

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE UNA HERRAMIENTA  
MAGNÉTICA PARA TRATAMIENTO A MUESTRAS DE CRUDO DEL CAMPO  
ESCUELA COLORADO**

**YESID ALBERTO BRICEÑO FAJARDO  
JOHNNATAN CAMILO DÍAZ CASTIBLANCO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES**

**BUCARAMANGA**

**2013**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE UNA HERRAMIENTA  
MAGNÉTICA PARA TRATAMIENTO A MUESTRAS DE CRUDO DEL CAMPO  
ESCUELA COLORADO**

**YESID ALBERTO BRICEÑO FAJARDO  
JOHNNATAN CAMILO DÍAZ CASTIBLANCO**

**Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electrónico**

**Director:**

**Ph.D. HERMANN RAÚL VARGAS TORRES**

**Ingeniero electricista**

**Codirector:**

**CRISTIAN JIMÉNEZ LEIVA, INGENIERO ELECTRICISTA**

**Ingeniero electricista**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2013**

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan sus agradecimientos a:

Cristian Jiménez Leiva Ingeniero Electricista por su completa disposición y apoyo durante todo el desarrollo de la investigación.

A Hermann Raúl Vargas PH,D, por sus valiosos aportes.

A los profesores Jaime Barrero y Rodrigo Correa por sus comentarios y consejos en la investigación.

Al operario de Macor Ltda Transformadores Oscar y al profesor Yibrail por su disposición, colaboración y brindarnos toda su experiencia.

Y por supuesto a Campo Escuela Colorado por permitirnos avanzar en este proceso académico y personal.

## DEDICATORIA

*A Dios por regalarme la vida y el don de la sabiduría para poder culminar esta etapa de mi vida.*

*A mi madre Nelly Ruth Fajardo, por todo su amor, confianza, dedicación y apoyo incondicional. Muchas gracias mamá por todo tu esfuerzo y tus bendiciones. Te Amo.*

*A mis hermanas Ruth, Carolina y Catalina, por ser mi ejemplo a seguir y resaltar todas mis virtudes. Las quiero mucho.*

*A mis sobrinos, Iván, Santiago e Isabella, por llenar mi vida de alegría y motivación.*

*A toda mi familia, por su apoyo y cariño.*

*A Isabel que además de brindarme su compañía y cariño, fue un gran apoyo en todo momento. Isa gracias por vivir toda esta etapa a mi lado, este triunfo también es tuyo. Te Amo.*

*A mis amigos Jaime, Yoreíma, Lina, Lady, Niño, Miguel y a todas aquellas personas que durante esta etapa de mi vida me acompañaron y apoyaron, ayudándome a crecer como persona y como profesional.*

*A mi compañero de trabajo y amigo Camilo, por su paciencia y compañía.*

*Yesid Briceño Fajardo*

*Gracias a Dios por haberme dado la vida, brindarme una familia maravillosa, y haberme guiado en el cumplimiento de esta gran meta en mi formación profesional. A mis padres Servilio y Emílce por su apoyo, consejos, ayuda e inmenso amor que son el motor de mi vida. A mis hermanos Carolina, Karen, Daniel los cuales están en mi corazón y siempre juntos cumpliendo meta tras meta. A mis abuelos por sus hermosos deseos de superación y guía en todo momento. A mi familia en general que gracias a ellos soy quien soy. Aquella quien fue mi inspiración, motivación y felicidad. A los profesores Hermann Vargas y Cristian Jiménez por su valiosa asesoría y continuo trabajo en conjunto para el desarrollo de este proyecto de investigación.*

*Camilo Díaz Castiblanco*

# CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>20</b>
<b>1 ANTECEDENTES</b> .....	<b>21</b>
1.1 HERRAMIENTAS MAGNÉTICAS PARA EL TRATAMIENTO DE FLUIDOS. ....	21
1.1.1 PATENTE US4367143 4 DE JUNIO DE 1983 .....	21
1.1.2 PATENTE US5024271 18 DE JUNIO DE 1991.....	24
1.2 MEJORA DE LA MOVILIDAD DEL CRUDO PARAFÍNICO MEDIANTE CAMPOS MAGNÉTICOS [1].....	25
1.3 ESTUDIO DE LA RESPUESTA REOLÓGICA DE CRUDOS PARAFÍNICOS DE CAMPO ESCUELA COLORADO ANTE UN CAMPO MAGNÉTICO .....	28
1.3.1 FUENTE GENERADORA DE CAMPO MAGNÉTICO 1 – ELECTROIMÁN. ....	30
1.3.2 FUENTE GENERADORA DE CAMPO MAGNÉTICO 2 – IMANES DE NEODIMIO (ND).....	30
<b>2 ESTUDIO DE LAS CARACTERÍSTICAS GENERALES DE UNA HERRAMIENTA MAGNÉTICA.</b> .....	<b>30</b>
2.1 MATERIALES. ....	30
2.1.1 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES FERROMAGNÉTICOS.....	31
2.1.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES FERROMAGNÉTICOS.....	31
2.1.3 TIPOS DE MATERIALES FERROMAGNÉTICOS. ....	32
2.1.3.1 MATERIALES MAGNÉTICOS BLANDOS .....	32
2.1.3.2 MATERIALES MAGNÉTICOS DUROS .....	34
2.1.4 MATERIALES FERRIMAGNÉTICOS. ....	38
2.1.4.1 FERRITAS BLANDAS.....	39
2.1.4.2 FERRITAS DURAS.....	39
2.2 GEOMETRÍA. ....	39
2.2.1 GEOMETRÍAS EN NÚCLEOS MAGNÉTICOS.....	39
2.2.2 TOROIDES: .....	39
2.2.3 NÚCLEOS E, I.....	40
2.2.4 NÚCLEOS ETD .....	40
2.2.5 NÚCLEOS CE.....	41
2.2.6 NÚCLEOS U. ....	41
2.2.7 NÚCLEOS PLANOS E, I.....	42
2.2.8 NÚCLEOS ER.....	42
2.2.9 NÚCLEOS PQ.....	43
2.2.10 NÚCLEOS POT. ....	44
2.2.11 NÚCLEOS RM. ....	44
2.2.12 NÚCLEOS EP.....	45
2.3 SELECCIÓN DEL MATERIAL Y FORMA GEOMÉTRICA DEL NÚCLEO PARA LA HERRAMIENTA MAGNÉTICA.....	46
2.4 ALAMBRE DE COBRE ESMALTADO. ....	52
2.4.1 HILO DE COBRE ESMALTADO.....	52
2.4.2 COBERTURAS.....	53
2.4.3 CALIBRE DEL ALAMBRE.....	53

2.4.4	SELECCIÓN DEL ALAMBRE .....	53
2.5	TUBERÍA DE ACERO INOXIDABLE .....	58
2.5.1	ACEROS INOXIDABLES MARTENSÍTICOS .....	58
2.5.2	ACEROS INOXIDABLES FERRÍTICOS .....	59
2.5.3	ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS .....	59
2.5.4	ACEROS INOXIDABLES DÚPLEX .....	60
2.5.5	SELECCIÓN DE ACERO INOXIDABLE PARA LA TUBERÍA .....	60
<b>3</b>	<b>ESTUDIO TEÓRICO DE LA DISTRIBUCIÓN DEL CAMPO MAGNÉTICO .....</b>	<b>61</b>
3.1	PRINCIPIOS DE TEORÍA ELECTROMAGNÉTICA .....	61
3.2	CIRCUITO MAGNÉTICO DE LA HERRAMIENTA .....	63
3.3	BOBINADO DE LA HERRAMIENTA MAGNÉTICA .....	69
<b>4</b>	<b>DISEÑO Y SIMULACIÓN DE LA HERRAMIENTA .....</b>	<b>71</b>
4.1	ACERCAMIENTO DEL PROTOTIPO DE LA HERRAMIENTA MAGNÉTICA .....	72
4.2	DESCRIPCIÓN DE LAS SIMULACIONES .....	72
4.3	SIMULACIONES PRELIMINARES .....	75
4.3.1	PROTOTIPO .....	75
4.3.2	SIMULACIÓN CON FERRITA 43 E55/28/25. HERRAMIENTA (H1) .....	76
4.3.2.1	Dimensiones de la herramienta .....	76
4.3.2.2	Simulación a 25 (°C), ferrita 43 .....	77
4.3.2.3	Simulación a 50 (°C), ferrita 43(H1) .....	79
4.3.3	SIMULACIÓN AGREGANDO EFECTOS DE SATURACIÓN .....	80
4.3.3.1	SIMULACIÓN E55/28/21 – 3C90, HERRAMIENTA (H2) .....	80
4.3.4	SIMULACIÓN CON ACERO AL SILICIO .....	84
4.3.4.1	Diseño 1, herramienta (H3) .....	85
4.3.4.2	Diseño 2, herramienta (H4) .....	88
4.4	SIMULACIONES EN EL PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE LA HERRAMIENTA MAGNÉTICA .....	90
4.4.1	UNA BOBINA, HERRAMIENTA (H5) .....	91
4.4.2	DOS BOBINAS, HERRAMIENTA (H6) .....	93
4.4.3	DIFERENTES CALIBRES .....	95
4.4.3.1	CALIBRE AWG 16 HERRAMIENTA (H7) .....	95
4.4.3.2	CALIBRE AWG 18 HERRAMIENTA (H8) .....	97
4.4.4	CORTE DEL NÚCLEO MAGNÉTICO (H9) .....	99
4.5	CONFRONTACIÓN CÁLCULOS MATEMÁTICOS .....	100
<b>5</b>	<b>CONSTRUCCIÓN DE LA HERRAMIENTA MAGNÉTICA .....</b>	<b>103</b>
5.1	DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO: .....	103
5.1.1	NÚCLEO MAGNÉTICO: .....	103
5.1.2	CONSTRUCCIÓN DE LA BOBINA: .....	105
5.1.2.1	AJUSTE DEL EJE DE LA MAQUINA BOBINADORA .....	105
5.1.2.2	FORMALETA .....	106
5.1.2.3	CINTA ROYAL DIAMONT COMO AISLANTE ELÉCTRICO .....	107
5.1.2.4	PRIMERA SECCIÓN EN BOBINADO .....	107
5.1.2.5	SEGUNDA SECCIÓN EN BOBINADO .....	109
5.1.2.6	CONTADOR DE VUELTAS .....	109

5.1.2.7	TROZOS DE MADERA PARA SISTEMA DE VENTILACIÓN.....	110
5.1.2.8	FINALIZACIÓN DE BOBINADO. ....	112
5.1.2.9	BOBINADO. ....	113
5.1.3	ADECUACIÓN DEL BOBINADO Y NÚCLEO MAGNÉTICO. ....	114
5.1.4	CONSTRUCCIÓN DE ACOPLER PARA CIERRE DE NÚCLEO MAGNÉTICO.....	115
5.1.5	SISTEMA DE SUJECIÓN PARA LA HERRAMIENTA CON AISLANTE MAGNÉTICO. ....	116
<b>6</b>	<b>PRUEBAS PRELIMINARES DE LA HERRAMIENTA MAGNÉTICA.....</b>	<b>119</b>
6.1	ELEMENTOS DE CIRCUITO MAGNÉTICO. ....	119
6.2	PRUEBAS A HERRAMIENTA CON UNA BOBINA (H5) .....	120
6.3	PRUEBAS A HERRAMIENTA CON DOS BOBINAS CALIBRE AWG 14 (H6) .....	122
6.4	PRUEBAS A HERRAMIENTA CON DOS BOBINAS CALIBRE AWG 16 (H7). ....	124
6.5	PRUEBAS A HERRAMIENTA CON DOS BOBINAS CALIBRE AWG 18 (H8). ....	125
6.6	PRUEBAS A HERRAMIENTA CON CORTE DE NÚCLEO (H9). ....	126
6.7	PRUEBAS A HERRAMIENTA CON TUBERÍA DE ACERO INOXIDABLE. ....	129
<b>7</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>131</b>
7.1	CONCLUSIONES.....	131
7.2	RECOMENDACIONES.....	133
	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>134</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>136</b>

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1	Características materiales blandos .....	34
---------	--	----

Tabla 2 Características de los materiales duros .....	38
Tabla 3 Dimensiones de lámina tipo E.....	48
Tabla 4 Especificaciones técnicas de lámina tipo E.....	48
Tabla 5 Características magnéticas láminas tipo E .....	49
Para la construcción de las bobinas que general el campo magnético se debe tener en cuenta la máxima corriente que va a soportar la herramienta, en este caso se dispone de una fuente DC de 20 <sup>a</sup> , 30V, donde según la Tabla 6, será necesario usar un calibre AWG 14 en adelante ya que la corriente máxima de este calibre es de 21 <sup>a</sup> .	
Tabla 6 Características alambre de cobre esmaltado. ....	53
Tabla 7 Características del cobre ofrecido por Frana International .....	55
Tabla 8 Análisis del alambre de cobre en la herramienta magnética.....	55
Tabla 9 Parámetros definitivos para la escogencia del cobre. ....	57
Tabla 10 Resultados del análisis matemático.....	71
Tabla 11 Curva de saturación de la ferrita 3C90 a una temperatura de 75 °C. ....	81
Tabla 12 Resultados simulaciones para confrontar análisis matemático. ....	102
Tabla 13 Dimensiones de acoples de separación.....	116
Tabla 14 Resultados pruebas herramienta H5 .....	121
Tabla 15 Resultados medición herramienta(H6).....	124
Tabla 16 Resultados herramienta calibre AWG 16 (H7) .....	125
Tabla 17 Resultados de la pruebas herramienta (H9). ....	128
Tabla 18 Resultados pruebas herramienta (H7) con tubería de acero inoxidable	129
Tabla 19 Datos referentes a la curva de caracterización. ....	139
Tabla 20 Datos referentes a la curva de caracterización. ....	140

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Patente US4367143 .....	21
Figura 2 Corte transversal del dispositivo instalado en tubería de 3 pulgadas. ....	23
Figura 3 Correa de sujeción del prototipo .....	23
Figura 4 Prototipo .....	24
Figura 5 Corte transversal de prototipo.....	25
Figura 6 Prototipos para escoger la forma óptima del núcleo. ....	26
Figura 7 Resultados del montaje para definir la forma óptima del núcleo .....	27
Figura 8 Arreglo de bobinas cortas con núcleo de hierro .....	28
Figura 9 Herramienta generadora de campo magnético (Electroimán) .....	29
Figura 10 Herramienta generadora de campo magnético (imanes de neodimio) .	29
Figura 11 Relación (B) vs (H) no lineal, material ferromagnético .....	32
Figura 12 Ciclo histéresis material ferromagnético duro .....	35
Figura 13 Núcleo Toroidal.....	40
Figura 14 Núcleo E, I .....	40
Figura 15 Núcleo ETD .....	41
Figura 16 Núcleo CE.....	41
Figura 17 Núcleo U .....	42
Figura 18 Núcleo plano E, I.....	42
Figura 19 Núcleo ER.....	43
Figura 20 Núcleo PQ .....	43
Figura 21 Núcleo PQ .....	44
Figura 22 Núcleo RM.....	45
Figura 23 Núcleo EP.....	45
Figura 24 Lámina tipo E de acero al silicio. ....	47
Figura 25 Núcleo magnético con bobinados aditivos.....	49
Figura 26 Permeabilidad Relativa vs Polarización Magnética de láminas tipo E ...	50
Figura 27 Perdidas vs Polarización Magnética de láminas tipo E.....	51
Figura 28 Geometría de la herramienta magnética – SolidWorks.....	52
Figura 29 Dimensiones en [mm] del núcleo magnético con sus respectivas longitudes medias del núcleo (lc).....	63
Figura 30 Circuito magnético de la herramienta .....	64
Figura 31 Sección transversal del núcleo .....	66
Figura 32 Circuito magnético de la herramienta. ....	68
Figura 33 Circuito magnético reducido de la herramienta.....	68
Figura 34 Curva de histéresis ferrita 43, B [G] Vs H [Oe]. ....	73
Figura 35 Curva de permeabilidad contra temperatura Ferrita 43 .....	73
Figura 36 Curva de histéresis ferrita 3C90, B [mT] Vs H [A/m] .....	74
Figura 37 Permeabilidad relativa Vs Temperatura (°C), ferrita 3C90 .....	74
Figura 38 B [T] Vs H [A/m] acero al silicio M-43FEMM.....	75

Figura 39 Bosquejo prototipo de la herramienta, Fuente: Autor. ....	76
Figura 40 Dimensiones núcleo ferrita E55-28-25 Ferroxcube .....	76
Figura 41 Configuración del software .....	77
Figura 42 Comportamiento densidad de flujo magnético (B) .....	78
Figura 43 Resultados de simulación en el centro de la tubería. ....	78
Figura 44 Resultados de simulación en el centro de la tubería .....	79
Figura 45 Curva de saturación de ferrita a 75°C, 3C90 [19]. ....	81
Figura 46 B vs H, simulador FEMM, ferrita 3C90.....	82
Figura 47 Comportamiento densidad de flujo magnético (B) .....	83
Figura 48 Resultados de simulación en el centro de la tubería .....	83
Figura 49 Dimensiones núcleo E/114/75/38 M-43. ....	84
Figura 50 Modelo herramienta (H3).....	85
Figura 51 Distribución de la densidad de campo magnético en geometría núcleo H3. ....	86
Figura 52 Valores de densidad de flujo magnético en el prototipo de la herramienta H3. ....	87
Figura 53 Modelo herramienta (H4).....	88
Figura 54 Distribución de la densidad de campo magnético de la herramienta (H4). ....	88
Figura 55 Valores de densidad de flujo magnético en el prototipo de la herramienta H4. ....	89
Figura 56 Modelo de la herramienta (H5) .....	91
Figura 57 Distribución de la densidad de campo magnético, una bobina .....	92
Figura 58 Resultado simulación, flujo magnético en el centro de la tubería .....	92
Figura 59 Modelo herramienta (H6).....	93
Figura 60 Distribución de la densidad de campo magnético, dos bobinas .....	94
Figura 61 Resultado simulación, flujo magnético en el centro de la tubería .....	94
Figura 62 Distribución de la densidad de campo magnético, bobinas calibre AWG 16(H7).....	96
Figura 63 Resultado simulación, flujo magnético en el centro de la tubería H7.....	96
Figura 64 Distribución de la densidad de campo magnético, bobinas calibre AWG 18 (H8).....	98
Figura 65 Resultado simulación, flujo magnético en el centro de la tubería (H8). .	98
Figura 66 Simulación corte del núcleo magnético (H9).....	99
Figura 67 Resultado simulación, flujo magnético en el centro de la tubería (H9).	100
Figura 68 Simulación AWG 14.....	101
Figura 69 Simulación AWG 16.....	101
Figura 70 Simulación AWG 18.....	102
Figura 71 Núcleo magnético. Autores.....	104

Figura 72 Núcleo magnético. Autores.....	104
Figura 73 Eje de la maquina bobinadora .....	105
Figura 74 Primera capa aislante del bobinado.....	106
Figura 75 Segunda capa con cinta aislante. ....	107
Figura 76 Inicio de primera sección del bobinado.....	108
Figura 77 Finalización de primera sección del bobinado. ....	108
Figura 78 Nueva capa de cinta aislante .....	109
Figura 79 Contador de vueltas en maquina bobinadora. ....	110
Figura 80 Bobinado.....	110
Figura 81 Aplicación de barniz dieléctrico.....	111
Figura 82 Bobinado.....	111
Figura 83 Bobinado.....	112
Figura 84 Bobinado.....	112
Figura 85 Bobinado.....	113
Figura 86 Bobinado.....	113
Figura 87 Bobinado y núcleo magnético.....	114
Figura 88 Bobinado y núcleo magnético.....	115
Figura 89 Acople para cierre de núcleo magnético.....	116
Figura 90 Figura Abrazadera industrial T-526 .....	117
Figura 91 Figura Cinta Royal Diamont.....	117
Figura 92 Sistema completo de sujeción de la herramienta magnética .....	118
Figura 93 Montaje para la medición del alcance de herramienta magnética. ....	120
Figura 94 Montaje de herramienta magnética (H5).....	121
Figura 95 Herramienta con dos bobinas (H6) .....	123
Figura 96 corte de núcleo magnético.....	127
Figura 97 Herramienta con corte del núcleo (H9) .....	127
Figura 98 Montaje herramienta (H7) con tubería de acero inoxidable en el entrehierro.....	130
Figura 99 Curva de caracterización herramienta entrehierro 21,3 mm. ....	139
Figura 100 Curva de caracterización herramienta entrehierro 3 mm. ....	140

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. MANUAL DEL USUARIO .....	136
-----------------------------------	-----

ANEXO B. TESLÁMETRO L DIDACTIC GMBH .....	142
ANEXO C. SENSOR HALL 1T LD DIDACTIC GMBH .....	144

## RESUMEN

**TITULO:**

## DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE UNA HERRAMIENTA MAGNÉTICA PARA TRATAMIENTO A MUESTRAS DE CRUDO DEL CAMPO ESCUELA COLORADO.\*

### **AUTORES:**

YESID ALBERTO BRICEÑO FAJARDO.

JOHNNATAN CAMILO DÍAZ CASTIBLANCO. \*\*

**PALABRAS CLAVES:** Crudo parafínico, campo magnético, ferromagnetismo, flujo magnético, entrehierro.

La precipitación de ceras parafínicas es uno de los inconvenientes que más se presentan en la industria de los hidrocarburos, ocasionando pérdidas en la producción y aumentando los costos de mantenimiento.

El propósito de este proyecto es construir una herramienta magnética que genere una densidad de campo magnético de 400 mT en un entrehierro de 21,3 mm, para ser aplicado a muestras de crudo del Campo Escuela Colorado y así disminuir las pérdidas en la producción y comenzar una nueva solución que permita menos contaminación ambiental.

Se estudiaron y seleccionaron materiales y formas geométricas óptimas para la construcción de la herramienta magnética, se procedió a diseñar y simular un prototipo que fuera ideal para el ajuste con un banco de pruebas donde se realizará el análisis de las propiedades del crudo, correspondiente al proyecto de maestría de C, Jiménez.

Se construyó el prototipo con los que se obtuvo mejores resultados según el análisis analítico y de simulación, las pruebas de laboratorio se realizaron para confirmar los valores de campo magnético esperados, los cuales cumplieron el objetivo de la investigación generando 407 mT, igualmente se analizó el efecto de la tubería en la exposición de campo magnético para verificar que las líneas de campo sobrepasaran y el fluido estuviera expuesto al campo magnético propuesto.

Finalmente se elaboró un manual de usuario de la herramienta magnética que se instalará en el banco de pruebas, donde se dan las indicaciones principales para su uso adecuado.

## **ABSTRACT**

---

\* Proyecto de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Hermann Vargas Torres. Codirector: Cristian Jiménez Leiva.

**TITLE:**

PROTOTYPE DESIGN AND CONSTRUCTION OF A MAGNETIC TOOL FOR TREATMENT OIL FIELD SIGNS ESCUELA COLORADO\*

**AUTHORS:**

YESID ALBERTO BRICEÑO FAJARDO  
JOHNNATAN CAMILO DÍAZ CASTIBLANCO\*\*

**KEY WORDS:** Crude paraffin, magnetic field, ferromagnetism, magnetic flux, air-gap.

Paraffinic crude precipitation is one of the problems most frequently present in the hydrocarbon industry, resulting in lost production and increased maintenance costs.

The purpose of this project is to build a magnetic tool that generates a density of 400 mT magnetic field in an air gap of 21.3 mm, to be applied to crude samples Colorado School field and thus reduce losses in production and start a new solution that allows less air pollution.

Were studied and selected optimal materials and geometric shapes to build magnetic tool, we proceeded to design and simulate a prototype that was perfect for the setting with a test which will be the analysis of the properties of crude for the project master of C, Jiménez.

Prototype was constructed with the best results was obtained by analytical analysis and simulation, laboratory tests were performed to confirm the expected magnetic field values, which met the goal of generating 407 mT research, also was analyzed pipe effect in magnetic field exposure to verify that the field lines and fluid will surpass exposed to the magnetic field was proposed.

Finally, we developed a manual scan tool to be installed on the test bench, where there are the main indications for proper use.

---

\* Undergraduate Project

\*\* Physical-Mechanical Engineering Faculty. Electrical, Electronics and Telecommunications Engineering School. Director: Hermann Vargas Torres. Codirector: Cristian Jiménez Leiva.

## INTRODUCCIÓN

La precipitación de ceras parafínicas es uno de los inconvenientes que más se presentan en la industria de los hidrocarburos, ocasionando pérdidas en la producción y aumento en los costos de mantenimiento. En la actualidad se han desarrollado investigaciones referentes a la aplicación de campo magnético a muestras de crudo de pozos con crudos de tipo livianos, pesados y ultra pesados con el fin de variar el comportamiento reológico y la cinética de cristalización de parafinas para este tipo de pozos, obteniendo variedad de resultados. En estudios recientes realizados por C. Villabona y D. González [1] se observó un cambio en las propiedades reológicas del crudo, ya que se logró un aumento en la movilidad de las muestras en los experimentos realizados. Adicionalmente en la investigación llevada a cabo por J. Almeida y S. Ramírez [2] se presentaron resultados de cambios en las variables de viscosidad, punto de nube y punto de fluidez que perfilan al tratamiento magnético como una alternativa de solución de la precipitación de las ceras en crudos parafínicos. Debido a lo anterior se hace necesaria la construcción del prototipo de una herramienta que permita la aplicación de estos tratamientos en un banco de pruebas que simule las condiciones de fondo de pozo, y de esta forma observar la validez de los anteriores resultados<sup>1</sup>.

El propósito de este proyecto es realizar el prototipo de una herramienta magnética que genere un campo magnético mínimo de 400 mT para ser aplicado a muestras de crudo y corroborar los resultados obtenidos en investigaciones anteriores [1].

Este proyecto hace parte de una investigación de maestría del Campo Escuela Colorado llamada "CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE UNA HERRAMIENTA MAGNÉTICA PARA INHIBIR LA PRECIPITACIÓN DE PARAFINAS DEL CRUDO DEL CAMPO COLORADO" [3], donde será usada la herramienta diseñada en el proyecto presente y de esta forma mostrar los resultados en función de la variación de las propiedades del fluido después de ser expuesto al campo magnético. El objetivo general de la investigación fue formulado por el Ingeniero Cristian Jiménez; autor de la investigación anteriormente nombrada, el cual es construir una herramienta magnética que genere hasta 400 mT de densidad de campo magnético en el centro de un entrehierro de 21,3 mm.

---

<sup>1</sup> Coautoría Ing Cristian Jiménez Leiva

# 1 ANTECEDENTES

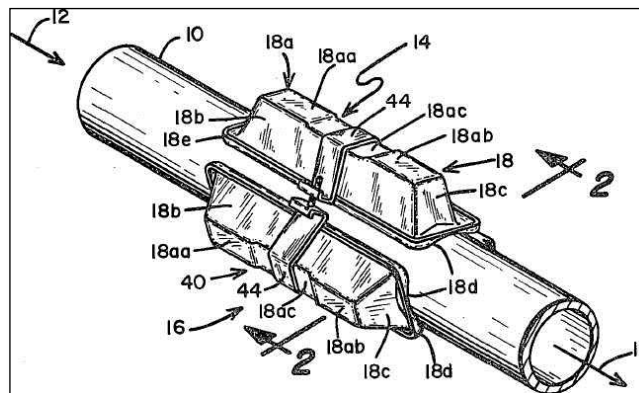
## 1.1 HERRAMIENTAS MAGNÉTICAS PARA EL TRATAMIENTO DE FLUIDOS.

### 1.1.1 PATENTE US4367143 4 DE JUNIO DE 1983 [4]

Inventor: Roland K. Carpenter, Roseville, Minn.

*APARATO PARA EL TRATAMIENTO MAGNÉTICO DE UN LIQUIDO QUE FLUYE POR UNA TUBERÍA Y SUJETO PRINCIPALMENTE PARA ELLO.*

Figura 1 Patente US4367143 [4]



El anterior dispositivo está constituido por una carcasa de material ferromagnético la cual contiene un par de imanes cerámicos encargados de realizar el trabajo magnético.

Los fluidos tratados a través de la herramienta contienen principalmente los siguientes compuestos:

- Calcio
- Sulfato de calcio
- Sulfato de Bario
- Cloruro de sodio

- Sulfato de magnesio
- Grasas
- Parafina

El campo magnético aplicado a estas muestras de naturaleza diamagnética tiene un alto impacto en la composición y distribución interna de las moléculas presentes en el crudo, es por ello que se utiliza esta herramienta para el respectivo tratamiento. Según lo observado por Carpenter, cuanto mayor sea el diámetro de la tubería y el tiempo de aplicación del tratamiento, las propiedades moleculares del fluido diamagnético cambiarán de manera considerable.

Esta invención tiene como objetivo principal generar un campo lo suficientemente fuerte para actuar sobre los compuestos parafínicos e impedir su acumulación en las paredes de la tubería. El largo de este dispositivo influye en el tiempo de aplicación del campo magnético a una molécula en particular, el cual se define como se describe a continuación:

$$t_{\text{exposición}} = \frac{x * \pi * d^2}{4 * Q} \text{segundos} \quad (1-1)$$

En donde:

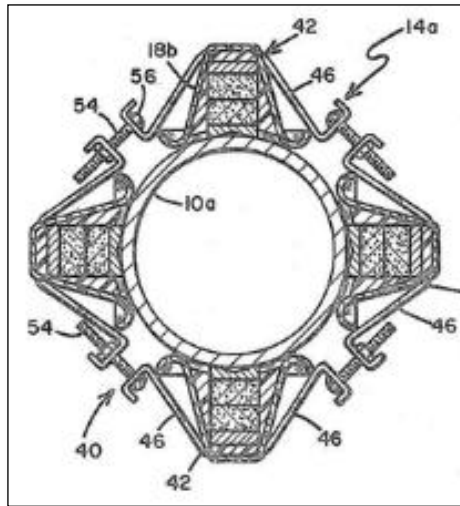
x: longitud de la herramienta [m].

d: diámetro interno de la tubería [m]

Q: caudal [ $\frac{m^3}{s}$ ]

En la figura mostrada a continuación (Figura 2), se observa la instalación de cuatro aparatos magnéticos en una tubería de 7.62cm, (3 pulgadas), donde se aprecia la facilidad de interconectar 3, 4, 5 o más dispositivos según el diámetro requerido en el tratamiento magnético sobre un determinado flujo.

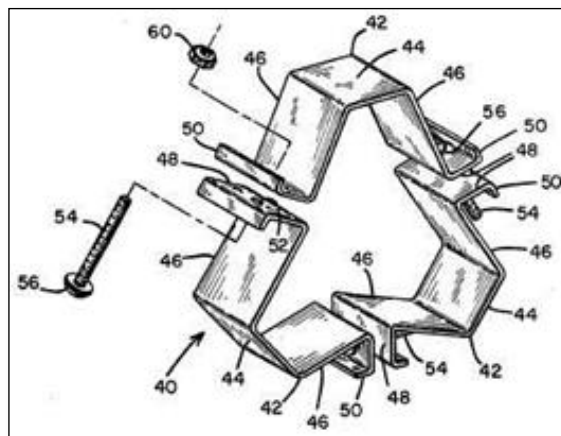
Figura 2 Corte transversal del dispositivo instalado en tubería de 3 pulgadas.



Patente US4367143 [4]

Las carcasas están construidas con materiales ferromagnéticos y una parte de hierro ligero que se apoya en ángulo al exterior de la tubería. La forma de la herramienta está hecha de tal forma que se pueda sujetar a la correa encargada de retener cada uno de los núcleos magnéticos a la tubería a través de muescas y tornillos de sujeción. Lo dicho anteriormente se muestra en la siguiente ilustración:

Figura 3 Correa de sujeción del prototipo



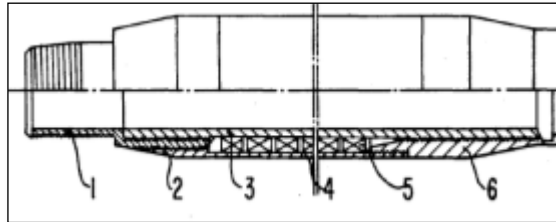
Fuente Patente US4367143 [4]

### 1.1.2 PATENTE US5024271 18 DE JUNIO DE 1991 [5]

Inventor: Wang Meihua, Baotou, China

### DISPOSITIVO DE IMANES PERMANENTES PARA EL CONTROL DE CERAS

Figura 4 Prototipo



Fuente PATENTE US5024271 [5]

La anterior figura ilustra un dispositivo que incluye uno o más pares de polos magnéticos; cada uno de los cuales incluye dos unidades de circuito para la circulación de las líneas de flujo. Cada una de estas dos unidades comprende imanes orientados radialmente con imanes orientados axialmente, circunferencialmente o una combinación de los anteriores; resultando así una alta concentración de campo magnético en el flujo del hidrocarburo.

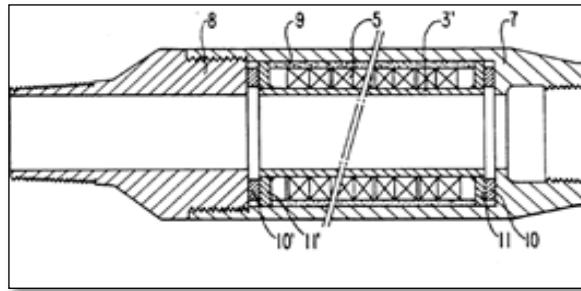
En las pruebas realizadas por Meihua se observó, que al aumentar este campo magnético decrece efectivamente la viscosidad del crudo y se logra la supresión de la acumulación de cera en las paredes de la tubería de transporte.

La invención contempla una forma de realización tal que pueda ser conectada a la tubería y distintas barras de bombeo de manera específica. Es claro anotar que debido a que es un dispositivo de imán permanente no tiene un consumo de energía externa asociado; haciendo de ésta una herramienta eficiente en el trabajo que se está desempeñando para la inhibición de precipitaciones de escamas orgánicas.

Esta invención tiene dos objetivos principales, descritos así:

- Concentrar altamente el campo magnético en el área principal del crudo.
- Facilitar la conexión de estos dispositivos para aplicar en las facilidades de la tubería.

**Figura 5 Corte transversal de prototipo.**



**Fuente PATENTE US5024271 [5]**

Dos conectores son separadamente roscados y soldados a ambos terminales de un tubo de núcleo hueco conductivo no magnético para formar un conjunto integral rígido. Este presenta unas terminales tipo “macho-hembra” para una debida conexión con la tubería.

Un prototipo de tubo hecho de un material magnéticamente conductivo envuelve al núcleo de material no magnético. A continuación se encuentran uno o más de un par de polos de un sistema del circuito magnético, los cuales se encuentran situados en el espacio entre el tubo del núcleo y dicho prototipo de prueba alineados axialmente.

Cada par de polos mencionados anteriormente contiene dos unidades de circuito magnético organizados de forma axial. Todos los demás elementos adyacentes usados son juntados con material adhesivo y las unidades de circuito magnético son pegadas al tubo del prototipo.

## **1.2 MEJORA DE LA MOVILIDAD DEL CRUDO PARAFÍNICO MEDIANTE CAMPOS MAGNÉTICOS [1].**

Trabajo de grado en la modalidad de investigación en la Universidad Industrial de Santander desarrollado por C. Villabona y D. González [1], encontrando que: “la aplicación de campos magnéticos para la remoción de depósitos de parafina no es eficiente, sin embargo, aplicando campos magnéticos al crudo de los pozos Colorado 25 y Colorado 63, se logró una mejora sustancial de las propiedades reológicas del crudo tratado en cuanto a viscosidad, punto de nube y punto de fluidez, ratificando el uso de campos magnéticos como alternativa viable para la inhibición de cristales en la tubería del pozo.”

En esta investigación se analizó la efectividad de dos tipos de bobinas para la generación de campo magnético; denominándolas bobinas largas y bobinas cortas.

Las bobinas largas contaban con un único devanado de alambre de cobre calibre AWG 8, cada una pesaba 5,14Kg, con 200 espiras arrolladas sobre 71cm de tubería de PVC de 2pulgadas de diámetro.

Las bobinas cortas a diferencia de las largas, contaban con varios devanados de alambre de cobre calibre AWG 8 con 120 espiras arrolladas en 7cm de tubería PVC de 2pulgadas de diámetro.

Se concluye que las bobinas cortas generan una mayor densidad de campo magnético en el punto central del arreglo, en comparación con las bobinas de mayor longitud.

Con fines de mejorar los resultados, aumentaron el número de vueltas de las espiras e incluyeron un núcleo hecho con varillas de hierro dulce. Luego se realizan experimentos para determinar la forma óptima del núcleo procurando obtener la mayor densidad de campo posible. Se hicieron tres prototipos: Uno con terminación plana, otro con terminación convexa y otro con una protuberancia como se muestra en la Figura 6.

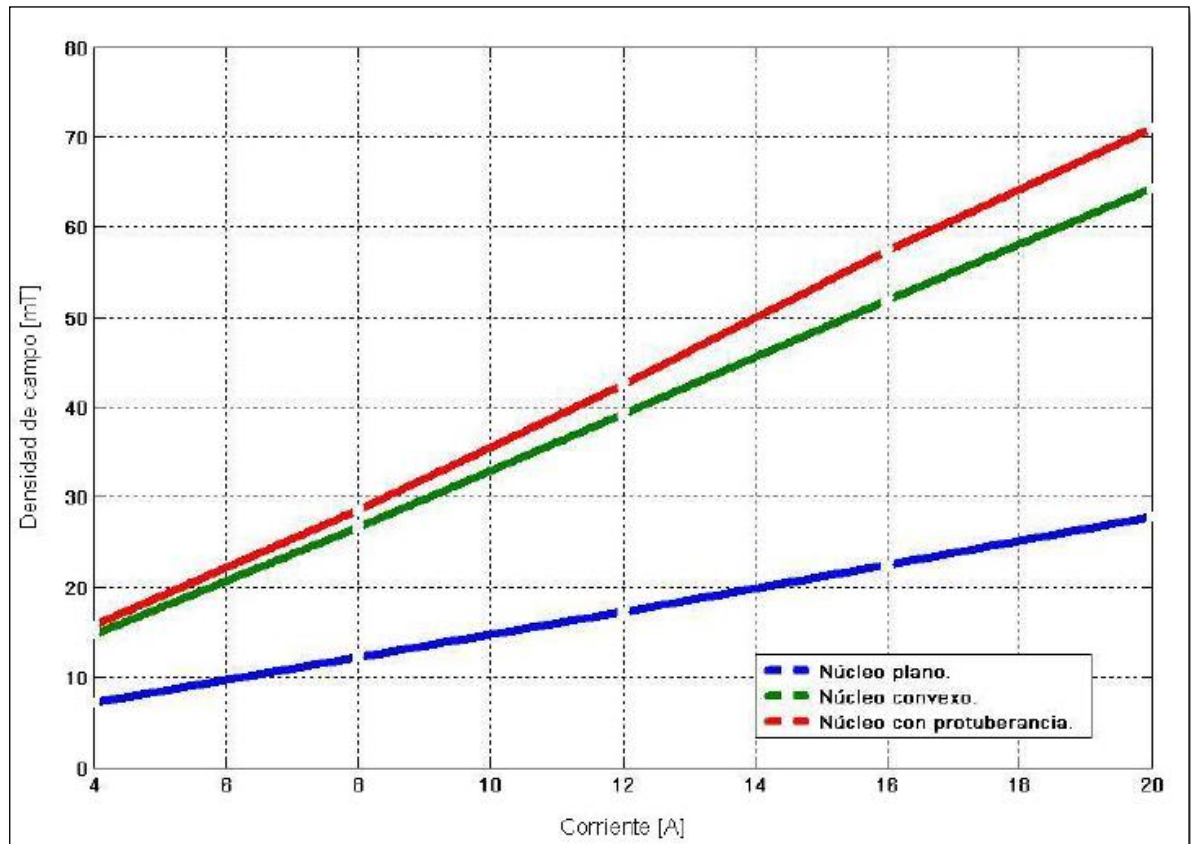
**Figura 6 Prototipos para escoger la forma óptima del núcleo.**



**Fuente C. A. villabona Carvajal y D. P. Gonzales Garcia [1].**

A continuación se muestra la gráfica de la relación de densidad de campo magnético vs Corriente de las tres geometrías diferentes:

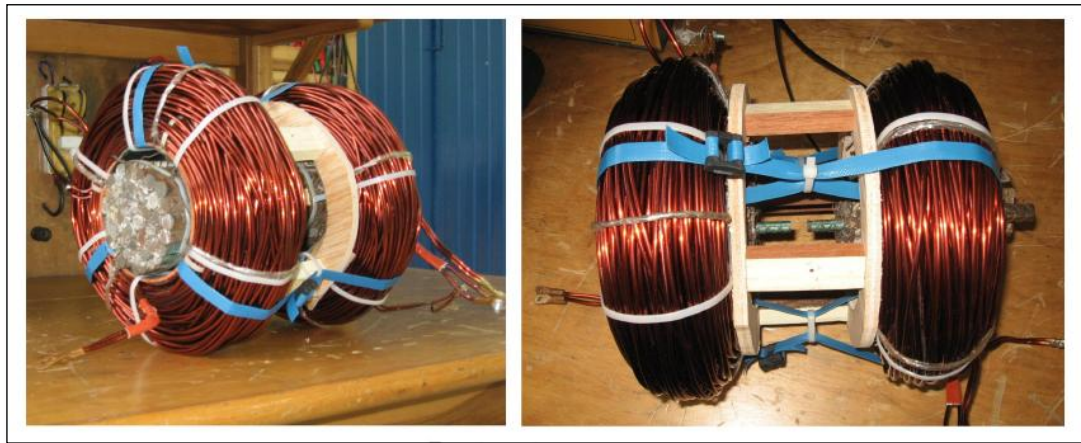
Figura 7 Resultados del montaje para definir la forma óptima del núcleo [1]



Fuente C. Villabona y D. Gonzales [1]

La línea roja indica el núcleo con protuberancia, la verde el núcleo convexo y la azul el núcleo plano. Con base a estos resultados decidieron continuar la investigación utilizando el núcleo con protuberancia, finalmente decidieron incorporarle otra bobina para aumentar el campo magnético y la herramienta magnética que obtuvieron fue la siguiente.

**Figura 8 Arreglo de bobinas cortas con núcleo de hierro [1].**



**Fuente C. Villabona y D. Gonzales [1]**

Cada bobina posee las siguientes características:

230 espiras de alambre calibre AWG 8, arrolladas sobre 71cm de tubería PVC de 2pulgadas de diámetro, posee múltiples devanados arrollados uno sobre otro formando capas; cada una pesa 9,19Kg.

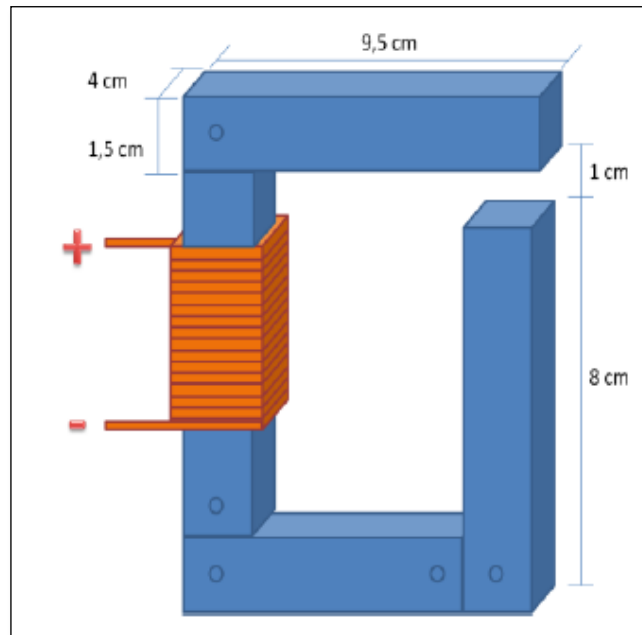
La investigación concluye que la generación de altos valores de densidad de campo magnético a partir de solenoides se logra optimizando la geometría de los solenoides así: Usando múltiples devanados, reduciendo la longitud y el radio del solenoide. Además, concluyen que es de mayor importancia el material del núcleo en un solenoide en comparación a la intensidad de corriente suministrada.

### **1.3 ESTUDIO DE LA RESPUESTA REOLÓGICA DE CRUDOS PARAFÍNICOS DE CAMPO ESCUELA COLORADO ANTE UN CAMPO MAGNÉTICO [2].**

Este estudio fue realizado en la Universidad Industrial de Santander por J. Almeida y S. Ramírez [2] donde tenían como propósito estudiar la respuesta reológica de los pozos Col 25 y Col 36 de Campo Escuela Colorado ante un campo magnético (CM) en condiciones de laboratorio.

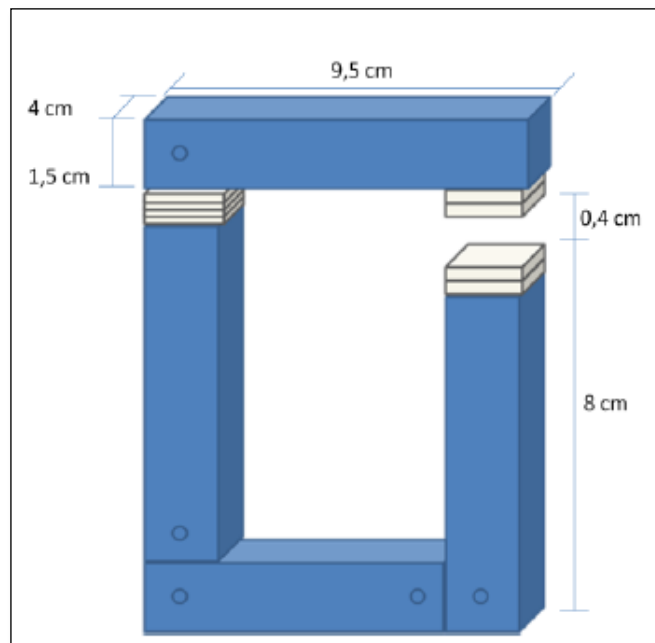
Para este fin, diseñaron y construyeron dos herramientas generadoras de campo magnético, una empleando imanes de neodimio y otra tipo electroimán vistas en la Figura 9 y Figura 10, las cuales permiten la aplicación de diferentes intensidades del campo en forma perpendicular a la dirección de flujo.

Figura 9 Herramienta generadora de campo magnético (Electroimán) [2].



Fuente C. Villabona y D. Gonzales [1]

Figura 10 Herramienta generadora de campo magnético (imanes de neodimio) [2].



Fuente C. Villabona y D. Gonzales [1]

### **1.3.1 FUENTE GENERADORA DE CAMPO MAGNÉTICO 1 – ELECTROIMÁN.**

La herramienta consta de un núcleo de hierro laminado de acero al silicio en forma de “G” y además un bobinado de 1000 vueltas de alambre de cobre esmaltado AWG 18 (Figura 9).

### **1.3.2 FUENTE GENERADORA DE CAMPO MAGNÉTICO 2 – IMANES DE NEODIMIO (ND).**

Esta fuente de campo magnético consiste en un conjunto de imanes de neodimio<sup>2</sup> que permite obtener campos magnéticos de mayor intensidad modificando la distancia de separación por medio de la inclusión de láminas de PET en el entrehierro de la herramienta, Figura 10.

El nivel de intensidad de campo magnético alcanzado con la herramienta magnética tipo electroimán en la región donde se ubica la muestra fue de 110 mT con entrehierro de 1cm y para la herramienta tipo imanes permanentes de neodimio fue de 320mT con entrehierro de 0.4cm.

Esta investigación concluyó que: “no hay un consenso en la comunidad científica sobre el mecanismo físico o químico que causa que en algunos crudos aumente o disminuya su viscosidad cuando son expuestos a un campo magnético o eléctrico.” [2]

## **2 ESTUDIO DE LAS CARACTERÍSTICAS GENERALES DE UNA HERRAMIENTA MAGNÉTICA.**

### **2.1 MATERIALES. [6, 7]**

El uso adecuado de un material en la fabricación de la herramienta magnética es de gran importancia ya que dependiendo de este, se pueden obtener valores elevados de densidad de flujo magnético (B) con valores de fuerza magnetomotriz (N.I) relativamente pequeños. Los núcleos magnéticos que se utilizan en la

---

<sup>2</sup> Un imán de neodimio es el tipo de imán de tierras raras más extensamente utilizado, se trata de un imán permanente hecho de una aleación de neodimio, hierro y boro.

práctica son los de materiales ferromagnéticos compuestos de hierro y sus aleaciones con cobalto, tungsteno, níquel, silicio, aluminio y otros metales. Estos materiales han evolucionado mucho con el paso del tiempo, lo que implica más eficiencia, reducción de volúmenes y costo en el diseño de transformadores y máquinas eléctricas.

Los materiales ferromagnéticos poseen las siguientes propiedades y características que se detallan a continuación.

### **2.1.1 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES FERROMAGNÉTICOS.**

- Aparece una gran inducción magnética al aplicarle un campo magnético.
- Permiten concentrar con facilidad líneas de campo magnético, acumulando densidad de flujo magnético elevado.
- Se utilizan estos materiales para delimitar y dirigir a los campos magnéticos en trayectorias bien definidas.
- Permite que las máquinas eléctricas tengan volúmenes razonables y costos bajos.

### **2.1.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES FERROMAGNÉTICOS.**

Los materiales ferromagnéticos se caracterizan por uno o varios de los siguientes atributos:

- Pueden imanarse mucho más fácilmente que los demás materiales. Esta característica viene indicada por una gran permeabilidad relativa  $\mu_r = \mu / \mu_0$ .
- Tienen una inducción magnética intrínseca máxima muy elevada.
- Las relaciones que expresan la inducción magnética y la permeabilidad ( $\mu$ ) como funciones del campo magnético, no son lineales ni uniformes.
- Conservan la imanación cuando se suprime el campo.

A continuación se muestra la relación entre la inducción (B) y la intensidad de campo magnético (H) no lineal. La correspondencia entre ambos está dada la curva de magnetización, la cual observamos en la Figura 11. En la misma se observa la linealidad en la Zona A y luego una Zona B no lineal en la cual los

incrementos de inducción magnética son menores y por último una zona en la cual grandes incrementos de intensidad de campo magnético producen pequeños incrementos de inducción magnética Zona C o Zona de saturación.

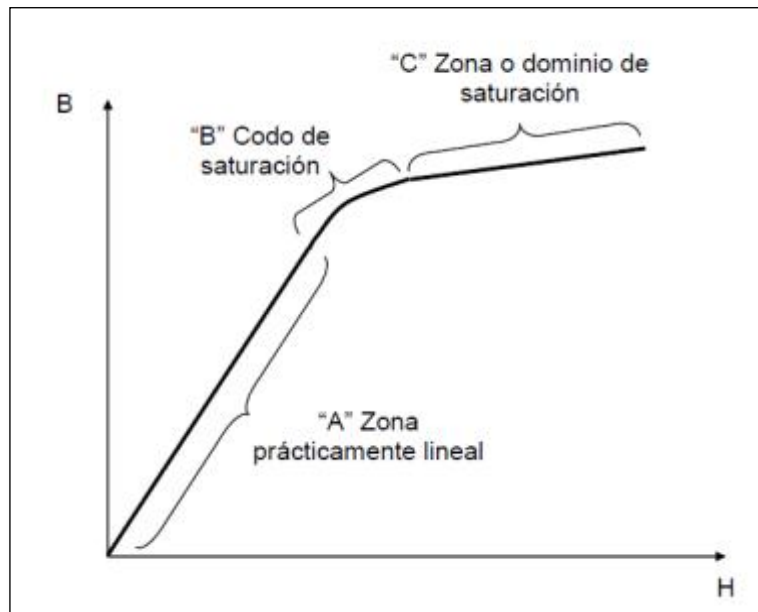


Figura 11 Relación (B) vs (H) no lineal, material ferromagnético [7]

### 2.1.3 TIPOS DE MATERIALES FERROMAGNÉTICOS.

#### 2.1.3.1 MATERIALES MAGNÉTICOS BLANDOS

- Descripción

Un material magnético blando es aquel que posee una gran facilidad para imanar y desimanar, pero que reciba este nombre no tiene nada que ver con la dureza física del material. Un material con estas características, alcanza la saturación con un campo aplicado relativamente pequeño y aun así tener pérdidas de energía pequeñas.

- Pérdidas de energía

Un material blando puede tener pérdidas de energía debidas a la histéresis y por acción de corrientes parasitarias. En el primer caso, los valores de susceptibilidad<sup>3</sup> y la coercitividad<sup>4</sup> que determinan la curva de histéresis son sensibles a la estructura del material. Así, los defectos estructurales (partículas de una fase no magnética, poros en material no magnético) disminuyen el movimiento de las paredes del dominio y aumenta por tanto la coercitividad.

Por otra parte, las pérdidas de energía debidas a corrientes parasitarias o de Foucault se dan al inducirse corrientes eléctricas en el material magnético, por un campo magnético que varía en magnitud y dirección con el tiempo. Para solucionar estas pérdidas se amplía la resistividad eléctrica del material.

- Aleación hierro-silicio

Es una de las aleaciones más utilizadas como material magnético blando, ya que soluciona en gran parte las pérdidas por histéresis y las corrientes parasitarias, y es menor la inducción por saturación y la temperatura de Curie, todo ello gracias al silicio. La proporción de este no puede superar el 4% debido a que a partir de entonces la ductilidad comienza a disminuir. Se suele utilizar en la fabricación de transformadores, apilando láminas de hierro-silicio con una capa de aislante entre ellas. Dichas láminas tienen la particularidad de tener los granos orientados para tener menos pérdidas.

- Vidrios metálicos

Son materiales de estructura amorfa, obtenidos mediante la combinación de elementos ferrimagnéticos como el hierro, cobalto y níquel, con metaloides como el Boro y el Silicio. Son muy fuertes, muy duros, con cierta flexibilidad y resistentes a la corrosión. En estos materiales, las paredes del dominio se mueven con facilidad a causa de que tienen ciclos de histéresis muy estrechos. Se suele emplear en la fabricación de transformadores de potencia, sensores magnéticos y cabezas grabadoras.

- Aleaciones níquel-hierro

Estos materiales magnéticos blandos se emplean como sustituto de la aleación hierro-silicio en aplicaciones que se necesite una permeabilidad relativamente alta para campos bajos. Existen dos tipos: con 50% de níquel, con moderada permeabilidad y alta inducción de saturación; y con 79% de níquel con alta

---

<sup>3</sup> Es el grado de magnetización de un material, en respuesta a un campo magnético. Este número se representa con el símbolo  $\chi$ , y es adimensional, está relacionado directamente con la permeabilidad.

<sup>4</sup> Resistencia de un material a la desimanación.

permeabilidad y menor inducción de saturación. Estas aleaciones tienen permeabilidades altas. Se suelen emplear en transformadores de instrumentación, relés de instrumentación y para laminados de rotores y estatores.

A continuación se muestra una tabla con las características de materiales blandos.

**Tabla 1 Características materiales blandos**

Material y composición	Inducción de saturación, Bs, T	campo coercitivo, Hi, A/cm	Permeabilidad relativa inicial $\mu_i$
Hierro magnético, chapa de 0,2 cm	2,15	0,8	250
M36 Si-Fe laminado en frío (aleatorio)	2,04	0,36	500
M6 (110) [001], 3,2% Si-Fe (orientado)	2,03	0,06	1.500
45 Ni-55 Fe (45 Permalloy)	1,6	0,024	2.700
75 Ni-5 Cu-2-Cr-18 Fe (Mumetal)	0,8	0,012	30.000
79 Ni-5 Mo-15 Fe-0,5% Mn(Supermalloy)	0,78	0,004	100.000
48% Ni-e2O3, 52% ZnO-Fe2O3 (ferrita suave)	0,36		1.000
36% NiO-Fe2O3, 64% ZnO-Fe2O3 (ferrita suave)	0,29		650

Fuente Ciencia y tecnología de los materiales [6].

### 2.1.3.2 MATERIALES MAGNÉTICOS DUROS

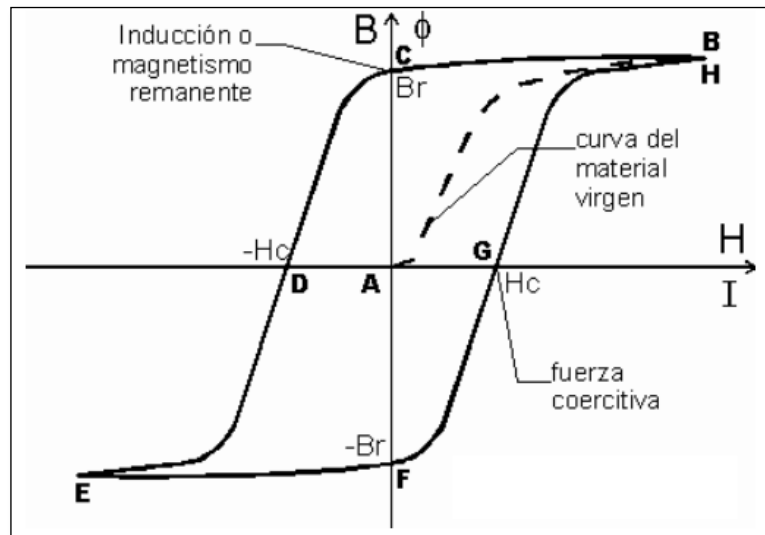
- Descripción

Este grupo de materiales destacan entre el resto por tener una gran resistencia a la des-magnetización, por lo que son utilizados como imanes permanentes. Sus características son una remanencia<sup>5</sup>, coercitividad y densidad de flujo de saturación alta que hace que tenga un ciclo de histéresis ancho y alto (Figura 12). Estos materiales se iman mediante la aplicación de un campo magnético que consiga orientar los dominios magnéticos en la misma dirección que el campo. De esta forma, el material adquirirá energía del campo que será convertida en energía potencial. La curva de desimantación viene dada por la representación del ciclo de histéresis en el segundo cuadrante. La energía potencial magnética de un material

<sup>5</sup> Es la capacidad de un material para retener el magnetismo que le ha sido inducido.

se mide como el producto de la inducción magnética y el campo des imador, es decir, el área encerrada por el mayor rectángulo que puede ser inscrito en el segundo cuadrante del ciclo de histéresis del material.

Figura 12 Ciclo histéresis material ferromagnético duro [8]



La curva de la figura anterior es conocida como curva de histéresis de los materiales magnéticos. El trazo entre A y B corresponde a la relación entre la excitación magnética o intensidad de campo [H] que origina la bobina y la imanación obtenida en el núcleo magnético. La inducción crece al principio en forma lenta para luego hacerlo en forma casi uniforme, hasta alcanzar un punto en el que llega a la saturación. Esto es consecuencia de que todas las partículas están orientadas en la dirección impuesta por la excitación.

Ahora si disminuye la corriente aplicada a la bobina, comienza a disminuir la inducción, pero no lo hace recorriendo el mismo camino trazado en el gráfico, por el contrario, todo ocurre como si solo una parte de las moléculas volviesen al desorden primitivo y otras quedan orientadas como si aún actuara el campo de la bobina. Esto se hace más notorio donde la excitación magnética es cero, sin embargo, la inducción conserva un valor [Br] nada despreciable. Este efecto se denomina *REMANENCIA*. Es evidente que los materiales con que se construyen los imanes permanentes (magnéticos duros) son de alta remanencia.

El tramo C – D, donde se ha invertido el sentido de la corriente y por lo tanto de la intensidad de campo, logrando así la disminución de la inducción, hasta lograr

finalmente anularla. Hemos vuelto a un núcleo totalmente desimantado, pero para ello, nos vemos en la necesidad de aplicar una corriente en sentido contrario al inicial. Este punto o valor de excitación  $[H_c]$  se denomina *FUERZA COERCITIVA*.

En el trazo D – E, se puede apreciar cómo se imana el material pero en sentido contrario, nuevamente la inducción crece hasta alcanzar el valor de saturación, por las mismas causas anteriores. Solo que ahora las moléculas se han orientado en sentido opuesto. Continuando con la evolución de la corriente de excitación, encontraremos el mismo efecto de remanencia descrito anteriormente, pero ahora en sentido opuesto y seguramente si aumentamos ahora la corriente, lograremos un punto donde se requiere una fuerza coercitiva para anular el campo, tramos E – F y F – G. El lazo se cierra con el tramo G – H, donde se obtiene nuevamente la saturación en sentido positivo.

- Aleaciones de alnico

El alnico es uno de los materiales magnéticos duros comercialmente más importantes. Tienen una alta energía producto<sup>6</sup> (40 a 70 kJ/m<sup>3</sup>), una alta inducción de remanente (0,7 a 1,35 T) y un moderado campo coercitivo (40 a 160 kA/m). Este tipo de aleaciones se obtienen a partir del hierro con adición de Aluminio, Níquel y Cobalto más un 3% de Cobre aunque también se le puede añadir Titanio. Este tipo de material es quebradizo y para su elaboración se funde para posteriormente recurrir a procesos de metalurgia de polvo. Su finalidad principal es la producción de grandes cantidades de pequeños artículos de formas complejas.

- Aleaciones de tierras raras

Los imanes de aleaciones de tierras raras tienen propiedades superiores a cualquier otro material magnético comercial. Su energía producto alcanza valores de 240kJ/m<sup>3</sup> y las coercitividads rondan los 3200kA/m. Hay dos grupos principales de materiales magnéticos de tierras raras: uno es la monofase SmCo<sub>5</sub> y el otro son las aleaciones endurecidas por precipitación de composición aproximada Sm (Co, Cu) 7,5.

---

<sup>6</sup> Energía producto

Los imanes de monofase SmCo<sub>5</sub> tienen un mecanismo de coercitividad basado en la nucleación<sup>7</sup> [9] y fijación de las paredes del dominio en las superficies y fronteras de grano

En el endurecimiento por precipitación de la aleación de Sm (Co, Cu)<sub>7,5</sub>, parte del cobalto es sustituido por el Cobre en el SmCo<sub>5</sub> por medio de un fino precipitado a una temperatura de envejecimiento de unos 400° C. El precipitado formado es coherente con la estructura anterior y se basa en la fijación homogénea de las paredes del dominio de las partículas precipitadas. Al igual que el anterior se recurre a métodos de metalurgia de polvos para su conformación. Los valores típicos de la energía producto en una aleación Sm (Co<sub>0</sub>, 68Cu<sub>0</sub>, 10Fe<sub>0</sub>, 21 Zr<sub>0</sub>, 01)<sub>7,4</sub> son de 240Kj/m<sup>3</sup> y de 1,1 T de inducción remanente.

Los imanes de Sm-Co se utilizan en dispositivos médicos tales como los pequeños motores de bombas implantables y válvulas, en relojes de muñeca, tubos de onda progresiva y en motores y generadores de corriente continua síncronos.

- Aleaciones magnéticas de neodimio-hierro-boro

El descubrimiento de este tipo de material es muy reciente, hacia 1984. Su energía producto, alrededor de 300kJ/m<sup>3</sup>, es una de las mayores entre los materiales magnéticos. Se producen mediante metalurgia de polvo, solidificando rápidamente mediante cintas de hilado fundido. La alta coercitividad y energía producto de este material son resultado de una nucleación inversa de los dominios magnéticos que habitualmente nuclean en las fronteras de grano de las matrices de los granos.

Se emplean en motores eléctricos, en especial en los motores de arranque de automóviles, gracias a ser más potente que otros materiales.

- Aleaciones magnéticas de hierro-cromo-cobalto

Estas aleaciones son similares a las de alnico en estructura metalúrgica y propiedades magnéticas permanentes, pero poseen como ventaja que pueden ser conformables en frío. La composición típica de esta estructura guarda la siguiente proporción: 61% de hierro, 28% de cromo y 11% de Cobalto. Los valores de las propiedades magnéticas son de 1,0T a 1,3T de inducción remanente, de 150 A/cm a 600 A/cm de coercitividad y de 10kJ/m<sup>3</sup> a 45kJ /m<sup>3</sup>. Se emplean en imanes permanentes para receptores telefónicos.

---

<sup>7</sup> Mecanismo básico de desimantación

**Tabla 2 Características de los materiales duros  
(Incluidas ferritas de las que se hablará posteriormente)**

Material y composición	Inducción remanente. Br,[T]	Campo coercido Hi [KA/m]
Alnico 1, 12 Al, 21 Ni, 5 Co, 2 Cu, Bal Fe	0,72	37
Alnico 5, 8 Al, 14 Ni, 25 Co, 3 Cu, Bal Fe	1,28	51
Alnico 8, 7 Al, 15 Ni, 24 Co, 3 Cu, Bal Fe	0,72	150
Tierra rara – Co, 35 Sm, 65 Co	0,9	675-1200
Tierra rara – Co, 25,5 Sm, 8 Cu, 15 Fe, 1,5Zr, 50 Co	1,1	510
Fe-Cr-Co, 30Cr, 10 Co, 1 Si, 59 Fe	1,17	46
MO-FE2O3(M=Ba,Sr)(ferrita dura)	0,38	235-240

Fuente Ciencia y tecnología de los materiales [6].

#### 2.1.4 MATERIALES FERRIMAGNÉTICOS.

Este tipo de materiales es también usado en el diseño y fabricación de máquinas eléctricas donde es necesario el uso de campos magnéticos, este tipo de materiales aportan características particulares de las que se hablara a continuación:

El ferrimagnetismo presenta, como el ferromagnetismo, magnetizaciones de saturación (punto en el que ya no aumenta la magnetización aunque aumentemos la fuerza del campo), aunque no en valores tan altos. Otra similitud es que por encima de la temperatura de Curie se pierde el ferrimagnetismo y el material pasa a ser paramagnético.

Los materiales ferrimagnéticos proceden normalmente de la ferrita. Las ferritas, siendo materiales cerámicos, son buenos aisladores eléctricos, por lo tanto, en estos materiales, las perdidas eléctricas (conocidas como perdidas por corrientes de Foucault o parásitas) son mucho menores en comparación con las de los materiales ferromagnéticos metálicos, En algunas aplicaciones magnéticas, tales como transformadores de alta frecuencia, se requiere una baja conductividad eléctrica.

Las ferritas son obtenidas al combinar óxido de hierro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) con otros óxidos y carbonatos en forma de polvo. Estos son presionados y sinterizados a grandes temperaturas.

#### **2.1.4.1 FERRITAS BLANDAS**

La mayoría de las ferritas blandas tienen la composición básica de  $MO \cdot Fe_2O_3$ , donde M es un ion bivalente como el  $Fe^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$  y  $Ni^{2+}$ . Estos materiales tienen una estructura de espinela inversa, que contienen una celdilla unidad consistente en 8 subceldas FCC. Cada subcelda corresponde a una molécula de  $MO \cdot Fe_2O_3$ . Por tanto, en esta estructura los 8 iones de  $M^{2+}$  ocupan 8 posiciones octaédricas, los 16 iones de  $Fe^{3+}$  ocupan 8 localizaciones octaédricas y 8 tetraédricas.

Estas ferritas se utilizan para aplicaciones de baja señal, núcleos de memoria, audiovisuales y cabezas grabadoras, como ejemplos. Puesto que estos materiales son aislantes, pueden utilizarse para aplicaciones de alta frecuencia donde las corrientes parásitas son un problema con campos alternos.

#### **2.1.4.2 FERRITAS DURAS**

Las ferritas duras, con la fórmula general de  $MO \cdot Fe_2O_3$ , donde M es usualmente un ion de Ba o Sr, son utilizadas para aplicaciones que requieran materiales magnéticos permanentes de bajo costo y baja densidad. Estos materiales se utilizan en altavoces, emisores y receptores telefónicos.

### **2.2 GEOMETRÍA.**

#### **2.2.1 GEOMETRÍAS EN NÚCLEOS MAGNÉTICOS.**

A continuación se presentan varios tipos de núcleos magnéticos desarrollados en la industria para distintas aplicaciones [10].

#### **2.2.2 TOROIDES:**

Este tipo de núcleos son económicos de fabricar, debido a que no requieren de una formaleta para la bobina, haciendo que su montaje no tenga ningún costo. Los toroides de ferrita están disponibles en varios tamaños (desde 2.54mm a 140mm) y materiales (permeabilidades relativas que van desde 90 a 10000). Estos toroides son excelentes opciones para transformadores de alta frecuencia y muchas más aplicaciones.

**Figura 13 Núcleo Toroidal**

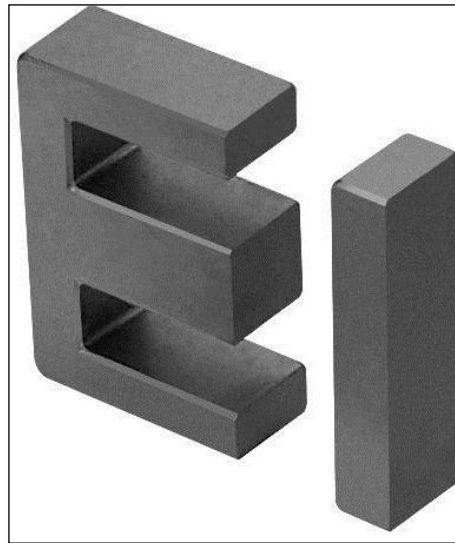


Fuente Power Design Magnetics Ferritas [10].

### **2.2.3 NÚCLEOS E, I**

Estos núcleos son unos de los más económicos y tienen la ventaja de un fácil montaje con simples devanados. Están disponibles en láminas tipo E de varios tamaños para formar núcleos que se adapten fácilmente a las bobinas comerciales. Estos se encuentran comúnmente en aplicaciones de potencia e inductores de telecomunicaciones, convertidores, transformadores inversores, entre otros.

**Figura 14 Núcleo E, I**



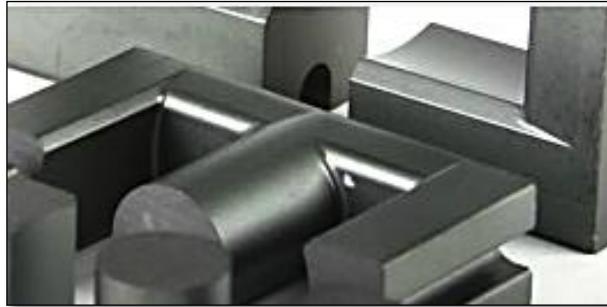
Fuente Power Design Magnetics Ferritas. [10]

### **2.2.4 NÚCLEOS ETD**

Estos núcleos son una opción económica para los transformadores e inductores. Tienen un poste central redondo para una resistencia mínima de bobinado.

Además, las dimensiones están optimizadas para una mayor eficiencia. Las aplicaciones típicas de estos núcleos incluyen inductores y transformadores diferenciales de poder.

**Figura 15 Núcleo ETD**

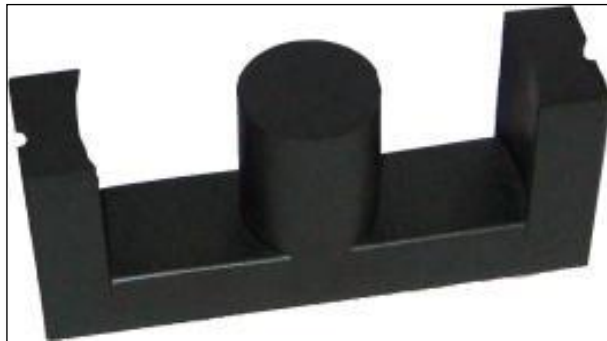


Fuente Power Design Magnetics Ferritas. [10]

### **2.2.5 NÚCLEOS CE.**

Estos núcleos tiene un poste central redondo y su geometría proporciona una amplia abertura en cada lado que permite un bobinado más grande para una mayor inducción. Sus aplicaciones son típicas de transformador de potencia.

**Figura 16 Núcleo CE**

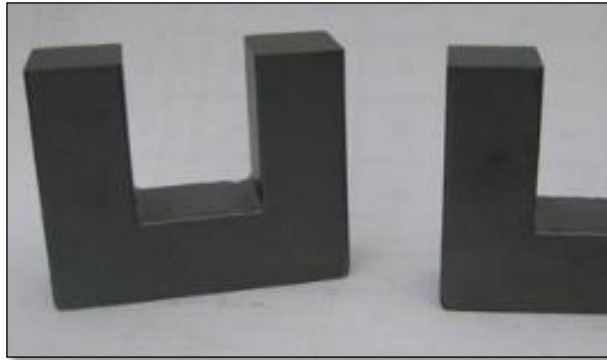


Fuente Power Design Magnetics Ferritas. [10].

### **2.2.6 NÚCLEOS U.**

Son núcleos en forma de U y son ideales para operar en alta potencia es espacios reducidos. Estas largas secciones del núcleo U posibilita apoyar una gran bobina para una excelente inducción con bajas fugas. Para facilitar su montaje se emplea un núcleo I para cerrar el núcleo magnético.

**Figura 17 Núcleo U**

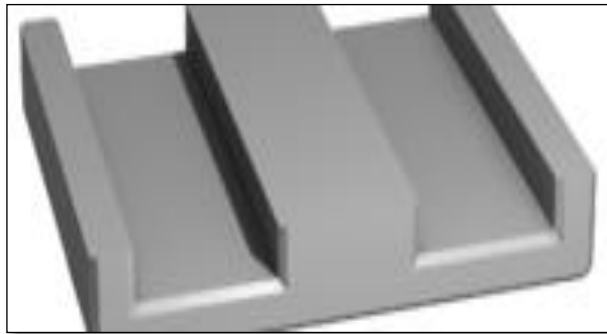


**Fuente Power Design Magnetics Ferritas. [10].**

### **2.2.7 NÚCLEOS PLANOS E, I**

Estos núcleos se adaptan fácilmente a los diseños planos, donde tienen pocas vueltas y una disipación térmica favorable en comparación con otros núcleos de ferrita convencionales. Estos son eficientes en espacios muy reducidos y una alta densidad de campo magnético. Sus aplicaciones principales son en convertidores DC/DC y AC/DC.

**Figura 18 Núcleo plano E, I**



**Fuente Power Design Magnetics Ferritas. [10]**

### **2.2.8 NÚCLEOS ER**

Estos núcleos tienen un poste central redondo angosto que ofrece la posibilidad de un corto bobinado con una menor resistencia. Además, ofrece una buena utilización del espacio con un mejor rendimiento térmico. Estos núcleos se ven típicamente en transformadores de potencia.

**Figura 19 Núcleo ER**

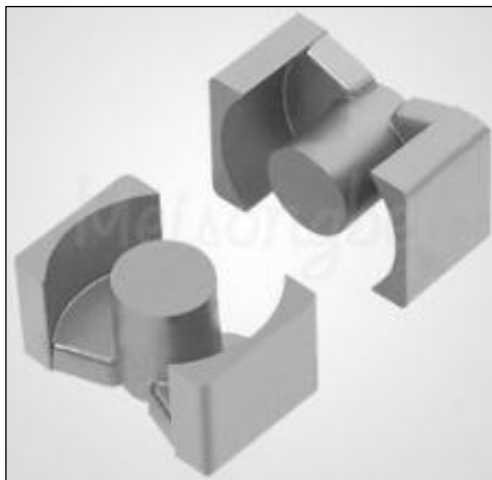


Fuente Power Design Magnetics Ferritas. [10]

### **2.2.9 NÚCLEOS PQ.**

Estos núcleos PQ han sido diseñados específicamente para fuentes de alimentación conmutada. Este diseño da una proporción optimizada de volumen en la zona de bobinado. Estos núcleos proporcionan una salida de potencia máxima con el mínimo peso, además de ocupar un área mínima en la placa de circuito impreso. Este núcleo tiene un eficiente diseño que busca disminuir los puntos calientes o de altas temperaturas en el núcleo, donde estos puntos tienen más presencia con otros diseños. Sus aplicaciones comunes son en transformadores de energía.

**Figura 20 Núcleo PQ**

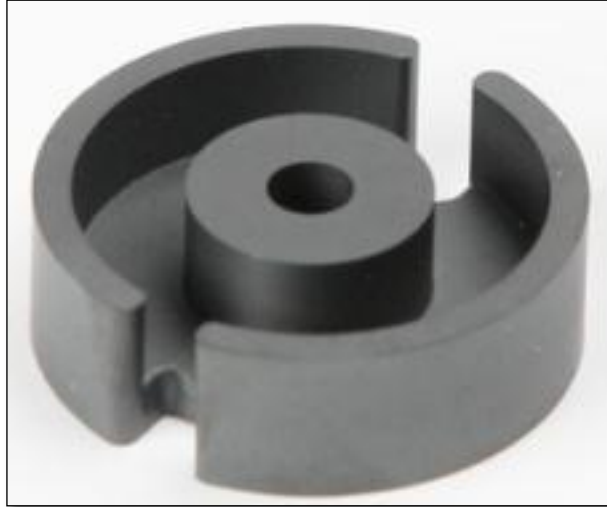


Fuente Power Design Magnetics Ferritas. [10].

### 2.2.10 NÚCLEOS POT.

Este tipo de núcleo POT presenta una buena estabilidad térmica y su geometría auto blindado aísla el bobinado de campos magnéticos o los efectos de otros elementos de circuitos circundantes. Sus aplicaciones comunes son de filtros y transformadores e inductores de telecomunicaciones.

Figura 21 Núcleo PQ



Fuente Power Design Magnetics Ferritas. [10]

### 2.2.11 NÚCLEOS RM.

Estos núcleos son diseñados para ofrecer todas ventajas magnéticas y mecánicas de los otros núcleos, además se le añadió la característica de maximizar el rendimiento por su mayor distancia disponible de bobinado y minimizar el blindaje magnético en comparación con el núcleo PQ.

**Figura 22 Núcleo RM**

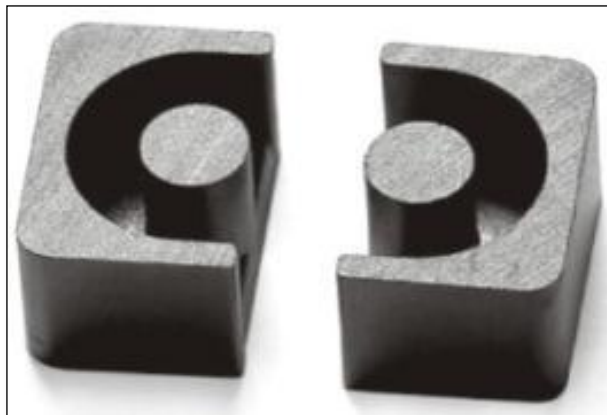


Fuente Power Design Magnetics Ferritas. [10]

### **2.2.12 NÚCLEOS EP.**

Los núcleos EP tienen un poste central, este núcleo encierra la bobina completamente a excepción de los terminales de la tarjeta de circuitos impresos. Esta forma particular minimiza el efecto de huecos de aire formados en las superficies de acoplamiento en el camino magnético y proporciona una relación de volumen grande para el espacio total para el bobinado. Estos núcleos EP proporcionan una excelente protección.

**Figura 23 Núcleo EP**



Fuente Power Design Magnetics Ferritas. [10]

### **2.3 SELECCIÓN DEL MATERIAL Y FORMA GEOMÉTRICA DEL NÚCLEO PARA LA HERRAMIENTA MAGNÉTICA.**

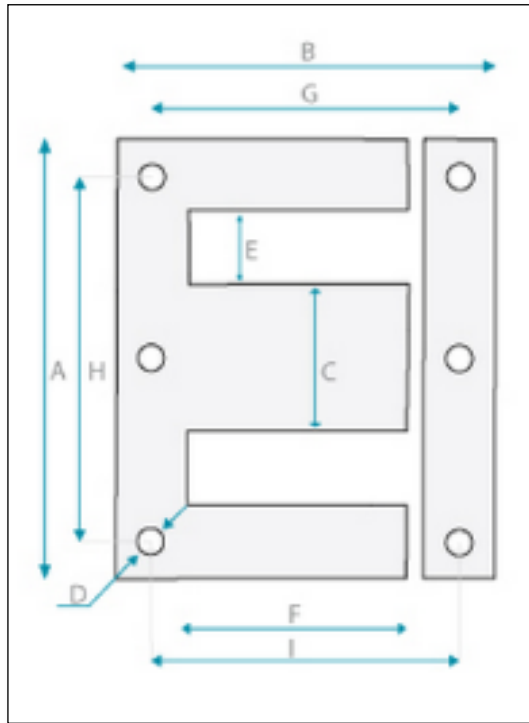
Para la selección del núcleo se tuvieron en cuenta los materiales y geometrías disponibles mencionados en las anteriores secciones, donde se reconoce que la geometría óptima para este núcleo es del tipo E debido a las siguientes consideraciones:

- Su presentación en láminas de material ferromagnético posibilita la construcción de núcleos magnéticos de varios espesores.
- Facilidad de montaje y disponibilidad comercial a nivel nacional en caso de construir otras herramientas magnéticas.
- No son óptimas las otras geometrías de núcleos mencionados anteriormente (sección 2.2) debido al poco espacio disponible para el arrollamiento de un bobinado, mientras que con la geometría seleccionada (tipo E) se posibilita un mejor bobinado.
- Con este tipo de núcleo puede desarrollarse un diseño geométrico óptimo que induzca un campo magnético perpendicular al flujo en la tubería.

Luego de investigar varios proveedores de láminas tipo E, se logra encontrar en el mercado nacional un laminado con dimensiones con ventajas de espacio disponible para un respectivo bobinado y un tamaño proporcional a la herramienta. Las láminas tipo E seleccionadas son de material de acero al silicio, las cuales tienen una permeabilidad relativa del orden de 3000 a 7000.

A continuación se muestra la lámina tipo E seleccionada para el respectivo diseño geométrico de la herramienta:

Figura 24 Lámina tipo E de acero al silicio.



Fuente Frana internacional

<http://www.franainternational.com/es/laminaciones-ei/47ustenitic.html> [11]

La siguiente tabla muestra las dimensiones de las láminas tipo E ofrecidas por Frana International [11], donde las dimensiones subrayadas son las escogidas, garantizando un espacio amplio para los respectivos bobinados. Además, el tamaño de las láminas seleccionadas es proporcional al diámetro de la tubería a utilizar de ½ pulgada.

**Tabla 3 Dimisiones de lámina tipo E.**

TIPO	A	B	C	D	E	F	G	H	I	KG.CM
EI.	40	34	13		7	20	=	=	27	0,084
EI.	48	40	16	3,5	8	24	=	=	34,5	0,116
EI.	54	45	18	3,5	9	27	36	45	=	0,149
EI.	57	47,5	19	3,5	9,5	28,5	=	=	42	0,166
EI.	60	50	20	3,5/4	10	30	40	50	45	0,184
EI.	66	55	22	4,5	11	33	44	55	47,5	0,221
EI.	75	62,5	25	4,5/5,5	12,5	37,5	50	62,5	55	0,287
EI.	84	70	28	4,5/6	14	42	56	70	62,5	0,362
EI.	96	80	32	5,5	16	48	64	80	68	0,472
EI.	108	90	36	5,5	18	54	72	90	79	0,599
EI.	114,2	95,1	38	5,5	19,1	57,1	75,4	94,3	=	0,669
EI.	135	112,5	45	7,5	22,5	67,5	90	112,5	99	0,934
EI.	150	125	50	8	25	75	100	125	110	1,154
EI.	180	150	60	9,0/10	30	90	120	150	134	1,665
EI.	192	160	64	11	32	96	128	160	144	1,887
EI.	220	190	70	12	40	110	150	180	=	2,538
EI.	240	200	80	11,5	40	120	160	200	=	2,947
EI.	300	250	100	12,5	50	150	190	250	=	4,641

Fuente Frana international. [11]

A continuación se muestra la hoja datos de la lámina tipo E escogida para la construcción del prototipo de la herramienta magnética.

**Tabla 4 Especificaciones técnicas de lámina tipo E.**

ITEM	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS
1	Designación de material: Acero al silicio de grano no orientado.
2	Designación Internacional: M 530-50 <sup>a</sup> Y M400-50 <sup>a</sup>
3	Composición %: -Carbono ©: 0.003 - Manganeso (Mn): 0.15 - Fósforo (P): 0.03 - Azufre (S): 0.001 - Silicio (Si): 1
4	Dimensiones: Espesor: 0.5 mm
5	Forma de presentación. Laminación troquelada en forma de E & I
6	Uso al cual va a destinarse: Fabricación de fuentes reguladas.
7	Límite de Elasticidad: 431 N / mm <sup>2</sup>
8	Tratamiento térmico: No tiene. Si tuviera sería recocido. Se puede ofrecer con o sin recocido.
9	Tipo de trabajo de la superficie: Superficie aislante
10	Proceso de obtención: Laminado en frío

Fuente Frana International [11]

**Tabla 5 Características magnéticas láminas tipo E**

CARACTERÍSTICAS MAGNÉTICAS	
INDUCCIÓN MAX:	1,0 TESLA
PERDIDAS DE MATERIAL:	1,7 W/ Kg.
ESPESOR:	0,5 mm

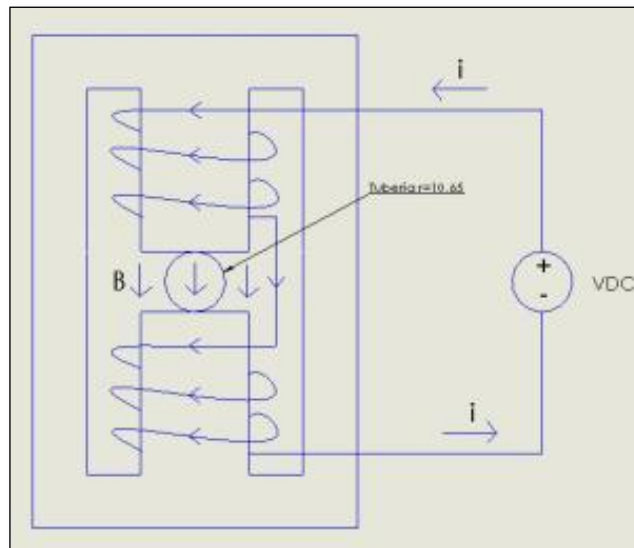
**Fuente Frana Internacional [11]**

El proveedor además de suministrar las características principales del laminado, provee las curvas de la Figura 26 y Figura 27 que describen el comportamiento en permeabilidad y pérdidas ante la magnetización del material.

Por disponibilidad en el mercado se trabajará el tipo M530 con permeabilidad relativa en un rango de 2000 a 6000, presentando saturación a 1T como se observa en la Figura 26.

A continuación se muestra el diseño propuesto para la herramienta magnética, la cual inducirá una densidad de campo magnético perpendicular a una tubería con 21.3mm de diámetro dispuesta en un entrehierro de la misma dimensión:

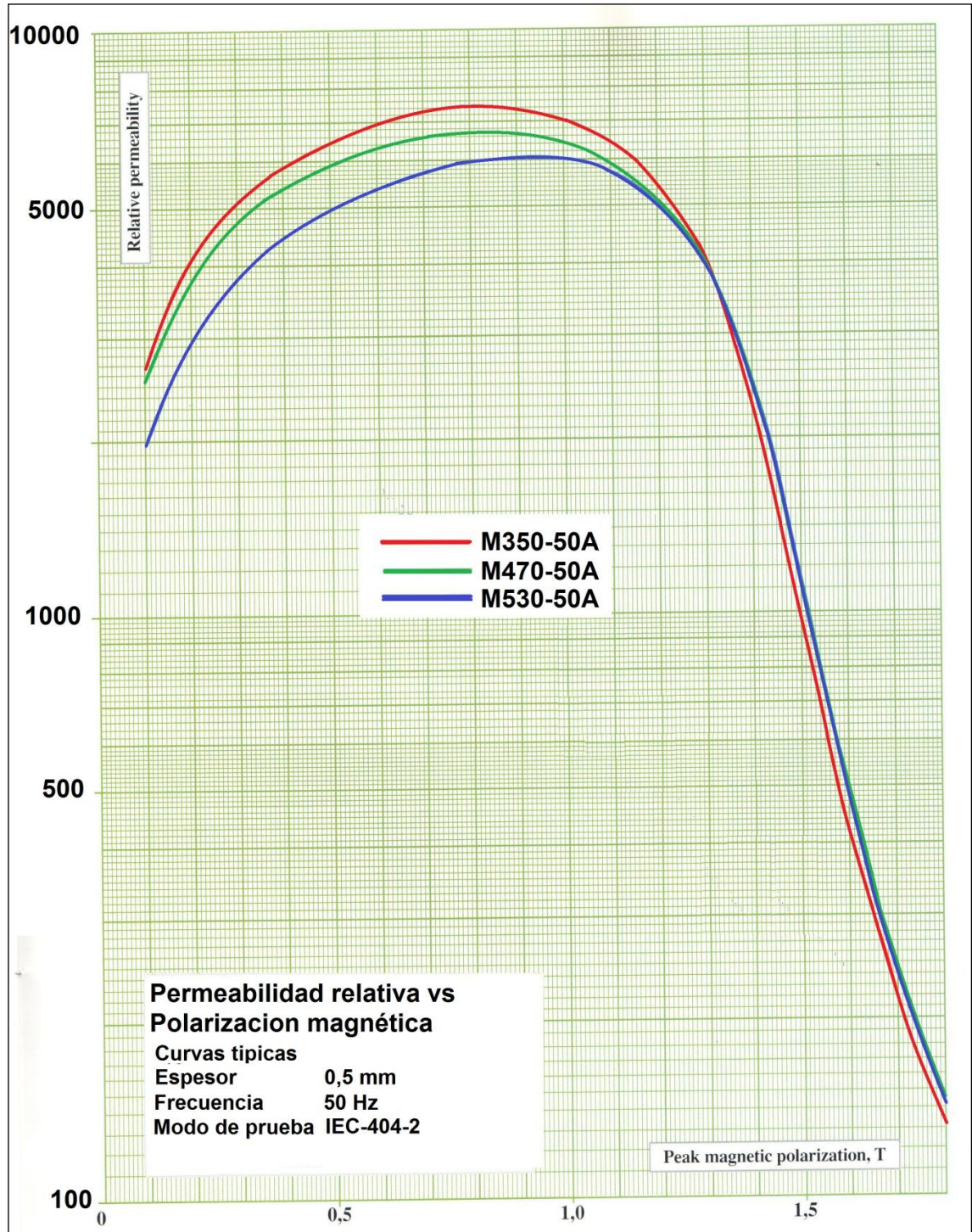
**Figura 25 Núcleo magnético con bobinados aditivos.**



**Fuente SolidWorks Autor.**

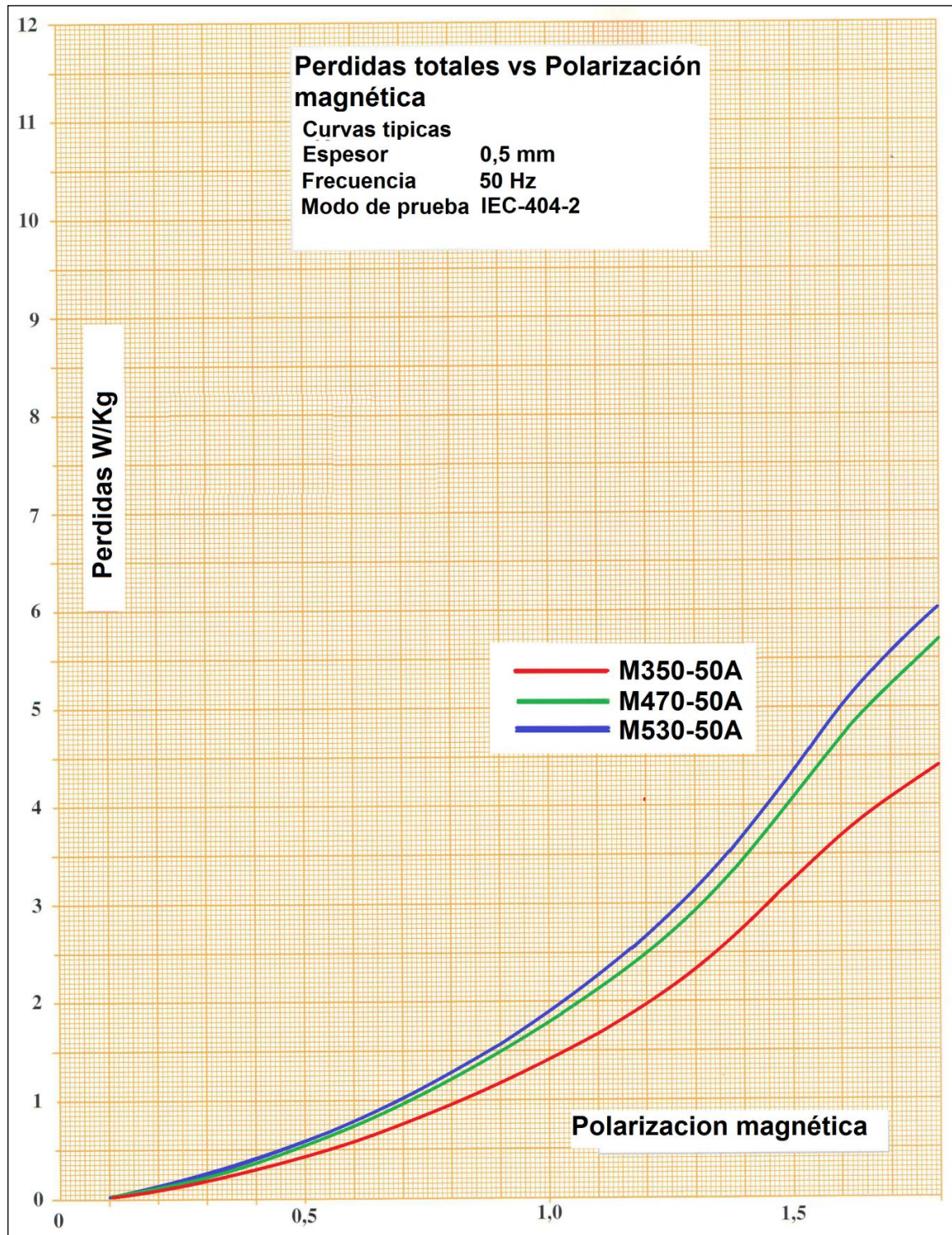
Como se observa en la figura anterior se desarrollaron bobinados aditivos para poder inducir un mayor campo magnético perpendicular a la tubería.

Figura 26 Permeabilidad Relativa vs Polarización Magnética de láminas tipo E



Fuente Frana International [11].

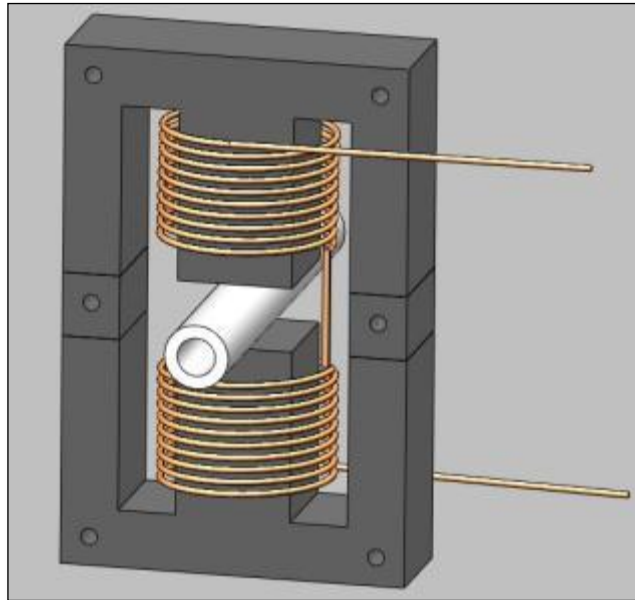
Figura 27 Perdidas vs Polarización Magnética de láminas tipo E.



Fuente Frana International [4]

A continuación se observa claramente la geometría de la herramienta magnética con ayuda del software SolidWorks<sup>8</sup>, donde se requieren dos acoples del mismo material que permitan un entrehierro de 21,3mm (diámetro de la tubería).

**Figura 28 Geometría de la herramienta magnética – SolidWorks**



**Fuente SolidWorks Autor**

## **2.4 ALAMBRE DE COBRE ESMALTADO.**

Hay muchos tipos y calidades de alambre, Así mismo el diámetro del alambre es variable y no hay un límite exacto cuando un hilo pasa a denominarse varilla o barra en vez de alambre. La principal característica del alambre es que permite enrollarse en rollos o bobinas de diferentes longitudes que facilitan su manipulación y transporte.

### **2.4.1 HILO DE COBRE ESMALTADO.**

En el alambre de hilo de cobre esmaltado, el cobre es trefilado en frío y tiene una pureza del 99% (cobre electrolítico, norma UNE 20 003) y el esmalte es resinoso (poliuretano modificado con poliéster, poliuretano, poliesteramida-theic, poliesteremida-theic Amida-Imida) lo que le da al aislamiento eléctrico posibilidades de mejorar algunas características (normas UNE EN 60317-20,-8,-13,-35,-38).

---

<sup>8</sup> Software de diseño para el modelado mecánico de sólidos, versión de prueba.

## 2.4.2 COBERTURAS

Existen varios tipos de coberturas para alambre, algunas dan resistencia a altas temperaturas (hasta 200 °C, índice de temperatura a 20.000 horas [CEI-IEC-172](#)), otras dan alta flexibilidad, sin quebrar en curvaturas con diámetros pequeños, otras son dotadas de colas de poliamida termo adherente, que al calentarse unen un alambre a otro sin perder el aislamiento y forman un paquete rígido, aunque los bobinados queden expuestos a la vista (yoke o yugo de tubo de TV, bobinas deflectoras de TV). Existen también coberturas de esmalte resistentes al exafluorocarbono (freón), que es usado frecuentemente como gas circulante en compresores de refrigeradores, neveras, frigoríficos, heladeras, acondicionadores de aire y como disolvente y limpiador industrial.

Recientemente y para suplir con éxito al rubro electricidad liviana, embarcada especialmente para uso aeronaval, se desarrollaron los hilos de aluminio esmaltados, con pérdidas eléctricas mayores pero que bajan el peso a la mitad para la misma potencia requerida. [12]

## 2.4.3 CALIBRE DEL ALAMBRE

El calibre de un alambre determina la corriente máxima que éste puede soportar. El calibre de alambre estadounidense (CAE, en inglés AWG – *American Wire Gauge*) es una referencia de clasificación de diámetros. Cuanto más alto es este número, más delgado es el alambre. El alambre de mayor grosor (AWG más bajo) es menos susceptible a la interferencia, posee menos resistencia interna y, por lo tanto, soporta mayores corrientes a distancias más grandes.

## 2.4.4 SELECCIÓN DEL ALAMBRE

El alambre de cobre es indispensable para la construcción de máquinas eléctricas, como lo son transformadores, motores y generadores. En este caso, es fundamental una buena elección del alambre pues de este depende la capacidad de corriente que soporte la herramienta magnética y la resistencia eléctrica de la misma.

Para la construcción de las bobinas que general el campo magnético se debe tener en cuenta la máxima corriente que va a soportar la herramienta, en este caso se dispone de una fuente DC de 20<sup>a</sup>, 30V, donde según la Tabla 6, será necesario usar un calibre AWG 14 en adelante ya que la corriente máxima de este calibre es de 21<sup>a</sup>. Tabla 6 Características alambre de cobre esmaltado.

Fuente Frana internacional

CALIBRE	ALAMBRE DESNUDO		ALAMBRE DOBLE CAPA			RESISTENCIA ELÉCTRICA	TENSIÓN DE EMOBINADO	CAPACIDAD DE CORRIENTE 200 °C
	AWG	Diámetro nominal (mm)	Peso (Kg/Km)	Mínimo incremento	Diámetro máx. (mm)	Longitud aprox. (m/Kg)	$\Omega/\text{Km a } 20\text{ °C}$	Kg
6	4,115	118,23	0,091	4,244	8,4	1,296	79,500	131
7	3,665	93,79	0,089	3,787	10,6	1,634	63,100	104
8	3,240	74,39	0,089	3,383	13,3	2,060	50,000	83
9	2,906	58,96	0,086	3,023	16,8	2,599	39,700	65
10	2,588	46,76	0,086	2,703	21,2	3,278	31,500	52
11	2,304	37,06	0,084	2,416	26,7	4,135	24,900	41
12	2,052	29,4	0,081	2,159	33,6	5,213	19,800	33
13	1,829	23,36	0,081	1,935	42,2	6,562	15,700	26
14	1,628	18,51	0,081	1,732	53,1	8,283	12,400	21
15	1,450	14,68	0,076	1,549	66,9	10,441	9,870	16
16	1,290	11,62	0,074	1,384	84,4	13,190	7,820	13
17	1,151	9,25	0,071	1,24	105,9	16,570	6,220	10
18	1,024	7,32	0,066	1,11	133,7	20,930	4,920	8,1
19	0,912	5,81	0,064	0,993	168,2	26,390	3,910	6,4
20	0,813	4,62	0,061	0,862	211,3	33,210	3,100	5,1
21	0,724	3,66	0,056	0,8	266	41,880	2,460	4,1
22	0,643	2,89	0,053	0,714	336,7	53,090	1,940	3,2
23	0,174	2,3	0,051	0,643	421,1	66,630	1,550	2,6
24	0,511	1,82	0,048	0,577	531,1	84,070	1,230	2
25	0,455	1,455	0,046	0,516	638,4	106,000	0,972	1,6
26	0,404	1,14	0,043	0,462	844,6	134,500	0,767	1,26
27	0,361	0,91	0,041	0,419	1057	168,400	0,612	1,01
28	0,320	0,715	0,041	0,363	1337	214,400	0,481	0,79
29	0,287	0,575	0,033	0,338	1658	266,500	0,387	0,64
30	0,254	0,451	0,033	0,302	2110	340,300	0,303	0,5
31	0,226	-	-	-	-	-	-	-
32	0,203	-	-	-	-	-	-	-

<http://www.franainternational.com/es/alambre-de-cobre/datos-tecnicos.html> [11]

La tabla anterior fue suministrada por Frana International [11], un proveedor nacional, además de indicarnos las siguientes características del producto (Tabla 7):

**Tabla 7 Características del cobre ofrecido por Frana International [11].**

<b>NOMBRE COMERCIAL</b>	INVEMID 200
<b>TIPO DE AISLAMIENTO</b>	Doble capa, con base de 55usteníti –amida y revestimiento externo amida – imida
<b>CLASE TÉRMICA</b>	200 °C
<b>NORMAS DE FABRICACIÓN</b>	NEMA NW – 1000, MW 35C, MW73C
<b>PROPIEDADES</b>	Optima resistencia mecánica. Resistencia a temperaturas elevadas Resistente a fluidos refrigerantes
<b>PRINCIPALES APLICACIONES</b>	Transformadores eléctricos de baja, media y alta potencia. Motores eléctricos. Balastos. Herramientas eléctricas.

Fuente Frana international

<http://www.franainternational.com/es/alambre-de-cobre/datos-tecnicos.html> [11]

Para la selección del calibre a usar en la herramienta magnética; además de la corriente máxima a soportar, fue necesario tener en cuenta el número de vueltas necesarias por cada calibre, es decir ver la corriente máxima que soporta cada calibre y hacer cálculos y simulaciones de cuantas vueltas son necesarias para llegar a generar la densidad de campo deseada, en este caso son mínimo 400mT. Por otro lado se tiene que verificar que el número determinado de vueltas que es posible realizar en el espacio estipulado para las bobinas, pues como ya se expuso anteriormente, este espacio depende del núcleo y sus dimensiones.

Otro factor importante a observar para la selección del calibre es la resistencia del alambre total en cada bobina, pues con este valor se calculará la corriente que pasa por las bobinas; y se analiza si el calibre soporta dichas corrientes y no supera la corriente nominal de la fuente (20ª).

Haciendo los anteriores análisis y basándonos en los calibres AWG 14, 16 y 18 se obtuvo la siguiente tabla:

**Tabla 8 Análisis del alambre de cobre en la herramienta magnética.**

AWG	Corriente Max [A]	diámetro	Nº vueltas posibles/bobina	Nº vueltas necesarias	Resistencia (Ohm* Km) a 20°C	Resistencia (Ohm* Km) a 70°C	Longitud/herramienta [m]	Resistencia/herramienta (ohm) 20°C	Resistencia/herramienta (ohm) 70°C
14	21	1,732	220	180	8,283	9,912	97,362	0,806	0,965
16	13	1,384	352	275	13,19	15,784	142	1,873	2,24
18	8,1	1,11	533	440	20,930	25,047	223,85	4,685	5,6

- N° de vueltas posibles/bobina:

Se obtiene este dato realizando cálculos aproximados del número de vueltas posibles en el núcleo por cada bobina, según el diámetro del calibre y la distancia específica del núcleo para ubicar las respectivas bobinas. Esta distancia limita la da el tipo de núcleo a utilizar, el cual fue de acero al silicio, que se explicará en detalle en la sección 2.3.

Este valor es un dato aproximado; pues todo depende de cómo se realice el embobinado y que tanto espacio es perdido en su proceso de construcción.

- N° vueltas necesarias:

Realizando una simulación (FEMM 4.2)<sup>9</sup> de la herramienta con sus respectivas dimensiones, se calcula el número de vueltas necesarias para obtener 400mT aproximadamente usando la corriente máxima que soporta cada calibre. Este valor se halla con el fin de compararlo con el número de vueltas posibles/bobina y verificar si es viable usar cada calibre en la herramienta.

Cabe resaltar que este valor depende netamente de la simulación y de introducir las características lo más aproximadas a la realidad para obtener buenos resultados, esto se explicará más adelante en el capítulo dedicado a simulaciones.

- Resistencia (Ohm\*Km) a 70°C:

La resistencia (Ohm\*Km) a 20°C es tomada de la Tabla 6, pero como se piensa trabajar con corrientes elevadas; esto va hacer que el alambre en las bobinas se caliente en exceso por lo que es conveniente analizar el alambre de cobre en condiciones de temperaturas altas, en este caso se asumió una temperatura de 70°C.

Para realizar el cálculo de la resistencia a otra temperatura fue necesario hacer uso de la resistencia a 0°C ( $R_0$ ) y su coeficiente de temperatura ( $\alpha_0$ ), usando las ecuaciones ( 2-1) y ( 2-2) se obtiene la resistencia a 70°C [13].

$$R_0 = \frac{1}{1 + \alpha_0 t_1} \quad ( 2-1)$$

$R_0 =$  resistencia cobre a temperatura de 0°C.

---

<sup>9</sup> FEMM 4.2, Finite Element Method Magnetics, software de simulación de circuitos eléctricos y magnéticos, de licencia libre.

$\alpha_0 = \text{coeficiente de temperatura del cobre a } 0^\circ\text{C} = 0.00427 \frac{1}{^\circ\text{C}}$ .

$t_1 = \text{temperatura conocida } ^\circ\text{C}$ .

$$R_x = R_0(1 + \alpha_0 t_2) \quad (2-2)$$

$R_x = \text{resistencia cobre a temperatura deseada}$ .

$t_2 = \text{temperatura deseada } ^\circ\text{C}$ .

Una vez se tiene este dato se realiza el cálculo para la longitud de alambre usado en cada calibre para la herramienta completa o sea las dos bobinas, ya que el valor arrojado por la ecuación (2) es la resistencia a la temperatura deseada por Km ( $\Omega \cdot \text{km}$ ), Los resultados se observan en la Tabla 8.

Según los datos obtenidos mediante cálculos aproximados los tres calibres son posibles de realizarlos pues el número de vueltas necesarias para generar 400mT como mínimo siempre es menor que el número de vueltas posibles en el núcleo lo que nos lleva a escoger el calibre por aquel que tenga mejor relación entre tensión, corriente y resistencia.

Con la siguiente información (Tabla 9) se puede observar cual calibre es idóneo para la fabricación de la herramienta.

**Tabla 9 Parámetros definitivos para la escogencia del cobre.**

Calibre	Corriente	Resistencia estimada	Resistencia máxima	Voltaje demandado
14	21	0,965	1,4285	20,265
16	13	2,24	2,3	29,12
18	8,1	5,6	3,7	45,36

Con la ley de Ohm se puede saber cuál es la resistencia que debe tener la bobina para hacer pasar la máxima corriente nominal en cada calibre, con este valor se verifica cual está por debajo para contemplar su uso.

Según esto la Tabla 9 indica que el calibre 18 no es apropiado para realizar el embobinado ya que este genera una resistencia mayor a la máxima permitida por el calibre cuando se aplica una tensión de 30V, la resistencia máxima posible es de  $3.7\Omega$  y la estimada por medio de cálculos es de  $5.6\Omega$ , se podría usar este calibre pero no se aprovecharía al máximo la fuente.

Por consiguiente quedan por escoger los calibre 14 y 16, los dos cumplen con el rango de resistencia pues están por debajo del máximo permitido, lo que lleva a pensar en la optimización de la herramienta como criterio de selección.

Analizando lo anterior se escogió el calibre 16 como calibre óptimo para la realización de las bobinas ya que consume menos corriente por herramienta, pensando que se va a llevar al máximo consumo, aunque se estaría trabajando en los límites de la fuente en cuanto a tensión, ya que demandaría 29.12V, pero la reducción en corriente es reducida en un 38% aproximadamente con respecto al calibre 14.

Se debe recordar que estos datos son una aproximación matemática y debe ser verificada por otro medio, ya que con el simulador no es posible estipularle cuanta tensión va a generar el campo, solo se especifica la magnitud de la corriente y por lo tanto, no se puede saber cuánta resistencia va a tener cada bobina.

Lo que nos lleva a hacer pruebas de laboratorio con estos dos calibre como mínimo para verificar los datos teóricos.

## **2.5 TUBERÍA DE ACERO INOXIDABLE**

Debido a estándares de la industria del petróleo es requisito trabajar con tuberías de acero inoxidable por las cualidades que estas prestan ante condiciones de trabajo extremas, haciendo cualquier otro material vulnerable a la corrosión y daños por las altas temperaturas y presiones de operación.

El acero inoxidable es clasificado en cinco familias diferentes [14]; cuatro de ellas corresponden a las particulares estructuras cristalinas llamadas: martensita, austenita, ferrita, dúplex (austenita más ferrita) y una última que son aleaciones endurecidas por precipitación.

### **2.5.1 ACEROS INOXIDABLES MARTENSÍTICOS**

Esta es la primera familia de acero inoxidable y sus principales características son:

- Moderada resistencia a la corrosión.
- Endurecidos por tratamiento magnético y por lo tanto se pueden desarrollar altos niveles de resistencia mecánica y dureza.
- Son magnéticos.
- Debido al alto contenido de carbono y a la naturaleza de su dureza, es de pobre soldabilidad.

Los aceros 59usteníticos59 son esencialmente aleaciones de cromo (Cr) y carbono ©. Donde el contenido de cromo es generalmente de 10,5 % a 18 % y el de carbono es alto, alcanzando valores de hasta 1,2%.

Las referencias 403, 410, 416, 420, 422, 431 y 440 de la serie 400 AISI<sup>10</sup> aplican a esta familia de aceros inoxidables 59usteníticos59.

### **2.5.2 ACEROS INOXIDABLES FERRÍTICOS**

Estos aceros inoxidables mantienen una estructura estable desde la temperatura ambiente hasta el punto de fusión, sus características son:

- Resistencia a la corrosión de moderada a buena, la cual se incrementa con el contenido de cromo y algunas aleaciones de molibdeno.
- Endurecido por trabajo en frío, no pueden ser endurecidos por tratamiento térmico.
- Son magnéticos.
- Su soldabilidad es pobre por lo que generalmente se eliminan las uniones por soldadura a calibres delgados.
- Usualmente de les aplica un tratamiento de recocido con lo que obtienen mayor suavidad, ductilidad y resistencia a la corrosión.
- Debido a su pobre dureza, el uso se limita generalmente a procesos de formado en frío.

Los 59ustenític son esencialmente aleaciones con cromo, donde su contenido es usualmente de 10,5 % a 30 % y contenidos limitados de carbono es normalmente de 0,08 %. Además pueden contener molibdeno, silicio, aluminio, titanio y niobio que promueven distintas características en el acero inoxidable.

Las referencias 407, 409, 430, 420, 434, 446 y 440 de la serie 400 AISI aplican a esta familia de aceros inoxidables 59ustenític.

### **2.5.3 ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS**

Esta familia de acero inoxidable comprende el mayor número de aleaciones disponibles. Su popularidad es debida a su alta resistencia a la corrosión con propiedades no magnéticas. Sus características son las siguientes:

- Excelente resistencia a la corrosión.

---

<sup>10</sup> American Iron & Steel Institute.

- Endurecido por trabajo en frío y no por tratamiento magnético.
- Excelente soldabilidad.
- Operación eficiente en altas temperaturas.
- Son no magnéticos.

Los 60 austeníticos se obtienen adicionando elementos tales como níquel, magnesio y nitrógeno. El contenido de cromo normalmente varía de 16 % a 26 % y el de carbono de 0,03 % a 0,08 %.

Esta familia se divide en dos categorías:

SERIE 300 AISI: Aleaciones cromo – níquel.

SERIE 200 AISI: Aleaciones cromo – magnesio – nitrógeno.

#### **2.5.4 ACEROS INOXIDABLES DÚPLEX**

Son aleaciones de cromo-níquel-molibdeno, donde sus características son las siguientes:

- Son magnéticos.
- No pueden ser endurecidos por tratamientos térmicos.
- Buena soldabilidad.
- La estructura dúplex mejora la resistencia a la corrosión de fractura bajo tensión en ambientes con iones de cloruro.

Los dúplex tienen un contenido de cromo de 18 % a 26% y de níquel de 4,5 a 6.5%. La adición de elementos de nitrógeno, molibdeno, cobre, silicio y tungsteno imparten ciertas características de resistencia a la corrosión.

#### **2.5.5 SELECCIÓN DE ACERO INOXIDABLE PARA LA TUBERÍA**

En conclusión, es necesario que la tubería empleada en el tratamiento magnético sea de acero inoxidable austenítico de las series 200 y 300 AISI debido a su excelente resistencia a la corrosión y principalmente a su propiedad no magnética. Esta propiedad no magnética garantiza que la densidad de campo magnético inducido por la herramienta magnética traspase la tubería y se realice el tratamiento magnético al fluido.

### 3 ESTUDIO TEÓRICO DE LA DISTRIBUCIÓN DEL CAMPO MAGNÉTICO

#### 3.1 PRINCIPIOS DE TEORÍA ELECTROMAGNÉTICA.

Como primera medida de diseño se cita la ley de Ampere que gobierna la producción de un campo magnético por una corriente:

$$\oint H * dl = I_{net} \quad (3-1)$$

$$Hl_c = Ni \quad (3-1)$$

Dónde:

H = Intensidad de campo magnético  $[\frac{A*v}{m}]$ .

I<sub>net</sub> = Corriente Neta que circula [A].

L<sub>c</sub> = Longitud media del núcleo [m].

La herramienta magnética a diseñar tiene como finalidad generar una densidad de flujo magnético de 400mT. Por ello, la ecuación que gobierna esta densidad y un flujo determinado es:

$$B = \mu H \quad (3-2)$$

$$\phi = BA = \frac{\mu NiA}{l_c} \quad (3-3)$$

Dónde:

B = Densidad de flujo magnético [T].

$\mu$  = Permeabilidad Magnética del material  $[\frac{H}{m}]$ .

H = Intensidad de campo magnético  $[\frac{A*v}{m}]$ .

$\phi$  = Flujo magnético  $[T * m^2]$ .

A = Área transversal de núcleo magnético  $[m^2]$ .

Un material ferromagnético se utiliza en la construcción de la herramienta magnética debido a que este presenta características importantes que posibilitan un eficiente flujo magnético gracias a su alta permeabilidad.

La permeabilidad del espacio libre es denominada así:

$$\mu_o = 4 * \pi * 10^{-7} H/m \quad (3-4)$$

Además, la permeabilidad de cualquier material comparada con la del espacio libre se denomina permeabilidad relativa así:

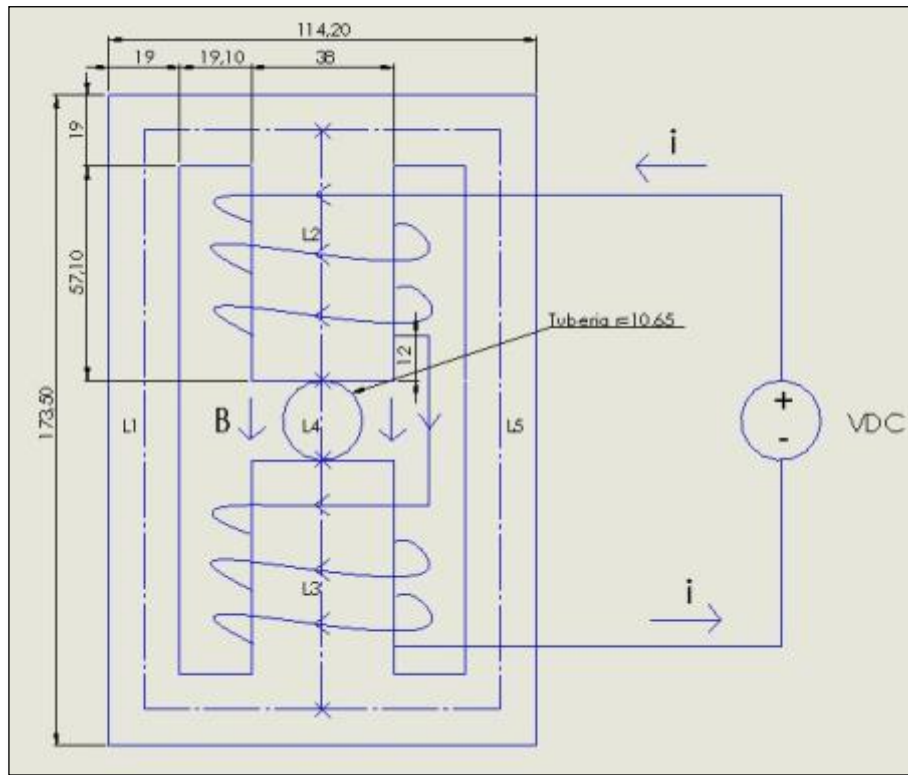
$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_o} \quad (3-5)$$

Donde la permeabilidad relativa es una medida útil para comparar la capacidad de magnetización de los materiales. Por tal motivo, es de gran utilidad en el diseño de la herramienta, ya que el material de esta debe poseer propiedades eficientes para poder generar una densidad de campo magnético de 400mT.

En conclusión, para el diseño y la construcción de la herramienta es indispensable el conocimiento de cada una de las ecuaciones que gobiernan el comportamiento magnético de un circuito magnético.

En la siguiente figura (Figura 29) se detallan las dimensiones del núcleo magnético y sus longitudes medias de núcleo que están sujetas a las dimensiones del laminado tipo E seleccionado. Además, el diseño del núcleo magnético busca encontrar un modelo matemático que describa el comportamiento de la herramienta para obtener criterios de selección en la viabilidad de construcción de la herramienta.

Figura 29 Dimensiones en [mm] del núcleo magnético con sus respectivas longitudes medias del núcleo ( $l_c$ ).



Fuente SolidWorks Autor.

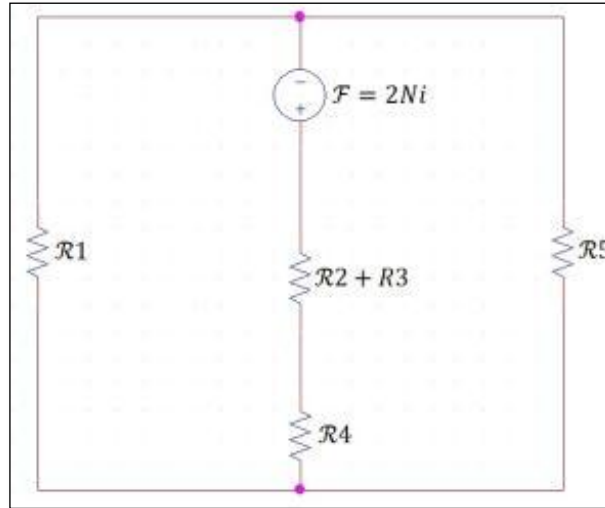
Para el estudio del comportamiento de la herramienta es necesario diseñar un circuito magnético de ésta que posibilite un análisis teórico.

### 3.2 CIRCUITO MAGNÉTICO DE LA HERRAMIENTA

El circuito magnético es de utilidad para estudiar el comportamiento del núcleo ante la inducción de un campo magnético por medio de una corriente. Es claro que el objetivo del diseño de la herramienta es encontrar las características geométricas óptimas que logren inducir un campo magnético de 400mT en el entre hierro. Donde posteriormente este campo será aplicado a muestras de crudo parafínico distribuido en una tubería de  $\frac{1}{2}$  pulgada de diámetro efectivo y 21,3mm de diámetro externo para un tratamiento magnético respectivo.

A continuación se muestra el circuito magnético de la herramienta para su posterior análisis teórico (Figura 30):

**Figura 30 Circuito magnético de la herramienta**



**Fuente Autor.**

Para conocer cada una de las reluctancias del anterior circuito magnético se cita la siguiente ecuación:

$$\mathcal{R} = \frac{lc}{\mu * A} A * v/Wb \quad (3-6)$$

Dónde:

$\mathcal{R}$  = Reluctancia  $A * v/Wb$

$lc$  = Longitud media del núcleo  $m$

$\mu$  = Permeabilidad  $H/m$

$A$  = Area sección transversal del núcleo  $m^2$

En los siguientes cálculos se utilizará la permeabilidad relativa de 5900, encontrando este valor en la Figura 26 con una polarización magnética promedio en los diferentes puntos del núcleo magnético de 750mT según los resultados de simulación mostrados en la Figura 62.

Sabiendo que las reluctancias  $\mathcal{R}1$  y  $\mathcal{R}5$  son las mismas se tiene:

$$\mathcal{R}1 = \frac{l1}{\mu * A1} A * v/Wb = \frac{l1}{\mu r * \mu o * A1} A * v/Wb \quad (3-7)$$

$$l1 = l5 = 0,2497m$$

$$A1 = A5 = 0,000722m^2$$

$$\mu r = 5900$$

$$\mu o = 4 * \pi * 10^{-7}H/m$$

Remplazando los datos anteriores en la ecuación ( 3-7) :

$$\mathcal{R}1 = \mathcal{R}5 = 46,6465 * 10^{3a} * v/Wb$$

Además, las reluctancias  $\mathcal{R}2$  y  $\mathcal{R}3$  también son las mismas:

$$\mathcal{R}2 = \frac{l2}{\mu * A2} A * v/Wb = \frac{l2}{\mu r * \mu o * A2} A * v/Wb \quad (3-8)$$

$$l2 = l3 = 0,0666m$$

$$A2 = A3 = 0,0382m^2$$

$$\mu r = 5900$$

$$\mu o = 4 * \pi * 10^{-7}H/m$$

Remplazando los datos anteriores en la ecuación ( 3-8) :

$$\mathcal{R}2 = \mathcal{R}3 = 6,2208 * 10^{3a} * v/Wb$$

Estando en serie estas reluctancias se tiene:

$$\mathcal{R}2 + \mathcal{R}3 = 12,4416 * 10^{3a} * v/Wb$$

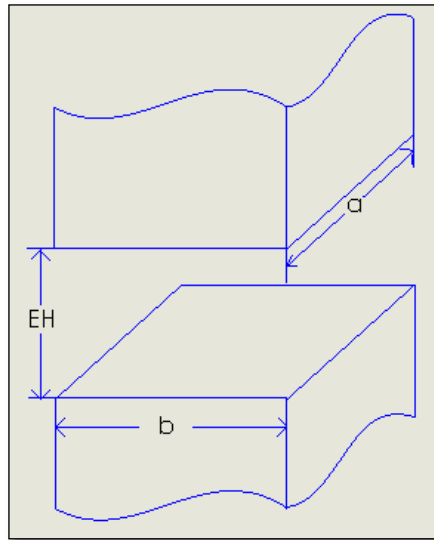
La reluctancia de entrehierro  $\mathcal{R}4$  es:

$$\mathcal{R}4 = \frac{l4}{\mu o * A4} A * v/Wb \quad (3-9)$$

$$l4 = 0,0213m$$

$$\mu o = 4 * \pi * 10^{-7}H/m.$$

Figura 31 Sección transversal del núcleo



Fuente SolidWorks Autor.

Para calcular la reluctancia  $R_4$  del entrehierro de la Figura 30 es necesario determinar qué tipo de entrehierro aplica en este caso.

Existen dos tipos de entrehierros:

- Entrehierros cortos.
- Entrehierros largos.

La ecuación para determinar si un entrehierro es corto es la siguiente:

$$A > 5EH \quad (3-10)$$

Fuente CIRCUITOS MAGNÉTICOS Y TRANSFORMADORES E.E. Staff del M.I.T [15].

Dónde:

$A$  = Área transversal del núcleo en  $\text{cm}^2$ . Según la Figura 31:

$EH$  = Longitud de entrehierro en cm.

$$A = a * b \quad (3-11)$$

Si no se cumple la ecuación ( 3-10 ), se asume que el entrehierro es largo y por tal motivo es necesario utilizar métodos complejos para los cálculos de circuito magnético [15].

Teniendo en cuenta la ecuación ( 3-10 ) se procede a determinar si aplica un entrehierro corto en este caso, teniendo en cuenta los siguientes valores:

$$a = b = 3,8cm$$

$$EH = 2,13cm$$

Remplazando los anteriores valores en la ecuación ( 3-10 ) se tiene:

$$14,44 > 10,65$$

Lo cual confirma que este entrehierro es corto y por tal motivo, se puede emplear la siguiente ecuación para hallar el área transversal en el entrehierro para el cálculo de la reluctancia  $R_4$ :

$$A_4 = (a + EH) * (b + EH)m^2. [15] \quad ( 3-12)$$

Según las dimensiones de la Figura 29 y Figura 31 con una profundidad en el diseño de la herramienta de 38mm se tienen los siguientes valores:

$$a = 0,038m$$

$$b = 0,038m$$

$$EH = 0,0213m$$

Remplazando en ( 3-12):

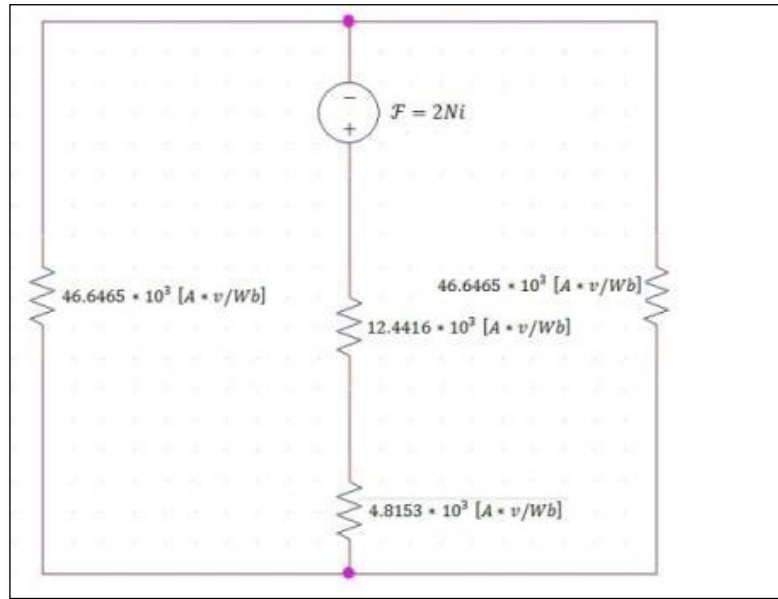
$$A_4 = 0,00352m^2$$

Posteriormente, remplazando en ( 3-9):

$$\mathcal{R}_4 = 4,8153 * 10^{6a} * v/Wb$$

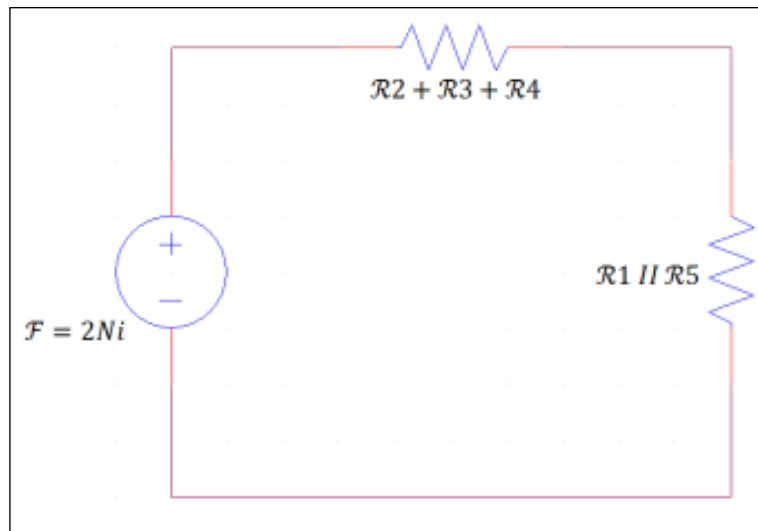
Finalmente el circuito magnético con sus valores previamente calculados es:

Figura 32 Circuito magnético de la herramienta.



Fuente Orcad Pspice Autor.

Figura 33 Circuito magnético reducido de la herramienta.



Fuente Orcad Pspice Autor.

### 3.3 BOBINADO DE LA HERRAMIENTA MAGNÉTICA.

Retomando el circuito magnético de la herramienta (Figura 33). La fuerza magnetomotriz total inducida por la corriente y un determinado número de vueltas se expresa así:

$$\mathcal{F} = 2Ni = \Phi(\mathcal{R}2 + \mathcal{R}3 + \mathcal{R}4 + \mathcal{R}1 \parallel \mathcal{R}5) \quad (3-13)$$

Esta fuerza magnetomotriz es doble por la inducción aditiva de campo magnético en las dos bobinas. Expresando el flujo magnético en función de la densidad de campo magnético y el área transversal del núcleo se tiene:

$$\mathcal{F} = 2Ni = BA(\mathcal{R}2 + \mathcal{R}3 + \mathcal{R}4 + \mathcal{R}1 \parallel \mathcal{R}5) \quad (3-14)$$

Despejando la corriente:

$$i = \frac{BA(\mathcal{R}2 + \mathcal{R}3 + \mathcal{R}4 + \mathcal{R}1 \parallel \mathcal{R}5)}{2N} \quad (3-15)$$

Teniendo la anterior expresión, se procede a calcular la corriente necesaria en las bobinas que induzcan una densidad de campo magnético de 400mT en el entrehierro. Para tal fin, se analizan los calibres de alambre esmaltado AWG. 14, 16 y 18 para determinar el de mejor disposición. Además, se debe tener en cuenta que el área transversal del núcleo para este entrehierro incrementó según la ecuación (3-12).

#### AWG 14

$$\text{Diámetro máximo} = 1,732\text{mm}$$

$$I_{\text{max}} = 21\text{A}$$

$$B = 400\text{mT}$$

$$A = 0,00352\text{m}^2.$$

$$N = 220 \text{ (Número de vueltas posibles/bobina con alambre AWG 14)}$$

$$\mathcal{R}1 = \mathcal{R}5 = 46,6465 * 10^{3\text{a}} * \text{v/Wb}$$

$$\mathcal{R}2 = \mathcal{R}3 = 6,2208 * 10^{3\text{a}} * \text{v/Wb}$$

$$\mathcal{R}4 = 4,8153 * 10^6 \text{ A} * \text{v/Wb}$$

Remplazando los datos anteriores en (3-15):

$$i = 16,1951 \text{ A.}$$

## **AWG 16**

*Diámetro máximo = 1,384mm*

*I<sub>max</sub> = 13 A*

Teniendo en cuenta la ecuación (3-15), se calcula la corriente necesaria para obtener una densidad de campo magnético igual a 400mT con los siguientes valores:

*B = 400 mT.*

*A = 0,00352 m<sup>2</sup>.*

*N = 352 (Número de vueltas posibles/bobina con alambre AWG 16).*

*R<sub>1</sub> = R<sub>5</sub> = 46,6465 \* 10<sup>3</sup> A \* v/Wb*

*R<sub>2</sub> = R<sub>3</sub> = 6,2208 \* 10<sup>3</sup> A \* v/Wb*

*R<sub>4</sub> = 4,8153 \* 10<sup>6</sup> A \* v/Wb*

Dónde:

$$i = 10,1219 A$$

## **AWG 18**

*Diámetro máximo = 1,11 mm*

*I<sub>max</sub> = 8,1 A.*

Nuevamente con la ecuación (3-15) y con los respectivos valores se obtiene la siguiente corriente necesaria para dicha densidad de campo:

*B = 400 mT*

*A = 0,00352 m<sup>2</sup>.*

*N = 533 (Número de vueltas posibles/bobina con alambre AWG 18)*

*R<sub>1</sub> = R<sub>5</sub> = 46,6465 \* 10<sup>3</sup> A \* v/Wb*

*R<sub>2</sub> = R<sub>3</sub> = 6,2208 \* 10<sup>3</sup> A \* v/Wb*

*R<sub>4</sub> = 4,8153 \* 10<sup>6</sup> A \* v/Wb*

Dónde:

$$i = 6,6846 A.$$

A continuación se muestran los resultados obtenidos de los anteriores cálculos:

**Tabla 10 Resultados del análisis matemático.**

AWG	Peso[Kg/Km]	Diámetro máx. [mm]	Resistencia [ $\Omega$ /Km]	# de vueltas Posibles/bobina	Corriente máx. [A]	Corriente que induce 400mT en EH. [A]	% de la I nominal
14	18,51	1,732	8,283	220	21	16,1951	77,12
16	11,62	1,384	13,19	352	13	10,1219	77,86
18	7,32	1,11	20,93	533	8,1	6,6846	82,53

Fuente Autor.

De la Tabla 10 se puede confirmar la viabilidad del alambre AWG 16 para el bobinado de la herramienta magnética, debido a que este operaría al 77,12 % de la corriente nominal; teniendo aproximadamente el mismo rango de operación que el alambre AWG 14 pero con un menor consumo de corriente. Por otro lado, el alambre AWG 18 presenta el menor rango de operación disponible estando a un 82,53 % de su corriente nominal. Finalmente por estas razones y las mencionadas en la sección 3.4.4 los alambres AWG 14 y 18 son descartados para la construcción de las bobinas.

#### 4 DISEÑO Y SIMULACIÓN DE LA HERRAMIENTA

Este capítulo permite observar el comportamiento del campo magnético producido en un núcleo de ferrita tipo E100/60/28<sup>11</sup> y especialmente Acero al silicio de grano no orientado M-43<sup>12</sup>. Que a partir de simulaciones se va acercando a un comportamiento más real, se tienen a consideración los parámetros de densidad de flujo, permeabilidad del material, temperatura, corriente en las bobinas y número de espiras, así como el análisis de la geometría de la herramienta y los cambios respectivos en pro de concentrar el flujo de campo magnético.

Las simulaciones se realizaron analizando principalmente la densidad de flujo magnético variando las características de los embobinados que producen el campo magnético (corriente en las espiras, número de espiras), a partir de estas simulaciones se pudo acercarse al comportamiento real de la herramienta magnética

<sup>11</sup> E100/60/28: Núcleo de ferrita tipo E con dimensiones: (100,3 x 59,4 x 27,5 mm )

<sup>12</sup> Acero al silicio de grano no orientado, laminación troquelada en forma de E & I.

y facilito la escogencia del material y la forma que va a tomar la misma así como el calibre del cobre en las bobinas.

#### 4.1 ACERCAMIENTO DEL PROTOTIPO DE LA HERRAMIENTA MAGNÉTICA.

Las simulaciones se realizan en primera instancia para dar una idea del comportamiento del campo magnético utilizando las dimensiones de un núcleo comercial y variando la permeabilidad basándose en la curva de magnetización de material ferrita tipo 43<sup>13</sup> y láminas de acero al silicio M-43 y M-45, teniendo presente la temperatura a la cual pueda estar operando la herramienta, debido a que la permeabilidad se ve afectada por la temperatura. De igual manera se simuló la herramienta basada en el núcleo tipo E100/60/28 de 3C90<sup>14</sup>. Según nomenclatura de Magnetics y Ferroxcube<sup>15</sup>.

#### 4.2 DESCRIPCIÓN DE LAS SIMULACIONES

Se analizaron núcleos de ferrita y de hierro al silicio comercial, en este caso se escogió un núcleo tipo E100/60/28 según los estándares de Magnetics y Ferroxcube elaborado con material ferrita tipo 43 y 3C90 al igual se analizó la herramienta con láminas de acero al silicio E/114/75/38 M-43 y M-45 según Frana International [11].<sup>16</sup>

Donde fue posible encontrar curvas características de los materiales que relacionan los parámetros que son de importancia en la elaboración de la herramienta (ver Figura 34 a Figura 37), estas figuras son suministradas por el fabricante del núcleo de material C390 y en hojas de datos del material suministradas por el fabricante [16]. Además se muestra la curva de magnetización del material ferromagnético acero al silicio Figura 38 que es obtenida del simulador FEMM 4.2. El cual Simula el comportamiento del material acero al silicio M-43 que tiene por defecto en sus librerías.

---

<sup>13</sup> **Ferrita tipo 43:** Material ferromagnético, permeabilidad inicial  $\mu=800(20\text{ }^{\circ}\text{C})$

<sup>14</sup> **3C90:** material ferromagnético, permeabilidad relativa  $\mu=2300(25^{\circ}\text{C}, \leq 10\text{KHz})$ .

<sup>15</sup> Magnetics y Ferroxcube son proveedores reconocidos de componentes de ferrita.

<sup>16</sup> Empresa nacional dedicada a la fabricación y comercialización de núcleos ferromagnéticos y componentes utilizados en máquinas eléctricas.

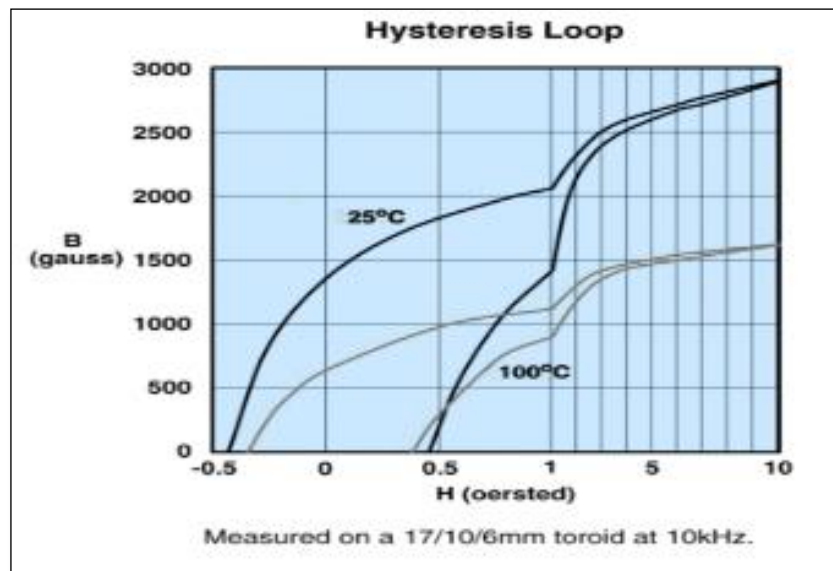


Figura 34 Curva de histéresis ferrita 43, B [G]<sup>17</sup> Vs H [Oe]<sup>18</sup>. [17]

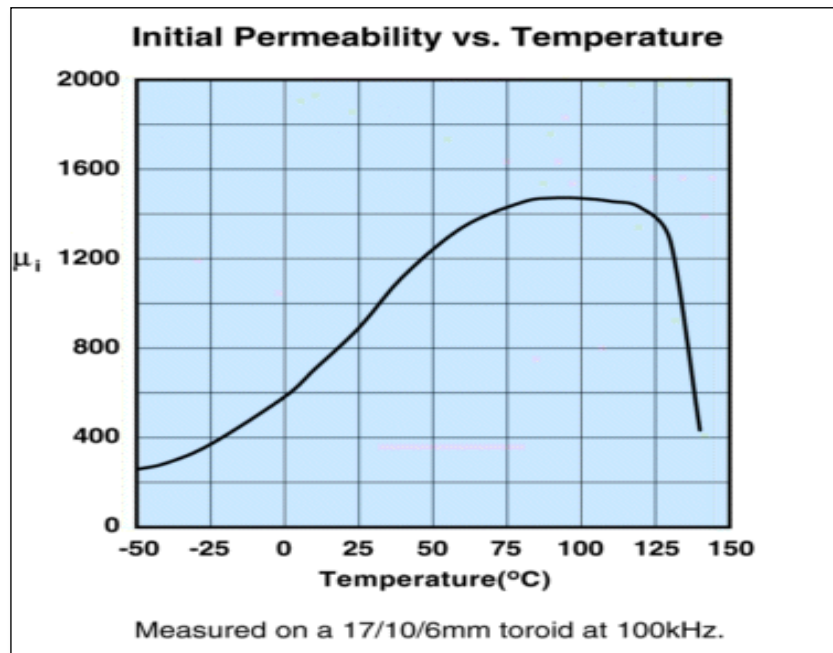


Figura 35 Curva de permeabilidad contra temperatura Ferrita 43 [17].

<sup>17</sup> G, Gauss: unidad de media del campo magnético en el Sistema Cegesimal de Unidades (CGS), 1T=10,000Gs

<sup>18</sup> Oe, Oersted: es la unidad de la intensidad de campo magnético en el sistema cegesimal,  $1 Oe = \frac{1000}{4\pi} A/m$

Figura 36 Curva de histéresis ferrita 3C90, B [mT] Vs H [A/m] [16].

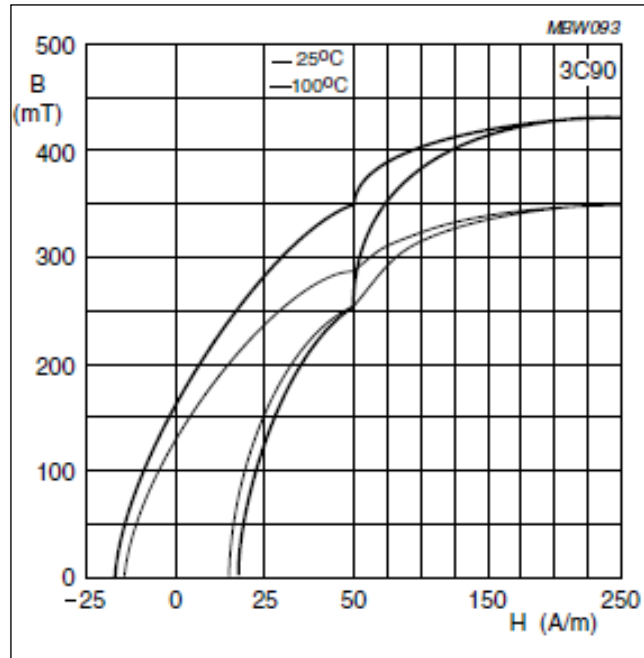


Figura 37 Permeabilidad relativa Vs Temperatura (°C), ferrita 3C90 [16].

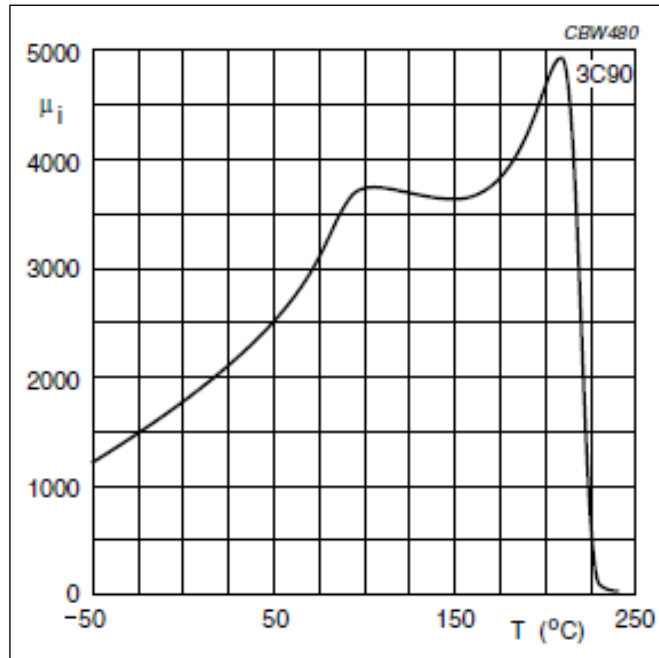
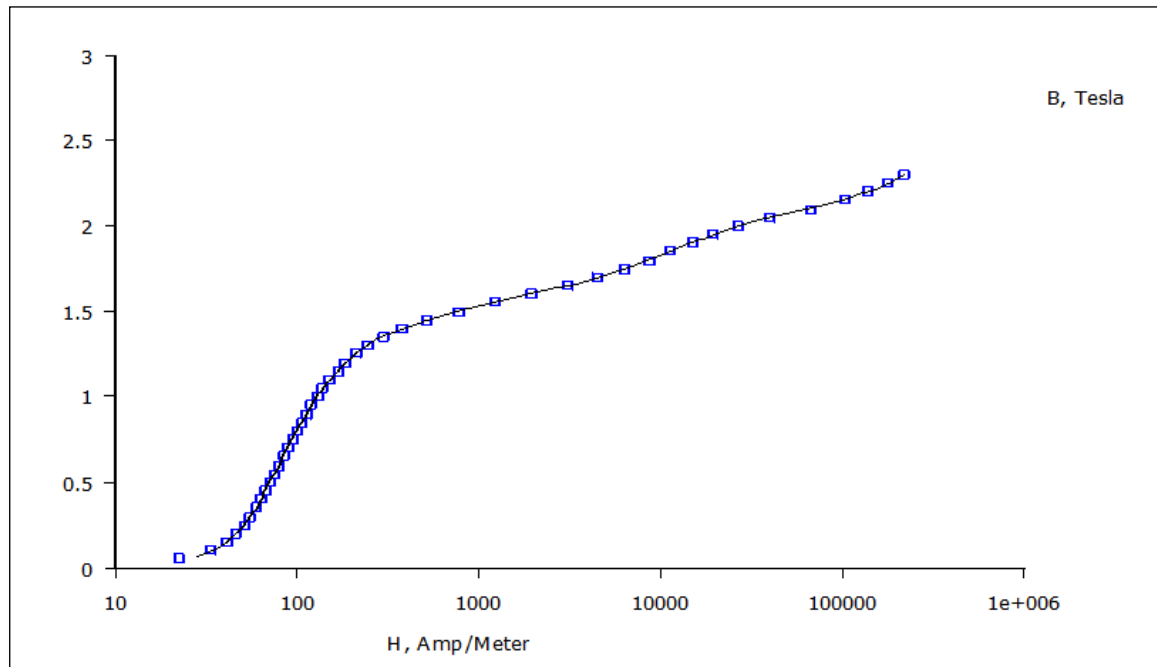


Figura 38 B [T] Vs H [A/m] acero al cilicio M-43FEMM.



### 4.3 SIMULACIONES PRELIMINARES.

#### 4.3.1 PROTOTIPO.

A continuación se muestra el primer bosquejo realizado del prototipo (Figura 39), consta de dos núcleos tipo E y una adecuación en las columnas laterales con el fin de cerrar el circuito magnético y hacer fluir el campo magnético, estas cuñas laterales deben ser del mismo material del núcleo, además de un corte semicircular en la columna central para la adecuación de la tubería por donde va a fluir el crudo, en la banco de pruebas.

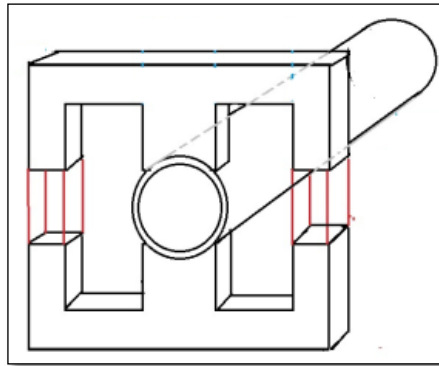


Figura 39 Bosquejo prototipo de la herramienta, Fuente: Autor.

A continuación se irán describiendo las diferentes simulaciones realizadas y los respectivos resultados, las simulaciones estarán buscando trabajar una corriente promedio de  $10^a$ , pensando trabajar a media carga de la fuente de tensión disponible, así se tendrá un margen amplio a la hora de necesitar más corriente en la fabricación de la herramienta.

#### 4.3.2 SIMULACIÓN CON FERRITA 43 E55/28/25. HERRAMIENTA (H1)

##### 4.3.2.1 Dimensiones de la herramienta.

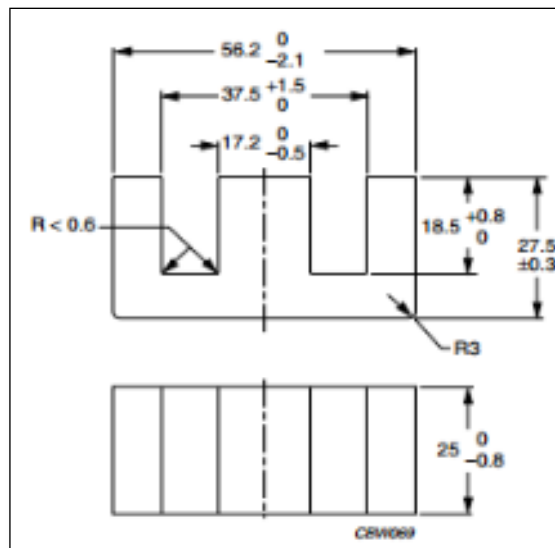


Figura 40 Dimensiones núcleo ferrita E55-28-25 Ferroxcube [18] medidas en [mm].

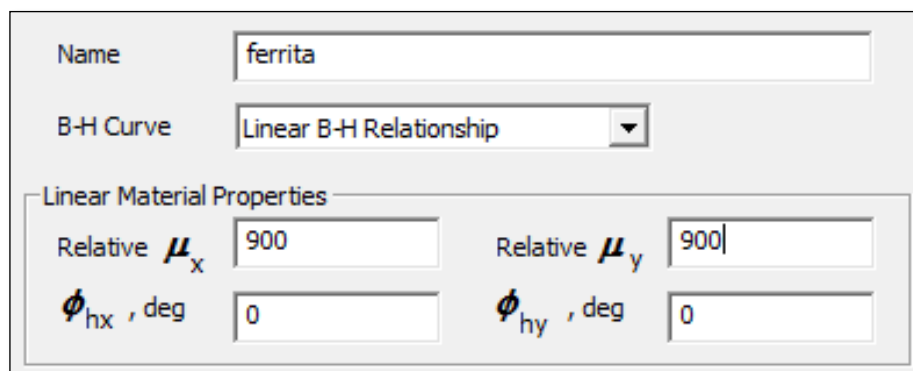
En primera instancia, las simulaciones se realizaron para observar el comportamiento del campo magnético de acuerdo con las dimensiones de un núcleo magnético comercial E/55/28/25 [18], así mismo variando la permeabilidad

en base a la curva de magnetización del material del núcleo de ferrita, teniendo presente la temperatura de operación de la herramienta, debido a que la permeabilidad varía dependiendo de la temperatura de operación del prototipo, tal como se observa en la curva de la Figura 35 y Figura 37.

#### 4.3.2.2 Simulación a 25 (°C), ferrita 43.

Según la Figura 35 a 25 °C la permeabilidad es de 900, se adecuó el simulador para obtener esta característica como se observa en la Figura 41.

El embobinado se simuló con una corriente de (10 a 20<sup>a</sup>) de DC usando 235 vueltas.



The image shows a software configuration window for a material named 'ferrita'. The 'B-H Curve' is set to 'Linear B-H Relationship'. Under 'Linear Material Properties', the relative permeability  $\mu_x$  and  $\mu_y$  are both set to 900. The phase angles  $\phi_{hx}$  and  $\phi_{hy}$  are both set to 0 degrees.

Name	ferrita		
B-H Curve	Linear B-H Relationship		
Linear Material Properties			
Relative $\mu_x$	900	Relative $\mu_y$	900
$\phi_{hx}$ , deg	0	$\phi_{hy}$ , deg	0

Figura 41 Configuración del software

Después de hacer varios cambios en la corriente del embobinado en la simulación trabajando con 235 vueltas se obtuvo una corriente aproximada de 11<sup>a</sup> con la cual se obtuvo una densidad de flujo mínima de 404 mT.

También se pudo haber cambiado el número de vueltas pero en este caso se redujo la corriente con el fin de usar un alambre de calibre menor para las bobinas.

Usando estos parámetros en el simulador FEMM4.2 sin tener en cuenta la saturación del material, se obtuvo las siguientes imágenes, las cuales indican el comportamiento del material en función de la densidad del campo magnético:

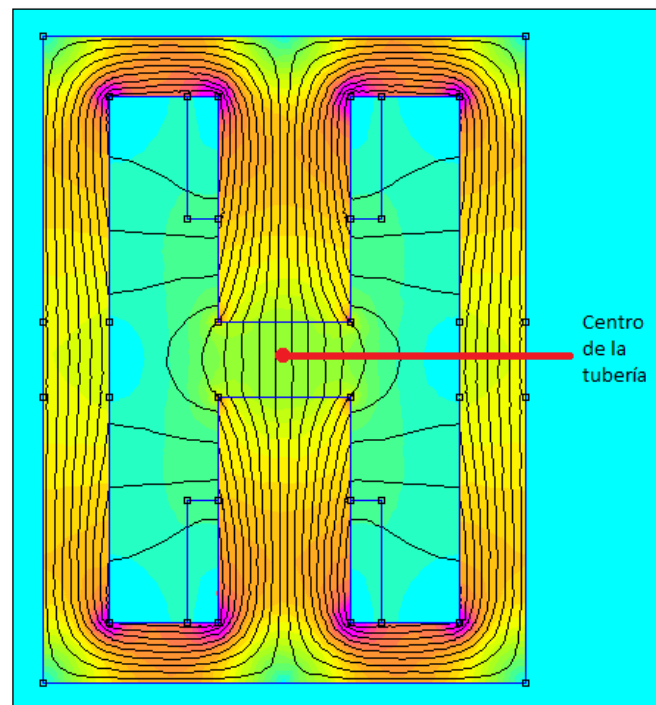


Figura 42 Comportamiento densidad de flujo magnético (B)

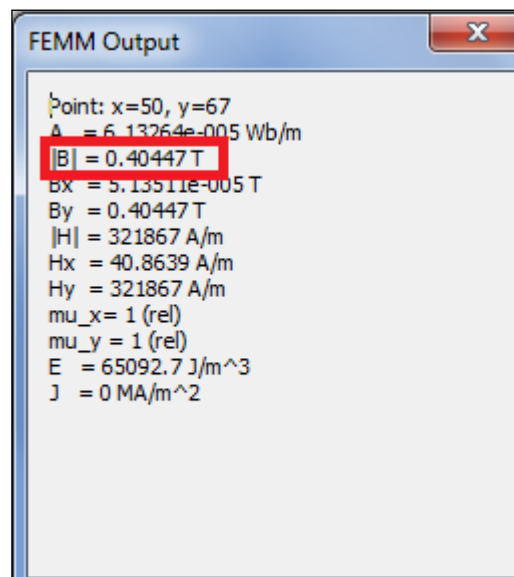


Figura 43 Resultados de simulación en el centro de la tubería.

Como se observa en la figura anterior (Figura 43), la densidad de flujo magnético en el punto que representa el centro de la tubería es de 404mT, donde se espera como mínimo 400mT.

Los valores finales de la simulación fueron:

Corriente: 11<sup>a</sup>.

Nuero de bobinas: 2.

Número de vueltas por bobina: 235

Densidad de flujo: 404mT.

#### 4.3.2.3 Simulación a 50 (°C), ferrita 43(H1).

Según la figura 14 a 50 °C la permeabilidad es de 1200.

El embobinado se simuló con una corriente de 11<sup>a</sup> de DC y realizando 400 vueltas.

Usando estos parámetros en el simulador FEMM sin tener en cuenta la saturación del material.

Se obtuvieron los siguientes resultados:

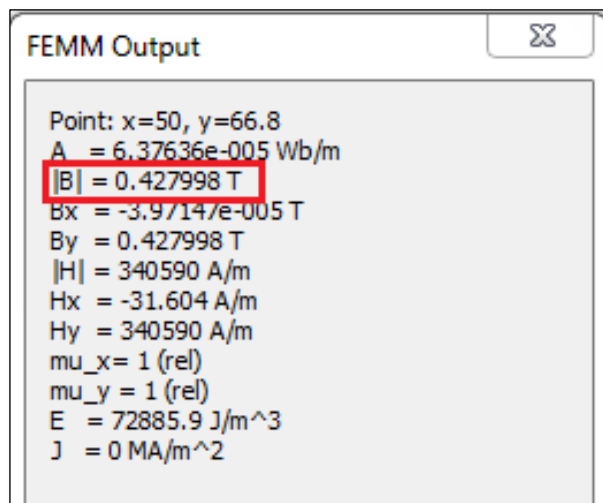


Figura 44 Resultados de simulación en el centro de la tubería

Como se observa en la anterior Figura 44 la densidad de flujo magnético en el punto que representa el centro de la tubería es de 428mT.

Los valores finales arrojados por la simulación fueron:

Corriente: 11<sup>a</sup>.

Nuero de bobinas: 2.

Número de vueltas por bobina: 200

Densidad de flujo: 428mT.

### **4.3.3 SIMULACIÓN AGREGANDO EFECTOS DE SATURACIÓN.**

Para mejorar la simulación se incluyó el efecto de saturación del núcleo de la herramienta, para esto se analizó la curva de magnetización del material, obteniendo así, valores congruentes con las capacidades reales del prototipo a construir.

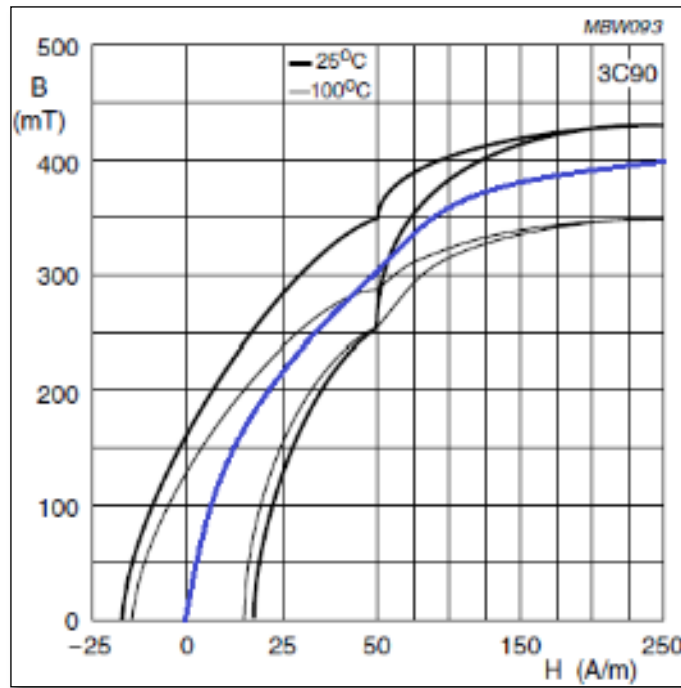
#### **4.3.3.1 SIMULACIÓN E55/28/21 – 3C90, HERRAMIENTA (H2)**

En esta ocasión se utilizó un núcleo tipo E55/28/21(Figura 36 y Figura 37) 3C90, se hizo una tabla con el mayor número de valores de intensidad de campo con sus correspondientes valores de densidad de flujo basado de la figura 15 con el fin de obtener una nueva curva que represente el comportamiento del material a 75°C, con el fin de introducir estos valores al software de simulación y obtener resultados más exactos.

La línea azul de la Figura 45, es el resultado de interpolar los valores de la curva de magnetización a 25° y a 100 °C (Figura 36), por lo tanto, la curva intermedio representa la relación entre la intensidad H y la densidad de flujo B a una temperatura de 75 °C.

La línea azul de la Figura 45 indica la modificación que se hizo y representa la relación entre la intensidad de campo H y la densidad de flujo magnético B a 75 °C.

Figura 45 Curva de saturación de ferrita a 75°C, 3C90 [19].



Modificado por el autor

Los datos obtenidos fueron los mostrados en la Tabla 11.

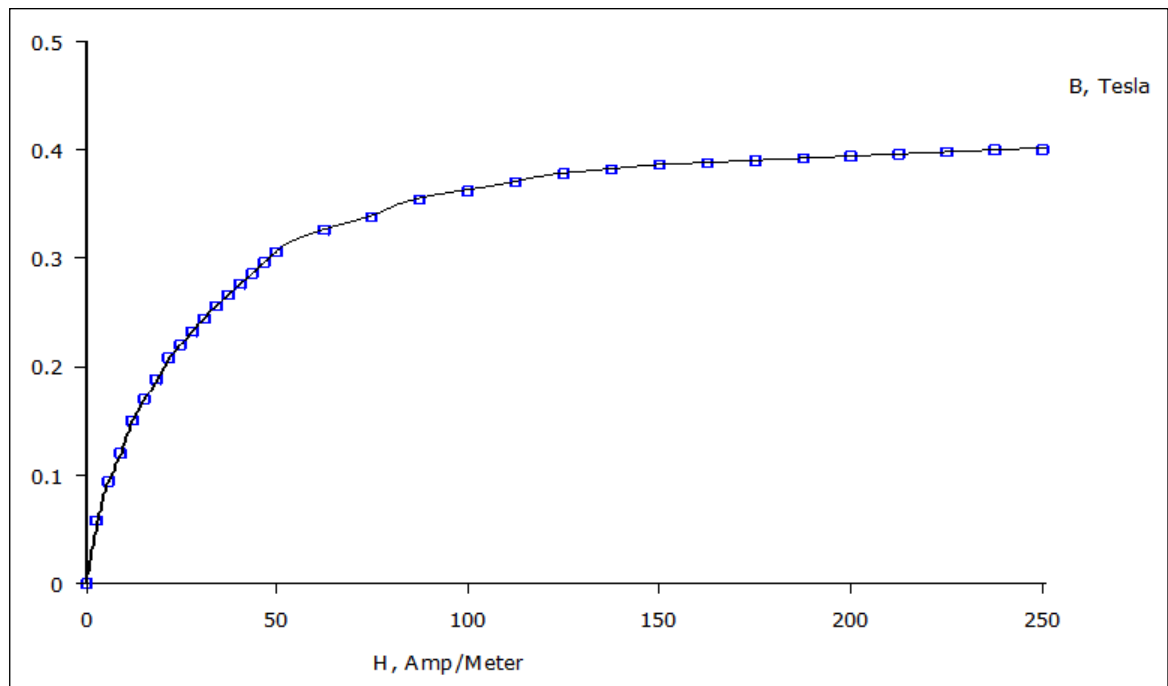
Tabla 11 Curva de saturación de la ferrita 3C90 a una temperatura de 75 °C.

B [T]	H [A/m]	B [T]	H [A/m]
0	0	0,325	62,5
0,05625	3,125	0,3375	75
0,09375	6,25	0,353846	87,5
0,11875	9,375	0,361538	100
0,150	12,5	0,36923	112,5
0,16875	15,625	0,376922	125
0,1875	18,75	0,380768	137,5
0,20625	21,875	0,384614	150
0,21875	25	0,386537	162,5
0,23125	28,125	0,38846	175
0,24375	31,25	0,390383	187,5
0,255	34,375	0,392306	200
0,265	37,5	0,394229	212,5
0,275	40,625	0,396152	225
0,285	43,75	0,398076	237,5
0,295	4,875	0,400	250
0,305	50		

Fuente Autor

Una vez se introducen los datos anteriores en el simulador, este nos proporciona una curva que representa el comportamiento que va a tomar el material en cada una de las simulaciones, a continuación se muestra dicha curva arrojada por el simulador.

**Figura 46 B vs H, simulador FEMM, ferrita 3C90.**



**Fuente FEMM4.2 Autor.**

Con el comportamiento del material en el simulador, se prosiguió a simular la herramienta magnética en busca de un mínimo de flujo magnético de 400mT.

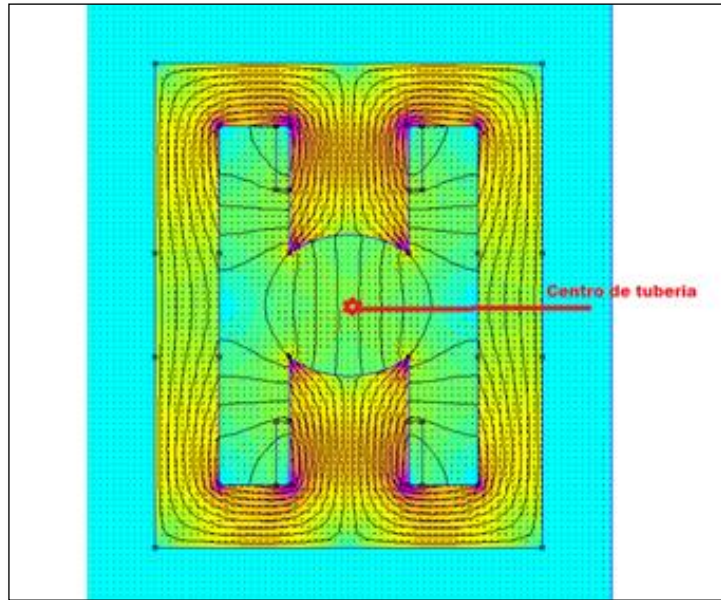


Figura 47 Comportamiento densidad de flujo magnético (B)

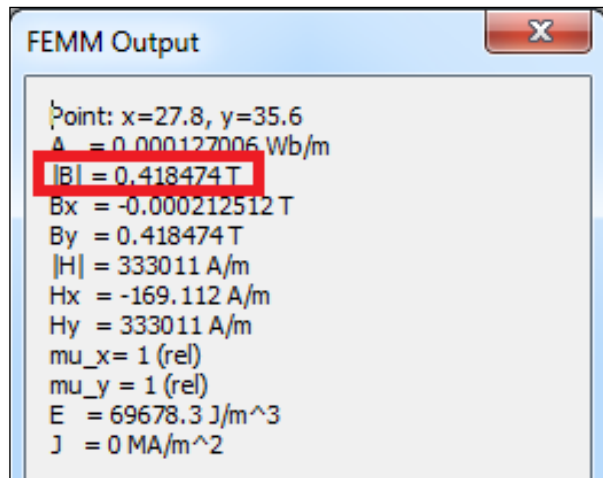


Figura 48 Resultados de simulación en el centro de la tubería

Con el fin de obtener un flujo mínimo de 400mT se utilizó una corriente de  $10^9$  y un bobinado de 350 vueltas, en esta ocasión se modificó la herramienta recortando en forma curva las terminales de la columna central, en esta ocasión hubo un cambio con respecto a las anteriores simulaciones, la corriente se mantuvo pero se disminuyó el número de vueltas en un 12.5%, el uso de este material junto con el comportamiento de la saturación tuvieron los siguientes resultados:

Corriente: 10<sup>a</sup>.

Nuero de bobinas: 2.

Número de vueltas por bobina: 350

Densidad de flujo: 418mT.

#### 4.3.4 SIMULACIÓN CON ACERO AL SILICIO.

Con el fin de ver el comportamiento de la herramienta con otros materiales se buscó en el mercado nacional y se obtuvo láminas de acero al silicio de grano no orientado M-43 o también denominado M530-50<sup>a</sup>, al igual se deseaba aumentar las dimensiones del núcleo pues con los análisis anteriores no era posible hacer un bobinado con las vueltas necesarias en el espacio correspondiente al núcleo E/114/75/38.

A continuación se presentan las dimensiones de cada lámina de acero al silicio M-43.

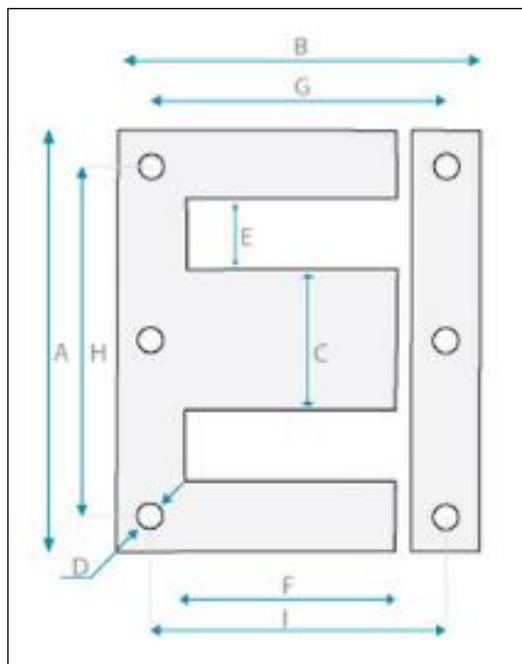


Figura 49 Dimensiones núcleo E/114/75/38 M-43. [11].

Se simuló la herramienta construida a partir del núcleo de geometría tipo E/114/75/38 acero al silicio M-43 (Figura 49).

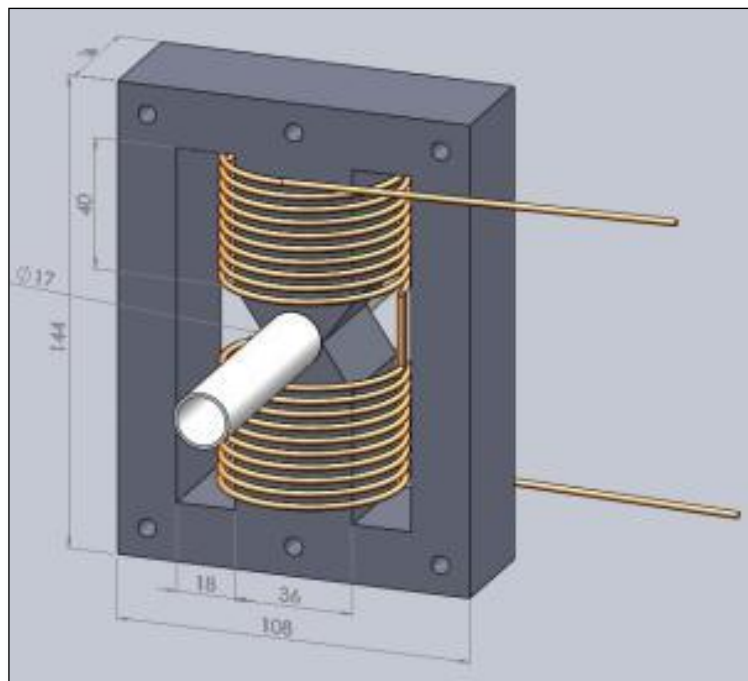
En donde las dimensiones se establecen de acuerdo con las tablas del fabricante de la siguiente manera (Tabla 3):

- A:** longitud: 114,2 mm
- B:** ancho: 95,1 mm
- C:** ancho columna central: 38 mm
- D:** diámetro agujero: 5,5 mm
- E:** ancho ventana: 19,1 mm
- F:** longitud ventana: 57,1 mm
- G:** distancia entre agujeros: 75,4 mm
- H:** distancia entre agujeros: 94,3 mm
- I:** distancia entre agujeros centrales: 79 mm

Se va a especificar cada cambio que se hizo en la geometría del núcleo en la búsqueda de un modelo que según las simulaciones se obtenga un mejor alcance en cuanto a densidad de flujo y corriente.

#### 4.3.4.1 Diseño 1, herramienta (H3)

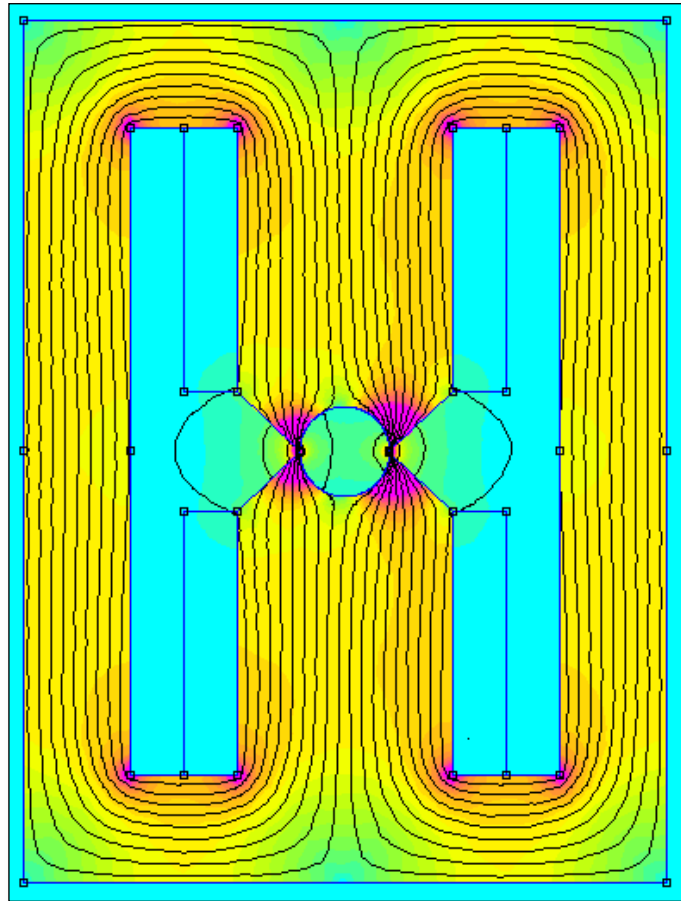
Figura 50 Modelo herramienta (H3)



Fuente SolidWorks Autor

Para obtener una mayor concentración de campo magnético se pensó en un acople completo de la tubería de acero inoxidable con la herramienta de tal forma que la línea de transporte quede totalmente encerrada por la columna central (Figura 50). Realizando las simulaciones se observó que en éstas condiciones el

campo magnético se concentra en los extremos laterales del núcleo, pero en el centro del entrehierro la densidad de campo es muy poca, los resultados se muestran en la siguiente figura cromatografía:



**Figura 51** Distribución de la densidad de campo magnético en geometría núcleo H3.

A continuación se relaciona una gama de colores en función de la densidad de campo magnético arrojada por el simulador.

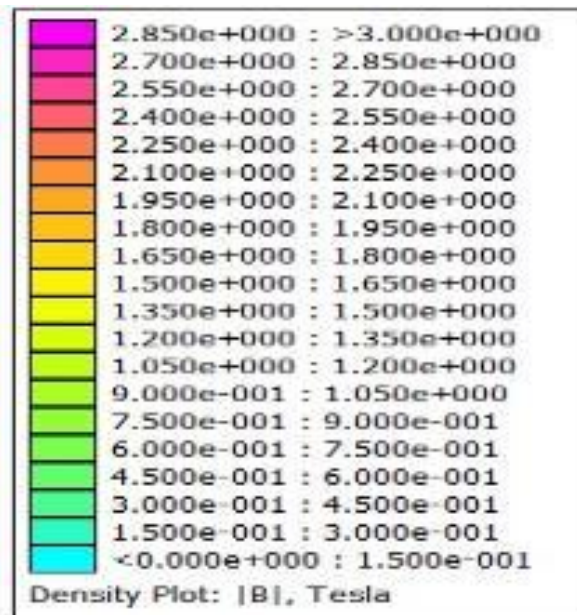


Figura 52 Valores de densidad de flujo magnético en el prototipo de la herramienta H3.

En el punto central de la tubería por donde se transporta las muestras de crudo se obtuvieron los siguientes datos del simulador:

B: densidad de campo magnético, 413mT

H: intensidad de campo 328687<sup>a</sup>/m

Los parámetros de simulación de acuerdo al diseño de la herramienta, fueron:

Corriente en las bobinas, I = 12<sup>a</sup>.

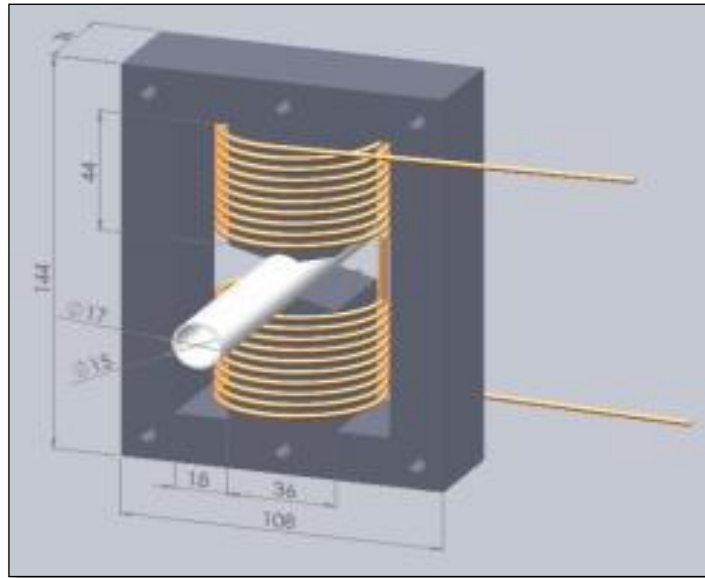
Calibre de conductor de cobre esmaltado, Calibre = AWG 14.

Números de vueltas, N = 280.

Material: acero al silicio M-43.

#### 4.3.4.2 Diseño 2, herramienta (H4)

Figura 53 Modelo herramienta (H4)



Fuente SolidWorks Autor

Con el propósito de encontrar una configuración óptima, de tal forma que se enfoque la densidad de campo magnético en el centro de la tubería y no en las uniones laterales, fueron planteadas las modificaciones a la geometría del núcleo del prototipo como se ve en la Figura 53. La simulación proporciona los resultados que se muestran a continuación.

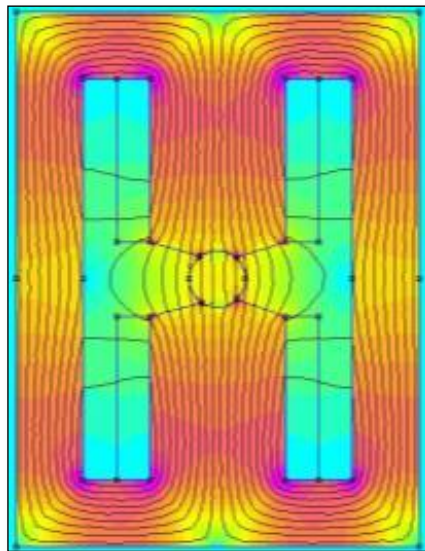
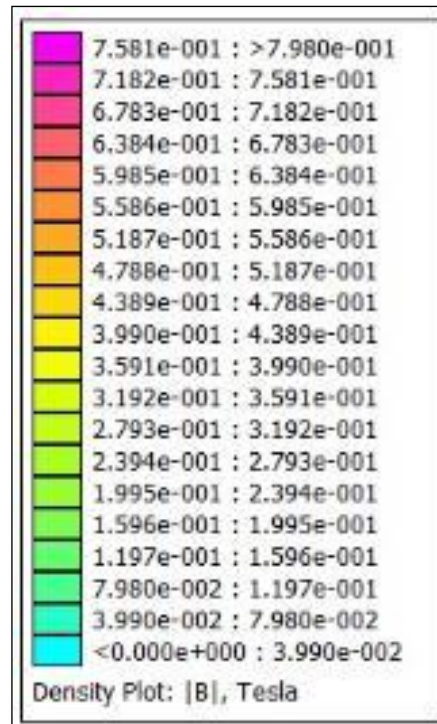


Figura 54 Distribución de la densidad de campo magnético de la herramienta (H4).

A continuación se relaciona los colores resultantes de la simulación en función de la intensidad de densidad de campo magnético.



**Figura 55 Valores de densidad de flujo magnético en el prototipo de la herramienta H4.**

En el punto central de la tubería por donde se transporta las muestras de crudo se obtuvieron los siguientes datos del simulador:

Corriente en las bobinas,  $I = 12^a$ .

Calibre de conductor de cobre esmaltado, Calibre = AWG 14

Números de vueltas,  $N = 200$ .

Material: M-43.

B: densidad de campo magnético, 403mT.

El resultado de la simulación con las condiciones ya especificadas anteriormente, en el prototipo de la herramienta H4, la corriente fue variada en forma descendente desde  $20^a$  que es el valor máximo de la fuente de laboratorio disponible, hasta encontrar el mínimo valor que permita obtener 400 mT en el centro de la tubería de transporte, este valor como ya fue mencionado fue  $12^a$  y la densidad de campo resultante fue de 403mT.

De acuerdo a lo anterior, el mayor cambio con respecto a la herramienta H3 fue debido a la reducción del número de espiras en las bobinas generadoras de campo, en donde se pasó de 280 a sólo 200 vueltas, lo que lleva a una reducción del tamaño de la herramienta en un 28% aproximadamente.

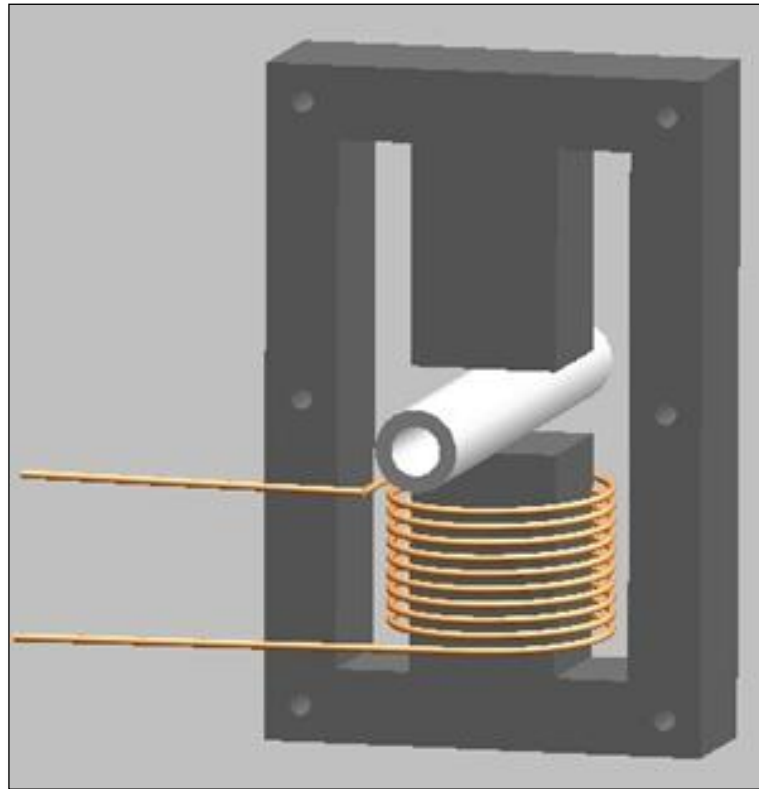
Con lo anterior se tiene que el diseño óptimo encontrado a partir de las simulaciones realizadas, para el prototipo de una herramienta magnética que mitigue la precipitación de ceras en muestras de crudo parafínico, está compuesto por: un núcleo E/114/75/38, un embobinado en calibre AWG 16 en cobre esmaltado, 280 vueltas y una corriente de alimentación de 12<sup>a</sup>, aunque como ya se mencionó con anterioridad el simulador no tiene en cuenta la resistencia del calibre del cobre usado, porque en el simulador no presenta cambios al variar el calibre del alambre, solo sirve para saber el material del cual está hecho el embobinado. Como en el capítulo anterior se puso en disposición tres calibres de cobre, hay que analizar la geometría de la herramienta (H4) con estos calibres seleccionados.

#### **4.4 SIMULACIONES EN EL PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE LA HERRAMIENTA MAGNÉTICA.**

Las siguientes simulaciones están realizadas con núcleo de dimensiones E/114/75/38 de material acero al silicio M-43 (Figura 49). Material que fue utilizado en la construcción de la herramienta magnética.

#### 4.4.1 UNA BOBINA, HERRAMIENTA (H5).

Figura 56 Modelo de la herramienta (H5)



Fuente SolidWorks Autor

Una vez definidos el material y las dimensiones de la herramienta se dio paso a la construcción de la misma, la herramienta se elaboró en varios pasos los cuales estuvieron expuestos a simulaciones previas con el fin de estimar los valores y resultados, en cuanto a corrientes, tensiones y campos magnéticos.

Inicialmente se realizó una herramienta cuadrada con una sola bobina y se le adecuaron dos cuñas laterales, lo cual se explicara con más detalle en el capítulo de construcción de la herramienta Capítulo 5.

Esta primera bobina se realizó con un alambre de cobre calibre AWG 14, dejando la columna central del núcleo cuadrado, para hacer una estimación inicial de la herramienta. La bobina quedó finalmente con 188 vueltas, la Figura 56 muestra un modelo de esta herramienta (H4).

La simulación con estas especificaciones se ven en las siguientes figuras:

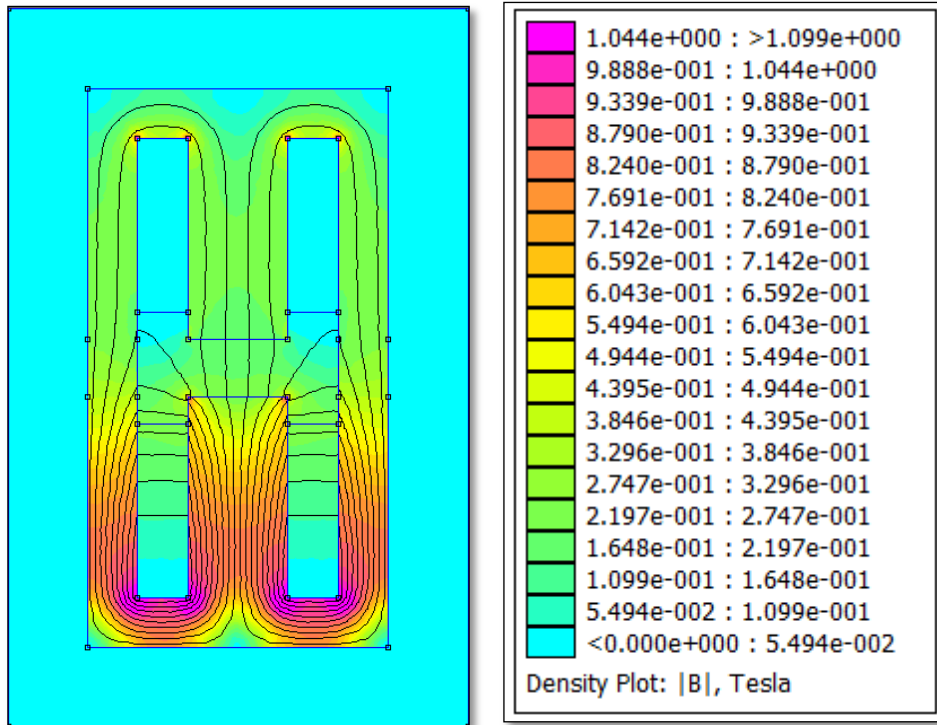


Figura 57 Distribución de la densidad de campo magnético, una bobina

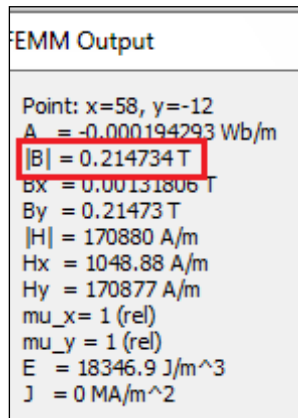


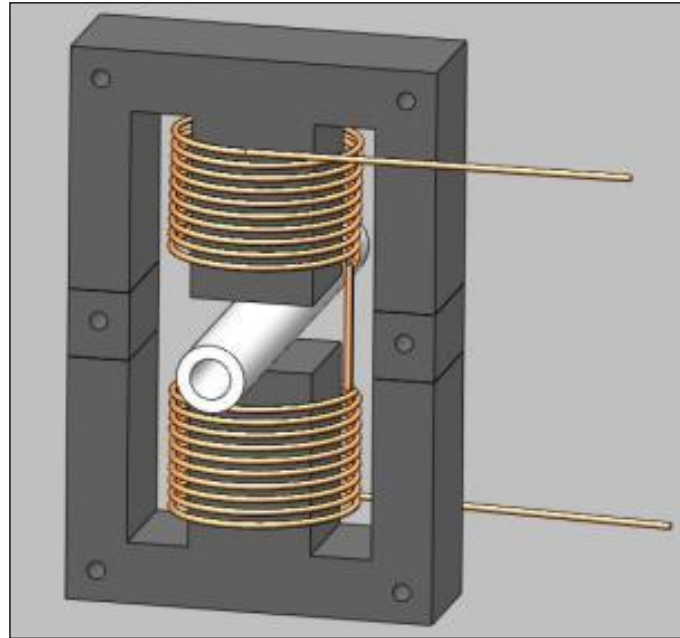
Figura 58 Resultado simulación, flujo magnético en el centro de la tubería

Como se muestra en la Figura 58, en este primer prototipo de la herramienta se esperan aproximadamente 200mT de flujo de campo magnético, este resultado se obtuvo llevando la fuente a su corriente nominal que son 20<sup>a</sup>, por lo tanto en resumen las características de esta primera medida deberían ser:

Corriente: 20 A.  
Número de bobinas: 1.  
Número de vueltas por bobina: 188.  
Densidad de campo magnético: 200 mT.

#### 4.4.2 DOS BOBINAS, HERRAMIENTA (H6).

Figura 59 Modelo herramienta (H6)



Fuente SolidWorks Autor

Después de hacer medidas con una sola bobina se realizó una segunda bobina con el mismo calibre AWG. 14, esperando mejorar considerablemente la densidad de flujo magnético pues se generaría un campo de igual magnitud al anterior y se pondría en una configuración aditiva. Se realizaron las respectivas simulaciones y estos fueron los resultados, ver Figura 60.

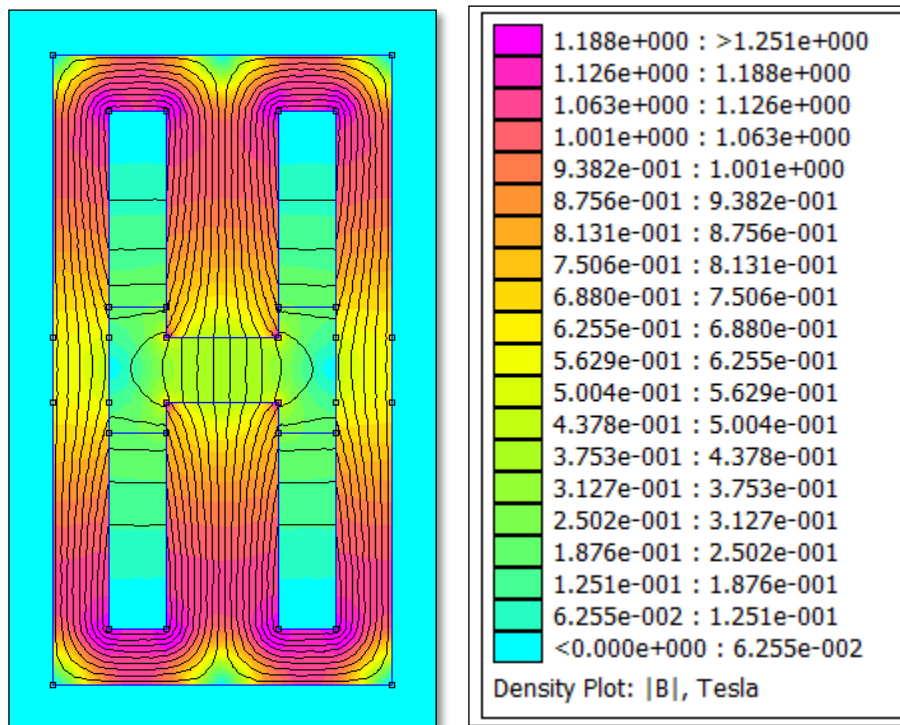


Figura 60 Distribución de la densidad de campo magnético, dos bobinas

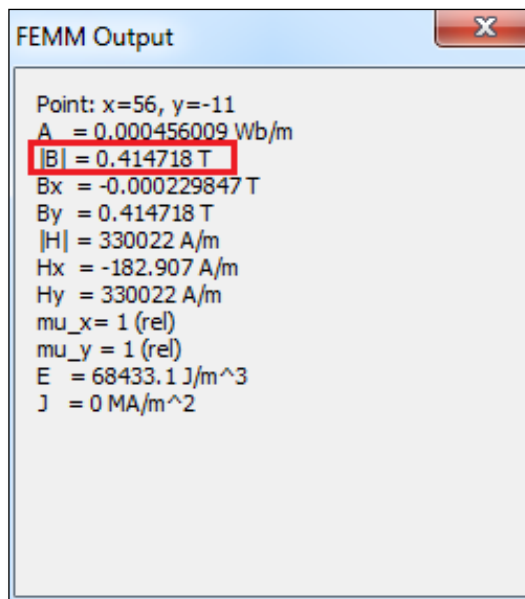


Figura 61 Resultado simulación, flujo magnético en el centro de la tubería

La simulación se realizó con un material de acero al silicio M-43 con la herramienta cuadrada y usando dos bobinas, una con 188 vueltas y otra con 198 vueltas, la diferencia en el número de vueltas se debe a que este valor depende únicamente del proceso de construcción de la bobina.

La simulación se llevó a corriente nominal de la fuente de tensión, que es de 20<sup>a</sup>, los resultados son los siguientes (Figura 61).

Corriente: 20 A.

Calibre: AWG 14.

Número de bobinas: 2.

Número de vueltas bobina 1: 188.

Número de vueltas bobina 2: 198.

Densidad de campo magnético: 415 mT.

#### **4.4.3 DIFERENTES CALIBRES**

Luego de tener los primeros resultados y ver que concordaban con las simulaciones se prosiguió a cambiar el calibre de las bobinas y confrontar los datos obtenidos en la sección 3.4.4.

##### **4.4.3.1 CALIBRE AWG 16 HERRAMIENTA (H7).**

Para las bobinas de calibre AWG 16 se consiguió ubicar 316 vueltas por bobina, lo que nos lleva a usar este número de vueltas en el simulador y variar la corriente para saber cuánta es necesaria para generar los 400mT, aunque en las simulaciones anteriores los resultados estaban 30 mT promedio por debajo de los datos reales se analizó la simulación con este rango de densidad de campo por encima, lo que nos lleva a los siguientes resultados:

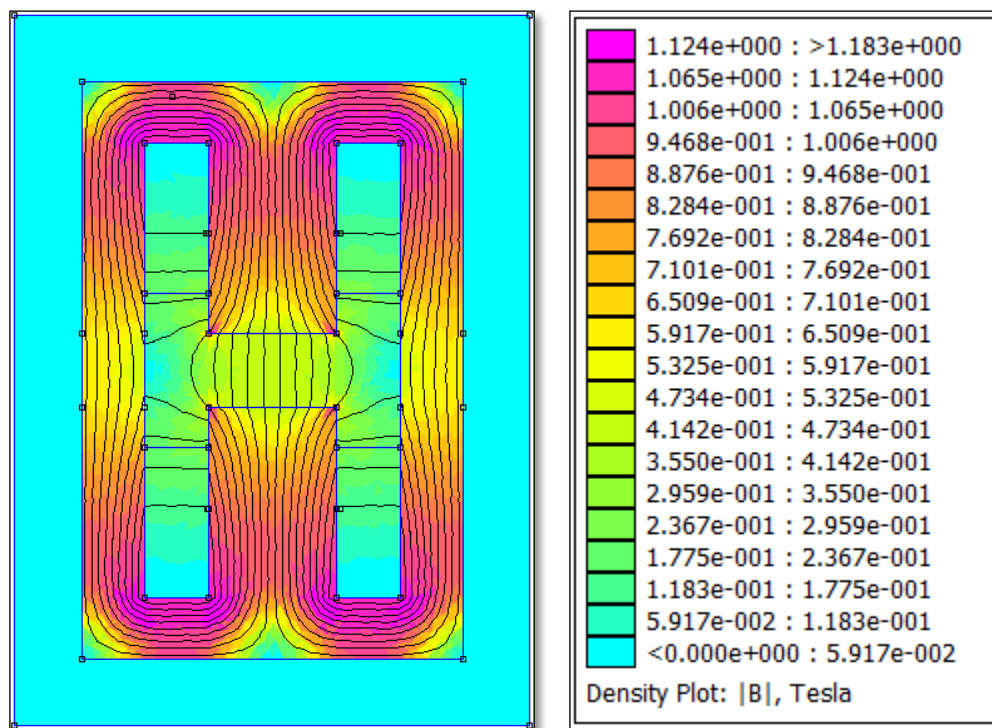
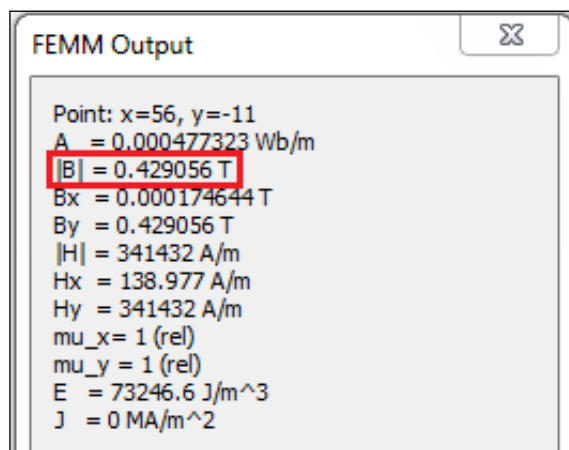


Figura 62 Distribución de la densidad de campo magnético, bobinas calibre AWG 16(H7)

Figura 63 Resultado simulación, flujo magnético en el centro de la tubería H7.



Fuente FEMM4.2 Autor.

Los resultados de la simulación fueron:

Corriente: 13 A.

Calibre: AWG 16.

Número de bobinas: 2.

Número de vueltas bobina 1: 316.

Número de vueltas bobina 2: 316.

Densidad de campo magnético: 429 mT (Figura 63).

#### **4.4.3.2 CALIBRE AWG 18 HERRAMIENTA (H8).**

Realizando las bobinas con calibre AWG 18 se obtuvo 481 vueltas por cada bobina, una vez teniendo este dato se realizan las simulaciones llevando la corriente hasta un máximo de 6<sup>a</sup>, puesto que los cálculos realizados con anterioridad en la sección 3.4.4 nos indica que la resistencia de esta bobina va a ser aproximadamente de 5,6 $\Omega$ , lo que indica que si llevamos la fuente de tensión a su límite (30V), la herramienta tendrá un consumo de 5,34<sup>a</sup>, porque en la simulación se dejó a una corriente de 6<sup>a</sup>.

Los resultados son los siguientes:

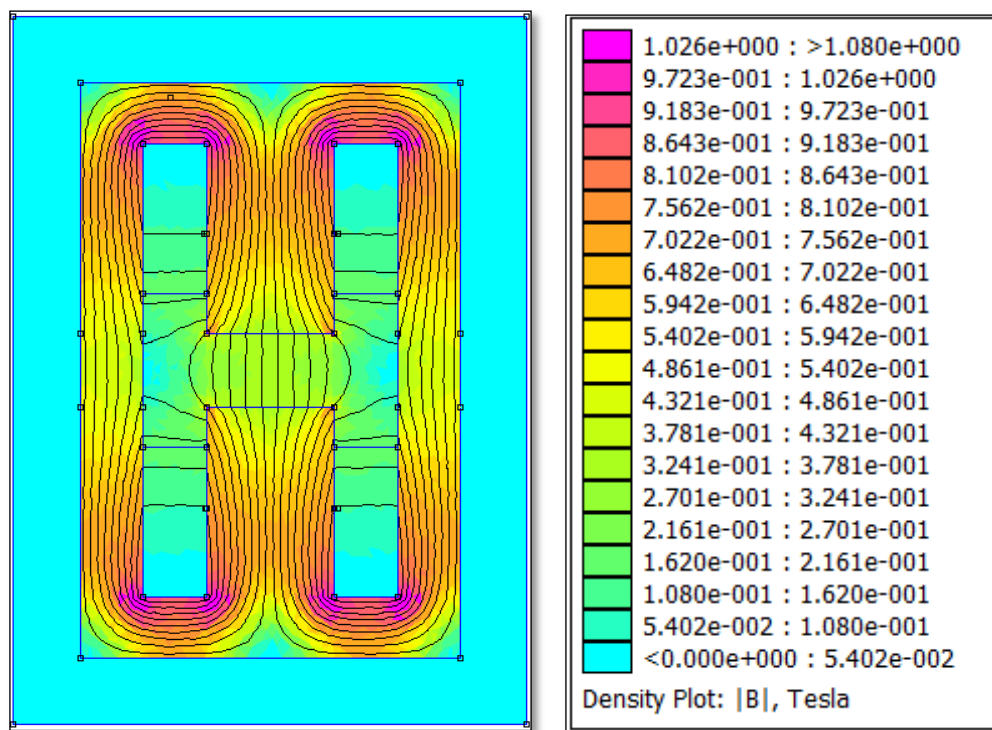


Figura 64 Distribución de la densidad de campo magnético, bobinas calibre AWG 18 (H8)

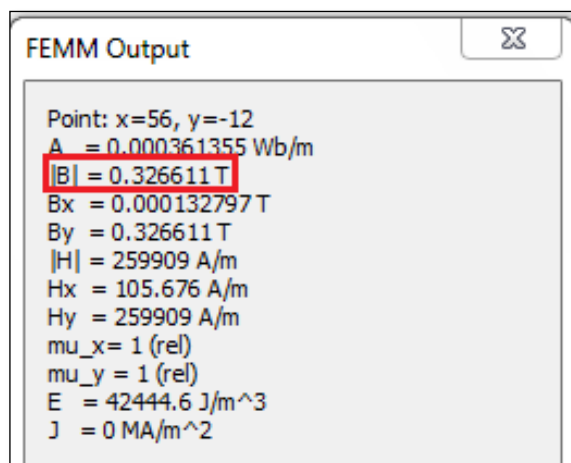


Figura 65 Resultado simulación, flujo magnético en el centro de la tubería (H8).

Corriente: 6 A.  
 Calibre: AWG 18.  
 Número de bobinas: 2.  
 Número de vueltas bobina 1: 481.

Número de vueltas bobina 2: 481.

Densidad de campo magnético: 327mT (Figura 65).

#### 4.4.4 CORTE DEL NÚCLEO MAGNÉTICO (H9).

Se realizó un corte al núcleo con el fin de aumentar el área donde se ubican las bobinas para así generar más densidad de campo, este corte se explica detalladamente en la sección 6.6, realizando las simulaciones efectivamente aumento la densidad de campo magnético en el entrehierro pero hay algo particular en esta configuración ya que en la sección central del núcleo se está presentando una saturación; pues en este punto la densidad de campo magnético es de 1,68T y este material presenta saturación por encima de 1T. Los resultados de la simulación se ven a continuación:

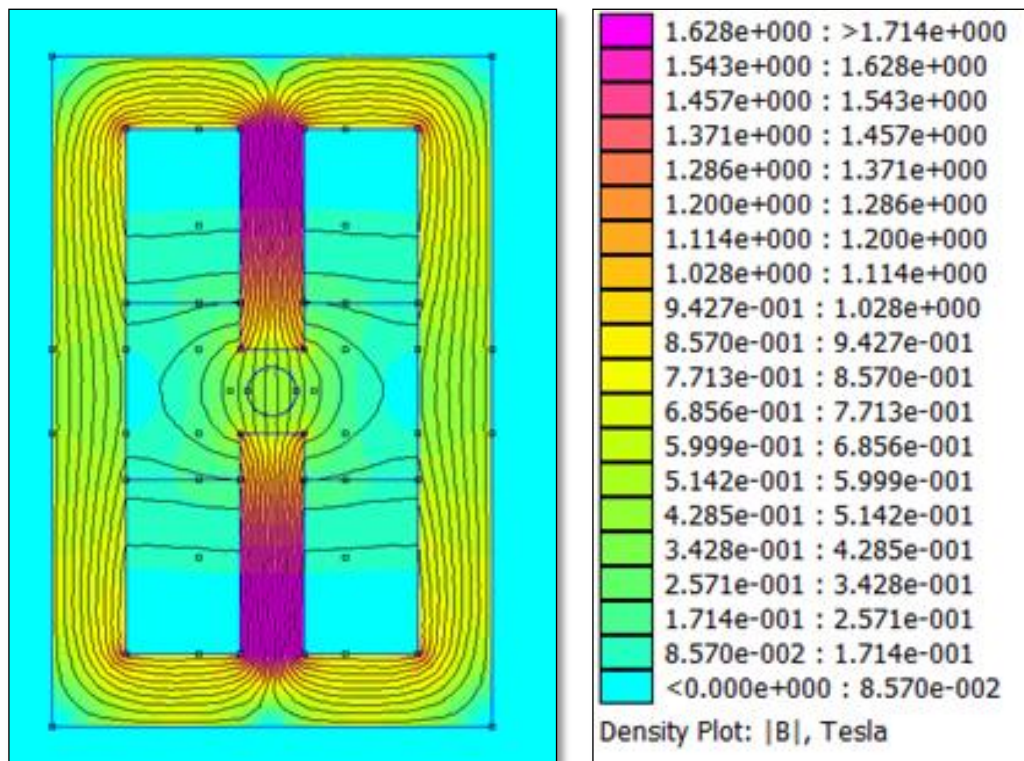
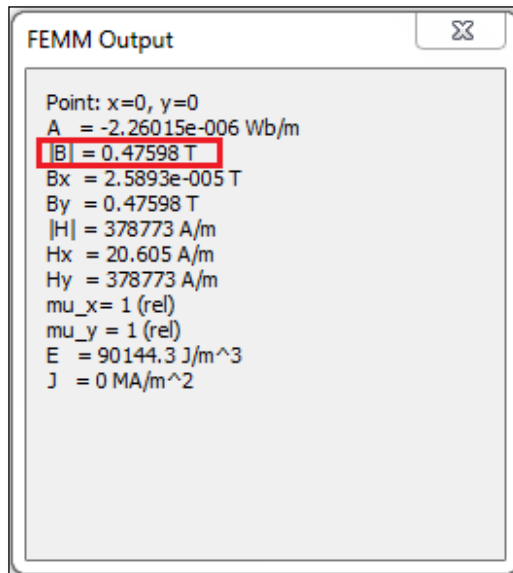


Figura 66 Simulación corte del núcleo magnético (H9).

Fuente FEEM4.2 Autor.

Figura 67 Resultado simulación, flujo magnético en el centro de la tubería (H9).



Fuente: Autor (FEMM4.2).

Los resultados finales de esta simulación son:

Corriente: 11 A.

Calibre: AWG 16.

Número de bobinas: 2.

Número de vueltas bobina 1: 416.

Número de vueltas bobina 2: 416.

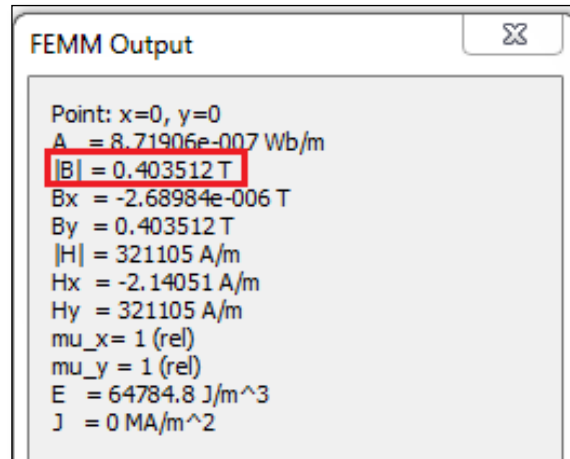
Densidad de campo magnético: 475mT (Figura 67).

#### 4.5 CONFRONTACIÓN CÁLCULOS MATEMÁTICOS.

Un procedimiento que se realizó en la investigación fue hacer una validación de los datos obtenidos con un análisis matemático de la densidad de campo magnético, por lo que se escogieron las herramientas H6, H7 y H8 para confrontar los resultados analíticos. El análisis mencionado se explica con más detalle en el capítulo 3; el análisis que se hizo fue básicamente hallar la corriente necesaria para generar 400mT para un número específico de vueltas, en este caso se usaron las vueltas posibles por calibre.

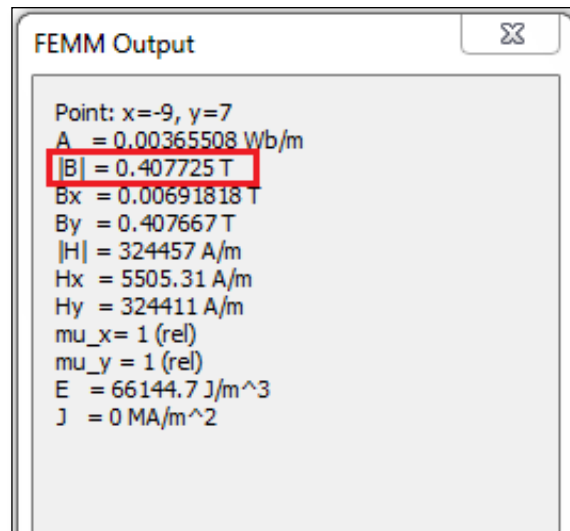
En las figuras siguientes se resumen los resultados obtenidos por las simulaciones para los tres calibres diferentes, introduciendo al simulador el número de vueltas y la corriente calculada en el análisis matemático.

**Figura 68 Simulación AWG 14**



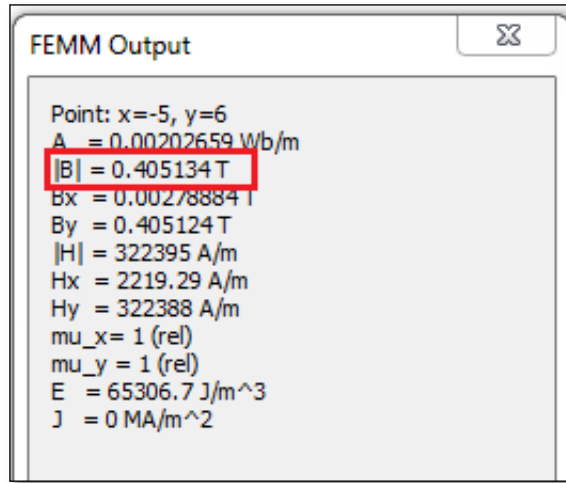
**Fuente FEMM4.2 Autor.**

**Figura 69 Simulación AWG 16**



**Fuente FEMM4.2 Autor.**

**Figura 70 Simulación AWG 18**



**Fuente FEMM4.2 Autor.**

Las tres gráficas anteriores muestran la densidad de flujo generado para el número de vueltas estimadas en la sección 3.3 (Tabla 10) junto con las corrientes halladas para generar 400mT teóricamente.

Tabulando los resultados se obtiene:

**Tabla 12 Resultados simulaciones para confrontar análisis matemático.**

Calibre	Número de vueltas/bobina	Corriente para generar 400mT, [A]	Densidad de campo en simulación, [mT]	% error
AWG 14	220	16,1951	403	0,75
AWG 16	352	10,1219	407	1,75
AWG 18	533	6,6846	405	1,25

Las imágenes de las simulaciones se omiten pues son similares a las expuestas durante todo el capítulo, más específicamente a las herramientas H6, H7 y H8.

Los resultados presentados en la Tabla 12 muestran la viabilidad del programa de simulación FEMM4.2 debido al bajo porcentaje de error que se obtuvo al confrontar los datos de simulación con los matemáticos. Finalmente con estos resultados y los análisis realizados en las secciones 2.4.4 y 3.3, se procede a exponer el procedimiento de construcción de la herramienta magnética con el bobinado AWG 16 siendo esta la mejor disposición analizada previamente.

## 5 CONSTRUCCIÓN DE LA HERRAMIENTA MAGNÉTICA

El diseño, simulación y construcción de la herramienta son puntos importantes en la realización del presente proyecto, donde es la construcción de la herramienta el tema principal en la esta sección que describe detalladamente los materiales y procedimientos tenidos en cuenta para ello.

### 5.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO:

A continuación se presenta el proceso de construcción de una herramienta magnética:

Antes de cualquier procedimiento se debe contar con los siguientes materiales y herramientas:

- Láminas tipo E de acero al silicio (E/114/75/38).
- Alambre esmaltado AWG 16.
- Barniz dieléctrico.
- Tornillos, tuercas, arandelas, brocha.
- Cartón Prespan<sup>19</sup> para formaleta.
- Cinta aislante Royal Diamont<sup>20</sup>.
- Maquina bobinadora.
- Prensa.

### Paso 1

#### 5.1.1 NÚCLEO MAGNÉTICO:

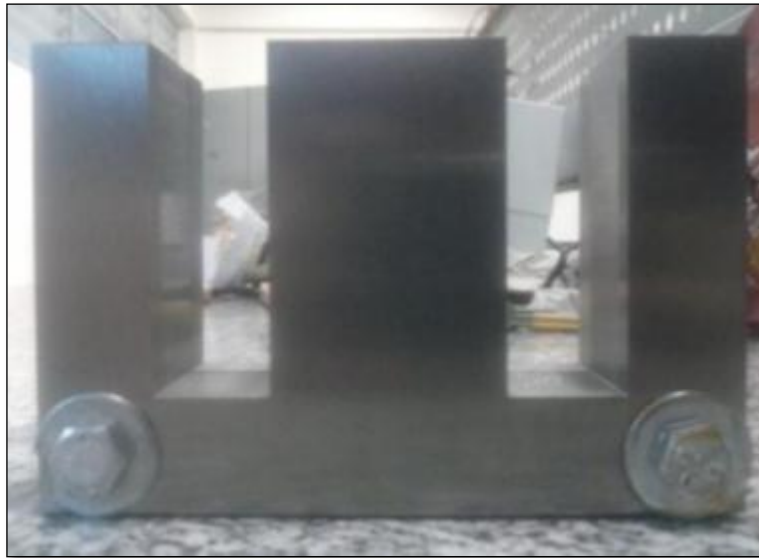
Como primer paso se dispone a sujetar con tornillos varias láminas tipo E para generar un núcleo magnético de espesor de 38mm, esta profundidad del núcleo es destinada para tener una sección transversal cuadrada de las láminas tipo E.

A continuación se presenta el núcleo magnético de la herramienta (Figura 71 Figura 72), cabe recordar que la herramienta requiere del montaje de dos núcleos similares:

---

<sup>19</sup> Prespan: Material aislante térmico que soporta altas temperaturas.

<sup>20</sup> Aislante eléctrico no magnético.



**Figura 71 Núcleo magnético. Autores**



**Figura 72 Núcleo magnético. Autores**

## Paso 2

### 5.1.2 CONSTRUCCIÓN DE LA BOBINA:

El bobinado de la herramienta fue realizado por un operario de la empresa Macor LTDA. Transformadores<sup>21</sup> [20], donde a continuación se detallan los procedimientos realizados.

#### 5.1.2.1 AJUSTE DEL EJE DE LA MAQUINA BOBINADORA

El primer paso en la construcción de la bobina es ajustar el eje de la maquina bobinadora (Figura 73) a las dimensiones requeridas de la bobina, que coinciden además con el espacio disponible en el núcleo E para el bobinado; para este caso es de 38 x 38mm.

Figura 73 Eje de la maquina bobinadora



Fuente Macor LTDA Transformadores [20]

---

<sup>21</sup> Empresa nacional dedicada al mantenimiento y reparación de maquinaria y equipo.

### Paso 3

#### 5.1.2.2 FORMALETA.

Se procede a construir la formaleta utilizando Prespan, siendo este un material aislante en capas y con buena capacidad de impregnación con aceite de transformador (dieléctrico), además el Prespan no presentan ningún tipo de punto de fusión. De ahí pueden soportarse altas cargas térmicas durante corto tiempo (ej.: pocos segundos a 350°C). Este material con espesor de 1mm permite proteger el alambre esmaltado de las esquinas cortantes del núcleo magnético y aísla térmicamente el bobinado del núcleo. Las dimensiones de área transversal de esta primera capa deben coincidir con el área transversal del núcleo magnético y con una profundidad de 47,1mm y no 57,1mm que están disponibles. Esta última dimensión es para dejar una distancia prudente entre el bobinado y la tubería que pasa por el entrehierro que no permita la transmisión de calor al flujo de crudo parafínico. Ver Figura 74.



Figura 74 Primera capa aislante del bobinado.

## **Paso 4**

### **5.1.2.3 CINTA ROYAL DIAMONT COMO AISLANTE ELÉCTRICO.**

Se aplica una capa de zuncho DIAPOL V.P. (Figura 75), conocido comercialmente como Royal Diamont que es una cinta formada por hilos de fibra de vidrio sin torsión, paralelos entre sí con grosor de 0,25mm. Esta cinta es un material no magnético, donde su función principal es aislar eléctricamente cada una de las secciones del bobino.



**Figura 75 Segunda capa con cinta aislante.**

## **Paso 5**

### **5.1.2.4 PRIMERA SECCIÓN EN BOBINADO.**

Ya teniendo las capas de material aislante se procede a realizar la primera sección del bobinado dejando una porción de alambre sin bobinar como se nota en la siguiente imagen:



**Figura 76 Inicio de primera sección del bobinado.**



**Figura 77 Finalización de primera sección del bobinado.**

A continuación se aplica barniz dieléctrico con la brocha a esta primera sección quedando lista para una nueva sección.

### **Paso 6**

#### **5.1.2.5 SEGUNDA SECCIÓN EN BOBINADO.**

Luego de tener la primera sección con barniz dieléctrico se procede a cubrir nuevamente el bobinado con una nueva capa aislante de cinta Royal Diamont para continuar con la segunda sección del bobinado.



**Figura 78 Nueva capa de cinta aislante**

#### **Paso 7**

#### **5.1.2.6 CONTADOR DE VUELTAS.**

Se repiten los pasos 5 y 6 como sean necesarios hasta llegar a la mitad del grosor del bobinado que es de 19,1mm para luego introducir trozos de madera con barniz para un sistema de ventilación. Además, se va notando el número de vueltas que se van teniendo en el bobinado según muestra la maquina bobinadora:

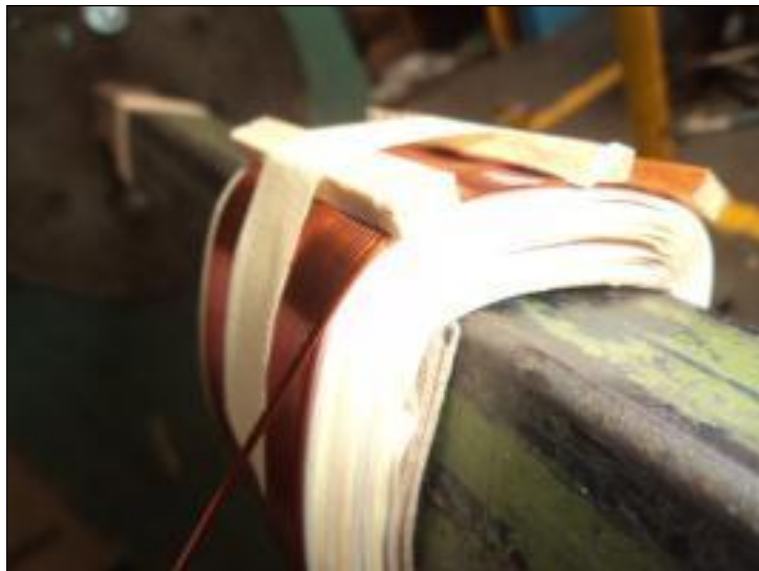


**Figura 79** Contador de vueltas en maquina bobinadora.

## **Paso 8**

### **5.1.2.7 TROZOS DE MADERA PARA SISTEMA DE VENTILACIÓN.**

Se introduce seguidamente unos trozos de madera con barniz que permiten la ventilación del bobinado en su interior como se muestra en la siguiente figura:



**Figura 80** Bobinado.

A continuación se realiza otra sección de bobinado teniendo en cuenta que es de suma importancia aplicar una buena capa de barniz dieléctrico entre secciones del bobinado.



**Figura 81** Aplicación de barniz dieléctrico.

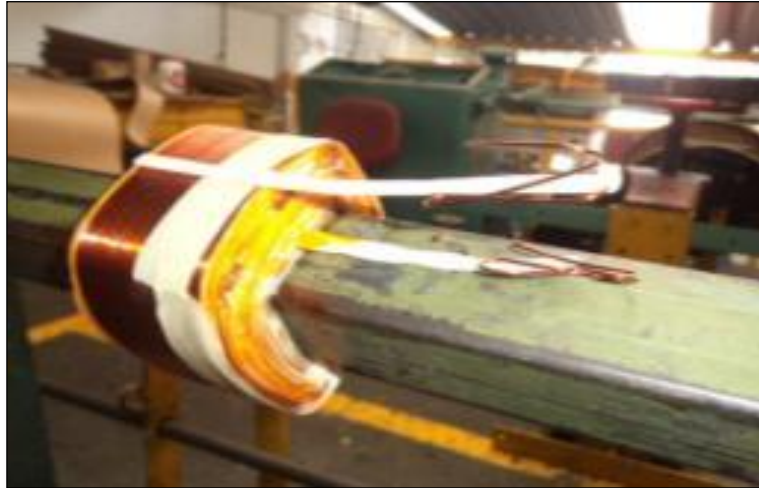


**Figura 82** Bobinado.

## Paso 9

### 5.1.2.8 FINALIZACIÓN DE BOBINADO.

Se continúa con las respectivas secciones del bobinado hasta un espesor de 19,1mm, siendo esta la distancia disponible en el núcleo magnético para el bobinado.



**Figura 83 Bobinado.**

Se finaliza recubriendo la bobina con la última capa de cinta aislante Royal Diamont y se corta el segundo extremo de alambre esmaltado:



**Figura 84 Bobinado.**

Por recomendación se deben recubrir estas salidas de alambre con material aislante para mantener el esmaltado en óptimas condiciones.

#### **Paso 10**

##### **5.1.2.9 BOBINADO.**

Teniendo la bobina finalizada con 316 vueltas que registro la maquina bobinadora y con un ancho de 19,1mm se retira la bobina del eje de la máquina para su posterior montaje al núcleo magnético:



**Figura 85 Bobinado.**

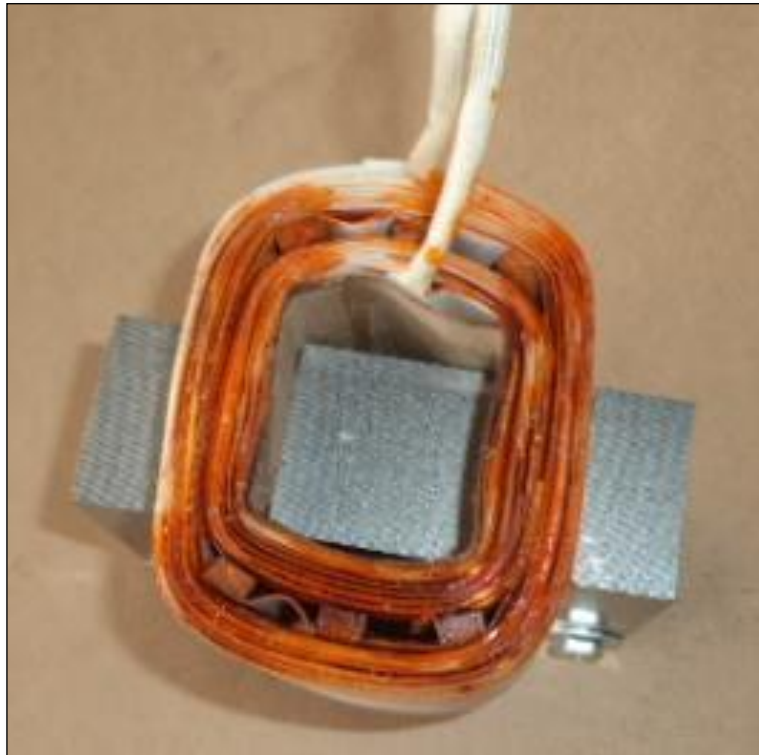


**Figura 86 Bobinado.**

## Paso 11

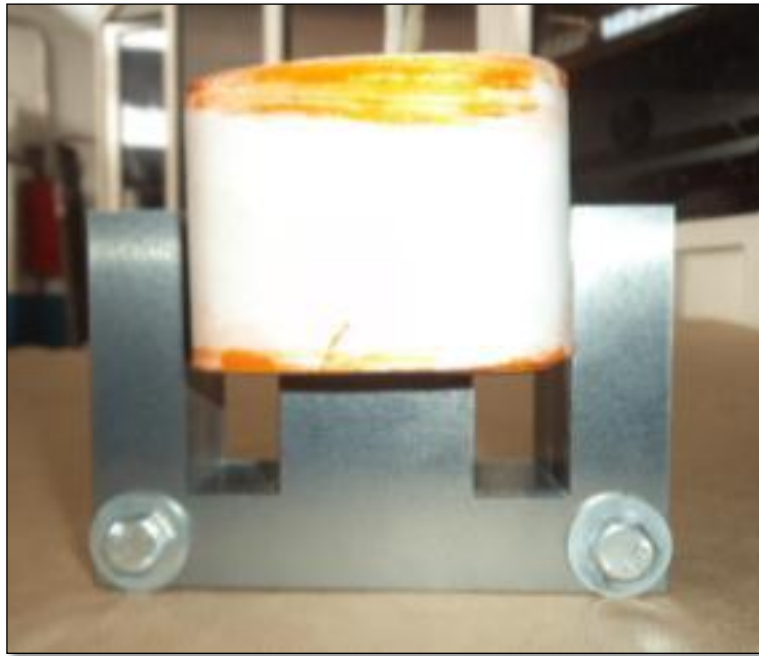
### 5.1.3 ADECUACIÓN DEL BOBINADO Y NÚCLEO MAGNÉTICO.

Montaje de dos bobinados a dos núcleos magnéticos que formaran parte de la herramienta magnética:



**Figura 87 Bobinado y núcleo magnético.**

Si es necesario se utiliza una prensa vertical para introducir la bobina al núcleo magnético.



**Figura 88 Bobinado y núcleo magnético.**

## **Paso 12**

### **5.1.4 CONSTRUCCIÓN DE ACOPLER PARA CIERRE DE NÚCLEO MAGNÉTICO.**

Teniendo en cuenta que la tubería que contendrá el crudo parafínico al cual se le aplicará campo magnético es de diámetro externo 21,3mm, es necesario construir unos acoples laterales (del mismo material ferromagnético del núcleo) con el mismo tamaño que garanticen el entrehierro necesario para esta tubería.

**Figura 89 Acople para cierre de núcleo magnético.**



Fuente: autor

A continuación se presenta las dimensiones de las cuñas de separación.

**Tabla 13 Dimensiones de acoples de separación.**

Dimensión	longitud [mm]
Alto	21,3
Ancho	19
Largo	38

Fuente: Autores

### **Paso 13**

#### **5.1.5 SISTEMA DE SUJECIÓN PARA LA HERRAMIENTA CON AISLANTE MAGNÉTICO.**

El sistema de sujeción de la herramienta es realizado con la abrazadera industrial T-526 mostrada en la Figura 90. Además, es necesario aislar esta abrazadera del núcleo magnético utilizando la cinta Royal Diamont Figura 91, siendo este un material no magnético según lo mencionado en la sección 5.1.2.3.

**Figura 90 Figura Abrazadera industrial T-526**



**Fuente Autor**

**Figura 91 Figura Cinta Royal Diamont.**



**Fuente Autor**

A continuación se observa la herramienta magnética con su respectiva sujeción, y aislamiento magnético que posibilita su correcto funcionamiento:

**Figura 92 Sistema completo de sujeción de la herramienta magnética**



**Fuente Autor**

Es de importancia realizar la conexión en serie de las bobinas teniendo en cuenta la Ley de la mano derecha para que sus campos magnéticos inducidos sean aditivos, y de esta forma, exista una gran concentración de campo magnético en el entrehierro. Si lo anterior no se cumple, la herramienta operaría en condiciones muy desfavorables.

## 6 PRUEBAS PRELIMINARES DE LA HERRAMIENTA MAGNÉTICA.

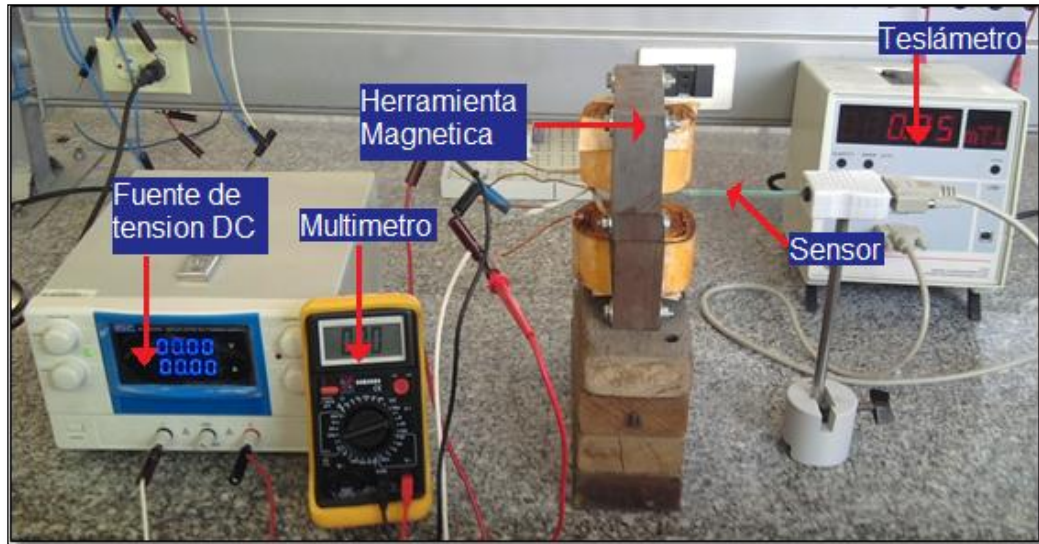
Una vez construida la herramienta magnética con los arrollamientos, espiras y dimensiones establecidas en la fase de simulación, se procede a realizar pruebas preliminares que permitan observar el comportamiento electromagnético del prototipo. Esto con el fin de determinar los alcances del generador de campos magnéticos directos para los experimentos a realizar en el banco que será construido por la propuesta de investigación del ingeniero Cristian Jiménez [3].

### 6.1 ELEMENTOS DE CIRCUITO MAGNÉTICO.

Para realizar las mediciones a la herramienta se implementó el circuito de la Figura 93, el cual consiste en las siguientes partes:

- **Multímetro marca FLUKE REF-175:** Instrumento para la medición de la resistencia de los devanados a través del tiempo debido al aumento de la temperatura.
- **Fuente digital 0-30V y 20ª variables:** fuente de corriente directa de marca “MCP Laboratory Electronics M10-QS3020”, utilizada para variar la intensidad de corriente de alimentación suministrada a la herramienta magnética.
- **Medidor de densidad de campo magnético:** Instrumento de censado marca “Universal Mesasuring instrument physics LD Didactics” ver ANEXOB, propiedad de la Universidad Industrial de Santander, ubicado en el laboratorio de física del campus universitario.
- **Prototipo de herramienta magnética:** elemento generador de densidad de campos magnéticos construida con núcleo de láminas de acero al silicio no orientado.

Figura 93 Montaje para la medición del alcance de herramienta magnética.

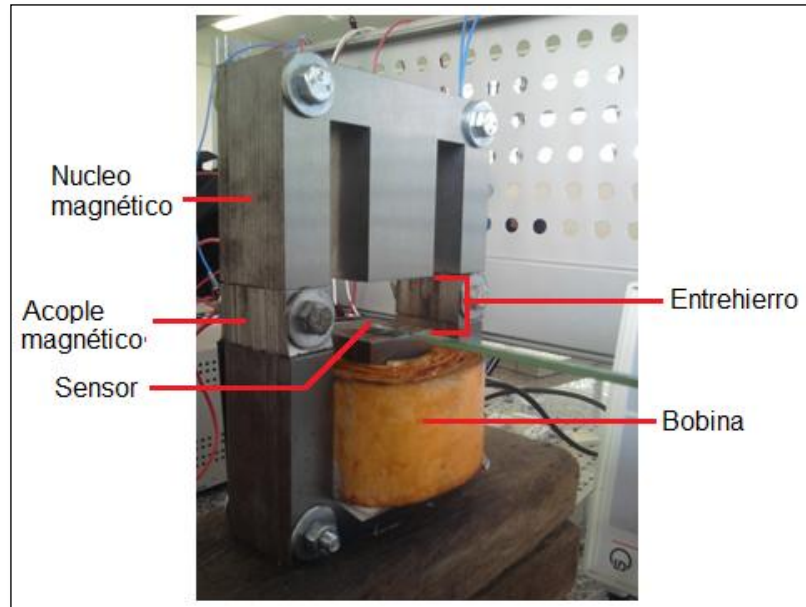


Fuente: Autores.

## 6.2 PRUEBAS A HERRAMIENTA CON UNA BOBINA (H5)

Para realizar las mediciones de campo magnético generado, se comenzó con las pruebas a un arrollamiento (“media herramienta”), es decir, a un solo bobinado en la columna central del núcleo magnético, a esta herramienta con estas características se le denominó “herramienta H5” en la sección de simulaciones (4.4.1), ubicando el sensor en la parte central del entrehierro formado por la colocación del acople lateral (Figura 94).

**Figura 94 Montaje de herramienta magnética (H5)**



**Fuente: Autor.**

Posteriormente se midió el alcance máximo de campo magnético del montaje a la máxima corriente permitida por el devanado arrollado en calibre AWG 14 (21 A), en esta situación se llevó la fuente a su máximo valor de corriente nominal (20 A). Los datos obtenidos se muestran a continuación de acuerdo a la metodología usada en el laboratorio (Tabla 14)

**Tabla 14 Resultados pruebas herramienta H5**

Voltaje [V]	Corriente [A]	Densidad de campo [mT]
1	2,26	22
2	4,46	43,5
3	6,58	64,4
4	8,78	86,1
5	10,96	107
6	13,15	128
7	15,17	148
8	17,38	168
9	19,22	187

**Fuente Autor.**

Como se observa en la tabla anterior la herramienta tuvo un comportamiento con forme se esperaba, puesto que en la simulación (sección 4.4.1) se obtuvieron los siguientes datos:

Corriente: 20 A.

Número de bobinas: 1.

Número de vueltas por bobina: 188.

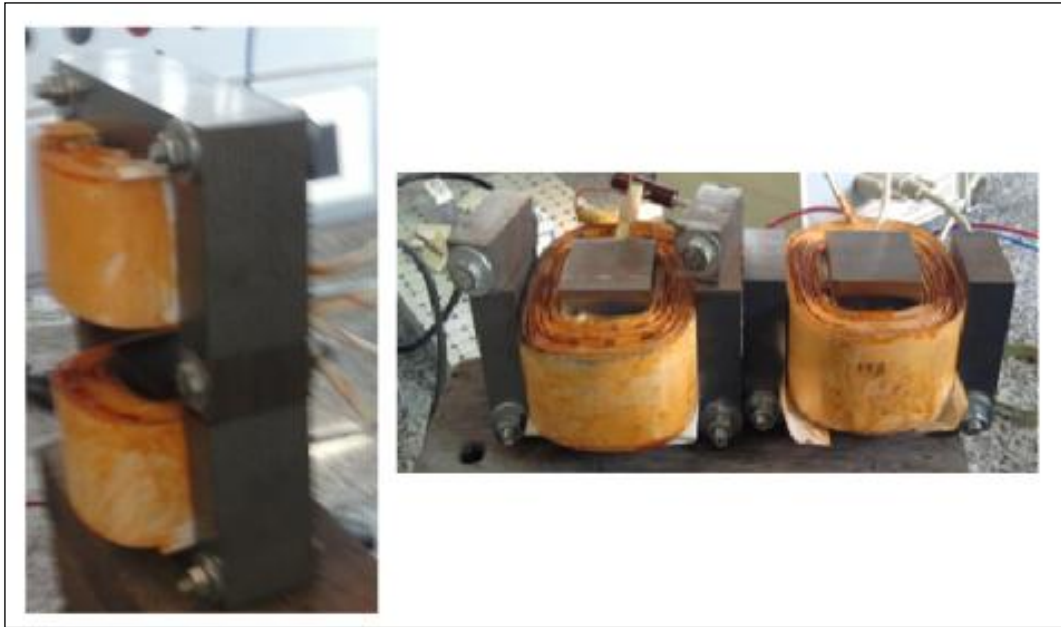
Densidad de campo magnético: 200 mT.

Según la Tabla 14 para una corriente de 19,22<sup>a</sup> se generó una densidad de campo magnético de 187mT, donde se esperaban 200mT aproximadamente según las simulaciones lo que nos indica un error de 6,5%.

### **6.3 PRUEBAS A HERRAMIENTA CON DOS BOBINAS CALIBRE AWG 14 (H6)**

Se implementó el prototipo de la “herramienta completa”, es decir, se acoplaron a la columna central del núcleo magnético las dos bobinas generadoras de la densidad de campo directo para el tratamiento, una con 188 vueltas y otra con 198 vueltas de calibre AWG 14. Es necesario resaltar que la orientación de las bobinas generadoras de campo fue construida en forma aditiva, es decir, el campo generado será aproximadamente la suma de cada una de las densidades generadas por cada arrollamiento herramienta (H6). A partir de lo anterior se realizaron las mediciones de la magnitud del flujo magnético. A continuación se muestra el prototipo construido ver Figura 95

**Figura 95 Herramienta con dos bobinas (H6)**



**Fuente: Autor**

En este caso las simulaciones hechas con anterioridad arrojaron los siguientes datos, revisar sección 4.4.2.

Corriente: 20 A.

Calibre: AWG #14.

Número de bobinas: 2.

Número de vueltas bobina 1: 188.

Número de vueltas bobina 2: 198.

Densidad de campo magnético: 415mT.

Los resultados de las mediciones se ven la siguiente tabla:

**Tabla 15 Resultados medición herramienta(H6)**

Voltaje [V]	Corriente [A]	Densidad de campo [mT]	Voltaje [V]	Corriente [A]	Densidad de campo [mT]
1	1,06	20,5	10	11,13	224
2	2,05	40	11	12,49	145
3	3,17	62,13	12	13,72	268
4	4,23	83,1	13	15,22	296
5	5,42	106	14	16,5	322
6	6,64	130	15	17,54	340
7	7,99	156	16	18,05	349
8	8,98	175	17	19	366
9	9,91	194	17,04	20	380

Fuente Autor.

Comparando estos últimos datos obtenidos de las pruebas de laboratorio con los datos de las simulaciones, se observa para la corriente máxima soportada por la fuente, la herramienta está generando 380mT y con las simulaciones se esperaban 415mT de densidad de campo.

Lo anterior nos arroja un porcentaje de error 8,431% con respecto a los datos simulados.

#### **6.4 PRUEBAS A HERRAMIENTA CON DOS BOBINAS CALIBRE AWG 16 (H7).**

Se procedió a probar la herramienta magnética con un bobinado realizado con alambre de cobre calibre AWG 16, que según las simulaciones y el análisis matemático hecho con anterioridad, es el calibre idóneo para realizar la herramienta magnética, pues presta las mejores condiciones en cuanto al aprovechamiento de la fuente de alimentación.

La herramienta es idéntica a la anterior (H6), lo único que cambia es el calibre del cobre.

Los resultados de las pruebas de laboratorio son las mostradas en la tabla siguiente.

**Tabla 16 Resultados herramienta calibre AWG 16 (H7)**

Voltaje [V]	Corriente [A]	Densidad de campo [mT]	Voltaje [V]	Corriente [A]	Densidad de campo [mT]
1	0,47	15,6	16	7,89	256
2	0,95	31,1	17	8,34	270
3	1,42	46,3	18	8,82	286
4	1,95	63,7	19	9,22	298
5	2,46	80,3	20	9,6	310
6	2,96	96,8	21	9,97	322
7	3,48	113	22	10,3	333
8	4,06	132	23	10,74	345
9	4,48	146	24	11,15	353
10	4,97	162	25	11,52	366
11	5,48	178	26	11,86	378
12	5,93	196	27	12,21	392
13	6,39	212	28	12,3	396
14	6,87	223	29	12,6	400
15	7,4	241	30	12,88	407

Fuente Autor.

Los datos realizando el mismo montaje en el simulador arrojan los siguientes datos:

Corriente: 13 A.

Calibre: AWG #16.

Número de bobinas: 2.

Número de vueltas bobina 1: 316.

Número de vueltas bobina 2: 316.

Densidad de campo magnético: 429 mT.

Al comparar los resultados de la simulación con los de la prueba de laboratorio se obtuvo una densidad de campo de 407mT donde se esperaban 429mT, estos datos dan un error de 5,1%

## **6.5 PRUEBAS A HERRAMIENTA CON DOS BOBINAS CALIBRE AWG 18 (H8).**

Para este caso, como se ha venido comprobando que el calibre AWG 18 no es el adecuado para realizar la herramienta por los motivos ya expuestos en capítulos anteriores y además con los resultados de las pruebas realizadas hasta el

momento tiene la seguridad y la confianza para descartar definitivamente la utilización del calibre AWG 18, por lo que este montaje no fue llevado a pruebas de laboratorio.

#### **6.6 PRUEBAS A HERRAMIENTA CON CORTE DE NÚCLEO (H9).**

Con el fin de mejorar los resultados obtenidos con la herramienta (H7) se realizó un corte al núcleo con el fin aumentar el número de vueltas por bobina y así generar una densidad de campo mayor. Conforme se mostró en las simulaciones, sección 4.4.4, esta modificación puede ser favorable ya que se aumentó notoriamente el campo magnético en el centro del entrehierro, los resultados de la simulación son los siguientes:

Corriente: 11 A.

Calibre: AWG 16.

Número de bobinas: 2.

Número de vueltas bobina 1: 416.

Número de vueltas bobina 2: 416.

Densidad de campo magnético: 475mT

La herramienta con el corte realizado se desarrolló con un embobinado de alambre calibre AWG 16 ya que es el de mejor desempeño. El corte del núcleo junto con la herramienta (H9) se muestra en las siguientes figuras:

**Figura 96 corte de núcleo magnético**



**Fuente: Autor**

**Figura 97 Herramienta con corte del núcleo (H9)**



**Fuente: Autor**

Al realizar las respectivas medias de la densidad de campo generado a medida que se aumentaba la corriente en la bobinas, se obtuvieron los siguientes resultados vistos en la Tabla 17.

**Tabla 17 Resultados de la pruebas herramienta (H9).**

Voltaje [V]	Corriente [A]	Densidad de campo [mT]	Voltaje [V]	Corriente [A]	Densidad de campo [mT]
1	0,4	16	16	6,2	242
2	0,8	31	17	6,54	253
3	1,19	47,3	18	6,95	264
4	1,55	62,1	19	7,34	274
5	1,96	78,2	20	7,66	283
6	2,36	94,1	21	7,96	290
7	2,75	109	22	8,31	297
8	3,14	125	23	8,67	304
9	3,53	140	24	9,01	311
10	3,92	155	25	9,3	317
11	4,28	170	26	9,65	322
12	4,67	185	27	9,93	327
13	5,05	200	28	10,21	331
14	5,43	214	29	10,47	334
15	5,81	229	30	10,81	339

Fuente Autor.

Analizando los resultados de las pruebas hechas a la herramienta (H9) ver Tabla 17, se observa que para una corriente de 10,81<sup>a</sup> se generaron 339mT, donde según las simulaciones hechas con anterioridad se esperaba una densidad de campo de 475mT, obteniendo un porcentaje de error de 28,63%. El error presente entre las simulaciones y las pruebas de laboratorio se deben principalmente a los siguientes factores:

**Saturación de núcleo magnético:** debido a la reducción del área transversal del núcleo magnético se presenta una mayor densidad de campo, registrando valores cercanos a 1,2T en puntos internos del material ferromagnético, de acuerdo lo mostrado en la

- Figura 66 de simulación. Además teniendo en cuenta la región de saturación del material mostrada en la Figura 26 en donde se presenta este efecto para valores de densidad de flujo magnético mayores a 1T, reduciendo de esta forma la permeabilidad del material conductor de las líneas de campo.
- **Dispersión de líneas de campo en entrehierro largo:** de acuerdo a lo establecido en la ecuación ( 3-10 ) se puede determinar que para este caso en particular de simulación no se cumple con la condición de entrehierros

cortos. Haciendo del análisis efectuado, una aplicación incorrecta de las herramientas para el análisis de circuitos magnéticos.

## 6.7 PRUEBAS A HERRAMIENTA CON TUBERÍA DE ACERO INOXIDABLE.

Con el fin de comprobar la teoría expuesta en la sección 2.5 acerca del comportamiento magnético de las tuberías de acero inoxidable, y que la escogencia del material acero inoxidable austenítico para la tubería por donde debe fluir el crudo, ayuda para que en el centro de la tubería se exponga la mayor cantidad de campo generado. Se realizaron pruebas de laboratorio a la herramienta (H7), los resultados están expuestos en la siguiente tabla.

**Tabla 18 Resultados pruebas herramienta (H7) con tubería de acero inoxidable**

Voltaje [V]	Corriente [A]	Densidad de campo con tubería[mT]	Densidad de campo sin tubería[mT] (H7)
0	0	0	0
2	0,86	27,4	31,1
4	1,78	56,2	63,7
6	3,12	93,9	96,8
8	4,14	130	132
10	4,93	159	162
12	5,77	194	196
14	7,14	220	223
16	8,06	252	256
18	8,91	283	286
20	9,66	308	310
22	10,29	329	333
24	11,08	347	353
26	11,82	373	378
28	12,29	390	396
30	12,71	401	407

Fuente Autor.

Al realizar la comparación de la densidad de flujo generada en el centro de la tubería con los datos tomados con anterioridad en el experimento que se hizo con la misma herramienta pero sin la tubería puesta en el entrehierro (H7), se obtiene una disminución de 2,86% en la generación de campo magnético al utilizar la tubería de acero inoxidable austenítico con características no magnéticas.

**Figura 98 Montaje herramienta (H7) con tubería de acero inoxidable en el entrehierro.**



**Fuente Autor**

## 7 RESULTADOS.

### 7.1 CONCLUSIONES.

Conclusiones de simulaciones y puesta en marcha de diferentes geometrías del prototipo de la herramienta magnética:

- Los valores de densidad de campo magnético registrados en la simulación realizada con FEMM 4.2 guardan una proporcionalidad directa con los resultados obtenidos en pruebas de laboratorio. Cabe resaltar que los valores obtenidos en laboratorio son en promedio 90% de los valores obtenidos punto a punto en las simulaciones; esto es debido a que el material de acero al Silicio M-43 que se encuentra en las librerías del software está caracterizado para una temperatura ambiente de 20°C y existen pequeños entrehierros en los diferentes acoples del núcleo ferromagnético, el bobinado y las cuñas.
- Según las pruebas realizadas en laboratorio se garantiza en la herramienta (H7) una densidad de campo magnético de 407mT en el centro del entrehierro de 21,3mm; siendo el centro del entrehierro el punto mínimo de densidad de campo dentro del entrehierro. Cabe resaltar que la geometría plana de la herramienta garantiza un flujo aproximadamente constante en el entrehierro como lo observado en la simulación, despreciando para facilitar el análisis de los resultados el efecto borde de los núcleos.
- De todas las geometrías simuladas y experimentadas en el presente proyecto se estableció la herramienta (H7) como la mejor disposición para realizar el tratamiento magnético a las muestras de crudo del Campo Escuela Colorado.
- Para la implementación del prototipo de la herramienta magnética se hace necesario utilizar en la tubería un material de acero inoxidable austenítico debido a su propiedad no magnética que garantiza el traspaso de las líneas de flujo magnético al fluido.
- Por medio de las técnicas de fabricación del bobinado mencionas en la sección 5, se pueden obtener características especiales en estos bobinados

como: resistencia a mayores temperaturas debido al barniz dieléctrico y las capas de cita aislante Royal Diamont. Además, un bobinado compacto aprovechando al máximo el espacio disponible con ayuda de la maquina bobinadora.

- El sistema de sujeción empleado posibilita ubicar la herramienta magnética en cualquier tramo de tubería con diámetro 21.3 mm independientemente de su posición.
- Se logró una densidad de campo magnético de 407mT en un entrehierro de 21.3mm (diámetro de la tubería) con dos bobinados en serie de 316 vueltas, usando alambre AWG 16, núcleo con laminado tipo E/114/75/38 y aplicando una corriente de 12.88<sup>a</sup>.
- La herramienta puede utilizarse para aplicar tratamientos magnéticos a distintas muestras que se requieran analizar, donde variando el acople magnético se pueden obtener varias densidades de campo magnético en el entrehierro. Esta logró inducir hasta 1 T con un entrehierro de 3mm. Lo anterior se observa en la curva de caracterización de la herramienta en el ANEXO A.

## 7.2 RECOMENDACIONES

- Para aumentar el rango de operación de la herramienta se recomienda la variación del grosor de los acoples laterales de la herramienta, de esta manera, se puede variar la distancia del entrehierro y obtener una mayor concentración del campo magnético.
- Para el montaje de la herramienta magnética a la tubería, es necesario cubrir el sistema con algunas láminas de propiedades magnéticas que no permitan la salida del campo magnético al medio exterior.
- Para poder utilizar la herramienta por tiempo prolongado, se sugiere el diseño de un sistema de refrigeración adicional para garantizar su correcto desempeño.
- Teniendo en cuenta que los bobinados de la herramienta tienen unos espacios internos de ventilación, es necesario que esta opere en espacios frescos y preferiblemente con un sistema de ventilación exterior que permita su refrigeración y un correcto funcionamiento.
- Se recomienda para futuros diseños de herramientas magnéticas, el estudio de nuevas geometrías de núcleos encontradas en el mercado e imanes permanentes con alguna distribución estratégica que permitan una mayor concentración de campo magnético en el centro de la tubería (diámetro 21,3 mm).

## REFERENCIAS

- [1] C. A. villabona Carvajal y D. P. Gonzales Garcia, Mejora de la movilidad del crudo parafínico mediante campos magnéticos..
- [2] A. Johanna y R. Sebastian, ESTUDIO DE LA RESPUESTA REOLÓGICA DE CRUDOS PARAFÍNICOS DE CAMPO ESCUELA COLORADO ANTE UN CAMPO MAGNÉTICO, Buacramanga, 2013.
- [3] C. Jiménez, Construcción del prototipo de una herramienta magnética para inhibir la precipitación del crudo de Campo Escuela Colorado, Universidad Industrial De Santander.
- [4] R. Carpenter, «Apparatus for Magnetically Treating Liquid Flowing Through a Pipe and Clamping means therefor». U.S. Patente 4367143, 1983..
- [5] B. Wang Meihua, «dispositivo de imanes permanentes para el control de ceras». Patente US5024271, 1991.
- [6] Askeland y D. R., Ciencia e Ingeniería de los Materiales, 4ta ed.
- [7] «INTRODUCCIÓN AL ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MAGNÉTICAS DE LOS MATERIALES».
- [8] [En línea]. Available: <http://www.monografias.com/trabajos7/grabmac/grabmac.shtml>.
- [9] V. E. M. M. Madrid, «1.1.4 Mecanismos básicos de desimánación,» de *RELACIONES ENTRE LA MICROESTRUCTURA Y LAS PROPIEDADES HISTERÉTICAS EN EL SISTEMA ND-DY-FE*, 2002.
- [10] Power Desing Magnetics Ferritas, [En línea]. Available: <http://www.mag-inc.com/products/ferrite-cores>.
- [11] F. International, «Frana International,» [En línea]. Available: <http://www.franainternational.com/es/linea-comercial-.html>.
- [12] «wikipedia,» [En línea]. Available: <http://es.wikipedia.org/wiki/Alambre>.

- [13] J. Marco. [En línea]. Available: <http://www.slideshare.net/marcopolo2009/cambio-de-resistencia-por-temperatura>.
- [14] Bonnet, «clasificación de los aceros inoxidables,» [En línea]. Available: <http://bonnet.es/clasificacionacerinox.pdf>.
- [15] E. d. M.I.T, CIRCUITOS MAGNETICOS Y TRANSFORMADORES, Reimpresión 2003 ed., Reverte, S.A, 2003.
- [16] «ferroxcube,» [En línea]. Available: <http://www.ferroxcube.com/prod/assets/3c90.pdf>.
- [17] Fair-Rite Products Cop, «Componentes de ferrita para la industria eléctrica,» [En línea]. Available: <http://www.fair-rite.com/newfair/materials43.htm>.
- [18] Ferroxcube, «Datasheet nucleo ferrita E55-28-25,» [En línea]. Available: <http://www.tme.eu/es/Document/18757/e552821.pdf>.
- [19] FERROXCUBE E55/28/21-3C90, «<http://www.tme.eu/es/Document/18757/e552821.pdf>,» [En línea]. Available: [http://www.tme.eu/es/details/e55\\_28\\_21-3c90/nucleos-de-ferrita/ferroxcube/#tac4e7780fb9574762f2969d38fd290fb](http://www.tme.eu/es/details/e55_28_21-3c90/nucleos-de-ferrita/ferroxcube/#tac4e7780fb9574762f2969d38fd290fb).
- [20] Macor LTDA. Transformadores, *Fabricacion de bobinados.*
- [21] «Wikipedia,» [En línea]. Available: <http://es.wikipedia.org/wiki/Hist%C3%A9resis>.
- [22] E. S. d. MIT, Circuitos Magnéticos y Transformadores, Reverté. ISBN: 9788429190243.
- [23] Electric Drive Laboratory, Using FEMM software tool, May 10, 2006.
- [24] J. G. J. Baldillo, Efecto del Tratamiento Electromagnético y Químico sobre la Inhibición en la Formación de Cristales de Parafinas en Crudos de Alto Punto de Fluidéz, Tesis de Grado, Escuela Ingeniería de Petróleos, Universidad Industrial de Santander.

## ANEXO A

### Manual del usuario

#### Herramienta generadora de campo magnético.

##### **Seguridad**

Para evitar estropear esta herramienta o generar daños a otros equipos electrónicos, lea todas estas instrucciones de seguridad antes de utilizar este equipo. Guárdelas en un lugar donde todas las personas que lo utilicen puedan leerlas.



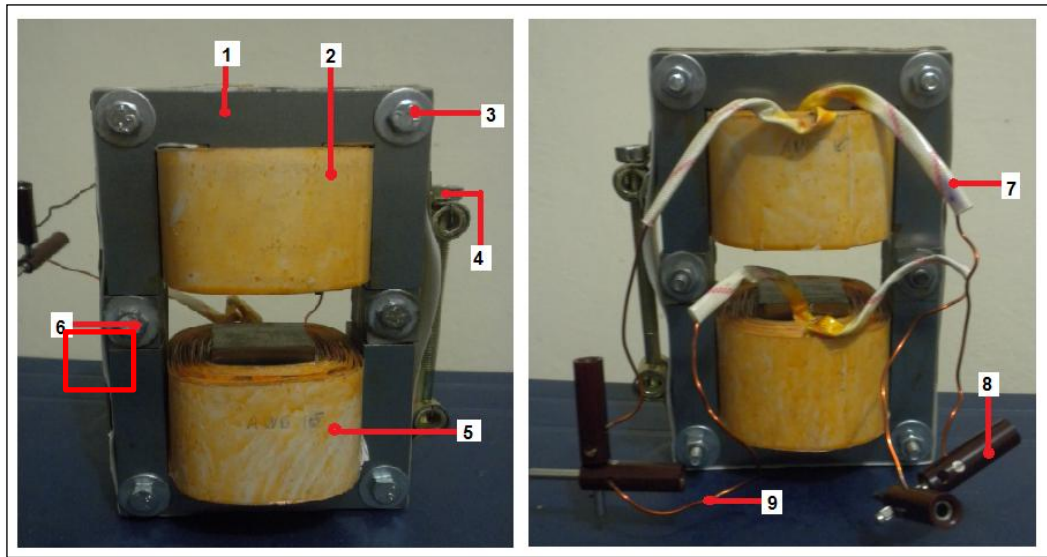
Este icono indica una advertencia: información que debe leer antes de utilizar esta herramienta.

##### **Advertencias:**

- ⚠ En caso de funcionamiento defectuoso desconecte la herramienta o apague la fuente de alimentación.
- ⚠ Revisar cuidadosamente los terminales de la herramienta que estén en buen estado.
- ⚠ Cerciórese que la herramienta está conectada conforme indica el manual de usuario.
- ⚠ Utilice cables adecuados; que soporten un máximo de corriente de 20<sup>a</sup>.
- ⚠ No utilice la herramienta por un tiempo prolongado mayor a 5 minutos.

##### **Partes de la herramienta.**

### Cuerpo de la herramienta



### Descripción del cuerpo de la herramienta

1	Núcleo magnético, acero al silicio.
2	Bobina 1, alambre de cobre AWG 16, 316 vueltas.
3	Tornillo para sujetar las láminas que forman el núcleo magnético.
4	Abrazadera industrial T-526, sujeta las partes individuales de la herramienta brindando estabilidad.
5	Bobina 2, alambre de cobre AWG 16, 316 vueltas.
6	Acople magnético, permite cerrar el circuito magnético, construido del mismo material del núcleo.
7	Aislante eléctrico, material que aísla eléctricamente los terminales de las bobinas.
8	Conector, permite la conexión de la herramienta a la fuente de tensión y la conexión entre las bobinas.
9	Terminal de la bobina, cobre AWG 16.

### **Conectar las bobinas.**

1. Identifique el terminal de cada bobina marcado con la cinta azul.
2. Conecte el terminal "azul" de la bobina1 con el terminal "azul" de la bobina2.

Esta conexión genera campos aditivos con líneas de campo perpendiculares a la tubería.

### **Conectar la fuente de alimentación.**

- ⚠ Antes de conectar cualquier fuente asegúrese que las características y valores nominales coincidan o estén por encima de los siguientes:

Tensión	0-30 V
Corriente	0-20 A

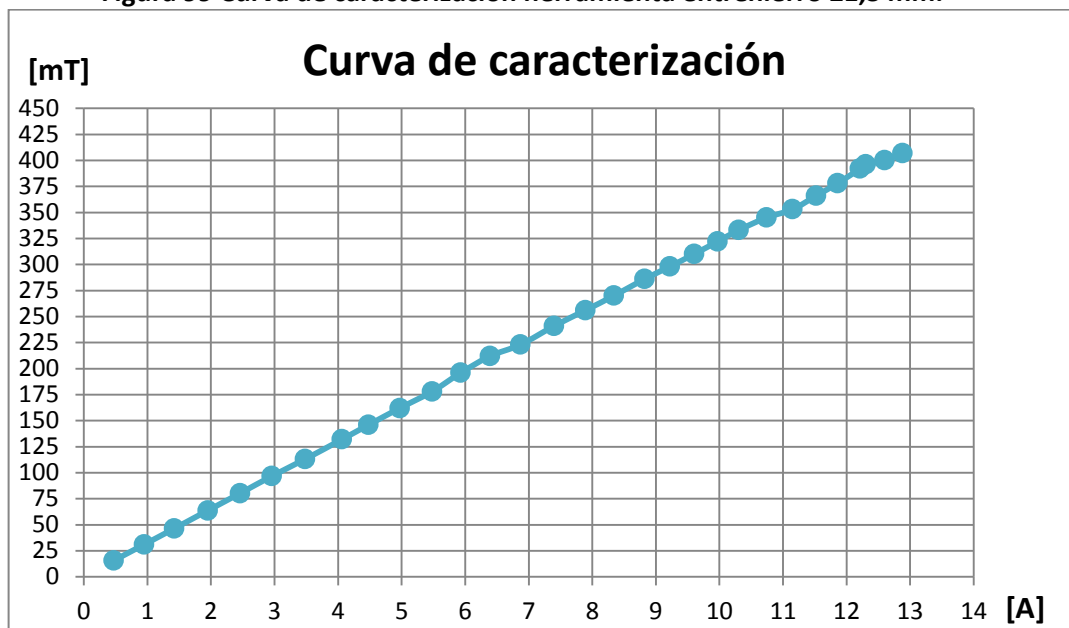
- ⚠ Usar cables para conectar la fuente de alimentación con la herramienta que soporten corrientes máximas de 20<sup>a</sup>

1. Asegúrese que la fuente esté conectada al tomacorriente.
2. Verifique que el botón de encendido de la fuente este inactivo (apagada).
3. Deje los botones que controlan la tensión de salida de la fuente en posición inicial (0V).
4. Conecte un cable al terminal “rojo” de la bobina1 y el otro extremo a la salida positiva (+) de la fuente.
5. Conecte un cable al terminal negro de la bobina2 y el otro extremo a la salida negativa (-) de la fuente.

### ***Poner en funcionamiento la herramienta.***

1. Conectar las bobinas de la herramienta como ya se explicó.
  2. Conectar la fuente de alimentación a la herramienta, ver sección anterior.
  3. Activar el botón de encendido de la fuente de tensión.
  4. Aumentar la tensión poco a poco verificando que la corriente suministrada por la fuente **no supere 13<sup>a</sup>**, si la fuente no es digital o no indica la corriente suministrada es recomendable usar un amperímetro conectado en serie entre una de las bobinas y la fuente de alimentación.
- ⚠ Es de gran importancia que la corriente no supere el valor de corriente mencionado (13 A), el recubrimiento aislante del alambre de cobre a corrientes por arriba de la nominal empieza a perder sus características y se corre el riesgo de generar un corto eléctrico en las bobinas.
5. Para generar la densidad de campo en el centro del entrehierro (21,3 mm) deseado debe suministra la corriente estipulada según la siguiente curva.

Figura 99 Curva de caracterización herramienta entrehierro 21,3 mm.



Fuente Autor.

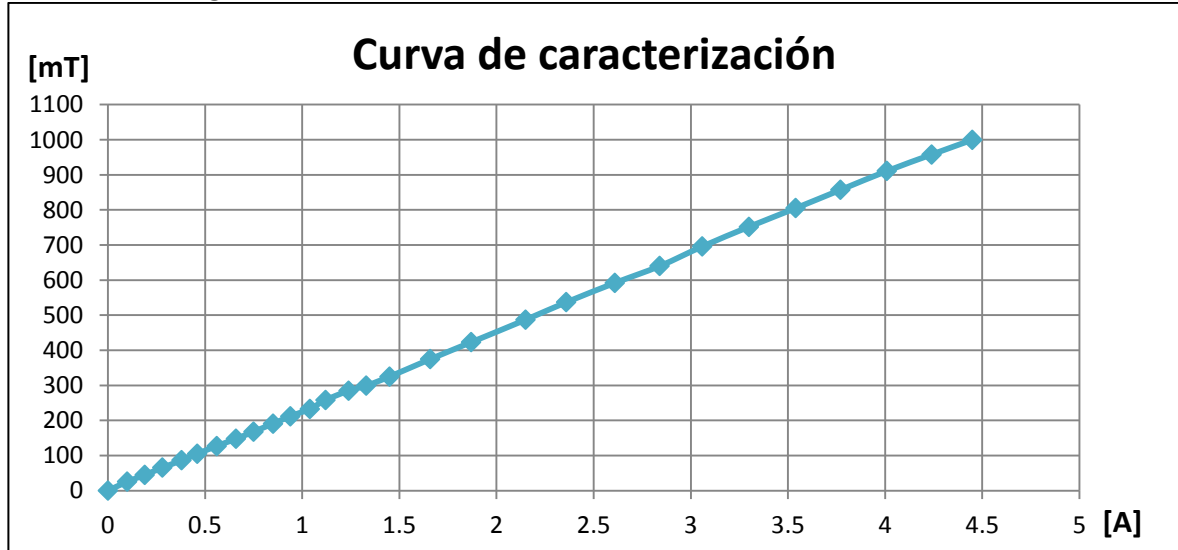
Tabla 19 Datos referentes a la curva de caracterización.

Corriente [A]	Densidad de campo [mT]	Corriente [A]	Densidad de campo [mT]
0,47	15,6	7,89	256
0,95	31,1	8,34	270
1,42	46,3	8,82	286
1,95	63,7	9,22	298
2,46	80,3	9,6	310
2,96	96,8	9,97	322
3,48	113	10,3	333
4,06	132	10,74	345
4,48	146	11,15	353
4,97	162	11,52	366
5,48	178	11,86	378
5,93	196	12,21	392
6,39	212	12,3	396
6,87	223	12,6	400
7,4	241	12,88	407

Fuente Autor.

6. Para generar la densidad de campo en el centro del entrehierro (3mm) deseado debe suministra la corriente estipulada según la siguiente curva.

Figura 100 Curva de caracterización herramienta entrehierro 3 mm.



Fuente Autor.

Tabla 20 Datos referentes a la curva de caracterización.

Corriente [A]	Densidad de campo [mT]	Corriente [A]	Densidad de campo [mT]
0	0	1,45	325
0,1	25,4	1,66	375
0,19	44,8	1,87	423
0,28	65,3	2,15	487
0,38	86,4	2,36	537
0,46	105	2,61	592
0,56	127	2,84	640
0,66	148	3,06	696
0,75	168	3,3	752
0,85	191	3,54	805
0,94	212	3,77	857
1,04	233	4,01	911
1,12	258	4,24	958
1,24	285	4,45	1000
1,33	299		

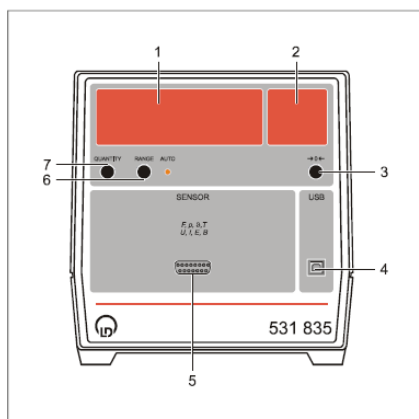
Fuente Autor.

⚠ Cabe resaltar que para usar la herramienta con un entrehierro de 3mm de altura la información anterior limita el uso hasta una generación de 1000mT, aplicando una corriente a los bobinados de 4,45<sup>a</sup>, debido a que el material del núcleo presenta saturación en esta cantidad de campo magnético. Para valores superiores de corriente no se garantiza el funcionamiento de la herramienta.

## ANEXO B TESLÁMETRO L DIDACTIC GMBH



02/05-W97-Hund



### Instruction sheet 531 835

Universal measuring instrument physics (531 835)

- 1 Numerical display
- 2 Unit display
- 3 Pushbutton →0←
- 4 USB port
- 5 Sensor input
- 6 Pushbutton RANGE, with status LED
- 7 Pushbutton QUANTITY

The universal measuring instrument physics complies with the safety requirements for electrical measuring, control and laboratory equipment in accordance with DIN EN 61010 part 1, and it is constructed in compliance with safety class I. The device is intended for use in dry rooms that are suited for the operation of electrical equipment and devices.

If the device is used as prescribed, its safe operation is guaranteed. However, safety is not guaranteed if the device is improperly used or carelessly handled. If it has to be assumed that safe operation is no longer possible (e.g. in the case of visible damage), shut the device down immediately.

- When putting the device into operation for the first time, check whether the value for the mains voltage indicated on the rating plate (back of housing) agrees with the local value.
- Before putting the device into operation, examine the housing for damage. In case of malfunction or visible damage shut the device down and make sure that it is not used inadvertently.
- Connect the device only to socket-outlets with grounded neutral wire and protective conductor.
- Replace a defective fuse only with a fuse that corresponds to the original value.
- Always keep the ventilation slots of the housing free in order to ensure sufficient air circulation.
- Allow only skilled persons to open the device.

The universal measuring instrument physics (UMI Physics) is designed for use in lectures, demonstration experiments in the classroom and practical exercises. It has a large digital indicator and provides for the connection of numerous sensors S for measuring forces, pressures, temperatures, electric field strengths, magnetic flux densities, distances, light time-of-flight, counting rates of radioactive decays, voltages or currents.

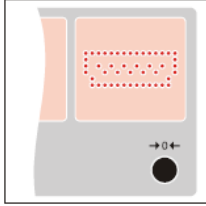
If the device is connected to a computer, it is also possible to display and evaluate time-resolved measurement curves.

Meas. quantity	Suitable sensor S
Force	Force sensor S, $\pm 50$ N (524 042)
Force	Force sensor S, $\pm 1$ N (524 060)
Force	Centrifugal force unit S (524 068)
Relative pressure	Pressure sensor S, $\pm 2000$ hPa (524 064)
Relative pressure	Pressure sensor S, $\pm 70$ hPa (524 066)
Absolute pressure	Absolute pressure sensor S, 1500 hPa (524065)
Temperature	Temperature sensor S, NTC (524 044)
Temperature, differential temp.	NiCr-Ni adapter S (524 0673) with sensor
Electric field strength	Electric field meter S (524 080)
Magnetic flux density	Combi B-sensor S (524 0381)
Magnetic flux density	Axial B-sensor S, $\pm 1000$ mT (524 0382)
Magnetic flux density	Axial B-probe S, $\pm 0.3$ mT (524 0383)
Distance, propagation time of light	Laser motion sensor S (524 073)
Counting rate, pulses	GM counter tube S (524 0331)
Voltage, current	UI sensor S (524 062)

## 2 Operation

### Sensor input (SubD15 socket)

for connecting a suitable sensor S. The connected sensor is recognized by the device automatically and the currently measured value is displayed automatically. If no sensor is connected, the open sensor input is displayed in the unit display.



### Pushbutton RANGE

switches cyclically from a measuring range to the next one or switches the automatic range selection on (status LED AUTO shines).

### Pushbutton QUANTITY

switches cyclically from display of a measurement quantity (indicated by the unit) to the next one.

For voltage, current and magnetic flux density, the display can be switched over to RMS values (indicated by "rms").

### Pushbutton →0←

sets the current measured value to zero for the zero calibration. In an RMS measurement of the magnetic flux density, only the constant component is compensated.

## 3 Technical data

Meas. quantity:	see instruction sheet of the respective sensor S
Range(s):	see instruction sheet of the respective sensor S
Range selection:	automatic or manual
Numerical display:	5-digit, 7-segment display
Unit display:	7x15 LEDs
Digit height:	25 mm
Mains voltage:	see rating plate on the back of the housing
Fuse:	see fuse plate on the back of the housing
Dimensions:	20 cm x 21 cm x 23 cm
Weight:	approx. 2 kg
Scanning rate:	max. 10,000 values/s (for measuring curve shapes on a computer)
Measured values storage:	16,000 values (for measuring curve shapes on a computer)
USB port:	compatible with USB 1.x and 2.0 (full speed, isolated)
Developer information:	<a href="http://www.ld-didactic.com/software/cassy-s.html">http://www.ld-didactic.com/software/cassy-s.html</a>

## 4 Scope of supply

- 1 Universal measuring instrument physics
- 1 CASSY Lab software for Windows 98/ Me/ 2000/ XP or higher, with comprehensive help (unlimited use for the universal measuring instrument physics without activation code)
- 1 USB cable

## 5 Operation on a PC

### 5.1 Hardware and software installation

The installation of the hardware and software requires a properly configured computer with the operating system 98/Me/2000/XP or higher.

#### Hardware installation:

- Connect the UMI Physics to the computer via the USB cable.

When the UMI Physics is connected to the computer for the first time, it is recognized by the operating system automatically, and the necessary drivers are installed.

Under Windows 98, the driver installation has to be confirmed manually:

- Confirm the dialog windows which appear with "Continue" and have the Windows installation CD ready.

#### Software installation:

- Insert the CD with the CASSY Lab software.
- Call the program START.EXE.
- Select the desired language.

During the installation an activation code is requested. This code need *not* be entered for the UMI Physics.

After the installation, the software is found in the Start menu under "Programs" → "CASSY Lab".

CASSY Lab contains a comprehensive help for all of its functions. In order to get familiar with the program, it is recommended to call this help with F1 after starting the program or to read the manual on the CD-ROM.

CASSY Lab can be deinstalled in "Control panel" under "Software".

Updates of the software (extensions, error corrections) are free available on our Internet server <http://www.ld-didactic.com/software/cassy-s.html>. There you also find the Developer Information (incl. source code) for creating your own software for the universal measuring instrument physics.

### 5.2 Operation of the UMI Physics on a computer

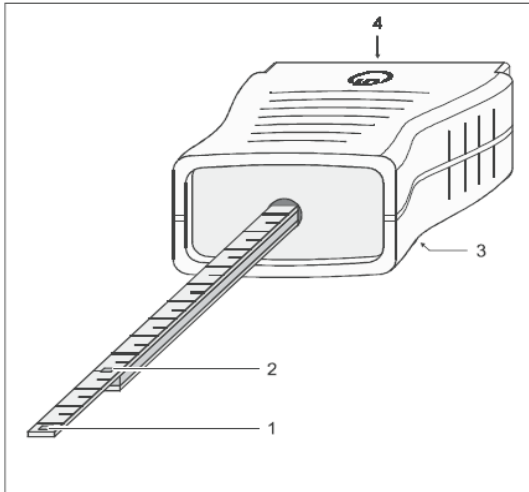
If the connected UMI Physics was recognized during the start of CASSY Lab, a picture of the UMI Physics is displayed. After clicking on the input, the input is switched on. The measurement quantities, ranges and zero calibration are indicated in a settings window. The measurement quantity currently displayed on the UMI Physics can be selected with the pushbutton QUANTITY. The other two pushbuttons of the UMI Physics are inoperative.

# ANEXO C

## SENSOR HALL 1T LD DIDACTIC GmbH

Physics	Chemistry · Biology	Technology	
			<b>Lehr- und Didaktiksysteme</b> LD Didactic GmbH Layboldstrasse 1 · D-50354 Huerth

06/05-W97-Sel



Instruction sheet 524 0381

Combi B-sensor S (524 0381)

- 1 Tangential probe
- 2 Axial probe
- 3 M6 thread
- 4 Plug

### 1 Description

The combi B-sensor S is used as a sensor in conjunction with the CASSY® computer-assisted measurement system for measuring the magnetic field components in the axial and tangential directions with respect to the axis of the sensor.

Experiment examples are found on the CD of the CASSY Lab software (524 200) or in the download version of the software under <http://www.ld-didactic.com> or in the manual of the CASSY Lab software (524 201).

### 2 Measurement quantities

Meas. quantity	CASSY Lab <sup>1/1</sup> (524 200)	CASSY-Display <sup>2/2</sup> (524 020)	Mobile-CASSY (524 009)	Ranges
Magnetic flux density (tangential)	B	✓	B	±10 mT, ±100 mT, ±1000 mT
Magnetic flux density (axial)	B	✓	B	±10 mT, ±100 mT, ±1000 mT

<sup>1/1</sup> for Sensor-CASSY (524 010), Pocket-CASSY (524 006) or Mobile-CASSY (524 009) on a PC

<sup>2/2</sup> in conjunction with Sensor-CASSY (524 010)

### 3 Use

#### 3.1 Putting the sensor into operation:

- Plug the combi B-sensor into a CASSY module (if necessary, use an extension cable).
- Select the desired measurement quantity.

#### 3.2 Compensation




CASSY Lab:

- Click on the "→ 0 ←" button in the dialog window "Sensor Input Settings".

CASSY-Display:

- Press the OFFSET key twice.

Mobile-CASSY:

- Open the Properties menu with the left  key.
- Select the menu item "Correct Offset" with the  key, and press the right  key.

#### 3.3 Carrying out a measurement

- Hold the sensor in the desired position.
- Read the measured value.

### 4 Scope of delivery

- 1 combi B-sensor
- 1 stand rod with thread

### 5 Accessories

- 1 extension cable, 15 pole

501 11

## 6 Compatibility

The combi B-sensor S can be used in conjunction with the following CASSY modules:

	Sensor-CASSY (524 010)	Pocket-CASSY (524 006)	Mobile-CASSY (524 009)
with PC	CASSY Lab software 1.43 or higher version		
without PC	CASSY-Display firmware 1.20 or higher ver- sion	—	Firmware 1.14 or higher version

As a member of the CASSY family this sensor has the following features:

- The sensor can be plugged in at any time.
- The connected sensor is recognized automatically.
- Measurement quantities and measuring ranges are set using the menu-driven software.

## 7 Updates

If the software or firmware used is older than that given above, an update of the software or firmware is required. The current version of the CASSY Lab software is available on the internet under <http://www.ld-didactic.com>.

- Install the current version of the CASSY Lab software and start it.
- Connect all available CASSY modules to the PC one after another.
- As soon as you are prompted, bring the firmware up to date with "Update CASSY Modules" so that it matches with CASSY Lab.

---

® CASSY is a registered trademark of LD Didactic GmbH