnética.
- 4- Se obtuvo el valor de intensidad de campo magnético de excitación óptimo para obtener la señal de RMB que proporciona mejores resultados para la caracterización de los aceros API-5L. Se determinó que no es necesario analizar todo el espectro de la señal de RMB para obtener resultados satisfactorios para la caracterización de los aceros. Se demostró que el efecto resonante de la bobina de detección solo influye en la magnitud de los parámetros obtenidos de la señal de RMB y que no tiene efectos significativos en la diferencia en porcentaje de los parámetros entre el EFM y el EDM.



## Trabajo a futuro

- Analizar la influencia del defasaje introducido por el amplificador de RMB en los parámetros de la señal de RMB.
- Realizar mediciones de la señales de RMB para diferentes frecuencia de excitación y analizar su influencia en los parámetros de la señal de RMB.
- Realizar mediciones de RMB en muestras de acero sometidas a tensiones y diferentes tratamientos térmicos, y en aceros con diferente dureza para comprobar su aplicación como un método de evaluación no destructiva.





## APÉNDICE A

### Influencia de las intensidades de campo magnético en los parámetros de la señal de RMB

TABLA A.1: Valores de ganancia y fase en función de la frecuencia medidos a la salida del amplificador de señal de RMB, para un intervalo de frecuencias desde 1 Hz hasta 1.5 MHz.

Frecuencia (Hz)	Ganancia (dBV)	Fase (Deg)	Frecuencia (Hz)	Ganancia (dBV)	Fase (Deg)
1	0	0	100 k	0.31	-19
2	0	0	200 k	0.51	-41
3	0	0	300 k	0.74	-68
4	0	0	400 k	0.55	-98
5	0	0	500 k	-0.63	-115
10	0	0	600 k	-0.86	-138
20	0	0	700 k	1	-170
30	0	0	800 k	0.51	140
40	0	0	900 k	-1.6	111
50	-0.1	0	977 k	-3	100
100	0.1	0	1 M	-3.67	91
200	0	0	1.1 M	-6.17	70
300	0	0	1.2 M	-8.87	50
400	-0.1	0	1.3 M	-11.72	32
500	-0.2	0	1.4 M	-14.57	21
1 k	0.1	0	1.5 M	-17.46	8
2 k	0.1	0			
3 k	0.04	0			
4 k	0	0			
5 k	-0.04	0			
10 k	0.23	0			
20 k	0.23	0			
30 k	0.2	0			
40 k	0.12	0			
50 k	0.08	0			



TABLA A.2: Valores de amplitud y fase en función de la frecuencia medidos a la salida del filtro pasa-altas, para un intervalo de frecuencias desde 100 Hz hasta 1.5 MHz.

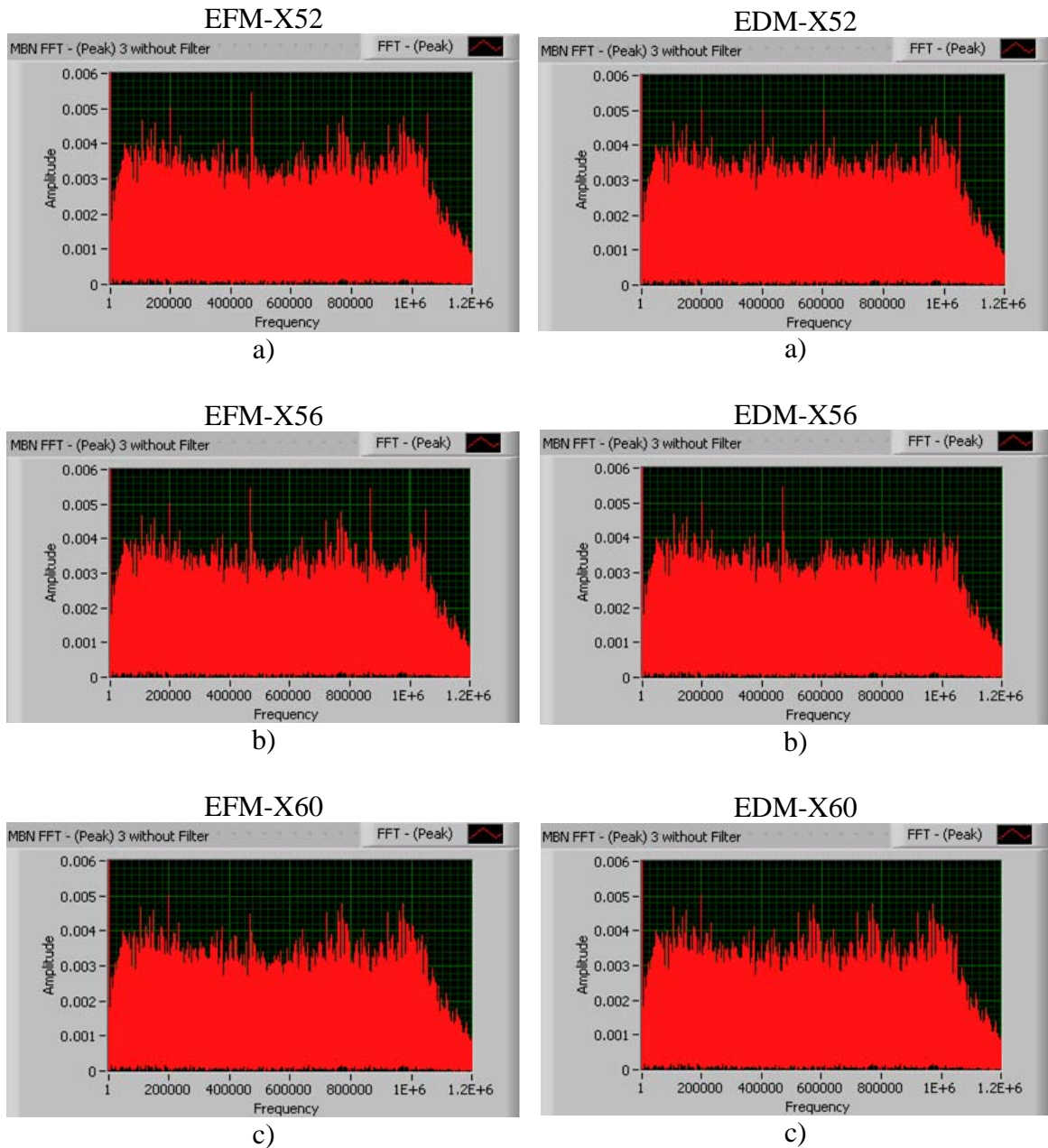
Frecuencia (Hz)	Ganancia (dBV)	Fase (Deg)	Frecuencia (Hz)	Ganancia (dBV)	Fase (Deg)
100	-60.66	110	100 k	0	0
200	-42.63	116	200 k	0	0
300	-32.2	128	300 k	0	0
400	-25.09	139	400 k	0	0
500	-19.35	151	500 k	0	0
1 k	-4.27	-140	600 k	0	0
1.12 k	-3	-123	700 k	0	0
2 k	-0.57	-63	800 k	0	0
3 k	-0.35	-41	900 k	0	0
4 k	-0.25	-30	1 M	0	0
5 k	-0.24	-23	1.1 M	0	0
10 k	-0.16	-9	1.2 M	0	0
20 k	-0.11	-1	1.3 M	0	0
30 k	-0.09	0	1.4 M	0	0
40 k	0	0	1.5 M	0	0
50 k	0	0			

TABLA A.3: Valores del campo magnético  $H$  generado por el par de bobinas de Helmholtz para cada intensidad de corriente  $I$ . Y valores del voltaje de salida  $V_H$  del sensor de efecto Hall para cada intensidad de campo magnético  $H$ .

$I$ (A)	$H$ (kA/m)	$V_H$ (mV)	$I$ (A)	$H$ (kA/m)	$V_H$ (mV)	$I$ (A)	$H$ (kA/m)	$V_H$ (mV)
0	0	3.89	1.2	12.021	15.18	2.4	24.042	26.44
0.1	1.0018	4.87	1.3	13.023	16.11	2.5	25.044	27.39
0.2	2.004	5.80	1.4	14.025	17.05	2.6	26.046	28.33
0.3	3.005	6.74	1.5	15.026	17.99	2.7	27.047	29.27
0.4	4.007	7.67	1.6	16.028	18.95	2.8	28.049	30.20
0.5	5.009	8.61	1.7	17.030	19.87	2.9	29.051	31.15
0.6	6.011	9.54	1.8	18.032	20.82	3	30.053	32.08
0.7	7.012	10.49	1.9	19.033	21.74	3.1	31.054	33.02
0.8	8.014	11.41	2	20.035	22.69	3.2	32.056	33.95
0.9	9.016	12.36	2.1	21.037	23.61	3.3	33.058	34.90
1	10.018	13.29	2.2	22.039	24.56	3.4	34.060	35.82
1.1	11.019	14.23	2.3	23.040	25.50			

## APÉNDICE B

### Medición de la señal de RMB en aceros API-5L y parámetros de la señal



B.1. Espectros de frecuencia de las señales de RMB obtenidas en la dirección del EFM en los aceros API-5L grado: a) X52, b) X56 y c) X60.

B.2. Espectros de frecuencia de las señales de RMB obtenidas en la dirección del EDM en los aceros API-5L grado: a) X52, b) X56 y c) X60.



## Influencia de las intensidades de campo magnético de excitación en los parámetros de la señal de RMB

TABLA B.1: Valores  $\overline{RMS}$  y  $\overline{Energía}$  del EFM y del EDM del acero X52 para cada valor de intensidad de campo magnético  $H$ .

$H$ (kA/m)	X52							
	EFM				EDM			
	$\overline{RMS}$	$\pm \sigma_s$	$\overline{Energía}$	$\pm \sigma_s$	$\overline{RMS}$	$\pm \sigma_s$	$\overline{Energía}$	$\pm \sigma_s$
	(mV)		(mV <sup>2</sup> .s)		(mV)		(mV <sup>2</sup> .s)	
<b>1.1</b>	77	0.7	298	5	58	1.0	165	6
<b>2.1</b>	123	0.8	751	9	93	0.3	430	3
<b>3.2</b>	150	0.3	1131	4	123	0.8	759	9
<b>4.3</b>	168	0.5	1416	8	141	0.4	999	5
<b>5.3</b>	181	0.9	1631	17	155	0.6	1204	9
<b>10.7</b>	201	1.1	2010	22	186	0.4	1732	8
<b>21.3</b>	212	1.0	2248	22	208	0.9	2152	18
<b>32</b>	216	0.6	2341	14	213	0.7	2259	14
<b>42.6</b>	217	1.6	2358	34	214	0.9	2297	20
<b>53.3</b>	218	0.9	2372	20	215	0.8	2314	16

TABLA B.2: Valores  $\overline{RMS}$  y  $\overline{Energía}$  del EFM y del EDM del acero X56 para cada valor de intensidad de campo magnético  $H$ .

$H$ (kA/m)	X56							
	EFM				EDM			
	$\overline{RMS}$	$\pm \sigma_s$	$\overline{Energía}$	$\pm \sigma_s$	$\overline{RMS}$	$\pm \sigma_s$	$\overline{Energía}$	$\pm \sigma_s$
	(mV)		(mV <sup>2</sup> .s)		(mV)		(mV <sup>2</sup> .s)	
<b>1.1</b>	73	0.3	264	2	58	0.1	170	1
<b>2.1</b>	129	0.3	837	3	90	0.2	404	2
<b>3.2</b>	154	0.1	1189	2	112	0.6	624	7
<b>4.3</b>	168	0.7	1411	11	130	0.5	846	6
<b>5.3</b>	177	0.6	1572	10	141	0.1	993	2
<b>10.7</b>	197	0.3	1949	7	168	0.7	1418	12
<b>21.3</b>	208	0.6	2154	13	192	0.5	1842	10
<b>32</b>	210	1.3	2208	27	199	0.3	1986	5
<b>42.6</b>	212	1.4	2237	29	201	0.8	2027	15
<b>53.3</b>	210	1.4	2213	30	203	0.5	2053	11

TABLA B.3: Valores  $\overline{RMS}$  y  $\overline{Energía}$  del EFM y del EDM del acero X60 para cada valor de intensidad de campo magnético  $H$ .

$H$ (kA/m)	X60							
	EFM				EDM			
	$\overline{RMS}$	$\pm\sigma_s$	$\overline{Energía}$	$\pm\sigma_s$	$\overline{RMS}$	$\pm\sigma_s$	$\overline{Energía}$	$\pm\sigma_s$
	(mV)		(mV <sup>2</sup> .s)		(mV)		(mV <sup>2</sup> .s)	
<b>1.1</b>	78	0.2	304	2	63	0.3	201	2
<b>2.1</b>	123	0.6	751	8	100	0.6	502	5
<b>3.2</b>	150	0.6	1130	9	126	0.4	798	5
<b>4.3</b>	169	0.9	1428	15	145	0.3	1057	4
<b>5.3</b>	180	1.0	1617	17	157	0.3	1232	5
<b>10.7</b>	201	0.6	2026	11	188	0.9	1767	18
<b>21.3</b>	215	0.5	2305	11	208	0.4	2161	8
<b>32</b>	217	0.7	2349	15	214	0.4	2284	9
<b>42.6</b>	218	0.9	2380	20	215	1.2	2319	25
<b>53.3</b>	219	0.5	2389	12	216	0.3	2341	6

TABLA B.4: Valores  $\Delta\overline{RMS}$  y  $\Delta\overline{Energía}$  del acero X52, X56 y X60 para cada valor de intensidad de campo magnético  $H$ .

$H$ (kA/m)	X52				X56				X60			
	$\Delta\overline{RMS}$		$\Delta\overline{Energía}$		$\Delta\overline{RMS}$		$\Delta\overline{Energía}$		$\Delta\overline{RMS}$		$\Delta\overline{Energía}$	
	(mV)	%	(mV <sup>2</sup> .s)	%	(mV)	%	(mV <sup>2</sup> .s)	%	(mV)	%	(mV <sup>2</sup> .s)	%
	$\pm\sigma_s$		$\pm\sigma_s$		$\pm\sigma_s$		$\pm\sigma_s$		$\pm\sigma_s$		$\pm\sigma_s$	
<b>1.1</b>	19	25	133	45	15	21	94	36	15	19	103	34
	1.7		11		0.3		2		0.5		3.59	
<b>2.1</b>	30	24	321	43	39	30	433	52	23	19	249	33
	1.0		12		0.5		6		1.2		13.3	
<b>3.2</b>	27	18	372	33	42	27	565	48	24	16	332	29
	1.0		13		0.8		9		1.0		14.25	
<b>4.3</b>	27	16	417	29	38	23	565	40	24	14	371	26
	0.8		13		1.1		17		1.2		19.29	
<b>5.3</b>	26	14	427	26	36	20	579	37	23	13	385	24
	1.5		25		0.7		11		1.3		21.97	
<b>10.7</b>	15	7	278	14	29	15	531	27	13	6	259	13
	1.6		31		1.1		19		1.5		28.92	
<b>21.3</b>	4	2	96	4	16	8	312	14	7	3	144	6
	1.9		40		1.2		23		0.9		19.06	
<b>32</b>	3	1	82	4	11	5	222	10	3	1	65	3
	1.3		28		1.6		32		1.1		23.48	
<b>42.6</b>	3	1	61	3	11	5	210	9	3	1	61	3
	2.5		54		2.1		44		2.1		45.17	
<b>53.3</b>	3	1	58	2	7	3	160	7	3	1	48	2
	1.7		37		2.0		41		0.8		17.13	



## Influencia de la frecuencia de corte del filtro pasa-bajas en los parámetros de la señal de RMB

TABLA B.5: Valores RMS, Energía y máximo de la envolvente del EFM y del EDM, y diferencia en porcentaje  $\Delta RMS$ ,  $\Delta Energía$  y  $\Delta Env_{m\acute{a}x}$  entre el EFM y el EDM, respectivamente. Obtenidos de las señales de RMB del acero X56 para cada frecuencia de corte  $f_c$  del FDPB.

$f_c$ (Hz)	SIN EFECTO RESONANTE								
	RMS (mV)		$\Delta RMS$	Energía (mV <sup>2</sup> .s)		$\Delta Energía$	Env <sub>máx</sub> (mV)		$\Delta Env_{m\acute{a}x}$
	EFM	EDM	%	EFM	EDM	%	EFM	EDM	%
800k	203.11	190.39	6.26	2063	1812	12.14	377.53	629.74	40.05
700k	193.52	181.17	6.38	1872	1641	12.35	361.92	605.15	40.19
600k	181.47	169.67	6.50	1647	1439	12.58	342.44	573.28	40.27
500k	167.47	156.54	6.53	1402	1225	12.63	320.96	535.25	40.04
400k	151.34	141.7	6.37	1145	1004	12.34	300.70	490.90	38.75
300k	132.28	124.29	6.04	875	772	11.72	276.41	438.22	36.92
200k	108.87	103.25	5.16	593	533	10.06	241.64	368.97	34.51
100k	74.73	73.46	1.70	279	270	3.37	182.50	261.27	30.15
50k	47.79	48.65	-1.80	114	118	-3.64	131.86	181.73	27.44
20k	26.35	26.66	-1.18	35	36	-2.33	82.94	98.99	16.21

## Influencia del efecto resonante de la bobina de detección en los parámetros de la señal de RMB

TABLA B.6: Valores RMS, Energía y máximo de la envolvente del EFM y del EDM, y diferencia en porcentaje  $\Delta RMS$ ,  $\Delta Energía$  y  $\Delta Env_{m\acute{a}x}$  entre el EFM y el EDM, respectivamente. Obtenidos de las señales de RMB del acero X56 bajo la influencia del efecto resonante del sistema BC para cada frecuencia de corte  $f_c$  del FDPB.

$f_c$ (Hz)	BAJO LA INFLUENCIA DEL EFECTO RESONANTE								
	RMS (mV)		$\Delta RMS$	Energía (mV <sup>2</sup> .s)		$\Delta Energía$	Env <sub>máx</sub> (mV)		$\Delta Env_{m\acute{a}x}$
	EFM	EDM	%	EFM	EDM	%	EFM	EDM	%
500k	253.42	239.08	5.66	3211.04	2858.05	10.99	784.56	523.69	33.25
400k	240.74	227.7	5.42	2897.68	2592.39	10.54	746.36	500.03	33.00
300k	205.82	195.74	4.90	2118	1915.7	9.55	637.77	428.89	32.75
200k	141.63	135.23	4.52	1002.95	914.37	8.83	444.29	307.75	30.73
100k	79.37	78.04	1.68	315.01	304.48	3.34	261.95	210.37	19.69
50k	47.64	48.95	-2.75	113.46	119.8	-5.59	164.74	143.34	12.99
20k	24.9	27.02	-8.51	30.99	36.49	-17.75	86.02	80.83	6.03



## Bibliografía

- [1] D. C. Jiles (1991). Introduction to Magnetism and Magnetic Materials. 1<sup>st</sup> ed. Chapman&Hall, 2-6 Boundary Row, London SE1 8HN.
- [2] J. A. Pérez-Benitez, “Estudio del ruido magnético Barkhausen en aceros al carbono”, *PhD Tesis, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba, (2007-2008)*.
- [3] Martin A. Plonus. (1994). Electromagnetismo Aplicado. Reverte S.A., España.
- [4] G. Dehmel. Magnetic field sensors: Induction coils (search coils) sensors. In Boll R. and Overshott K. J., editors, *Magnetic sensors.*, volume 5 of *Sensors. A Comprehensive Survey*, chapter 6, pages 205 – 253. VCH Verlagsgesellschaft mbH, 1989.
- [5] Ripka P. (2001). Magnetic Sensors and Magnetometers, Artech House, Inc.
- [6] Antonio Massarini and Marian K. Kazimierczuk. “Self-Capacitance of Inductors”. *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 2, No. 4, July 1997.
- [7] A. Massarini, M. K. Kazimierczuk, and G. Grandi. “Lumped Parameter Models for Single- and Multiple-Layer Inductors”. 1996 IEEE.
- [8] Gabriele Grandi, Marian K. Kazimierczuk, Antonio Massarini, and Ugo Reggiani. “Stray Capacitances of Single-Layer Solenoid Air-Core Inductors”. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 35, No. 5, September 1999.
- [9] Sunderarajan S. Mohan, Maria del Mar Hershenson, Stephen P. Boyd, and Thomas H. Lee. “Simple Accurate Expressions for Planar Spiral Inductances”. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Vol. 34, No. 10, October 1999.
- [10] C. Patrick Yue and S. Simon Wong. “Physical Modeling of Spiral Inductors on Silicon”. *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 47, No. 3, March 2000.
- [11] Ingo Schäfer and Klaus Krüger. “Modelling of coils using fractional derivatives”. *Journal of Magnetic and Magnetic Materials* 307(2006) 91-98.
- [12] Slawomir Tumansky. “Induction Coil Sensors-a Review”. Institute of Physics Publishing. *Meas. Sci. Technol.* 18(2007) R31-R46.
- [13] Espina Hernández José Hiram, “Nueva técnica de medición para la caracterización de materiales magnéticos en campos pulsados”, *PhD Tesis, Centro de materiales y reactivos (UH), Centro de investigación en microelectrónica (ISPJAE)*.



- “Measurements of self-capacitance for windings on high-permeability ferrites cores. *Measurements science review*, 1(1):219-222, 2001.
- [14] Espina Hernández José Hiram, “Nueva técnica de medición para la caracterización de materiales magnéticos en campos pulsados”, *PhD Tesis, Centro de materiales y reactivos (UH), Centro de investigación en microelectrónica (ISPJAE)*. D. C. Jiles. Introduction to Magnetism. Cambridge University Press, second edition, 1989.
- [15] Cardon M. (2007), “The Marketing of Barkhausen Noise Analysis”. The shot peener, pp 18-20.
- [16] L. Clapham, C. Heald, T. Krause, and D. L. Atherton. “Origin of a magnetic easy axis in pipeline steel”. *J. Appl. Phys.*, 86, 1574 (1999).
- [17] 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.
- [18] J. Capó-Sánchez, L. Padovese. “Magnetic Barkhausen noise measurement by resonant coil method”. *J. of Magnetism and Magnetic Materials*, 321 (2009) L57-L62.
- [19] <http://www.magnet-physik.de/>
- [20] <http://www.chenyang-ism.com/>
- [21] <http://www.datasheetarchive.com/LM4701T-datasheet.html>
- [22] <http://apex.cirrus.com/en/products/apex/index.html>
- [23] <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/56683/BURR-BROWN/INA128.html>
- [24] <http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/opa4228.html>
- [25] <http://www.national.com/ds/LM/LM194.pdf>
- [26] 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.
- [27] Agilent Technologies. Agilent 6000 Series Oscilloscopes. User’s Guide.
- [28] Don E. Bray, Roderic K. Stanley. (1996). *Nondestructive Evaluation: A tool in Design, Manufacturing, and Service*. 1<sup>st</sup> ed. Taylor&Francis Group, USA.





- [29] S. White, T. Krause, L. Clapham. “Control of Flux in Magnetic Circuits for Barkhausen Noise Measurements”. Meas. Sci. Technol. 18(2007)3501-3510. October 2007.
- [30] A. Bruce Carlson, Paul B. Crilly y Janet C. Rutledge. Sistemas de comunicación “Una introducción a las señales y el ruido en las comunicaciones eléctricas”. 4<sup>a</sup> ed. MacGrawHill (2007).



# Trabajos Publicados

## I. Congreso Internacional CIINDET 2009

**CIINDET 2009**

VII Congreso Internacional en Innovación y Desarrollo Tecnológico,  
7 al 9 de octubre de 2009, Cuernavaca, Morelos., México.

### Desarrollo de un sistema de medición de ruido magnético Barkhausen en materiales ferromagnéticos

P. Martínez-Ortiz; J. H. Espina-Hernández; E. Ramírez-Pacheco.

**Resumen:** En este trabajo se presenta un sistema de medición de ruido magnético Barkhausen para la caracterización de materiales ferromagnéticos. El sistema se desarrolló utilizando técnicas magnéticas, de instrumentación electrónica, de adquisición y de procesamiento de señales. Los materiales ferromagnéticos fueron excitados por medio de un campo magnético sinusoidal con una frecuencia entre 10 y 20 Hz, el cual magnetizó el material. Tal efecto permitió medir la señal de ruido magnético Barkhausen que se genera en la muestra bajo prueba. Se demostró que a través de este método es posible reconocer un material ferromagnético dado entre varios de ellos. Tres distintos aceros fueron examinados y el valor RMS máximo fue computado, el cual de hecho ayuda a distinguir cada material.

**Palabras Clave:** evaluación no destructiva, magnetización, material ferromagnético, ruido magnético Barkhausen.

**Abstract:** In this work a measurement system of magnetic Barkhausen noise for the characterization of ferromagnetic materials is presented. The system is developed using magnetic, electronic instrumentation, acquisition and signal processing techniques. The ferromagnetic materials were excited by mean of a sinusoidal magnetic field with frequencies between 10 and 20 Hz, which magnetized the material. Such an effect allowed the measurement of the magnetic Barkhausen noise signal that is generated in the sample under test. It is demonstrated that through this method, it is possible to recognize a given ferromagnetic material among others. Three different steels were tested and the maximum RMS value was computed,

which in fact helps to distinguish each material.

**Keywords:** ferromagnetic material, magnetic Barkhausen noise, magnetization, non-destructive evaluation.

#### Introducción

El hierro y el acero son los materiales que se producen en mayor cantidad cada año en comparación con cualquier otro tipo de material. El acero se considera económicamente uno de los bienes industriales más importantes. Los materiales ferromagnéticos han sido ampliamente utilizados en proyectos de gran escala en muchos campos de la industria tal como petróleo, vías férreas, aviación y otras; debido a su buena elasticidad, plasticidad y alta resistencia [1].

Las averías en los materiales antes mencionados pueden causar fallas potencialmente catastróficas, que se traduciría en pérdidas económicas y humanas. No obstante, estos percances pueden ser evitados por medio de diferentes métodos de evaluación no destructiva (NDE, por sus siglas en inglés), como los que utilizan radiación ionizante, ultrasonido, pérdidas de flujo magnético, entre otras [2, 3]. La medición de ruido magnético Barkhausen (MBN, por sus siglas en inglés) es uno de los métodos de NDE que puede ser utilizado para caracterizar a los materiales ferromagnéticos. El método de MBN se basa en un concepto de medición de pulsos eléctricos inducidos formando un ruido como señal, generado cuando un campo magnético alterno se aplica a un material ferromagnético [1]. La Figura 1 muestra de manera simplificada el proceso de magnetización de un material ferromagnético, a partir de la curva inicial de magnetización.

Los materiales ferromagnéticos están formados por pequeñas regiones magnéticas llamadas dominios magnéticos. Cada dominio está orientado espontáneamente en una dirección aleatoria. Esta orientación aleatoria responde a que todo sistema tiende hacia una configuración de mínima energía [1, 4]. Los

Pedro Martínez Ortiz [pedromartinezo@hotmail.com](mailto:pedromartinezo@hotmail.com)  
José Hiram Espina Hernández [jhespina@gmail.com](mailto:jhespina@gmail.com)  
Eduardo Ramírez Pacheco [erpach@hotmail.com](mailto:erpach@hotmail.com)  
SEPI Electrónica, ESIME Zacatenco  
Instituto Politécnico Nacional  
UPALM Edif. Z-4, 3<sup>er</sup> Piso, Zacatenco, México DF, CP 07300.



## II. Congreso Nacional CNIES 2009

## Sistema de Medición de Ruido Magnético Barkhausen para la Caracterización de Aceros API-5L

P. Martínez-Ortiz<sup>1,a</sup>, J. H. Espina-Hernández<sup>1</sup>, J. M. Hallen<sup>2</sup><sup>1</sup>SEPI Electrónica, ESIME Zacatenco-IPN, México DF, México<sup>2</sup>ESIQIE, Instituto Politécnico Nacional, México DF, MéxicoTeléfono (55) 5729-6000 Ext.: 54607 E-mail: <sup>a</sup>pmartinezo0200@ipn.mx

**Resumen** — En este trabajo se presenta un sistema de medición de ruido magnético Barkhausen para la caracterización de aceros API-5L (grado X52, X56, X60). El sistema se basa en técnicas magnéticas de excitación y sensado para obtener la señal de ruido magnético Barkhausen en un acero. Un campo magnético sinusoidal de 10 Hz de frecuencia e intensidad de hasta 5.2 kA/m se aplicó a las muestras de acero API-5L. Las muestras de acero estuvieron sometidas a un proceso de magnetización por medio del campo magnético alterno aplicado. Durante el proceso de magnetización el acero generó la señal de ruido magnético Barkhausen la cual se logró medir. Se demostró que cada acero genera una señal de ruido magnético Barkhausen propia que depende de su composición química y su 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 máximo y la energía máxima de la señal los cuales pueden ser utilizados para caracterizar a los aceros API-5L.

**Palabras Clave** – Anisotropía, magnetización, microestructura, ruido magnético Barkhausen.

**Abstract** — In this work a measurement system of magnetic Barkhausen noise for the characterization of API-5L (grade X52, X56, X60) steels is presented. The system is based on magnetic techniques of excitement and sensing to obtain the magnetic Barkhausen noise signal. A sinusoidal magnetic field of 10 Hz of frequency with up to 5.2 kA/m was applied to the API-5L steel samples. The steel samples were subjected to a magnetization process by mean of the applied alternating magnetic field. During the magnetization process the signal of magnetic Barkhausen noise is generated by the steel which was possible to measure. It is demonstrated that each steel generate a magnetic Barkhausen noise signal depend on the material chemical composition and microstructure. The steel magnetic anisotropy was verified through the magnetic Barkhausen noise signal. The magnetic Barkhausen noise signal was processed and three parameters were extracted: signal envelope, maximum RMS value and maximum energy of the signal which can be used to characterize the API-5L steels.

**Keywords** – Anisotropy, magnetic Barkhausen noise, magnetization, microstructure.

## I. 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 fácil de magnetización (EFM) y eje difícil de magnetización (EDM) los cuales son perpendiculares entre sí. El EFM se satura magnéticamente con una intensidad de campo magnético menor comparado con el EDM.

La evaluación no-destructiva (END) de estructuras de acero (material ferromagnético) utilizando métodos magnéticos, es única, porque utiliza las propiedades magnéticas del acero para detectar defectos en dichas estructuras además de evaluar las propiedades magnéticas de los aceros. La medición de la señal de ruido magnético Barkhausen (RMB) en materiales ferromagnéticos es uno de los métodos de END que puede ser utilizado para caracterizar a los aceros. La medición del RMB se basa en la detección de pulsos eléctricos de corta duración registrados en un sensor inductivo, formando una señal que parece ruido que se genera cuando un campo magnético  $H$  variante en el tiempo se aplica a un acero [1].

En la Fig. 1(a) se representa esquemáticamente un material ferromagnético en su estado desmagnetizado, el cual está formado por pequeñas regiones magnéticas llamadas dominios magnéticos. Los dominios magnéticos están separados unos de otros por fronteras conocidas como paredes de dominio. En el estado desmagnetizado cada dominio tiene su momento magnético orientado espontáneamente en una dirección aleatoria. La orientación de los momentos de los dominios magnéticos responde a que todo sistema tiende hacia una configuración de mínima energía [1, 2].

Cuando se aplica un campo magnético externo a un material ferromagnético ocurre el proceso de magnetización. El material que inicialmente se encontraba en un estado desmagnetizado comienza a magnetizarse hasta llegar a un



III. Revista CIENTÍFICA de ESIME (para ser publicado en Abril-Junio 2010)

## Caracterización de Aceros API-5L por medio de la Medición de Ruido Magnético Barkhausen

P. Martínez-Ortiz<sup>1, a</sup>, J. H. Espina-Hernández<sup>1</sup>, J. M. Hallen<sup>2</sup>, R. Linares y Miranda<sup>1</sup>

<sup>1</sup>SEPI Electrónica, ESIME Zacatenco-IPN, México D.F., México

<sup>2</sup>ESIQIE, Instituto Politécnico Nacional, México D.F., México

e-mail: pmartinezo0200@ipn.mx<sup>a</sup>

**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.

**Abstract** — 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.

**Keywords** – Magnetic Barkhausen noise, Steel, Anisotropy.

### I. 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 este 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



The screenshot shows an Outlook window titled "Redirected Mensaje". The menu bar includes "Correo", "Redactar", "Libreta de Direcciones", "Calendario", "Caroeta orincial de tareas", "Caroeta de notas", "Opciones", "Control de Correo", "Salir", and "Avuda". The email header shows it is from Alma Miranda to Pedro Martinez Ortiz. The main body of the email contains a message from Alma Miranda regarding the publication of an article and a forwarded message from Pedro Martinez Ortiz asking for clarification on a corrected article.

**Mensaje** (Mi dominio)

**De:** alma miranda <revistacientifipn@yahoo.com.mx>  
**Asunto:** Re: ARTÍCULO  
**Fecha:** Wed, 30 Jun 2010 08:07:42 -0700 (PDT)  
**Para:** Pedro Martinez Ortiz <pmartinezo0200@ipn.mx>

Estimado Dr. pedro Martínez, su artículo "Caracterización de Aceros API-5L por medio de la Medición del Ruido Magnético Barkhausen" ya esta listo para publicar se esta trabajando ya no es posible enviarle las pruebas de galera de este será para regresando de vacaciones, esta contemplado para el Vol. 14 Núm, 2 abril - junio de 2010, alguna duda estamos para servirle reciba un cordial saludo, y que tenga unas excelentes vacaciones,  
Atte.  
Alma Miranda

PD  
Dr. le voy a pedir que regresando de vacaciones se suscriban a la revista todos los autores el costo es de \$ 400 pesos anuales.

--- El mar 29-jun-10, Pedro Martinez Ortiz <pmartinezo0200@ipn.mx> escribió:

De: Pedro Martinez Ortiz <pmartinezo0200@ipn.mx>  
Asunto: ARTÍCULO  
A: revistacientifipn@yahoo.com.mx  
Fecha: martes, 29 de junio de 2010, 12:17

Saludos, buenos tardes señorita Alma Miranda escribo para preguntar acerca del artículo corregido que envíe a su correo electrónico titulado "Caracterización de Aceros API-5L por medio de la medición de ruido magnético Barkhausen" y como autores P. Martínez-Ortiz, J. H. Espina-Hernández, J. M. Hallen y R. Linares y Miranda. La pregunta es que si fue aceptado el artículo con las correcciones realizadas y si lo fue conocer los siguientes pasos para su publicación.

Sin más por el momento me despido agradeciendo su fina atención y espero su pronta respuesta.



## Agradecimientos

En la elaboración de este trabajo han contribuido muchas personas a quienes deseo expresar mi más sincero agradecimiento:

A mi madre y hermanos por dirigirme por el buen camino en los primeros pasos de mi vida;

Especialmente a mi esposa e hijo, por el apoyo y amor incondicional, que como en toda familia tuvimos altas y bajas pero que al fin y al cabo hemos logrado salir adelante. Por los momentos que pasamos juntos y por las cosas que dejamos de hacer para que me dedicara a hacer este trabajo;

A la familia de mi esposa, por el apoyo en el cuidado de mi hijo durante mi ausencia y la de mi esposa;

A mis suegros, Alejandro y Evelia, por demostrarme su apoyo y afecto incondicional;

A todos los profesores de SEPI Electrónica de ESIME Zacatenco por la contribución en mi formación profesional;

De manera especial a mi director de tesis por el interés y dedicación demostrada durante la realización de este trabajo;

Al Dr. Francisco Gallegos Funes por el ánimo que me daba para no desistir en la etapa final de este trabajo y por los consejos de vida que me ha dado;

Al Dr. Jose Manuel de la Rosa por el apoyo mostrado durante mi estancia en la maestría;

Al Dr. Roberto Linares y Miranda por los consejos vertidos para la mejora de este trabajo;

A mis colegas de la sección de posgrado, Jonathan, Fernando, Diego, Erick, Juan, Cesar, Dario, Saúl y muchos otros, quienes fueron fundamentales para pasarla bien en mi estancia en la maestría. Y en especial al M. en C. Eduardo Ramírez Pacheco quien me enseñó que la perseverancia es la herramienta fundamental para alcanzar los objetivos deseados;

A los especialistas del laboratorio de laseres de SEPI Electrónica ESIME Zacatenco, Sr. Moctezuma y Sr. Soria, y de ESIQIE a Robert y Lucio, quienes intervinieron en el maquinado de las muestras de acero;

A CONACYT y a PIFI-ESIME Zacatenco por el apoyo económico que me brindó durante la realización de este trabajo de tesis.