



SEP

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



**TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO**

Tecnológico Nacional de México

**Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico**

Tesis de Maestría

**Caracterización de las propiedades magnéticas de un material
compuesto a base de resinas y polvo de hierro**

presentada por

Ing. Susana Magaly Parrilla Rubio

como requisito para la obtención del grado de
Maestra en Ciencias en Ingeniería Electrónica

Director de tesis

Dr. Mario Ponce Silva

Codirector de tesis

Dra. Claudia Cortés García

Cuernavaca, Morelos, México. Octubre de 2018.

Cuernavaca, Mor., 15 de octubre de 2018

OFICIO No. DIE/161/2018.

Asunto: Aceptación de documento de tesis

DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del **C. Susana Magaly Parrilla Rubio**, con número de control **M16CE100** de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado **“Caracterización de las Propiedades Magnéticas de un Material Compuesto a Base de Resinas y Polvo de Hierro”** y hemos encontrado que se han realizado todas las correcciones y observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

DIRECTOR DE TESIS



Dr. Mario Ponce Silva
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 3516427

CODIRECTOR DE TESIS



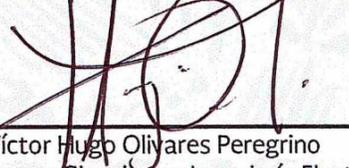
Dra. Claudia Cortés García
Doctora en Ciencias en Ingeniería Mecánica
Cédula profesional 9336586

REVISOR 1



Dr. Jesús Aguayo Alquicira
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 4706315

REVISOR 2



Dr. Víctor Hugo Olivares Peregrino
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 5999002

C.p. M.T.I. María Elena Gómez Torres- Jefa del Departamento de Servicios Escolares

Estudiante
Expediente
RFEJ/Irr.

Cuernavaca, Mor., 15 de octubre de 2018

OFICIO No. SAC/459/2018

Asunto: Autorización de impresión de tesis

ING. SUSANA MAGALY PARRILLA RUBIO
CANDIDATA AL GRADO DE MAESTRA EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
PRESENTE

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado "**Caracterización de las Propiedades Magnéticas de un Material Compuesto a Base de Resinas y Polvo de Hierro**", ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

EXCELENCIA EN EDUCACIÓN TECNOLÓGICA®
"CONOCIMIENTO Y TECNOLOGÍA AL SERVICIO DE MÉXICO"



SEP TecNM
CENTRO NACIONAL
DE INVESTIGACIÓN
Y DESARROLLO
TECNOLÓGICO
SUBDIRECCIÓN
ACADÉMICA



DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO

C.p. M.T.I. María Elena Gómez Torres- Jefa del Departamento de Servicios Escolares.
Expediente

GVGR/mcr





AGRADECIMIENTOS

A Dios, por ser él quien me guía siempre hacia un mejor camino, por ser mi fuerza y por ser fiel en todo momento.

A mi pequeña familia; al M.C. Jorge Rivas, quien se desveló a mi lado y me ayudó siempre incondicionalmente para lograr este grado académico, quien, además, me ha dado su amor, su respeto y su confianza; a la gata Lola por ser la mascota de la casa, y a mi pequeña princesa que viene en camino y que está cambiando mi forma de ver el mundo.

A CONACYT por darme la oportunidad de ser becaria y cubrir mis necesidades básicas y escolares durante mis estudios de Maestría. Siempre estaré enormemente agradecida con ustedes.

A CENIDET por permitirme cursar este grado académico y, en general a todo su personal, en especial a la Lic. Lorena por ser tan atenta, amable y paciente.

Al TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO por haberme ofertado la carrera de electrónica de potencia y haber despertado en mí el enorme interés de cursar la maestría.

A mi abuelo Jesús, quien me apoyó económica y moralmente para comenzar mis estudios de maestría, a mi abuelita Isabel que siempre me da su cariño y comprensión cuando quiero alcanzar una nueva meta. A mis tías y mis primas, en especial, a la tía Isa y a mi apreciada Quetzy, y a mi hermana Sary por su apoyo y sus consejos. Pero, sobre todo, muchas gracias a mis tíos Noé y Cristina Moncada, que me recibieron en esta ciudad y me acogieron con mucho cariño durante el primer semestre de la maestría.

A mi querido asesor Mario, quien no sólo me apoyó en la parte académica, también tuvo prestos sus oídos a mis cuestiones personales y me dio sus consejos, así como a su esposa, Claudia, por ser tan linda y bondadosa. Muchísimas gracias a los dos por darme su amistad y ser como mis papás sustitutos en mi estadía por este instituto.

A todos mis profesores y, en especial, a mis revisores: el Dr. Olivares y el Dr. Aguayo que aportaron sus observaciones y sus conocimientos a este trabajo. Singularmente, gracias al Dr. Aguayo por su amistad y por sus enseñanzas.

A mis compañeros de generación Dante y Carlos, con quienes compartí buenos momentos y que me impartieron asesoramiento escolar cuando lo necesité, y en general, a todos los demás que me brindaron su apoyo en alguna ocasión.

Al laboratorio de electrónica de potencia y energías renovables por permitirme consolidar una parte de este trabajo mediante el acceso a uno de sus equipos y, en especial, al Dr. Rodolfo y al Dr. Hugo, que estuvieron al pendiente de mis actividades y me ofrecieron siempre su apoyo.



RESUMEN

En esta tesis se presenta un material compuesto magnético blando de baja permeabilidad, caracterizado para usarse en la elaboración de núcleos magnéticos de inductores y transformadores que operan a frecuencias mayores a 1 kHz.

Los inductores y transformadores actuales que operan a alta frecuencia (mayor a 1 kHz) presentan el siguiente inconveniente: sus núcleos magnéticos se elaboran a partir de materiales cerámicos y/o metálicos que son muy frágiles y se rompen con facilidad. Además, el proceso de fabricación de los núcleos magnéticos actuales consiste en tratamientos de moldeo a presión, tratamientos térmicos, procesos de laminación en capas, trituración mecánica mediante molinos de chorro, tratamientos de presión reducida mediante caudal controlado, tratamientos de compactación, por mencionar los más relevantes.

Los núcleos magnéticos elaborados con el material compuesto por hierro y resina se originan a partir de moldes flexibles y blandos de caucho de silicona. El caucho de silicona permite reproducir núcleos de formas inusuales, sin necesidad de requerir altas presiones o altas temperaturas, por lo que es innecesario un equipo sofisticado, costoso y de alta precisión para elaborar los núcleos magnéticos deseados.

Además, los núcleos magnéticos compuestos por el material presentado fueron elaborados por moldeo manual mediante la mezcla de polvo de hierro de malla 100, resina laminada e insaturada de poliéster y un agente catalizador. Sus elementos estructurales basan su importancia en las siguientes características: el polvo de hierro permite alcanzar importantes características magnéticas; la resina polimérica proporciona el aislamiento necesario para reducir los efectos de la histéresis, presente en materiales ferromagnéticos, así como las pérdidas por corrientes parásitas; el catalizador permite solidificar la mezcla en un mínimo lapso de tiempo a temperatura ambiente. El material compuesto magnético blando resultante actúa como un material paramagnético que tiene una estructura homogénea, cristalina e isotrópica.

La limitación del material compuesto por hierro y resina reside en los valores de la permeabilidad magnética obtenida. Estos son comparables con el valor de la permeabilidad magnética del aire. Sin embargo, su valor se puede incrementar conforme se agrega un mayor porcentaje del hierro, y su aplicación más interesante es en núcleos magnéticos que trabajen en frecuencias por encima de 1 kHz.



ABSTRACT

This thesis presents a soft magnetic composite with low permeability, characterized for its utilization in the elaboration of magnetic cores for inductors and transformers operating at frequencies above 1 kHz.

The available inductors and transformers that operate at high frequency (higher than 1 kHz) have the following disadvantages: their magnetic cores are made from ceramic and/or metallic materials that are very fragile and break easily. In addition, the manufacturing process of the typical magnetic cores consists of pressure molding treatments, thermal treatments, lamination processes in layers, mechanical crushing by jet mills, treatments of reduced pressure by controlled flow, compaction treatments, to mention the most relevant.

The magnetic cores made with the material composed of iron and resin were shaped with flexible and soft silicone rubber molds. Silicone rubber can reproduce cores of unusual shapes, without requiring high pressures or high temperatures, so it is unnecessary to have sophisticated, expensive and high precision equipment to elaborate the desired magnetic cores.

In addition, the magnetic cores composed of the material presented were done by manual molding through the mixture 100 mesh iron powder, polyester laminated and unsaturated resin and a catalyst agent. Its structural elements base their importance on the following characteristics: iron powder allows to reach important magnetic characteristics; the polymeric resin provides the necessary insulation to reduce the effects of hysteresis, present in ferromagnetic materials, as well as parasitic current losses; the catalyst allows the mixture to solidify in a minimum period of time at room temperature. The resulting soft magnetic composite acts as a paramagnetic material having a homogeneous, crystalline and isotropic structure.

The limitation of the material composed of iron and resin lies in the values of the magnetic permeability obtained. These are comparable with the values of the air's magnetic permeability. However, its value can be increased as a higher percentage of iron is added, and its magnetic characteristics are better when it is applied to magnetic cores working at frequencies above 1 kHz.



CONTENIDO

Lista de figuras y gráficas	i
Lista de tablas	iv
Simbología	vi
Acrónimos y siglas	x
CAPÍTULO 1. ANTEDECENTES Y MARCO TEÓRICO	1
1.1 Introducción	1
1.1.1 Aplicaciones relevantes de los generadores eléctricos	1
1.1.2 La participación de las energías renovables en México	1
1.2 Planteamiento del problema	2
1.2.1 Importancia de las máquinas eléctricas en la industria	2
1.2.2 Material Compuesto Magnético Blando (SMC por sus siglas en inglés)	2
1.2.3 La oportunidad de mejorar el rendimiento de núcleos magnéticos de generadores y/o máquinas eléctricas	3
1.3 Justificación	3
1.3.1 Importancia de la caracterización magnética	4
1.3.2 Tipo de material a caracterizar	4
1.3.3 Selección de materiales necesarios para las muestras de SMC hierro- resina	5
1.3.4 Propiedades magnéticas a medir	8
1.4 Revisión del estado del arte	10
1.4.1 Métodos y técnicas de caracterización magnética	10
1.4.2 Instrumentación	12
1.4.3 Conclusiones del estado del arte	14
1.5 Propuesta de solución	14
1.6 Objetivos	15
1.6.1 Objetivo general	15

1.6.2	Objetivos específicos	15
1.7	Aportaciones, alcance y/o limitaciones	15
CAPÍTULO 2. DESARROLLO DEL PROCESO DE CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL		16
2.1	Gestión de la calidad del proceso de caracterización	16
2.2	Protocolos de pruebas y el diseño de experimentos	17
2.3	La base para la selección de las dimensiones de los núcleos elaborados	18
2.4	Higiene, seguridad y medio ambiente	20
2.5	Equipos y/o materiales utilizados para la elaboración de núcleos magnéticos	22
CAPÍTULO 3. ELABORACIÓN DE NÚCLEOS MAGNÉTICOS		24
3.1	La estructura molecular del compuesto hierro-resina	24
3.2	Elaboración de núcleos con el material SMC hierro - resina	29
3.2.1	Metodología para la elaboración de núcleos con el material compuesto mediante moldeo manual	31
3.2.2	Maquinado, lijado y acabado de las muestras de núcleos magnéticos	31
3.3	Devanado de los núcleos magnéticos elaborados con el material compuesto	32
CAPÍTULO 4. PRUEBAS DE TEMPERATURA		37
4.1	Objetivo y alcance de la prueba	37
4.2	Procedimiento y desarrollo de las pruebas de temperatura	37
4.2.1	Diagrama de flujo	37
4.2.2	Descripción del procedimiento	39
4.2.3	Equipo utilizado	39
4.2.4	Referencias	40
4.2.5	Tipos de permeabilidad magnética: la permeabilidad inicial del material compuesto hierro-resina	40

4.3	Base matemática para realizar las pruebas de temperatura	43
4.3.1	Variables geométricas de los núcleos toroidales construidos	43
4.3.2	Deducción de las variables eléctricas y magnéticas involucradas en las pruebas de temperatura	45
4.4	Resultados gráficos de las pruebas de temperatura	47
4.5	Observaciones	49
4.6	Conclusiones	49
CAPÍTULO 5. PRUEBAS EN BAJA FRECUENCIA		50
5.1	Objetivo y alcance de la prueba	50
5.2	Procedimiento y desarrollo de las pruebas en baja frecuencia	50
5.2.1	Diagrama de flujo	50
5.2.2	Descripción del procedimiento	52
5.2.3	Equipo utilizado	52
5.3	Conexión eléctrica con base en la norma ASTM A772/A772M	53
5.4	Base matemática para realizar las pruebas de magnetización en baja frecuencia a los núcleos	54
5.5	Resultados gráficos de las pruebas en baja frecuencia	58
5.6	Conclusiones	59
CAPÍTULO 6. PRUEBAS EN ALTA FRECUENCIA		60
6.1	Objetivo y alcance de la prueba	60
6.2	Procedimiento y desarrollo de las pruebas en baja frecuencia	60
6.2.1	Diagrama de flujo	60
6.2.2	Descripción del procedimiento	62
6.2.3	Equipo utilizado	62
6.3	Conexión eléctrica en base a la norma ASTM A772/A772M	63

6.4	Base matemática dada por la norma ASTM A772/A772M para caracterizar núcleos magnéticos en alta frecuencia	64
6.5	Diseño del inversor resonante	67
6.6	Etapa de potencia. Inversor resonante medio puente	67
6.7	Etapa de control. Diseño del microcontrolador	69
6.8	Pérdidas por conducción y pérdidas en el núcleo	72
6.9	Resultados gráficos de las pruebas en alta frecuencia	73
6.10	Conclusiones	79
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES		80
7.1	Recapitulación	80
7.2	Conclusiones de las pruebas de temperatura	80
7.3	Conclusiones de las pruebas a baja frecuencia	81
7.4	Conclusiones de las pruebas a alta frecuencia	81
7.5	Conclusiones generales	82
7.6	Trabajos futuros	82
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		83
APÉNDICE A. Hojas de características de los materiales usados para el compuesto		87
APÉNDICE B. Normas empleadas durante el proceso de caracterización del material		90
APÉNDICE C. Protocolos de pruebas		94
APÉNDICE D. Registro de datos obtenidos del material compuesto por hierro y resina		100
APÉNDICE E. Representación gráfica de los resultados obtenidos en las pruebas a alta frecuencia		119

LISTA DE FIGURAS Y GRÁFICAS

Capítulo 1:

Figura 1.1. Tipos de fuentes de energías renovables aceptadas por el SEN.	2
Figura 1.2. Características del material a caracterizar.	3
Figura 1.3. Ciclo de histéresis magnética.	4
Figura 1.4. Comportamiento B-H de un material diamagnético.	5
Figura 1.5. Efecto del contenido Epoxi en las pérdidas en el núcleo [16].	6
Figura 1.6. Factores más importantes en la composición de un SMC hierro-resina.	8
Figura 1.7. Comparación entre los diversos tipos de permeabilidades.	9
Figura 1.8. Métodos y técnicas de caracterización magnética encontradas en la literatura.	10
Figura 1.9. Configuración del método inductivo [35].	11
Figura 1.10. Sensores de campo magnético.	12

Capítulo 2:

Figura 2.1. Factores que influyen un SGC.	16
Figura 2.2. Metodología PHVA según la ISO 9001 (2008).	16
Figura 2.3. Similitud entre el protocolo de pruebas y el diseño de experimentos.	17
Figura 2.4. Representación de las dimensiones de un toroide.	18
Figura 2.5. Representación del contenedor que indica residuos peligrosos.	21
Figura 2.6. Características más importantes de los materiales utilizados respecto a sus medidas de seguridad.	22
Figura 2.7. Equipo utilizado y sus características.	23

Capítulo 3:

Figura 3.1. Clasificación de materiales sólidos termoplásticos.	24
Figura 3.2. Estructuras compactas a) BBC, b) FCC y c) HCP [44].	25
Figura 3.3. Las tres direcciones cristalográficas principales en el plano (110) de un material cúbico [46].	25
Figura 3.4. El prototipado rápido como técnica de elaboración de moldes.	30
Figura 3.5. Molde de silicona de un núcleo de ferrita convencional.	31
Figura 3.6. Molde de silicona para un núcleo toroidal normalizado.	31
Figura 3.7. Metodología sugerida para elaborar los núcleos.	31
Figura 3.8. Inconveniente del vaciado a un molde de silicona de una sola cara.	32
Figura 3.9. Comparación entre el acabado de una pieza maquinada manualmente, y una maquinada en un taller.	32
Figura 3.10. Criterios seguidos para devanar los núcleos elaborados.	33
Figura 3.11. Diferencia entre un enrollamiento holgado y uno apretado [51].	33
Figura 3.12. Comparación entre un devanado uniforme y uno fortuito [51].	34
Figura 3.13. El efecto de piel: (a) la corriente $i(t)$ induce un flujo que a su vez induce corrientes de Foucault; (b) las corrientes parásitas tienden a oponerse a la corriente $i(t)$ en el centro del cable [50].	34
Figura 3.14. Relación del calibre del cable con la frecuencia y la temperatura de trabajo [50].	35

Figura 3.15. Devanados obtenidos en: a) un núcleo toroidal #3, b) un núcleo toroidal #N.	36
--	----

Capítulo 4:

Figura 4.1. Diagrama de flujo para las pruebas de temperatura.	38
Figura 4.2. Aparatos eléctricos: a) La cámara micro climática, b) El medidor de inductancias.	39
Figura 4.3. Ciclo de histéresis de un material ferromagnético que detalla la trayectoria que presentan B y H .	41
Figura 4.4. Pérdidas por desplazamiento de fase: a) en serie, b) en paralelo.	43
Figura 4.5. Cara superior de un núcleo toroidal.	43
Figura 4.6. Sección de un núcleo toroidal que muestra su A_c , lado a , lado b y la h .	44
Figura 4.7. Magnitudes de un ortoedro.	45
Figura 4.8. Dos bobinas conectadas en serie y devanadas sobre un núcleo magnético [52].	45
Figura 4.9. Permeabilidad magnética de núcleos clase N al variar la frecuencia y la temperatura.	48

Capítulo 5:

Figura 5.1. Diagrama de flujo para las pruebas en baja frecuencia.	51
Figura 5.2. Diagrama eléctrico sugerido en la norma ASTM A772/A772M [36] para la caracterización de materiales.	53
Figura 5.3. Diagrama eléctrico de la norma ASTM A772/A772M [36] adaptado a las condiciones de trabajo.	53
Figura 5.4. Diagrama eléctrico.	54
Figura 5.5. Relación eléctrica en transformadores.	56
Figura 5.6. Circuitos eléctricos a) Al despreciar el valor de R_s , b) Resultado de la simplificación a X_{LL} .	57
Figura 5.7. Ruido producido por el voltaje suministrado por la fuente de CA a 50 Hz.	58
Figura 5.8. Formas de onda inducidas a 1 kHz.	59
Figura 5.9. Comportamiento magnético de un núcleo clase N en tono azul, B vs. H .	59

Capítulo 6:

Figura 6.1. Diagrama de flujo para las pruebas en alta frecuencia.	61
Figura 6.2. Diagrama eléctrico de la norma ASTM A772/A772M adaptado para las pruebas en alta frecuencia.	63
Figura 6.3. Formas de onda suministradas al inversor para el caso del núcleo morado, a 600 kHz.	64
Figura 6.4. Acoplamiento magnético entre los devanados de un par de inductores que poseen un núcleo toroidal.	65
Figura 6.5. Topología de un inversor medio puente.	68
Figura 6.6. Inversor resonante medio puente simulado en un software electrónico.	68
Figura 6.7. Conexión que sugiere el integrado IR2110 para un inversor medio puente.	69
Figura 6.8. Circuito esquemático del inversor medio puente.	71
Figura 6.9. Diseño del PCB elaborado para el inversor.	71
Figura 6.10. Circuito inversor utilizado para las pruebas.	72

Figura 6.11. Definición de las pérdidas en el núcleo [54].	72
Gráfica 6.1. Variables $B-H$ en incremento de H para los 9 núcleos clase N, a 200 kHz.	76
Gráfica 6.2. Variables $B-H$ en incremento de H para los 9 núcleos clase N, a 600 kHz.	76
Gráfica 6.3. Variables $B-H$ en incremento de H para los 9 núcleos clase N, a 800 kHz.	77
Gráfica 6.4. Comportamiento de la permeabilidad magnética con respecto a la frecuencia.	77
Gráfica 6.5. Relación entre las pérdidas totales normalizadas vs. densidad de campo magnético para los 9 núcleos clase N, a 200 kHz.	78
Gráfica 6.6. Relación entre las pérdidas totales normalizadas vs. densidad de campo magnético para los 9 núcleos clase N, a 600 kHz.	78
Gráfica 6.7. Relación entre las pérdidas totales normalizadas vs. densidad de campo magnético para los 9 núcleos clase N, a 800 kHz.	79

LISTA DE TABLAS

Capítulo 1:

Tabla 1.1. Algunos de los materiales termoestables que se utilizan para el recubrimiento.	6
Tabla 1.2. Utilización de los SMC desde 1993 hasta 2007.	7
Tabla 1.3. Comparación entre los tipos de materiales con respecto a la susceptibilidad magnética que poseen.	9

Capítulo 2:

Tabla 2.1. Pautas generales para diseñar un experimento.	18
Tabla 2.2. Dimensiones de los toroides estándar.	19
Tabla 2.3. Comparativa entre las dimensiones reales de núcleos de ferrita contra las dimensiones de los elaborados.	19

Capítulo 3:

Tabla 3.1. Clasificación de los núcleos por colores según su porcentaje de hierro.	26
Tabla 3.2. Homogeneidad microscópica de los núcleos por color.	26
Tabla 3.3. Número de vueltas y factor de utilización (ku) con el correspondiente calibre de alambre seleccionado.	35

Capítulo 4:

Tabla 4.1. Descripción del procedimiento que se realizó en la cámara micro climática.	39
Tabla 4.2. Clasificación de los núcleos según sus dimensiones.	40
Tabla 4.3. Clasificación de los núcleos según sus colores.	40
Tabla 4.4. Especificaciones para las pruebas de temperatura.	47
Tabla 4.5. Permeabilidad inicial y factor de acoplamiento de los núcleos clase N.	48

Capítulo 5:

Tabla 5.1. Descripción del procedimiento que se realizó en el proceso de magnetización del toroide.	52
Tabla 5.2. Especificaciones para las pruebas en baja frecuencia.	58

Capítulo 6:

Tabla 6.1. Descripción del procedimiento que se realizó en el proceso de magnetización del toroide.	62
Tabla 6.2. Valores calculados para los capacitores empleados en cada frecuencia.	69

Tabla 6.3. Especificaciones de las pruebas en alta frecuencia.	73
Tabla 6.4 Máximas variables de B y H obtenidas de diversos núcleos para cada frecuencia de trabajo.	74
Tabla 6.5. Variables B, H y μ_r del núcleo con 48.7 % Fe, en cada f, y V_{cd} en un rango de 5 a 140 (V).	75
.	

SIMBOLOGÍA

Área de sección transversal del núcleo	A_c
Densidad de flujo magnético	B
Densidad de flujo magnético máximo	$B_{m\acute{a}x}$
Densidad de flujo de saturación	B_s
Densidad de flujo remanente	B_r
Capacitor resonante	C_1
Capacitor a	C_a
Capacitor b	C_b
Capacitor de Bootstrap	C_B
Capacitor del divisor de tensión capacitiva	C_L
Diodo 1	D_1
Diodo 2	D_2
Diámetro exterior del toroide	D_e
Diámetro interior del toroide	D_i
Tensión eficaz en el devanado secundario	E_f
Tensión pico en el devanado secundario	E_p
Frecuencia de la corriente introducida al primario	f
Símbolo químico del hierro	Fe
Longitud del espacio de aire	G
Intensidad de campo magnético	H
Altura	h
Coercitividad	H_z
Corriente	I
Corriente instantánea	$i(t)$
Longitud efectiva del circuito magnético	l_e

Corriente a la entrada	I_{ent}
Corriente eficaz en el inductor L1	I_{L1}
Corriente de fuga del IR2110	I_{LK}
Corriente de fuga del MOSFET	I_{LKCAP}
Corriente de fuga en el diodo de Bootstrap	$I_{LKDIODE}$
Corriente de fuga del capacitor de Bootstrap	I_{LKGS}
Corriente en el inductor máxima	$I_{Lmáx}$
Corriente en el devanado primario	I_p
Corriente instantánea en el primario	$i_p(t)$
Corriente pico o máxima en el devanado primario	I_{pmax}
Corriente RMS medida en el devanado primario	I_{pRMS}
Corriente inactiva del IR2110	I_{QBS}
Factor de utilización del núcleo magnético	ku
Factor de acoplamiento magnético	K_y
Inductancia	L
Inductancia en el devanado primario	L_1
Inductancia en el devanado secundario	L_2
Longitud media de la trayectoria magnética	lm
Inductancia mínima del devanado primario	L_{min}
Inductancia total de la conexión serie aditiva del devanado primario y el secundario	L_{total}
Inductancia mutua	M
Masa	m
Número de vueltas en el devanado primario	n_1
Número de vueltas en el devanado secundario	n_2
Porcentaje de hierro con respecto a la masa total	p_2
Pérdidas por conducción o pérdidas en el cobre	P_{cu}
Potencia en el inductor	P_L
Máxima potencia disipada por el devanado primario	P_{L1}

Pérdidas en el núcleo	P_{nu}
Potencia promedio total	P_{prom}
Carga de compuerta total del MOSFET	Q_{gate}
Carga requerida por el cambio interno de nivel	Q_{LS}
Resistencia por conducción en el MOSFET	R_{DSon}
Reóstato limitador de corriente	R_e
Resistencia serie en el devanado primario	R_p
Resistencia serie en el secundario de un inductor	R_s
Resistencia obtenida de la suma de R_s y R_e	R_{se}
Temperatura, K	T
Interruptor 1	T1
Interruptor 2	T2
Máximo tiempo de encendido del MOSFET de baja señal	t_{ON}
Tensión	V
Tensión de corriente continua	V_{cd}
Tensión de referencia digital del “1” lógico para el IR2110	V_{DD}
Tensión de entrada del lado del devanado primario	V_{ent}
Tensión de conducción del diodo de Bootstrap	V_f
Tensión compuerta-fuente del MOSFET	V_{GS}
Tensión compuerta-fuente mínimo del MOSFET	V_{GSmin}
Volumen	V
Tensión entre las terminales del devanado primario	V_p
Tensión en el inducido en el devanado secundario	V_s
Tensión instantánea en el devanado secundario	$V_s(t)$
Tensión medida en el devanado secundario	V_{sal}
Ancho del toroide	w
Reactancia inductiva	X_L

Reactancia inductiva del inductor L_l	X_{Ll}
Impedancia	Z
Profundidad de penetración o efecto piel	δ
Densidad de un material	δ_m
Caída de tensión en el capacitor de Bootstrap	ΔV_{BOOT}
Relación efectiva de vueltas	η_e
Constante de la permeabilidad magnética en el vacío	μ_0
Permeabilidad de amplitud	μ_a
Permeabilidad de materiales diamagnéticos	μ_d
Permeabilidad efectiva	μ_e
Permeabilidad de materiales ferromagnéticos	μ_f
Permeabilidad inicial relativa	μ_i
Permeabilidad de materiales paramagnéticos	μ_p
Permeabilidad magnética relativa de un material	μ_r
Permeabilidad reversible	μ_{rev}
Permeabilidad magnética absoluta de un material	μ_z
Permeabilidad incremental	μ_{Δ}
Susceptibilidad de campo magnético	χ
Frecuencia angular de la corriente suministrada	ω
Espesor del toroide	\emptyset

ACRÓNIMOS Y SIGLAS

Siglas en inglés para la <i>American Society of Testing Materials</i> , que significa Asociación Americana de Ensayo de Materiales	ASTM
Siglas en inglés de una estructura <i>Body Centered Cubic</i> , que significa Cúbica Centrada en el Cuerpo	BCC
Corriente Alterna	CA
Corriente Directa	CD
Tipo de sensores con Emisión Acústica	EA
Emisión Magneto-Acústica	EMA
Ensayos No Destructivos	END
Siglas en inglés de una estructura <i>Face Centered Cubic</i> , que significa Cúbica Centrada en las Caras	FCC
Siglas en inglés de una estructura <i>Hexagonal Close Packed</i> , que significa Hexagonal Compactada	HCP
Del inglés <i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i> , que significa Transistor Bipolar de Puerta Aislada	IGBT
Del inglés <i>International Organization for Standardization</i> , que significa Organización Internacional para la Estandarización	ISO
Circuito o rama de un circuito que contiene un Inductor, un Capacitor y una Resistencia	LCR
Del inglés <i>Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor</i> , que significa Transistor de Efecto de Campo Metal-Óxido-Semiconductor	MOSFET
Del inglés <i>Magnetic Resonance Imaging</i> , que significa Imagen de Resonancia Magnética	MRI
Norma Oficial Mexicana	NOM
Sólido que posee un Orden de Largo Alcance	OLA
Del inglés <i>Printed Circuit Board</i> , que significa Placa de Circuito Impreso	PCB
Metodología que consiste en Planear, Hacer, Verificar y Actuar	PHVA
Ruido Barkhausen	RB
Del inglés <i>Root Mean Square</i> , que significa Valor Cuadrático Medio	RMS

Prototipado Rápido	PR
Tecnologías de Herramientas Rápidas	TR
Sistema de Gestión de la Calidad	SGC
Secretaría de Energía Nacional	SEN
Sistema Integral de Medición	SIM
Siglas en inglés de un material, <i>Soft Magnetic Composites</i> , que significa Material Compuesto Magnético Blando	SMC
Del inglés <i>Switched Reluctance Motor</i> , que significa Máquina de Reluctancia Conmutada	SMR
Del inglés <i>Superconducting Quantum Interference Devices</i> , que significa Dispositivo Superconductor de Interferencia Cuántica	SQUID
Secretaría del Trabajo y Previsión Social	STPS

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO

1.1 Introducción

El tema de este proyecto surgió de una investigación anterior [1], en la cual se desarrolló una metodología para optimizar la eficiencia de un generador radial de imanes permanentes, basándose en la importancia de las condiciones geométricas del generador, y en particular, de su estator. Es conocido que, a partir de los devanados de un generador eléctrico se obtienen determinadas formas de onda de salida que representan la tensión, por ello, la principal desventaja en la fabricación de generadores radica en el diseño del estator, puesto que es el responsable del campo magnético generado. Sin embargo, los generadores poseen núcleos magnéticos con formas estandarizadas, cuyas características magnéticas dependen de los materiales de fabricación.

La idea de desarrollar un nuevo material convino a la necesidad de fabricar un núcleo magnético a partir de un material capaz de moldearse a la forma del estator, y que además tuviera las propiedades magnéticas necesarias para mejorar la eficiencia del núcleo y, por ende, lograr la optimización del diseño del generador. Pero, en los inicios del material [1] no se profundizó en el estudio de sus propiedades magnéticas ni mecánicas, y solamente se empleó artesanalmente para construir un generador radial de imanes permanentes.

1.1.1 Aplicaciones relevantes de los generadores eléctricos

En la actualidad, los generadores eléctricos se emplean en diversidad de aplicaciones, siendo la más relevante, en el sector energético. Son de vital importancia para transformar la energía mecánica, proveniente de las fuentes de energía renovables aceptadas por el Sistema Eléctrico Nacional, a la energía eléctrica que se distribuye hacia diversos sectores.

Las energías renovables son un tema prioritario en asuntos energéticos, tanto de países industrializados como de las economías en desarrollo, gracias a sus efectos positivos en las esferas ambiental, económica y social. Son precursoras del desarrollo y comercialización de nuevas tecnologías, de la creación de empleo, de la conservación de recursos energéticos no renovables, de la reducción de la dependencia de energéticos importados mediante el aprovechamiento energético de recursos locales, de la reducción de gases de efecto invernadero, así como de partículas que pueden dañar el ambiente y la salud pública.

1.1.2 La participación de las energías renovables en México

En México, el aumento de participación de las energías renovables en la matriz del sector energético pasó a los hechos, gracias a la Reforma Energética, con la implementación y el financiamiento de múltiples proyectos [2] y, de acuerdo con la Secretaría de Energía Nacional (SEN), las fuentes de energías renovables aceptadas en nuestro país para la generación de energía eléctrica son las mostradas en la figura 1.1.

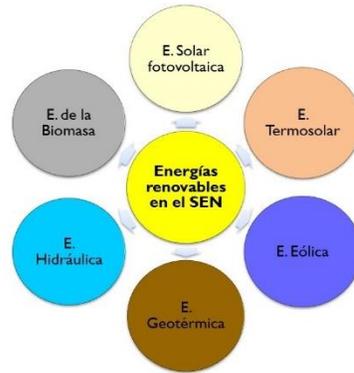


Figura 1.1. Tipos de fuentes de energías renovables aceptadas por el SEN.

Todas ellas se sustentan en el aprovechamiento de recursos naturales como el calor del sol (termosolar); el viento (eólica); el calor de la tierra (geotérmica); el movimiento de las olas o las energías cinéticas y potencial de las corrientes de agua (hidráulica); procesos biológicos (biomasa) y la radiación solar (fotovoltaica) [3].

1.2 Planteamiento del problema

De acuerdo al antecedente de este proyecto [1], se retoma la problemática que consiste en el diseño y construcción de máquinas eléctricas, específicamente, de inductores y transformadores. El punto es elaborar una práctica metodología de elaboración de núcleos magnéticos toroidales de diversas magnitudes geométricas que sustente la manufactura de inductores y transformadores. De esta forma, se presenta la simplificación de la manufactura de máquinas eléctricas como una dependencia del proceso a seguir y los materiales a emplear, para evitar la necesidad de equipo de gran precisión o de maquinaria inaccesible.

1.2.1 Importancia de las máquinas eléctricas en la industria

En la industria se garantiza que generar electricidad moviendo un imán permanente por una bobina de alambres, tanto la tecnología de generación eléctrica más antigua, como la mejor opción en nuestros días para lograr un alto nivel de eficiencia al convertir las energías renovables y los combustibles fósiles en electricidad [4, 5].

La dicotomía se basa en la simplicidad y la complejidad simultáneas de la física involucrada [6]; puesto que, los generadores de imanes permanentes se clasifican dentro de los generadores síncronos, los cuales se caracterizan por tener la misma velocidad angular en el campo magnético generado por el rotor y el estator, a diferencia de los generadores asíncronos. Por su parte, los generadores de imanes permanentes se clasifican de acuerdo a la dirección del campo magnético generado con respecto al eje de giro; puede ser radial (perpendicular), axial (paralela) o esférica.

1.2.2 Material Compuesto Magnético Blando (SMC por sus siglas en inglés)

La literatura [7] aportó las siglas de un material para describir compuestos similares al compuesto en desarrollo para esta investigación: SMC (En inglés, *Soft Magnetic composite*, que significa Compuesto Magnético Blando). El material compuesto a caracterizar es un SMC conformado por polvo de hierro y resina. Dicho material cumple con las características señaladas en la Figura 1.2.

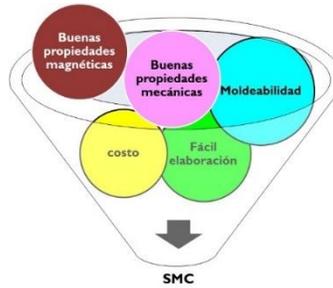


Figura 1.2. Características del material a caracterizar.

1.2.3 La oportunidad de mejorar el rendimiento de núcleos magnéticos de generadores y/o máquinas eléctricas

En el origen del material compuesto por hierro y resina [1] no se menciona, específicamente, su introducción. Tampoco se encuentra publicada su utilización en ninguna sección sobre materiales para fabricar núcleos magnéticos.

Con base en todo lo anterior, la problemática principal consiste en:

- El análisis de las propiedades magnéticas de un material compuesto a base de resina de poliéster con inclusiones de limadura de hierro, que simplifique el proceso de manufactura de máquinas eléctricas, específicamente, la elaboración de núcleos magnéticos de inductores y transformadores.

De esta forma, se presenta una nueva oportunidad de mejorar el proceso de manufactura de máquinas eléctricas [8] para sus núcleos magnéticos a partir del SMC hierro- resina, cuya peculiaridad es que se compone por resinas poliméricas que se aglutinan en líquido y se moldean a la forma de un núcleo hasta que se catalizan o solidifican, y polvo de hierro que se distingue como un material ferromagnético que permite adoptar importantes propiedades magnéticas.

1.3 Justificación

La caracterización de las propiedades magnéticas de un SMC hierro- resina permitirá constituir un protocolo de caracterización basado en una norma válida actualmente, y permitirá conocer el desempeño del material ante diversas variaciones de tensión y frecuencia, a partir del cálculo de sus propiedades magnéticas más importantes.

De esta forma se presenta un nuevo material magnético de hierro- resina con propiedades mecánicas únicas (moldeabilidad, dureza, elasticidad) para su uso o aplicación en la elaboración de núcleos magnéticos de máquinas eléctricas. Se realizarán experimentos empleando el material en inductores y transformadores.

El análisis del nuevo material magnético pretende colaborar en la simplificación del proceso de manufactura de máquinas eléctricas al ser de fácil elaboración y utilización en los núcleos magnéticos de los estatores de dichas máquinas.

La presente investigación se realiza como una continuación de un trabajo anterior, en el cual se dejó la oportunidad de profundizar en la naturaleza de un material compuesto a base de resina y polvo de hierro ante la problemática de manufactura y diseño de un generador radial de imanes permanentes.

1.3.1 Importancia de la caracterización magnética

Una caracterización magnética es capaz de poner de manifiesto la existencia de impurezas o incluso la formación de fases indeseadas que se hubieran podido originar durante las diversas etapas del ciclo de producción de un material. En este sentido, posee la capacidad de determinar aquellas rutas de síntesis más convenientes para el diseño de materiales específicos al objetivo [9].

En la actualidad, la electrónica e informática han contribuido sobremanera a incrementar la sensibilidad, precisión y exactitud de los instrumentos de medición magnética, a lograr un alto nivel de automatización y a facilitar la consulta de extensas bases de datos. Todo ello ha permitido poner al alcance de la ciencia y la tecnología poderosas y selectivas herramientas capaces de resolver los problemas que se presentan durante el análisis y la caracterización [10].

También se ha supuesto la aparición de nuevas técnicas que han propiciado un extraordinario avance en el conocimiento de las características de los materiales, pero al mismo tiempo ha complicado el manejo del propio instrumento y la posibilidad de tenerlo al alcance de nuestras manos [11].

La determinación de las características magnéticas es un punto clave para la optimización del diseño y/o la evaluación de la estrategia de control en una máquina [12]. Por ello, después del impacto electrónico, particularmente la producción de circuitos integrados y microordenadores, la instrumentación para mediciones magnéticas ha mejorado dramáticamente. Los avances han incluido incrementos en sensibilidad, velocidad de medición, portabilidad, disponibilidad y simplicidad de operación [13].

1.3.2 Tipo de material a caracterizar

Los diversos avances electrónicos en la instrumentación han sido fundamentales para el reciente aumento en el ámbito de aplicación de las investigaciones magnéticas a proyectos ambientales y especialmente al uso de mediciones magnéticas como una herramienta preliminar de reconfiguración en el curso de las regulaciones. Pero, para poder llevar a cabo las mediciones magnéticas de un material, se debe tener conocimiento del tipo de componente a estudiar [6].

En un material ferromagnético los átomos se agrupan en zonas denominadas “dominios magnéticos”. En cada uno de estos dominios (con dimensiones del orden de los μm) se tiene un determinado sentido de magnetización neta. La superficie que encierra esta zona se denomina “pared del dominio magnético”. Si pudiera verse con gran aumento la curva del lazo de histéresis para un material ferromagnético, se comprobaría que lo que aparece como una línea continua, en realidad está compuesta de pequeños incrementos discretos; éstos corresponden al movimiento repentino de las paredes de los dominios magnéticos, como se muestra en la Figura 1.3. Al magnetizar un material ferromagnético, se logra una determinada dirección de magnetización privilegiada, haciendo que el dominio magnético apropiado sea cada vez más grande, moviéndose sus paredes. Como consecuencia, también se producen cambios en el volumen de los dominios magnéticos (magnetoestricción), lo que produce súbitas ondas elásticas Emisión Magneto-Acústica (EMA) que se propagan en el material. Con sensores de Emisión Acústica (EA) colocados sobre la superficie de la muestra, se detectan estas ondas [14].

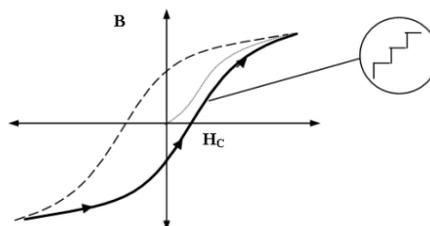


Figura 1.3. Ciclo de histéresis magnética.

El movimiento de las paredes de los dominios magnéticos, está fuertemente influenciado por la microestructura del material: el borde de grano, las inclusiones, los átomos precipitados, etc., haciendo que frente a alguno de ellos se produzca un freno al movimiento de las paredes. Por lo dicho queda claro que la respuesta de un material ferromagnético a un campo magnético es en el nivel atómico y depende de sus características microestructurales. En presencia de un campo magnético que aumenta lentamente, el movimiento de las paredes de los dominios, puede ser monitoreado adecuadamente con métodos inductivos, ópticos o acústicos, detectándose así los saltos discretos [15].

Los materiales ferromagnéticos, compuestos de hierro y sus aleaciones con cobalto, tungsteno, níquel, aluminio y otros metales, son los materiales magnéticos más comunes y se utilizan para el diseño y constitución de núcleos de los transformadores y máquinas eléctricas. En un transformador se usan para maximizar el acoplamiento entre los devanados, así como para disminuir la corriente de excitación necesaria para la operación del transformador. En las máquinas eléctricas se usan los materiales ferromagnéticos para dar forma a los campos, de modo que se logren hacer máximas las características de producción de par. Sin embargo, los materiales ferromagnéticos tienen la desventaja de que, en un núcleo magnético, el ciclo de histéresis refleja las pérdidas que se tienen en el material. El área cerrada es una medida de la energía perdida en el material del núcleo durante ese ciclo.

Pese a lo anterior, se optó por otro tipo de material, el paramagnético, que posee características magnéticas inferiores, pero beneficia en las pérdidas por histéresis.

En la Figura 1.4, se puede observar el comportamiento de un material paramagnético, donde la relación $B-H$ es lineal; el aumento de H aumenta B y, por lo tanto, el flujo en la bobina, y, de esta manera, se pueden producir campos muy grandes con grandes corrientes. La linealidad de la relación $B-H$ representa la principal ventaja de las bobinas de núcleo de aire.

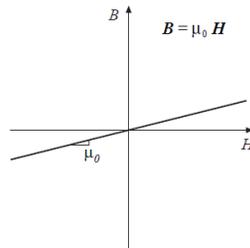


Figura 1.4. Comportamiento $B-H$ de un material diamagnético.

En resumen, se tuvo la necesidad de elaborar núcleos magnéticos compuestos por hierro y resina, cuyas propiedades magnéticas sean similares a las de los materiales paramagnéticos.

1.3.3 Selección de materiales necesarios para las muestras de SMC hierro- resina

- *Aislante o resina polimérica a utilizar*

Para proporcionar la permeabilidad magnética máxima, la cantidad de aislamiento entre partículas debe reducirse al mínimo y maximizar el contenido de hierro. El efecto del contenido epoxi en las pérdidas en el núcleo se muestra en la Figura 1.5. Es evidente que un alto contenido de epoxi $> 6,5 \%$ no es benéfico a frecuencias más altas. Los núcleos hechos de partículas de hierro unidos a polímeros deberían tener un contenido de polímero tan bajo como sea posible ya que, desgraciadamente, éstos tienden a reducir la fuerza física del núcleo.

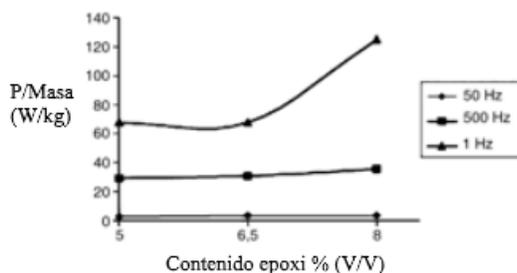


Figura 1.5. Efecto del contenido Epoxi en las pérdidas en el núcleo [16].

Los polímeros más comunes que logran sobrevivir en ambientes hostiles no tienen la característica de capacidad de procesamiento para recubrir completamente las partículas, o una alta densidad para moldear fácilmente los núcleos con las propiedades físicas y magnéticas deseadas. De hecho, la mayoría de los polímeros afines a ambientes hostiles son termoestables porque, después de haber sido solidificados, no pueden ser disueltos sobre las partículas de hierro transformadas por compresión o inyección de moldeo. Por otro lado, la mayoría de los termoplásticos pueden ser moldeables, a la vez que son capaces de resistir el entorno hostil, pero no son prácticos al recubrir uniforme y continuamente sobre las pequeñas partículas de hierro, principalmente debido a que son esencialmente insolubles en disolventes industrialmente aceptables (por ejemplo, los termoplásticos cristalinos) y tienen una viscosidad demasiado alta de fusión para el llenado apropiado de la matriz de conformación durante el moldeo [16].

La selección de un material termoestable en lugar de un termoplástico se hace para minimizar el efecto de las variaciones de temperatura sobre las propiedades magnéticas y mecánicas de los materiales compuestos. Hay muchas ventajas que hacen que la elección de la aplicación de revestimientos en polvo termoendurecible sea tan atractivo para las empresas de recubrimiento. Estos son:

1. El polvo de hierro está inmediatamente listo para el uso;
2. Menos residuos de polvo de hierro durante el proceso de aplicación;
3. Reducción de riesgos para la salud en caso de exposición de los operadores;
4. Menores costes de inversión de capital.

Algunos de los materiales termoestables que se utilizan para el recubrimiento se enumeran en la Tabla 1.1 [17]:

Tabla 1.1. Algunos de los materiales termoestables que se utilizan para el recubrimiento.

Nombre	Descripciones
Polvos epoxi	Por alto brillo y recubrimientos lisos con una excelente adhesión, flexibilidad y dureza, el disolvente y resistencia química.
Polvos acrílicos	Ampliamente utilizado en los revestimientos de superficie, con buena retención de brillo y color en la exposición exterior, el calor y resistencia a los álcalis
Polvos de poliéster	Rendimiento general entre polvos epoxídicos y acrílicos, excelente durabilidad, alta resistencia al amarillamiento bajo luz ultravioleta.
Polvos híbridos epoxi-poliéster	Polvos epoxídicos que contienen un alto porcentaje de resina de poliéster especial (a veces superior al 50%) con resistencia al amarillamiento por baja cocción y resistencia a la intemperie, es la columna vertebral principal de la industria en recubrimiento en polvo.
Polvos de poliuretano	Buenos en todos los aspectos de propiedades físicas y químicas, buena durabilidad exterior.

*Nota: Se seleccionó el tipo poliéster.

Una de las razones por las que se sugiere el uso de resina de poliéster en lugar de la epóxica desde hace varios años como en la actualidad, es que ésta posee mejores propiedades mecánicas [18]. Además, químicamente, las resinas de poliéster son resinas insaturadas formadas por la reacción de dibásicos de ácidos orgánicos y alcoholes polihídricos; son del tipo orto-ftálicos porque parten de anhídrido orto-ftálico. Lo anterior, permite que las resinas de poliéster presenten buenas propiedades (como buen aislamiento eléctrico, rigidez, poco peso, entre otras) y que sean accesibles económicamente.

Para la elaboración de los núcleos magnéticos desarrollados en este trabajo, se empleó la resina de poliéster de una marca altamente reconocida en el mercado como comercializadora de resinas. Dicho fabricante de resinas de poliéster recomienda que, por cada 100 gramos de resina se agregue 1.5% de catalizador (endurecedor) y mezclar alrededor de 14 a 20 minutos antes de llegar a la solidificación. Para lograr por completo la solidificación de la resina o curado, se recomienda esperar de 30 a 40 minutos a una temperatura de 25° C y baja humedad en el ambiente, como se suele tener en la ciudad de Cuernavaca. En el Apéndice A.1 se tiene la hoja de características de dicha resina, de la cual se pueden comparar sus características más importantes como lo son su máxima temperatura de distorsión por calor, la relación resina-catalizador, el tiempo de curado, la temperatura y en el ambiente con otros fabricantes de resinas de poliéster.

➤ *Polvo de hierro*

El tamaño del grano del polvo de hierro es una consideración muy importante, ya que especifica el rango de frecuencias a la cual se trabajará. Para nano o mili-granos las frecuencias que se pueden manejar son amplias (>1 MHz), pero para granos mayores las frecuencias de trabajo son por debajo de 1 MHz [19]. En este trabajo se seleccionó el hierro en polvo malla 100 reducido por hidrógeno. El tamaño de este polvo de hierro se midió con un vernier, y la lectura de su grano fue de, aproximadamente, 50 micrómetros (Véase el Apéndice A.2 para mayor información acerca del polvo de hierro seleccionado en este trabajo).

En la Tabla 1.2 se dan a conocer las aplicaciones más importantes de los materiales SMC, en el período desde 1993 hasta 2007:

Tabla 1.2. Utilización de los SMC desde 1993 hasta 2007.

Año	Ref.	Caracterización	Parámetros medidos	Aplicación
1993	[4]			Transformadores de audio.
1996	[20]		Susceptibilidad.	
1999	[21]		Permeabilidad, densidad magnética, coercitividad.	Transformadores, inductancias, transductores.
2002	[5]	Tratamientos térmicos y prensado.	Señales de ruido Barkhausen.	
2003	[8]			Máquinas eléctricas.
2005	[22]		Permeabilidad, resistividad eléctrica, pérdidas.	Convertidores eléctricos, motores de baja potencia.
2005	[23]			Motores eléctricos.
2005	[24-26]		Campos magnéticos 3D, flujo magnético 3D.	Máquinas de flujo transversal.
2006	[27]			Motores síncronos.
2006	[16, 17, 19]	Métodos de compactación en frío y caliente.	Inducción magnética, densidad y pérdidas en el núcleo.	

En apoyo a lo anterior, una referencia literaria más [28] concluye que, cuánto más pequeño sea el tamaño del grano del hierro de un SMC hierro- resina puede emplearse para aplicaciones de alta frecuencia, en tanto que la resina actúa como recubrimiento aislante que aísla los granos milimétricos de hierro; la distancia entre ellos es muy pequeña por lo cual disminuye las corrientes parásitas y, con ello, las pérdidas. En la Figura 1.6 se aprecia la combinación relativa entre la resina (aislante) y los granos del polvo de hierro, así como los factores que se involucran en dicha conformación.



Figura 1.6. Factores más importantes en la composición de un SMC hierro-resina.

1.3.4 Propiedades magnéticas a medir

Dos características clave de un componente de núcleo de hierro son sus características de permeabilidad magnética y de pérdidas en el núcleo. Las características magnéticas, eléctricas y mecánicas dependen de la preparación y procesamiento de los componentes. Además, la pureza de los materiales, la forma y el tamaño de las partículas influyen en la respuesta magnética general.

Existen dos tipos básicos de materiales magnéticos blandos. Estos, se utilizan ampliamente, dependiendo de la aplicación y sus requisitos, como se tiene a continuación:

1. Materiales ferrimagnéticos, que se basan en óxidos cerámicos de algunos metales, tales como ferritas, y son aplicables a las frecuencias desde unos pocos kHz a más de 80 MHz.
2. Los materiales ferromagnéticos sobre la base de hierro y níquel, que son para aplicaciones de frecuencia más baja, $< 2\text{ kHz}$, constan de aleaciones a base de hierro que tienen baja permeabilidad para aplicaciones de frecuencia media en máquinas eléctricas. Los SMC suelen ser materiales ferromagnéticos que han mejorado significativamente las propiedades de alta frecuencia, siendo una alternativa viable a las laminaciones de acero ante una gama de nuevas aplicaciones, tales como la maquinaria de rotación, los sensores y solenoides de conmutación rápida.

Las propiedades únicas de los materiales compuestos magnéticos blandos incluyen isotropía magnética y térmica, pérdidas muy bajas de corriente y, relativamente, baja pérdida total del núcleo a altas frecuencias, de alta permeabilidad magnética, de alta magnetización remanente, de alta resistividad, la reducción en el tamaño y peso, la gran anisotropía constante, la baja coercitividad y la alta temperatura de Curie [29]. Algunas de las propiedades magnéticas más importantes de los SMC son [28]:

- *Susceptibilidad magnética (χ)*. Es la razón entre la magnetización inducida en el material o polarización magnética, y la intensidad de campo magnético H a la cual está sujeto dicho material (medida de la facilidad que presenta un material que ha de ser magnetizado por un campo magnético H dado). En la Tabla 1.3, se muestran los tipos de materiales respecto a la típica susceptibilidad que son capaces de poseer.

Tabla 1.3. Comparación entre los tipos de materiales con respecto a la susceptibilidad magnética que poseen.

Tipo de material	Susceptibilidad (χ)
Diamagnéticos	$\chi < 0$
Paramagnéticos	$\chi > 0$
Ferromagnéticos	$\chi \rightarrow \infty$

- *Permeabilidad magnética (μ_z)*. Indica con qué facilidad atraviesa el campo magnético la materia, es decir, si ésta es buena conductora o no del campo magnético. En la Figura 1.7 se muestra una comparación simple entre los diversos tipos de permeabilidades: ferromagnéticos (μ_f), paramagnéticos (μ_p), diamagnéticos (μ_d) y el vacío (μ_0), con respecto a la permeabilidad magnética que poseen. Como se observa, en el caso de los materiales paramagnéticos y diamagnéticos, se compara con la permeabilidad magnética en el vacío (μ_0); ésta es una constante magnética que equivale a $4\pi \times 10^{-7} \text{ A} / \text{m}$.

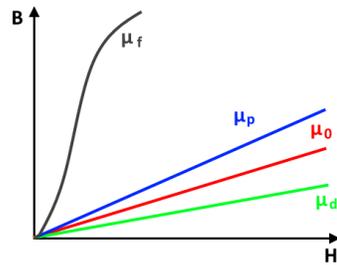


Figura 1.7. Comparación entre los diversos tipos de permeabilidades.

Para comparar entre sí los materiales, se entiende la permeabilidad magnética absoluta (μ_z) como el producto entre la permeabilidad magnética relativa (μ_r) y la permeabilidad magnética de vacío (μ_0). La Ecuación 1.1 representa lo anterior:

$$\mu_z = \mu_r * \mu_0 \quad (1.1)$$

A grandes rasgos, los materiales se pueden clasificar según su permeabilidad magnética relativa en:

- Ferromagnéticos, cuyo valor de permeabilidad magnética relativa es muy superior a 1.
 - Paramagnéticos o no magnéticos, cuya permeabilidad relativa es aproximadamente 1 (se comportan como el vacío).
 - Diamagnéticos, de permeabilidad magnética relativa inferior a 1.
- *Intensidad de campo magnético (H)*. Es la influencia que ejerce la corriente externa en la creación del campo magnético del material, independientemente de la respuesta magnética del material.
 - *Densidad de campo magnético (B)*. Corresponde al número de líneas de fuerza magnética que atraviesan perpendicularmente un área o región del campo magnético [30].

1.4 Revisión del estado del arte

1.4.1 Métodos y técnicas de caracterización magnética

La Figura 1.8 muestra los más relevantes métodos y técnicas encontrados en la literatura, que permiten caracterizar magnéticamente a los materiales ferromagnéticos. Más adelante se describe a cada uno de ellos.



Figura 1.8. Métodos y técnicas de caracterización magnética encontradas en la literatura.

➤ *Método del fluxímetro*

Este método se basa en la ley de inducción. El cambio de flujo en una bobina de medición inducirá una tensión a través de los terminales de la bobina. Es el más antiguo de los métodos utilizados actualmente para las mediciones magnéticas, pero puede ser muy preciso. Hoy en día se ha convertido en el método de medición más importante para los imanes aceleradores de partículas. Es también el método más preciso para determinar la dirección de las líneas de flujo magnético, esto es de particular importancia en los imanes aceleradores. La geometría de la bobina se elige a menudo para adaptarse a una medida particular, puesto que tiene el inconveniente de dar datos aproximados y suelen aparecer fugas de flujo por la forma del material [31].

➤ *Método del efecto Hall*

Una tira de metal muy delgada sumergida en un campo magnético transversal, que lleva una corriente desarrolla una tensión mutuamente perpendicular a la corriente y al campo que se oponen a la fuerza de Lorentz sobre los electrones. En 1910 se realizaron las primeras mediciones magnéticas utilizando este efecto [32]. Sin embargo, alrededor de 1950 se desarrollaron materiales semiconductores adecuados y desde entonces el método se ha utilizado ampliamente como sensores de efecto Hall o magnetómetros para realizar mediciones magnéticas. Además, se ha demostrado que este tipo de método por uso de magnetómetros de efecto Hall no es lineal en todo su intervalo de medición, y muestra más fuentes de error que los anteriores métodos por ser sumamente sensible a la temperatura.

➤ *Método de resonancia magnética (para medir susceptibilidad)*

Se conocen tres técnicas básicas de medición. La primera fue descrita por Wang [6], que caracterizó un método de medición de susceptibilidad de MRI (Del inglés Magnetic Resonance Imaging, que significa Imagen de Resonancia Magnética), que es una técnica usada en radiología para formar imágenes de la anatomía y los procesos fisiológicos del cuerpo que utiliza una discontinuidad de frecuencia resonante en la interfaz entre dos materiales, cada uno de los cuales tiene una señal MRI observable. La diferencia de susceptibilidad entre los dos materiales puede obtenerse utilizando los datos adquiridos desde la vecindad de la interfaz sin conocer todos los detalles de la geometría de una muestra. El segundo método de medición de susceptibilidad magnética en muestras asume una distribución de susceptibilidad uniforme y además requiere una forma geométrica definida. Sin embargo, la inversión es computacionalmente intensiva y ningún trabajo experimental que aplique

esta técnica ha sido publicado hasta la fecha. Otra desventaja de este método consiste en la necesidad de tener un número suficientemente grande de puntos medidos. El tercero es usar resonancia magnética 2D [32].

➤ *Técnicas del ruido Barkhausen (RB) y la EMA*

A efectos de aplicar un campo magnético controlado y medir las señales de RB (Ruido Barkhausen) y EMA (Emisión Magneto-Acústica) se construyeron diferentes dispositivos tales como un yugo magnético, una fuente de corriente de baja frecuencia, un amplificador y filtro de frecuencias y varios sensores de RB. Para esto se desarrolló un Sistema Integral de Medición (SIM) como una valiosa herramienta de Ensayos No Destructivos (END) para materiales ferromagnéticos, siempre que el sistema se calibre previamente con una muestra patrón. La EMA se midió con un sensor piezoeléctrico de banda ancha (100 a 1000 (kHz)), AE65 modelo WD [33, 34].

➤ *Método indirecto de obtención del enlace de flujo.*

Método para obtener las características magnéticas de una SMR (Del inglés *Switched Reluctance Motor*, que significa Máquina de Reluctancia Conmutada) 8/6. Dicho método describe un procedimiento experimental mejorado, simple y rentable y un igualmente simple procesamiento de datos post-experimental para obtener las curvas de flujo de vinculación corrientes a la variación de posición del rotor de la SRM. Aunque no se podría trabajar con una SRM porque ésta no opera directamente con una fuente CA o CD para realizar el propósito principal de este proyecto, este método nos fue acercando a técnicas más sencillas puesto que, para obtener las curvas de saturación magnética de la máquina únicamente mide la tensión que aparece a través del bobinado de la SRM, así como la corriente que fluye a través del arrollamiento comenzando desde 0 hasta que la SRM alcanza un valor de estado estacionario más alto que la corriente de carga completa [12, 14].

Estos métodos de caracterización magnética requieren maquinaria o instrumentos no accesibles para los diseñadores tecnológicos en desarrollo. Por lo anterior, basar este proyecto en alguno de dichos métodos no fue una opción. Un método más se detalla en el siguiente punto.

➤ *Método inductivo*

El método inductivo, es un procedimiento barato que ofrece información relevante. El método inductivo se basa en una muestra introducida en el centro de una bobina. La alta permeabilidad de las fibras del material aumenta la inductancia de la bobina, que se mide a través de un analizador de impedancia. Trabajos anteriores describieron el método [32, 34], y mostraron una buena correlación entre las mediciones de inductancia y el contenido de fibra de las muestras probadas. Además, este método proporciona una estimación precisa de la dosificación de fibra tanto en muestras de cualquier forma [35].

Como se muestra en la Figura 1.9, el método inductivo utiliza un medidor de inductancias LCR y multímetros para medir la resistencia, la tensión y la corriente. Ambos se encuentran en el CENIDET.



Figura 1.9. Configuración del método inductivo [35].

Para realizar pruebas en alta frecuencia con el material compuesto por hierro y resina, se seleccionó una norma válida en la actualidad que valida el proceso, la norma ASTM A772/A772M que se anexa en Apéndice B.1. Siguiendo con la descripción de este método, basta mencionar que fue el seleccionado por basarse en la norma ASTM A772/A772M. Además, este método está referido a SMC hierro- resina para aplicaciones en corriente alterna [36].

Para complementar a la literatura que se indagó para caracterizar materiales SMC, se describen los instrumentos de medición magnética más utilizados en la práctica de caracterización de materiales y que son de gran importancia cuando se tiene acceso a laboratorios especializados.

1.4.2 Instrumentación

La caracterización de las propiedades magnéticas de un SMC se suele llevar a cabo utilizando diversos sensores o equipos especializados para obtener un valor más exacto de las magnitudes que se desean medir del SMC. En la Figura 1.10 se muestra un mapa conceptual que engloba los dispositivos de medición magnética más importantes, encontrados en la literatura, lo cuales se describen más adelante.

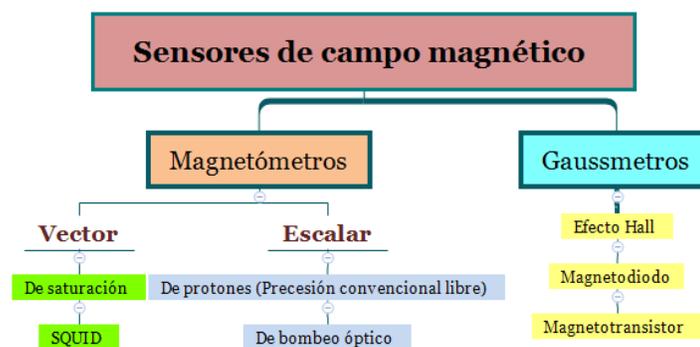


Figura 1.10. Sensores de campo magnético.

Los sensores de campo magnético se dividen en dos categorías basadas en sus intensidades de campo y rango de medición: magnetómetros miden campos bajos y gaussímetros miden campos altos [22].

➤ *Magnetómetro de saturación*

Un magnetómetro de saturación es un dispositivo que mide la intensidad y la orientación de las líneas magnéticas de flujo. Consta de: bobina de excitación, donde la corriente CA impulsa un par de agujas ferromagnéticas a la saturación; bobina de detección que detecta la condición de campo cero; bobina de polarización que mantiene una condición de campo cero [31].

➤ *Magnetómetros SQUID*

Si se mantiene una corriente de polarización constante en SQUID CD (donde SQUID significa Superconducting Quantum Interference Device- Dispositivo superconductor de interferencia cuántica) la tensión medida oscila con el cambio en el flujo magnético. El conteo de las oscilaciones permite evaluar el cambio de flujo que ha ocurrido. Debido al estado superconductor necesario, este dispositivo funciona sólo a bajas temperaturas (-

268.95 °C, helio líquido). Estos dispositivos son magnetómetros muy caros, pero también muy sensibles, lo suficientes como para medir campos magnéticos extremadamente pequeños [32].

➤ *Los magnetómetros de protones (precesión convencional - tipo libre precesión)*

Un fluido, que contiene cualquier compuesto rico de hidrógeno (agua, por ejemplo), podría ser utilizado para detectar campos magnéticos mediante la manipulación y el control de la reacción de protones dentro del fluido. Para iniciar el proceso y realizar las mediciones, bobinas eléctricas se colocan alrededor de un recipiente de líquido de hidrógeno y los energiza durante un intervalo de tiempo muy corto. En una corriente eléctrica directa (CD) los protones pasan de un giro natural al azar a la alineación en dirección de la corriente inducida. Cuando la corriente de la bobina cesa, los protones tenderán a preceder (precesión) de nuevo a su estado aleatorio natural de giro. Sin embargo, la velocidad a la que se produce esta precesión de protones depende de la del campo magnético ambiente cerca del recipiente o sensor. Los campos magnéticos fuertes obligarán a los protones de precesión a un ritmo más rápido que la vuelta a la normalidad en un campo magnético más débil. La velocidad a la que los protones preceden de nuevo a un movimiento normal es proporcional a la intensidad de campo magnético y por lo tanto proporciona un valor medible [32].

➤ *Magnetómetros de bombeo óptico*

Un vapor alcalino, como el cesio o el potasio se sella dentro de una cámara de vacío de temperatura controlada, donde la luz es emitida de forma ionizante o “bombeada” en la cámara a través de diversos filtros ópticos. La luz ionizante energiza las moléculas en el volumen de la muestra y expulsa electrones de la órbita más externa de electrones individuales. Los campos magnéticos del ambiente cerca de la cámara de vacío tenderán a forzar a los electrones a su estado estable. Un tubo fotomultiplicador (un dispositivo que mide la intensidad de la luz) en el otro extremo de las medidas de la cámara de vacío muestra la cantidad de luz emitida. Una mayor intensidad de la luz significa que un fuerte campo magnético está obligando a los electrones a pasar rápidamente de nuevo a un estado normal dentro del volumen de la muestra. Los campos magnéticos más débiles no causarán que los electrones vuelven a la normalidad lo más rápido, lo que produce menos luz en el volumen de la muestra. La velocidad a la cual los electrones vuelven a su estado normal es proporcional a la intensidad de campo magnético y por lo tanto proporciona un valor medible. Una desventaja de esta herramienta es la fragilidad del sensor debido al tipo de los componentes del instrumento utilizado, ya que debe ser manejado con cuidado en el campo [37].

➤ *Gaussímetros de efecto Hall*

El generador Hall proporciona una medición instantánea, utiliza equipos de medición electrónicos muy sencillos y ofrece una sonda compacta, adecuada para mediciones puntuales. Los portadores de carga experimentan una fuerza de Lorentz en presencia de un campo magnético. Esto produce una tensión de estado estacionario en una dirección perpendicular a la corriente y al campo. Sus desventajas lo describen como un dispositivo no lineal que requiere previa calibración para sensibilidad en cada sonda. Y es sensible a la temperatura con desviación de calibración a largo plazo [31].

➤ *Gaussímetro con magnetodiodo*

Los magnetodiodos se basan en la fuerza de Lorentz del campo magnético para desviar la recombinación de electrones / agujeros a un área con mayor resistividad. Esto hace que la corriente sea una función de la intensidad del campo magnético [38].

➤ *Gaussímetro con magnetotransistor*

Un magnetotransistor es un transistor con dos colectores. Sin un campo magnético presente estos colectores reciben cantidades iguales de portadores de carga. Cuando se aplica un campo magnético perpendicular a la dirección del flujo de corriente, la fuerza de Lorentz empuja estos portadores de carga hacia uno de los colectores y se puede medir la diferencia. Los magnetotransistores y los diodos funcionan a frecuencias más altas y con mejor sensibilidad que los sensores Hall, pero sufren de alta dependencia de la temperatura [38].

1.4.3 Conclusiones del estado del arte

De la revisión del estado del arte se concluyeron diversas limitaciones técnicas y/o contextuales para la caracterización del material compuesto por hierro y resina:

- La mayoría de los métodos y técnicas de caracterización mostrados son inaccesibles por la falta del equipo o maquinaria que requieren.
- En general, cada método o técnica depende del autor y permite medir la permeabilidad, la intensidad de campo magnético o la densidad de flujo, sin referenciar una normatividad para la metodología desarrollada.
- La mayoría de los autores no especifican el proceso que siguieron para elaborar las muestras con las que trabajó, o cuáles fueron sus consideraciones.
- No se ha encontrado en la literatura (acerca de los métodos de caracterización magnética) una referencia que haya caracterizado, específicamente, un SMC hierro- resina.
- De la literatura se seleccionó el método inductivo que cuenta con una norma válida en la actualidad.

1.5 Propuesta de solución

El Método de prueba estándar para la permeabilidad magnética de los materiales que utilizan la corriente sinusoidal, basado en la norma ASTM (American Society for Testing and Materials) A772/A772M (Apéndice B.1) y proporciona un medio para determinar la permeabilidad relativa de los materiales (μ_r) bajo la condición de excitación de corriente sinusoidal.

Este método de ensayo es adecuado para el diseño, la aceptación de las especificaciones, la evaluación del servicio, el control de calidad y el uso de la investigación. Utiliza especímenes de ensayo en forma de núcleos toroidales laminados y núcleos laminados de tipo enlace que tienen secciones transversales uniformes y trayectorias de flujo cerradas (sin espacios de aire), además permite realizar mediciones de permeabilidad de impedancia a inducciones magnéticas muy bajas a frecuencias de potencia (50 a 60 (Hz)) para moderar las inducciones por debajo del punto de máxima permeabilidad del material.

El límite inferior es una función del área de muestra, de las vueltas secundarias y de la sensibilidad del voltímetro de lectura de flujo utilizado.

El límite superior está dado por la disponibilidad de una corriente sinusoidal pura, que es una función de la fuente de energía. Además, se requiere una proporción grande (mayor o igual a 10) de la resistencia en serie total del circuito primario a la impedancia de la bobina primaria. Con un aparato de prueba adecuado, este método de ensayo es adecuado para su uso en frecuencias de hasta 1 MHz.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo general

Llevar a cabo la caracterización de las propiedades magnéticas de un material magnético blando hierro - resina para aplicaciones en inductores y transformadores.

1.6.2 Objetivos específicos

1. Adaptar la norma ASTM A772 / A772M a través del método de prueba estándar de inducción para la permeabilidad magnética de los materiales que utilizan corriente sinusoidal.
2. Desarrollar y adaptar las muestras y los circuitos de prueba que se van a caracterizar.
3. Deducir las características magnéticas más importantes que restan para la caracterización del material, como lo son: la susceptibilidad, la intensidad de campo magnético, etc.
4. Reportar los resultados.

1.7 Aportaciones, alcance y/o limitaciones

- El proyecto se centra en la caracterización magnética de núcleos toroidales de SMC hierro- resina (polvo de hierro malla 100 y resina de poliéster), y se basa en la adaptación de la norma ASTM A772 / A772M.
- Para evaluar la respuesta de las propiedades magnéticas del material ante diversos niveles de tensión eléctrica y/o corriente eléctrica, los experimentos se realizaron de 50 Hz a 1 kHz para pruebas en baja frecuencia y, de 100 a 800 (kHz) para pruebas en alta frecuencia.

Los resultados fueron reportados en tablas que describen el desempeño de las propiedades magnéticas del material ante diversos cambios de tensión eléctrica y/o corriente eléctrica.

CAPÍTULO 2. DESARROLLO DEL PROCESO DE CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

2.1 Gestión de la calidad del proceso de caracterización

La norma ISO 9001 (2008) es un SGC (Sistema de Gestión de la Calidad) que subraya que el diseño e implementación del sistema está influenciado por los factores que se muestra en la Figura 2.1 y la metodología PHVA (Planear, Hacer, Verificar y Actuar) de la Figura 2.2 [39].



Figura 2.1. Factores que influyen un SGC.

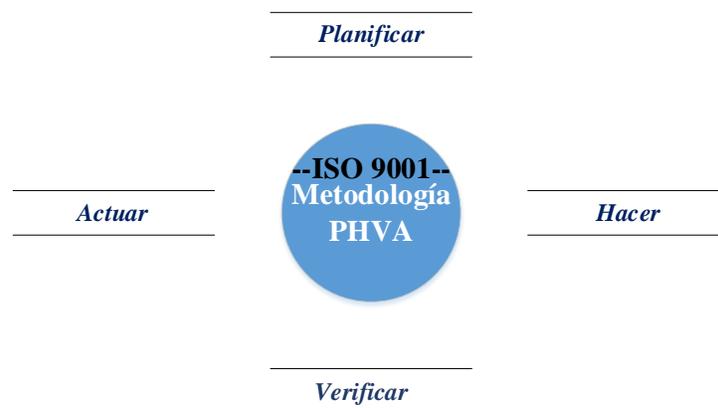


Figura 2.2. Metodología PHVA según la ISO 9001 (2008).

Esta norma mexicana (véase el Apéndice B.2) no tiene el propósito de proporcionar uniformidad en la estructura de los sistemas de gestión de la calidad o en la documentación, más bien, los requisitos de esta norma son complementarios a los requisitos para el desarrollo de un producto. Además, esta norma promueve la adopción de un enfoque basado en procesos cuando se desarrolla, implementa y mejora la eficacia de un SGC, para aumentar la satisfacción del demandante mediante el cumplimiento de sus requisitos.

Una actividad o un conjunto de actividades que utiliza recursos se puede considerar como un proceso.

Para lograr el desarrollo del proceso de caracterización de núcleos magnéticos es necesario contar con un SGC que clarifique los elementos o partes de este. Dichos elementos deben ser evaluados; en el caso del equipo empleado para las pruebas de caracterización en baja y alta frecuencia, se especifica la exactitud de cada aparato eléctrico y/o electrónico; en el caso de las etapas del proceso de elaboración de núcleos magnéticos, se sigue una metodología que contempla la calidad de los materiales empleados para el compuesto y sus características más relevantes, las medidas de seguridad y el equipo de seguridad que se debe emplear, el adecuado desecho de los residuos, todos los anteriores con base en diversas normas.

2.2 Protocolos de pruebas y el diseño de experimentos

A modo de procesos para el desarrollo de caracterización del SMC hierro- resina se seguirá un protocolo de pruebas y el diseño de experimentos. En la Figura 2.3 se muestra la similitud existente entre ambos.

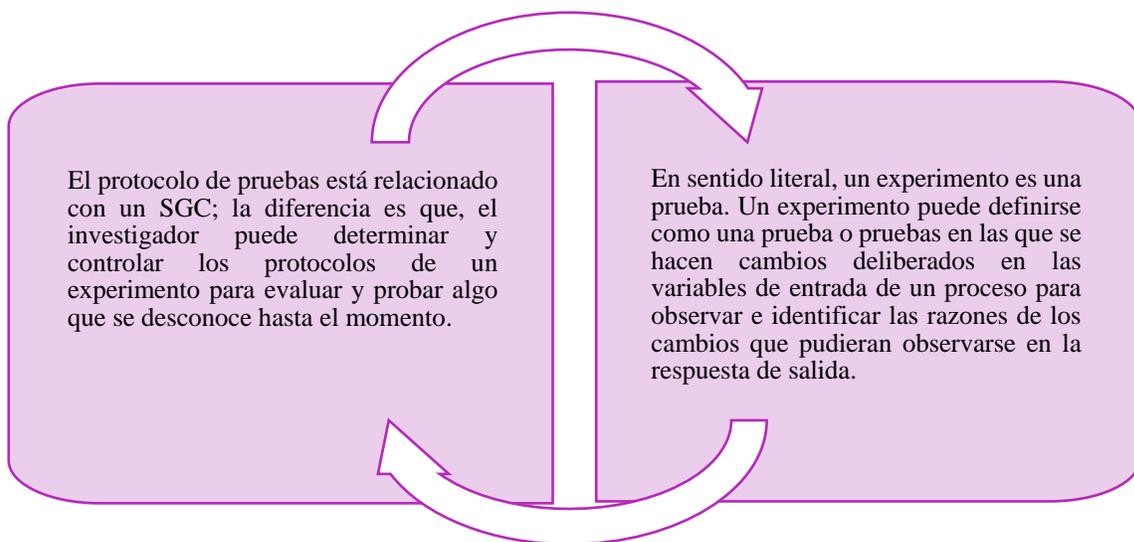


Figura 2.3. Similitud entre el protocolo de pruebas y el diseño de experimentos.

Para llevar a cabo el análisis y diseño de experimentos, es necesario tener una idea clara de lo que va a desarrollarse, la forma en que se recolectarán y, analizarán los datos.

En la Tabla 2.1 se muestra un esquema general del procedimiento recomendado por [40] y que fue considerado para desarrollar el proceso de caracterización de los núcleos magnéticos del compuesto hierro-resina.

Tabla 2.1. Pautas generales para diseñar un experimento.

Procedimiento para diseñar un experimento según Montgomery	
Identificación y exposición del problema	} Planeación previa al experimento
Elección de los factores, los niveles y los rangos	
Selección de la variable propuesta	
Elección del diseño experimental	
Realización del experimento	
Análisis estadístico de los datos	
Conclusiones y recomendaciones	

Nota: En la práctica, los pasos 2 y 3 suelen hacerse simultáneamente o en el orden inverso.

2.3 La base para la selección de las dimensiones de los núcleos elaborados

Para reconocer las dimensiones geométricas de un núcleo toroidal en la Figura 2.4 se aprecia la representación gráfica general de cada dimensión en los núcleos toroidales; donde D_i es el diámetro interior, D_e es el diámetro exterior, w es el ancho y \emptyset es el espesor del toroide.

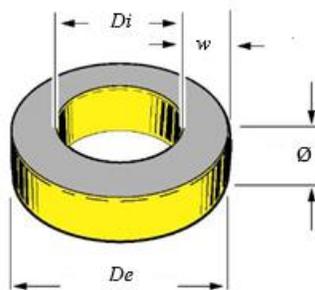


Figura 2.4. Representación de las dimensiones de un toroide.

La base para la selección de las dimensiones que tuvieron los núcleos elaborados, se apoya en el punto de la norma ASTM A772/A772M que referencia que el ancho de la muestra del núcleo toroidal debe ser aproximadamente 9 veces su diámetro interior y, que la relación del diámetro interior entre el diámetro exterior debe ser mayor que 0.82 [36]. A estos núcleos se les denominó núcleos normalizados y se reconocen por la letra N.

A continuación, se comparan las relaciones anteriores, según las magnitudes reales, en centímetros, que se dieron a los núcleos:

$$\frac{D_i}{D_e} = \frac{7.61}{8.85} = 0.85 \quad (2.1)$$

donde D_i es el diámetro interior y D_e es el diámetro exterior del toroide,

$$\frac{D_i}{D_e} > 0.82 \quad (2.2)$$

$$\frac{D_i}{w} = \frac{7.61}{0.63} = 12 \quad (2.3)$$

donde w es el ancho y \emptyset es el espesor del toroide.

También se elaboraron muestras de núcleos toroidales con base en las dimensiones de toroides estándar de ferrita. La Tabla 2.2 recopila las magnitudes de las dimensiones de los núcleos toroidales de ferrita, con los cuales se elaboraron moldes para reproducir piezas similares con el material compuesto en desarrollo.

Tabla 2.2. Dimensiones de los toroides estándar.

Núcleo	Nomenclatura	De (mm)	Di (mm)	\emptyset (mm)	w (mm)
N	Normalizado	88.5	76.1	22	6.3
3	TX51/32/19-1385	51.5	31.5	19.5	10
2	TX36/23/15-1385	36	23	15.5	6.9
1	TX22/14/13-1385	22	13.5	12.9	4.5

Nota: donde De = Diámetro exterior del toroide (mm); Di = Diámetro interior del toroide(mm); \emptyset =Espesor del toroide (mm); w =ancho del toroide (mm).

En la Tabla 2.3 se muestra la comparativa entre las dimensiones reales de los núcleos toroidales de ferrita, contra las dimensiones de los núcleos que se elaboraron y se basaron en ellos.

Tabla 2.3. Comparativa entre las dimensiones reales de núcleos de ferrita contra las de los núcleos elaborados.

Núcleo	De (mm)	Di (mm)	\emptyset (mm)	w (mm)
3	51.5	31.5	19.5	10
2	36	23	15.5	6.9
1	22	13.5	12.9	4.5
Muestra elaborada	De (mm)	Di (mm)	\emptyset (mm)	w (mm)
3	50	31	17.5	9.5
2	34	22.5	14	6
1	21	13	9.5	4
Muestra y su error	De %	Di %	\emptyset %	w %
3	2.91	1.58	10.25	5
2	5.55	2.17	9.67	13
1	4.54	3.70	26.35	11.11

El proceso de caracterización de núcleos magnéticos que aquí se propone, abarca la realización de pruebas a diferentes temperaturas para medir la permeabilidad inicial del material compuesto hierro-resina, así como el factor de acoplamiento de los devanados; la realización de pruebas en baja frecuencia para conocer las características magnéticas: permeabilidad, intensidad de campo magnético, densidad de flujo magnético y susceptibilidad, para analizar si el compuesto en desarrollo es apto a esta frecuencia; pruebas en alta frecuencia, para saturar el núcleo magnético a una mayor intensidad de campo magnético y descifrar si es posible aumentar la permeabilidad del compuesto, así como analizar el efecto de las pérdidas en los núcleos toroidales elaborados con el material compuesto.

De acuerdo a lo anterior, se tienen los protocolos (en el Apéndice C) para las pruebas de temperatura (Apéndice C.1), las pruebas en baja frecuencia (Apéndice C.2) y las pruebas en alta frecuencia (Apéndice C.3).

Dichos protocolos detallan la forma en que se realizaron las pruebas mencionadas, lo que se pretendía medir y/o calcular, y que se siguió un SGC basado en la norma ISO 9001 (2008). Se realizaron a modo de plantillas de texto que describan los procedimientos para las pruebas, pero los resultados numéricos se incluyeron en hojas de cálculo de programas de software matemáticos. De esta forma, se recabaron los datos para someterlos al diseño de experimentos e interpretar los resultados de forma gráfica.

2.4 Higiene, seguridad y medio ambiente

La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos es la máxima ley en el territorio de México en materia de gestión de residuos. Esta ley abarca la gestión tanto de residuos no peligrosos sólidos urbanos, como la gestión de los residuos peligrosos, considera además una tercera clasificación de residuos denominados residuos de manejo especial y está basada en el Artículo 4° de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos y la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Se promulgó el 8 de octubre de 2003 y la última reforma publicada fue el 19 de enero del 2018 [41].

Los principios de esta ley son:

- Prevenir, valorizar y hacer un manejo integral bajo criterios de eficiencia ambiental, tecnológica, económica y social.
- Responsabilidad compartida de productores, consumidores y autoridades.
- El generador de los residuos debe asumir los costos de su disposición
- Los lugares que han sido afectados por la disposición inadecuada de residuos deben ser atendidos para que dejen de ser fuente de contaminación.
- Es indispensable que los procesos de producción se realicen bajo condiciones de eficiencia ambiental, en términos de uso de recursos, insumos y generación de residuos.

En esta ley se exponen de manera general y concisa las disposiciones generales aplicables dentro de México en materia de residuos. La distribución de competencias, coordinación y atribuciones de las tres órdenes de gobierno y coordinación entre dependencias.

En el título tercero describe la clasificación de los residuos. Los artículos que aplican para la clasificación de los elementos residuales empleados en la composición del material en desarrollo son los siguientes:

Artículo 16.- La clasificación de un residuo como peligroso, se establecerá en las normas oficiales mexicanas que especifiquen la forma de determinar sus características, que incluyan los listados de los mismos y fijen los límites de concentración de las sustancias contenidas en ellos, con base en los conocimientos científicos y las evidencias acerca de su peligrosidad y riesgo.

Artículo 18.- Los residuos sólidos urbanos podrán subclasificarse en orgánicos e inorgánicos con objeto de facilitar su separación primaria y secundaria, de conformidad con los Programas Estatales y Municipales para la Prevención y la Gestión Integral de los Residuos, así como con los ordenamientos legales aplicables.

Artículo 22.- Las personas que generen o manejen residuos y que requieran determinar si éstos son peligrosos, conforme a lo previsto en este ordenamiento, deberán remitirse a lo que establezcan las normas oficiales mexicanas que los clasifican como tales.

Según lo estipulado en el Artículo 22 de Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, se refiere en esta sección la Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005 (Véase el Apéndice B.3), la cual establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos. Fue publicada en el Diario Oficial de la Federación el 23 de junio de 2006 [42].

Un residuo es peligroso si se encuentra en alguno de los siguientes listados: Listado 1: Clasificación de residuos peligrosos por fuente específica. Listado 2: Clasificación de residuos peligrosos por fuente no específica. Listado 3: Clasificación de residuos peligrosos resultado del desecho de productos químicos fuera de especificaciones o caducos (Tóxicos Agudos). Listado 4: Clasificación de residuos peligrosos resultado del desecho de productos químicos fuera de especificaciones o caducos (Tóxicos Crónicos). Listado 5: Clasificación por tipo de residuos, sujetos a Condiciones Particulares de Manejo.

De acuerdo al ANEXO 1 BASES PARA LISTAR RESIDUOS PELIGROSOS POR “FUENTE ESPECIFICA” Y “FUENTE NO ESPECIFICA”, EN FUNCIÓN DE SUS TOXICIDADES AMBIENTAL, AGUDA O CRÓNICA de la NOM-052-SEMARNAT-2005, no aplica la utilización del hierro en el compuesto en desarrollo. Por otro lado, los elementos residuales empleados para la elaboración del material compuesto en desarrollo se encontraron en el listado 5. Dichos elementos constituyentes no tenían un estado caduco o gastado y fueron: resina sintética, restos de catalizador para resinas, ferroaleación de hierro (puro).

Debido a lo anterior, se llevó a cabo una recolección de los residuos para desecharlo en los botes correspondientes para su tratado (Figura 2.5).



Figura 2.5. Representación del contenedor que indica residuos peligrosos.

En cuanto a la seguridad que se debe disponer al trabajar con el hierro, los fabricantes de la limadura de hierro cumplieron con los requisitos que se consideran en la norma NOM-018-STPS-2000, acerca de comunicación de peligros por sustancias químicas [43]. Además, estos sugieren la protección especial a los que empleen la limadura de hierro. A continuación, en la Figura 2.6 se presenta un mapa conceptual que menciona los puntos más importantes de la resina, catalizador y hierro, así como las medidas de seguridad.

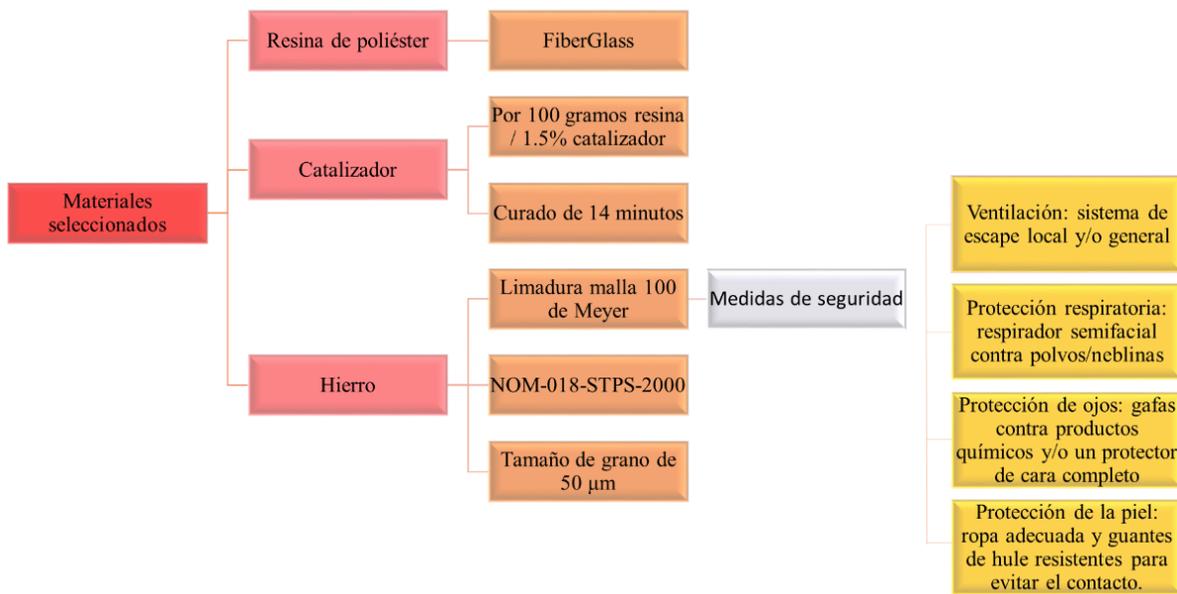


Figura 2.6. Características más importantes de los materiales utilizados respecto a sus medidas de seguridad.

En la Sección 1.3.3.1 se mencionó el papel de la resina de poliéster al actuar no sólo como aditamento mecánico, sino también como aislante. Una característica muy importante para la selección de la resina es la máxima temperatura de distorsión por calor. Según el fabricante sugerido en este trabajo, la resina soporta la distorsión por calor hasta los 356.15 K. Este dato proporcionó la medida de seguridad más importante al utilizar la resina de poliéster en la elaboración de los núcleos.

2.5 Equipos y/o materiales utilizados para la elaboración de núcleos magnéticos

Hasta este momento se ha descrito el proceso de caracterización que se contempló para el material compuesto, de forma que se tenga un SGC de normalización válida [39]; los protocolos de pruebas, el diseño de experimentos para analizar las variables que actúan y los resultados; las dimensiones de las muestras de toroides estándar y clase N y el desecho de los residuos en el proceso de manufactura o moldeo manual de las muestras.

En la Figura 2.7 se aprecian las características de la exactitud de los aparatos eléctricos y/o electrónicos más relevantes que se utilizaron para realizar pruebas con el material compuesto a baja y alta frecuencia.

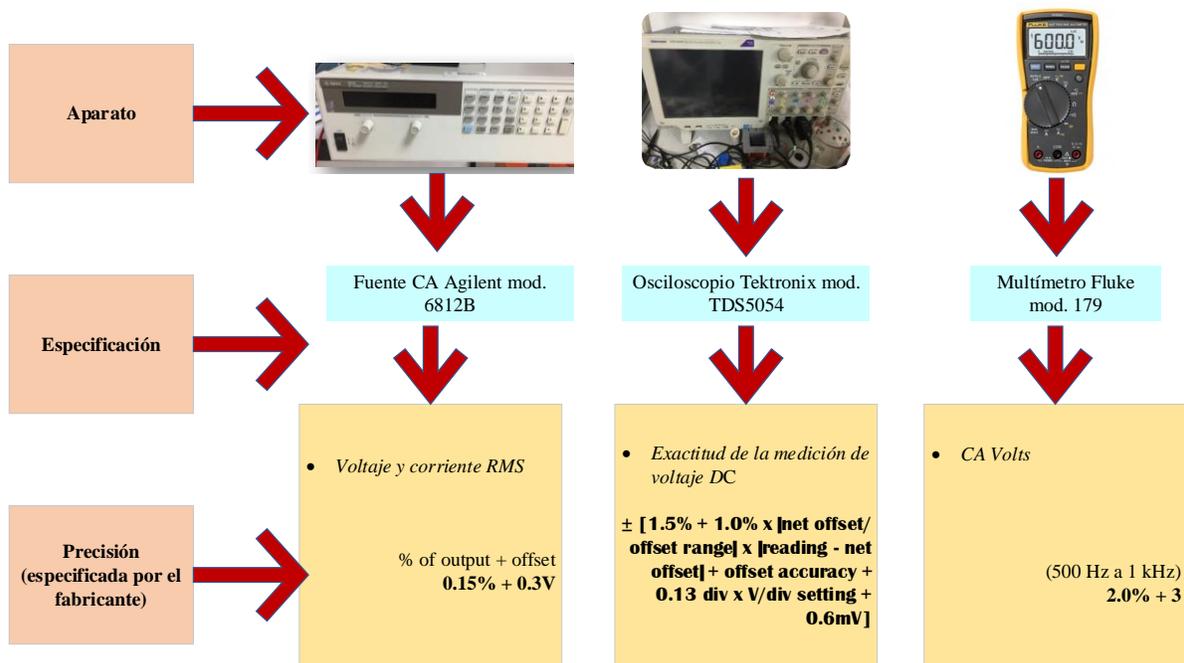


Figura 2.7. Equipo utilizado y sus características.

Bajo este contexto, el empleo de los equipos mostrados en la Figura 2.7 tuvo una repercusión en la medición de las características magnéticas que se obtuvieron en el material.

CAPÍTULO 3. ELABORACIÓN DE NÚCLEOS MAGNÉTICOS

En este capítulo se describe el proceso que se desarrolló para la elaboración de los núcleos magnéticos. En primera instancia, se explica la estructura molecular que tiene el material compuesto magnético blando, conformado por hierro y resina; en segunda instancia, se da a conocer una metodología para elaborar núcleos magnéticos de hierro y resina a partir del moldeo manual. Finalmente, se menciona la forma en que se devanaron los núcleos.

3.1 La estructura molecular del compuesto hierro-resina

Al ser sometida a proceso de curado, la resina de poliéster se comporta como un material sólido termoplástico cristalino. En Figura 3.1 se describe la clasificación de estos materiales:

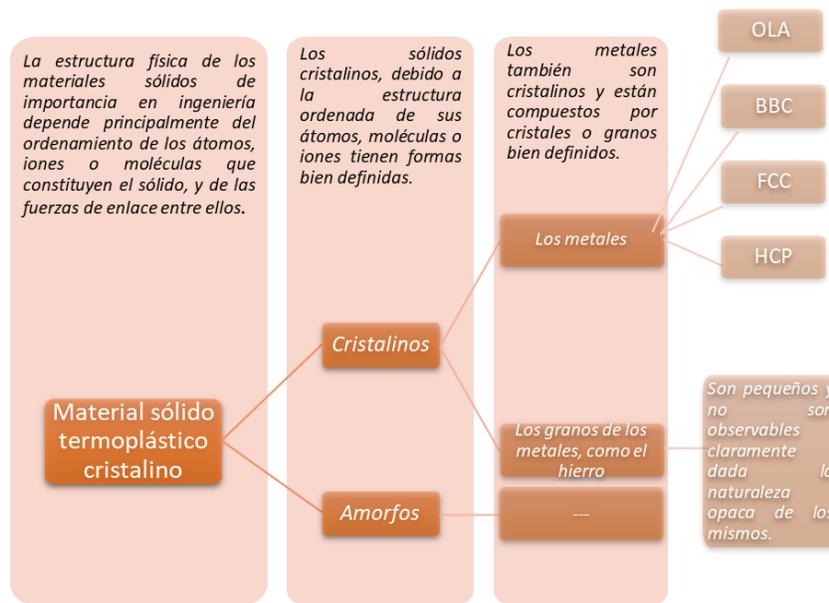


Figura 3.1. Clasificación de materiales sólidos termoplásticos.

En la ingeniería de materiales, los sólidos se clasifican en dos amplias categorías: cristalinos y amorfos. Los sólidos cristalinos, debido a la estructura ordenada de sus átomos, moléculas o iones tienen formas bien definidas. Los metales también son cristalinos y están compuestos por cristales o granos bien definidos. Los granos de los metales, como sucede con el hierro, son pequeños y no son observables claramente dada la naturaleza opaca de los mismos. La estructura física de los materiales sólidos de importancia en ingeniería depende principalmente del ordenamiento de los átomos, iones o moléculas que constituyen el sólido, y de las fuerzas de enlace entre ellos.

Si los átomos o iones de un sólido están ordenados de acuerdo con un patrón que se repite en el espacio, forman un sólido que tiene un OLA (Orden de Largo Alcance) al cual se le llama sólido cristalino o material cristalino [44].

La mayoría de los metales puros cristalizan al solidificar en tres estructuras compactas: BBC (Siglas en inglés de una estructura *Body Centered Cubic*, que significa Cúbica Centrada en el Cuerpo), FCC (Siglas en inglés de una estructura *Face Centered Cubic*, que significa Cúbica Centrada en las Caras) y la HCP (Siglas en inglés de una estructura *Hexagonal Close Packed*, que significa Hexagonal Compactada). En la Figura 3.2 se muestran dichas estructuras:

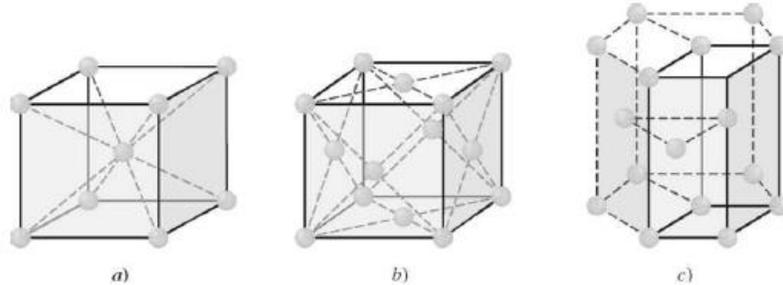


Figura 3.2. Estructuras compactas a) BBC, b) FCC y c) HCP [44].

El hierro posee la estructura cristalina BCC a temperatura ambiente; si se representan los átomos de la celda de la Figura 3.2 (a) como esferas rígidas, se observará que el átomo central está rodeado por 8 vecinos más próximos (número de coordinación de 8). Esto significa que un átomo entero se encuentra en el centro de la celda unitaria y un octavo de esfera se encuentra en cada vértice de la celda, lo que equivale a otro átomo.

En cuanto a la elaboración de un material compuesto que utiliza resinas de poliéster, las técnicas conocidas son aquellas mediante las cuales se procesa la matriz individualmente para llegar a una pieza final. La del molde manual consiste en vaciar proporciones deseadas de resina y metal (hierro) en el molde, mezclando de forma simultánea, y cuidando que la mezcla posea un tapiz lo más homogéneo posible en cuanto a espesor y distribución [45].

La anisotropía magnética dicta que las propiedades magnéticas de un material dependerán de la dirección en la que se miden. Por ejemplo, si una estructura cristalina cúbica se corta en forma de un disco plano de configuración $\{110\}$, el espécimen tendrá direcciones de la forma $\{100\}$, $\{110\}$ y $\{111\}$ como se aprecia en la Figura 3.3.

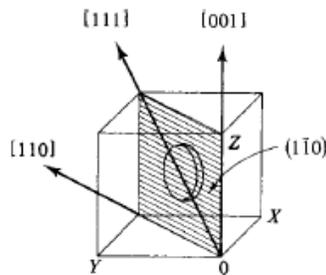


Figura 3.3. Las tres direcciones cristalográficas principales en el plano (110) de un material cúbico [46].

Por lo tanto, la anisotropía cristalina puede considerarse como una fuerza que tiende a mantener la magnetización en ciertas direcciones cristalográficas equivalentes en un cristal [46].

Visto desde un punto de vista más práctico, una forma de asegurar que, al agregar el hierro en la resina se disuelva homogéneamente, es agregar además un pigmento o tonalidad que no perjudique las propiedades mecánicas del compuesto. De esta forma, al mezclar ambos elementos, el pigmento se disuelve junto con el polvo de hierro por toda la mezcla hasta observar que la mezcla sea totalmente de un determinado color. Además, el utilizar pigmentos benefició en la clasificación de los núcleos de acuerdo a su porcentaje de hierro.

En la Tabla 3.1 se muestra la clasificación de los núcleos elaborados, por colores, de acuerdo a su porcentaje de hierro en la cantidad de mezcla total.

Tabla 3.1. Clasificación de los núcleos por colores según su porcentaje de hierro.

Color	Polvo de Fe %
Rosa	0
Vino	15.3
Gris	16.7
Verde olivo	23
Verde	28.6
Negro	33.3
Café	44.4
Morado	47.4
Azul	48.7

En la Tabla 3.2 se observa la homogeneidad visual microscópica de los núcleos elaborados por su color. Las imágenes fueron tomadas con ayuda de una cámara de alta calidad microscópica.

Tabla 3.2. Homogeneidad microscópica de los núcleos por color.

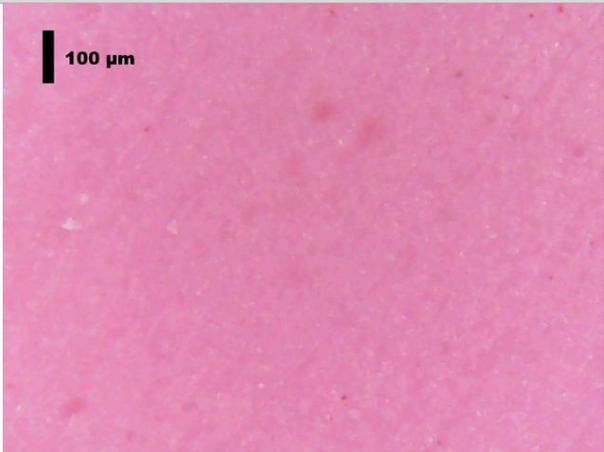
Color	% Fe	Homogeneidad microscópica
Rosa	0	

Tabla 3.2 continuación...

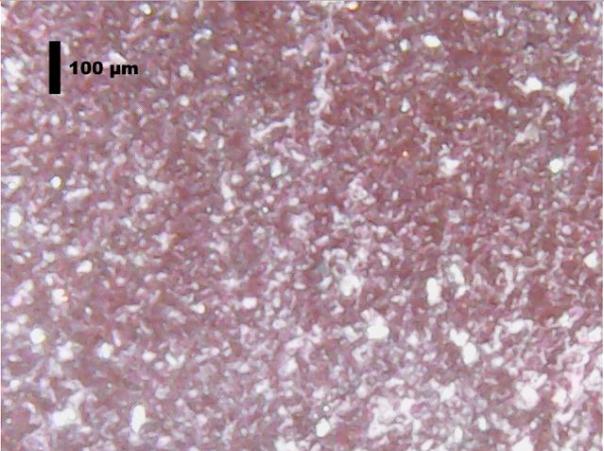
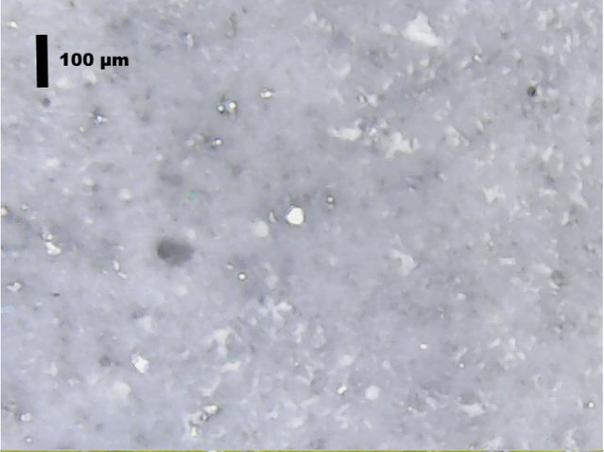
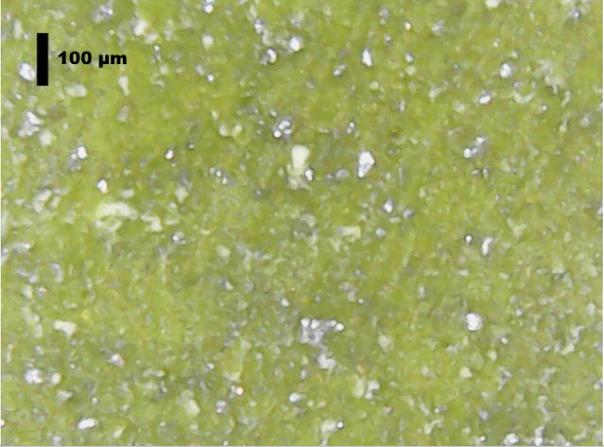
Vino	15.3	
Gris	16.7	
Verde olivo	23	

Tabla 3.2 continuación...

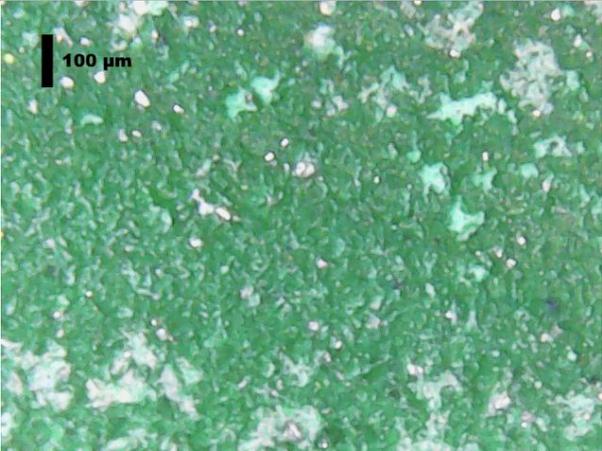
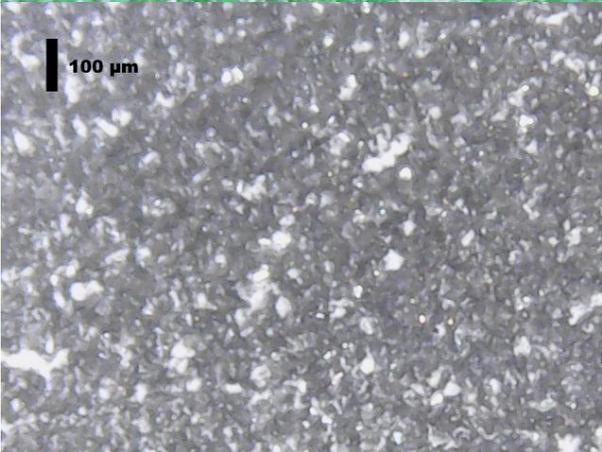
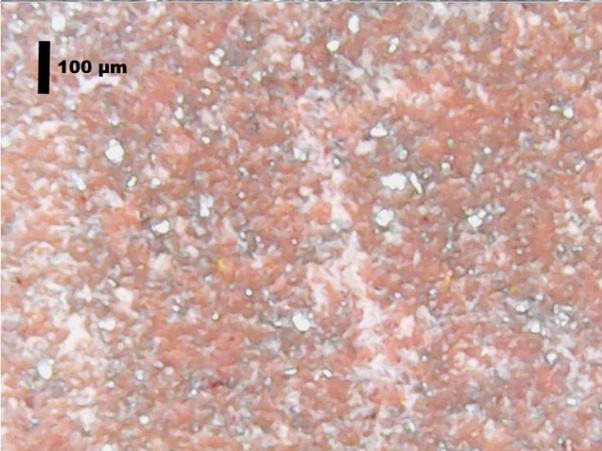
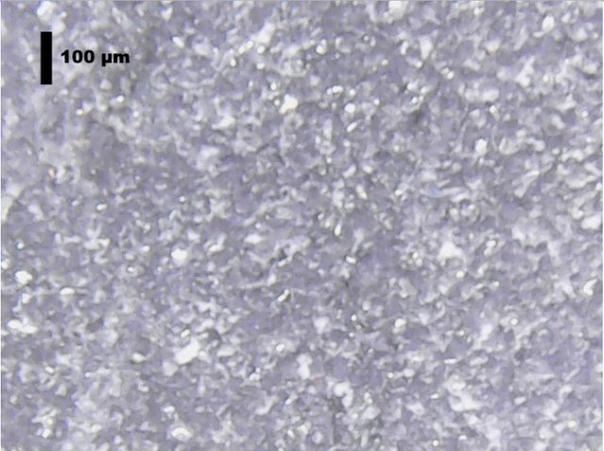
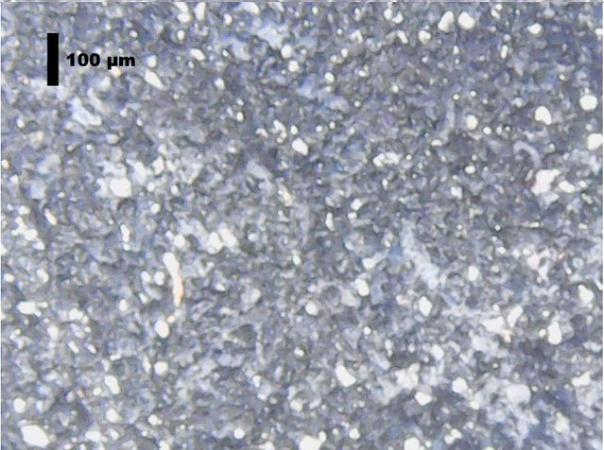
Verde	28.6	
Negro	33.3	
Café	44.4	

Tabla 3.2 continuación...

Morado	47.4	
Azul	48.7	

3.2 Elaboración de núcleos con el material SMC hierro - resina

Como ya se ha mencionado, la literatura [47] reconoce el moldeo manual al estudiar los efectos de las partículas de limadura de hierro sobre la microestructura de resina de poliéster. Inclusive se demostró prácticamente que la adición de limaduras de hierro a la resina de poliéster incrementa su dureza, la porosidad aparente y la densidad hasta en un 78%. Es así como se pueden conseguir mejores propiedades en un compuesto de matriz de resina de poliéster mediante la adición de limaduras de hierro. Además, se ha demostrado que el incremento en la adición de limaduras de hierro en un porcentaje del 9 al 12% favorece en una distribución uniforme de la microestructura de la mezcla.

Para la elaboración de núcleos magnéticos por moldeo manual, fue muy importante elaborar moldes a base de un PR (Prototipado Rápido). La Figura 3.4 describe las diversas formas de realizar el PR.

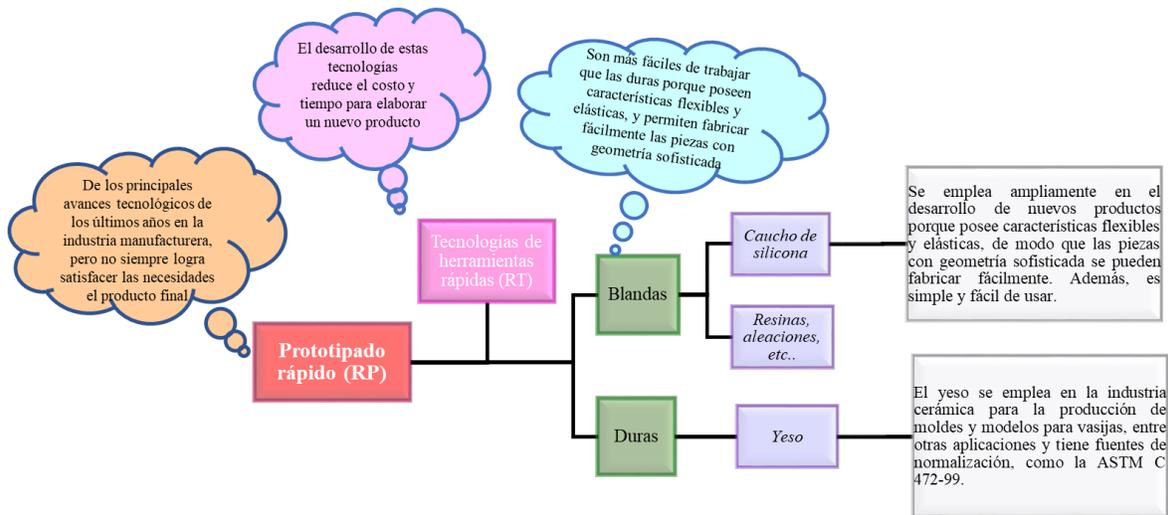


Figura 3.4. El prototipado rápido como técnica de elaboración de moldes.

El yeso tiene en contraparte la intervención de factores como la calidad y temperatura del proceso, la relación agua- yeso, el tiempo de humectación, de mezclado, y el uso de aditivos.

Los aditivos aceleran el proceso de fraguado del yeso [48].

La elaboración de moldes con silicona también posee algunos inconvenientes [49].

Generalmente, por cada 100 gramos de silicona se debe agregar el 3 % de catalizador, pero su secado depende, en gran manera, de la temperatura y humedad del ambiente.

Pese a este tipo de inconvenientes, en [18] se reportó el uso de la silicona en la elaboración de piezas de resina epóxica y poliéster. De hecho, la resina de poliéster presenta un mejor módulo de elasticidad, esfuerzo de fluencia, límite elástico y mejor porcentaje de deformación que la resina epóxica. También, se concluyó que las propiedades mecánicas de las resinas epóxica y poliéster se ven notablemente mejoradas con la adición de fibra de carbono, ya que esta adición le atribuye un mejor sinergismo de dichas propiedades.

Por lo anterior, se sugiere la elaboración de moldes con silicona para la reproducción de núcleos magnéticos con el material compuesto por hierro y resina que se desarrolla en este proyecto.

En la Figura 3.5 se muestra un molde de silicona que fue elaborado tomando como base un núcleo toroidal de ferrita de dimensiones convencionales y, en la Figura 3.6 se muestra un molde de silicona que fue elaborado con base en las dimensiones especificadas por la norma [36] para núcleos magnéticos toroidales.



Figura 3.5. Molde de silicona de un núcleo de ferrita convencional.



Figura 3.6. Molde de silicona para un núcleo toroidal normalizado.

3.2.1 Metodología para la elaboración de núcleos con el material compuesto mediante moldeo manual

A continuación, en la Figura 3.7, se muestra la metodología que se desarrolló para la elaboración de los núcleos magnéticos toroidales presentados:

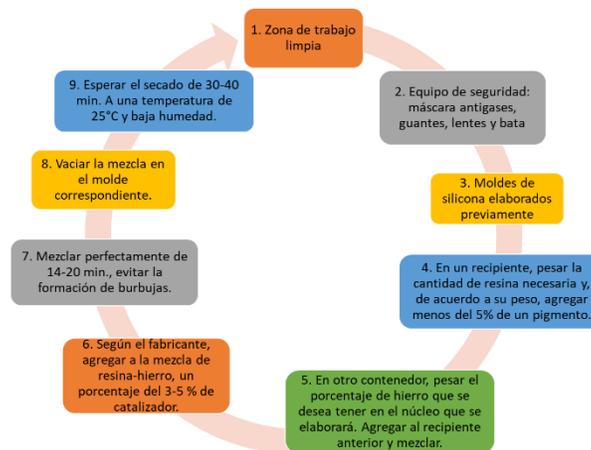


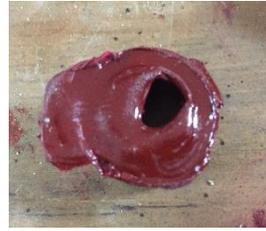
Figura 3.7. Metodología sugerida para elaborar los núcleos.

3.2.2 Maquinado, lijado y acabado de las muestras de núcleos magnéticos

La metodología para elaborar núcleos mediante moldeo manual sugerida en la Sección 3.2.1, contempla una etapa de maquinado y lijado para dichas piezas, ya que, en la práctica, cuando se usa un tipo de molde de silicona de una sola cara y, se vacía la mezcla líquida del compuesto hierro- resina, se tendrá el inconveniente mostrado en las Figuras 3.8 (a) y 3.8 (b).



a) El vaciado de la mezcla en el molde de silicona de una sola cara no es preciso



b) El vaciado origina impurezas en la pieza final resultante o núcleo elaborado

Figura 3.8. Inconveniente del vaciado a un molde de silicona de una sola cara.

Para continuar con el proceso de elaboración de núcleos magnéticos mediante la metodología propuesta, es importante maquinar las piezas que se extraigan del molde de silicona. La ventaja de este procedimiento es que, las piezas obtenidas pueden lijarse manualmente, con ayuda de un taladro marca Dremel®, o para un acabado más sofisticado pueden utilizarse máquinas como la fresadora o el torno.

Se tiene la opción de llevar a maquinar las piezas a un taller mecánico especializado (de preferencia con máquinas de control numérico), lo cual aumenta el costo de maquinado de las piezas, pero asegura un acabado profesional en las mismas. En este caso, se practicaron ambas opciones y, en ambas se obtuvieron resultados apreciables en las Figuras 3.9 (a) y 3.9 (b).



a) Acabado de un núcleo o pieza maquinada y lijada manualmente



b) Acabado de un núcleo maquinado y lijado en un taller mecánico

Figura 3.9. Comparación entre el acabado de una pieza maquinada manualmente, y una maquinada en un taller.

3.3 Devanado de los núcleos magnéticos elaborados con el material compuesto

Para devanar los núcleos toroidales elaborados se presentaron 2 criterios, ambos se muestran en la Figura 3.10. En resolución a los conflictos mostrados en la Figura 3.10, se recurrió a las referencias que se desglosan en el párrafo consecutivo a dicha figura.

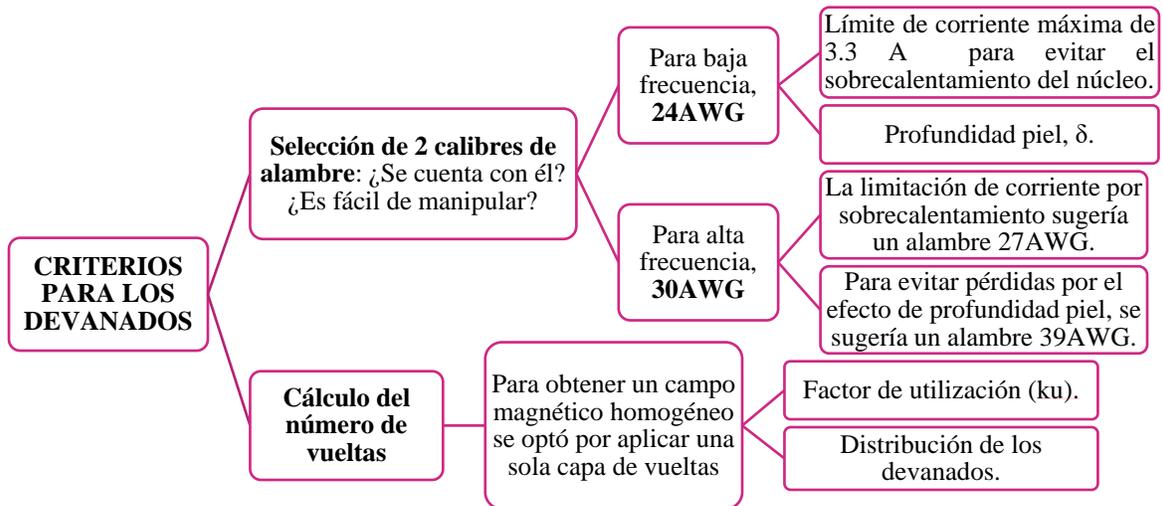


Figura 3.10. Criterios seguidos para devanar los núcleos elaborados.

- a) En [50] se calculó el calibre de alambre de cobre #24 AWG.
- b) En [51] se determinó un calibre máximo de 23AWG para aprovechar todo el área del alambre y minimizar las pérdidas por el efecto de la profundidad piel.
- c) En [51] se calcula un factor de utilización (ku) de 0.4 para aprovechar la mayor área del núcleo al realizar los devanados.
- d) Se siguió [51] para asegurar que, mediante un devanado manual, la distribución de los devanados de forma constante y uniforme.

En una bobina, a medida que aumenta el espacio de aire, aumentará la franja de flujo. Una franja de flujo es el espacio por el que divaga un flujo magnético disperso, por lo que también se le conoce de esta forma.

Como se muestra en la Figura 3.11, si una bobina se enrolla de forma apretada, alrededor de un núcleo de aire, el flujo generado alrededor del cable del imán forzará el flujo disperso al interior del núcleo. El resultado será la reducción de la franja de flujo.

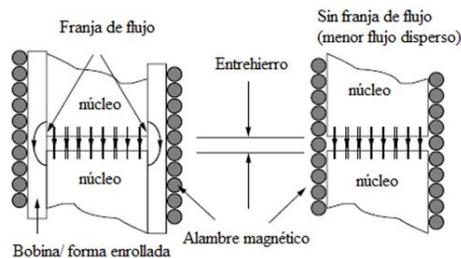


Figura 3.11. Diferencia entre un enrollamiento holgado y uno apretado [51].

El diseño de convertidores de alta frecuencia, utilizando núcleos de aire de baja permeabilidad, usualmente requerirá muy pocas vueltas. Es por esto que, para despreciar la existencia de franjas de flujo y por las pocas vueltas, es importante enrollar uniformemente y en forma constante (véase Figura 3.12) [51].

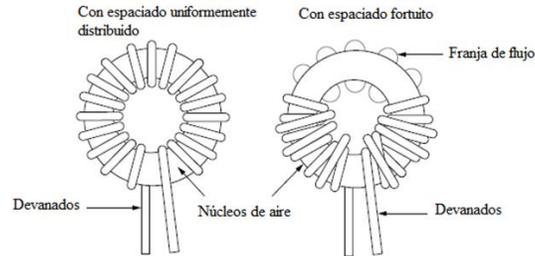


Figura 3.12. Comparación entre un devanado uniforme y uno fortuito [51].

La Figura 3.13 (a) ilustra una corriente $i(t)$ que fluye a través de una espira conductora. Esta corriente induce flujo magnético cuyas líneas de flujo siguen trayectorias circulares alrededor de la corriente. Según la ley de Lenz, el flujo de CA en el conductor induce corrientes parásitas, que fluyen de forma que tiende a oponerse al flujo de CA. La Figura 3.13 (b) ilustra las trayectorias de las corrientes parásitas. Se puede ver que las corrientes parásitas tienden a reducir la densidad de corriente neta en el centro del conductor, y aumentan la densidad de corriente neta cerca de la superficie del conductor.

Para una corriente sinusoidal $i(t)$ de frecuencia f , el resultado es que la densidad de corriente es mayor en la superficie del conductor. La densidad de corriente es una función decreciente exponencial de la distancia al conductor, con una longitud característica conocida como profundidad de penetración o profundidad de la piel.

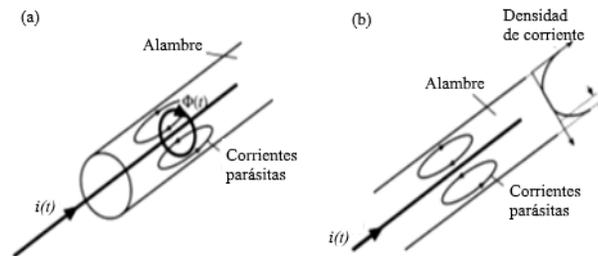


Figura 3.13. El efecto de piel: (a) la corriente $i(t)$ induce un flujo que a su vez induce corrientes de Foucault; (b) las corrientes parásitas tienden a oponerse a la corriente $i(t)$ en el centro del cable [50].

La profundidad de penetración está dada por la Ecuación 3.1:

$$\delta = \frac{6.62}{\sqrt{f}} \quad (3.1)$$

Donde; δ es la profundidad de penetración en cm, y f es la frecuencia de trabajo.

Para continuar con el criterio de selección del calibre del alambre magnético, se usó también la Figura 3.14, que proporciona el diámetro del alambre magnético adecuado bajo los efectos de la profundidad piel, dependiendo de la temperatura y la máxima frecuencia a la que se trabaje; en este caso, la máxima temperatura es de 338.15 K y la frecuencia de 50 kHz [50].

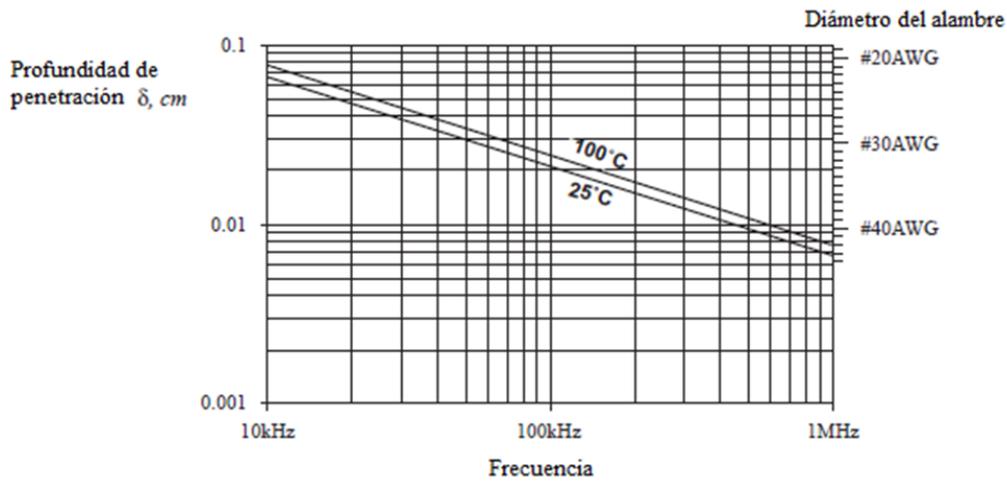


Figura 3.14. Relación del calibre del cable con la frecuencia y la temperatura de trabajo [50].

Por todo lo anterior, fue que se eligió el calibre 24AWG para realizar las pruebas en baja frecuencia, y el calibre 30AWG para las pruebas en alta frecuencia. De acuerdo a la longitud de cada tipo de núcleo toroidal elaborado y, por el diámetro del alambre se tuvo un determinado número de vueltas que correspondió a un ku aceptable por [51], en la Tabla 3.3 se puede apreciar lo anterior:

Tabla 3.3. Número de vueltas y factor de utilización (ku) con el correspondiente calibre de alambre seleccionado.

Núcleo #N		Núcleo #3		Núcleo #2		Núcleo #1	
Con 24AWG	210 vueltas	Con 24AWG	90 vueltas	Con 24AWG	60 vueltas	Con 24AWG	40 vueltas
$ku=0.41$		$ku=0.35$		$ku=0.3$		$ku=0.37$	
Con 30AWG	440 vueltas						
$ku=0.43$							

Nota: recuérdese que #N es la clase Normalizada. Todas las clases de núcleos se mencionaron en la Sección 2.3.

Es importante mencionar que, se optó por emplear únicamente los núcleos clase N para realizar las pruebas en alta frecuencia, puesto que la base para realizar dichas pruebas se tuvo en la norma ASTM A772/A772M [36].

En la Figura 3.15 se muestran los devanados de a) un núcleo toroidal clase #3 contra b) un núcleo toroidal clase #N.



a) Devanado de un núcleo #3



b) Devanado de un núcleo #N

Figura 3.15. Devanados obtenidos en: a) un núcleo toroidal #3, b) un núcleo toroidal #N.

CAPÍTULO 4. PRUEBAS DE TEMPERATURA

En el Capítulo 2 se describieron las características del hierro y de la resina; en el caso de la resina, se habló de una muy importante: el valor máximo de temperatura para evitar la distorsión por calor. Considerando el dato anterior, se decidió realizar pruebas de temperatura al material compuesto por hierro y resina en un rango de $258.15 \text{ K} < T < 338.15 \text{ K}$. Dichas pruebas se llevaron a cabo utilizando la cámara micro climática modelo MCB-1.2-33-33-H/AC de A GENTHERM COMPANY® y el medidor de inductancias LCR modelo 3550 de Tegan®. Según la capacidad del medidor de inductancias para medir en baja y alta frecuencia, se seleccionó un intervalo de 60 Hz a 60 kHz para tomar lecturas lo más acertadas posibles. Con estas pruebas se mide la permeabilidad inicial del material compuesto hierro-resina.

4.1 Objetivo y alcance de la prueba

- El objetivo de esta prueba consiste en realizar pruebas de temperatura a núcleos toroidales que están elaborados por un material compuesto a base de resina y limadura de hierro, para determinar la variación de la permeabilidad magnética que dicho material presenta al inyectarle determinadas corrientes a distintas frecuencias.
- Su alcance reside en observar el comportamiento de las características magnéticas del material en un rango de temperatura de 258.15 a 338.15 (K).

4.2 Procedimiento y desarrollo de las pruebas de temperatura

4.2.1 Diagrama de flujo

La realización de las pruebas de temperatura del material compuesto por hierro y resina se basó en el protocolo desarrollado para las mismas (Apéndice C). En esta sección se describirá el procedimiento y desarrollo de las pruebas de temperatura bajo los criterios que se siguieron en dicho protocolo de pruebas.

El diagrama de flujo del proceso se muestra en la Figura 4.1:

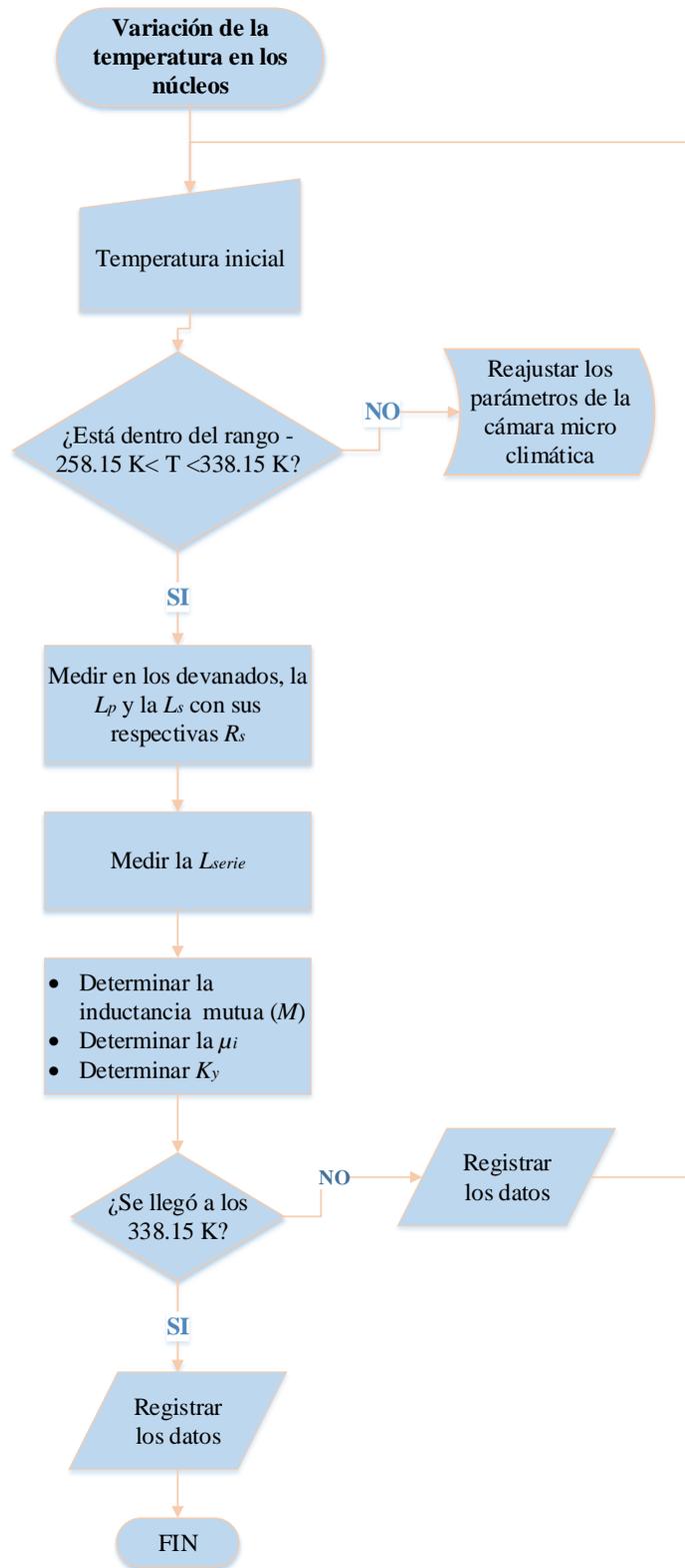


Figura 4.1. Diagrama de flujo para las pruebas de temperatura.

4.2.2 Descripción del procedimiento

En la Tabla 4.1 se tiene la descripción del procedimiento que se llevó a cabo, con base en el diagrama de flujo mostrado en la Figura 4.1.

Tabla 4.1. Descripción del procedimiento que se realizó en la cámara micro climática.

Actividad	Descripción
Paso 1. Establecer eventos de T de 258.15 a 338.15 (K).	Programar la cámara climática para que, en cierto período, varíe de una temperatura a otra.
Paso 2. Variar la frecuencia (de 60 Hz a 60 kHz) y la corriente (de 10 a 60 (mA)) con medidor de inductancias.	Se irá incrementando el valor de la corriente, así como de la frecuencia en el medidor de inductancias LCR.
Paso 3. Medir las inductancias de dispersión en devanados primarios y secundarios (L_1 y L_2).	En circuito abierto se medirán dichos valores en los devanados de los núcleos.
Paso 4. Medir la inductancia serie entre los devanados primario y secundario (L_{total}).	En circuito cerrado se medirán dichos valores en los devanados de los núcleos.
Paso 5. Determinar la inductancia mutua (M), permeabilidad inicial relativa del material (μ_i) y el factor de acoplamiento entre los devanados (K_v).	Operaciones calculadas con las ecuaciones descritas en la base matemática de este capítulo.

4.2.3 Equipo utilizado

- Cámara climática MCH-3-.33-.33-H/AC.
- Medidor de inductancias LCR modelo 3550 de Tegam®.
- Toroides devanados con alambre de cobre.

En la Figura 4.2, se aprecia la cámara micro climática con la cual fue posible manipular la temperatura a la que se sometieron los núcleos, y a un costado se observa el medidor de inductancias que permitió tomar la lectura de los datos.



Figura 4.2. Aparatos eléctricos: a) La cámara micro climática, b) El medidor de inductancias.

4.2.4 Referencias

La norma que avala el procedimiento: ISO 9001 (2008).

- La capacidad para interactuar con la aplicación de almacén de datos existente.
- La capacidad para incorporar enrutamiento y notificaciones automatizados con base en reglas empresariales.

En la Tabla 4.2 se clasifican las muestras del compuesto hierro- resina de forma toroidal, de acuerdo a sus dimensiones:

Tabla 4.2. Clasificación de los núcleos según sus dimensiones.

Probeta N°	De	Di	Ø
1	2.14	1.34	0.95
2	3.48	2.25	1.4
3	4.96	3.06	1.75
N	8.85	7.61	2.2

Nota: De (Diámetro exterior), Di (Diámetro interior), Ø (espesor) de cada núcleo toroidal.

También, en la Tabla 4.3 se han clasificado por colores de acuerdo al porcentaje de hierro que contienen:

Tabla 4.3. Clasificación de los núcleos según sus colores.

Probeta N°	Color	Limadura de Fe %
1 2 3 N	Rosa	0
	Vino	15.3
	Gris	16.7
	Verde olivo	23
	Verde	28.6
	Negro	33.3
	Café	44.4
	Morado	47.4
	Azul	48.7

Para esta prueba se medirá la permeabilidad inicial de cada núcleo. Existen distintas clases o tipos de permeabilidad, a continuación, se describen las más importantes:

4.2.5 Tipos de permeabilidad magnética: la permeabilidad inicial del material compuesto hierro-resina

Debe recordarse que, si se aplica un campo alterno a un material ferromagnético, se obtiene un ciclo de histéresis. Para intensidades de campo muy altas, se alcanza la densidad de flujo máxima. Esta es conocida como densidad de flujo de saturación (Bs).

Si se elimina el campo, el material vuelve a un estado donde, dependiendo del grado del material, un cierto flujo de la densidad permanece. Esta es la densidad de flujo remanente (B_r).

Este flujo remanente vuelve a cero a través de una intensidad de campo magnética negativa, la cual se conoce como coercitividad (H_z) [30].

Estos puntos se muestran claramente en la Figura 4.3:

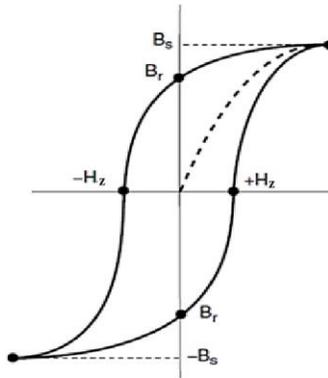


Figura 4.3. Ciclo de histéresis de un material ferromagnético que detalla la trayectoria que presentan B y H .

Asimilando lo anterior, existen diversos tipos de permeabilidad:

- **Permeabilidad inicial.** La permeabilidad inicial se mide en un circuito magnético cerrado (núcleo en anillo) usando una intensidad de campo muy baja.

$$\mu_i = \frac{1}{\mu_0} \times \frac{\Delta B}{\Delta H (\Delta H \rightarrow 0)} \quad (4.1)$$

Donde μ_i es la permeabilidad inicial, μ_0 es la permeabilidad en el vacío y $\frac{\Delta B}{\Delta H}$ es el incremento de la densidad de flujo magnético con respecto a la intensidad de campo magnético.

La permeabilidad inicial depende de la temperatura y frecuencia.

- **Permeabilidad efectiva.** Si un espacio de aire se introduce en un circuito magnético cerrado, la polarización magnética se reduce. Como resultado, la densidad de flujo para una intensidad de campo magnético dada es menor. La permeabilidad efectiva depende de la permeabilidad inicial del material magnético blando y las dimensiones del espacio de aire y el circuito.

$$\mu_e = \frac{\mu_i}{1 + \frac{G \times \mu_i}{I_e}} \quad (4.2)$$

Donde, μ_e es la permeabilidad efectiva, μ_i es la permeabilidad inicial, G es la longitud del espacio de aire e I_e es la longitud efectiva del circuito magnético.

Esta fórmula simple es una buena aproximación solo para pequeños espacios de aire. Para longitudes de aire más largas, parte del flujo cruzará el espacio afuera de su área normal (flujo difuso) causando un aumento de la permeabilidad efectiva.

- **Permeabilidad de amplitud.** La relación entre la fuerza de campo magnético y la densidad de flujo sin la presencia del campo inducido, se da por la permeabilidad de amplitud.

$$\mu_a = \frac{1}{\mu_0} \times \frac{\hat{B}}{\hat{H}} \quad (4.3)$$

Donde μ_a es la permeabilidad de amplitud, μ_0 es la permeabilidad en el vacío y $\frac{\hat{B}}{\hat{H}}$ es la relación entre la fuerza de campo magnético y la densidad de flujo sin la presencia del campo inducido.

Como el lazo $B-H$ está lejos de ser lineal, los valores dependen de la fuerza máxima del campo aplicado.

- **Permeabilidad incremental.** La permeabilidad que se observa cuando un campo magnético alterno se superpone a un campo inducido estático, es llamada la permeabilidad incremental.

$$\mu_\Delta = \frac{1}{\mu_0} \left[\frac{\Delta B}{\Delta H} \right] H_{DC} \quad (4.4)$$

Donde μ_Δ es la permeabilidad incremental, μ_0 es la permeabilidad en el vacío, $\frac{\Delta B}{\Delta H}$ es el incremento de la densidad de flujo magnético con respecto a la intensidad de campo magnético y H_{DC} es el campo inducido estático.

Si la amplitud del campo alterno es despreciablemente pequeña, la permeabilidad es llamada permeabilidad reversible (μ_{rev}).

- **Permeabilidad compleja.** Una bobina que consta de devanados en un núcleo magnético blando nunca será una inductancia ideal con un ángulo de fase de 90 °.

Siempre habrá pérdidas de algún tipo, causando un desplazamiento de fase, que puede representarse por una resistencia en serie o paralela, como se muestra en las Figuras 4.4 (a) y 4.4 (b).

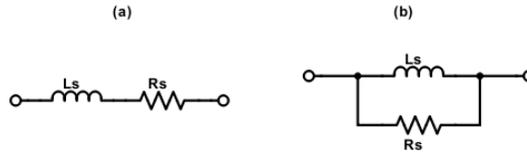


Figura 4.4. Pérdidas por desplazamiento de fase: a) en serie, b) en paralelo.

El estudio de estos términos, lleva las pruebas a la suposición de obtener las permeabilidades iniciales del material, puesto que la magnitud de las corrientes que se está proporcionando a los núcleos devanados es muy pequeña (de 10 a 60 mA). Sin embargo, debido a la naturaleza del compuesto como un material paramagnético, no se presentará una histéresis en el material aparente, por lo que la permeabilidad inicial será lineal de principio a fin durante el ciclo.

4.3 Base matemática para realizar las pruebas de temperatura

Las bases matemáticas necesarias para la realización de las pruebas de temperatura son descritas en esta sección. Las variables nombradas en la Sección 4.3.1 son de aplicación general a todos los núcleos toroidales con una sección transversal rectangular, y se utilizarán en todas las pruebas descritas en los capítulos posteriores.

4.3.1 Variables geométricas de los núcleos toroidales construidos

En la Figura 4.5 se tiene la representación de la cara frontal o superior de un núcleo magnético de forma toroidal, donde De es el diámetro exterior y Di es el diámetro interior. La norma se refiere a núcleos específicamente de forma toroidal. A partir de la Figura 4.5 comienza el desarrollo de ecuaciones para determinar el área de sección transversal (A), la longitud de la trayectoria magnética media (lm) y el volumen (V).

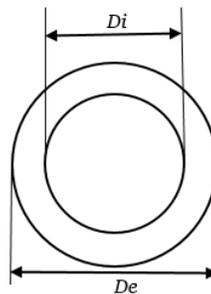


Figura 4.5. Cara superior de un núcleo toroidal.

De acuerdo al diámetro exterior (De) y al diámetro interior (Di), se tienen las siguientes longitudes de trayectoria magnética media:

$$lm_1 = \pi Di \tag{4.5}$$

$$lm_2 = \pi De \quad (4.6)$$

pero al ser longitud promedio:

$$\overline{lm} = \frac{\pi Di + \pi De}{2} \quad (4.7)$$

$$\overline{lm} = \frac{\pi (Di + De)}{2} \quad (4.8)$$

De la fórmula conocida para la densidad de un material δ_m se sabe que, ésta es igual al cociente de la masa (m) entre el volumen del material (V), y a partir de δ_m es posible conocer V .

$$\delta_m = \frac{m}{V} \quad (4.9)$$

$$V = \frac{m}{\delta_m} \quad (4.10)$$

En un núcleo toroidal el área de sección transversal A_c se observa al cortar una sección del mismo, así como sus lados a y b , y la altura h . Lo anterior se muestra en la Figura 4.6.

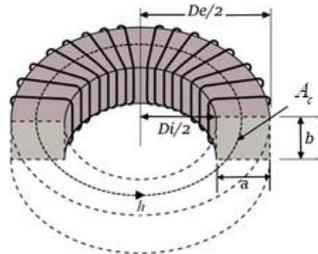


Figura 4.6. Sección de un núcleo toroidal que muestra su A_c , lado a , lado b y la h .

De la Figura 4.6 es posible obtener el V de un núcleo toroidal; como la magnitud del lado a difiere del lado b , se aprecia que, el V de dicho núcleo corresponde al de un ortoedro.

$$V = A_c h \quad (4.11)$$

En la Figura 4.7 se muestran las magnitudes de un ortoedro, para el cual, el área transversal es $A_c = ab$, y la altura del ortoedro equivale a la trayectoria magnética media del núcleo toroidal ($h = lm$).

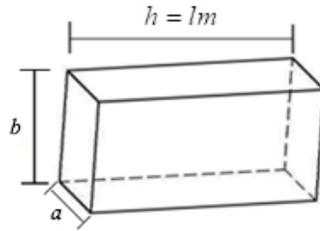


Figura 4.7. Magnitudes de un ortoedro.

despejando A_c :

$$A_c = \frac{V}{lm} \quad (4.12)$$

sustituyendo el V:

$$A_c = \frac{m}{\delta_m lm} \quad (4.13)$$

4.3.2 Deducción de las variables eléctricas y magnéticas involucradas en las pruebas de temperatura

De acuerdo a las dimensiones del núcleo y a la frecuencia (f) de aplicación en que se utilizará, se devanó con un calibre de alambre de cobre según la profundidad piel (δ), como se explicó en el Capítulo 3.

En la Ecuación 4.14 se tiene la referencia matemática de dicho efecto.

$$\delta = \frac{6.62}{\sqrt{f}} [\text{cm}] \quad (4.14)$$

La Ecuación 4.15 permite determinar la inductancia mutua (M); a partir de la Figura 4.8 [52], se mide la inductancia total (L_{total}), la inductancia en el primario (L_1) y la inductancia en el secundario (L_2).

$$L_{total} = L_1 + L_2 + 2M \quad (4.15)$$

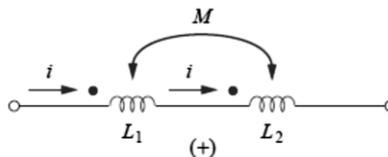


Figura 4.8. Dos bobinas conectadas en serie y devanadas sobre un núcleo magnético [52].

Se partirá de la Ley de Faraday que relaciona la tensión inducida $v(t)$ en una bobina con la derivada de la densidad del flujo magnético B al interior de la misma, como se muestra en la Ecuación 4.16, donde A_c es el área de sección transversal del núcleo toroidal y n es el número de vueltas de la bobina; y la Ley de Ampere que dice que la intensidad de campo magnético $H(t)$ que fluye a través de una trayectoria cerrada, en este caso la trayectoria magnética media del núcleo toroidal lm , es directamente proporcional al número de vueltas n por la corriente neta encerrada en dicha trayectoria $i(t)$, como se muestra en la Ecuación 4.17, para la deducción de las ecuaciones siguientes.

Para el cálculo de la permeabilidad magnética relativa (μ_r), de cualquiera de los núcleos magnéticos elaborados (véase la Ecuación 4.18), es importante tener conocimiento de la trayectoria magnética media (lm) del núcleo, la inductancia mutua (M), la constante de permeabilidad en el vacío (μ_0), el número de vueltas en los devanados (n), así como su área de sección transversal (A_c), en el sistema internacional de unidades.

$$v(t) = nA_c \frac{dB(t)}{dt} \quad (4.16)$$

$$H(t)lm = ni(t) \quad (4.17)$$

$$\mu_r = \frac{lm}{\mu_0 n^2 A_c} M \quad (4.18)$$

Para calcular la intensidad de campo magnético, se utilizó la Ecuación 4.19 (donde I_{pRMS} es la corriente RMS medida en el devanado primario), mientras que, para conocer la densidad de campo magnético se tuvo la Ecuación 4.20 (donde E_f es la tensión eficaz medido en el devanado secundario) y, para obtener la susceptibilidad magnética χ se contempló la Ecuación 4.21.

Finalmente, el acoplamiento magnético (K_y) entre los devanados del núcleo magnético se calculó utilizando la Ecuación 4.22, donde M es la inductancia mutua, y L_1 , L_2 son las inductancias en el devanado primario y secundario, respectivamente.

$$H_z = \frac{nI_{pRMS} \sqrt{2}}{lm} \quad (4.19)$$

$$B_{m\acute{a}x} = \frac{E_f}{\sqrt{2} N_2 A_c \pi f} \quad (4.20)$$

$$\chi = \mu_r - 1 \quad (4.21)$$

$$K_y = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (4.22)$$

Las pruebas de temperatura se efectuaron en 27 núcleos de dimensiones similares a los de ferrita y 9 núcleos de dimensiones normalizadas. Pese a que se cuenta con el registro del total de 36 núcleos, sólo se presentan las tablas de registro de los 9 toroides clase N con sus respectivos resultados. La razón principal de esto, es que, al realizar las mediciones, los valores de los núcleos de cada color (sin importar sus dimensiones o su tipo de clasificación) fueron similares, pero los núcleos que resultaron con el mejor acoplamiento magnético correspondieron a la clase N. Los registros de los datos obtenidos en las mediciones se anexan en el Apéndice D.1.

4.4 Resultados gráficos de las pruebas de temperatura

Las especificaciones en estas pruebas fueron los que se muestran en la Tabla 4.4:

Tabla 4.4. Especificaciones para las pruebas de temperatura.

Temperatura (T)	Frecuencia (f)	Corriente (I)
258.15 K - 338.15 K	60 Hz - 60 kHz	10 mA – 60 mA

Los resultados de las pruebas de temperatura a los núcleos clase N que se elaboraron con el material SMC hierro - resina, se registraron en la Tabla 4.5.

En dicha tabla se muestran los valores del porcentaje de hierro con respecto a la masa total (p_2), la inductancia total (L_{total}), la inductancia en el primario (L_1), la inductancia en el secundario (L_2), la resistencia en el primario (R_p) y en el secundario (R_s) en correspondencia al color del núcleo.

Fue a partir de las ecuaciones 4.6, 4.9 y 4.13 que se determinaron las variables de la Tabla 4.5: La inductancia de magnetización (M), la permeabilidad inicial (μ_i) y el factor de acoplamiento (K_y) también mostrados en la Tabla 4.5.

En general, las características de los 9 núcleos fueron:

- Número de vueltas en el primario $n_1 = 210$
- Número de vueltas en el secundario $n_2 = n_1$
- Área de sección transversal $A_c = 0.00000802 \text{ m}^2$
- Trayectoria magnética media $lm = 0.26 \text{ m}$

Tabla 4.5. Permeabilidad inicial y factor de acoplamiento de los núcleos clase N.

Color del núcleo	$p2$ %	L_{total} (H)	L_1 (H)	L_2 (H)	R_p (Ω)	R_s (Ω)	M (A/m)	μ_i	K_y
Rosa	0	81.9u	21.6u	21.7u	0.99	1.00	19.3u	1.1	89.1%
Vino	15.3	86.8u	23.2u	23.1u	1.01	1,00	20.2u	1.2	87.5%
Gris	16.7	99.8u	26.3u	26.2u	1.08	1.08	23.6u	1.4	90%
Verde olivo	23	101.8u	26.8u	26.6u	0.98	0.97	24.2u	1.42	90.6%
Verde	28.6	105.9u	27.9u	28.1u	1.18	1.18	25u	1.46	89.1%
Negro	33.3	113u	29.8u	29.6u	1.06	1.05	26.8u	1.6	90.2%
Café	44.4	128.8u	33.1u	33.5u	1.02	1.02	31.1u	1.82	93.4%
Morado	47.4	143.8u	37u	37u	1.01	1.02	34.9u	1.88	94.3%
azul	48.7	142.8u	37.2u	37u	1.03	1.00	34.3u	2	92.5%

La Figura 4.9 muestra la representación gráfica de los resultados de la permeabilidad magnética inicial en los núcleos clase N elaborados con el material compuesto hierro- resina, así como el efecto que tuvo la frecuencia en todo el lapso. La frecuencia no causó cambios significativos en la permeabilidad inicial de ninguno de los 9 núcleos clase N.

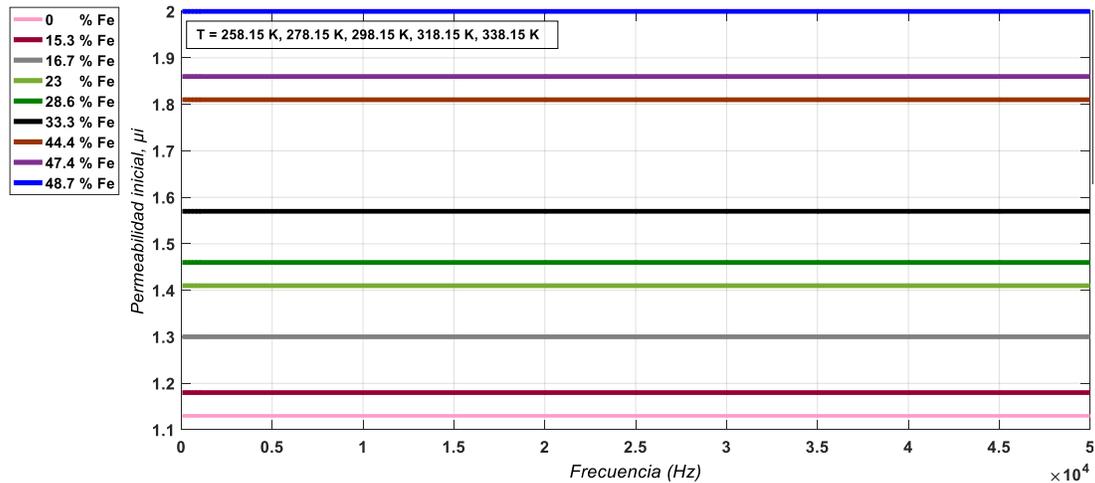


Figura 4.9. Permeabilidad magnética de núcleos clase N al variar la frecuencia y la temperatura.

4.5 Observaciones

Las estimaciones de la permeabilidad relativa fueron más confiables cuando se basaron en las mediciones de las inductancias de los toroides clase N, ya que presentaron el mejor acoplamiento magnético entre las diversas clases elaboradas de núcleos.

La frecuencia se varió de 60 Hz a 60 kHz puesto que a estos valores el medidor de inductancia tomaba lecturas estables.

Nota:

La máxima temperatura de distorsión por calor de la resina fue evaluada por los fabricantes, basándose en la norma ASTM D648 “*Standard Test Method for Deflection Temperature of Plastics Under Flexural Load in the Edgewise Position*” que predice el comportamiento de los materiales plásticos a temperaturas elevadas.

4.6 Conclusiones

Se realizaron pruebas de temperatura, en un rango de 258.15 a 338.15 (K), al SMC hierro-resina, de acuerdo a dos criterios; la temperatura más baja, según las características de la cámara climática, y la más alta, en relación a la temperatura de distorsión por calor del material (la resina).

Se determinó la variación de la permeabilidad magnética de los núcleos clase N elaborados, al ser magnetizados con corrientes de 10 a 60 (mA).

CAPÍTULO 5. PRUEBAS EN BAJA FRECUENCIA

La naturaleza paramagnética del material compuesto por hierro y resina predecía la aplicación de los núcleos elaborados en alta frecuencia. Sin embargo, se decidió desarrollar la caracterización del material abarcando su experimentación en pruebas de baja frecuencia, y no sólo en alta frecuencia.

El punto fue observar su comportamiento ante muy pequeñas inyecciones de corriente. Puesto que la proporción de hierro más alta fue de 48.7% para el núcleo azul, se optó por realizar esta prueba únicamente a dicho núcleo.

5.1 Objetivo y alcance de la prueba

- Aplicar señales de tensión y corriente sinusoidales a los especímenes del material propuesto al realizar pruebas en baja frecuencia para observar su comportamiento a partir de la determinación de sus características magnéticas obtenidas.
- Registrar los resultados para cada tipo de núcleo.

5.2 Procedimiento y desarrollo de las pruebas en baja frecuencia

5.2.1 Diagrama de flujo

En esta sección se describirá el procedimiento y desarrollo de las pruebas en baja frecuencia.

El diagrama de flujo del proceso se muestra en la Figura 5.1:

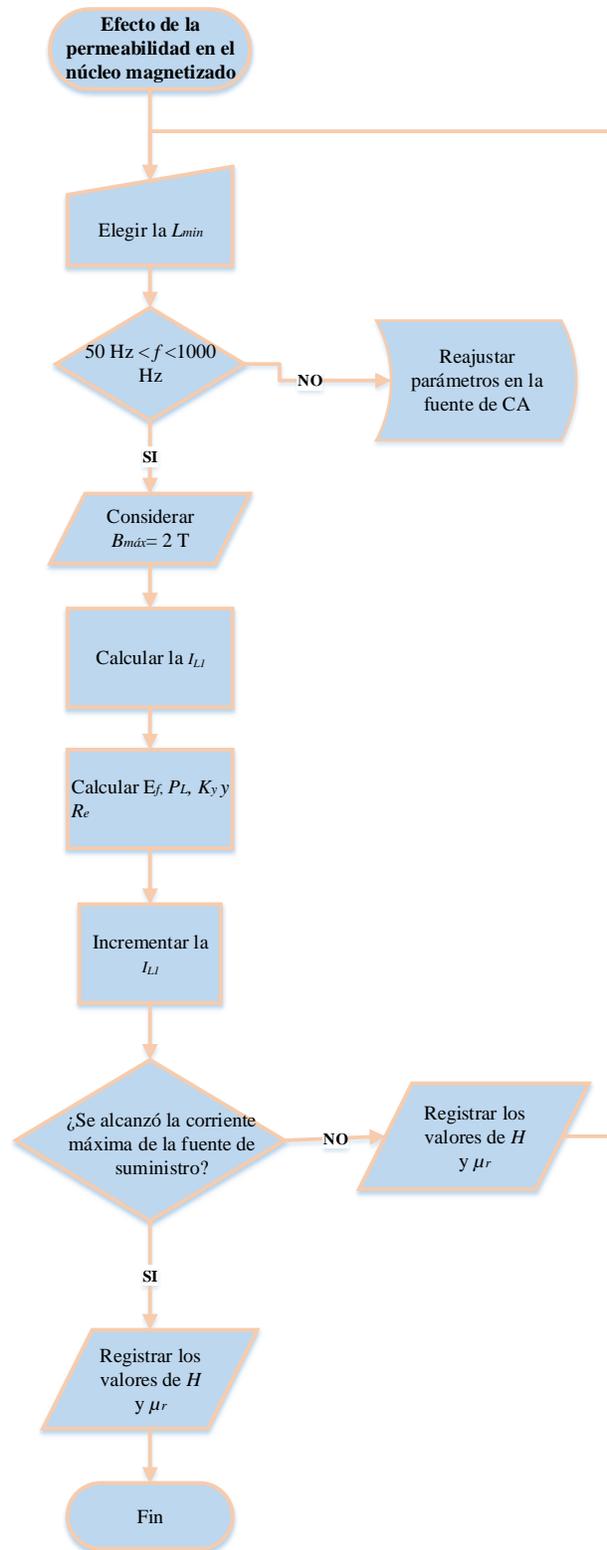


Figura 5.1. Diagrama de flujo para las pruebas en baja frecuencia.

5.2.2 Descripción del procedimiento

En la Tabla 5.1 se tiene la descripción del procedimiento que se llevó a cabo en base al diagrama de flujo mostrado en la Figura 5.1.

Tabla 5.1. Descripción del procedimiento que se realizó en el proceso de magnetización del toroide.

Actividad	Descripción
Paso 1. Mediciones de inductancia de los núcleos en rangos de frecuencia de 50, 60, 200, 400, 600, 800 y 1000 (Hz).	Utilizar el medidor de inductancias para realizar las mediciones.
Paso 2. Selección del valor de la L_{min} (mínima inductancia) para cada tipo de núcleo.	Comparar los resultados para cada tipo de toroide y seleccionar el menor valor de inductancia.
Paso 3. Asignar 2 T al valor de la densidad de flujo magnético ($B_{máx}$).	Este valor puede disminuirse o aumentarse, de acuerdo al resultado final de la prueba.
Paso 4. Calcular la I_{LI} (corriente eficaz) que se puede aplicar al núcleo.	En función de la densidad de flujo magnético, el número de vueltas, área de sección transversal e inductancia mínima del espécimen.
Paso 5. Calcular la P_L (potencia en el inductor) y el K_y (factor de acoplamiento).	En función de las anteriores, más el producto de la resistencia serie. El factor de acoplamiento como relación de la inductancia mutua y la autoinductancia del primario.
Paso 6. Calcular el E_p (tensión de salida eficaz) mediante la relación efectiva de vueltas.	La relación efectiva de vueltas es la relación entre la autoinductancia en el secundario y en el primario.
Paso 7. Calcular la R_e (resistencia del réostato).	Depende de la tensión a la salida, la corriente máxima y la reactancia del devanado en el núcleo.
Paso 8. Incrementar la I_{LI} .	Basándose en la norma ASTM A772/A772M.
Paso 9. Registrar los valores de H y μ_r para determinar el efecto de la permeabilidad magnética en el núcleo probado.	Reportar si se saturó el espécimen, registrar el dato o datos obtenidos de la experimentación.

5.2.3 Equipo utilizado

- Fuente de corriente sinusoidal.
- Medidor de inductancias.
- Núcleos devanados con alambre de cobre.
- Multímetro.

5.3 Conexión eléctrica con base en la norma ASTM A772/A772M

La norma ASTM A772/A772M [36], sugiere el diagrama eléctrico que se muestra en la Figura 5.2 para realizar las pruebas de caracterización de materiales.

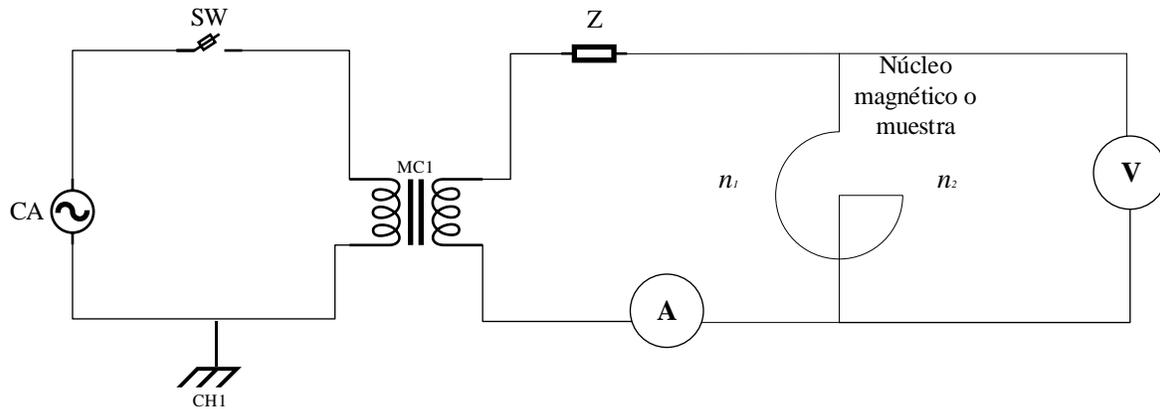


Figura 5.2. Diagrama eléctrico sugerido en la norma ASTM A772/A772M [36] para la caracterización de materiales.

En la Figura 5.2 se muestra la entrada de corriente sinusoidal (CA), seguida de un interruptor de protección (SW) y un autotransformador MC1 (en el interior de la fuente de CA), enseguida la impedancia (Z), enseguida la muestra o núcleo magnético con devanado primario y secundario. También se observan los instrumentos de medición (amperímetro A y voltímetro V) sugeridos por dicha norma.

A continuación, en la Figura 5.3 se muestra el diagrama de la Figura 5.2 adaptado a las condiciones particulares de este trabajo, donde se asume que la impedancia Z es de naturaleza predominantemente resistiva de valor aproximado al del reóstato R_e y el núcleo se caracteriza como un par de inductores acoplados magnéticamente. La Figura 5.3 se usará como base para el desarrollo de ecuaciones que se verá más adelante.

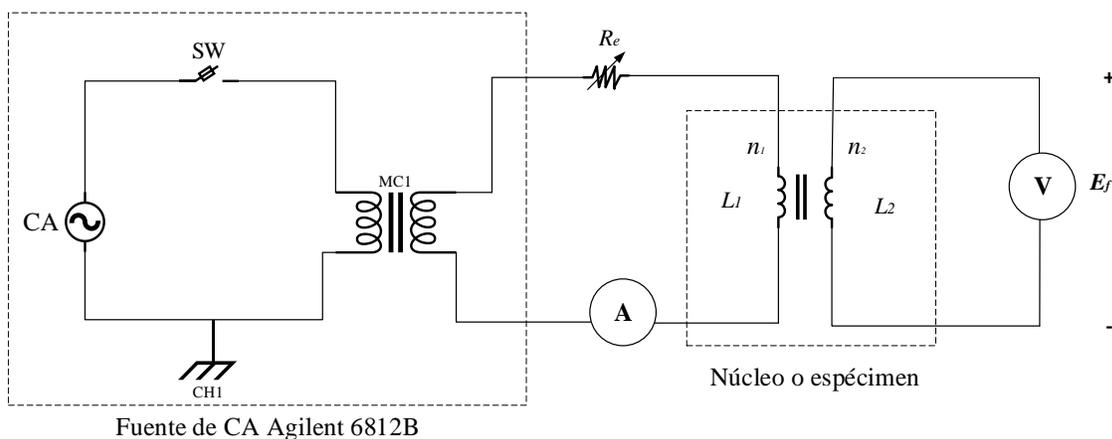


Figura 5.3. Diagrama eléctrico de la norma ASTM A772/A772M [36] adaptado a las condiciones de trabajo.

En la Figura 5.3 se indican los elementos que conforman a la fuente de CA Agilent 6812B, así como la disposición eléctrica de los devanados de un núcleo magnético con sus respectivas inductancias (L_1 , L_2) y, en lugar de una impedancia, utiliza con un reóstato (R_e).

Aunque se pretendía que los rangos de frecuencias para estas pruebas fueran de: 50, 60, 200, 400, 600, 800 y 1000 Hz, la fuente de corriente senoidal utilizada tuvo problemas técnicos para permitir la toma correcta de los datos a las frecuencias por debajo de 1 kHz.

Con base en la observación anterior, se realizaron pruebas a mayor frecuencia (1 kHz), en el núcleo clase N de tono azul, para observar si se conseguía una mejor forma de onda sinusoidal de tensión a la salida. Para dicha prueba, se inyectaron corrientes en el devanado primario del núcleo clase N en tono azul incrementando la inyección de corriente desde 141 mA hasta 3.3 A, así como de forma decreciente. Lo anterior, con el propósito de visualizar si se presentaba cierta histéresis. Los datos obtenidos en esta prueba se encuentran en el Apéndice D.2.

5.4 Base matemática para realizar las pruebas de magnetización en baja frecuencia a los núcleos

La importancia de estas pruebas fue conocer las características magnéticas del material o su comportamiento en baja frecuencia. Para conocer las características magnéticas del material en baja frecuencia, primero se desarrolló una base matemática para determinar y calificar su comportamiento.

En la Figura 5.4 se muestra el diagrama simplificado del circuito de pruebas, donde la fuente de alimentación Agilent modelo 6812B que suministra energía al circuito se representa por medio de la fuente V_{ent} , el resistor R_e representa al reóstato cuya función es limitar el valor eficaz de la corriente máxima en el devanado primario I_{L1} , y el resistor R_s es la resistencia en serie equivalente del devanado primario, cuya inductancia es L_1 ; L_2 es la inductancia del devanado secundario, entre cuyas terminales se toma la lectura del valor de E_f . A continuación, se muestran las expresiones matemáticas de los valores máximos posibles de tensión, corrientes y potencia a los que se sometieron los inductores devanados sobre la muestra.

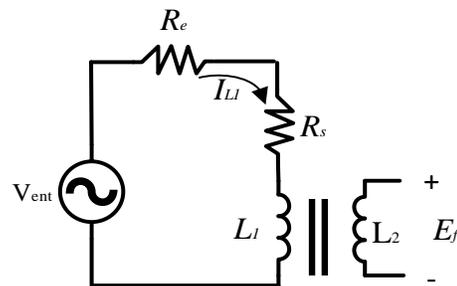


Figura 5.4. Diagrama eléctrico.

De la Figura 5.4 y de acuerdo a la norma ASTM A772/A772M [36] se tiene que:

$$B_{m\acute{a}x} = \frac{E_f}{\sqrt{2\pi f n_2 A_C}} \quad (5.1)$$

Donde E_f es la tensión eficaz inducido entre las terminales del devanado secundario cuando su densidad de flujo tiene una magnitud igual a $B_{m\acute{a}x}$, en este caso f es la frecuencia de la corriente sinusoidal introducida en el devanado primario, n_2 es el número de vueltas del devanado secundario, y A_c es el área transversal de la muestra (para mayor información, véase la Sección 4.3.1).

A partir de la Ecuación (5.1) se obtiene el valor de E_f requerido entre las terminales del devanado secundario para lograr la densidad de campo magnético esperada $B_{m\acute{a}x}$.

$$E_f = B_{m\acute{a}x} \sqrt{2\pi n_2 A_c} \quad (5.2)$$

Tomando en cuenta que el valor máximo del acoplamiento magnético entre los inductores devanados sobre la muestra es 1, y que ambos devanados tienen el mismo número de vueltas, el valor máximo posible de E_f será:

$$E_f = I_{L1} X_{L1} \quad (5.3)$$

Donde X_{L1} es la magnitud de la reactancia inductiva del devanado primario expresada como:

$$X_{L1} = \omega L_1 \quad (5.4)$$

Y, ω es la frecuencia de la corriente de entrada expresada en rad/s, por lo que:

$$X_{L1} = 2\pi f L_1 \quad (5.5)$$

Sustituyendo la Ecuación (5.5) en la (5.3), se obtiene la Ecuación (5.6) que permite obtener el máximo valor posible de E_f .

$$E_f = I_{L1} 2\pi f L_1 \quad (5.6)$$

Al igualar las Ecuaciones (5.2) y la (5.6):

$$B_{m\acute{a}x} \sqrt{2\pi n_2 A_c} = I_{L1} 2\pi f L_1 \quad (5.7)$$

al despejar el valor de I_{L1} requerido para obtener la máxima densidad de flujo magnético en el secundario $B_{m\acute{a}x}$:

$$I_{L1} = \frac{B_{m\acute{a}x} \sqrt{2n_2 A_c}}{2L_1} \quad (5.8)$$

Para que la densidad de flujo magnético sea máxima ($B_{m\acute{a}x}$) debe contemplarse que, la inductancia (L) elegida de cada espécimen sea la mínima (L_{min}). De esta forma, la corriente que se proporcionará también será la máxima.

$$I_{L1} = \frac{B_{m\acute{a}x} \sqrt{2n_2 A_c}}{2L_{min}} \quad (5.9)$$

Es conocido que I_{L1} también puede obtenerse de Ecuación (5.10):

$$I_{L1} = \sqrt{\frac{P_L}{R_s}} \quad (5.10)$$

Cuando la densidad de flujo magnético en el secundario es $B_{m\acute{a}x}$ la máxima potencia posible disipada por el devanado primario P_{L1} puede expresarse mediante la Ecuación (5.11):

$$P_{L1} = I_{L1}^2 \times R_{se} \quad (5.11)$$

donde R_{se} es la suma de los elementos resistivos en serie con el devanado primario R_s y R_e . Sustituyendo la Ecuación (5.9) en la (5.11):

$$P_{L1} = \frac{B_{m\acute{a}x}^2 n_2^2 A_c^2}{2(L_1)^2} \times R_{se} \quad (5.12)$$

De las ecuaciones utilizadas para las pruebas de temperatura, el factor de acoplamiento K_y se calculó con la expresión:

$$K_y = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (5.13)$$

Donde:

M = inductancia serie mutua.

L_1 = inductancia en el primario.

L_2 = inductancia en el secundario.

El factor K_y está definido en el siguiente intervalo: $0 < K_y < 1$

Por otro lado, la relación efectiva de vueltas en un inductor η_e se determina con:

$$\eta_e = \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \quad (5.14)$$

De la relación eléctrica existente para transformadores (Figura 5.5), es posible encontrar E_f en función de la tensión suministrada al devanado primario V_p , asumiendo un factor de acoplamiento máximo ($K_y = 1$):

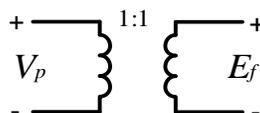


Figura 5.5. Relación eléctrica en transformadores.

$$\sqrt{\frac{L_2}{L_1}} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{E_f}{V_p} = \frac{n_2}{n_1} \quad E_f = \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} V_p \quad (5.15)$$

La sección encerrada en rojo en la Figura 5.6 (a) muestra la conexión del inductor L_1 con su respectiva resistencia serie R_s ; ya que se espera que $R_s \ll R_e$; en la Figura 5.6 (b) se ha simplificado la impedancia del primario a solo su reactancia inductiva X_{L1} .

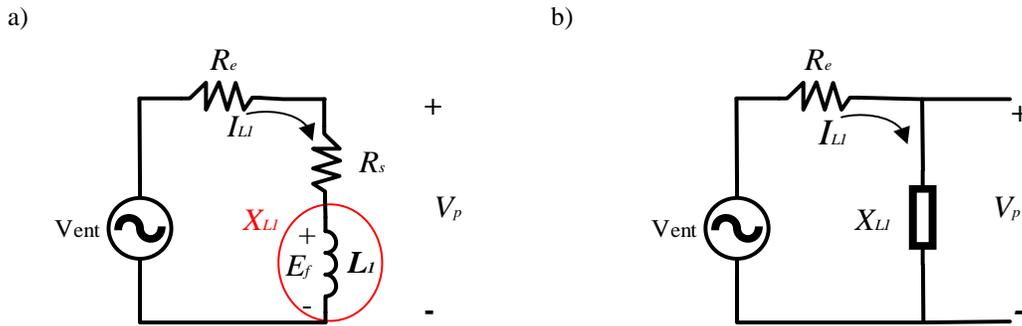


Figura 5.6. Circuitos eléctricos a) Al desprejar el valor de R_s , b) Resultado de la simplificación a X_{L1} .

A partir de la Figura 5.6 (b), se observa que la corriente I_{L1} se puede calcular como:

$$I_{L1} = \frac{V_p}{\sqrt{R_e^2 + X_{L1}^2}} \quad (5.16)$$

Y para obtener el valor del réostato R_e que permite obtener una corriente con magnitud I_{L1} se encuentra a partir de la Ecuación (5.16):

$$R_e = \sqrt{\frac{V_p^2}{I_{L1}^2} - X_{L1}^2} \quad (5.17)$$

El valor máximo de la intensidad de campo magnético H se puede calcular cuando se conoce el valor de la I_{L1} suministrada al devanado primario, donde lm es la longitud de la trayectoria magnética media (para mayor información de lm véase la Sección 4.3.1):

$$H = \frac{n_1 I_{L1} \sqrt{2}}{lm} \quad (5.18)$$

Por último, el valor de la permeabilidad relativa del material (μ_r) puede calcularse con la Ecuación (5.19).

$$\mu_r = \frac{B_{m\acute{a}x}}{H \mu_0} \quad (5.19)$$

NOTA: Se consideró como máximo $V_{sal} = 10$ V, para un máximo de potencia disipada de 10 W y, se asumió una densidad de flujo magnético, $B_{m\acute{a}x} = 2$ T.

5.5 Resultados gráficos de las pruebas en baja frecuencia

Como se mencionó anteriormente, la fuente de corriente sinusoidal utilizada presentó problemas técnicos para permitir la toma correcta de los datos a las frecuencias por debajo de 1 kHz.

Las especificaciones para estas pruebas se muestran en la Tabla 5.2:

Tabla 5.2. Especificaciones para las pruebas en baja frecuencia.

Temperatura (T)	Frecuencia (f)	Corriente (I)
298.15 K	50 Hz - 1 kHz	141 mA - 3.3 A

En la Figura 5.7 se muestra que, a baja frecuencia (50 Hz), la tensión suministrada por la fuente de CA contenía mucho ruido, y esto provocó que la tensión inducida en el devanado secundario (V_{sal}) perdiera la forma sinusoidal.

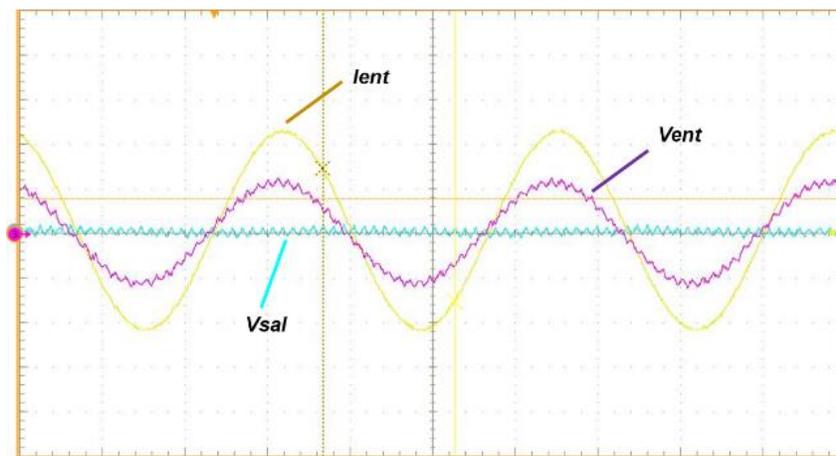


Figura 5.7. Ruido producido por la tensión suministrada por la fuente de CA a 50 Hz.

La Figura 5.8 muestra la representación gráfica de los datos obtenidos a 1 kHz (1 ms/div):

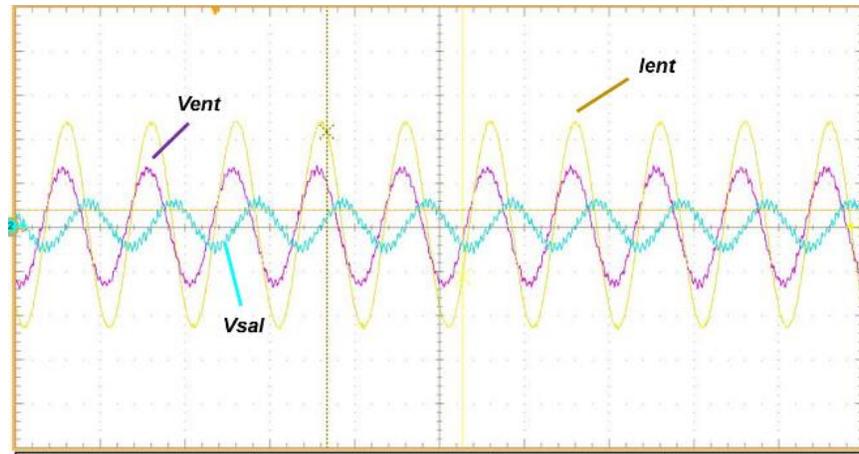


Figura 5.8. Formas de onda inducidas a 1 kHz.

La Figura 5.9 muestra el comportamiento magnético de un núcleo con 48.7% Fe (color azul) bajo las restricciones antes mencionadas:

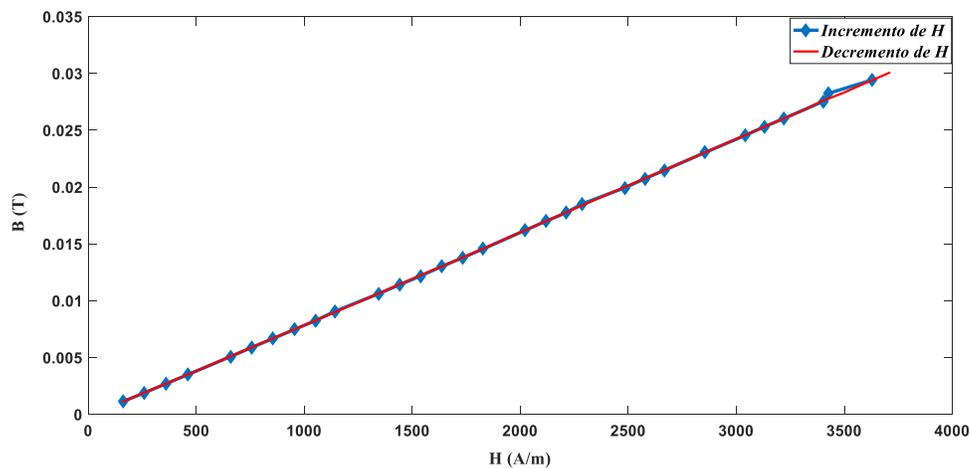


Figura 5.9. Comportamiento magnético de un núcleo clase N en tono azul, B vs. H .

En la Figura 5.9 se observa la nula existencia de histéresis en el núcleo clase N con 48.7 % Fe (tono azul), del material compuesto por hierro y resina.

5.6 Conclusiones

Se aplicaron valores de tensión y corriente de CA, en orden ascendente y descendente, al núcleo clase N que posee 48.7 % Fe (color azul) en baja frecuencia (de 50 Hz a 1 kHz); se magnetizó el núcleo y se observó la nula existencia de histéresis en la curva $B-H$. En conclusión, puesto que los demás núcleos elaborados contienen valores por debajo de 48.7 % Fe, ninguno de los núcleos clase N presentó histéresis magnética con estas pruebas.

CAPÍTULO 6. PRUEBAS EN ALTA FRECUENCIA

En los Capítulos 4 y 5 se observó en el material compuesto por hierro y resina la existencia nula de saturación magnética. Lo anterior apoyó hasta este punto, las previstas conclusiones respecto al tipo de material magnético que se había desarrollado y sus posibles contribuciones en aplicaciones de alta frecuencia.

A continuación, se tienen las pruebas en alta frecuencia, las cuales también siguieron una estructura mediante un protocolo estipulado.

6.1 Objetivo y alcance de la prueba

- Realizar pruebas a alta frecuencia en los núcleos clase N mediante la inyección de señales de tensión y corriente de CA, para analizar el comportamiento del material a partir de la determinación de sus características magnéticas obtenidas
- Registrar los resultados de las características magnéticas obtenidas para cada clase y color de núcleo.

6.2 Procedimiento y desarrollo de las pruebas en baja frecuencia

6.2.1 Diagrama de flujo

En esta sección se describirá el procedimiento y desarrollo de las pruebas en alta frecuencia bajo los criterios que se siguieron en el protocolo de pruebas (Apéndice C).

El diagrama de flujo del proceso se muestra en la Figura 6.1:

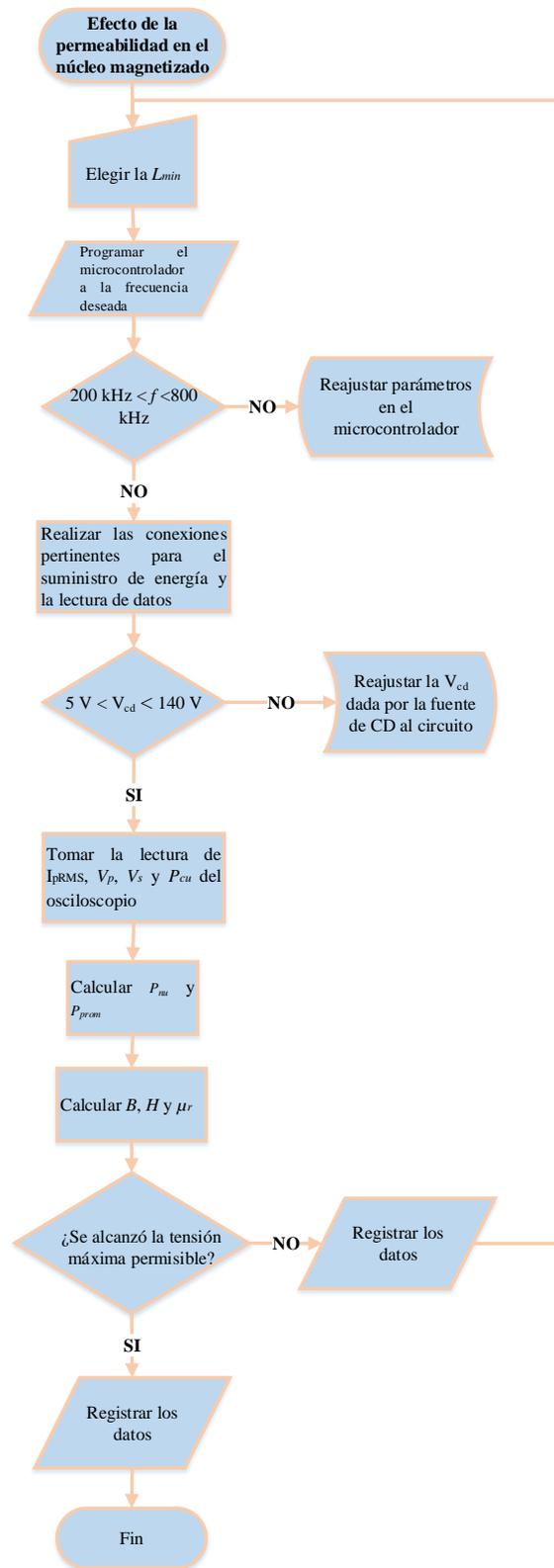


Figura 6.1. Diagrama de flujo para las pruebas en alta frecuencia.

6.2.2 Descripción del procedimiento

En la Tabla 6.1 se tiene la descripción del procedimiento que se llevó a cabo con base en el diagrama de flujo mostrado en la Figura 6.1:

Tabla 6.1. Descripción del procedimiento que se realizó en el proceso de magnetización del toroide.

Actividad	Descripción
Paso 1. Medición de la inductancia de los núcleos devanados con alambre de cobre 30 AWG.	Utilizar el medidor de inductancias para realizar las mediciones.
Paso 2. Selección del valor de la mínima inductancia para cada clase de núcleo.	Comparar los resultados para cada clase de núcleo y seleccionar el menor valor de inductancia.
Paso 3. Ajustar el microcontrolador a la frecuencia deseada.	Las frecuencias a las que se trabajará son: 200, 600 y 800 kHz.
Paso 4. Proporcionar la tensión al inversor con la fuente de CD de alta potencia (en el rango $5\text{ V} < V_{cd} < 140\text{ V}$).	Este valor puede disminuirse o aumentarse, de acuerdo al resultado final de la prueba.
Paso 5. Registrar la I_{rms} inducida en el primario, el V_P , el V_s y las pérdidas en el cobre, P_{cu} .	La lectura de estos datos se tomará con el empleo del osciloscopio, el cual permitirá observar la forma de onda senoidal a la salida del inversor.
Paso 6. Calcular la B (densidad de flujo magnético), la H (intensidad de campo magnético) y la μ_r (permeabilidad relativa del núcleo).	En función de las ecuaciones dadas por la norma ASTM A772/A772M.
Paso 7. Calcular la P_{nu} (potencia en el núcleo) y la P_{prom} (potencia total).	Con base en los cálculos que se tienen para determinar dichos datos.
Paso 8. Calcular la χ (susceptibilidad magnética).	Con la Ecuación (4.21).
Paso 9. Determinar el efecto de la permeabilidad magnética en el núcleo probado.	Reportar si se saturó el espécimen, registrar el dato o datos obtenidos de la experimentación.

6.2.3 Equipo utilizado

- Fuente de CD de alta potencia.
- Medidor de inductancias.
- Núcleos devanados con alambre de cobre.
- Multímetro.
- Osciloscopio.
- Circuito inversor medio puente.

6.3 Conexión eléctrica en base a la norma ASTM A772/A772M

Las pruebas a alta frecuencia se realizaron con un inversor resonante, alimentado por una fuente de CD de alta potencia que suministró tensiones de CD en rangos 5, 20, 35, 50, 65, 80, 95, 110, 125 hasta 140 (V).

La base matemática anterior se desglosó del estudio de la norma ASTM A772/A772M [36], y se implementó el circuito eléctrico mostrado en la Figura 6.2 para realizar las pruebas de caracterización del material. Esta configuración se adaptó a partir del circuito mostrado en la Figura 5.2 (del Capítulo 5). Las formas de onda de corriente y tensión presentes en los inductores devanados alrededor del material a caracterizar, son iguales a los suministrados por la configuración original.

En Figura 6.2 el inversor resonante, alimentado por una fuente de CD, actúa como la fuente de CA mostrada en la Figura 5.2 que es la encargada de suministrar la corriente sinusoidal al devanado primario, para inducir una tensión sinusoidal de CA entre las terminales del devanado secundario, cumpliendo así con lo estipulado por la norma.

Al utilizar esta configuración se logró prescindir de la impedancia Z , sugerida por la norma [36] para limitar la corriente en el devanado primario (que en la práctica tendría un valor aproximado al del reóstato R_e de la configuración original) y también se prescindió del transformador limitador de la tensión de entrada MC1, ya que en esta configuración la tensión y la corriente a la salida del inversor resonante son regulados con la tensión de CD a la entrada del inversor.

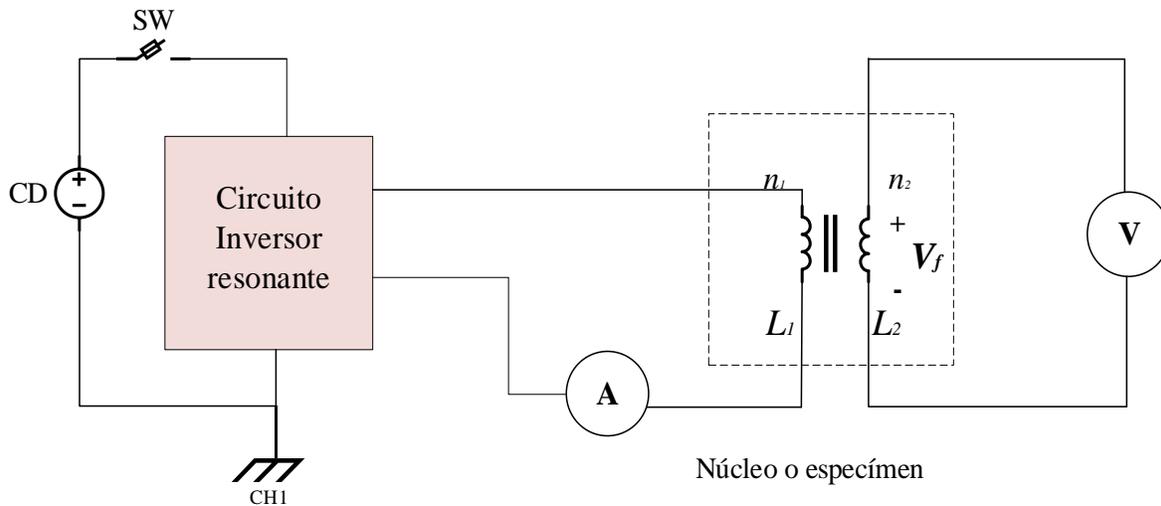


Figura 6.2. Diagrama eléctrico de la norma ASTM A772/A772M adaptado para las pruebas en alta frecuencia.

Las frecuencias de trabajo fueron en rangos de 200, 600 y 800 (kHz).

En la Figura 6.3 se muestra, a manera de ejemplo, una de las formas de onda obtenidas para el caso del núcleo morado (que contiene 47.4 % Fe) a la frecuencia de 600 kHz cuando se aplicó una V_{cd} de 5 V a la entrada del inversor resonante.

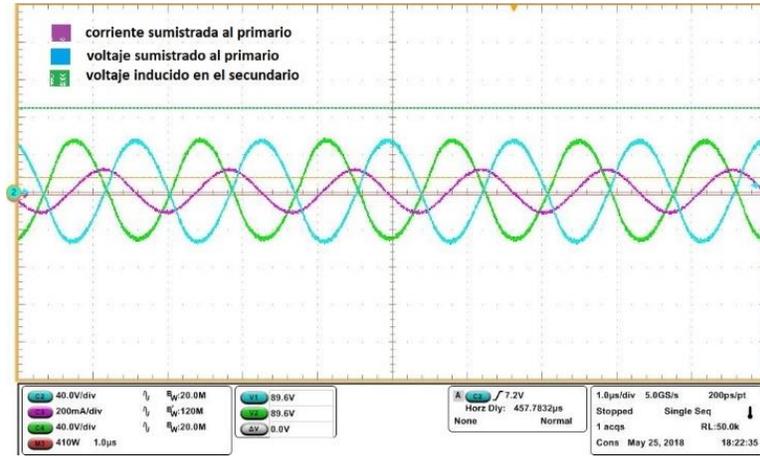


Figura 6.3. Formas de onda suministradas al inversor para el caso del núcleo morado, a 600 kHz.

6.4 Base matemática dada por la norma ASTM A772/A772M para caracterizar núcleos magnéticos en alta frecuencia

En términos generales, según la ley de Ampere, la intensidad de campo magnético H en una trayectoria cerrada l es proporcional a la corriente encerrada por dicha trayectoria, I_{enc} . Cuando la ley de Ampere es aplicada a un inductor de n vueltas, con una trayectoria magnética media lm , por el que circula una corriente senoidal con un valor pico I_{pmax} , se sabe que:

$$\oint Hdl = I_{enc} = nI_p \quad (6.1)$$

$$\vec{H}_z lm = nI_{pmax} \quad (6.2)$$

$$H_z = \frac{nI_{pmax}}{lm} \quad (6.3)$$

donde, se parte de la corriente instantánea en el devanado primario $i_p(t)$ para determinar la corriente máxima en el devanado primario I_{pmax} :

$$i_p(t) = I_{pmax} \sin \omega t \quad (6.4)$$

$$I_{pRMS} = \frac{I_{pmax}}{\sqrt{2}} \quad (6.5)$$

$$I_{pm\acute{a}x} = \sqrt{2} \times I_{pRMS} \quad (6.6)$$

por lo cual,

$$H_z = \frac{nI_{pRMS} \sqrt{2}}{lm} \quad (6.7)$$

En un par de inductores magnéticamente acoplados con un núcleo toroidal y sin carga en el secundario, el acoplamiento magnético entre los devanados se muestra en la Figura 6.4.

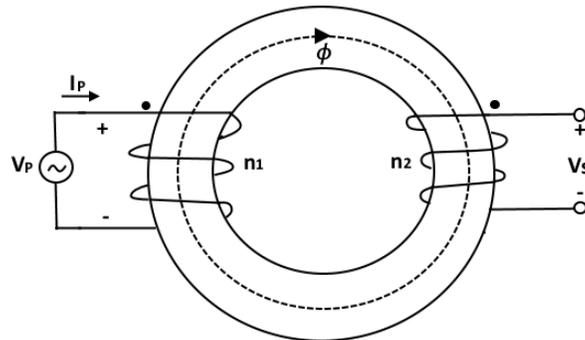


Figura 6.4. Acoplamiento magnético entre los devanados de un par de inductores que poseen un núcleo toroidal.

De la Figura 6.4, la tensión en el secundario está dado por:

$$V_s(t) = n_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (6.8)$$

donde el flujo magnético es $\phi = B \times A_c$, y A_c es el área de sección transversal del núcleo toroidal. Debido a lo anterior, V_s expresado en términos de la variación de la densidad del flujo magnético B queda como:

$$V_s(t) = n_2 A_c \frac{dB}{dt} \quad (6.9)$$

y despejando la razón de cambio de la densidad de flujo magnético con respecto al tiempo:

$$\frac{dB}{dt} = \frac{V_s(t)}{n_2 A_c} \quad (6.10)$$

donde la tensión en el secundario es una onda sinusoidal con una frecuencia de ω rad/s y una amplitud pico de E_p Volts.

$$V_s(t) = E_p \sin \omega t \quad (6.11)$$

por lo tanto, del valor eficaz de la tensión en el secundario, se tiene que:

$$E_f = \frac{E_p}{\sqrt{2}} \quad (6.12)$$

por lo que el valor pico de la tensión en el secundario, expresado en términos de su valor eficaz es:

$$E_p = \sqrt{2} E_f \quad (6.13)$$

La expresión para determinar la densidad de flujo máxima, $B_{m\acute{a}x}$ está dada por:

$$B_{m\acute{a}x} = \frac{1}{n_2 A_c} \frac{1}{\omega} \int_0^{\frac{T}{2}} V_s(t) \omega dt \quad (6.14)$$

sustituyendo a (6.11) en (6.14) y resolviendo la integral:

$$B_{m\acute{a}x} = \frac{E_p \cos \omega t}{n_2 A_c \omega} \quad (6.15)$$

sustituyendo para encontrar $B_{m\acute{a}x}$ a partir del valor de la tensión eficaz en el secundario:

$$B_{m\acute{a}x} = \frac{\sqrt{2} E_f \cos(0) \sqrt{2}}{n_2 A_c (2\pi f) \sqrt{2}} \quad (6.16)$$

entonces resulta:

$$B_{m\acute{a}x} = \frac{E_f}{\sqrt{2} n_2 A_c \pi f} \quad (6.17)$$

de la densidad de flujo máximo, se sabe que:

$$B_{m\acute{a}x} = \mu H \quad (6.18)$$

y despejando para la permeabilidad absoluta μ_z :

$$\mu_z = \frac{B_{m\acute{a}x}}{H} \quad (6.19)$$

μ_z , a su vez, es igual al producto de la permeabilidad magnética relativa del material del núcleo μ_r por la permeabilidad magnética en el vacío μ_o :

$$\mu_z = \mu_r \mu_o \quad (6.20)$$

de esta forma se tiene que:

$$\mu_r = \frac{B_{m\acute{a}x}}{H_z \mu_o} \quad (6.21)$$

6.5 Diseño del inversor resonante

Como se vio en la Sección 6.3, la función de fuente de CA seleccionada para energizar a los inductores devanados alrededor de los núcleos hechos con el material a caracterizar fue llevada a cabo por un inversor resonante de tensión. Un inversor de tensión es un convertidor CD/CA que consta de una etapa de potencia que se logra con el empleo interruptores semiconductores controlados de potencia (en este caso se utilizaron MOSFETs, por razones que se detallarán en el siguiente párrafo) que trocean la corriente continua, alternándola y creando una forma de salida cuasi sinusoidal o, como en este caso, sinusoidal [53]. La salida del inversor empleado para las pruebas fue monofásica. Y para el funcionamiento óptimo del circuito, fue necesario implementar un sistema de control digital mediante un microcontrolador que pudiera ejecutar los algoritmos de control específicos para precisar las señales de disparo de los interruptores de potencia del inversor.

En el diseño de convertidores electrónicos se debe tomar en cuenta la configuración o tecnología a utilizar. Los elementos que conforman, comúnmente, a cualquier convertidor de potencia son: los interruptores controlados de potencia, los elementos pasivos y los elementos de control. Los interruptores de potencia para corrientes alternas deben ser capaces de conducir una intensidad bidireccional cuando están cerrados y bloquear una tensión bidireccional cuando están abiertos. Lo cual implica que deben ser capaces de cerrarse, independientemente de la polaridad de la tensión aplicada en sus extremos y el sentido de la corriente después de producirse el cierre, y de abrirse independientemente del sentido de la corriente y la polaridad de la tensión antes de la apertura. Los transistores MOSFET de potencia son dispositivos electrónicos que manejan potencias medias, y soportan tensiones de hasta 1500 V, así como corrientes elevadas (hasta 500A). En el estado de conducción, este dispositivo presenta un comportamiento de tipo resistivo ($R_{DS(on)}$) entre las terminales de potencia. Se hace hincapié en este dispositivo puesto que, las frecuencias de conmutación máxima de los inversores implementados con este pueden operar con frecuencias de hasta 1 MHz, lo que los hizo una opción adecuada para la caracterización del material fabricado como núcleo magnético a frecuencias de hasta 800 kHz.

6.6 Etapa de potencia. Inversor resonante medio puente

Para la realización de las pruebas en alta frecuencia se optó por diseñar un inversor resonante medio puente, debido a la practicidad necesaria para suministrar al devanado primario del inductor una corriente de forma sinusoidal a varios valores de frecuencia.

En la Figura 6.5 se muestra la topología de un inversor resonante medio puente donde la tensión de continua V_{cd} mantiene los condensadores C_a y C_b cargados a una tensión $V_{cd}/2$. Por motivos de que los diodos parásitos de los MOSFETs empleados son muy lentos, se colocaron dos diodos rápidos (D1 y D2) en antiparalelo.

El funcionamiento de este inversor es muy simple, ya que sólo cuenta con dos interruptores T1 y T2 que conmutan alternativamente, por lo que nunca están en circuito cerrado simultáneamente. Se pueden establecer dos combinaciones:

- T1 en ON y T2 en OFF: el capacitor C_a se conecta a través de T1 a la carga, y le aplica una tensión de valor $V_a = V_{C1} = + V_{cd}/2$.
- T2 en ON y T1 en OFF: el capacitor C_b se conecta a través de T2 a la carga y le aplica una tensión de valor $V_a = V_{C2} = - V_{cd}/2$.

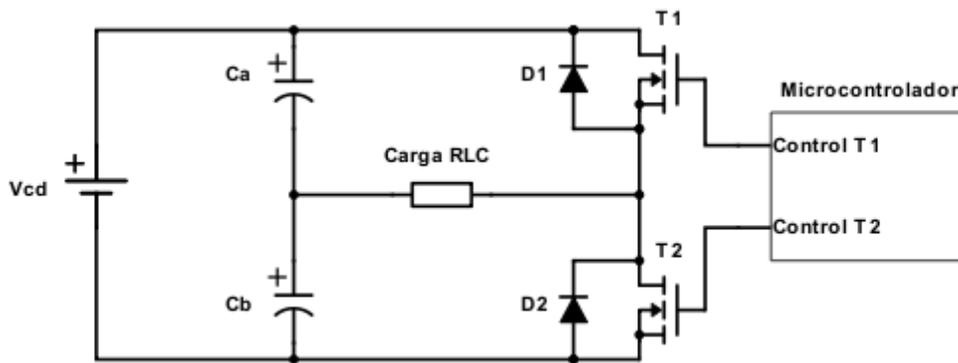


Figura 6.5. Topología de un inversor medio puente.

En la Figura 6.6 se ejemplifica el diseño del inversor medio puente simulado en un software electrónico. En ésta es posible apreciar la practicidad del circuito; se sustituirá el capacitor resonante (C1) para trabajar con los valores de frecuencia de 200, 600 y 800 (kHz).

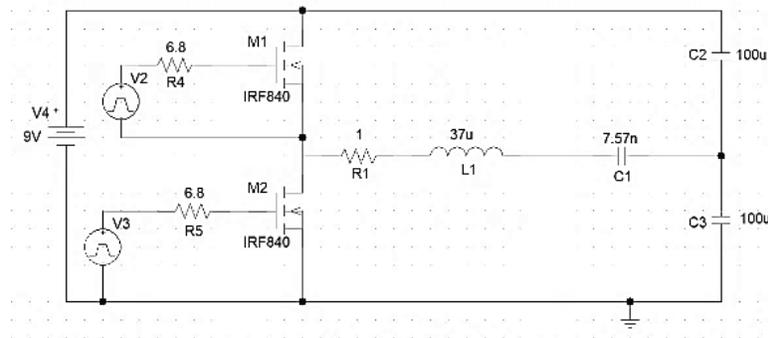


Figura 6.6. Inversor resonante medio puente simulado en un software electrónico.

Como ya se mencionó, con el circuito inversor medio puente elaborado se trabajará a diferentes valores de frecuencia sustituyendo el capacitor resonante de la carga RLC; por ello, se hizo un cálculo para conocer los valores que dicho capacitor debe tener. Para los cálculos fue necesario tener el valor de la menor inductancia L_{min} de los devanados de cada núcleo. Para la selección de los capacitores usados en C1 se optó por aquellos

elaborados por polipropileno, poliéster, cerámica y de película, ya que son capacitores no polarizados y tienen muy baja resistencia en serie.

En el Capítulo 3, Sección 3.3 se mencionó que, para estas pruebas, se volvieron a devanar los núcleos con alambre de cobre calibre #30 y se calcularon 440 vueltas para cada núcleo, para tener un ku de 0.43, por lo que el valor de las inductancias en los devanados se vio multiplicada.

Los valores calculados para el capacitor, por cada frecuencia y por cada núcleo, fueron los que se muestran en la Tabla 6.2:

Tabla 6.2. Valores calculados para los capacitores empleados en cada frecuencia.

Color de los núcleos clase #N	L_{min} (H)	R_p (Ω)	Capacitores para 200 kHz	Capacitores para 600 kHz	Capacitores para 800 kHz
Rosa	0.0000718	5.3	8.81970E-09	9.7997E-10	5.51231E-10
Vino	0.000092	5.3	6.88320E-09	7.6480E-10	4.30200E-10
Gris	0.000088	5.4	7.19607E-09	7.9956E-10	4.49755E-10
Verde olivo	0.000089	5.3	7.11522E-09	7.9058E-10	4.44701E-10
Verde	0.0000984	5.3	6.43551E-09	7.1506E-10	4.02220E-10
Negro	0.000077	5.3	8.22408E-09	9.1379E-10	5.14005E-10
Café	0.000111	5.6	5.70499E-09	6.3389E-10	3.56562E-10
Morado	0.0001226	5.5	5.16521E-09	5.7391E-10	3.22825E-10
Azul	0.000125	5.5	5.06604E-09	5.6289E-10	3.16627E-10

6.7 Etapa de control. Diseño del microcontrolador

Para controlar la frecuencia en el inversor se empleó por un microcontrolador ATtiny85V, mientras que los MOSFETs seleccionados fueron los IRF840 y, para su control, se empleó el circuito integrado IR2110.

El IR2110 permite realizar la conexión requerida para diseñar un inversor medio puente como el que se tiene en la Figura 6.7:

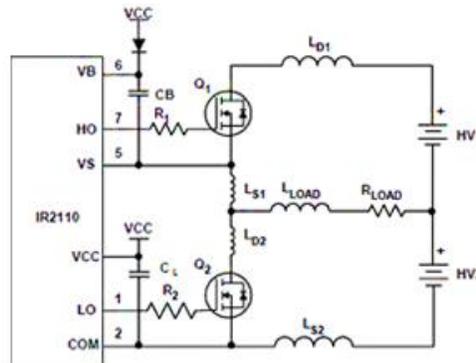


Figura 6.7. Conexión que sugiere el integrado IR2110 para un inversor medio puente.

La conexión anterior emplea el capacitor de Bootstrap (C_B). De acuerdo a las especificaciones técnicas del integrado IR2110 se tiene las siguientes ecuaciones:

$$\Delta V_{BOOT} = V_{DD} - V_F - V_{GSMIN} \quad (6.22)$$

Donde:

ΔV_{BOOT} es la caída de tensión en el capacitor de Bootstrap.

V_{DD} es la tensión de referencia digital del “1” lógico = 5 V.

V_F es la tensión forward en el diodo de Bootstrap = 1.5 V.

V_{GSMIN} es la tensión compuerta-fuente del MOSFET.

El C_B se calcula a partir de la Ecuación 6.23:

$$C_B \geq \frac{Q_{total}}{\Delta V_{BOOT}} \quad (6.23)$$

Donde Q_{total} es la cantidad total de carga suministrada por el capacitor y se obtiene de la Ecuación 6.24:

$$Q_{total} = Q_{gate} + (I_{LKCAP} + I_{LKGS} + I_{QBS} + I_{LK} + I_{LKDIODE}) \cdot t_{ON} + Q_{LS} \quad (6.24)$$

Donde:

Q_{gate} = carga de compuerta total del MOSFET.

I_{LKCAP} = corriente de fuga del MOSFET.

I_{LKGS} = corriente de fuga del capacitor de Bootstrap.

I_{QBS} = corriente inactiva del IR2110.

I_{LK} = corriente de fuga del IR2110.

$I_{LKDIODE}$ = corriente de fuga en el diodo de Bootstrap.

t_{ON} = máximo tiempo de encendido del MOSFET de baja señal.

Q_{LS} = carga requerida por el cambio interno de nivel, de 3 nC.

Para el diodo de Bootstrap se utilizó el MUR1540, mientras que, para el capacitor C_L se seleccionó un capacitor cuya capacitancia fuera 10 veces el valor del capacitor de Bootstrap. El valor calculado para el capacitor de Bootstrap debió cumplir con $C_B \geq 470nF$. La resistencia de Bootstrap que protege al diodo para este caso no

fue necesaria, ya que su minúsculo valor hace que se pueda prescindir de ella en el funcionamiento del circuito. Los MUR1560 fueron los diodos rápidos colocados en antiparalelo a los MOSFETs IRF840.

El diseño del PCB del inversor se realizó en un paquete de software de automatización de diseño de PCB y electrónico para placas de circuito impreso. El esquemático del circuito se muestra en la Figura 6.8:

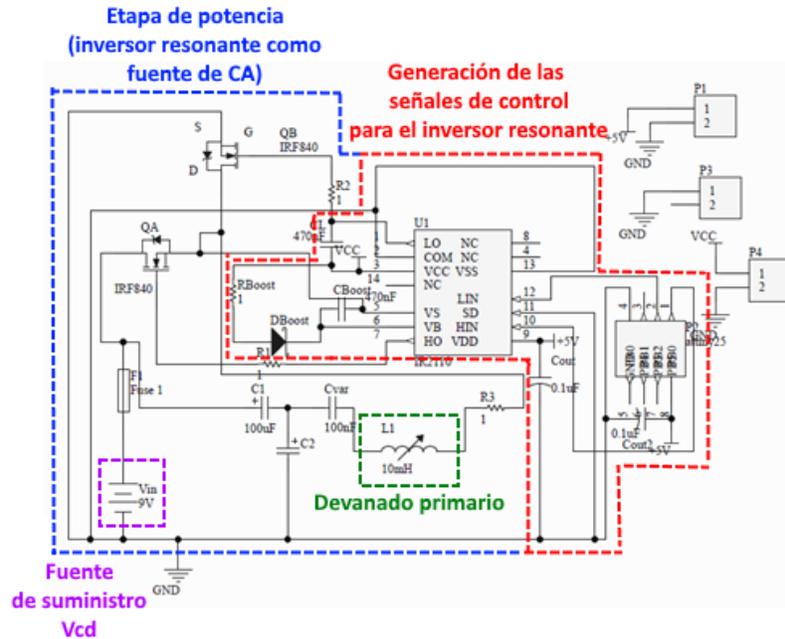


Figura 6.8. Circuito esquemático del inversor medio puente.

Mientras que, el diseño en PCB se puede observar en la Figura 6.9:

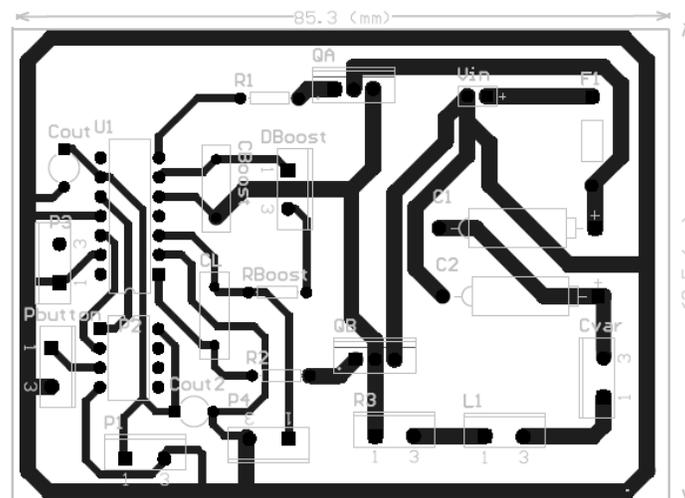


Figura 6.9. Diseño del PCB elaborado para el inversor.

Físicamente, el circuito inversor medio puente empleado para las pruebas a alta frecuencia, se muestra en la Figura 6.10.



Figura 6.10. Circuito inversor utilizado para las pruebas.

6.8 Pérdidas por conducción y pérdidas en el núcleo

Puesto que la cantidad de flujo de carga en circuitos de CA cambia con el tiempo, el campo magnético que rodea a la carga en movimiento o corriente, cambia también. Para un conductor que porta corriente alterna, el campo magnético cambiante que rodea al cable enlaza al cable mismo, desarrollando una tensión interna inducida que se opone al flujo original de carga o corriente. Estos efectos son más pronunciados en el centro del conductor que en la superficie, ya que el centro está enlazado por el flujo cambiante dentro del cable, así como por el flujo externo al cable.

En altas frecuencias el efecto de superficie o conducción es tan pronunciado que los conductores a menudo se fabrican huecos dado que la parte central es relativamente inefectiva. El efecto de superficie, por tanto, reduce el área efectiva a través de la cual puede fluir la corriente y ocasiona que la resistencia del conductor se incremente.

Las pérdidas por corriente fuga o pérdidas en el núcleo se describen con mayor detalle al considerar los efectos de una corriente alterna que pasa a través de una bobina enrollada a través de un núcleo. A medida que la corriente alterna pase a través de la bobina como al núcleo, éste desarrollará una tensión interna inducida según la ley de Faraday. Dicha tensión inducida junto con la resistencia geométrica del núcleo, ocasionan que se generen corrientes dentro del núcleo, denominadas corrientes de fuga. Las corrientes fluyen en trayectorias circulares, como se muestra en la Figura 6.11, modificando su dirección con el potencial de CA aplicado.

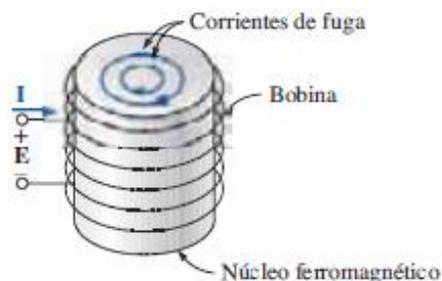


Figura 6.11. Definición de las pérdidas en el núcleo [54].

Es importante mencionar que, la magnitud de estas pérdidas se encuentra determinada principalmente por el tipo de núcleo utilizado. Si el núcleo no es ferromagnético (y tiene una alta resistividad como la madera o el aire) las pérdidas en el núcleo suelen ser insignificantes [54].

Con la afirmación anterior se realizó un estimado de la potencia promedio por medio del osciloscopio tras la realización de las pruebas en alta frecuencia.

Las pérdidas por conducción se calcularon con:

$$P_{cu} = I_{pRMS}^2 \times R_p \quad (6.25)$$

Donde

P_{cu} = pérdidas por conducción o pérdidas en el cobre.

I_{pRMS} = corriente eficaz en el devanado primario.

R_p = resistencia serie del devanado primario.

Las pérdidas en el núcleo (P_{nu}) se calcularon a partir de la potencia promedio total (P_{prom}) y las pérdidas en el cobre (P_{cu}):

$$P_{nu} = P_{prom} - P_{cu} \quad (6.26)$$

En el Apéndice D.3 se tiene el registro de datos de las características magnéticas obtenidas de los 9 núcleos elaborados con el material compuesto por hierro y resina al trabajar a 200, 600 y 800 (kHz).

6.9 Resultados gráficos de las pruebas en alta frecuencia

Las especificaciones para estas pruebas fueron las siguientes:

Tabla 6.3. Especificaciones de las pruebas en alta frecuencia.

Temperatura (T)	Frecuencia (f)	Tensión de CD a la entrada del inversor
298.15 K	200 - 800 (kHz)	5 - 140 (V)

La Tabla 6.4 recopila las densidades de campo magnético más altas que fueron posibles de inducir a ciertos núcleos magnéticos, con sus respectivas intensidades de campo magnético, las cuales se seleccionaron del Apéndice D.

Tabla 6.4. Máximas variables de B y H obtenidas de diversos núcleos para cada frecuencia de trabajo.

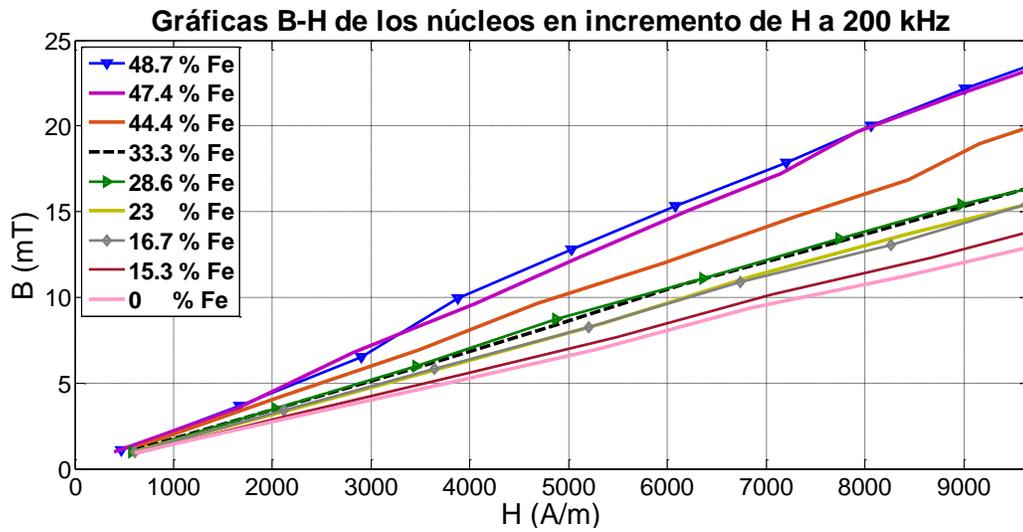
$f=200$ kHz Núcleo verde olivo (23 % Fe)		$f=600$ kHz Núcleo negro (33.3 % Fe)		$f=800$ kHz Núcleo rosa (0 % Fe)	
B (mT)	H (A/m)	B (mT)	H (A/m)	B (mT)	H (A/m)
0.988	585.397	0.631	375.746	0.362	301.554
3.586	2259.740	1.966	1183.480	1.320	1065.0116
6.156	3886.694	3.274	1972.066	2.156	1765.765
8.524	5370.530	4.600	2713.985	3.011	2377.728
11.230	6849.580	5.953	3484.622	3.620	2924.594
13.666	8424.361	7.036	4219.361	4.228	3427.183
16.101	10094.874	7.487	4492.195	4.431	3599.500
18.537	11681.622	8.118	4872.727	4.702	3767.030
20.702	13119.99	8.660	5171.888	4.972	3975.246
23.137	14417.146	9.111	5427.969	5.243	4183.461
0.106	619.621	0.649	373.831	0.507	353.727
3.653	2167.837	2.015	1192.574	1.455	1087.508
6.089	3834.042	3.247	1952.920	2.334	1772.945
8.795	5341.811	4.600	2716.378	3.011	2392.567
11.230	6909.412	5.773	3441.543	3.687	2912.627
13.936	8496.160	6.675	3987.212	4.161	3388.891
16.101	9889.0516	7.397	4429.970	4.499	3601.893
17.996	11394.427	8.028	4810.502	4.702	3783.783
20.702	13127.165	8.660	5176.674	4.972	3982.425
23.137	14417.146	9.111	5427.970	5.243	4183.461

La permeabilidad magnética del caso más prometedor, es decir, el núcleo en tono azul (que representa un 48.7 % hierro), así como la B y la H que se tuvo en dicho núcleo, a distintas frecuencias, se muestran en la Tabla 6.5.

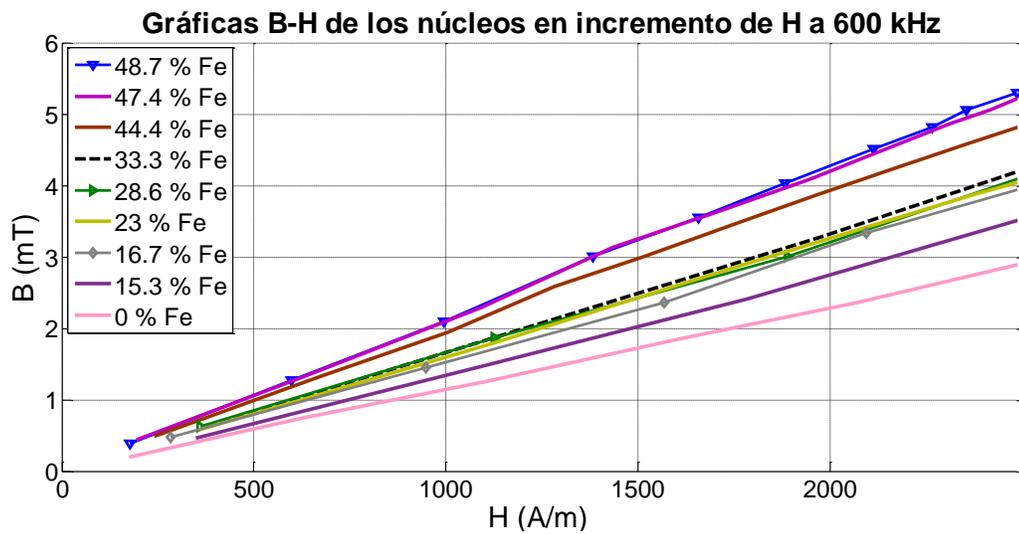
Tabla 6.5. Variables B , H y μ_r del núcleo con 48.7 % Fe, en cada f , y V_{cd} en un rango de 5 a 140 (V).

$f=200$ kHz			$f=600$ kHz			$f=800$ kHz		
B (mT)	H (A/m)	μ_r	B (mT)	H (A/m)	μ_r	B (mT)	H (A/m)	μ_r
1.055	468.844	1.791	0.385	177.318	1.727	0.148	66.676	1.762
3.676	1670.273	1.751	1.278	596.645	1.704	0.615	276.185	1.770
6.535	2895.874	1.795	2.093	993.691	1.675	1.043	466.690	1.778
9.922	3877.120	2.036	3.007	1382.839	1.730	1.470	670.119	1.746
12.809	5025.897	2.028	3.548	1656.631	1.704	1.868	853.923	1.740
15.335	6081.335	2.006	4.029	1882.078	1.703	2.368	1074.584	1.753
17.860	7201.393	1.973	4.510	2110.876	1.700	2.819	1270.355	1.765
20.025	8058.188	1.977	4.811	2264.047	1.690	2.909	1344.307	1.722
22.190	9010.716	1.959	5.051	2354.034	1.707	3.225	1509.923	1.699
23.994	9889.051	1.930	5.292	2484.229	1.695	3.450	1605.654	1.709
1.128	428.158	2.095	0.397	180.357	1.751	0.183	76.8962	1.890
3.743	1654.956	1.800	1.323	591.6199	1.779	0.589	261.346	1.792
6.720	2895.874	1.846	2.105	980.528	1.708	1.049	467.887	1.783
9.607	4030.291	1.896	2.887	1361.778	1.686	1.477	676.820	1.736
12.809	5023.504	2.029	3.548	1637.724	1.723	1.928	878.096	1.747
15.335	6126.808	1.991	4.029	1884.232	1.701	2.289	1073.866	1.696
17.499	7021.896	1.983	4.450	2072.345	1.708	2.695	1278.492	1.677
20.025	8168.279	1.950	4.811	2250.884	1.700	2.954	1374.702	1.710
22.190	9051.401	1.950	5.112	2400.464	1.694	3.315	1527.872	1.726
23.994	9889.051	1.930	5.292	2484.229	1.695	3.450	1605.654	1.709

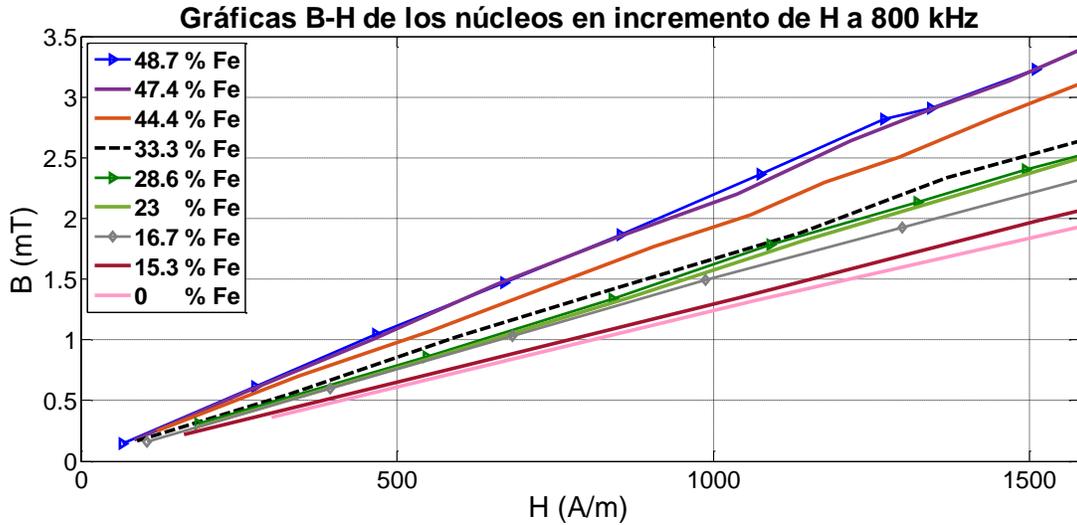
A continuación, se presenta la representación gráfica de las variables magnéticas más importantes obtenidas en incremento de H para todos los núcleos elaborados con dimensiones normalizadas, en el rango de frecuencias: de 200 a 800 (kHz).



Gráfica 6.1. Variables B - H en incremento de H para los 9 núcleos clase N, a 200 kHz.

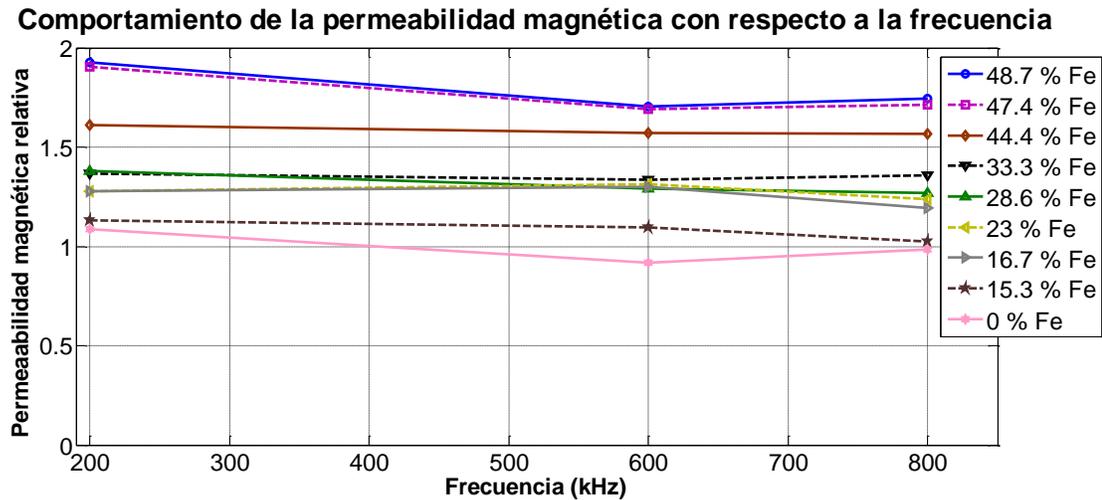


Gráfica 6.2. Variables B - H en incremento de H para los 9 núcleos clase N, a 600 kHz.



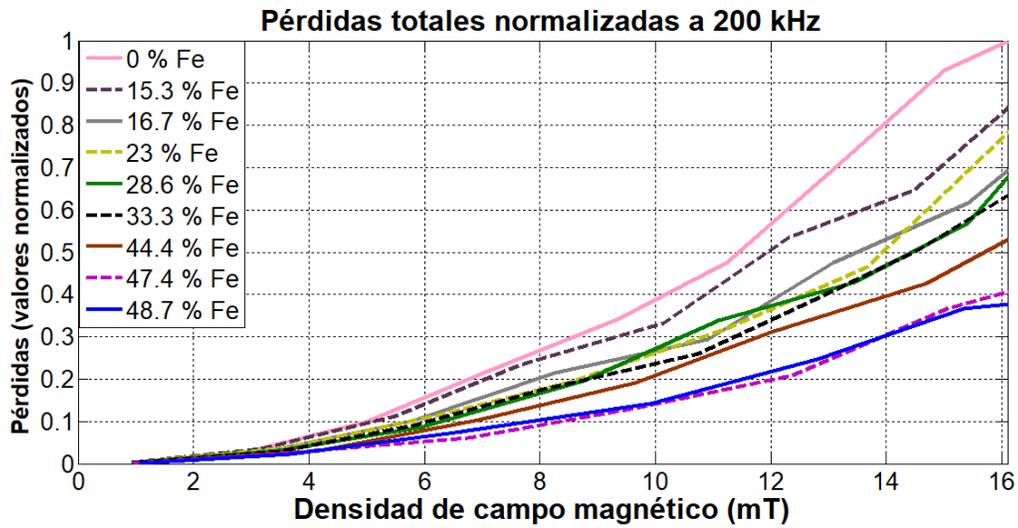
Gráfica 6.3. Variables $B-H$ en incremento de H para los 9 núcleos clase N, a 800 kHz.

En resumen, el comportamiento de la permeabilidad magnética con respecto a las frecuencias en que se trabajó fue el siguiente:



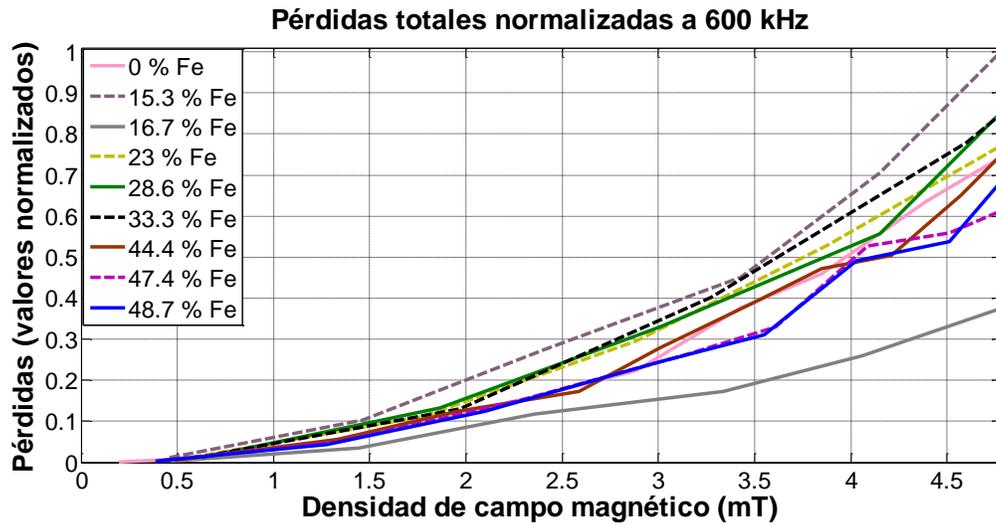
Gráfica 6.4. Comportamiento de la permeabilidad magnética con respecto a la frecuencia.

La representación gráfica de las pérdidas en el núcleo y las pérdidas por conducción también se consideraron, a modo de resumen, se muestra una gráfica sobre las pérdidas totales normalizadas vs. la densidad de campo magnético en el rango de frecuencias: de 200 a 800 (kHz).



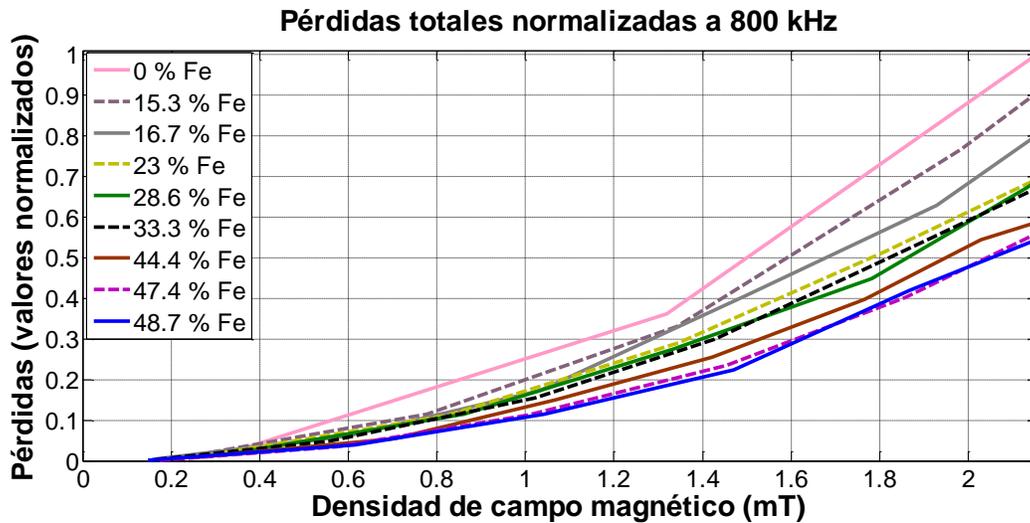
Gráfica 6.5. Relación entre las pérdidas totales normalizadas vs. densidad de campo magnético para los 9 núcleos clase N, a 200 kHz.

✚ En esta frecuencia se observó una correlación negativa entre la cantidad de Fe en las muestras y las pérdidas totales.



Gráfica 6.6. Relación entre las pérdidas totales normalizadas vs. densidad de campo magnético para los 9 núcleos clase N, a 600 kHz.

✚ A esta frecuencia no se observó relación entre las pérdidas totales y la cantidad de Fe en la muestra.



Gráfica 6.7. Relación entre las pérdidas totales normalizadas vs. densidad de campo magnético para los 9 núcleos clase N, a 800 kHz.

- ✚ En esta frecuencia se observó una correlación negativa entre la cantidad de Fe en las muestras y las pérdidas totales.

En el Apéndice E, se muestran todas las representaciones gráficas de los resultados obtenidos del material compuesto por hierro y resina en las pruebas en alta frecuencia.

6.10 Conclusiones

Se realizaron pruebas en alta frecuencia (rango de 200 a 800 (kHz)) a los núcleos clase N elaborados con el SMC hierro-resina, mediante la inducción de diversos valores de tensión y corrientes de CA, en orden ascendente y descendente; se magnetizaron los núcleos y se analizó la curva $B-H$, la cual, nuevamente, confirmó la nula existencia de histéresis en todos ellos. Se determinaron los valores de B , H , μ_r y χ para todos los núcleos de clase N.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

7.1 Recapitulación

El estudio o caracterización del material compuesto por hierro y resina mediante la elaboración de núcleos magnéticos del tipo toroidal de clases 1, 2, 3 y N permitió obtener registros de datos de sus principales características magnéticas. Pero, además la inclusión de un sistema de gestión de la calidad mediante la norma ISO 9001 (2008) permitió obtener protocolos para las pruebas de temperatura, en baja y en alta frecuencia que fueron la base para tener un registro ordenado de los datos obtenidos.

En el Capítulo 3 se tuvo la metodología de elaboración de núcleos por moldeo manual, el Capítulo 4 se obtuvo el registro de datos de las características magnéticas del material compuesto por hierro y resina al ser sometidos a diferentes temperaturas, en el Capítulo 5 se logró el registro de datos de características magnéticas del material al trabajar en baja frecuencia y en el Capítulo 6 al trabajar en alta frecuencia, aunque las características magnéticas del material observadas en las pruebas de alta frecuencia, no fueron muy diferentes de las obtenidas en las pruebas de baja frecuencia.

Para la introducción de los datos, determinación de las variables, la recopilación de los resultados y la representación gráfica de los datos obtenidos, se usaron diversas herramientas de softwares matemáticos.

7.2 Conclusiones de las pruebas de temperatura

- 1) El material elaborado se comporta como un material paramagnético porque, de acuerdo a la clasificación de los materiales mostrada en la Sección 1.3.4 del Capítulo 1, se alcanzó la permeabilidad máxima de 2. En la Tabla 4.5 se muestra el dato.
- 2) El material no es susceptible a los cambios de temperatura, ya que, las propiedades magnéticas del material no cambiaron en un rango de temperatura de 258.15 a 338.15 (K). En la Tabla 4.5 se muestra el dato.
- 3) El porcentaje de Fe mejoró la μ_i de los núcleos y el K_y :
 - a. El núcleo con 48.7% Fe (muestra azul con mayor concentración de Fe) tuvo una μ_i 100 % mayor que un núcleo de aire (muestra rosa con 0 % Fe) con las mismas características geométricas.
 - b. Esto también se vio reflejado en una mejora del 3.82 % en el K_y del núcleo que contiene 48.7% Fe, con respecto al de núcleo de aire.En la Tabla 4.5 se muestran estos datos.
- 4) De acuerdo a las pruebas realizadas en el Capítulo 4, la R_s de los devanados no está correlacionada con el porcentaje de Fe de los núcleos:
 - a. La R_s promedio fue de 1.0355 Ω .
 - b. Para los valores extremos de porcentajes de Fe (0 % y 48.7 %) se obtuvo una R_s de 1 Ω .
 - c. La R_s máxima fue de 1.18 Ω (caso del núcleo con 28.6 % Fe), 13.9 % más alta que el valor promedio.En la Tabla 4.5 se muestran estos datos.

7.3 Conclusiones de las pruebas a baja frecuencia

- 1) No se observaron pérdidas por histéresis en la muestra con mayor concentración (azul con 48.7% Fe) en un rango de H de 161.05 a 3,627.8 (A/m), y un rango de B de 0.36 a 9.36 (mT), como se puede ratificar en la Figura 5.9, donde se obtuvo un comportamiento lineal (sin área bajo la curva) en la forma de la curva de histéresis.
- 2) A partir de las pruebas realizadas en el rango de frecuencias de 50 Hz a 1 kHz, se determinó que el SMC trabaja mejor por encima de 1 kHz. Teóricamente, en las bobinas con núcleos de aire, conforme aumentan los niveles de frecuencia, aumenta la di/dt , lo cual es proporcional a los campos dispersos generados. Y, en las bobinas devanadas alrededor de un núcleo hecho con el SMC hierro-resina, experimentalmente, el B quedó más confinado al interior del núcleo, porque su μ_i fue 100% mayor que la de un núcleo de aire con las mismas características.

7.4 Conclusiones de las pruebas a alta frecuencia

- 1) En estas pruebas, se repitió la conducta paramagnética en el SMC hierro-resina, como se tuvo en las de temperatura y en las de baja frecuencia, ya que, de nuevo, la máxima μ_r obtenida en los núcleos elaborados con el SMC fue de 2 para el núcleo con 48.7 % Fe, lo cual es 85.71 % menos que la menor μ_r registrada para los núcleos comerciales de Fe pulverizado:

Fabricados por Arnold Engineering Co

HF-014-14,	$\mu_r = 14$
A-467004-1,	$\mu_r = 14$
A-3407-2,	$\mu_r = 14$
A-187010-2,	$\mu_r = 14$
D-344014-4,	$\mu_r = 14$
B-344014-4,	$\mu_r = 14$

- 2) Como puede verse en las gráficas E.32-E.40 del Apéndice E, para una B dada, existe una correlación negativa entre el porcentaje de Fe empleado en los núcleos magnéticos y las P_{prom} , P_{cu} , y P_{nu} .
- 3) En los núcleos clase N se observó que:
 - a. Al aumentar la frecuencia de 200 a 600 (kHz) la μ_r disminuye. Como ejemplo, se tiene el núcleo con 48.7 % Fe, para el cual, la μ_r disminuyó 11.5 %, y
 - b. Al aumentar la frecuencia de 600 a 800 (kHz) la μ_r se estabiliza, ya que, en el caso del núcleo con 48.7 % Fe, solo aumentó un 2.4 % y se estabilizó.

En la Gráfica 6.4 se muestran dichos datos.

- 4) En los núcleos clase N, el incremento de la frecuencia aumentó las P_{nu} , como se puede ver en las Gráficas E.34, E.37 y E.40. A modo de ejemplo, en la Gráfica E.41, se tiene el caso del núcleo con 23 % Fe, en el cual:
 - a. Al aumentar la frecuencia de 200 a 600 (kHz), las P_{nu} incrementan 1,548 % y,
 - b. Al aumentar la frecuencia de 600 a 800 (kHz), las P_{nu} incrementan 106.6 %.
- 5) En los núcleos clase N, las P_{cu} son dominantes a 200 kHz; pero, a partir de 600 kHz, las dominantes son las P_{nu} . En las Gráficas E.37 y E.40 se muestran dichos datos.

7.5 Conclusiones generales

- 1) El objetivo general se cumplió porque se elaboró un nuevo material SMC de resina de poliéster y polvo de hierro malla 100 (con tamaño de grano de 50 micrómetros), y se llevó a cabo la caracterización magnética de sus propiedades para campos de aplicación en inductores y transformadores.
- 2) Los objetivos específicos 1 y 2 se cumplieron porque se adaptó la norma ASTM A772 / A772M, a través del método de prueba estándar de inducción para la permeabilidad magnética, a las pruebas realizadas con el SMC hierro-resina, por inducción de corrientes de CA y en rangos de:
 - a. Frecuencias de 50 a 1000 (Hz), donde la temperatura fue de, aproximadamente, 298.15 K.
 - b. Frecuencias de 60 Hz a 60 kHz, donde la temperatura se varió de 258.15 hasta 338.15 (K)
 - c. Frecuencias de 200 a 800 (kHz), donde la temperatura fue de, aproximadamente, 298.15 K
- 3) El objetivo específico 3 se cumplió porque se le realizaron pruebas al SMC para medir sus principales características magnéticas: B , H , μ_r , y χ .
- 4) El objetivo específico 4 se cumplió porque se reportaron los resultados de los núcleos clase N que poseen porcentajes de Fe dados, a través de tablas, figuras y representaciones gráficas.

Las características del SMC hierro-resina son:

- El material es paramagnético al poseer la μ_r máxima de 2.
- La μ_r del SMC se mostró inmune a la temperatura (en el rango de 258.15 a 338.15 (K)).
- Su permeabilidad es 100 % mayor que un núcleo de aire con las mismas características geométricas
- Ausencia de histéresis magnética.
- Las P_{mi} por corrientes parásitas predominan a partir de 600 kHz. Dicho dato se muestra en las Gráficas E.37 y E.40.
- Las P_{cu} predominan al trabajar con frecuencias por debajo de 600 kHz. Dicho dato se muestra en la Gráfica E.33.
- Para el núcleo con 48.7 % Fe, la μ_r disminuyó 11.5 % al pasar de 200 a 600 (kHz), y posteriormente aumentó 2.4 % al pasar de 600 a 800 (kHz). Dicha tendencia, de una disminución considerable en la μ_r y una estabilización posterior, se observó en todos los núcleos clase N. Los datos se muestran en las Gráficas E.34, E.37, E.40 y E.41.

7.6 Trabajos futuros

A partir de este trabajo de tesis, en un futuro, se podrían llevar a cabo los siguientes puntos:

- Realizar la patente del material.
- Redactar un artículo sobre la propuesta del material y su caracterización.
- Desarrollar el material con base en sus propiedades mecánicas.
- Aplicar el material en sensores de corriente.
- Aplicar el material a núcleos de transformadores e inductores en circuitos resonantes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. E. M. Mastache, "Análisis de un generador radial de imanes permanentes y propuesta de una metodología para optimizar la eficiencia", TESIS DE MAESTRÍA EN CIENCIAS, Departamento de Ingeniería Electrónica, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico Cuernavaca, Morelos, México., Febrero de 2016.
- [2] Secretaría de Energía, "Estrategia Nacional de Energía," G. F. d. México, ed. México, 2014- 2028, p. 57.
- [3] Secretaría de Energía, "Prospectiva de Energías Renovables 2016-2030," ed. México, 2016, p. 132.
- [4] G. Sowter, "Soft magnetic materials for audio transformers: History, production, and applications," *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 35, pp. 760-777, 1987.
- [5] I. Gilbert, V. Moorthy, S. Bull, J. Evans, and A. Jack, "Development of soft magnetic composites for low-loss applications," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 242, pp. 232-234, 2002.
- [6] A. H. Grande and J. M. R. Alaminos, "Física de los materiales magnéticos," Síntesis, 2001.
- [7] L. Hultman and A. Jack, "Soft magnetic composites-materials and applications," in *Electric Machines and Drives Conference, 2003. IEMDC'03. IEEE International*, 2003, pp. 516-522.
- [8] L. Pennander and A. G. Jack, "Soft magnetic iron powder materials AC properties and their application in electrical machines," *EURO Powder Metallurgy*, 2003.
- [9] P. Y. Lara Rodríguez, M. Mena Montoya, C. Bernal, S. Yaneth, M. A. Garza Navarro, M. Hinojosa Rivera, *et al.*, "Síntesis y caracterización de nanocompuestos magnéticos," *Ingenierías*, vol. 8, pp. 47-51, 2005.
- [10] A. Krings and J. Soulard, "Experimental characterization of magnetic materials for electrical machine applications," in *Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD), 2015 IEEE Workshop on*, 2015, pp. 85-89.
- [11] M. Faraldos and C. Goberna, "Técnicas de análisis y caracterización de materiales (2002)," *Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, España*.
- [12] B. Parreira, S. Rafael, A. Pires, and P. C. Branco, "Obtaining the magnetic characteristics of an 8/6 switched reluctance machine: from FEM analysis to the experimental tests," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 52, pp. 1635-1643, 2005.
- [13] L. Righi, P. Eckert, and Á. Flores Filho, "A practical method for characterization of magnetic materials," in *2015 IEEE Magnetics Conference (INTERMAG)*, 2015, pp. 1-1.
- [14] V. K. Sharma, S. S. Murthy, and B. Singh, "An improved method for the determination of saturation characteristics of switched reluctance motors," *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, vol. 48, pp. 995-1000, 1999.

- [15] S. A. Macintyre, "Magnetic field measurement," in *Electrical Measurement, Signal Processing, and Displays*, ed: CRC Press, 2003, pp. 12-1-31.
- [16] H. Shokrollahi and K. Janghorban, "Effect of warm compaction on the magnetic and electrical properties of Fe-based soft magnetic composites," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 313, pp. 182-186, 2007.
- [17] J. J. Shea, "Book Reviews [7 books reviews]," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 28, pp. 52-56, 2012.
- [18] J. Ramos, "Comportamiento mecánico de compuestos en matriz con resina epóxica y resina poliéster reforzados con fibra de carbono unidireccional," ed: Paper, Universidad Autónoma de Occidente. Cali, 2008.
- [19] H. Shokrollahi and K. Janghorban, "The effect of compaction parameters and particle size on magnetic properties of iron-based alloys used in soft magnetic composites," *Materials Science and Engineering: B*, vol. 134, pp. 41-43, 2006.
- [20] P. Laurent, G. Viau, A. Konn, P. Gelin, and M. Le Floch, "Effect of the magnetic fraction on the complex susceptibility of soft magnetic composite materials," *Journal of magnetism and magnetic materials*, vol. 160, pp. 63-64, 1996.
- [21] M. E. McHenry, M. A. Willard, and D. E. Laughlin, "Amorphous and nanocrystalline materials for applications as soft magnets," *Progress in Materials Science*, vol. 44, pp. 291-433, 1999.
- [22] I. Chicinas, O. Geoffroy, O. Isnard, and V. Pop, "Soft magnetic composite based on mechanically alloyed nanocrystalline Ni₃Fe phase," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 290, pp. 1531-1534, 2005.
- [23] E. Bayramlı, Ö. Gölgelioğlu, and H. B. Ertan, "Powder metal development for electrical motor applications," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 161, pp. 83-88, 2005.
- [24] Y. Guo, J. Zhu, and J. Zhong, "Measurement and modelling of magnetic properties of soft magnetic composite material under 2D vector magnetisations," *Journal of magnetism and magnetic materials*, vol. 302, pp. 14-19, 2006.
- [25] J. Zhong, Y. Guo, J. Zhu, and Z. Lin, "Characteristics of soft magnetic composite material under rotating magnetic fluxes," *Journal of magnetism and magnetic materials*, vol. 299, pp. 29-34, 2006.
- [26] Y. Guo, J. G. Zhu, Z. W. Lin, and J. J. Zhong, "3D vector magnetic properties of soft magnetic composite material," *Journal of magnetism and magnetic materials*, vol. 302, pp. 511-516, 2006.
- [27] A. Hamler, V. Goričan, B. Šuštaršič, and A. Sirc, "The use of soft magnetic composite materials in synchronous electric motor," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 304, pp. e816-e819, 2006.
- [28] H. Shokrollahi and K. Janghorban, "Soft magnetic composite materials (SMCs)," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 189, pp. 1-12, 2007.
- [29] K. Asaka and C. Ishihara, "Technical trends in soft magnetic parts and materials," *Hitachi powdered metals technical report*, vol. 4, pp. 3-9, 2005.

- [30] T. L. Floyd, "Principios de circuitos eléctricos," Pearson Educación, 2007.
- [31] J. Prescott and A. El-Kharashi, "A method of measuring self-inductances applicable to large electrical machines," *Proceedings of the IEE-Part A: Power Engineering*, vol. 106, pp. 169-173, 1959.
- [32] P. Marcon and K. Ostanina, "Overview of methods for magnetic susceptibility measurement," in *PIERS Proceedings*, 2012, pp. 420-424.
- [33] D. Ruiz, R. Piotrkowski, M. Pumarega, and J. Ruzzante, "Ruido Barkhausen y emisión magneto acústica para la caracterización de materiales ferromagnéticos," *Revista Matéria*, vol. 13, pp. 12-22, 2008.
- [34] D. Jiles, "Review of magnetic methods for nondestructive evaluation," *NDT international*, vol. 21, pp. 311-319, 1988.
- [35] P. Juan-García, J. M. Torrents, R. D. López-Carreño, and S. H. P. Cavalaro, "Influence of Fiber Properties on the Inductive Method for the Steel-Fiber-Reinforced Concrete Characterization," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 65, pp. 1937-1944, 2016.
- [36] A. International, "ASTM A772 / A772M-00(2016), Standard Test Method for AC Magnetic Permeability of Materials Using Sinusoidal Current, ," ed. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2016.
- [37] S. Knappe, T. Sander, and L. Trahms, "Optically-pumped magnetometers for MEG," in *Magnetoencephalography*, ed. Springer, 2014, pp. 993-999.
- [38] R. Thompson, J. Stober, G. Turner, F. Oldfield, J. Bloemendal, J. Dearing, *et al.*, "Environmental applications of magnetic measurements," *Science*, vol. 207, pp. 481-486, 1980.
- [39] I. O. f. Standardization, "Sistemas de gestión de la calidad: requisitos: ISO 9001: 2008," ISO, 2008.
- [40] D. C. Montgomery, "Diseño y análisis de experimentos," Limusa Wiley, 2008.
- [41] D. O. de la Federación, "Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos," vol. 8, 2003.
- [42] D. O. de la Federación, "Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005, Que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente," *México, Distrito Federal*, 2006.
- [43] *Diario Oficial. Secretaría del Trabajo y Previsión Social*, M. Palacios, "NOM-018-STPS-2000: Sistema para la identificación y comunicación de peligros y riesgos por sustancias químicas peligrosas en los centros de trabajo," 2000.
- [44] W. F. Smith, J. Hashemi, G. N. Cázares, and P. A. González-Caver, "Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales," McGraw-Hill, 2006.
- [45] F. Stupenengo, "Materiales y materias primas: Materiales compuestos," *Guía didáctica, Capítulo*, vol. 10, 2011.
- [46] B. D. Cullity and C. D. Graham, "Introduction to magnetic materials," John Wiley & Sons, 2011.

- [47] I. Madugu, M. Abdulwahab, and V. Aigbodion, "Effect of iron fillings on the properties and microstructure of cast fiber–polyester/iron filings particulate composite," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 476, pp. 807-811, 2009.
- [48] E. M. Múzquiz, J. G. Osuna, A. Solís, and S. Solís, "Influencia de los aniones Cl-1, Br-1 y SO4-2 sobre el tiempo de fraguado y propiedades del yeso cerámico," *Bol. Soc. Quím. Méx*, vol. 3, pp. 73-78, 2009.
- [49] C.-C. Kuo, C.-Y. Lin, and X.-Z. Wu, "Development of an adjustable mold box for making silicone rubber mold," in *Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 2010 IEEE International Conference on*, 2010, pp. 762-766.
- [50] R. W. Erickson and D. Maksimovic, "*Fundamentals of power electronics*," Springer Science & Business Media, 2007.
- [51] C. W. T. McLyman, "*Transformer and inductor design handbook*" CRC press, 2017.
- [52] C. K. Alexander, M. N. Sadiku, and M. Sadiku, "*Fundamentals of electric circuits*," vol. 3: McGraw-Hill New York, 2009.
- [53] F. J. G. Sales, S. S. Chilet, and S. O. Grau, "*Convertidores electrónicos: energía solar fotovoltaica, aplicaciones y diseño*," ed. Universidaa Politécnica de Valencia, 2011.
- [54] R. L. Boylestad, "*Introducción al análisis de circuitos*," Pearson Educación, 2004.

APÉNDICE A. HOJAS DE CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES USADOS PARA EL COMPUESTO

A1. Hoja de características de la resina de poliéster utilizada



COR61-AA-531EX
DCPD Laminating Resin
Technical Data Sheet

FOR FIBERGLASS COATINGS, INC. ONLY

COR61-AA-531EX is a low profile, low shrink, unsaturated polyester laminating resin for use in general purpose, non-marine applications.

FEATURES	BENEFITS
• Low Laminate Exotherm	• Good cosmetic surface with minimal glass print
• Moderate Trim Time	• Good cycle times with moderate Barcol development
• Excellent Fiberglass Wet-Out	• Easy roll-out and high laminate physical properties
• Excellent Toughness	• High resistance to cracking and torsional stress
• Less Than 32% HAP (Styrene)	• Less odor and lower emissions in the shop

LIQUID PROPERTIES	RESULTS
Viscosity, Brookfield Model LV #3 Spindle @ 60 rpm, 77°F (25°C), cps	500-700
Thixotropic Index	3.0-4.0
100 grams resin @ 77°F (25°C), catalyzed with 1.0% DDM-9 by volume *	
Gel Time, min:sec	30:00-37:00
Gel to Peak Exotherm Time, min:sec	9:00-14:00
Peak Exotherm	265-305°F (129-152°C)
Non-Volatile Content, %	66.5-69.5
Hazardous Air Pollutant (Styrene) Content, %	26.8-29.8

TYPICAL PROPERTIES	1/8 inch (3.2 mm) Casting		1/8 inch (3.2 mm) Laminate	
	Not Applicable		3 Plies 1.5 oz/ft ² , 30% Glass Mat	
Flexural Strength, ASTM D790	11,700 psi	80 MPa	20,000 psi	140 MPa
Flexural Modulus, ASTM D790	5.22 x 10 ³ psi	3,600 MPa	12.0 x 10 ³ psi	8,280 MPa
Tensile Strength, ASTM D638	6,750 psi	46 MPa	10,900 psi	75 MPa
Tensile Modulus, ASTM D638	4.84 x 10 ³ psi	3,340 MPa	12.4 x 10 ³ psi	8,550 MPa
Tensile Elongation, ASTM D638	1.5 %	1.5 %	1.24 %	1.24 %
Barcol Hardness, 934-1 gauge, ASTM D2583	35	35	48-52	48-52
Heat Distortion Temperature, ASTM D648	182 °F	83 °C	-- °F	-- °C

* The gel time and reactivity will vary due to the type and concentration of Free Radical Initiator (catalyst), shop temperature, humidity, and type of fillers used. In order to meet your individual needs, consult our technical sales representative for assistance.
The air-curing capabilities of DCPD laminating resins are well documented. Ambient temperature, catalyst level, laminate thickness and configuration can all contribute to accelerating surface cure. Care must be taken to ensure that secondary laminates have good adhesion. Cured surfaces should be sanded between laminates.

All specifications and properties specified above are approximate. Specifications and properties of material delivered may vary slightly from those given above. Interplastic Corporation makes no representations of fact regarding the material except those specified above. No person has any authority to bind Interplastic Corporation to any representation except those specified above. Final determination of the suitability of the material for the use contemplated is the sole responsibility of the Buyer. The Thermoset Resins Division's technical sales representatives will assist in developing procedures to fit individual requirements.

INTERPLASTIC CORPORATION
2015 Northeast Broadway Street
Minneapolis, Minnesota 55413-1775
651.481.6860 Fax 612.331.4235
www.interplastic.com

Revised: 11/07

A2. Hojas de características del polvo de hierro malla 100 empleado



HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD

HIERRO LIMADURA

Rev. 0
Fecha de Elaboración: 05 Dic 08
Fecha de Actualización: 05 Ene 09

SECCIÓN I. DATOS GENERALES

Nombre de la empresa: **QUÍMICA SUJASTES, S.A. DE C.V.**
 En caso de emergencia comunicarse al: Tel.: 5659 8976 / 5659 8975
 Fax: 5659 8976
 Domicilio: Calle Pampano No. 7
 Col. Del Mir. Delegación Tlalhuac.
 C.P. 13270, México, Distrito Federal

SECCIÓN II. DATOS GENERALES DE LA SUSTANCIA QUÍMICA

Nombre químico del producto: **HIERRO LIMADURA MALLA 100**
 Síntomas: Hierro metálico, Hierro elemental
 Fórmula molecular: Fe
 Peso molecular: 55.85
 Familia química: Reactivo de laboratorio.
 Uso del producto: Reactivo de laboratorio.

SECCIÓN III. IDENTIFICACIÓN DE LA SUSTANCIA QUÍMICA

III.1 Identificación

Numero CAS: 7439-89-6
 Numero ONU: NA
 LIMPE (PPT, CT, P): NA
 IPAS: NA

III.2 Clasificación de riesgo NFPA

Salud: 3 Severamente peligroso
 Inflamabilidad: 1 Ligera y peligroso
 Reactividad: 1 Ligera y peligroso
 BPP: E Arreglos de seguridad, guantes y respirador para polvos
 Color de almacenamiento: ROJO

III.3 De los componentes riesgosos

COMPONENTE	No. CAS	No. ONU	CONTENIDO (%)	LIMPE (PPT,CT,P)
HIERRO	7439-89-6	NA	90 – 100 %	NA

SECCIÓN IV. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

Aspecto físico y olor: Gris Fichas cristalinas.
 Peso específico: 7.57
 Presión de vapor (mm Hg): N/A
 Solubilidad en agua @ 25 °C: Insoluble (<0.1%)
 Punto de fusión: 1538 °C (2796 °F)
 Punto de ebullición: 2750 °C (4982 °F)
 Densidad del vapor (aire = 1): N/A
 Página 1 de 4

QS-F0294-02-01
Rev. 00: 20 de noviembre de 2007



HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD

HIERRO LIMADURA

Rev. 0
Fecha de Elaboración: 05 Dic 08
Fecha de Actualización: 05 Ene 09

Temperatura de inflamabilidad: NA
 Temperatura de auto ignición: NA
 pH: NA

SECCIÓN V. RIESGOS DE FUEGO O EXPLOSIÓN

PELIGRO DE EXPLOSIÓN El polvo puede formar mezcla explosiva con el aire.
 Medios de extinción: Use grafito pulverizado, sal pulverizada, o piedra caliza pulverizada. NO use agua, bióxido de carbono, o químicos secos.
 Procedimientos especiales: Los bomberos deben usar equipo de protección adecuado y aparato independiente de respiración con mascarilla completa operada en el modo de presión positiva.
 Descomposición: NA

SECCIÓN VI. DATOS DE REACTIVIDAD

Estabilidad: Almacenar de acuerdo a las consideraciones de la sección XII.
 Incompatibilidad: Ácidos fuertes, fuertes agentes oxidantes, agua, ácidos minerales.
 Polimerización peligrosa: No ocurren.
 Condiciones a evitar: Humedad, calor, llama, otras fuentes de ignición, aire.

SECCIÓN VII. RIESGOS A LA SALUD Y PRIMEROS AUXILIOS

VII.1 INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA

No se obtuvo información sobre las LD50/LD01 relacionadas con las rutas normales de exposición ocupacional.

VII.2 PRIMEROS AUXILIOS

Inhalación. Si una persona respira grandes cantidades, saque a la persona expuesta al aire fresco.
Ingestión. Si se ingieren grandes cantidades, dé a tomar agua y busque consejo médico.
Contacto con la piel. Lave de inmediato con bastante jabón y agua por lo menos durante 15 minutos.
Contacto con los ojos. En caso de contacto con los ojos, lave inmediatamente con bastante agua por lo menos durante 15 minutos.

VII.3 INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA

NA

SECCIÓN VIII. INDICACIONES EN CASO DE FUGA O DERRAME

Página 2 de 4

QS-F0294-02-01
Rev. 00: 20 de noviembre de 2007



HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD

HIERRO LIMADURA

Rev. 0
Fecha de Elaboración 09/Ene/08
Fecha de Actualización 09/Ene/08

Use ropa protectora adecuada. Barra cuidadosamente y retira.

Para información de **EMERGENCIA EN TRANSPORTACIÓN** llamar al Sistema de Emergencias en Transporte de la Industria Química SETIQ 01 800 0021400 para el interior de la República y 01(55)6559 15 86 para el D.F. y Zona Metropolitana, las 24 horas del día. Para información de urgencia sobre salud, seguridad y medio ambiente llamar al teléfono 01(55)6639 8976 en México, D.F.

SECCIÓN IX. PROTECCIÓN ESPECIAL PARA CASOS DE EMERGENCIA

Ventilación: Se recomienda un sistema de escape local y/o general para las exposiciones de empleados otorgado de los Límites de Exposición Aves. En general, se prefiere la ventilación de extractor local debido a que puede controlar las emisiones del contaminante en su fuente, impidiendo dispersión del mismo al lugar general de trabajo.

Protección respiratoria: Si se excede el límite de exposición, se puede usar un respirador semifacial contra polvos/neblinas hasta diez veces el límite de exposición o la concentración máxima de utilización que especifica el organismo de control apropiado o el fabricante del respirador, lo que sea más bajo. Se puede usar un respirador facial.

Protección de ojos: Utilice gafas protectoras contra productos químicos y/o un protector de cara completo donde el contacto no sea posible. Los lentes de contacto no deberían ser usados cuando se trabaja con este material.

Protección de la piel: Usar ropa de protección adecuada y guantes de hule resistentes para evitar el contacto. En caso de contacto, lavarse rápidamente. Lavar la ropa y limpiar el equipo contaminado antes de usarlo de nuevo.

SECCIÓN X. INFORMACIÓN PARA SU TRANSPORTACIÓN

MEDIOS DE TRANSPORTACIÓN NO REGULADOS.

SECCIÓN XI. INFORMACIÓN SOBRE ECOLOGÍA

Toxicidad Ambiental:
No encontró información.

SECCIÓN XII. PRECAUCIONES ESPECIALES

ALMACENAMIENTO: Mantenga envase firmemente cerrado. Adecuado para cualquier área de almacenamiento general de químicos. Almacene en área seca. Evite de crear polvo. Los recipientes de este material pueden ser peligrosos al vaciarse puesto que retienen residuos del producto (polvo, sólidos); observe todas las advertencias y precauciones listadas para el producto.

DESECHO: Lo que no pueda salvarse para recuperar o reciclar debe manejarse en una instalación de eliminación de residuos, aprobada y apropiada. El procesamiento, utilización o contaminación de este producto puede cambiar las opciones de administración de residuos. Las regulaciones de eliminación local o estatal pueden diferir de las regulaciones de eliminación federal.

Página 3 de 4

Q6-FORH-02-01
Rev. 00: 30/04/2016/09/01/2007



HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD

HIERRO LIMADURA

Rev. 0
Fecha de Elaboración 09/Ene/08
Fecha de Actualización 09/Ene/08

Este documento ha sido preparado de acuerdo con los requisitos de la norma **NOM-016-STPS-2000**, de comunicación de peligros por sustancias químicas.

La información aquí contenida está basada en el conocimiento y experiencia actuales; no se acepta ninguna responsabilidad si es inadecuada o incompleta en todos los casos. El usuario debe considerar estos datos como suplemento únicamente de otra información que haya obtenido por su propia experiencia para garantizar el uso y la eliminación apropiados de estos materiales, la seguridad y salud del personal y clientes, así como la protección del medio ambiente.

Hoja de Datos de Seguridad de materiales preparada por: Subdirección de Control de Operaciones – Proceso de Seguridad e Higiene de Química Susates, S.A. de C.V.

Ricardo Susates Torales
Responsable de Seguridad e Higiene

Página 4 de 4

Q6-FORH-02-01
Rev. 00: 30/04/2016/09/01/2007

APÉNDICE B. NORMAS EMPLEADAS DURANTE EL PROCESO DE CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

B1. Norma ASTM A772/A772M



Designation: A772/A772M – 00 (Reapproved 2011)¹

Standard Test Method for AC Magnetic Permeability of Materials Using Sinusoidal Current¹

This standard is based under the fixed designation A772/A772M; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last approval. A superscript symbol (n) indicates an editorial change since the last revision or approval.

¹ Non-Updated 6.2 and 7.3 editorially in August 2011.

1. Scope

1.1 This test method provides a means for determination of the impedance permeability (μ_z) of ferromagnetic materials under the condition of sinusoidal current (sinusoidal H) excitation. Test specimens in the form of laminated toroidal cores, tape-wound toroidal cores, and link-type laminated cores having uniform cross sections and closed flux paths (no air gaps) are used. The method is intended as a means for determining the magnetic performance of ferromagnetic strip having a thickness less than or equal to 0.025 in. [0.635 mm].

1.2 This test method shall be used in conjunction with those applicable paragraphs in Practice A330/A330M.

1.3 The values and equations stated in customary (cgs-emu and inch-pound) or SI units are to be regarded separately as standard. Within this standard, SI units are shown in brackets except for the sections concerning calculations where there are separate sections for the respective unit systems. The values stated in each system may not be exact equivalents; therefore, each system shall be used independently of the other. Combining values from the two systems may result in nonconformance with this standard.

1.4 This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:²

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee A09 on Magnetic Properties and is the direct responsibility of Subcommittee A09.01 on Test Methods.
Current edition approved May 1, 2011. Published May 2011. Originally approved in 1980. Last previous edition approved in 2005 as A772/A772M-06b-2005. DOI: 10.1520/A0772_A772M-08E11816.
² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For Annual Book of ASTM Standards volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

Copyright © ASTM International, 100 Barr Harbor Dr., PO Box C-700, West Conshohocken, Pennsylvania 19380-2959, United States

Copyright by ASTM Int'l (all rights reserved); Wed Sep 19 01:13:46 EDT 2012
Downloaded by []

A34/A34M Practice for Sampling and Procurement Testing of Magnetic Materials
A340 Terminology of Symbols and Definitions Relating to Magnetic Testing

3. Terminology

3.1 **Definitions**—The terms and symbols used in this test method are defined in Terminology A340.

4. Significance and Use

4.1 The permeability determined by this method is the impedance permeability. Impedance permeability is the ratio of the peak value of flux density (B_{max}) to the assumed peak magnetic field strength (H_c) without regard to phase. As compared to testing under sinusoidal flux (sinusoidal B) conditions, the permeabilities determined by this method are numerically lower since, for a given test signal frequency, the rate of flux change (dB/dt) is higher.

4.2 This test method is suitable for impedance permeability measurements at very low magnetic inductions at power frequencies (50 to 60 Hz) to moderate inductions below the point of maximum permeability of the material (the knee of the magnetization curve) or until there is visible distortion of the current waveform. The lower limit is a function of sample area, secondary turns, and the sensitivity of the flux-reading voltmeter used. At higher inductions, measurements of flux-generated voltages that are appreciably distorted mean that the flux has appreciable harmonic frequency components. The upper limit is given by the availability of pure sinusoidal current, which is a function of the power source. In addition, a large ratio (≥ 10) of the total series resistance of the primary circuit to the primary coil impedance is required. With proper test apparatus, this test method is suitable for use at frequencies up to 1 MHz.

4.3 This test method is suitable for design, specification acceptance, service evaluation, quality control, and research use.

A772/A772M – 00 (2011)¹

5. Apparatus

5.1 The test circuit, which is schematically illustrated in Fig. 1, shall consist of the following components.

5.2 **Power Supply**—For power frequency (50- or 60-Hz) testing, a suitable power supply consists of two or three series connected autotransformers of sufficient power rating. This will provide a continuously variable current source to excite the test specimen. For testing at other than power frequency, an ac power source consisting of a low distortion sinusoidal signal generator and linear amplifier are required. The use of feedback control of the power amplifier is permitted.

5.3 **Isolation/Stepdown Transformer**—The use of a low distortion isolation/stepdown transformer is highly recommended for operator safety and to eliminate any dc bias current present when using electronic power supplies. A combined isolation/stepdown transformer can provide greater control when testing is done at very low magnetizing currents.

5.4 **Primary Series Resistor (Z)**—A noninductive resistor having sufficiently high resistance to maintain sinusoidal current conditions at the highest magnetizing current and test signal frequency of interest. In practice, resistance values of 10 to 100 Ω are used. If this resistor is used to measure the magnetizing current, the resistance shall be known to better than 0.5 % and the resistance shall not increase by more than 0.5 % at the rated maximum current of the power supply.

5.5 **True RMS Ammeter (A)**—A true rms ammeter or a combination of a noninductive, precision current viewing resistor and true rms voltmeter shall be used to measure the magnetizing current. The meter shall have an accuracy of better than 0.5 % full scale at the test frequency. The current viewing resistor, if used, shall have an accuracy better than 0.5 % and shall have sufficient power rating such that the resistance shall not vary by more than 0.5 % at the rated maximum current of the power supply.

5.6 **Flux Measuring Voltmeter (V)**—The flux shall be determined from the voltage induced in the secondary winding using one of the following type of voltmeter:
(1) an average responding digital voltmeter calibrated to read rms volts for a sine wave or
(2) a true average responding digital voltmeter.

The voltmeter shall have input impedance greater than 1 M Ω , a full-scale accuracy of better than 0.5 % at the test frequency, and a crest factor capability of 3 or greater.

6. Procedure

6.1 **Specimen Preparation**—After determining the mass and dimensions of the test specimen, it should be enclosed in a suitable insulating case to prevent intimate contact between it and the primary and secondary windings. This will also minimize the stress introduced by windings. The case shape and

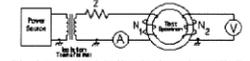


FIG. 1 Schematic Circuit for Sinusoidal Current Permeability Test

Copyright by ASTM Int'l (all rights reserved); Wed Sep 19 01:13:46 EDT 2012
Downloaded by []

size shall approximate that of the test specimen so that the secondary winding encloses minimal air flux. All test specimens shall have a uniform rectangular cross section.

6.1.1 The cross-sectional area and mean magnetic path length of the test specimen shall be calculated using the equations in 7.1 and 7.2 or 8.1 and 8.2. To obtain acceptable uniformity of magnetic field strength throughout the specimen, the following dimensional constraints shall be observed:
(1) for a toroid the inside diameter to outside diameter ratio shall exceed 0.82 and
(2) for the link specimen shown in Fig. 2, the separation (s) shall exceed nine times the radial width (w).

6.1.2 A secondary winding (N_2) using insulated wire shall be uniformly distributed over the test specimen using a sufficient number of turns so that a measurable voltage will be obtained at the lowest flux density of interest. A uniformly distributed primary winding (N_1) of insulated wire shall be applied on top of the secondary winding and be of sufficient diameter to conduct the highest intended magnetizing current safely without significant heating. Twisted leads or biconductor cable shall be used to connect the specimen windings to the test apparatus.

6.2 **Calculation of Test Signals**—Testing is done either at specified values of flux density (B_{max}) or magnetic field strength (H_c). Before testing, the rms magnetizing currents or voltages generated in the secondary shall be calculated using the equations found in 7.3 and 7.4 or 8.3 and 8.4.

6.3 **Demagnetization**—After connecting the primary and secondary windings to the apparatus, the test specimen shall be demagnetized by applying a magnetizing current sufficiently large to create a magnetic field strength greater than ten times the coercivity of the test specimen. The magnetizing current then shall be slowly and smoothly reduced to zero to demagnetize the test specimen. The frequency used should be the same as the test frequency.

6.4 **Measurement**—The magnetizing current shall be carefully increased until the lowest value of either magnetizing current (if measuring at a specified value of magnetic field strength) or flux density (if measuring at a specified value of flux density) is obtained. Both the magnetizing current and secondary voltage shall be recorded. The magnetizing current is then increased to the next test point and the process repeated until all test points have been measured. It is imperative that measurements be made in order of increasing magnetic field

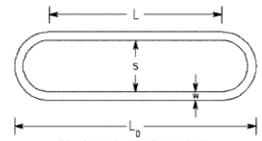


FIG. 2 Schematic of Link-Type Lamination

strength or flux density. When a prescribed value of magnetic field strength or flux density has been accidentally exceeded during the test, the specimen must be demagnetized and testing resumed at that point.

6.4.1 At the conclusion of testing, the magnetizing current shall be reduced to zero and the specimen removed from the test apparatus. The impedance permeability shall be calculated using the equations found in 7.5 or 8.5.

7. Calculation (Customary Units)

7.1 Calculation of Mean Magnetic Path Length, l (assumed to be equal to the mean geometric path):

7.1.1 For toroidal cores:

$$l = \frac{\pi(D+d)}{2} \quad (1)$$

where:
 l = mean magnetic path length, cm;
 D = outside diameter, cm; and
 d = inside diameter, cm.

7.1.2 For link cores of the form shown in Fig. 2:

$$l = 2L + \pi(s + w) = 2L_0 + (\pi - 2)s + (\pi - 4)w \quad (2)$$

where:
 l = mean magnetic path length, cm;
 L_0 = total length, cm;
 L = length of parallel sides, cm;
 s = wall separation, cm; and
 w = radial width, cm.

7.2 Calculation of Cross-Sectional Area, A :
 7.2.1 For either toroidal or link-type cores, the cross-sectional area is calculated from the mass and mean magnetic path length as:

$$A = \frac{m}{\delta} \quad (3)$$

where:
 A = cross-sectional area, cm²;
 m = specimen mass, g/m;
 l = mean magnetic path length, cm; and
 δ = specimen density, g/cm³.

Note that the core height or lamination stacking factor is not required in the preceding equation.

7.3 Calculation of the Assumed Peak Magnetic Field Strength, H_p . The assumed peak magnetic field strength is calculated from the rms value of magnetizing current as:

$$H_p = \frac{0.4\pi\sqrt{2}N_1I_p}{l} \quad (4)$$

where:
 H_p = assumed peak magnetic field strength, Oe;
 N_1 = number of primary turns;
 I_p = rms magnetizing current, A; and
 l = mean magnetic path length of specimen, cm.

7.4 Calculation of Peak Flux Density, B_{max} :
 7.4.1 The peak flux density when using an average responding voltmeter calibrated to yield rms values for a sine wave is calculated as:

$$B_{max} = \frac{10^8 E_p}{\sqrt{2}\pi N_2 A} \quad (5)$$

7.4.2 The peak flux density when using a true average responding voltmeter is calculated as:

$$B_{max} = \frac{10^8 E_{avg}}{3.98N_2 A} \quad (6)$$

where:
 B_{max} = peak flux density (induction), gauss;
 E_p = flux voltage measured across secondary winding, V;
 E_{avg} = average voltage measured across secondary winding, V;
 f = test frequency, Hz;
 N_2 = number of secondary turns; and
 A = cross-sectional area of test specimen, cm².

7.5 Calculation of Impedance Permeability, μ_i :
 7.5.1 The impedance permeability is calculated as the ratio of B_{max} to H_p , or:

$$\mu_i = \frac{B_{max}}{H_p} \quad (7)$$

8. Calculation (SI Units)

8.1 Calculation of Mean Magnetic Path Length, l (assumed to be equal to the mean geometric path):

8.1.1 For toroidal cores:

$$l = \frac{\pi(D+d)}{2} \quad (8)$$

where:
 l = mean magnetic path length, m;
 D = outside diameter, m; and
 d = inside diameter, m.

8.1.2 For link cores of the form shown in Fig. 2:

$$l = 2L + \pi(s + w) = 2L_0 + (\pi - 2)s + (\pi - 4)w \quad (9)$$

where:
 l = mean magnetic path length, m;
 L_0 = total length, m;
 L = length of parallel sides, m;
 s = wall separation, m; and
 w = radial width, m.

8.2 Calculation of Cross-Sectional Area, A :
 8.2.1 For either toroidal or link type cores, the cross-sectional area is calculated from the mass and mean magnetic path length as:

$$A = \frac{m}{\delta} \quad (10)$$

where:
 A = cross-sectional area, m²;
 m = specimen mass, kg;
 l = mean magnetic path length, m; and
 δ = specimen density, kg/m³.

Note that the core height or lamination stacking factor is not required in the preceding equation.

8.3 Calculation of the Assumed Peak Magnetic Field Strength, H_p . The assumed peak magnetic field strength is calculated from the rms value of magnetizing current as:

$$H_p = \frac{\sqrt{2}N_1 I_p}{l} \quad (11)$$

where:
 H_p = assumed peak magnetic field strength, A/m;
 N_1 = number of primary turns;
 I_p = rms magnetizing current, A; and
 l = mean magnetic path length of specimen, m.

8.4 Calculation of Peak Flux Density, B_{max} :
 8.4.1 The peak flux density when using an average responding voltmeter calibrated to yield rms values for a sine wave is calculated as:

$$B_{max} = \frac{E_p}{\sqrt{2}\pi N_2 A} \quad (12)$$

8.4.2 The peak flux density when using a true average responding voltmeter is calculated as:

$$B_{max} = \frac{E_{avg}}{3.98N_2 A} \quad (13)$$

where:
 B_{max} = peak flux density (induction), tesla;
 E_p = flux voltage measured across secondary winding, V;

E_{avg} = average voltage measured across secondary winding, V;
 f = test frequency, Hz;
 N_2 = number of secondary turns; and
 A = cross-sectional area of test specimen, m².

8.5 Calculation of Impedance Permeability, μ_i :
 8.5.1 In the SI system of units, the ratio of B_{max} to H_p is the absolute impedance permeability. A more useful form is the relative impedance permeability which is the ratio of the absolute permeability to the permeability of free space or:

$$\mu_r = \frac{B_{max}}{l_p H_p} \quad (14)$$

μ_0 = magnetic constant equal to $4\pi \times 10^{-7}$ H/m.

9. Precision and Bias

9.1 The precision and bias of this test method have not been established by interlaboratory study. However, it is estimated that the precision of measurement is no worse than $\pm 5\%$.

10. Keywords

10.1 magnetic field strength; magnetic flux density; magnetic induction; permeability; sinusoidal current; toroidal core

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19380-2900, United States. Individual reports (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-855-7800 (international), 610-855-9800 (fax), or approval.astm.org (internet), or through the ASTM website (www.astm.org). Permission rights to photocopy this standard may also be secured from the ASTM website (www.astm.org/COPYRIGHT).

NOTA. En los siguientes anexos de las normas empleadas, únicamente se presentará la página 1 y 2 de las normas restantes. Lo anterior por cuestiones de extensión de este documento, y por cuestiones de relevancia en el propósito de presentarlas.

B2. Norma ISO 9001 (2008)

NMX-CC-9001-IMNC-2008

COPANT/ISO 9001-2008

ISO 9001:2008

ISO 9001:2008

COPANT/ISO 9001-2008

NMX-CC-9001-IMNC-2008

Introducción

0.1 Generalidades

La adopción de un sistema de gestión de la calidad debería ser una decisión estratégica de la organización. El diseño y la implementación del sistema de gestión de la calidad de una organización están influenciados por:

- su entorno organizativo, cambios en ese entorno y los riesgos asociados con ese entorno,
- sus necesidades cambiantes,
- sus objetivos particulares,
- los productos que proporciona,
- los procesos que emplea,
- su tamaño y la estructura de la organización.

No es el propósito de esta norma mexicana proporcionar uniformidad en la estructura de los sistemas de gestión de la calidad o en la documentación.

Los requisitos del sistema de gestión de la calidad especificados en esta norma mexicana son complementarios a los requisitos para los productos. La información identificada como "NOTA" se presenta a modo de orientación para la comprensión o clarificación del requisito correspondiente.

Esta norma mexicana pueden utilizarla partes internas y externas, incluyendo organismos de certificación, para evaluar la capacidad de la organización para cumplir los requisitos del cliente, los legales y los reglamentarios aplicables al producto y los propios de la organización.

En el desarrollo de esta norma mexicana se han tenido en cuenta los principios de gestión de la calidad enunciados en las normas NMX-CC-9000-IMNC e NMX-CC-9004-IMNC.

0.2 Enfoque basado en procesos

Esta norma mexicana promueve la adopción de un enfoque basado en procesos cuando se desarrolla, implementa y mejora la eficacia de un sistema de gestión de la calidad, para aumentar la satisfacción del cliente mediante el cumplimiento de sus requisitos.

Para que una organización funcione de manera eficaz, tiene que determinar y gestionar numerosas actividades relacionadas entre sí. Una actividad o un conjunto de actividades que utiliza recursos, y que se gestiona con el fin de permitir que los elementos de entrada se transformen en resultados, se puede considerar como un proceso. Frecuentemente el resultado de un proceso constituye directamente el elemento de entrada del siguiente proceso.

La aplicación de un sistema de procesos dentro de la organización, junto con la identificación e interacciones de estos procesos, así como su gestión para producir el resultado deseado, puede denominarse como "enfoque basado en procesos".

Una ventaja del enfoque basado en procesos es el control continuo que proporciona sobre los vínculos entre los procesos individuales dentro del sistema de procesos, así como sobre su combinación e interacción.

x

Derechos reservados © IMNC 2008

Un enfoque de este tipo, cuando se utiliza dentro de un sistema de gestión de la calidad, enfatiza la importancia de:

- la comprensión y el cumplimiento de los requisitos,
- la necesidad de considerar los procesos en términos que aporten valor,
- la obtención de resultados del desempeño y eficacia del proceso, y
- la mejora continua de los procesos con base en mediciones objetivas.

El modelo de un sistema de gestión de la calidad basado en procesos que se muestra en la Figura 1 ilustra los vínculos entre los procesos presentados en los Capítulos 4 a 8. Esta figura muestra que los clientes juegan un papel significativo para definir los requisitos como elementos de entrada. El seguimiento de la satisfacción del cliente requiere la evaluación de la información relativa a la percepción del cliente acerca de si la organización ha cumplido sus requisitos. El modelo mostrado en la Figura 1 cubre todos los requisitos de esta norma mexicana, pero no refleja los procesos de una forma detallada.

NOTA De manera adicional, puede aplicarse a todos los procesos la metodología conocida como "Planificar-Hacer-Verificar-Actuar" (PHVA). PHVA puede describirse brevemente como:

Planificar: establecer los objetivos y procesos necesarios para conseguir resultados de acuerdo con los requisitos del cliente y las políticas de la organización.

Hacer: implementar los procesos.

Verificar: realizar el seguimiento y la medición de los procesos y los productos respecto a las políticas, los objetivos y los requisitos para el producto, e informar sobre los resultados.

Actuar: tomar acciones para mejorar continuamente el desempeño de los procesos.

Derechos reservados © IMNC 2008

xi

B3. Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005

NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-052-SEMARNAT-2005, QUE ESTABLECE LAS CARACTERÍSTICAS, EL PROCEDIMIENTO DE IDENTIFICACIÓN, CLASIFICACIÓN Y LOS LISTADOS DE LOS RESIDUOS PELIGROSOS.

NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-052-SEMARNAT-2005, QUE ESTABLECE LAS CARACTERÍSTICAS, EL PROCEDIMIENTO DE IDENTIFICACIÓN, CLASIFICACIÓN Y LOS LISTADOS DE LOS RESIDUOS PELIGROSOS.

Norma publicada en el Diario Oficial de la Federación el 23 de junio de 2006

TEXTO VIGENTE

Al margen un sello con el Escudo Nacional, que dice: Estados Unidos Mexicanos.- Presidencia de la República.

JOSÉ RAMÓN ARDAVIN ITUARTE, Subsecretario de Fomento y Normatividad Ambiental de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, y Presidente del Comité Consultivo Nacional de Normalización de Medio Ambiente y Recursos Naturales, con fundamento en lo dispuesto en los artículos 32 Bis fracciones I, II, IV y V de la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal; 6o. fracción XIX y 8o. fracción V del Reglamento Interior de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; 1o., fracciones I, II, III y VI, 5o., fracciones V y VI, 36, 37 Bis, 150, 151, 160 y 171 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente; 7o. fracción II, 15, fracciones I, III, 16, 22, 31, 42, 43, 45 y 67 fracción VIII de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos; 4o. fracción I del Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de Residuos Peligrosos; 38 fracción II, 4o. fracciones X, XIII y XVII, 47 fracción I, 51 y 73 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización; 33 y 40, fracciones III y IV del Reglamento de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, y

CONSIDERANDO

Que las disposiciones de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente y de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos son de orden público e interés social y tienen por objeto propiciar el desarrollo sustentable y establecer, entre otras, las bases para garantizar el derecho de toda persona a vivir en un medio ambiente adecuado para su desarrollo, salud y bienestar; definir los principios de la política ambiental y los instrumentos para su aplicación; la preservación, la restauración y el mejoramiento del ambiente, así como la prevención y el control de la contaminación del aire, agua y suelo.

Que los citados ordenamientos legales establecen que las normas oficiales mexicanas contendrán, entre otros temas, los listados que clasifiquen los materiales y residuos peligrosos considerando sus características.

Que con fecha 22 de octubre de 1993 se publicó en el Diario Oficial de la Federación la Norma Oficial Mexicana NOM-CRP-001-ECOL/1993, que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente; dicha Norma mediante acuerdo SECRETARÍA

NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-052-SEMARNAT-2005, QUE ESTABLECE LAS CARACTERÍSTICAS, EL PROCEDIMIENTO DE IDENTIFICACIÓN, CLASIFICACIÓN Y LOS LISTADOS DE LOS RESIDUOS PELIGROSOS.

publicado en el Diario Oficial de la Federación el 29 de noviembre de 1994, actualizó su nomenclatura quedando como NOM-052-ECOL-1993.

Que los residuos peligrosos se han diversificado en la medida que se modifican o presentan nuevos procesos de extracción, transformación, producción, uso y tratamiento, por lo que se hizo necesario revisar la NOM-052-ECOL-1993, acorde a las modificaciones de la legislación aplicable.

Que con fecha 22 de octubre de 1999, se publicó en el Diario Oficial de la Federación el Proyecto de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-052-ECOL-1999, que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y el listado de los residuos peligrosos con el fin de que los interesados dentro del plazo legal que establece la ley en la materia presentaran sus comentarios ante el Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Protección Ambiental; que durante el citado plazo, los interesados presentaron sus comentarios y modificaciones al proyecto en cuestión, que al ser analizados algunos se consideraron procedentes y como consecuencia se hicieron modificaciones sustanciales al mismo.

Que derivado de lo anterior, el mencionado Comité, en cumplimiento con lo establecido por el artículo 33 del Reglamento de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, determinó someter el proyecto modificado al periodo de consulta pública, bajo la denominación de PROY-NOM-052-ECOL-2001, que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y el listado de los residuos peligrosos.

Que el PROY-NOM-052-ECOL-2001, que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y el listado de los residuos peligrosos, de conformidad con los preceptos antes invocados, se publicó a consulta pública el 26 de julio de 2002, a efecto de que los interesados, dentro de los 60 días naturales siguientes a la publicación en el Diario Oficial de la Federación, emitieran sus comentarios ante el Comité Consultivo Nacional de Normalización de Medio Ambiente y Recursos Naturales, sito en Bulevar Adolfo Ruíz Cortines número 4209, piso 5o., colonia Jardines en la Montaña, código postal 14210, Delegación Tlalpan, México, D.F., vía fax 5628-0632 o al correo electrónico: industria@semarnat.gob.mx.

Que el día 23 de abril de 2003 apareció en el Diario Oficial de la Federación un acuerdo a través del cual se reforma la nomenclatura de las normas oficiales mexicanas expedidas por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, cambiando el nombre tanto de la NOM-052-ECOL-1993 como del PROY-NOM-052-ECOL-2001 a NOM-052-SEMARNAT-1993 y PROY-NOM-052-SEMARNAT-2001, respectivamente.

Que el 8 de octubre de 2003 fue publicada, en el Diario Oficial de la Federación, la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos.

Que de acuerdo a lo establecido en el artículo 47 fracciones II y III de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, los interesados presentaron sus comentarios al proyecto de norma en cuestión, los cuales fueron analizados por el Comité Consultivo

C2. Protocolo de pruebas en baja frecuencia

CONTROL DE CAMBIOS Y MEJORAS

NIVEL DE REVISIÓN	SECCIÓN Y/O PÁGINA	DESCRIPCIÓN DE LA MODIFICACIÓN Y MEJORA	FECHA DE MODIFICACIÓN
01			
02			
03			
04			

Elaboró:	Autorizó:	Revisó:	Fecha y horario de inicio:	Fecha y horario de término:
Ing. Susana Magaly Parrilla Rubio Alumna de CENIDET				

I. Objetivo

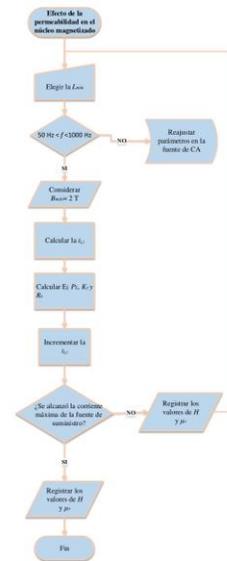
Aplicar señales de voltaje y corriente sinusoidales a los especímenes del material propuesto al realizar pruebas en baja frecuencia para observar su comportamiento a partir de la determinación de sus características magnéticas obtenidas.

II. Alcance

Registrar los resultados para cada tipo de núcleo.

III. Diagrama del procedimiento

El diagrama de flujo del proceso se muestra en la siguiente página:



IV. Descripción del procedimiento

Tabla 1. Descripción del procedimiento que se realizará en el proceso de magnetización del toroide

Actividad	Descripción	Responsable
Paso 1. Mediciones de inductancia de los núcleos en frecuencias de 50, 60, 200, 400, 600, 800 y 1000 Hz.	Utilizar el medidor de inductancias para realizar las mediciones.	Ing. Susana Magaly Parrilla Rubio
Paso 2. Selección del valor de la $L_{m\text{mínima}}$ (mínima inductancia) para cada tipo de toroide y seleccionar el menor valor de inductancia.	Comparar los resultados para cada tipo de toroide y seleccionar el menor valor de inductancia.	Ing. Susana Magaly Parrilla Rubio
Paso 3. Asignar 2 T al valor de la densidad de flujo magnético ($B_{\text{máx}}$).	Este valor puede disminuirse o aumentarse, de acuerdo al resultado final de la prueba.	Ing. Susana Magaly Parrilla Rubio
Paso 4. Calcular la I_L (corriente eficaz) que se puede aplicar al núcleo.	En función de la densidad de flujo magnético, el número de vueltas, área de sección transversal e inductancia mínima del espécimen.	Ing. Susana Magaly Parrilla Rubio
Paso 5. Calcular la P_s (potencia en el inductor) y el K_s (factor de acoplamiento).	En función de los anteriores, más el producto de la resistencia serie. El factor de acoplamiento como relación de la inductancia mutua y la autoinductancia del primario.	Ing. Susana Magaly Parrilla Rubio
Paso 6. Calcular el E_s (voltaje de salida eficaz) mediante la relación efectiva de vueltas.	La relación efectiva de vueltas es la relación entre la autoinductancia en el secundario y en el primario.	Ing. Susana Magaly Parrilla Rubio
Paso 7. Calcular la R_s (resistencia del réostato).	La cual depende del voltaje a la salida, la corriente máxima y la reactancia del devanado en el núcleo.	Ing. Susana Magaly Parrilla Rubio
Paso 8. Incrementar la I_L .	Basándose en la norma ASTM A772/A772M.	Ing. Susana Magaly Parrilla Rubio
Paso 9. Registrar los valores de H y μ , para determinar el efecto de la permeabilidad magnética en el núcleo probado.	Reportar si se saturó el espécimen, registrar el dato o datos obtenidos de la experimentación.	Ing. Susana Magaly Parrilla Rubio

V. Equipo utilizado

- Fuente de corriente sinusoidal
- Medidor de inductancias
- Núcleos devanados con alambre de cobre
- Multímetro

VI. Referencias

Norma que avala el procedimiento: ISO 9001

- La capacidad para interactuar con la aplicación de almacén de datos existente
- La capacidad para incorporar enrutamiento y notificaciones automatizados en base a reglas empresariales

Se tienen núcleos del compuesto hierro-resina de forma toroidal, clasificadas de acuerdo a sus dimensiones:

Tabla 2. Clasificación de los núcleos según sus dimensiones.

Probeta N°	De	Di	O
1	2.14	1.34	0.95
2	3.48	2.25	1.4
3	4.96	3.06	1.75
N	8.85	7.61	2.2

Nota: De (Diámetro exterior), Di (Diámetro interior), O (espesor) de cada toroide.

También, se han clasificado por colores de acuerdo al porcentaje de hierro que contienen:

Tabla 3. Clasificación de las probetas según sus colores.

Probeta N°	Color	Limadura de Fe %
1	Rosa	0
	Vino	15.3
2	Gris	16.7
	Verde olivo	23
3	Verde	28.6
	Negro	33.3
N	Café	44.4
	Morado	47.4
	Azul	48.7



VII. Glosario

Toroide. En geometría el toroide o toro es la superficie de revolución generada por una curva plana cerrada simple que gira alrededor de una recta externa coplanar (el eje de rotación) con la que no se interseca.

Saturación. Es un efecto que se observa en algunos materiales magnéticos, y se caracteriza como el estado alcanzado cuando cualquier incremento posterior en un campo de magnetización externo H no provoca un aumento en la magnetización del material

Devanado. Acción de devanar, también se le nombra a un componente de un circuito eléctrico formado por un hilo conductor aislado y devanado repetidamente, en forma variable según su uso.

Susceptibilidad magnética. Es la razón entre la magnetización inducida en el material o polarización magnética, y la intensidad de campo magnético H a la cual está sujeto dicho material (medida de la facilidad que presenta un material que ha de ser magnetizado por un campo magnético H dado).

Permeabilidad magnética. Indica con qué facilidad atraviesa el campo magnético la materia, o sea si esta es buena conductora o no del campo magnético.

Intensidad de campo magnético. Es la influencia que ejerce la corriente externa en la creación del campo magnético del material, independientemente de la respuesta magnética del material.

Densidad de campo magnético. Corresponde al número de líneas de fuerza magnética que atraviesan perpendicularmente un área o región del campo magnético.

VIII. Observaciones

Se propuso el valor de la densidad de flujo magnético para la magnetización del núcleo azul (48.7%) compuesto por hierro y resina para tener un punto de referencia en el desarrollo de los cálculos matemáticos.

Mediante la inducción de diversos valores de voltaje y corriente de CA, en orden ascendente y descendente, de los núcleos normalizados en baja frecuencia (50 Hz a 1 kHz), se magnetizó el material y se analizó el efecto que se tuvo para obtener sus características magnéticas.



IX. Anexos

Plantilla de cálculos realizados

Datos de entrada
T (° C) = Aprox. 298.15 K
f (Hz) = 1000

La siguiente tabla registrará la permeabilidad magnética de cada núcleo según varíe la tensión suministrada.

Tabla 4. Registro de los datos de magnetización para los núcleos

Equipo utilizado:						
<ul style="list-style-type: none"> Fuente de corriente alterna Medidor de inductancias Osciloscopio 						
Probeta N°	Color: l(m) = A.(m²) =		n=210 n=210 Alambre magneto #_24_			
Vent (V)	Ient (A)	Vsal (V)	H (A/m)	Bsat (T)	μr	χ

C3. Protocolo de pruebas en alta frecuencia

CONTROL DE CAMBIOS Y MEJORAS

NIVEL DE REVISIÓN	SECCIÓN Y/O PÁGINA	DESCRIPCIÓN DE LA MODIFICACIÓN Y MEJORA	FECHA DE MODIFICACIÓN
01			
02			
03			
04			

Elaboró:	Autorizó:	Revisó:	Fecha y horario de inicio:	
Ing. Susana Magaly Parrilla Rubio Alumna de CENDET			Fecha y horario de término:	

I. Objetivo

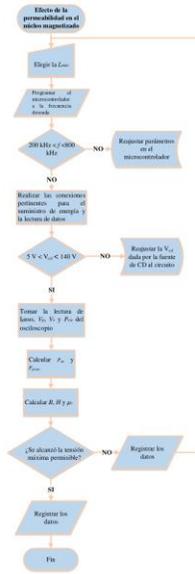
Realizar pruebas a alta frecuencia en los núcleos normalizados mediante la inyección de señales de voltaje y corriente de CA, para analizar el comportamiento del material a partir de la determinación de sus características magnéticas.

II. Alcance

Registrar los resultados de las características magnéticas obtenidas para cada clase y color de núcleo.

III. Diagrama del procedimiento

El diagrama de flujo del proceso se muestra en la siguiente página:



IV. Descripción del procedimiento

Tabla 1. Descripción del procedimiento que se realizará en el proceso de magnetización del toroide

Actividad	Descripción	Responsable
Paso 1. Medición de la inductancia de los núcleos devanados con alambre de cobre 30 AWG.	Utilizar el medidor de inductancias para realizar las mediciones.	Ing. Susana Magaly Parrilla Rubio
Paso 2. Selección del valor de la mínima inductancia para cada clase de núcleo y seleccionar el menor valor de inductancia.	Comparar los resultados para cada clase de núcleo y seleccionar el menor valor de inductancia.	Ing. Susana Magaly Parrilla Rubio
Paso 3. Ajustar el microcontrolador a la frecuencia deseada.	Las frecuencias a las que se trabajará son: 200, 600 y 800 kHz.	Ing. Susana Magaly Parrilla Rubio
Paso 4. Proporcionar la tensión al inversor con la fuente de CD de alta potencia (en el rango $5 V < V_{cc} < 140 V$).	Este valor puede disminuirse o aumentarse, de acuerdo al resultado final de la prueba.	Ing. Susana Magaly Parrilla Rubio
Paso 5. Registrar la I_{ms} inducida en el primario, el V_p , el V_c y las pérdidas en el cobre, P_{cu} .	La lectura de estos datos se tomará con el empleo del osciloscopio, el cual permitirá observar la forma de onda senoidal a la salida del inversor.	Ing. Susana Magaly Parrilla Rubio
Paso 6. Calcular la B_c (densidad de flujo magnético), la H (intensidad de campo magnético) y la μ_r (permeabilidad relativa del núcleo).	En función de las ecuaciones dadas por la norma ASTM A772/A772M.	Ing. Susana Magaly Parrilla Rubio
Paso 7. Calcular la P_m (potencia en el núcleo) y la P_{total} (potencia total).	En base a los cálculos que se tienen para determinar dichos datos.	Ing. Susana Magaly Parrilla Rubio
Paso 8. Calcular la χ (susceptibilidad magnética).	Con la Ecuación (4.21).	Ing. Susana Magaly Parrilla Rubio
Paso 9. Determinar el efecto de la permeabilidad magnética en el núcleo probado.	Reportar si se saturó el espécimen, registrar el dato o datos obtenidos de la experimentación.	Ing. Susana Magaly Parrilla Rubio

V. Equipo utilizado

- Fuente de CD de alta potencia
- Medidor de inductancias
- Núcleos devanados con alambre de cobre
- Multímetro
- Osciloscopio
- Circuito inversor medio puente

VI. Referencias

- Norma que avala el procedimiento: ISO 9001
- La capacidad para interactuar con la aplicación de almacén de datos existente
 - La capacidad para incorporar enrutamiento y notificaciones automatizados en base a reglas empresariales

Se tienen núcleos del compuesto hierro-resina de forma toroidal, clasificadas de acuerdo a sus dimensiones:

Tabla 2. Clasificación de los núcleos según sus dimensiones.

Probeta N°	De	Di	O
1	2.14	1.34	0.95
2	3.48	2.25	1.4
3	4.96	3.06	1.75
N	8.85	7.61	2.2

Nota: De (Diámetro exterior), Di (Diámetro interior), O (espesor) de cada toroide.

También, se han clasificado por colores de acuerdo al porcentaje de hierro que contienen:

Tabla 3. Clasificación de las probetas según sus colores.

Probeta N°	Color	Limadura de Fe %
1	Rosa	0
	Vino	15.3
2	Gris	16.7
	Verde olivo	23
3	Verde	28.6
	Negro	33.3
N	Café	44.4
	Morado	47.4
	Azul	48.7

APÉNDICE D. REGISTRO DE DATOS OBTENIDOS DEL MATERIAL COMPUESTO POR HIERRO Y RESINA

D1. Registro de datos del material en las pruebas de temperatura

Registro de las mediciones magnéticas a diferentes temperaturas y frecuencias

60 Hz < f < 60 kHz									
Equipo utilizado:		Cámara micro climática Medidor de inductancias							
Prueba N°_3 Color: Verde oliva		n ₁ =90 vueltas n ₂ =90 vueltas				Alambre magneto #_2L			
I (mA)	T °C	Lp (µH)	La (µH)	Lserie (µH)	Rp (Ω)	Ra (Ω)	µi	Ky %	
10	65	23.3	23.4	88.2	0.80	0.80			
20		23.3	23.4	88.2	0.80	0.80			
30		23.3	23.4	88.2	0.80	0.80			
40		23.3	23.4	88.2	0.80	0.80			
50		23.3	23.4	88.2	0.80	0.80			
60		23.3	23.4	88.2	0.80	0.80			
10	45	23.2	23.4	58.2	0.78	0.78			
20		23.2	23.4	58.2	0.78	0.78			
30		23.2	23.4	58.2	0.78	0.78			
40		23.2	23.4	58.2	0.78	0.78			
50		23.2	23.4	58.2	0.78	0.78			
60		23.2	23.4	58.2	0.78	0.78			
10	25	23.2	23.4	88.1	0.74	0.75			
20		23.2	23.4	88.1	0.74	0.75			
30		23.2	23.4	88.1	0.74	0.75			
40		23.2	23.4	88.1	0.74	0.75			
50		23.2	23.4	88.1	0.74	0.75			
60		23.2	23.4	88.1	0.74	0.75			
10	5	23.2	23.3	88.8	0.69	0.70			
20		23.2	23.3	88.8	0.69	0.70			
30		23.2	23.3	88.8	0.69	0.70			
40		23.2	23.3	88.8	0.69	0.70			
50		23.2	23.3	88.8	0.69	0.70			
60		23.2	23.3	88.8	0.69	0.70			
10	-15	23.1	23.3	88.1	0.66	0.67			
20		23.1	23.3	88.1	0.66	0.67			
30		23.1	23.3	88.1	0.66	0.67			
40		23.1	23.3	88.1	0.66	0.67			
50		23.1	23.3	88.1	0.66	0.67			
60		23.1	23.3	88.1	0.66	0.67			
Prueba N°_3 Color: Verde		n ₁ =90 vueltas n ₂ =90 vueltas				Alambre magneto #_2L			
I (mA)	T °C	Lp (µH)	La (µH)	Lserie (µH)	Rp (Ω)	Ra (Ω)	µi	Ky %	
10	65	31.5	28.5	89.9	0.83	0.86			
20		31.5	28.5	89.9	0.83	0.86			
30		31.5	28.5	89.9	0.83	0.86			
40		31.5	28.5	89.9	0.83	0.86			
50		31.5	28.5	89.9	0.83	0.86			
60		31.5	28.5	89.9	0.83	0.86			
10	45	31.5	28.5	89.8	0.80	0.83			
20		31.5	28.5	89.8	0.80	0.83			
30		31.5	28.5	89.8	0.80	0.83			
40		31.5	28.5	89.8	0.80	0.83			
50		31.5	28.5	89.8	0.80	0.83			
60		31.5	28.5	89.8	0.80	0.83			
10	25	31.5	28.4	89.6	0.78	0.81			
20		31.5	28.4	89.6	0.78	0.81			

30		31.5	28.4	89.6	0.78	0.81			
40		31.5	28.4	89.6	0.78	0.81			
50		31.5	28.4	89.6	0.78	0.81			
60		31.5	28.4	89.6	0.78	0.81			
10	5	31.5	28.4	89.6	0.75	0.76			
20		31.5	28.4	89.6	0.75	0.76			
30		31.5	28.4	89.6	0.75	0.76			
40		31.5	28.4	89.6	0.75	0.76			
50		31.5	28.4	89.6	0.75	0.76			
60		31.5	28.4	89.6	0.75	0.76			
10	-15	31.5	28.4	89.5	0.70	0.72			
20		31.5	28.4	89.5	0.70	0.72			
30		31.5	28.4	89.5	0.70	0.72			
40		31.5	28.4	89.5	0.70	0.72			
50		31.5	28.4	89.5	0.70	0.72			
60		31.5	28.4	89.5	0.70	0.72			
Prueba N°_3 Color: Café		n ₁ =90 vueltas n ₂ =90 vueltas				Alambre magneto #_2L			
I (mA)	T °C	Lp (µH)	La (µH)	Lserie (µH)	Rp (Ω)	Ra (Ω)	µi	Ky %	
10	65	29.1	28.9	109.8	0.95	0.95			
20		29.1	28.9	109.8	0.95	0.95			
30		29.1	28.9	109.8	0.95	0.95			
40		29.1	28.9	109.8	0.95	0.95			
50		29.1	28.9	109.8	0.95	0.95			
60		29.1	28.9	109.8	0.95	0.95			
10	45	29.2	29	109.8	0.92	0.91			
20		29.2	29	109.8	0.92	0.91			
30		29.2	29	109.8	0.92	0.91			
40		29.2	29	109.8	0.92	0.91			
50		29.2	29	109.8	0.92	0.91			
60		29.2	29	109.8	0.92	0.91			
10	25	29.2	29	109.9	0.90	0.88			
20		29.2	29	109.9	0.90	0.88			
30		29.2	29	109.9	0.90	0.88			
40		29.2	29	109.9	0.90	0.88			
50		29.2	29	109.9	0.90	0.88			
60		29.2	29	109.9	0.90	0.88			
10	5	29.1	28.9	109.5	0.84	0.83			
20		29.1	28.9	109.5	0.84	0.83			
30		29.1	28.9	109.5	0.84	0.83			
40		29.1	28.9	109.5	0.84	0.83			
50		29.1	28.9	109.5	0.84	0.83			
60		29.1	28.9	109.5	0.84	0.83			
10	-15	29.1	28.9	109.4	0.80	0.79			
20		29.1	28.9	109.4	0.80	0.79			
30		29.1	28.9	109.4	0.80	0.79			
40		29.1	28.9	109.4	0.80	0.79			
50		29.1	28.9	109.4	0.80	0.79			
60		29.1	28.9	109.4	0.80	0.79			
Prueba N°_3 Color: Anil		n ₁ =90 vueltas n ₂ =90 vueltas				Alambre magneto #_2L			
I (mA)	T °C	Lp (µH)	La (µH)	Lserie (µH)	Rp (Ω)	Ra (Ω)	µi	Ky %	
10	65	31	31	118.2	0.86	0.86			
20		31	31	118.2	0.86	0.86			
30		31	31	118.2	0.86	0.86			
40		31	31	118.2	0.86	0.86			
50		31	31	118.2	0.86	0.86			

Prueba N° 1_		Color Gris		n ₁ = 90 vueltas n ₂ = 90 vueltas		Alambre magneto #_24_			
I (mA)	T °C	Lp (µH)	La (µH)	Lserie (µH)	Rp (Ω)	Ra (Ω)	µi	Ky %	
60		31	31	118.2	0.86	0.86			
10	45	31	31	118.5	0.83	0.83			
20		31	31	118.5	0.83	0.83			
30		31	31	118.5	0.83	0.83			
40		31	31	118.5	0.83	0.83			
50		31	31	118.5	0.83	0.83			
60		31	31	118.5	0.83	0.83			
10	25	31	31	118.6	0.81	0.81			
20		31	31	118.6	0.81	0.81			
30		31	31	118.6	0.81	0.81			
40		31	31	118.6	0.81	0.81			
50		31	31	118.6	0.81	0.81			
60		31	31	118.6	0.81	0.81			
10	5	31	31	118.4	0.76	0.76			
20		31	31	118.4	0.76	0.76			
30		31	31	118.4	0.76	0.76			
40		31	31	118.4	0.76	0.76			
50		31	31	118.4	0.76	0.76			
60		31	31	118.4	0.76	0.76			
10	-15	31	31	118.6	0.72	0.72			
20		31	31	118.6	0.72	0.72			
30		31	31	118.6	0.72	0.72			
40		31	31	118.6	0.72	0.72			
50		31	31	118.6	0.72	0.72			
60		31	31	118.6	0.72	0.72			
Prueba N° 2_		Color Rosa		n ₁ = 90 vueltas n ₂ = 90 vueltas		Alambre magneto #_24_			
I (mA)	T °C	Lp (µH)	La (µH)	Lserie (µH)	Rp (Ω)	Ra (Ω)	µi	Ky %	
10	65	17.5	17.6	68.4	0.45	0.46			
20		17.5	17.6	68.4	0.45	0.46			
30		17.5	17.6	68.4	0.45	0.46			
40		17.5	17.6	68.4	0.45	0.46			
50		17.5	17.6	68.4	0.45	0.46			
60		17.5	17.6	68.4	0.45	0.46			
10	45	17.5	17.6	68.2	0.43	0.44			
20		17.5	17.6	68.2	0.43	0.44			
30		17.5	17.6	68.2	0.43	0.44			
40		17.5	17.6	68.2	0.43	0.44			
50		17.5	17.6	68.2	0.43	0.44			
60		17.5	17.6	68.2	0.43	0.44			
10	25	17.5	17.6	68.5	0.41	0.43			
20		17.5	17.6	68.5	0.41	0.43			
30		17.5	17.6	68.5	0.41	0.43			
40		17.5	17.6	68.5	0.41	0.43			
50		17.5	17.6	68.5	0.41	0.43			
60		17.5	17.6	68.5	0.41	0.43			
10	5	17.5	17.4	68.4	0.41	0.42			
20		17.5	17.4	68.4	0.41	0.42			
30		17.5	17.4	68.4	0.41	0.42			
40		17.5	17.4	68.4	0.41	0.42			
50		17.5	17.4	68.4	0.41	0.42			
60		17.5	17.4	68.4	0.41	0.42			
10	-15	17.5	17.4	68.2	0.41	0.42			
20		17.5	17.4	68.2	0.41	0.42			
30		17.5	17.4	68.2	0.41	0.42			
40		17.5	17.4	68.2	0.41	0.42			
50		17.5	17.4	68.2	0.41	0.42			
60		17.5	17.4	68.2	0.41	0.42			

Prueba N° 3_		Color Gris		n ₁ = 90 vueltas n ₂ = 90 vueltas		Alambre magneto #_24_			
I (mA)	T °C	Lp (µH)	La (µH)	Lserie (µH)	Rp (Ω)	Ra (Ω)	µi	Ky %	
10	65	22.4	28	88.5	0.78	0.90			
20		22.4	28	88.5	0.78	0.90			
30		22.4	28	88.5	0.78	0.90			
40		22.4	28	88.5	0.78	0.90			
50		22.4	28	88.5	0.78	0.90			
60		22.4	28	88.5	0.78	0.90			
10	45	22.4	28	88.5	0.75	0.88			
20		22.4	28	88.5	0.75	0.88			
30		22.4	28	88.5	0.75	0.88			
40		22.4	28	88.5	0.75	0.88			
50		22.4	28	88.5	0.75	0.88			
60		22.4	28	88.5	0.75	0.88			
10	25	22.3	28	88.5	0.71	0.89			
20		22.3	28	88.5	0.71	0.89			
30		22.3	28	88.5	0.71	0.89			
40		22.3	28	88.5	0.71	0.89			
50		22.3	28	88.5	0.71	0.89			
60		22.3	28	88.5	0.71	0.89			
10	5	22.4	28	88.7	0.69	0.84			
20		22.4	28	88.7	0.69	0.84			
30		22.4	28	88.7	0.69	0.84			
40		22.4	28	88.7	0.69	0.84			
50		22.4	28	88.7	0.69	0.84			
60		22.4	28	88.7	0.69	0.84			
10	-15	22.3	28	88.9	0.66	0.79			
20		22.3	28	88.9	0.66	0.79			
30		22.3	28	88.9	0.66	0.79			
40		22.3	28	88.9	0.66	0.79			
50		22.3	28	88.9	0.66	0.79			
60		22.3	28	88.9	0.66	0.79			
Prueba N° 4_		Color Negro		n ₁ = 90 vueltas n ₂ = 90 vueltas		Alambre magneto #_24_			
I (mA)	T °C	Lp (µH)	La (µH)	Lserie (µH)	Rp (Ω)	Ra (Ω)	µi	Ky %	
10	65	26.8	29.2	100.5	0.94	0.99			
20		26.8	29.2	100.5	0.94	0.99			
30		26.8	29.2	100.5	0.94	0.99			
40		26.8	29.2	100.5	0.94	0.99			
50		26.8	29.2	100.5	0.94	0.99			
60		26.8	29.2	100.5	0.94	0.99			
10	45	26.9	29.3	100.5	0.91	0.97			
20		26.9	29.3	100.5	0.91	0.97			
30		26.9	29.3	100.5	0.91	0.97			
40		26.9	29.3	100.5	0.91	0.97			
50		26.9	29.3	100.5	0.91	0.97			
60		26.9	29.3	100.5	0.91	0.97			
10	25	26.9	29.3	100.6	0.88	0.95			
20		26.9	29.3	100.6	0.88	0.95			
30		26.9	29.3	100.6	0.88	0.95			
40		26.9	29.3	100.6	0.88	0.95			
50		26.9	29.3	100.6	0.88	0.95			
60		26.9	29.3	100.6	0.88	0.95			
10	5	26.8	29.2	100.5	0.89	0.91			
20		26.8	29.2	100.5	0.89	0.91			
30		26.8	29.2	100.5	0.89	0.91			

40		26.8	29.2	100.5	0.89	0.91			
50		26.8	29.2	100.5	0.89	0.91			
60		26.8	29.2	100.5	0.89	0.91			
10	-15	26.8	29.2	100.9	0.79	0.85			
20		26.8	29.2	100.9	0.79	0.85			
30		26.8	29.2	100.9	0.79	0.85			
40		26.8	29.2	100.9	0.79	0.85			
50		26.8	29.2	100.9	0.79	0.85			
60		26.8	29.2	100.9	0.79	0.85			
Probeta N° 1		Color: Verde		n ₁ =90 vueltas n ₂ =90 vueltas		Alambre magneto #24			
I (mA)	T °C	Lp (µH)	Ls (µH)	Lserie (µH)	Rp (Ω)	Rs (Ω)	µi	Ky %	
10	65	20.4	20.3	75.6	0.84	0.83			
20		20.4	20.3	75.6	0.84	0.83			
30		20.4	20.3	75.6	0.84	0.83			
40		20.4	20.3	75.6	0.84	0.83			
50		20.4	20.3	75.6	0.84	0.83			
60		20.4	20.3	75.6	0.84	0.83			
10	45	20.4	20.3	75.6	0.81	0.81			
20		20.4	20.3	75.6	0.81	0.81			
30		20.4	20.3	75.6	0.81	0.81			
40		20.4	20.3	75.6	0.81	0.81			
50		20.4	20.3	75.6	0.81	0.81			
60		20.4	20.3	75.6	0.81	0.81			
10	25	20.4	20.3	75.6	0.79	0.79			
20		20.4	20.3	75.6	0.79	0.79			
30		20.4	20.3	75.6	0.79	0.79			
40		20.4	20.3	75.6	0.79	0.79			
50		20.4	20.3	75.6	0.79	0.79			
60		20.4	20.3	75.6	0.79	0.79			
10	5	20.3	20.3	75.6	0.79	0.79			
20		20.3	20.3	75.6	0.79	0.79			
30		20.3	20.3	75.6	0.79	0.79			
40		20.3	20.3	75.6	0.79	0.79			
50		20.3	20.3	75.6	0.79	0.79			
60		20.3	20.3	75.6	0.79	0.79			
10	-15	20.3	20.3	75.6	0.70	0.70			
20		20.3	20.3	75.6	0.70	0.70			
30		20.3	20.3	75.6	0.70	0.70			
40		20.3	20.3	75.6	0.70	0.70			
50		20.3	20.3	75.6	0.70	0.70			
60		20.3	20.3	75.6	0.70	0.70			
Probeta N° 1		Color: Morado		n ₁ =90 vueltas n ₂ =90 vueltas		Alambre magneto #24			
I (mA)	T °C	Lp (µH)	Ls (µH)	Lserie (µH)	Rp (Ω)	Rs (Ω)	µi	Ky %	
10	65	28.4	27.7	107.2	1	0.89			
20		28.4	27.7	107.2	1	0.89			
30		28.4	27.7	107.2	1	0.89			
40		28.4	27.7	107.2	1	0.89			
50		28.4	27.7	107.2	1	0.89			
60		28.4	27.7	107.2	1	0.89			
10	45	28.3	27.7	107.1	1	0.86			
20		28.3	27.7	107.1	1	0.86			
30		28.3	27.7	107.1	1	0.86			
40		28.3	27.7	107.1	1	0.86			
50		28.3	27.7	107.1	1	0.86			
60		28.3	27.7	107.1	1	0.86			

10	25	26.9	26.3	104.7	0.47	0.47			
20		26.9	26.3	104.7	0.47	0.47			
30		26.9	26.3	104.7	0.47	0.47			
40		26.9	26.3	104.7	0.47	0.47			
50		26.9	26.3	104.7	0.47	0.47			
60		26.9	26.3	104.7	0.47	0.47			
10	5	28.3	27.6	107.9	0.99	0.79			
20		28.3	27.6	107.9	0.99	0.79			
30		28.3	27.6	107.9	0.99	0.79			
40		28.3	27.6	107.9	0.99	0.79			
50		28.3	27.6	107.9	0.99	0.79			
60		28.3	27.6	107.9	0.99	0.79			
10	-15	28.2	27.5	107	0.97	0.76			
20		28.2	27.5	107	0.97	0.76			
30		28.2	27.5	107	0.97	0.76			
40		28.2	27.5	107	0.97	0.76			
50		28.2	27.5	107	0.97	0.76			
60		28.2	27.5	107	0.97	0.76			
Probeta N° 2		Color: Morado		n ₁ =90 vueltas n ₂ =90 vueltas		Alambre magneto #24			
I (mA)	T °C	Lp (µH)	Ls (µH)	Lserie (µH)	Rp (Ω)	Rs (Ω)	µi	Ky %	
10	65	10.7	10.7	79.4	0.48	0.48			
20		10.7	10.7	79.4	0.48	0.48			
30		10.7	10.7	79.4	0.48	0.48			
40		10.7	10.7	79.4	0.48	0.48			
50		10.7	10.7	79.4	0.48	0.48			
60		10.7	10.7	79.4	0.48	0.48			
10	45	10.7	10.7	79.3	0.53	0.52			
20		10.7	10.7	79.3	0.53	0.52			
30		10.7	10.7	79.3	0.53	0.52			
40		10.7	10.7	79.3	0.53	0.52			
50		10.7	10.7	79.3	0.53	0.52			
60		10.7	10.7	79.3	0.53	0.52			
10	25	10.7	10.7	79.4	0.51	0.50			
20		10.7	10.7	79.4	0.51	0.50			
30		10.7	10.7	79.4	0.51	0.50			
40		10.7	10.7	79.4	0.51	0.50			
50		10.7	10.7	79.4	0.51	0.50			
60		10.7	10.7	79.4	0.51	0.50			
10	5	10.7	10.7	79.3	0.46	0.46			
20		10.7	10.7	79.3	0.46	0.46			
30		10.7	10.7	79.3	0.46	0.46			
40		10.7	10.7	79.3	0.46	0.46			
50		10.7	10.7	79.3	0.46	0.46			
60		10.7	10.7	79.3	0.46	0.46			
10	-15	10.7	10.6	79.3	0.44	0.43			
20		10.7	10.6	79.3	0.44	0.43			
30		10.7	10.6	79.3	0.44	0.43			
40		10.7	10.6	79.3	0.44	0.43			
50		10.7	10.6	79.3	0.44	0.43			
60		10.7	10.6	79.3	0.44	0.43			
Probeta N° 2		Color: Negro		n ₁ =60 vueltas n ₂ =60 vueltas		Alambre magneto #24			
I (mA)	T °C	Lp (µH)	Ls (µH)	Lserie (µH)	Rp (Ω)	Rs (Ω)	µi	Ky %	
10	65	9.3	9.3	33	0.57	0.57			
20		9.3	9.3	33	0.57	0.57			
30		9.3	9.3	33	0.57	0.57			

40		9.3	9.3	33	0.57	0.57				
50		9.3	9.3	33	0.57	0.57				
60		9.3	9.3	33	0.57	0.57				
10	45	9.3	9.2	33	0.55	0.55				
20		9.3	9.2	33	0.55	0.55				
30		9.3	9.2	33	0.55	0.55				
40		9.3	9.2	33	0.55	0.55				
50		9.3	9.2	33	0.55	0.55				
60		9.3	9.2	33	0.55	0.55				
10	25	9.3	9.2	33	0.52	0.52				
20		9.3	9.2	33	0.52	0.52				
30		9.3	9.2	33	0.52	0.52				
40		9.3	9.2	33	0.52	0.52				
50		9.3	9.2	33	0.52	0.52				
60		9.3	9.2	33	0.52	0.52				
10	5	9.3	9.2	33	0.50	0.50				
20		9.3	9.2	33	0.50	0.50				
30		9.3	9.2	33	0.50	0.50				
40		9.3	9.2	33	0.50	0.50				
50		9.3	9.2	33	0.50	0.50				
60		9.3	9.2	33	0.50	0.50				
10	-15	9.3	9.2	33	0.48	0.48				
20		9.3	9.2	33	0.48	0.48				
30		9.3	9.2	33	0.48	0.48				
40		9.3	9.2	33	0.48	0.48				
50		9.3	9.2	33	0.48	0.48				
60		9.3	9.2	33	0.48	0.48				
Prueba N° 2, Color Verde										
I (mA)		T (°C)	Lp (µH)	La (µH)	Lserie (µH)	Rp (Ω)	Rs (Ω)	µi	Ky %	
10	65	8.5	8.5	29	0.61	0.58				
20		8.5	8.5	29	0.61	0.58				
30		8.5	8.5	29	0.61	0.58				
40		8.5	8.5	29	0.61	0.58				
50		8.5	8.5	29	0.61	0.58				
60		8.5	8.5	29	0.61	0.58				
10	45	8.5	8.5	29	0.61	0.58				
20		8.5	8.5	29	0.61	0.58				
30		8.5	8.5	29	0.61	0.58				
40		8.5	8.5	29	0.61	0.58				
50		8.5	8.5	29	0.61	0.58				
60		8.5	8.5	29	0.61	0.58				
10	25	8.3	8.4	29	0.53	0.55				
20		8.3	8.4	29	0.53	0.55				
30		8.3	8.4	29	0.53	0.55				
40		8.3	8.4	29	0.53	0.55				
50		8.3	8.4	29	0.53	0.55				
60		8.3	8.4	29	0.53	0.55				
10	5	8.4	8.5	29.2	0.56	0.60				
20		8.4	8.5	29.2	0.56	0.60				
30		8.4	8.5	29.2	0.56	0.60				
40		8.4	8.5	29.2	0.56	0.60				
50		8.4	8.5	29.2	0.56	0.60				
60		8.4	8.5	29.2	0.56	0.60				
10	-15	8.3	8.4	29	0.51	0.51				
20		8.3	8.4	29	0.51	0.51				
30		8.3	8.4	29	0.51	0.51				
40		8.3	8.4	29	0.51	0.51				

50		8.3	8.4	29	0.51	0.51				
60		8.3	8.4	29	0.51	0.51				
Prueba N° 2, Color Verde										
I (mA)		T (°C)	Lp (µH)	La (µH)	Lserie (µH)	Rp (Ω)	Rs (Ω)	µi	Ky %	
10	65	9.6	9.8	31.6	0.69	0.79				
20		9.6	9.8	31.6	0.69	0.79				
30		9.6	9.8	31.6	0.69	0.79				
40		9.6	9.8	31.6	0.69	0.79				
50		9.6	9.8	31.6	0.69	0.79				
60		9.6	9.8	31.6	0.69	0.79				
10	45	9.5	9.7	31.6	0.68	0.67				
20		9.5	9.7	31.6	0.68	0.67				
30		9.5	9.7	31.6	0.68	0.67				
40		9.5	9.7	31.6	0.68	0.67				
50		9.5	9.7	31.6	0.68	0.67				
60		9.5	9.7	31.6	0.68	0.67				
10	25	9.5	9.7	31.6	0.64	0.64				
20		9.5	9.7	31.6	0.64	0.64				
30		9.5	9.7	31.6	0.64	0.64				
40		9.5	9.7	31.6	0.64	0.64				
50		9.5	9.7	31.6	0.64	0.64				
60		9.5	9.7	31.6	0.64	0.64				
10	5	9.4	9.7	31.6	0.61	0.62				
20		9.4	9.7	31.6	0.61	0.62				
30		9.4	9.7	31.6	0.61	0.62				
40		9.4	9.7	31.6	0.61	0.62				
50		9.4	9.7	31.6	0.61	0.62				
60		9.4	9.7	31.6	0.61	0.62				
10	-15	9.4	9.6	31.5	0.58	0.59				
20		9.4	9.6	31.5	0.58	0.59				
30		9.4	9.6	31.5	0.58	0.59				
40		9.4	9.6	31.5	0.58	0.59				
50		9.4	9.6	31.5	0.58	0.59				
60		9.4	9.6	31.5	0.58	0.59				
Prueba N° 2, Color Verde										
I (mA)		T (°C)	Lp (µH)	La (µH)	Lserie (µH)	Rp (Ω)	Rs (Ω)	µi	Ky %	
10	65	8.8	8.8	28.9	0.62	0.62				
20		8.8	8.8	28.9	0.62	0.62				
30		8.8	8.8	28.9	0.62	0.62				
40		8.8	8.8	28.9	0.62	0.62				
50		8.8	8.8	28.9	0.62	0.62				
60		8.8	8.8	28.9	0.62	0.62				
10	45	8.7	8.7	28.9	0.60	0.60				
20		8.7	8.7	28.9	0.60	0.60				
30		8.7	8.7	28.9	0.60	0.60				
40		8.7	8.7	28.9	0.60	0.60				
50		8.7	8.7	28.9	0.60	0.60				
60		8.7	8.7	28.9	0.60	0.60				
10	25	8.7	8.7	28.9	0.57	0.59				
20		8.7	8.7	28.9	0.57	0.59				
30		8.7	8.7	28.9	0.57	0.59				
40		8.7	8.7	28.9	0.57	0.59				
50		8.7	8.7	28.9	0.57	0.59				
60		8.7	8.7	28.9	0.57	0.59				
10	5	8.7	8.7	28.8	0.55	0.55				

20		8.7	8.7	28.8	0.55	0.55			
30		8.7	8.7	28.8	0.55	0.55			
40		8.7	8.7	28.8	0.55	0.55			
50		8.7	8.7	28.8	0.55	0.55			
60		8.7	8.7	28.8	0.55	0.55			
10	-15	8.7	8.6	28.8	0.53	0.52			
20		8.7	8.6	28.8	0.53	0.52			
30		8.7	8.6	28.8	0.53	0.52			
40		8.7	8.6	28.8	0.53	0.52			
50		8.7	8.6	28.8	0.53	0.52			
60		8.7	8.6	28.8	0.53	0.52			
Prueba N° 2 Color: Rosa		n _s = 60 vueltas n _r = 60 vueltas			Alambre magneto # 24				
I (mA)	T °C	Lp (µH)	Ls (µH)	Lserie (µH)	Rp (Ω)	Rs (Ω)	µi	Ky %	
10	65	7.1	7.1	24	0.48	0.48			
20		7.1	7.1	24	0.48	0.48			
30		7.1	7.1	24	0.48	0.48			
40		7.1	7.1	24	0.48	0.48			
50		7.1	7.1	24	0.48	0.48			
60		7.1	7.1	24	0.48	0.48			
10	45	7.1	7.1	24	0.46	0.46			
20		7.1	7.1	24	0.46	0.46			
30		7.1	7.1	24	0.46	0.46			
40		7.1	7.1	24	0.46	0.46			
50		7.1	7.1	24	0.46	0.46			
60		7.1	7.1	24	0.46	0.46			
10	25	7.1	7.1	24	0.43	0.43			
20		7.1	7.1	24	0.43	0.43			
30		7.1	7.1	24	0.43	0.43			
40		7.1	7.1	24	0.43	0.43			
50		7.1	7.1	24	0.43	0.43			
60		7.1	7.1	24	0.43	0.43			
10	5	7.1	7.1	24.1	0.40	0.40			
20		7.1	7.1	24.1	0.40	0.40			
30		7.1	7.1	24.1	0.40	0.40			
40		7.1	7.1	24.1	0.40	0.40			
50		7.1	7.1	24.1	0.40	0.40			
60		7.1	7.1	24.1	0.40	0.40			
10	-15	7.1	7.1	24.2	0.34	0.34			
20		7.1	7.1	24.2	0.34	0.34			
30		7.1	7.1	24.2	0.34	0.34			
40		7.1	7.1	24.2	0.34	0.34			
50		7.1	7.1	24.2	0.34	0.34			
60		7.1	7.1	24.2	0.34	0.34			
Prueba N° 2 Color: Anil		n _s = 60 vueltas n _r = 60 vueltas			Alambre magneto # 24				
I (mA)	T °C	Lp (µH)	Ls (µH)	Lserie (µH)	Rp (Ω)	Rs (Ω)	µi	Ky %	
10	65	11.7	11.5	42.3	0.70	0.60			
20		11.7	11.5	42.3	0.70	0.60			
30		11.7	11.5	42.3	0.70	0.60			
40		11.7	11.5	42.3	0.70	0.60			
50		11.7	11.5	42.3	0.70	0.60			
60		11.7	11.5	42.3	0.70	0.60			
10	45	11.7	11.5	42.3	0.66	0.54			
20		11.7	11.5	42.3	0.66	0.54			
30		11.7	11.5	42.3	0.66	0.54			
40		11.7	11.5	42.3	0.66	0.54			

50		11.7	11.5	42.3	0.66	0.54			
60		11.7	11.5	42.3	0.66	0.54			
10	25	11.7	11.5	42.4	0.64	0.50			
20		11.7	11.5	42.4	0.64	0.50			
30		11.7	11.5	42.4	0.64	0.50			
40		11.7	11.5	42.4	0.64	0.50			
50		11.7	11.5	42.4	0.64	0.50			
60		11.7	11.5	42.4	0.64	0.50			
10	5	11.7	11.5	42.4	0.60	0.49			
20		11.7	11.5	42.4	0.60	0.49			
30		11.7	11.5	42.4	0.60	0.49			
40		11.7	11.5	42.4	0.60	0.49			
50		11.7	11.5	42.4	0.60	0.49			
60		11.7	11.5	42.4	0.60	0.49			
10	-15	11.7	11.5	42.2	0.57	0.45			
20		11.7	11.5	42.2	0.57	0.45			
30		11.7	11.5	42.2	0.57	0.45			
40		11.7	11.5	42.2	0.57	0.45			
50		11.7	11.5	42.2	0.57	0.45			
60		11.7	11.5	42.2	0.57	0.45			
Prueba N° 2 Color: Verde		n _s = 60 vueltas n _r = 60 vueltas			Alambre magneto # 24				
I (mA)	T °C	Lp (µH)	Ls (µH)	Lserie (µH)	Rp (Ω)	Rs (Ω)	µi	Ky %	
10	65	8.4	8.4	28.1	0.63	0.62			
20		8.4	8.4	28.1	0.63	0.62			
30		8.4	8.4	28.1	0.63	0.62			
40		8.4	8.4	28.1	0.63	0.62			
50		8.4	8.4	28.1	0.63	0.62			
60		8.4	8.4	28.1	0.63	0.62			
10	45	8.4	8.4	28.1	0.60	0.58			
20		8.4	8.4	28.1	0.60	0.58			
30		8.4	8.4	28.1	0.60	0.58			
40		8.4	8.4	28.1	0.60	0.58			
50		8.4	8.4	28.1	0.60	0.58			
60		8.4	8.4	28.1	0.60	0.58			
10	25	8.4	8.4	28.1	0.57	0.53			
20		8.4	8.4	28.1	0.57	0.53			
30		8.4	8.4	28.1	0.57	0.53			
40		8.4	8.4	28.1	0.57	0.53			
50		8.4	8.4	28.1	0.57	0.53			
60		8.4	8.4	28.1	0.57	0.53			
10	5	8.4	8.4	28.1	0.54	0.47			
20		8.4	8.4	28.1	0.54	0.47			
30		8.4	8.4	28.1	0.54	0.47			
40		8.4	8.4	28.1	0.54	0.47			
50		8.4	8.4	28.1	0.54	0.47			
60		8.4	8.4	28.1	0.54	0.47			
10	-15	8.4	8.4	28.2	0.50	0.45			
20		8.4	8.4	28.2	0.50	0.45			
30		8.4	8.4	28.2	0.50	0.45			
40		8.4	8.4	28.2	0.50	0.45			
50		8.4	8.4	28.2	0.50	0.45			
60		8.4	8.4	28.2	0.50	0.45			
Prueba N° 2 Color: Café		n _s = 60 vueltas n _r = 60 vueltas			Alambre magneto # 24				
I (mA)	T °C	Lp (µH)	Ls (µH)	Lserie (µH)	Rp (Ω)	Rs (Ω)	µi	Ky %	
10	65	10.3	10.4	37.8	0.52	0.53			

20		10.3	10.4	37.8	0.52	0.53		
30		10.3	10.4	37.8	0.52	0.53		
40		10.3	10.4	37.8	0.52	0.53		
50		10.3	10.4	37.8	0.52	0.53		
60		10.3	10.4	37.8	0.52	0.53		
10	45	10.3	10.4	37.8	0.49	0.51		
20		10.3	10.4	37.8	0.49	0.51		
30		10.3	10.4	37.8	0.49	0.51		
40		10.3	10.4	37.8	0.49	0.51		
50		10.3	10.4	37.8	0.49	0.51		
60		10.3	10.4	37.8	0.49	0.51		
10	25	10.3	10.4	37.8	0.45	0.48		
20		10.3	10.4	37.8	0.45	0.48		
30		10.3	10.4	37.8	0.45	0.48		
40		10.3	10.4	37.8	0.45	0.48		
50		10.3	10.4	37.8	0.45	0.48		
60		10.3	10.4	37.8	0.45	0.48		
10	5	10.3	10.4	37.8	0.44	0.47		
20		10.3	10.4	37.8	0.44	0.47		
30		10.3	10.4	37.8	0.44	0.47		
40		10.3	10.4	37.8	0.44	0.47		
50		10.3	10.4	37.8	0.44	0.47		
60		10.3	10.4	37.8	0.44	0.47		
10	-15	10.3	10.4	37.8	0.40	0.44		
20		10.3	10.4	37.8	0.40	0.44		
30		10.3	10.4	37.8	0.40	0.44		
40		10.3	10.4	37.8	0.40	0.44		
50		10.3	10.4	37.8	0.40	0.44		
60		10.3	10.4	37.8	0.40	0.44		
		Prueba N° 1_L Color: Verde olivo		n ₁ = 40 vueltas n ₂ = 40 vueltas		Alambre magneto #_2L_		
I (mA)	T °C	Lp (µH)	Ls (µH)	Lserie (µH)	Rp (Ω)	Rs (Ω)	µi	Ky %
10	65	4	4	12.78	0.38	0.38		
20		4	4	12.78	0.38	0.38		
30		4	4	12.78	0.38	0.38		
40		4	4	12.78	0.38	0.38		
50		4	4	12.78	0.38	0.38		
60		4	4	12.78	0.38	0.38		
10	45	4	4	12.8	0.37	0.37		
20		4	4	12.8	0.37	0.37		
30		4	4	12.8	0.37	0.37		
40		4	4	12.8	0.37	0.37		
50		4	4	12.8	0.37	0.37		
60		4	4	12.8	0.37	0.37		
10	25	4	3.9	12.6	0.36	0.35		
20		4	3.9	12.6	0.36	0.35		
30		4	3.9	12.6	0.36	0.35		
40		4	3.9	12.6	0.36	0.35		
50		4	3.9	12.6	0.36	0.35		
60		4	3.9	12.6	0.36	0.35		
10	5	4	3.9	12.6	0.35	0.34		
20		4	3.9	12.6	0.35	0.34		
30		4	3.9	12.6	0.35	0.34		
40		4	3.9	12.6	0.35	0.34		
50		4	3.9	12.6	0.35	0.34		
60		4	3.9	12.6	0.35	0.34		
10	-15	3.9	3.8	12.5	0.33	0.33		
20		3.9	3.8	12.5	0.33	0.33		

30		3.9	3.8	12.5	0.33	0.33		
40		3.9	3.8	12.5	0.33	0.33		
50		3.9	3.8	12.5	0.33	0.33		
60		3.9	3.8	12.5	0.33	0.33		
		Prueba N° 1_L Color: Verde olivo		n ₁ = 40 vueltas n ₂ = 40 vueltas		Alambre magneto #_2L_		
I (mA)	T °C	Lp (µH)	Ls (µH)	Lserie (µH)	Rp (Ω)	Rs (Ω)	µi	Ky %
10	65	4.6	4.5	14.5	0.40	0.40		
20		4.6	4.5	14.5	0.40	0.40		
30		4.6	4.5	14.5	0.40	0.40		
40		4.6	4.5	14.5	0.40	0.40		
50		4.6	4.5	14.5	0.40	0.40		
60		4.6	4.5	14.5	0.40	0.40		
10	45	4.5	4.3	14.5	0.39	0.39		
20		4.5	4.3	14.5	0.39	0.39		
30		4.5	4.3	14.5	0.39	0.39		
40		4.5	4.3	14.5	0.39	0.39		
50		4.5	4.3	14.5	0.39	0.39		
60		4.5	4.3	14.5	0.39	0.39		
10	25	4.5	4.3	14.5	0.38	0.38		
20		4.5	4.3	14.5	0.38	0.38		
30		4.5	4.3	14.5	0.38	0.38		
40		4.5	4.3	14.5	0.38	0.38		
50		4.5	4.3	14.5	0.38	0.38		
60		4.5	4.3	14.5	0.38	0.38		
10	5	4.5	4.3	14.4	0.37	0.36		
20		4.5	4.3	14.4	0.37	0.36		
30		4.5	4.3	14.4	0.37	0.36		
40		4.5	4.3	14.4	0.37	0.36		
50		4.5	4.3	14.4	0.37	0.36		
60		4.5	4.3	14.4	0.37	0.36		
10	-15	4.4	4.2	14.3	0.35	0.35		
20		4.4	4.2	14.3	0.35	0.35		
30		4.4	4.2	14.3	0.35	0.35		
40		4.4	4.2	14.3	0.35	0.35		
50		4.4	4.2	14.3	0.35	0.35		
60		4.4	4.2	14.3	0.35	0.35		
		Prueba N° 1_L Color: Verde		n ₁ = 40 vueltas n ₂ = 40 vueltas		Alambre magneto #_2L_		
I (mA)	T °C	Lp (µH)	Ls (µH)	Lserie (µH)	Rp (Ω)	Rs (Ω)	µi	Ky %
10	65	4.8	4.8	13.1	0.52	0.51		
20		4.8	4.8	13.1	0.52	0.51		
30		4.8	4.8	13.1	0.52	0.51		
40		4.8	4.8	13.1	0.52	0.51		
50		4.8	4.8	13.1	0.52	0.51		
60		4.8	4.8	13.1	0.52	0.51		
10	45	4.7	4.8	13	0.50	0.50		
20		4.7	4.8	13	0.50	0.50		
30		4.7	4.8	13	0.50	0.50		
40		4.7	4.8	13	0.50	0.50		
50		4.7	4.8	13	0.50	0.50		
60		4.7	4.8	13	0.50	0.50		
10	25	4.7	4.7	13	0.48	0.48		
20		4.7	4.7	13	0.48	0.48		
30		4.7	4.7	13	0.48	0.48		
40		4.7	4.7	13	0.48	0.48		
50		4.7	4.7	13	0.48	0.48		
60		4.7	4.7	13	0.48	0.48		

60		4.7	4.7	13	0.48	0.48			
10	5	4.6	4.7	13	0.47	0.47			
20		4.6	4.7	13	0.47	0.47			
30		4.6	4.7	13	0.47	0.47			
40		4.6	4.7	13	0.47	0.47			
50		4.6	4.7	13	0.47	0.47			
60		4.6	4.7	13	0.47	0.47			
10	-15	4.6	4.7	12.9	0.46	0.45			
20		4.6	4.7	12.9	0.46	0.45			
30		4.6	4.7	12.9	0.46	0.45			
40		4.6	4.7	12.9	0.46	0.45			
50		4.6	4.7	12.9	0.46	0.45			
60		4.6	4.7	12.9	0.46	0.45			
Prueba N° 1_L Color Negro		n ₁ = 40 vueltas n ₂ = 40 vueltas				Alambre magneto #_24_			
I (mA)	T °C	Ip (µH)	Ls (µH)	Lserie (µH)	Rp (Ω)	Rs (Ω)	µi	Ky %	
10	65	4.2	4.2	12.9	0.45	0.44			
20		4.2	4.2	12.9	0.45	0.44			
30		4.2	4.2	12.9	0.45	0.44			
40		4.2	4.2	12.9	0.45	0.44			
50		4.2	4.2	12.9	0.45	0.44			
60		4.2	4.2	12.9	0.45	0.44			
10	45	4.2	4.2	13	0.42	0.42			
20		4.2	4.2	13	0.42	0.42			
30		4.2	4.2	13	0.42	0.42			
40		4.2	4.2	13	0.42	0.42			
50		4.2	4.2	13	0.42	0.42			
60		4.2	4.2	13	0.42	0.42			
10	25	4.2	4.1	12.88	0.41	0.41			
20		4.2	4.1	12.88	0.41	0.41			
30		4.2	4.1	12.88	0.41	0.41			
40		4.2	4.1	12.88	0.41	0.41			
50		4.2	4.1	12.88	0.41	0.41			
60		4.2	4.1	12.88	0.41	0.41			
10	5	4.1	4.1	12.7	0.5	0.48			
20		4.1	4.1	12.7	0.5	0.48			
30		4.1	4.1	12.7	0.5	0.48			
40		4.1	4.1	12.7	0.5	0.48			
50		4.1	4.1	12.7	0.5	0.48			
60		4.1	4.1	12.7	0.5	0.48			
10	-15	4.1	4.1	12.7	0.38	0.38			
20		4.1	4.1	12.7	0.38	0.38			
30		4.1	4.1	12.7	0.38	0.38			
40		4.1	4.1	12.7	0.38	0.38			
50		4.1	4.1	12.7	0.38	0.38			
60		4.1	4.1	12.7	0.38	0.38			
Prueba N° 1_L Color Café		n ₁ = 40 vueltas n ₂ = 40 vueltas				Alambre magneto #_24_			
I (mA)	T °C	Ip (µH)	Ls (µH)	Lserie (µH)	Rp (Ω)	Rs (Ω)	µi	Ky %	
10	65	5.2	5.2	16.8	0.4	0.39			
20		5.2	5.2	16.8	0.4	0.39			
30		5.2	5.2	16.8	0.4	0.39			
40		5.2	5.2	16.8	0.4	0.39			
50		5.2	5.2	16.8	0.4	0.39			
60		5.2	5.2	16.8	0.4	0.39			
10	45	5.2	5.2	16.8	0.38	0.38			
20		5.2	5.2	16.8	0.38	0.38			

30		5.2	5.2	16.8	0.38	0.38			
40		5.2	5.2	16.8	0.38	0.38			
50		5.2	5.2	16.8	0.38	0.38			
60		5.2	5.2	16.8	0.38	0.38			
10	25	5.2	5	16.8	0.37	0.36			
20		5.2	5	16.8	0.37	0.36			
30		5.2	5	16.8	0.37	0.36			
40		5.2	5	16.8	0.37	0.36			
50		5.2	5	16.8	0.37	0.36			
60		5.2	5	16.8	0.37	0.36			
10	5	5.2	5	16.6	0.36	0.35			
20		5.2	5	16.6	0.36	0.35			
30		5.2	5	16.6	0.36	0.35			
40		5.2	5	16.6	0.36	0.35			
50		5.2	5	16.6	0.36	0.35			
60		5.2	5	16.6	0.36	0.35			
10	-15	5.2	5	16.6	0.34	0.33			
20		5.2	5	16.6	0.34	0.33			
30		5.2	5	16.6	0.34	0.33			
40		5.2	5	16.6	0.34	0.33			
50		5.2	5	16.6	0.34	0.33			
60		5.2	5	16.6	0.34	0.33			
Prueba N° 1_L Color Morado		n ₁ = 40 vueltas n ₂ = 40 vueltas				Alambre magneto #_24_			
I (mA)	T °C	Ip (µH)	Ls (µH)	Lserie (µH)	Rp (Ω)	Rs (Ω)	µi	Ky %	
10	65	4.8	4.8	15.1	0.40	0.40			
20		4.8	4.8	15.1	0.40	0.40			
30		4.8	4.8	15.1	0.40	0.40			
40		4.8	4.8	15.1	0.40	0.40			
50		4.8	4.8	15.1	0.40	0.40			
60		4.8	4.8	15.1	0.40	0.40			
10	45	4.8	4.8	15.1	0.38	0.38			
20		4.8	4.8	15.1	0.38	0.38			
30		4.8	4.8	15.1	0.38	0.38			
40		4.8	4.8	15.1	0.38	0.38			
50		4.8	4.8	15.1	0.38	0.38			
60		4.8	4.8	15.1	0.38	0.38			
10	25	4.8	4.8	15	0.37	0.37			
20		4.8	4.8	15	0.37	0.37			
30		4.8	4.8	15	0.37	0.37			
40		4.8	4.8	15	0.37	0.37			
50		4.8	4.8	15	0.37	0.37			
60		4.8	4.8	15	0.37	0.37			
10	5	4.8	4.8	15.1	0.36	0.36			
20		4.8	4.8	15.1	0.36	0.36			
30		4.8	4.8	15.1	0.36	0.36			
40		4.8	4.8	15.1	0.36	0.36			
50		4.8	4.8	15.1	0.36	0.36			
60		4.8	4.8	15.1	0.36	0.36			
10	-15	4.8	4.7	15	0.34	0.35			
20		4.8	4.7	15	0.34	0.35			
30		4.8	4.7	15	0.34	0.35			
40		4.8	4.7	15	0.34	0.35			
50		4.8	4.7	15	0.34	0.35			
60		4.8	4.7	15	0.34	0.35			
Prueba N° 1_L Color Azul		n ₁ = 40 vueltas n ₂ = 40 vueltas				Alambre magneto #_24_			

I (mA)	T °C	Lp (pH)	Ls (pH)	Lserie (pH)	Rp (Ω)	Ra (Ω)	pH	Ky %
10	65	6	6	18	0.53	0.53		
20		6	6	18	0.53	0.53		
30		6	6	18	0.53	0.53		
40		6	6	18	0.53	0.53		
50		6	6	18	0.53	0.53		
60		6	6	18	0.53	0.53		
10	45	5.9	6	18	0.51	0.50		
20		5.9	6	18	0.51	0.50		
30		5.9	6	18	0.51	0.50		
40		5.9	6	18	0.51	0.50		
50		5.9	6	18	0.51	0.50		
60		5.9	6	18	0.51	0.50		
10	25	5.8	5.9	18	0.5	0.49		
20		5.8	5.9	18	0.5	0.49		
30		5.8	5.9	18	0.5	0.49		
40		5.8	5.9	18	0.5	0.49		
50		5.8	5.9	18	0.5	0.49		
60		5.8	5.9	18	0.5	0.49		
10	5	5.9	5.9	17.9	0.48	0.48		
20		5.9	5.9	17.9	0.48	0.48		
30		5.9	5.9	17.9	0.48	0.48		
40		5.9	5.9	17.9	0.48	0.48		
50		5.9	5.9	17.9	0.48	0.48		
60		5.9	5.9	17.9	0.48	0.48		
10	-15	5.9	5.9	17.9	0.46	0.46		
20		5.9	5.9	17.9	0.46	0.46		
30		5.9	5.9	17.9	0.46	0.46		
40		5.9	5.9	17.9	0.46	0.46		
50		5.9	5.9	17.9	0.46	0.46		
60		5.9	5.9	17.9	0.46	0.46		
Prueba N°_N ₁ Color: Morado		n ₁ = 210 vueltas n ₂ = 210 vueltas			Alambre magneto #_21_			
I (mA)	T °C	Lp (pH)	Ls (pH)	Lserie (pH)	Rp (Ω)	Ra (Ω)	pH	Ky %
10	65	36.9	36.9	143	1.12	1.12		
20		36.9	36.9	143	1.12	1.12		
30		36.9	36.9	143	1.12	1.12		
40		36.9	36.9	143	1.12	1.12		
50		36.9	36.9	143	1.12	1.12		
60		36.9	36.9	143	1.12	1.12		
10	45	37	37	143.8	1.08	1.08		
20		37	37	143.8	1.08	1.08		
30		37	37	143.8	1.08	1.08		
40		37	37	143.8	1.08	1.08		
50		37	37	143.8	1.08	1.08		
60		37	37	143.8	1.08	1.08		
10	25	37	37	143.8	1.01	1.02		
20		37	37	143.8	1.08	1.08		
30		37	37	143.8	1.08	1.08		
40		37	37	143.8	1.08	1.08		
50		37	37	143.8	1.08	1.08		
60		37	37	143.8	1.08	1.08		
10	5	36.88	36.88	143	0.98	0.98		
20		36.88	36.88	143	0.98	0.98		
30		36.88	36.88	143	0.98	0.98		
40		36.88	36.88	143	0.98	0.98		

50		36.88	36.88	143	0.98	0.98		
60		36.88	36.88	143	0.98	0.98		
10	-15	36.8	36.8	143	0.91	0.91		
20		36.8	36.8	143	0.91	0.91		
30		36.8	36.8	143	0.91	0.91		
40		36.8	36.8	143	0.91	0.91		
50		36.8	36.8	143	0.91	0.91		
60		36.8	36.8	143	0.91	0.91		
Prueba N°_N ₂ Color: Azul		n ₁ = 210 vueltas n ₂ = 210 vueltas			Alambre magneto #_24_			
I (mA)	T °C	Lp (pH)	Ls (pH)	Lserie (pH)	Rp (Ω)	Ra (Ω)	pH	Ky %
10	65	37.1	36.8	143	1.13	1.15		
20		37.1	36.8	143	1.13	1.15		
30		37.1	36.8	143	1.13	1.15		
40		37.1	36.8	143	1.13	1.15		
50		37.1	36.8	143	1.13	1.15		
60		37.1	36.8	143	1.13	1.15		
10	45	37.2	37	142.8	1.08	1.13		
20		37.2	37	142.8	1.08	1.13		
30		37.2	37	142.8	1.08	1.13		
40		37.2	37	142.8	1.08	1.13		
50		37.2	37	142.8	1.08	1.13		
60		37.2	37	142.8	1.08	1.13		
10	25	37.2	37	142.8	1.03	1		
20		37.2	37	142.8	1.03	1		
30		37.2	37	142.8	1.03	1		
40		37.2	37	142.8	1.03	1		
50		37.2	37	142.8	1.03	1		
60		37.2	37	142.8	1.03	1		
10	5	37	36.8	142.8	0.98	0.98		
20		37	36.8	142.8	0.98	0.98		
30		37	36.8	142.8	0.98	0.98		
40		37	36.8	142.8	0.98	0.98		
50		37	36.8	142.8	0.98	0.98		
60		37	36.8	142.8	0.98	0.98		
10	-15	37	36.8	142.8	0.92	0.91		
20		37	36.8	142.8	0.92	0.91		
30		37	36.8	142.8	0.92	0.91		
40		37	36.8	142.8	0.92	0.91		
50		37	36.8	142.8	0.92	0.91		
60		37	36.8	142.8	0.92	0.91		
Prueba N°_N ₃ Color: Verde oliva		n ₁ = 210 vueltas n ₂ = 210 vueltas			Alambre magneto #_24_			
I (mA)	T °C	Lp (pH)	Ls (pH)	Lserie (pH)	Rp (Ω)	Ra (Ω)	pH	Ky %
10	65	26.9	26.8	101.8	1.08	1.08		
20		26.9	26.8	101.8	1.08	1.08		
30		26.9	26.8	101.8	1.08	1.08		
40		26.9	26.8	101.8	1.08	1.08		
50		26.9	26.8	101.8	1.08	1.08		
60		26.9	26.8	101.8	1.08	1.08		
10	45	26.9	26.7	101.8	1.03	1.03		
20		26.9	26.7	101.8	1.03	1.03		
30		26.9	26.7	101.8	1.03	1.03		
40		26.9	26.7	101.8	1.03	1.03		
50		26.9	26.7	101.8	1.03	1.03		
60		26.9	26.7	101.8	1.03	1.03		
10	25	26.8	26.6	101.8	0.98	0.97		

20		26.8	26.6	101.8	0.98	0.97			
30		26.8	26.6	101.8	0.98	0.97			
40		26.8	26.6	101.8	0.98	0.97			
50		26.8	26.6	101.8	0.98	0.97			
60		26.8	26.6	101.8	0.98	0.97			
10	5	26.8	26.6	101.8	0.93	0.93			
20		26.8	26.6	101.8	0.93	0.93			
30		26.8	26.6	101.8	0.93	0.93			
40		26.8	26.6	101.8	0.93	0.93			
50		26.8	26.6	101.8	0.93	0.93			
60		26.8	26.6	101.8	0.93	0.93			
10	-15	26.7	26.6	101.8	0.88	0.88			
20		26.7	26.6	101.8	0.88	0.88			
30		26.7	26.6	101.8	0.88	0.88			
40		26.7	26.6	101.8	0.88	0.88			
50		26.7	26.6	101.8	0.88	0.88			
60		26.7	26.6	101.8	0.88	0.88			
Prueba N°_N_		n ₁ = 210 vueltas		Alambre magneto #_24_					
Color Negro		n ₂ = 210 vueltas							
I (mA)	T °C	Lp (µH)	Ls (µH)	Lserie (µH)	Rp (Ω)	Rs (Ω)	µi	Ky %	
10	65	29.8	29.6	113	1.18	1.17			
20		29.8	29.6	113	1.18	1.17			
30		29.8	29.6	113	1.18	1.17			
40		29.8	29.6	113	1.18	1.17			
50		29.8	29.6	113	1.18	1.17			
60		29.8	29.6	113	1.18	1.17			
10	45	29.8	29.7	113	1.13	1.12			
20		29.8	29.7	113	1.13	1.12			
30		29.8	29.7	113	1.13	1.12			
40		29.8	29.7	113	1.13	1.12			
50		29.8	29.7	113	1.13	1.12			
60		29.8	29.7	113	1.13	1.12			
10	25	29.8	29.6	113	1.06	1.05			
20		29.8	29.6	113	1.06	1.05			
30		29.8	29.6	113	1.06	1.05			
40		29.8	29.6	113	1.06	1.05			
50		29.8	29.6	113	1.06	1.05			
60		29.8	29.6	113	1.06	1.05			
10	5	29.8	29.6	113	1.02	1.01			
20		29.8	29.6	113	1.02	1.01			
30		29.8	29.6	113	1.02	1.01			
40		29.8	29.6	113	1.02	1.01			
50		29.8	29.6	113	1.02	1.01			
60		29.8	29.6	113	1.02	1.01			
10	-15	29.8	29.5	113	0.98	0.98			
20		29.8	29.5	113	0.98	0.98			
30		29.8	29.5	113	0.98	0.98			
40		29.8	29.5	113	0.98	0.98			
50		29.8	29.5	113	0.98	0.98			
60		29.8	29.5	113	0.98	0.98			
Prueba N°_N_		n ₁ = 210 vueltas		Alambre magneto #_24_					
Color Vино		n ₂ = 210 vueltas							
I (mA)	T °C	Lp (µH)	Ls (µH)	Lserie (µH)	Rp (Ω)	Rs (Ω)	µi	Ky %	
10	65	23.2	23.1	86.8	1.11	1.10			
20		23.2	23.1	86.8	1.11	1.10			
30		23.2	23.1	86.8	1.11	1.10			
40		23.2	23.1	86.8	1.11	1.10			

50		23.2	23.1	86.8	1.11	1.10			
60		23.2	23.1	86.8	1.11	1.10			
10	45	23.2	23.2	86.8	1.08	1.08			
20		23.2	23.2	86.8	1.08	1.08			
30		23.2	23.2	86.8	1.08	1.08			
40		23.2	23.2	86.8	1.08	1.08			
50		23.2	23.2	86.8	1.08	1.08			
60		23.2	23.2	86.8	1.08	1.08			
10	25	23.2	23.1	86.8	1.01	1.00			
20		23.2	23.1	86.8	1.01	1.00			
30		23.2	23.1	86.8	1.01	1.00			
40		23.2	23.1	86.8	1.01	1.00			
50		23.2	23.1	86.8	1.01	1.00			
60		23.2	23.1	86.8	1.01	1.00			
10	5	23.2	23	86.8	0.98	0.96			
20		23.2	23	86.8	0.98	0.96			
30		23.2	23	86.8	0.98	0.96			
40		23.2	23	86.8	0.98	0.96			
50		23.2	23	86.8	0.98	0.96			
60		23.2	23	86.8	0.98	0.96			
10	-15	23.1	23	86.8	0.93	0.91			
20		23.1	23	86.8	0.93	0.91			
30		23.1	23	86.8	0.93	0.91			
40		23.1	23	86.8	0.93	0.91			
50		23.1	23	86.8	0.93	0.91			
60		23.1	23	86.8	0.93	0.91			
Prueba N°_N_		n ₁ = 210 vueltas		Alambre magneto #_24_					
Color Café		n ₂ = 210 vueltas							
I (mA)	T °C	Lp (µH)	Ls (µH)	Lserie (µH)	Rp (Ω)	Rs (Ω)	µi	Ky %	
10	65	33.1	33.4	128.8	1.13	1.13			
20		33.1	33.4	128.8	1.13	1.13			
30		33.1	33.4	128.8	1.13	1.13			
40		33.1	33.4	128.8	1.13	1.13			
50		33.1	33.4	128.8	1.13	1.13			
60		33.1	33.4	128.8	1.13	1.13			
10	45	33.2	33.5	128.8	1.08	1.08			
20		33.2	33.5	128.8	1.08	1.08			
30		33.2	33.5	128.8	1.08	1.08			
40		33.2	33.5	128.8	1.08	1.08			
50		33.2	33.5	128.8	1.08	1.08			
60		33.2	33.5	128.8	1.08	1.08			
10	25	33.1	33.5	128.8	1.02	1.02			
20		33.1	33.5	128.8	1.02	1.02			
30		33.1	33.5	128.8	1.02	1.02			
40		33.1	33.5	128.8	1.02	1.02			
50		33.1	33.5	128.8	1.02	1.02			
60		33.1	33.5	128.8	1.02	1.02			
10	5	33.1	33.4	128.8	0.98	0.98			
20		33.1	33.4	128.8	0.98	0.98			
30		33.1	33.4	128.8	0.98	0.98			
40		33.1	33.4	128.8	0.98	0.98			
50		33.1	33.4	128.8	0.98	0.98			
60		33.1	33.4	128.8	0.98	0.98			
10	-15	33	33.3	128.8	0.99	0.93			
20		33	33.3	128.8	0.99	0.93			
30		33	33.3	128.8	0.99	0.93			
40		33	33.3	128.8	0.99	0.93			
50		33	33.3	128.8	0.99	0.93			

Probeta N°_21_		n _p = 210 vueltas n _s = 210 vueltas				Alambre magneto #_24_			
I (mA)	T °C	Lp (µH)	Ls (µH)	Leqte (µH)	Rp (Ω)	Rs (Ω)	µi	Ky %	
60		33	33.3	128.8	0.99	0.93			
10	65	21.6	21.7	81.9	1.00	1.10			
20		21.6	21.7	81.9	1.00	1.10			
30		21.6	21.7	81.9	1.00	1.10			
40		21.6	21.7	81.9	1.00	1.10			
50		21.6	21.7	81.9	1.00	1.10			
60		21.6	21.7	81.9	1.00	1.10			
10	45	21.6	21.7	81.9	1.05	1.06			
20		21.6	21.7	81.9	1.05	1.06			
30		21.6	21.7	81.9	1.05	1.06			
40		21.6	21.7	81.9	1.05	1.06			
50		21.6	21.7	81.9	1.05	1.06			
60		21.6	21.7	81.9	1.05	1.06			
10	25	21.6	21.7	81.9	0.99	1.00			
20		21.6	21.7	81.9	0.99	1.00			
30		21.6	21.7	81.9	0.99	1.00			
40		21.6	21.7	81.9	0.99	1.00			
50		21.6	21.7	81.9	0.99	1.00			
60		21.6	21.7	81.9	0.99	1.00			
10	5	21.5	21.6	81.2	0.95	0.96			
20		21.5	21.6	81.2	0.95	0.96			
30		21.5	21.6	81.2	0.95	0.96			
40		21.5	21.6	81.2	0.95	0.96			
50		21.5	21.6	81.2	0.95	0.96			
60		21.5	21.6	81.2	0.95	0.96			
10	-15	21.5	21.6	81	0.89	0.93			
20		21.5	21.6	81	0.89	0.93			
30		21.5	21.6	81	0.89	0.93			
40		21.5	21.6	81	0.89	0.93			
50		21.5	21.6	81	0.89	0.93			
60		21.5	21.6	81	0.89	0.93			
Probeta N°_22_		n _p = 210 vueltas n _s = 210 vueltas				Alambre magneto #_24_			
I (mA)	T °C	Lp (µH)	Ls (µH)	Leqte (µH)	Rp (Ω)	Rs (Ω)	µi	Ky %	
10	65	27.9	28.1	105.9	1.29	1.30			
20		27.9	28.1	105.9	1.29	1.30			
30		27.9	28.1	105.9	1.29	1.30			
40		27.9	28.1	105.9	1.29	1.30			
50		27.9	28.1	105.9	1.29	1.30			
60		27.9	28.1	105.9	1.29	1.30			
10	45	27.9	28.1	105.9	1.24	1.25			
20		27.9	28.1	105.9	1.24	1.25			
30		27.9	28.1	105.9	1.24	1.25			
40		27.9	28.1	105.9	1.24	1.25			
50		27.9	28.1	105.9	1.24	1.25			
60		27.9	28.1	105.9	1.24	1.25			
10	25	27.9	28.1	105.9	1.18	1.18			
20		27.9	28.1	105.9	1.18	1.18			
30		27.9	28.1	105.9	1.18	1.18			
40		27.9	28.1	105.9	1.18	1.18			
50		27.9	28.1	105.9	1.18	1.18			
60		27.9	28.1	105.9	1.18	1.18			
10	5	27.8	28	105.9	1.12	1.13			
20		27.8	28	105.9	1.12	1.13			

Probeta N°_23_		n _p = 210 vueltas n _s = 210 vueltas				Alambre magneto #_24_			
I (mA)	T °C	Lp (µH)	Ls (µH)	Leqte (µH)	Rp (Ω)	Rs (Ω)	µi	Ky %	
30		27.8	28	105.9	1.12	1.13			
40		27.8	28	105.9	1.12	1.13			
50		27.8	28	105.9	1.12	1.13			
60		27.8	28	105.9	1.12	1.13			
10	-15	27.8	28	105.9	1.06	1.07			
20		27.8	28	105.9	1.06	1.07			
30		27.8	28	105.9	1.06	1.07			
40		27.8	28	105.9	1.06	1.07			
50		27.8	28	105.9	1.06	1.07			
60		27.8	28	105.9	1.06	1.07			
Probeta N°_24_		n _p = 210 vueltas n _s = 210 vueltas				Alambre magneto #_24_			
I (mA)	T °C	Lp (µH)	Ls (µH)	Leqte (µH)	Rp (Ω)	Rs (Ω)	µi	Ky %	
10	65	26.2	26.2	99.8	1.18	1.18			
20		26.2	26.2	99.8	1.18	1.18			
30		26.2	26.2	99.8	1.18	1.18			
40		26.2	26.2	99.8	1.18	1.18			
50		26.2	26.2	99.8	1.18	1.18			
60		26.2	26.2	99.8	1.18	1.18			
10	45	26.2	26.2	99.8	1.13	1.13			
20		26.2	26.2	99.8	1.13	1.13			
30		26.2	26.2	99.8	1.13	1.13			
40		26.2	26.2	99.8	1.13	1.13			
50		26.2	26.2	99.8	1.13	1.13			
60		26.2	26.2	99.8	1.13	1.13			
10	25	26.3	26.2	99.8	1.08	1.08			
20		26.3	26.2	99.8	1.08	1.08			
30		26.3	26.2	99.8	1.08	1.08			
40		26.3	26.2	99.8	1.08	1.08			
50		26.3	26.2	99.8	1.08	1.08			
60		26.3	26.2	99.8	1.08	1.08			
10	5	26.2	26.2	99.8	1.02	1.02			
20		26.2	26.2	99.8	1.02	1.02			
30		26.2	26.2	99.8	1.02	1.02			
40		26.2	26.2	99.8	1.02	1.02			
50		26.2	26.2	99.8	1.02	1.02			
60		26.2	26.2	99.8	1.02	1.02			
10	-15	26.1	26.1	99.8	0.97	0.96			
20		26.1	26.1	99.8	0.97	0.96			
30		26.1	26.1	99.8	0.97	0.96			
40		26.1	26.1	99.8	0.97	0.96			
50		26.1	26.1	99.8	0.97	0.96			
60		26.1	26.1	99.8	0.97	0.96			

Resultados de las mediciones magnéticas a diferentes temperaturas

Color del núcleo	Clase	μ_r	Ky %
Rosa	1	1.01	52
Vino	1	1.20	61.4
Gris	1	1.7	59.5
Verde olivo	1	2	64.8
Verde	1	1.42	42.9
Negro	1	1.63	53.3
Café	1	2.4	64.7
Morado	1	1.96	56.2
azul	1	2.29	53.8
Rosa	2	1.24	69
Vino	2	1.43	67.3
Gris	2	1.33	66
Verde olivo	2	1.44	64.6
Verde	2	1.52	70.6
Negro	2	1.83	78.4
Café	2	2.16	82.6
Morado	2	2	83.6
azul	2	2.42	82.3
Rosa	3	1.14	81.1
Vino	3	1.19	86.6
Gris	3	1.30	97.5
Verde olivo	3	1.42	89
Verde	3	1.01	49.6
Negro	3	1.52	79
Café	3	1.77	88.8
Morado	3	1.86	96.8
azul	3	1.93	91.3
Rosa	N	1.13	89.1
Vino	N	1.18	87.5
Gris	N	1.38	90
Verde olivo	N	1.41	90.6
Verde	N	1.46	89.1
Negro	N	1.57	90.2
Café	N	1.81	93.3
Morado	N	2	94.3
azul	N	2	92.5

D2. Registro de datos del material en las pruebas de baja frecuencia

f (Hz)= 1000						
Equipo utilizado:						
<ul style="list-style-type: none"> • Fuente de corriente alterna • Medidor de inductancias • Osciloscopio 						
Prueba N°	Color: Azul		n ₁ =210	n ₂ =210		
N	A _c (m²) = 0.0000802		Alambre magneto #_ 24_			
Vent (V)	Ient (A)	Vsnt (V)	H (A/m)	B _{max} (T)	μ _r	χ
0.14	0.141	0.027	161.0571676	0.000360651	1.781959229	0.781959229
0.21	0.227	0.045	259.2906174	0.000601086	1.844759555	0.844759555
0.27	0.314	0.064	358.6663165	0.000854877	1.896720935	0.896720935
0.34	0.402	0.083	459.1842651	0.001108669	1.9213441	0.9213441
0.47	0.576	0.121	657.9356635	0.001616253	1.954861523	0.954861523
0.54	0.662	0.14	756.1691132	0.001870044	1.967991227	0.967991227
0.61	0.749	0.159	855.5448124	0.002123836	1.97546081	0.97546081
0.68	0.836	0.178	954.9205116	0.002377628	1.981375719	0.981375719
0.74	0.923	0.197	1054.296211	0.00263142	1.986175575	0.986175575
0.81	1	0.216	1142.249416	0.002885211	2.010050011	1.010050011
0.95	1.177	0.253	1344.427562	0.003379438	2.000309374	1.000309374
1.02	1.263	0.272	1442.661012	0.003633229	2.004096665	1.004096665
1.08	1.346	0.29	1537.467714	0.003873664	2.004961556	1.004961556
1.15	1.432	0.31	1635.701163	0.004140813	2.014520947	1.014520947
1.22	1.516	0.328	1731.650114	0.004381247	2.01338929	1.01338929
1.28	1.601	0.347	1828.741315	0.004635039	2.016931992	1.016931992
1.42	1.771	0.386	2022.923715	0.00515598	2.028251731	1.028251731
1.49	1.855	0.405	2118.872666	0.005409772	2.031721709	1.031721709
1.56	1.938	0.423	2213.679368	0.005650206	2.031139287	1.031139287
1.63	2	0.441	2284.498832	0.00589064	2.051926053	1.051926053
1.77	2.174	0.475	2483.25023	0.006344794	2.033233149	1.033233149
1.84	2.256	0.494	2576.914682	0.006598585	2.037703378	1.037703378
1.91	2.336	0.512	2668.294635	0.00683902	2.039624567	1.039624567
2.05	2.5	0.549	2855.623539	0.007333246	2.043550844	1.043550844
2.19	2.663	0.585	3041.810194	0.007814114	2.04426791	1.04426791
2.26	2.74	0.603	3129.763399	0.008054549	2.047952413	1.047952413
2.33	2.818	0.62	3218.858854	0.008281626	2.04740525	1.04740525
2.47	2.978	0.656	3401.61876	0.008762494	2.049898028	1.049898028
2.54	3	0.673	3426.748247	0.008989571	2.087598236	1.087598236
2.7	3.176	0.701	3627.784144	0.00936358	2.053953636	1.053953636
2.77	3.25	0.717	3712.310601	0.009577299	2.052999797	1.052999797
2.71	3.143	0.693	3590.089914	0.00925672	2.051832787	1.051832787
2.64	3.06	0.674	3495.283212	0.009002928	2.049706044	1.049706044
2.57	2.97	0.656	3392.480765	0.008762494	2.055419639	1.055419639

2.5	2.896	0.637	3307.954308	0.008508702	2.04688756	1.04688756
2.36	2.735	0.602	3124.052152	0.008041191	2.048293903	1.048293903
2.29	2.656	0.584	3033.814448	0.007800757	2.04615198	1.04615198
2.22	2.575	0.566	2941.292246	0.007560323	2.04546621	1.04546621
2.08	2.414	0.53	2757.39009	0.007079454	2.043109841	1.043109841
2.01	2.335	0.512	2667.152386	0.00683902	2.040498068	1.040498068
1.94	2.256	0.495	2576.914682	0.006611943	2.041828284	1.041828284
1.87	2.176	0.477	2485.534729	0.006371509	2.039917482	1.039917482
1.8	2.095	0.459	2393.012526	0.00611074	2.038833543	1.038833543
1.66	1.935	0.423	2210.25262	0.005650206	2.03428834	1.03428834
1.59	1.855	0.405	2118.872666	0.005409772	2.031721709	1.031721709
1.52	1.775	0.387	2027.492713	0.00515598	2.02892372	1.02892372
1.38	1.613	0.35	1842.448308	0.004675111	2.019234644	1.019234644
1.24	1.452	0.314	1658.540152	0.004194243	2.012408502	1.012408502
1.17	1.371	0.297	1566.023949	0.003967166	2.015914489	1.015914489
1.1	1.29	0.279	1473.501746	0.003726731	2.012646974	1.012646974
0.97	1.13	0.243	1290.74184	0.003245863	2.001155984	1.001155984
0.9	1.049	0.225	1198.219637	0.003005429	1.995998183	0.995998183
0.83	0.967	0.207	1104.555185	0.002764994	1.992035085	0.992035085
0.76	0.885	0.189	1010.890733	0.00252456	1.987337581	0.987337581
0.62	0.719	0.153	821.2773299	0.002043691	1.980230075	0.980230075
0.55	0.637	0.135	727.6128778	0.001803257	1.972184076	0.972184076
0.48	0.555	0.117	633.9484257	0.001562823	1.961760521	0.961760521
0.41	0.471	0.098	537.9994748	0.001309031	1.956235954	0.956235954
0.35	0.387	0.08	442.0505239	0.001068597	1.923676917	0.923676917
0.28	0.304	0.062	347.2438224	0.000828163	1.897890787	0.897890787
0.21	0.22	0.044	251.2948715	0.000587728	1.861157417	0.861157417
0.14	0.136	0.026	155.3459205	0.000347294	1.779047531	0.779047531

D3. Registro de datos del material en las pruebas de alta frecuencia

Datos de entrada
T (° C) = Aprox. 25 °C

Equipo utilizado:

- Fuente de CD de alta potencia
- Medidor de inductancias
- Núcleos devanados con alambre de cobre
- Multímetro
- Osciloscopio
- Circuito inversor medio puente

f (kHz) = 200

Probeta N° N	Color: AZUL Im(m) = 0.26 A(m²) = 0.0000802		n ₁ =440 n ₂ =440 Alambre magneto # 30								
Vent (V)	Ient (A)	Vsal (V)	B _{max} (T)	H (A/m)	μ _r	P _{in} (W)	P _{ac} (W)	P _{out} (W)	χ		
48	0.1959	46.8	0.0011	468.84	1.791	0.196	0.106	0.302	0.791		
168	0.6979	163	0.0037	1670.27	1.751	2.486	1.205	3.691	0.751		
304	1.21	289.8	0.0065	2895.87	1.796	7.472	4.588	12.660	0.796		
444	1.62	440	0.0099	3877.12	2.037	13.394	9.656	23.050	1.037		
564	2.1	568	0.0128	5025.90	2.028	22.507	17.273	39.780	1.028		
672	2.541	680	0.0153	6081.34	2.007	32.952	26.218	59.170	1.007		
792	3.009	792	0.0179	7201.39	1.974	46.208	39.272	85.480	0.974		
876	3.367	888	0.0200	8058.19	1.978	57.857	49.440	109.440	0.978		
972	3.765	984	0.0222	9010.72	1.960	72.344	60.256	132.600	0.960		
1068	4.132	1064	0.0240	9889.05	1.931	87.135	76.765	163.900	0.931		
48	0.1789	50	0.0011	428.16	2.096	0.163	0.082	0.227	1.096		
172	0.6915	166	0.0037	1654.96	1.800	2.440	1.299	2.483	0.800		
308	1.21	298	0.0067	2895.87	1.847	7.472	5.808	8.107	0.847		
436	1.684	426	0.0096	4030.29	1.897	14.473	10.037	13.740	0.897		
564	2.099	568	0.0128	5023.50	2.029	22.485	17.775	18.880	1.029		
672	2.56	680	0.0153	6126.81	1.992	33.447	22.063	29.760	0.992		
768	2.934	776	0.0175	7021.90	1.983	43.933	32.457	30.500	0.983		
888	3.413	888	0.0200	8168.28	1.951	59.449	49.251	39.370	0.951		
972	3.782	984	0.0222	9051.40	1.951	72.999	62.801	43.590	0.951		
1068	4.132	1064	0.0240	9889.05	1.931	87.135	76.765	52.500	0.931		

Probeta N° N	Color: CAFÉ Im(m) = 0.26 A(m²) = 0.0000802		n ₁ =440 n ₂ =440 Alambre magneto # 30								
Vent (V)	Ient (A)	Vsal (V)	B _{max} (T)	H (A/m)	μ _r	P _{in} (W)	P _{ac} (W)	P _{out} (W)	χ		
56.8	0.2595	55.6	0.0013	621.06	1.607	0.344	0.208	0.552	0.607		
189.6	0.8693	186	0.0042	2080.48	1.604	3.857	1.059	4.916	0.604		
309.6	1.455	307.8	0.0069	3482.23	1.586	10.804	6.086	16.890	0.586		
424	1.951	428	0.0097	4669.30	1.645	19.426	11.534	30.960	0.645		
536	2.49	532	0.0120	5959.28	1.602	31.642	18.538	50.180	0.602		
656	3.044	652	0.0147	7285.16	1.606	47.289	21.711	69.000	0.606		
752	3.523	748	0.0169	8431.54	1.592	63.343	31.317	94.660	0.592		
848	3.826	840	0.0189	9156.71	1.646	74.707	54.893	129.600	0.646		
960	4.357	952	0.0215	10427.54	1.638	96.883	49.417	146.300	0.638		
1056	4.91	1048	0.0236	11751.03	1.600	123.037	59.563	182.600	0.600		
61.2	0.2465	59.4	0.0013	589.94	1.807	0.310	0.100	0.410	0.807		
190.8	0.8679	189	0.0043	2077.13	1.633	3.844	1.525	5.369	0.633		
320	1.44	324	0.0073	3446.33	1.687	10.583	3.987	14.570	0.687		
424	1.941	428	0.0097	4645.37	1.653	19.227	8.173	27.400	0.653		
536	2.463	532	0.0120	5894.66	1.620	30.960	18.280	49.240	0.620		
656	2.928	648	0.0146	7007.54	1.659	43.754	23.976	67.730	0.659		

752	3.411	744	0.0168	8163.49	1.635	59.379	37.751	97.130	0.635		
848	3.878	856	0.0193	9281.16	1.655	76.751	45.449	122.200	0.655		
960	4.293	936	0.0211	10274.37	1.635	94.057	66.043	160.100	0.635		
1056	4.91	1048	0.0236	11751.03	1.600	123.037	59.563	182.600	0.600		

Probeta N° N	Color: GRIS Im(m) = 0.26 A(m²) = 0.0000802		n ₁ =440 n ₂ =440 Alambre magneto # 30								
Vent (V)	Ient (A)	Vsal (V)	B _{max} (T)	H (A/m)	μ _r	P _{in} (W)	P _{ac} (W)	P _{out} (W)	χ		
44.8	0.2528	44.4	0.0010	605.02	1.317	0.326	0.117	0.443	0.317		
152	0.8838	151	0.0034	2115.18	1.281	3.986	1.433	5.419	0.281		
259.2	1.52	257.4	0.0058	3637.79	1.270	11.791	4.729	16.520	0.270		
372	2.172	366	0.0083	5198.21	1.264	24.076	10.664	34.740	0.264		
488	2.814	484	0.0109	6734.70	1.290	40.413	7.077	47.490	0.290		
592	3.451	580	0.0131	8259.22	1.260	60.780	16.130	76.910	0.260		
688	4.025	684	0.0154	9632.97	1.274	82.680	17.130	99.810	0.274		
784	4.616	780	0.0176	11047.40	1.267	108.743	30.657	139.400	0.267		
888	5.11	870	0.0196	12229.68	1.277	133.264	45.236	178.500	0.277		
972	5.592	966	0.0218	13383.25	1.295	159.590	59.610	219.200	0.295		
48	0.2388	50	0.0011	571.52	1.570	0.291	0.113	0.404	0.570		
160	0.8877	154	0.0035	2124.52	1.301	4.022	1.716	5.738	0.301		
260	1.511	258	0.0058	3616.25	1.280	11.652	5.098	16.750	0.280		
372	2.158	366	0.0083	5164.71	1.272	23.767	10.813	34.580	0.272		
492	2.749	486	0.0110	6579.14	1.326	38.567	8.433	47.000	0.326		
600	3.383	582	0.0131	8096.48	1.290	58.408	17.372	75.780	0.290		
696	3.99	690	0.0156	9549.21	1.297	81.249	18.691	99.940	0.297		
792	4.563	774	0.0175	10920.56	1.272	106.261	29.239	135.500	0.272		
888	5.159	882	0.0199	12346.95	1.282	135.832	74.868	210.700	0.282		
972	5.592	966	0.0218	13383.25	1.295	159.590	59.610	219.200	0.295		

Probeta N° N	Color: MORADO Im(m) = 0.26 A(m²) = 0.0000802		n ₁ =440 n ₂ =440 Alambre magneto # 30								
Vent (V)	Ient (A)	Vsal (V)	B _{max} (T)	H (A/m)	μ _r	P _{in} (W)	P _{ac} (W)	P _{out} (W)	χ		
43.2	0.166	42.4	0.0010	397.29	1.915	0.141	0.057	0.198	0.915		
161.6	0.6859	156	0.0035	1641.55	1.705	2.401	1.449	3.850	0.705		
312	1.178	300	0.0068	2819.29	1.910	7.082	2.665	9.747	0.910		
440	1.693	428	0.0097	4051.83	1.896	14.628	6.742	21.370	0.896		
552	2.139	548	0.0124	5119.24	1.921	23.350	10.350	33.700	0.921		
672	2.595	668	0.0151	6210.57	1.930	34.367	24.743	59.110	0.930		
768	2.986	764	0.0172	7146.35	1.919	45.504	27.716	73.220	0.919		
880	3.307	872	0.0197	7914.59	1.977	55.814	29.286	85.100	0.977		
976	3.731	968	0.0218	8929.34	1.945	71.043	62.157	133.200	0.945		
1056	4.038	1032	0.0233	9664.08	1.916	83.215	43.585	126.800	0.916		
48	0.1783	46.4	0.0010	426.72	1.951	0.162	0.102	0.265	0.951		
169.6	0.6951	161.6	0.0036	1663.57	1.743	2.466	1.195	3.661	0.743		
312	1.201	308	0.0069	2874.33	1.923	7.361	2.989	10.350	0.923		
440	1.671	436	0.0098	3999.18	1.956	14.250	4.830	19.080	0.956		
560	2.152	556	0.0125	5150.35	1.937	23.635	9.445	33.080	0.937		
664	2.57	660	0.0149	6150.74	1.926	33.708	13.062	46.770	0.926		
784	2.941	776	0.0175	7038.65	1.978	44.143	19.887	64.030	0.978		
880	3.344	872	0.0197	8003.14	1.955	57.069	33.991	91.060	0.955		
976	3.722	968	0.0218	8907.80	1.950	70.701	61.699	132.400	0.950		
1056	4.038	1032	0.0233	9664.08	1.916	83.215	43.585	126.800	0.916		

Probeta Nº N	Color: NEGRO Im(m) = 0.26 A(m²) = 0.0000802			n ₁ =210 n ₂ =210 Alambre magneto # 30						
Vent (V)	Ient (A)	Vsal (V)	B _{max} (T)	H (A/m)	μ _r	P _{ca} (W)	P _m (W)	P _{pm} (W)	χ	
84	0.157	84	0.0011	595.45	1.410	0.316	0.136	0.452	0.410	
268.8	0.4945	261.6	0.0035	2041.47	1.357	3.713	1.059	4.772	0.357	
446.4	0.824	435.6	0.0058	3424.79	1.352	10.451	4.089	14.540	0.352	
624	1.134	612	0.0081	4709.98	1.364	19.766	8.664	28.430	0.364	
792	1.456	792	0.0107	6145.95	1.390	33.656	8.194	41.850	0.390	
948	1.763	936	0.0127	7419.18	1.364	49.045	13.315	62.360	0.364	
1020	1.877	996	0.0145	8520.09	1.356	64.680	16.860	81.540	0.356	
1104	2.036	1080	0.0163	9623.40	1.350	82.516	23.084	105.600	0.350	
1176	2.161	1152	0.0180	10451.47	1.370	97.328	34.372	131.700	0.370	
1236	2.268	1212	0.0196	11475.80	1.360	117.341	36.159	153.500	0.360	
88.8	0.1562	86.4	0.0012	568.41	1.705	0.288	0.118	0.406	0.705	
272	0.4983	268	0.0035	1950.05	1.417	3.388	1.462	4.850	0.417	
444	0.816	432	0.0058	3381.71	1.369	10.190	3.780	13.970	0.369	
636	1.135	612	0.0079	4607.07	1.363	18.912	9.668	28.580	0.363	
780	1.438	768	0.0104	5923.38	1.400	31.262	10.288	41.550	0.400	
900	1.666	888	0.0123	7012.32	1.397	43.813	17.667	61.480	0.397	
1008	1.851	984	0.0142	8089.30	1.398	58.305	30.485	88.790	0.398	
1104	2.01	1068	0.0164	9400.82	1.386	78.743	23.157	101.900	0.386	
1176	2.163	1152	0.0180	10432.33	1.373	96.972	37.228	134.200	0.373	
1236	2.268	1212	0.0196	11475.80	1.360	117.341	36.159	153.500	0.360	
Probeta Nº N	Color: ROSA Im(m) = 0.26 A(m²) = 0.0000802			n ₁ =440 n ₂ =440 Alambre magneto # 30						
Vent (V)	Ient (A)	Vsal (V)	B _{max} (T)	H (A/m)	μ _r	P _{ca} (W)	P _m (W)	P _{pm} (W)	χ	
43.2	0.2533	42	0.0009	606.22	1.243	0.327	0.116	0.444	0.243	
134.4	0.8939	130.8	0.0029	2139.36	1.097	4.078	0.648	4.726	0.097	
230.4	1.576	222	0.0050	3771.82	1.056	12.676	3.384	16.060	0.056	
320	2.215	310	0.0070	5301.13	1.049	25.039	9.511	34.550	0.049	
420	2.853	414	0.0093	6828.04	1.088	41.541	13.689	55.230	0.088	
528	3.5	498	0.0112	8376.50	1.067	62.518	14.472	76.990	0.067	
612	4.104	582	0.0131	9822.04	1.063	85.958	27.442	113.400	0.063	
684	4.677	666	0.0150	11193.39	1.068	111.636	38.964	150.600	0.068	
744	5.139	714	0.0161	12299.09	1.042	134.781	26.919	161.700	0.042	
43.2	0.2533	42	0.0009	598.08	1.218	0.319	0.083	0.401	0.218	
42	0.2499	40.6	0.0029	2168.32	1.078	4.189	1.058	5.247	0.078	
134.4	0.906	130.2	0.0053	3704.80	1.133	12.230	2.530	14.760	0.133	
252	1.548	234	0.0074	5305.91	1.116	25.084	7.576	32.660	0.116	
348	2.217	330	0.0093	6914.20	1.075	42.596	16.464	59.060	0.075	
432	2.889	414	0.0112	8424.36	1.061	63.235	24.935	88.170	0.061	
528	3.52	498	0.0131	9912.98	1.054	87.557	26.443	114.000	0.054	
612	4.142	582	0.0153	11487.77	1.059	117.585	28.315	145.900	0.059	
696	4.8	678	0.0166	12619.79	1.049	141.901	15.199	157.100	0.049	
Probeta Nº N	Color: VERDE Im(m) = 0.26 A(m²) = 0.0000802			n ₁ =440 n ₂ =440 Alambre magneto # 30						
Vent (V)	Ient (A)	Vsal (V)	B _{max} (T)	H (A/m)	μ _r	P _{ca} (W)	P _m (W)	P _{pm} (W)	χ	
46.4	0.2416	44.4	0.0010	578.22	1.378	0.298	0.127	0.425	0.378	

158.4	0.8474	154.4	0.0035	2028.07	1.366	3.665	1.496	5.161	0.366	
271.6	1.443	264.6	0.0060	3453.51	1.375	10.627	3.353	13.980	0.375	
392	2.037	388	0.0087	4875.12	1.428	21.176	10.384	31.560	0.428	
504	2.658	492	0.0111	6361.35	1.388	36.056	18.694	54.750	0.388	
600	3.235	596	0.0134	7742.28	1.381	53.410	15.890	69.300	0.381	
696	3.75	684	0.0154	8974.82	1.368	71.768	20.152	91.920	0.368	
776	4.298	764	0.0172	10286.34	1.333	94.277	45.423	139.700	0.333	
880	4.659	872	0.0197	11150.31	1.403	110.779	30.321	141.100	0.403	
960	5.111	952	0.0215	12232.08	1.397	133.316	37.984	171.300	0.397	
48	0.2379	47	0.0011	569.36	1.481	0.289	0.063	0.352	0.481	
168	0.8369	172	0.0039	2002.94	1.541	3.575	0.606	4.181	0.541	
280	1.423	276	0.0062	3405.64	1.454	10.334	2.416	12.750	0.454	
392	2.019	388	0.0087	4832.04	1.441	20.804	9.156	29.960	0.441	
512	2.601	504	0.0114	6224.93	1.453	34.526	17.084	51.610	0.453	
592	3.109	600	0.0135	7440.72	1.447	49.330	22.410	71.740	0.447	
704	3.657	696	0.0157	8752.24	1.427	68.253	35.847	104.100	0.427	
784	4.16	776	0.0175	9956.06	1.399	88.320	47.880	136.200	0.399	
880	4.685	872	0.0197	11212.54	1.396	112.019	30.181	142.200	0.396	
960	5.111	952	0.0215	12232.08	1.397	133.316	37.984	171.300	0.397	
Probeta Nº N	Color: VINO Im(m) = 0.26 A(m²) = 0.0000802			n ₁ =440 n ₂ =440 Alambre magneto # 30						
Vent (V)	Ient (A)	Vsal (V)	B _{max} (T)	H (A/m)	μ _r	P _{ca} (W)	P _m (W)	P _{pm} (W)	χ	
41.6	0.2636	41.2	0.0009	630.87	1.172	0.355	0.161	0.515	0.172	
146.4	0.9334	140.4	0.0032	2233.89	1.128	4.446	1.096	5.697	0.128	
249.6	1.643	243.6	0.0055	3932.17	1.112	13.777	4.362	18.050	0.112	
349.2	2.292	340.2	0.0077	5485.41	1.113	26.810	9.335	37.680	0.113	
468	2.944	450	0.0101	7045.83	1.146	44.233	7.067	53.760	0.146	
576	3.625	546	0.0123	8675.66	1.129	67.064	9.708	86.480	0.129	
660	4.22	642	0.0145	10099.66	1.141	90.886	16.066	104.400	0.141	
756	4.851	726	0.0164	11609.82	1.122	120.097	19.010	141.100	0.122	
840	5.448	822	0.0185	13058.61	1.131	151.477	53.765	178.600	0.131	
936	6.066	906	0.0204	14517.66	1.120	187.792	106.308	294.100	0.120	
42	0.2626	41.4	0.0009	628.48	1.182	0.352	0.161	0.513	0.182	
168	0.9125	162	0.0037	2183.87	1.331	4.249	1.096	5.345	0.331	
264	1.563	246	0.0055	3740.70	1.180	12.468	4.362	16.830	0.180	
372	2.256	354	0.0080	5399.25	1.177	25.975	9.335	35.310	0.177	
468	2.938	450	0.0101	7031.47	1.148	44.053	7.067	51.120	0.148	
564	3.619	546	0.0123	8661.30	1.131	66.842	9.708	76.550	0.131	
672	4.265	642	0.0145	10207.36	1.129	92.834	16.066	108.900	0.129	
756	4.871	726	0.0164	11657.69	1.118	121.090	19.010	140.100	0.118	
840	5.467	822	0.0185	13084.09	1.127	152.535	53.765	206.300	0.127	
936	6.066	906	0.0204	14517.66	1.120	187.792	106.308	294.100	0.120	
Probeta Nº N	Color: VERDE OLIVO Im(m) = 0.26 A(m²) = 0.0000802			n ₁ =440 n ₂ =440 Alambre magneto # 30						
Vent (V)	Ient (A)	Vsal (V)	B _{max} (T)	H (A/m)	μ _r	P _{ca} (W)	P _m (W)	P _{pm} (W)	χ	
44.4	0.2446	43.8	0.0010	585.40	1.343	0.305	0.099	0.404	0.343	
164	0.9442	159	0.0036	2259.74	1.263	4.550	1.555	6.105	0.263	
277.2	1.624	273	0.0062	3886.69	1.260	13.460	4.520	17.980	0.260	
388	2.244	378	0.0085	5370.53	1.263	25.699	5.521	31.220	0.263	
504	2.862	498	0.0112	6849.58	1.305	41.803	9.857	51.660	0.305	
624	3.52	606	0.0137	8424.36	1.291	63.235	11.775	75.010	0.291	

732	4.218	714	0.0161	10094.87	1.269	90.800	35.700	126.500	0.269
940	4.881	822	0.0185	11681.62	1.263	121.587	44.713	166.300	0.263
948	5.482	918	0.0207	13119.99	1.256	153.373	64.127	217.500	0.256
1044	6.024	1026	0.0231	14417.15	1.277	185.200	83.500	268.700	0.277
48	0.2589	47.2	0.0011	619.62	1.367	0.342	0.124	0.466	0.367
164	0.9058	162	0.0037	2167.84	1.341	4.187	1.861	6.048	0.341
276	1.602	270	0.0061	3834.04	1.264	13.098	2.812	15.910	0.264
396	2.232	390	0.0088	5341.81	1.310	25.425	8.055	33.480	0.310
516	2.887	498	0.0112	6909.41	1.293	42.537	18.103	60.640	0.293
624	3.55	618	0.0139	8496.16	1.305	64.317	21.723	86.040	0.305
720	4.132	714	0.0161	9889.05	1.296	87.135	16.065	103.200	0.296
828	4.761	798	0.0180	11394.43	1.257	115.682	22.918	138.600	0.257
936	5.485	918	0.0207	13127.17	1.255	153.541	63.559	217.100	0.255
1044	6.024	1026	0.0231	14417.15	1.277	185.200	83.500	268.700	0.277
f (kHz) = 600									
Prueba N°	Color: Azul lm(m) = 0.26 A(m²) = 0.0000802			n _o =440 Alambre magneto # 30					
Vent (V)	lent (A)	Visal (V)	B _{max} (T)	H (A/m)	μ _r	P _{av} (W)	P _{max} (W)	P _{total} (W)	χ
50.4	0.07409	51.2	0.0004	177.32	1.727	0.031	0.196	0.227	0.727
170	0.2493	170	0.0013	596.65	1.704	0.355	2.298	2.653	0.704
281.6	0.4152	278.4	0.0021	993.69	1.676	0.985	6.577	7.562	0.676
400	0.5778	400	0.0030	1382.84	1.730	1.908	12.992	14.900	0.730
480	0.6922	472	0.0035	1656.63	1.704	2.738	16.192	18.930	0.704
536	0.7864	536	0.0040	1882.08	1.704	3.534	26.336	29.870	0.704
600	0.882	600	0.0045	2110.88	1.700	4.446	28.204	32.650	0.700
640	0.946	640	0.0048	2264.05	1.691	5.114	37.546	42.660	0.691
680	0.9836	672	0.0051	2354.03	1.708	5.529	38.451	43.980	0.708
704	1.038	704	0.0053	2484.23	1.695	6.157	46.343	52.500	0.695
54.4	0.07536	52.8	0.0004	180.36	1.751	0.032	0.194	0.227	0.751
176	0.2472	176	0.0013	591.62	1.780	0.349	2.134	2.483	0.780
280	0.4097	280	0.0021	980.53	1.708	0.959	7.148	8.107	0.708
384	0.569	384	0.0029	1361.78	1.687	1.850	11.890	13.740	0.687
480	0.6843	472	0.0035	1637.72	1.724	2.676	16.204	18.880	0.724
536	0.7873	536	0.0040	1884.23	1.702	3.542	26.218	29.760	0.702
592	0.8659	592	0.0045	2072.35	1.709	4.285	26.215	30.500	0.709
640	0.9405	640	0.0048	2250.88	1.701	5.055	34.315	39.370	0.701
680	1.003	680	0.0051	2400.46	1.695	5.749	37.841	43.590	0.695
704	1.038	704	0.0053	2484.23	1.695	6.157	46.343	52.500	0.695
Prueba N°	Color: CAFÉ lm(m) = 0.26 A(m²) = 0.0000802			n _o =440 Alambre magneto # 30					
Vent (V)	lent (A)	Visal (V)	B _{max} (T)	H (A/m)	μ _r	P _{av} (W)	P _{max} (W)	P _{total} (W)	χ
67.2	0.1002	64.8	0.0005	239.81	1.616	0.057	0.313	0.370	0.616
180	0.2828	177.6	0.0013	676.82	1.570	0.457	2.910	3.367	0.570
264	0.4192	259.2	0.0019	1003.26	1.545	1.004	6.495	7.499	0.545
344	0.5359	344	0.0026	1282.56	1.604	1.641	8.919	10.560	0.604
400	0.6334	400	0.0030	1515.91	1.578	2.293	14.667	16.960	0.578
464	0.7377	464	0.0035	1765.53	1.572	3.110	20.410	23.520	0.572
512	0.8174	512	0.0038	1956.27	1.566	3.818	24.822	28.640	0.566
560	0.8986	560	0.0042	2150.61	1.558	4.615	25.995	30.610	0.558
608	0.9821	608	0.0046	2350.44	1.547	5.512	33.968	39.480	0.547

656	1.053	648	0.0049	2520.13	1.538	6.337	41.833	48.170	0.538
64.8	0.09789	64.8	0.0005	234.28	1.655	0.055	0.356	0.411	0.655
176.4	0.2787	176.4	0.0013	667.01	1.582	0.444	2.595	3.039	0.582
272	0.415	272	0.0020	993.21	1.638	0.984	5.311	6.295	0.638
336	0.5378	344	0.0026	1287.11	1.599	1.655	13.847	15.500	0.599
408	0.642	400	0.0030	1536.49	1.557	2.355	13.085	15.440	0.557
464	0.7365	464	0.0035	1762.65	1.575	3.100	18.510	21.610	0.575
512	0.8239	512	0.0038	1971.83	1.553	3.879	20.831	24.710	0.553
560	0.9065	560	0.0042	2169.51	1.544	4.696	27.284	31.980	0.544
600	0.9618	592	0.0045	2301.86	1.538	5.287	34.873	40.160	0.538
656	1.053	648	0.0049	2520.13	1.538	6.337	41.833	48.170	0.538
Prueba N°	Color: GRIS lm(m) = 0.26 A(m²) = 0.0000802			n _o =440 Alambre magneto # 30					
Vent (V)	lent (A)	Visal (V)	B _{max} (T)	H (A/m)	μ _r	P _{av} (W)	P _{max} (W)	P _{total} (W)	χ
62.4	0.1178	62.4	0.0002	281.93	1.324	0.079	0.171	0.251	0.324
199.2	0.396	192	0.0006	947.74	1.212	0.896	1.206	2.102	0.212
329.6	0.6544	313.6	0.0010	1566.17	1.198	2.447	4.740	7.187	0.198
456	0.875	444	0.0015	2094.12	1.268	4.375	6.085	10.460	0.268
552	1.07	540	0.0019	2560.81	1.261	6.543	9.217	15.760	0.261
672	1.282	660	0.0024	3068.19	1.287	9.392	15.218	24.610	0.287
752	1.376	752	0.0028	3293.16	1.366	10.820	22.660	33.480	0.366
776	1.491	792	0.0031	3568.39	1.328	12.705	30.425	43.130	0.328
864	1.591	880	0.0034	3807.72	1.382	14.466	35.624	50.090	0.382
928	1.676	928	0.0037	4011.14	1.384	16.053	39.547	55.600	0.384
60	0.1161	58	0.0004	277.86	1.249	0.077	0.402	0.479	0.249
200	0.3873	188	0.0014	926.92	1.213	0.857	1.174	1.501	0.213
328	0.6371	312	0.0023	1524.76	1.224	2.320	9.930	12.250	0.224
480	0.8463	464	0.0035	2025.44	1.370	4.093	17.467	21.560	0.370
576	1.046	560	0.0042	2503.38	1.338	6.253	30.737	36.990	0.338
704	1.239	672	0.0051	2965.28	1.356	8.773	39.907	48.680	0.356
768	1.401	752	0.0057	3352.99	1.342	11.217	55.413	66.630	0.342
816	1.488	816	0.0061	3561.21	1.371	12.653	65.827	78.480	0.371
864	1.584	864	0.0065	3790.96	1.363	14.339	78.841	93.180	0.363
928	1.676	928	0.0070	4011.14	1.384	16.053	89.547	105.600	0.384
Prueba N°	Color: MORADO lm(m) = 0.26 A(m²) = 0.0000802			n _o =440 Alambre magneto # 30					
Vent (V)	lent (A)	Visal (V)	B _{max} (T)	H (A/m)	μ _r	P _{av} (W)	P _{max} (W)	P _{total} (W)	χ
56	0.08097	57.6	0.0004	193.78	1.778	0.037	0.235	0.273	0.778
179	0.2657	177.6	0.0013	635.90	1.671	0.403	2.580	2.983	0.671
307.2	0.4551	304	0.0023	1089.18	1.670	1.184	8.049	9.233	0.670
416	0.599	416	0.0031	1433.58	1.736	2.050	13.780	15.830	0.736
488	0.7089	480	0.0036	1696.60	1.692	2.872	17.208	20.080	0.692
552	0.8152	544	0.0041	1951.01	1.668	3.798	28.262	32.060	0.668
608	0.8958	600	0.0045	2143.90	1.674	4.586	29.384	33.970	0.674
656	0.9655	648	0.0049	2310.72	1.677	5.327	33.053	38.380	0.677
680	1.009	672	0.0051	2414.82	1.665	5.818	36.852	42.670	0.665
720	1.06	712	0.0054	2536.88	1.679	6.421	39.369	45.790	0.679
57.6	0.07728	55.2	0.0004	184.95	1.785	0.034	0.189	0.224	0.785
200	0.2769	200	0.0015	662.70	1.805	0.438	2.406	2.844	0.805
312	0.4462	312	0.0023	1067.88	1.748	1.138	7.237	8.375	0.748
416	0.6018	416	0.0031	1440.28	1.728	2.070	14.870	16.940	0.728

488	0.7027	480	0.0036	1681.76	1.707	2.822	20.288	23.110	0.707
552	0.8192	552	0.0041	1960.58	1.684	3.835	28.495	32.330	0.684
624	0.9088	616	0.0046	2175.02	1.694	4.720	33.240	37.960	0.694
648	0.9685	648	0.0049	2317.90	1.672	5.360	37.970	43.330	0.672
696	1.02	680	0.0051	2441.15	1.666	5.946	36.614	42.560	0.666
720	1.06	712	0.0054	2536.88	1.679	6.421	39.369	45.790	0.679
Prueba N° N	Color: NEGRO Im(m) = 0.26 A(m²) = 0.0000802			n ₁ =440 n ₂ =440 Alambre magneto # 30					
Vent (V)	Ient (A)	Vsal (V)	B _{int} (T)	H (A/m)	μ _r	P _{in} (W)	P _m (W)	P _{pm} (W)	χ
84	0.157	84	0.0006	375.75	1.337	0.141	0.726	0.867	0.337
268.8	0.4945	261.6	0.0020	1183.48	1.322	1.397	6.587	7.984	0.322
446.4	0.824	435.6	0.0033	1972.07	1.321	3.880	20.520	24.400	0.321
624	1.134	612	0.0046	2713.98	1.349	7.349	40.051	47.400	0.349
792	1.456	792	0.0060	3484.62	1.360	12.115	66.645	78.760	0.360
948	1.763	936	0.0070	4219.36	1.327	17.763	99.537	117.300	0.327
1020	1.877	996	0.0075	4492.19	1.326	20.134	116.366	136.500	0.326
1104	2.036	1080	0.0081	4872.73	1.326	23.690	132.510	156.200	0.326
1176	2.161	1152	0.0087	5171.89	1.332	26.688	156.212	182.900	0.332
1236	2.268	1212	0.0091	5427.97	1.336	29.396	183.104	212.500	0.336
808.8	0.1562	86.4	0.0006	373.83	1.383	0.139	0.666	0.806	0.383
272	0.4983	268	0.0020	1192.57	1.344	1.419	7.921	9.340	0.344
444	0.816	432	0.0032	1952.92	1.323	3.805	20.555	24.360	0.323
636	1.135	612	0.0046	2716.38	1.348	7.362	40.528	47.890	0.348
780	1.438	768	0.0058	3441.54	1.355	11.817	62.253	74.070	0.355
900	1.666	888	0.0067	3987.21	1.352	15.862	92.738	108.600	0.352
1008	1.851	984	0.0074	4429.97	1.329	19.580	102.920	122.500	0.329
1104	2.01	1068	0.0080	4810.50	1.328	23.088	141.112	164.200	0.328
1176	2.163	1152	0.0087	5176.67	1.331	26.737	164.163	190.900	0.331
1236	2.268	1212	0.0091	5427.97	1.336	29.396	183.104	212.500	0.336
Prueba N° N	Color: ROSA Im(m) = 0.26 A(m²) = 0.0000802			n ₁ =440 n ₂ =440 Alambre magneto # 30					
Vent (V)	Ient (A)	Vsal (V)	B _{int} (T)	H (A/m)	μ _r	P _{in} (W)	P _m (W)	P _{pm} (W)	χ
26.4	0.07311	26	0.0002	174.97	0.889	0.031	0.065	0.096	-0.111
98	0.2607	98	0.0007	623.93	0.940	0.388	0.483	0.871	-0.060
172	0.4624	168	0.0013	1106.65	0.908	1.222	1.775	2.997	-0.092
252	0.6729	246.4	0.0019	1610.44	0.915	2.588	3.846	6.434	-0.085
322	0.8645	313.6	0.0024	2068.99	0.907	4.271	5.438	9.709	-0.093
392	1.039	384	0.0029	2486.62	0.924	6.169	7.441	13.610	-0.076
464	1.225	456	0.0034	2931.77	0.930	8.576	14.314	22.890	-0.070
520	1.38	512	0.0038	3302.73	0.927	10.883	16.987	27.870	-0.073
592	1.578	584	0.0044	3776.60	0.925	14.230	24.360	38.590	-0.075
664	1.78	648	0.0049	4260.05	0.910	18.107	28.613	46.720	-0.090
27.2	0.07106	27.6	0.0002	170.07	0.971	0.029	0.039	0.068	-0.029
104.4	0.2607	104.4	0.0008	623.93	1.001	0.388	0.865	1.253	0.001
176.4	0.4554	172.8	0.0013	1089.90	0.948	1.185	2.088	3.273	-0.052
256	0.6562	256	0.0019	1570.47	0.975	2.461	3.451	5.912	-0.025
320	0.8349	320	0.0024	1998.15	0.958	3.984	6.556	10.540	-0.042
400	1.047	400	0.0030	2505.77	0.955	6.265	10.415	16.680	-0.045
472	1.241	464	0.0035	2970.07	0.935	8.801	15.039	23.840	-0.065
544	1.425	536	0.0040	3410.43	0.940	11.605	19.905	22.510	-0.060
616	1.604	600	0.0045	3838.83	0.935	14.703	25.747	40.450	-0.065

664	1.78	648	0.0049	4260.05	0.910	18.107	28.613	46.720	-0.090
Prueba N° N	Color: VERDE Im(m) = 0.36 A(m²) = 0.0000802			n ₁ =440 n ₂ =440 Alambre magneto # 30					
Vent (V)	Ient (A)	Vsal (V)	B _{int} (T)	H (A/m)	μ _r	P _{in} (W)	P _m (W)	P _{pm} (W)	χ
84	0.1505	84	0.0006	360.19	1.395	0.129	0.588	0.718	0.395
252	0.4702	248	0.0019	1125.32	1.318	1.263	6.835	8.098	0.318
412	0.7892	400	0.0030	1888.78	1.267	3.559	16.501	20.060	0.267
564	1.051	552	0.0041	2515.34	1.313	6.313	27.567	33.880	0.313
684	1.296	672	0.0051	3101.70	1.296	9.599	50.011	59.610	0.296
804	1.533	780	0.0059	3668.91	1.272	13.430	63.840	77.270	0.272
924	1.772	900	0.0068	4240.90	1.269	17.944	85.956	103.900	0.269
1008	1.949	984	0.0074	4664.51	1.262	21.708	113.092	134.800	0.262
1104	2.135	1080	0.0081	5109.66	1.264	26.049	127.351	153.400	0.264
1176	2.282	1140	0.0086	5461.48	1.249	29.760	134.140	163.900	0.249
82.8	0.1495	79.2	0.0006	357.80	1.324	0.128	0.563	0.691	0.324
252	0.4704	256	0.0019	1125.80	1.360	1.265	5.245	6.510	0.360
416	0.7862	416	0.0031	1881.60	1.323	3.532	18.678	22.210	0.323
560	1.083	552	0.0041	2591.93	1.274	6.703	33.787	40.490	0.274
696	1.302	672	0.0051	3116.06	1.290	9.688	44.272	53.960	0.290
816	1.562	780	0.0059	3738.31	1.248	13.943	70.677	84.620	0.248
936	1.797	900	0.0068	4300.73	1.252	18.454	95.946	114.400	0.252
1020	1.968	984	0.0074	4709.98	1.250	22.134	100.466	122.600	0.250
1104	2.15	1080	0.0081	5145.56	1.256	26.417	119.683	146.100	0.256
1176	2.282	1140	0.0086	5461.48	1.249	29.760	134.140	163.900	0.249
Prueba N° N	Color: VINO Im(m) = 0.26 A(m²) = 0.0000802			n ₁ =440 n ₂ =440 Alambre magneto # 30					
Vent (V)	Ient (A)	Vsal (V)	B _{int} (T)	H (A/m)	μ _r	P _{in} (W)	P _m (W)	P _{pm} (W)	χ
64	0.1456	60.8	0.0005	348.46	1.044	0.121	0.533	0.654	0.044
204	0.4551	194.4	0.0015	1089.18	1.068	1.184	5.009	6.193	0.068
332	0.745	320.4	0.0024	1783.00	1.075	3.172	13.548	16.720	0.075
468	1.016	456	0.0034	2431.58	1.122	5.899	21.421	27.320	0.122
564	1.225	552	0.0041	2931.77	1.126	8.576	34.324	42.900	0.126
660	1.437	636	0.0048	3439.15	1.106	11.801	48.929	60.730	0.106
720	1.571	696	0.0052	3759.85	1.107	14.104	52.856	66.960	0.107
816	1.8	792	0.0060	4307.91	1.100	18.516	70.434	88.950	0.100
912	2.011	888	0.0067	4812.90	1.104	23.111	96.689	119.800	0.104
960	2.137	948	0.0071	5114.45	1.109	26.098	103.502	129.600	0.109
62.4	0.1439	58.8	0.0004	344.39	1.021	0.118	0.553	0.671	0.021
208	0.4617	200	0.0015	1104.98	1.083	1.218	5.162	6.380	0.083
336	0.7446	320	0.0024	1782.04	1.074	3.168	13.612	16.780	0.074
464	1.006	448	0.0034	2407.64	1.113	5.784	20.966	26.750	0.113
564	1.234	552	0.0041	2953.31	1.118	8.702	36.018	44.720	0.118
660	1.428	636	0.0048	3417.61	1.113	11.654	43.756	55.410	0.113
720	1.588	708	0.0053	3800.54	1.114	14.411	59.029	73.440	0.114
816	1.807	804	0.0060	4324.67	1.112	18.660	75.900	94.560	0.112
912	2.029	900	0.0068	4855.97	1.109	23.527	97.773	121.300	0.109
960	2.137	948	0.0071	5114.45	1.109	26.098	103.502	129.600	0.109
Prueba N° N	Color: VERDE OLIVO Im(m) = 0.26 A(m²) = 0.0000802			n ₁ =440 n ₂ =440 Alambre magneto # 30					
Vent (V)	Ient (A)	Vsal (V)	B _{int} (T)	H (A/m)	μ _r	P _{in} (W)	P _m (W)	P _{pm} (W)	χ

78	0.1485	76	0.0006	355.40	1.279	0.126	0.611	0.737	0.279
240	0.4658	236	0.0018	1114.79	1.266	1.240	5.479	6.719	0.266
396	0.7413	384	0.0029	1774.14	1.295	3.140	14.870	18.010	0.295
540	0.9936	516	0.0039	2377.97	1.298	5.642	26.518	32.160	0.298
660	1.243	636	0.0048	2974.85	1.279	8.830	38.040	46.870	0.279
768	1.461	756	0.0057	3496.59	1.293	12.198	53.852	66.050	0.293
840	1.595	828	0.0062	3817.29	1.297	14.539	67.501	82.040	0.297
952	1.69	924	0.0069	4044.65	1.367	16.322	83.778	100.100	0.367
1080	1.768	980	0.0074	4231.33	1.385	17.864	88.336	106.200	0.385
1064	1.903	1036	0.0078	4554.42	1.361	20.696	109.604	130.300	0.361
76	0.1405	76	0.0006	336.26	1.352	0.113	0.511	0.624	0.352
240	0.4472	232	0.0017	1070.28	1.297	1.143	6.159	7.302	0.297
396	0.733	396	0.0030	1754.28	1.350	3.071	12.509	15.580	0.350
540	0.9612	516	0.0039	2300.43	1.342	5.280	25.140	30.420	0.342
660	1.199	648	0.0049	2869.55	1.351	8.216	36.524	44.740	0.351
756	1.377	744	0.0056	3295.55	1.350	10.836	46.474	57.310	0.350
840	1.565	816	0.0061	3745.49	1.303	13.997	74.893	88.890	0.303
912	1.704	900	0.0068	4078.16	1.320	16.594	90.706	107.300	0.320
960	1.779	948	0.0071	4257.65	1.332	18.087	103.213	121.300	0.332
1064	1.903	1036	0.0078	4554.42	1.361	20.696	109.604	130.300	0.361

f (kHz) = 800

Prueba N° N									
Color: AZUL Im(m) = 0.26 A(m²) = 0.0000802									
n ₁ =440 n ₂ =440 Alambre magneto # 30									
Vent (V)	Ient (A)	Vsal (V)	B _{int} (T)	H (A/m)	μ _r	P _{ca} (W)	P _{ma} (W)	P _{pm} (W)	χ
26.4	0.02786	26.2	0.0001	66.68	1.763	0.005	0.045	0.050	0.763
110	0.1154	109	0.0006	276.19	1.771	0.082	0.804	0.886	0.771
188	0.195	185	0.0010	466.69	1.778	0.235	2.410	2.645	0.778
265.6	0.28	260.8	0.0015	670.12	1.746	0.484	4.654	5.139	0.746
336	0.3568	331.2	0.0019	853.92	1.740	0.787	8.824	9.611	0.740
424	0.449	420	0.0024	1074.58	1.753	1.246	13.394	14.640	0.753
496	0.5308	500	0.0028	1270.36	1.766	1.741	17.769	19.510	0.766
520	0.5617	516	0.0029	1344.31	1.722	1.950	19.610	21.560	0.722
584	0.6309	572	0.0032	1599.92	1.700	2.460	25.700	28.160	0.700
624	0.6709	612	0.0035	1605.65	1.710	2.781	28.339	31.120	0.710
33.6	0.03213	32.4	0.0002	76.90	1.890	0.006	0.029	0.035	0.890
105.6	0.1092	104.4	0.0006	261.35	1.792	0.074	0.715	0.788	0.792
188	0.1955	186	0.0010	467.89	1.783	0.236	2.421	2.657	0.783
268	0.2828	262	0.0015	676.82	1.737	0.494	5.356	5.850	0.737
348	0.3669	342	0.0019	878.10	1.747	0.832	8.647	9.479	0.747
408	0.4487	406	0.0023	1073.87	1.696	1.244	12.456	13.700	0.696
484	0.5342	478	0.0027	1278.49	1.677	1.763	18.437	20.200	0.677
528	0.5744	524	0.0030	1374.70	1.710	2.039	20.551	22.590	0.710
592	0.6384	588	0.0033	1527.87	1.727	2.518	25.792	28.310	0.727
624	0.6709	612	0.0035	1605.65	1.710	2.781	28.339	31.120	0.710

Prueba N° N									
Color: CAFFÉ Im(m) = 0.26 A(m²) = 0.0000802									
n ₁ =440 n ₂ =440 Alambre magneto # 30									
Vent (V)	Ient (A)	Vsal (V)	B _{int} (T)	H (A/m)	μ _r	P _{ca} (W)	P _{ma} (W)	P _{pm} (W)	χ
42.4	0.0505	44.8	0.0003	120.86	1.663	0.016	0.140	0.156	0.663
126	0.1447	124.8	0.0007	346.31	1.617	0.129	1.127	1.256	0.617
193.2	0.2302	189.6	0.0011	550.93	1.544	0.327	3.092	3.419	0.544

256	0.3045	252	0.0014	728.76	1.551	0.573	5.240	5.813	0.551
316	0.379	313.2	0.0018	907.05	1.549	0.888	8.235	9.123	0.549
364	0.4427	360	0.0020	1059.51	1.524	1.211	11.259	12.470	0.524
420	0.4912	408	0.0023	1175.58	1.557	1.491	13.149	14.640	0.557
456	0.541	444	0.0025	1294.77	1.538	1.809	16.421	18.230	0.538
516	0.6055	504	0.0028	1449.13	1.560	2.265	21.135	23.400	0.560
552	0.6598	552	0.0031	1579.09	1.568	2.690	24.470	27.160	0.568
42	0.0472	43.2	0.0002	112.96	1.716	0.014	0.123	0.137	0.716
124	0.1432	128	0.0007	342.72	1.676	0.127	1.156	1.283	0.676
192	0.2265	192	0.0011	542.08	1.589	0.317	2.980	3.297	0.589
252	0.2971	252	0.0014	711.04	1.590	0.545	5.170	5.715	0.590
308	0.3707	308	0.0017	887.19	1.557	0.849	7.769	8.618	0.557
356	0.4312	356	0.0020	1031.98	1.548	1.149	10.341	11.490	0.548
420	0.4919	408	0.0023	1177.26	1.555	1.495	13.855	15.350	0.555
456	0.5496	468	0.0026	1315.35	1.596	1.866	17.144	19.010	0.596
504	0.6022	504	0.0028	1441.24	1.569	2.241	21.039	23.280	0.569
552	0.6598	552	0.0031	1579.09	1.568	2.690	24.470	27.160	0.568

Prueba N° N									
Color: GRIS Im(m) = 0.26 A(m²) = 0.0000802									
n ₁ =440 n ₂ =440 Alambre magneto # 30									
Vent (V)	Ient (A)	Vsal (V)	B _{int} (T)	H (A/m)	μ _r	P _{ca} (W)	P _{ma} (W)	P _{pm} (W)	χ
28.08	0.04354	27.9	0.0002	104.20	1.201	0.012	0.082	0.094	0.201
108	0.1645	106.4	0.0006	393.70	1.212	0.167	1.243	1.410	0.212
185.6	0.2854	183.2	0.0010	683.04	1.203	0.503	3.467	3.970	0.203
274.4	0.4127	264.6	0.0015	987.71	1.202	1.052	8.211	9.263	0.202
352	0.5428	342	0.0019	1299.07	1.181	1.821	12.559	14.380	0.181
432	0.6845	426	0.0024	1638.20	1.167	2.895	19.855	22.750	0.167
504	0.777	500	0.0028	1859.58	1.206	3.731	26.289	30.020	0.206
568	0.8875	556	0.0031	2124.04	1.174	4.867	33.353	38.220	0.174
608	0.9411	596	0.0034	2252.32	1.187	5.473	38.327	43.800	0.187
664	1.041	660	0.0037	2491.41	1.188	6.696	47.414	54.110	0.188
29.6	0.04502	29.2	0.0002	107.75	1.216	0.013	0.093	0.106	0.216
110	0.1648	109.2	0.0006	394.41	1.242	0.168	1.164	1.332	0.242
190.8	0.283	189	0.0011	677.30	1.252	0.495	3.825	4.320	0.252
273.6	0.4135	268.2	0.0015	989.62	1.216	1.057	8.044	9.101	0.216
360	0.5327	364	0.0021	1274.90	1.281	1.753	12.057	13.810	0.281
440	0.6658	436	0.0025	1593.45	1.228	2.739	19.391	22.130	0.228
496	0.7628	492	0.0028	1825.60	1.209	3.595	24.155	27.750	0.209
568	0.8892	564	0.0032	2128.11	1.189	4.886	33.634	38.520	0.189
624	0.9634	612	0.0035	2305.69	1.191	5.735	39.085	44.820	0.191
664	1.041	660	0.0037	2491.41	1.188	6.696	47.414	54.110	0.188

Prueba N° N									
Color: MORADO Im(m) = 0.26 A(m²) = 0.0000802									
n ₁ =440 n ₂ =440 Alambre magneto # 30									
Vent (V)	Ient (A)	Vsal (V)	B _{int} (T)	H (A/m)	μ _r	P _{ca} (W)	P _{ma} (W)	P _{pm} (W)	χ
30.4	0.03573	31	0.0002	85.51	1.626	0.008	0.017	0.025	0.626
102.4	0.1088	101.6	0.0006	260.39	1.751	0.073	0.732	0.805	0.751
182.4	0.1939	178.4	0.0010	464.06	1.725	0.232	2.341	2.573	0.725
264	0.2747	258	0.0015	657.44	1.761	0.466	4.916	5.382	0.761
336	0.3573	329.4	0.0019	855.12	1.728	0.789	8.412	9.201	0.728
396	0.4338	390.6	0.0022	1038.21	1.688	1.163	12.267	13.430	0.688
468	0.5088	468	0.0026	1217.70	1.724	1.600	15.230	16.830	0.724
528	0.5633	516	0.0029	1348.14	1.717	1.961	18.609	20.570	0.717

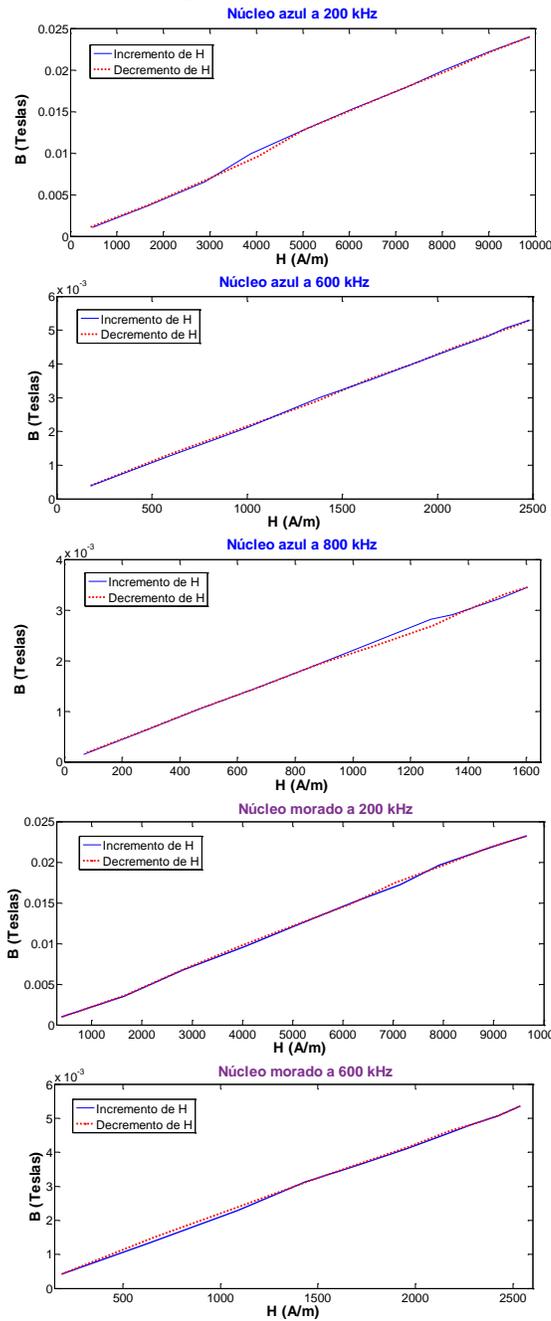
576	0.6127	556	0.0031	1466.37	1.701	2.320	24.070	26.390	0.701
612	0.6706	612	0.0035	1604.94	1.711	2.779	27.201	29.980	0.711
36	0.0309	32.2	0.0002	73.95	1.953	0.006	0.054	0.060	0.953
104	0.1082	102.2	0.0006	258.95	1.771	0.072	0.716	0.788	0.771
204	0.1978	196	0.0011	473.39	1.857	0.242	2.302	2.544	0.857
288	0.2943	276	0.0016	704.34	1.758	0.535	5.262	5.797	0.758
348	0.37	348	0.0020	885.52	1.763	0.846	8.167	9.013	0.763
420	0.4506	420	0.0024	1078.41	1.747	1.255	15.485	16.740	0.747
492	0.5264	484	0.0027	1259.82	1.724	1.712	17.678	19.390	0.724
516	0.5554	508	0.0029	1329.23	1.715	1.906	19.494	21.400	0.715
564	0.6143	556	0.0031	1470.19	1.697	2.332	23.768	26.100	0.697
612	0.6706	612	0.0035	1604.94	1.711	2.779	27.201	29.980	0.711
Probeta N° N	Color: NEGRO Im(m) = 0.26 A(m²) = 0.0000802			n _c =440 n _e =440 Alambre magneto # _30_					
Vent (V)	Ient (A)	Vsal (V)	B _{max} (T)	H (A/m)	μ _r	P _{in} (W)	P _m (W)	P _{max} (W)	χ
28.8	0.03705	29.6	0.0002	88.67	1.498	0.008	0.065	0.074	0.498
99.6	0.1385	98.4	0.0006	331.47	1.332	0.119	0.999	1.118	0.332
184.8	0.2481	181.2	0.0010	593.77	1.369	0.380	3.150	3.530	0.369
256.8	0.3537	253.2	0.0014	846.50	1.342	0.773	6.077	6.850	0.342
338.4	0.4751	333	0.0019	1137.05	1.314	1.395	10.695	12.090	0.314
408	0.5718	414	0.0023	1368.48	1.357	2.020	15.530	17.550	0.357
492	0.6701	474	0.0027	1603.74	1.326	2.775	21.605	24.380	0.326
528	0.7174	522	0.0029	1716.94	1.364	3.180	24.910	28.090	0.364
588	0.8148	582	0.0033	1950.05	1.339	4.102	31.048	35.150	0.339
636	0.8771	630	0.0036	2099.15	1.346	4.754	37.796	42.550	0.346
27.6	0.03618	27	0.0002	86.59	1.399	0.008	0.066	0.074	0.399
100.8	0.1343	99.4	0.0006	321.42	1.387	0.111	0.885	0.997	0.387
180	0.2439	178	0.0010	583.72	1.368	0.368	3.055	3.423	0.368
264	0.3636	258	0.0015	870.20	1.330	0.817	6.367	7.184	0.330
336	0.4776	330	0.0019	1143.03	1.295	1.409	10.851	12.260	0.295
408	0.5742	402	0.0023	1374.22	1.312	2.037	15.423	17.460	0.312
492	0.6667	474	0.0027	1595.60	1.333	2.747	21.443	24.190	0.333
525	0.7478	546	0.0031	1789.70	1.369	3.455	25.935	29.390	0.369
576	0.7959	570	0.0032	1904.82	1.343	3.914	32.446	36.360	0.343
636	0.8771	630	0.0036	2099.15	1.346	4.754	37.796	42.550	0.346
Probeta N° N	Color: ROSA Im(m) = 0.26 A(m²) = 0.0000802			n _c =440 n _e =440 Alambre magneto # _30_					
Vent (V)	Ient (A)	Vsal (V)	B _{max} (T)	H (A/m)	μ _r	P _{in} (W)	P _m (W)	P _{max} (W)	χ
68.4	0.126	64.2	0.0004	301.55	0.955	0.098	0.567	0.665	-0.045
244.8	0.445	234	0.0013	1065.01	0.986	1.224	7.064	8.288	-0.014
396	0.7378	382.4	0.0022	1765.77	0.972	3.364	19.556	22.920	-0.028
552	0.9935	534	0.0030	2377.73	1.008	6.099	32.711	38.810	0.008
672	1.222	642	0.0036	2924.59	0.985	9.227	53.173	62.400	-0.015
780	1.432	750	0.0042	3427.18	0.982	12.671	72.159	84.830	-0.018
828	1.504	786	0.0044	3599.50	0.980	13.977	90.123	104.100	-0.020
864	1.574	834	0.0047	3767.03	0.993	15.309	103.291	118.600	-0.007
912	1.661	882	0.0050	3975.25	0.995	17.048	114.552	131.600	-0.005
960	1.748	930	0.0052	4183.46	0.997	18.880	140.020	158.900	-0.003
96	0.1478	90	0.0005	353.73	1.141	0.135	0.399	0.534	0.141
264	0.4544	258	0.0015	1087.51	1.064	1.276	6.685	7.961	0.064
420	0.7408	414	0.0023	1772.95	1.048	3.391	17.769	21.160	0.048

564	0.9997	534	0.0030	2392.57	1.001	6.175	33.595	39.770	0.001
672	1.217	654	0.0037	2912.63	1.007	9.152	49.788	58.940	0.007
768	1.416	738	0.0042	3388.89	0.977	12.389	71.971	84.360	-0.023
828	1.505	798	0.0045	3601.89	0.994	13.996	90.004	104.000	-0.006
864	1.581	834	0.0047	3783.78	0.989	15.445	107.355	122.800	-0.011
912	1.664	882	0.0050	3982.43	0.994	17.109	121.091	138.200	-0.006
960	1.748	930	0.0052	4183.46	0.997	18.880	140.020	158.900	-0.003
Probeta N° N	Color: VERDE Im(m) = 0.26 A(m²) = 0.0000802			n _c =440 n _e =440 Alambre magneto # _30_					
Vent (V)	Ient (A)	Vsal (V)	B _{max} (T)	H (A/m)	μ _r	P _{in} (W)	P _m (W)	P _{max} (W)	χ
58.8	0.07754	54.6	0.0003	185.58	1.320	0.037	0.265	0.302	0.320
162.4	0.2288	152.6	0.0009	547.58	1.250	0.323	2.292	2.615	0.250
243.6	0.3513	236.6	0.0013	840.76	1.263	0.763	5.518	6.281	0.263
324	0.4555	316	0.0018	1090.14	1.300	1.282	8.998	10.280	0.300
384	0.5527	378	0.0021	1322.77	1.282	1.888	13.492	15.380	0.282
444	0.6243	426	0.0024	1494.13	1.279	2.408	17.392	19.800	0.279
492	0.7088	474	0.0027	1696.36	1.254	3.104	22.046	25.150	0.254
540	0.785	522	0.0029	1878.73	1.247	3.808	26.842	30.650	0.247
576	0.8561	570	0.0032	2048.89	1.248	4.529	31.761	36.290	0.248
636	0.9221	606	0.0034	2206.85	1.232	5.254	36.656	41.910	0.232
56	0.07687	58	0.0003	183.97	1.414	0.037	0.254	0.291	0.414
160	0.2254	154	0.0009	539.45	1.281	0.314	2.251	2.565	0.281
244	0.3512	238	0.0013	840.52	1.270	0.762	5.561	6.323	0.270
312	0.4578	310	0.0017	1095.65	1.269	1.295	9.455	10.750	0.269
372	0.5474	366	0.0021	1310.08	1.253	1.852	13.498	15.530	0.253
432	0.6235	426	0.0024	1492.21	1.281	2.402	16.988	19.390	0.281
492	0.71	474	0.0027	1699.23	1.251	3.115	22.065	25.180	0.251
540	0.7959	522	0.0029	1900.03	1.233	3.895	28.735	32.650	0.233
588	0.8678	570	0.0032	2076.89	1.231	4.653	33.107	37.760	0.231
636	0.9221	606	0.0034	2206.85	1.232	5.254	36.656	41.910	0.232
Probeta N° N	Color: VINO Im(m) = 0.26 A(m²) = 0.0000802			n _c =440 n _e =440 Alambre magneto # _30_					
Vent (V)	Ient (A)	Vsal (V)	B _{max} (T)	H (A/m)	μ _r	P _{in} (W)	P _m (W)	P _{max} (W)	χ
40.8	0.06802	39.6	0.0002	162.79	1.091	0.029	0.172	0.200	0.091
141.6	0.2507	138	0.0008	600.00	1.032	0.388	2.248	2.636	0.032
252	0.4342	238	0.0013	1039.16	1.028	1.165	6.412	7.577	0.028
360	0.6332	352	0.0020	1515.43	1.042	2.477	15.093	17.570	0.042
464	0.8095	448	0.0025	1937.36	1.037	4.049	23.721	27.770	0.037
552	0.9911	536	0.0030	2371.98	1.014	6.070	36.750	42.820	0.014
632	1.153	616	0.0035	2759.46	1.001	8.215	49.885	58.100	0.001
688	1.253	672	0.0038	2998.79	1.005	9.701	56.769	66.470	0.005
768	1.393	744	0.0042	3333.85	1.001	11.990	71.910	83.900	0.001
848	1.522	804	0.0045	3642.58	0.990	14.314	85.456	99.770	-0.010
44	0.06765	44	0.0002	161.91	1.219	0.028	0.149	0.177	0.219
148	0.253	144	0.0008	605.50	1.067	0.396	2.299	2.695	0.067
240	0.4241	236	0.0013	1014.99	1.043	1.111	6.292	7.403	0.043
348	0.6241	340	0.0019	1493.65	1.021	2.407	14.783	17.190	0.021
444	0.792	424	0.0024	1895.48	1.004	3.876	24.624	28.500	0.004
560	0.9946	540	0.0030	2380.36	1.018	6.113	37.417	43.530	0.018
640	1.159	624	0.0035	2773.82	1.009	8.300	49.970	58.270	0.009
704	1.265	672	0.0038	3027.50	0.996	9.888	57.752	67.640	-0.004

784	1.377	744	0.0042	3295.55	1.013	11.716	70.764	82.480	0.013
848	1.522	804	0.0045	3642.58	0.990	14.314	85.456	99.770	-0.010
Probeta N° N_	Color: VERDE OLIVO lm(m) = 0.26 A(m²) = 0.0000802			n ₁ =440 n ₂ =440 Alambre magnético # 30					
Vent (V)	Ient (A)	Vsal (V)	B _{max} (T)	H (A/m)	μ_r	P _{ca} (W)	P _{at} (W)	P _{pm} (W)	χ
51.2	0.07578	49.2	0.0003	181.36	1.217	0.035	0.261	0.296	0.217
153.6	0.2244	146.4	0.0008	537.05	1.223	0.311	2.242	2.553	0.223
249.6	0.3613	238.8	0.0013	864.69	1.239	0.807	5.836	6.643	0.239
326.4	0.4762	321.6	0.0018	1139.68	1.266	1.401	10.399	11.800	0.266
392	0.5771	388	0.0022	1381.16	1.260	2.058	14.232	16.290	0.260
448	0.6611	444	0.0025	1582.20	1.259	2.701	19.909	22.610	0.259
504	0.7509	500	0.0028	1797.12	1.248	3.484	24.606	28.090	0.248
560	0.8371	548	0.0031	2003.42	1.227	4.330	30.980	35.310	0.227
616	0.9138	596	0.0034	2186.98	1.223	5.160	37.140	42.300	0.223
648	0.9738	636	0.0036	2330.58	1.224	5.860	42.470	48.330	0.224
56	0.07487	51.8	0.0003	179.19	1.297	0.035	0.223	0.258	0.297
168	0.2279	164	0.0009	545.43	1.349	0.321	2.169	2.490	0.349
256	0.355	252	0.0014	849.62	1.331	0.779	5.242	6.021	0.331
328	0.4751	332	0.0019	1137.05	1.310	1.395	9.995	11.390	0.310
392	0.5715	388	0.0022	1367.76	1.273	2.018	13.962	15.980	0.273
448	0.6621	444	0.0025	1584.59	1.257	2.709	20.691	23.400	0.257
504	0.7443	492	0.0028	1781.32	1.239	3.423	23.917	27.340	0.239
560	0.8373	548	0.0031	2003.90	1.227	4.332	31.848	36.180	0.227
608	0.9089	588	0.0033	2175.26	1.213	5.105	38.255	43.360	0.213
648	0.9738	636	0.0036	2330.58	1.224	5.860	42.470	48.330	0.224

APÉNDICE E. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS A ALTA FRECUENCIA

Representación gráfica



Descripción y/u observación

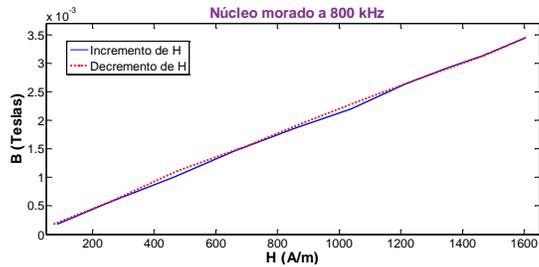
Gráfica E.1. B - H en incremento y decremento de H para el núcleo azul a 200 kHz.

Gráfica E.2. B - H en incremento y decremento de H para el núcleo azul a 600 kHz.

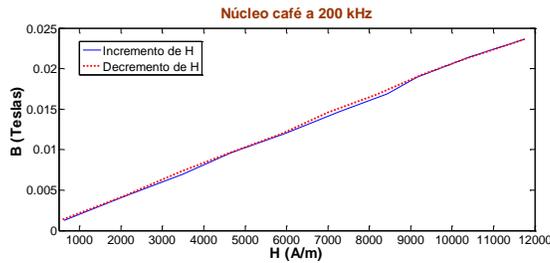
Gráfica E.3. B - H en incremento y decremento de H para el núcleo azul a 800 kHz.

Gráfica E.4. B - H en incremento y decremento de H para el núcleo morado a 200 kHz.

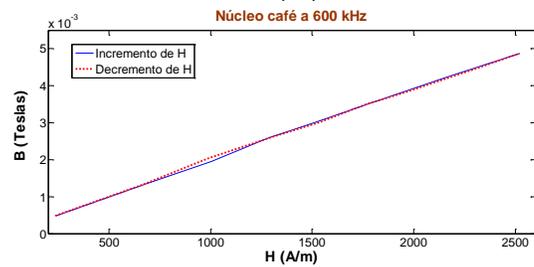
Gráfica E.5. B - H en incremento y decremento de H para el núcleo morado a 600 kHz.



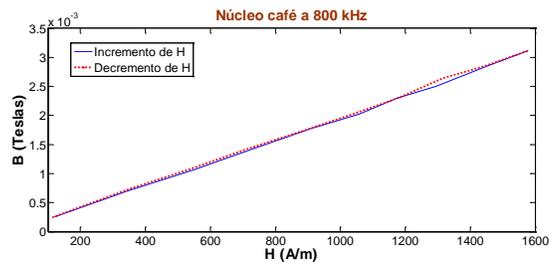
Gráfica E.6. B - H en incremento y decremento de H para el núcleo morado a 800 kHz.



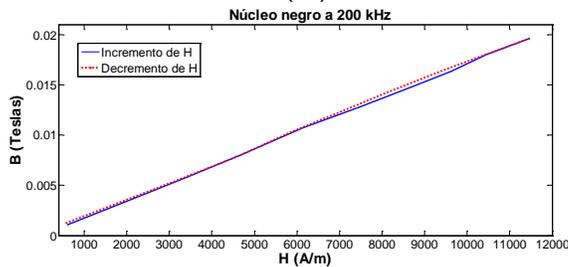
Gráfica E.7. B - H en incremento y decremento de H para el núcleo café a 200 kHz.



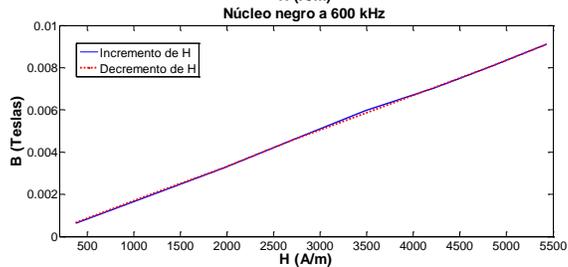
Gráfica E.8. B - H en incremento y decremento de H para el núcleo café a 600 kHz.



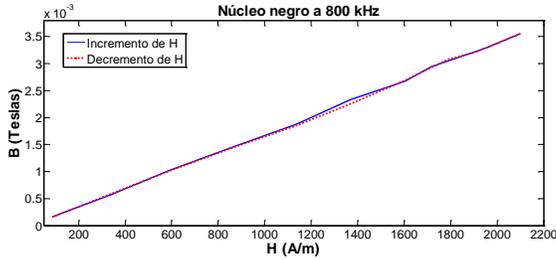
Gráfica E.9. B - H en incremento y decremento de H para el núcleo café a 800 kHz.



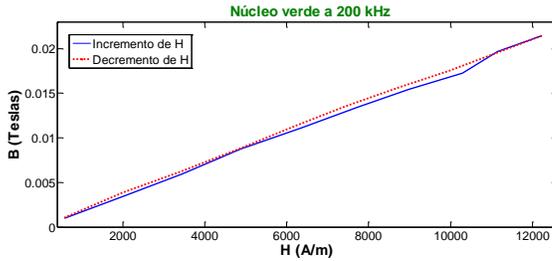
Gráfica E.10. B - H en incremento y decremento de H para el núcleo negro a 200 kHz.



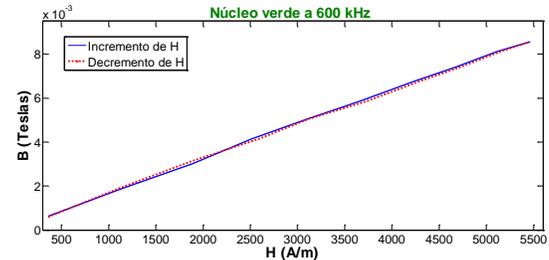
Gráfica E.11. B - H en incremento y decremento de H para el núcleo negro a 600 kHz.



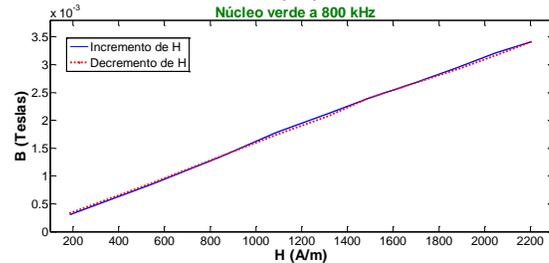
Gráfica E.12. $B-H$ en incremento y decremento de H para el núcleo negro a 800 kHz.



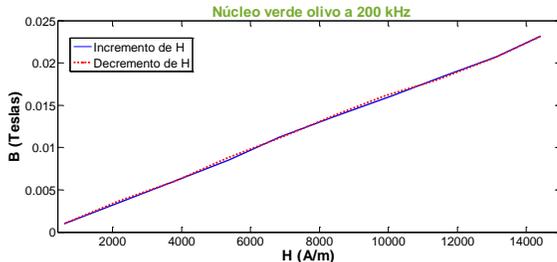
Gráfica E.13. $B-H$ en incremento y decremento de H para el núcleo verde a 200 kHz.



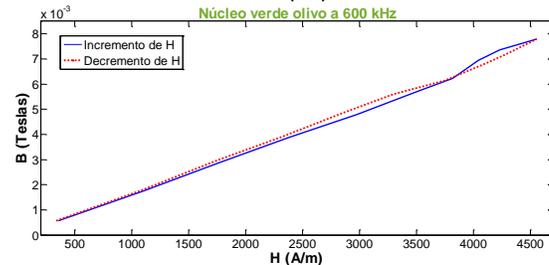
Gráfica E.14. $B-H$ en incremento y decremento de H para el núcleo verde a 600 kHz.



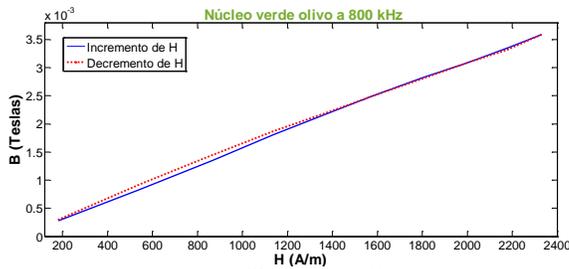
Gráfica E.15. $B-H$ en incremento y decremento de H para el núcleo verde a 800 kHz.



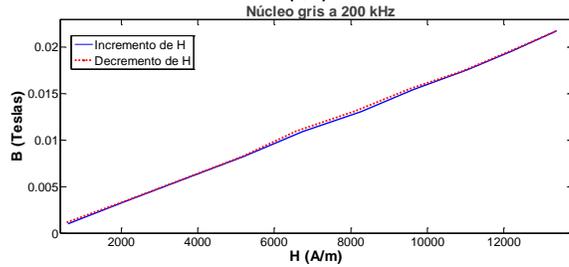
Gráfica E.16. $B-H$ en incremento y decremento de H para el núcleo verde olivo a 200 kHz.



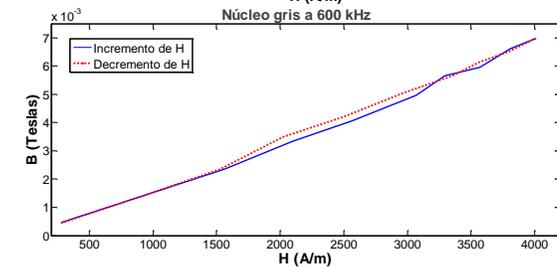
Gráfica E.17. $B-H$ en incremento y decremento de H para el núcleo verde olivo a 600 kHz.



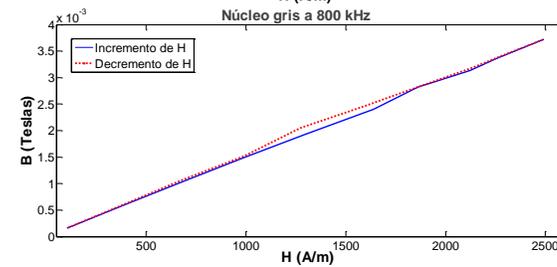
Gráfica E.18. $B-H$ en incremento y decremento de H para el núcleo verde olivo a 800 kHz.



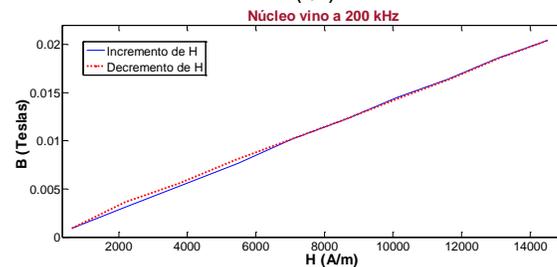
Gráfica E.19. $B-H$ en incremento y decremento de H para el núcleo gris a 200 kHz.



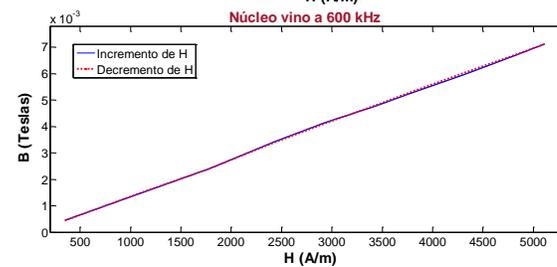
Gráfica E.20. $B-H$ en incremento y decremento de H para el núcleo gris a 600 kHz.



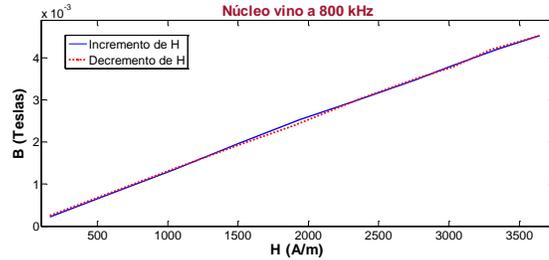
Gráfica E.21. $B-H$ en incremento y decremento de H para el núcleo gris a 800 kHz.



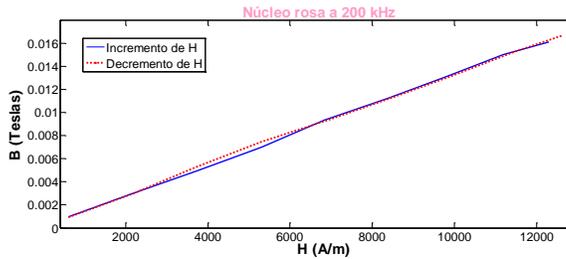
Gráfica E.22. $B-H$ en incremento y decremento de H para el núcleo vino a 200 kHz.



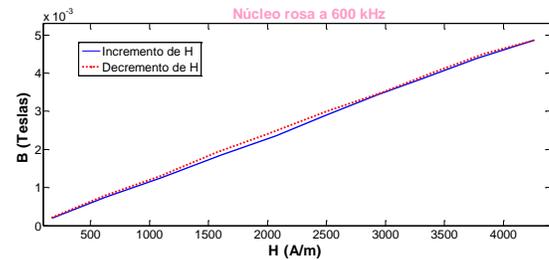
Gráfica E.23. $B-H$ en incremento y decremento de H para el núcleo vino a 600 kHz.



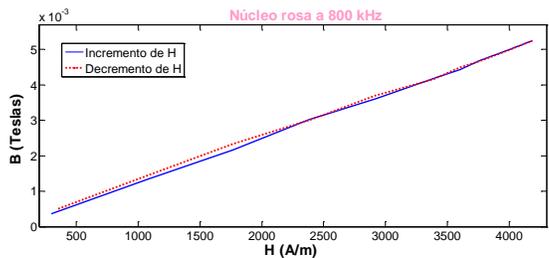
Gráfica E.24. $B-H$ en incremento y decremento de H para el núcleo vino a 800 kHz.



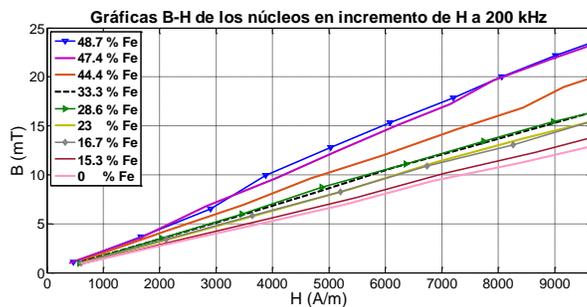
Gráfica E.25. $B-H$ en incremento y decremento de H para el núcleo rosa a 200 kHz.



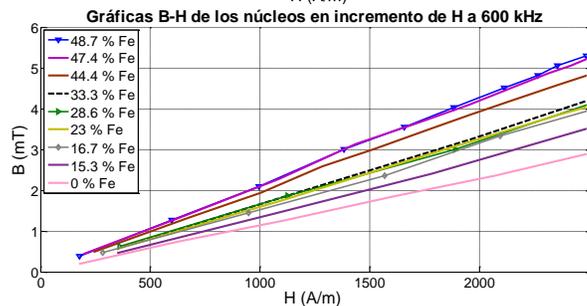
Gráfica E.26. $B-H$ en incremento y decremento de H para el núcleo rosa a 600 kHz.



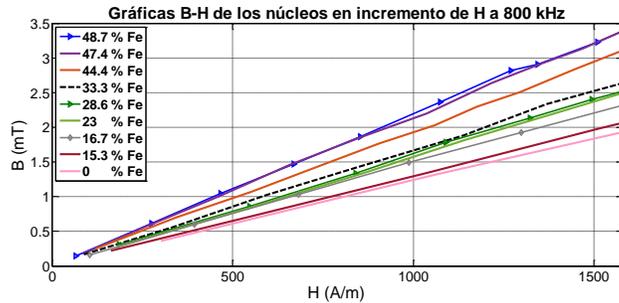
Gráfica E.27. $B-H$ en incremento y decremento de H para el núcleo rosa a 800 kHz.



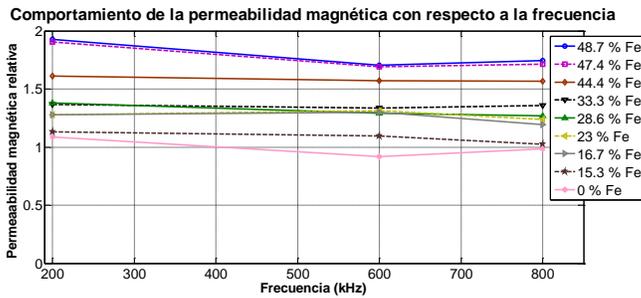
Gráfica E.28. $B-H$ de todos los núcleos en incremento de H a 200 kHz.



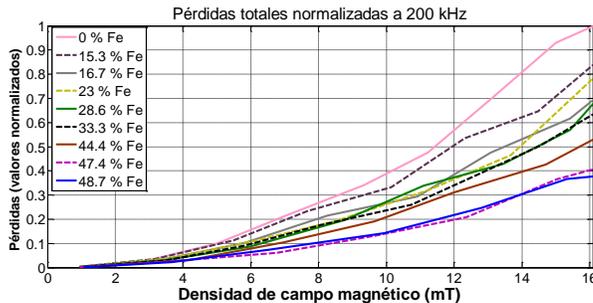
Gráfica E.29. $B-H$ de todos los núcleos en incremento de H a 600 kHz.



Gráfica E.30. B-H de todos los núcleos en incremento de H a 800 kHz.

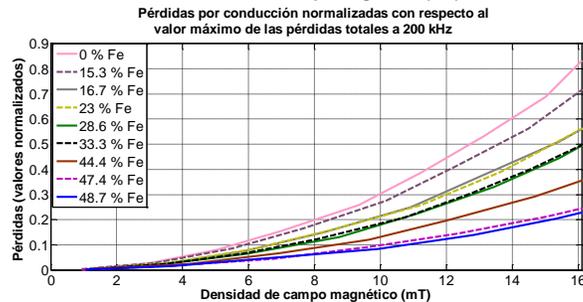


Gráfica E.31. Comportamiento de la permeabilidad magnética con respecto a la frecuencia.



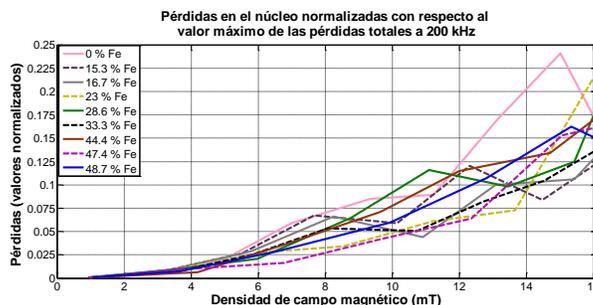
Gráfica E.32. Pérdidas totales normalizadas a 200 kHz.

En esta frecuencia se observó una correlación negativa entre la cantidad de Fe en las muestras y las pérdidas totales.



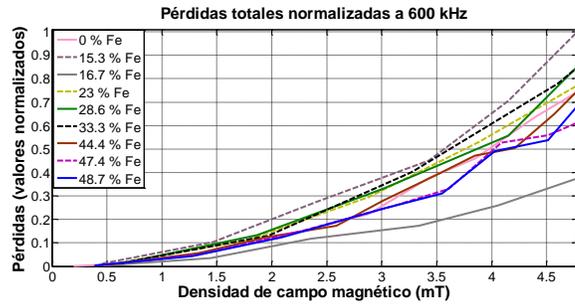
Gráfica E.33. Pérdidas por conducción a 200 kHz.

También se observó una correlación negativa entre la cantidad de Fe en las muestras y las pérdidas por conducción. A esta frecuencia las pérdidas dominantes fueron por conducción.



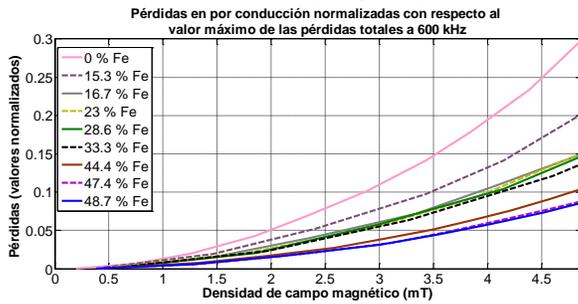
Gráfica E.34. Pérdidas en el núcleo a 200 kHz.

A esta frecuencia no se observó relación entre las pérdidas en el núcleo y la cantidad de Fe en la muestra.



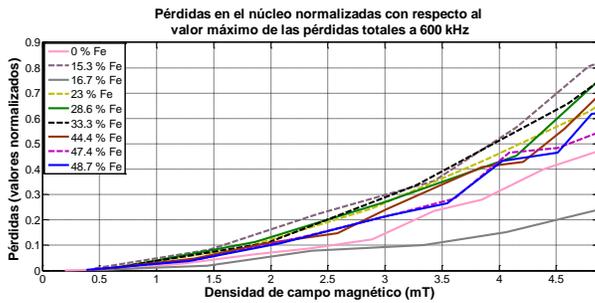
Gráfica E.35. Pérdidas totales normalizadas a 600 kHz.

A esta frecuencia no se observó relación entre las pérdidas totales y la cantidad de Fe en la muestra.



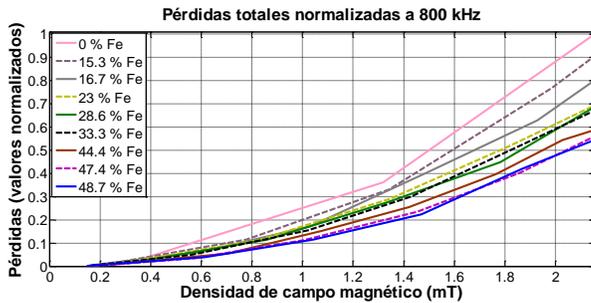
Gráfica E.36. Pérdidas por conducción a 600 kHz.

En esta frecuencia se observó una correlación negativa entre la cantidad de Fe en las muestras y las pérdidas por conducción.



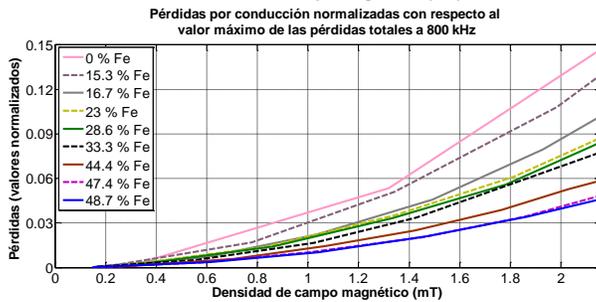
Gráfica E.37. Pérdidas en el núcleo a 600 kHz.

A esta frecuencia no se observó relación entre las pérdidas en el núcleo y la cantidad de Fe en la muestra. Las pérdidas dominantes fueron en el núcleo.



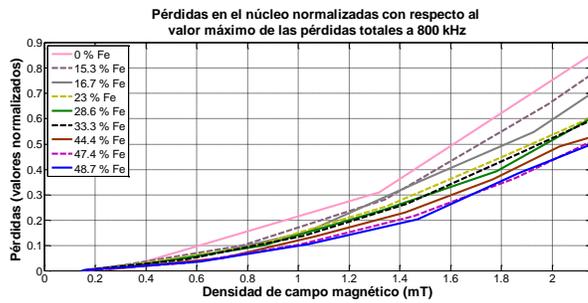
Gráfica E.38. pérdidas totales normalizadas a 800 kHz.

En esta frecuencia se observó una correlación negativa entre la cantidad de Fe en las muestras y las pérdidas totales.



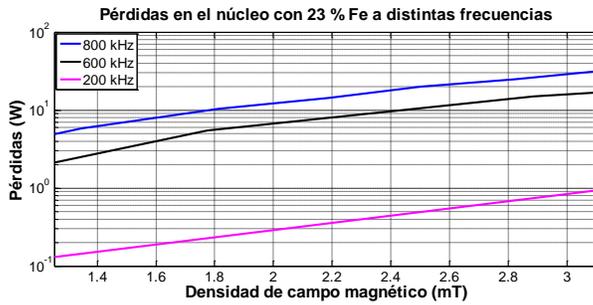
Gráfica E.39. Pérdidas por conducción a 800 kHz.

También se observó una correlación negativa entre la cantidad de Fe en las muestras y las pérdidas por conducción. A esta frecuencia las pérdidas por conducción fueron mucho menores con respecto a las frecuencias anteriores.



Gráfica E.40. Pérdidas en el núcleo a 800 kHz.

A esta frecuencia se observó una correlación negativa entre las pérdidas en el núcleo y la cantidad de Fe en la muestra. Las pérdidas dominantes fueron en el núcleo.



Gráfica E.41. Pérdidas en el núcleo con 23 % de Fe a distintas frecuencias.

En el caso del inductor de núcleo color verde olivo (23% Fe), las pérdidas en el núcleo aumentaron cuando se aumentó la frecuencia. Nótese la escala logarítmica empleada para las pérdidas a 200 kHz; dichas pérdidas fueron mínimas comparadas con las presentadas a 600 kHz y 800 kHz.