

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE UNA HERRAMIENTA
MAGNÉTICA PARA INHIBIR LAS PRECIPITACIONES DE PARAFINA DE CAMPO
ESCUELA COLORADO**

Ing. Cristian Camilo Jiménez Leiva

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

2013

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE UNA HERRAMIENTA
MAGNÉTICA PARA INHIBIR LAS PRECIPITACIONES DE PARAFINA DE CAMPO
ESCUELA COLORADO**

Ing. Cristian Camilo Jiménez Leiva

**Trabajo de Grado para optar el título de
Magister en Ingeniería Eléctrica**

Director

Dr. Hermann Raúl Vargas Torres

Co-Director

Dr. (c) Emiliano Ariza León

M.Sc. Jorge Enrique Meneses Flórez

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

2013

AGRADECIMIENTOS

Al finalizar esta etapa de mi formación profesional quiero agradecer especialmente a la Universidad Industrial de Santander, al Campo Escuela Colorado y al grupo de investigación GISEL por el apoyo brindado en el desarrollo de la investigación.

Quiero agradecer a mis tutores de investigación: al Dr. Hermann Raúl Vargas Torres, al Dr. (c). Emiliano Ariza León y al M.Sc. Jorge Enrique Meneses Flórez, por su incondicionalidad en los momentos cruciales de la investigación. Sus valiosos aportes hicieron posible todos y cada uno de los resultados obtenidos.

Quiero dar un agradecimiento a mi familia, porque siempre han estado en cada momento que los he necesitado, inclusive, en los más difíciles.

Quiero agradecer a mis compañeros en el proceso: Jairo Blanco, Gabriel Malagón, Iván Serna, María Alejandra Mantilla, Erick Vera y Mónica Chaparro, su amistad me ha enseñado lo divertido que pueden ser los momentos difíciles. Gracias por hacerme parte de ustedes.

Finalmente quiero hacer un reconocimiento especial a todos los estudiantes que, con su proyecto de grado apoyaron de manera total los resultados alcanzados en la investigación: Sergio Riberos, Ángela Ortiz, John Rey, Jerson Pinzón, Sebastián Ramírez, Yesid Briceño, Camilo Díaz, Andrés Hernández, José Suárez, Marcos Arias y Byron Campo. Sin ustedes nada de esto fuera sido posible. Inmensamente agradecido y espero que les vaya muy bien en sus vidas profesionales y personales, lo merecen.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	14
1. ANTECEDENTES DE MÉTODOS IMPLEMENTADOS PARA EL CONTROL DE PRECIPITACIÓN DE CERAS.....	16
1.1 Métodos correctivos para el control de parafinas	19
1.1.1 Remoción mecánica [18]	19
1.1.2 Reacción química exotérmica [19] [20] [21] [22]	19
1.1.3 Generadores de calor [23]	20
1.1.4 Productos microbianos [24]	20
1.1.5 Químicos dispersantes-solventes [25]	21
1.2 Métodos de inhibición	21
1.2.1 Flujo en frío [26] [27] [28] [29] [30] [31] [32]	21
1.2.2 Reductores químicos de depositación de ceras [33] [34] [35] [36] [37] [38].....	22
1.2.3 Tuberías anti-adherentes.....	22
1.3 Influencia de campos eléctricos y magnéticos en crudos parafínicos	23
1.3.1 Campos magnéticos [43]	23
1.3.2 Campos eléctricos	27
1.3.3 Herramientas magnéticas para el tratamiento de crudos parafínicos [54] [55].....	29
2. PRUEBAS PRELIMINARES: CAMPO MAGNÉTICO	39
• Toma de muestras de los pozos en Campo Colorado:	39
• Selección del viscosímetro (medición de flujo másico):	39
• Simulación de distribución de flujo magnético aplicado a través de núcleo generador de campo estacionario:.....	39
• Adaptación de viscosímetro y herramienta generadora de campo estacionario:	39
• Diseño experimental:	39

• Pruebas en muestras de crudo paraafínico:	39
3. PRUEBAS PRELIMINARES: CAMPO ELÉCTRICO	43
• Construcción de viscosímetro capilar:	44
• Construcción fuente generadora de campo eléctrico:	44
• Caracterización de los crudos en estudio:	44
• Pruebas preliminares:	44
• Diseño experimental (muestras no modificadas):	44
4. CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE UNA HERRAMIENTA MAGNÉTICA PARA INHIBIR LA PRECIPITACIÓN DE PARAFINAS.....	50
4.1 Geometría de núcleo magnético [60].....	52
4.1.1 Núcleos E-I.....	52
4.2 Diseño y simulación del prototipo de la herramienta.....	58
4.3 Diseño de herramienta (H6).....	69
4.4 Diseño de herramienta (H7).....	71
4.5 Análisis matemático.....	73
4.6 Circuito magnético del prototipo de herramienta	75
4.7 Construcción de la herramienta magnética	82
4.8 Pruebas de laboratorio a herramienta magnética	84
5. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA HERRAMIENTA MAGNÉTICA.....	89
5.1 Elementos del banco de pruebas.....	90
01. Codo para Cambio de dirección en tubería	90
02. Válvula tipo bola (llave de apertura y cierre).....	91
03. Bomba de desplazamiento positivo	92
04. Tubería Acero al Carbono	93
05. Tubería de conexión tipo “T”	93
06. Termómetro.....	94
07. Tubería Acero Inoxidable.....	94
08. Prototipo de Herramienta Magnética	95
09. Generador de Vapor/Conductor de Cobre Flexible/Consigna Temperatura.....	95

10. Tanque de almacenamiento de crudo (5 litros)	96
11. Tubería de conexión tipo “cruz”	96
12. Tanque de almacenamiento de crudo (10 litros).....	96
13. Conductor de Cobre THHN # 16 AWG	97
14. Fuente regulada de tensión	97
15. Circuito Ferromagnético	97
5.2 Descripción técnica del banco de pruebas	97
5.3 Estructura de soporte mecánico	102
5.4 Selección de tubería de transporte de crudo	104
5.5 Dimensiones finales del banco de pruebas	105
6. CONCLUSIONES	113
7. RECOMENDACIONES	116
8. PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN DIRIGIDOS.....	118
9. PUBLICACIONES REALIZADAS	119
10. BIBLIOGRAFÍA	120

Lista de Gráficas

Figura 1: Localización Campo Colorado.....	35
Figura 2: Mapa de los pozos de Campo Colorado	36
Figura 3: Mejora de la movilidad del crudo parafínico mediante campos magnéticos.....	17
Figura 4: Modificado de O. Hernández [16]	18
Figura 5: Dirección de la fuerza de Lorentz.	26
Figura 6: Dispositivo de Patente US4367143. Fuente [54]	29
Figura 7: Corte transversal del dispositivo instalado en tubería	31
Figura 8: Correa de sujeción de dispositivo. Patente US4367143 [54]	31
Figura 9: Carcasa de dispositivo patente 5024271 [55]	32
Figura 10: Corte transversal de prototipo. Patente No. 5024271 [55].....	33
Figura 11: Metodología de Aplicación de Campos Eléctricos en Crudos.	43
Figura 12: Sistema de aplicación de campo eléctrico.	44
Figura 13: Viscosidad Pos-tratamiento a temperatura ambiente	46
Figura 14: Herramienta tipo solenoide. [56]	50
Figura 15: Herramienta tipo imán permanente. [56]	51
Figura 16: Núcleo de ferrita tipo E-I. [60]	52
Figura 17: Núcleo acero al silicio. Fabricante: Frana International S.A.S. [61]	53
Figura 18: Curva de permeabilidad relativa del acero al silicio del núcleo. [61]	56
Figura 19: Curva de pérdidas por kilogramos del núcleo de la herramienta. [61].....	57
Figura 20: Dibujo esquemático del prototipo de la herramienta magnética. [62]	58
Figura 21: Curva de magnetización del acero al silicio. FEMM 4.2. [62].....	59
Figura 22: Dimensiones lámina de ferrita E55/28/25 Ferroxcube. [62]	60
Figura 23: Curva de magnetización inicial de la ferrita 43. Ferroxcube. [62]	60
Figura 24: Curva de permeabilidad vs temperatura, ferrita 43. Ferroxcube. [62]	61

Figura 25: Configuración de la permeabilidad de la ferrita @25°C. [62]	61
Figura 26: Distribución de campo magnético en núcleo de ferrita. [62]	63
Figura 27: Resultados en centro de herramienta de ferrita propuesta. [62].....	63
Figura 28: Interpolación de curva de magnetización @75 °C. [62]	64
Figura 29: Curva de caracterización de la ferrita 3C90 @75 °C. [62].....	66
Figura 30: Comportamiento de prototipo con núcleo 3C90 @75 °C. [62]	67
Figura 31: Resultados en centro de entrehierro de núcleo 3C90 @75 °C. [62]	67
Figura 32: Características físicas de láminas E/114/75/38. [62]	68
Figura 33: Propuesta de prototipo H6. [62]	69
Figura 34: Resultados cromatografía de prototipo H6. [62]	70
Figura 35: Resultados en centro de entrehierro de núcleo M-43. [62].....	70
Figura 36: Resultados cromatografía de prototipo H7. [62]	72
Figura 37: Resultados en centro de entrehierro de núcleo M-43 (H7). [62].....	72
Figura 38: Dimensiones del prototipo de la herramienta magnética. [62]	75
Figura 39: Esquema circuital de prototipo de herramienta magnética. [62].....	76
Figura 40: Entrehierro de un núcleo magnético de sección rectangular. [62]	78
Figura 41: Circuito magnético de herramienta magnética construida. [62].....	79
Figura 42: Circuito magnético resultante herramienta magnética construida. [62]	80
Figura 43: Esquema de construcción de herramienta magnética. Autor.....	83
Figura 44: Prototipo de la herramienta magnética construido. [62].....	84
Figura 45: Circuito de prueba de herramienta magnética construida. [62]	85
Figura 46: Diseño inicial de banco de pruebas para tratamiento magnético. Autor	90
Figura 47: Ilustración de un codo de tubería de acero.....	91
Figura 48: Ilustración de válvula tipo bola.....	91
Figura 49: Ilustración de bomba de desplazamiento positivo.....	92
Figura 50: Ilustración de tubería de conexión tipo “T”.....	93
Figura 51: Sensor y transmisor de temperatura.....	94
Figura 52: Prototipo de herramienta magnética. Autor.....	95
Figura 53 : Tubería de conexión tipo cruz.....	96
Figura 54: Fuente regulada de tensión.....	97
Figura 55: Diagrama de tuberías y procesos de banco de pruebas. Autor.....	98
Figura 56: Esquema general de banco de pruebas construido. Autor.....	100
Figura 57: Vista superior de banco de pruebas construido. Autor.	101
Figura 58: Vista lateral de banco de pruebas construido. Autor.	101
Figura 59: Dimensiones de la estructura de soporte mecánico del banco. Autor.	103
Figura 60: Dimensiones de banco de pruebas de experimentación. Autor.	107
Figura 61: Vista frontal de banco de pruebas construido. Autor.	108
Figura 62: Vista frontal 2 referenciada de banco de pruebas construido. Autor.....	109

Lista de Tablas

Tabla 1: Datos básicos de yacimiento (formación mugrosa).....	37
Tabla 2: Caracterización de muestras. [56].....	40
Tabla 3: Comportamiento de la viscosidad sin y con tratamiento magnético. [56].....	41
Tabla 4: Comportamiento de la viscosidad sin y con tratamiento magnético. [56].....	41
Tabla 5: Comportamiento punto de nube sin y con tratamiento magnético. [56].....	42
Tabla 6: Caracterización crudo en blanco Colorado 36 y Colorado 67. [57].....	45
Tabla 7: Medición de la viscosidad en muestras representativas.	45
Tabla 8: Medición de Punto de nube a muestras en blanco y con tratamiento	45
Tabla 9: Emulsiones del diseño experimental propuesto.	47
Tabla 10: Caracterización de emulsiones no tratadas. [58]	48
Tabla 11: Tiempo de exposición a campo eléctrico. [58].....	48
Tabla 12: Dimensiones de lámina de acero al silicio escogida. [61]	54
Tabla 13: Características generales del material seleccionado. [61].....	55
Tabla 14: Características ferromagnéticas del material seleccionado. [61].....	55
Tabla 15: Resultados de simulación en núcleo de ferrita @ 25 °C. [62]	64
Tabla 16: Tabulación curva de magnetización de ferrita @ 75 °C. [62]	65
Tabla 17: Resultados de simulación con efectos de saturación. [62]	68
Tabla 18: Dimensiones lámina de núcleo tipo E/114/75/38. [62]	69
Tabla 19: Parámetros de construcción de prototipo H6. [62]	71
Tabla 20: Parámetros de construcción de prototipo H7. [62]	73
Tabla 21: Corriente para generar 400 mT para diferentes calibres. [62].....	81
Tabla 22: Porcentaje de error entre cálculos matemáticos y simulación. [62]	82
Tabla 23: Pruebas de laboratorio a herramienta magnética construida. [62].....	86
Tabla 24: Resultados de simulación de herramienta construida. [62]	87
Tabla 25: Dimensiones y peso de banco de pruebas construido.....	106
Tabla 26: Dimensiones y peso de banco de pruebas construido.....	110
Tabla 27: Proyectos realizados como soporte de tesis de maestria.	118

RESUMEN

TÍTULO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE UNA HERRAMIENTA MAGNÉTICA PARA INHIBIR LAS PRECIPITACIONES DE PARAFINA DE CAMPO ESCUELA COLORADO¹

AUTOR: CRISTIAN CAMILO JIMÉNEZ LEIVA²

PALABRAS CLAVES: Prototipo de una herramienta magnética, inhibición magnética de precipitación de ceras tipo parafina, inhibición eléctrica de precipitación de ceras tipo parafinas, Método de Elementos Magnéticos Finitos (FEMM 4.2), Campo Escuela Colorado.

Este trabajo de investigación, está motivado por la necesidad de inhibir las precipitaciones de ceras tipo parafina de los pozos del Campo Escuela Colorado (CEC), las cuales reducen considerablemente el diámetro efectivo de la tubería de producción, disminuyendo de esta manera la extracción y en casos críticos el taponamiento de la tubería. Entre las soluciones alternativas propuestas para evitar este problema, se plantea la aplicación de campos magnéticos con la intensidad suficiente para producir cambios en las características reológicas de las muestras de crudo tratadas. Para este fin, se realizaron pruebas preliminares en laboratorio, en donde se pudo observar los requerimientos básicos tales como la geometría de la herramienta, la disposición de líneas de campo, la magnitud de la densidad de flujo magnético, entre otros, para la aplicación del tratamiento. Teniendo en cuenta lo anterior, se construyó el prototipo de una herramienta magnética en base con los modelos matemáticos que describen el comportamiento de los circuitos magnéticos y el software numérico Finite Element Method Magnetics 4.2 (FEMM 4.2). Finalmente se realizaron mediciones en laboratorios a la herramienta en operación, obteniendo datos que validaron los resultados previamente arrojados por el modelo y el simulador.

Por otro lado, se desarrollaron los experimentos necesarios para establecer las bases de diseño (intensidad de campo eléctrico, dirección de las líneas de campo, porcentaje de agua en emulsión, entre otros), en la construcción del prototipo de una herramienta de generación de campos eléctricos, para el tratamiento de muestras seleccionadas de crudo del CEC.

En base con los resultados obtenidos en la investigación, se pudo observar que un campo magnético tiene la capacidad de reducir en un 32% la temperatura de cristalización de las ceras tipo parafina, así como también, con un campo eléctrico se obtuvo una reducción de 7,46% en la viscosidad de las muestras tratadas.

¹ Trabajo de investigación.

² Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Grupo GISEL – CAMPO ESCUELA COLORADO. Director: Dr. Hermann Raúl Vargas Torres. Codirectores: Dr. (c) Emiliano Ariza León y M.Sc. Jorge Enrique Meneses Flórez.

ABSTRACT

TÍTULO: DESIGN AND CONSTRUCTION OF A MAGNETIC TOOL PROTOTYPE TO INHIBIT THE PRECIPITATIONS OF PARAFFINS OF CAMPO ESCUELA COLORADO³

AUTHOR: CRISTIAN CAMILO JIMÉNEZ LEIVA⁴

KEY WORDS: Magnetic tool prototype, magnetic inhibition of precipitation of paraffin waxes, electrical inhibition of precipitation of paraffin waxes, Finite Element Method Magnetics (FEMM 4.2), Campo Escuela Colorado.

This research is motivated by the need to inhibit the precipitation of paraffin waxes into the wells of Campo Escuela Colorado (CEC), which reduces significantly the effective diameter of the tubing and decrease the crude oil extraction and in the critical case blockage the tubing completely. Among the alternative solutions proposed to avoid this problem, the best proposal choose is the application of magnetic fields with sufficient intensity to produce changes in the rheological properties of the treated oil samples. For this purpose, preliminary tests were conducted in the laboratory, where it was observed the basic requirements such as the geometry of the tool, the arrangement of field lines, the magnitude of the magnetic flux density, among others parameters for the application of treatment. Taking into account the above, the design and construction the magnetic tool prototype was based in mathematical models that describe the behavior of the magnetic circuits and Finite Element Method Magnetics 4.2 (FEMM 4.2) numerical software. Finally, laboratory measurements were made to the tool in operation, obtaining data previously validated the results produced by the model and the simulator.

Furthermore, some necessary experiments were conducted (electric field strength, direction of the field lines, percentage of water in emulsion, etc.) to establish the design bases in the construction of a prototype field electric generator tool, for the treatment of selected samples of CEC's crude.

Based on the results obtained in the investigation, it was observed that a magnetic field is capable of reducing by 32% the crystallization temperature of the paraffin waxes , as well as with an electric field is obtained a reduction about of 7,46% in the viscosity of the treated samples.

³ Master Thesis topic.

⁴ Faculty of Physical-Mechanics Engineering. School of Electric, Electronic and Telecommunication Engineering. Research Group GISEL – CAMPO ESCUELA COLORADO. Director: Dr. Hermann Raúl Vargas Torres. Co-directors: Dr. (c) Emiliano Ariza León and M.Sc. Jorge Enrique Meneses Flórez.

INTRODUCCIÓN

Teniendo en cuenta el incremento en la demanda de petróleo, se requiere producir más barriles de crudo por día. Esto se traduce finalmente en aumento de recursos tanto para la nación, como para todos aquellos que hacen parte de la cadena productiva de la transformación de los hidrocarburos, teniendo en cuenta la paulatina pero constante reducción de las reservas y el alza de precios del crudo en el mercado internacional.

Según la industria petrolera, un campo pasa a la categoría de maduro cuando comienza a declinar el máximo de producción que ha alcanzado. Entonces, cuando un campo ha alcanzado su madurez, las economías son distintas, los costos son más elevados y los barriles producidos son menos.

Por tanto, así como se habla de la 'eficiencia energética' como una fuente principal de crecimiento de la economía de un país [1], el aumento de la productividad de los campos maduros resultaría en un incremento de los recursos energéticos, y por ende el mejoramiento de la economía de un país. Adicionalmente, la autosuficiencia petrolera ha sido uno de los principales propósitos en Colombia, ya que de no ser así conllevaría a la compra del hidrocarburo a las compañías asociadas o a importarlo, en ambos casos a precios internacionales, sumando las implicaciones negativas sobre la economía, las finanzas públicas y las exportaciones.

El objetivo básico al aumentar la productividad de los pozos es lograr un aumento en el factor de recobro⁵ de los hidrocarburos, con lo cual se extiende la vida útil del campo y se mejora la rentabilidad del mismo, ya que estos campos tienen una infraestructura y transporte que no necesita nuevos desarrollos, o adelantar costosas campañas de perforación de nuevos pozos. En este sentido existen varias opciones para aumentar la producción y por ende la recuperación de hidrocarburos. Una de las alternativas consiste en la aplicación de nuevas tecnologías que den lugar al mejoramiento de las características reológicas del crudo, permitiendo de esta manera un mejor uso, consumo y aprovechamiento de los recursos naturales.

⁵ **Factor de Recobro:** Es el porcentaje de petróleo en sitio que se puede recuperar, por ejemplo, un factor de recobro de 20% significa que de cada 100 barriles en el yacimiento sólo 20 son extraíbles.

En consecuencia, hace más de una década ha tomado importancia la posibilidad de mejorar la producción de los campos con características no favorables. De esta manera son los yacimientos maduros los que se perfilan como una nueva posibilidad económica, brindando la oportunidad de continuar la explotación del área trabajada.

En la actualidad gran parte de los hidrocarburos provienen de yacimientos denominados marginales o maduros, lo que centra el interés de la industria frente a los campos petroleros de este tipo. De acuerdo con estudios realizados para el máximo aprovechamiento de los campos petroleros maduros, el mejoramiento del factor de recobro de yacimientos conocidos en tan sólo un uno por ciento, implicaría la incorporación de 10 mil millones de barriles (1600 millones de m³) de petróleo equivalente al 40% de la cantidad en reservas pronosticadas para esta época (25.000 millones de barriles anuales).[2][3]

En la industria del petróleo uno de los aspectos que afecta negativamente la tasa de producción (ya sea de crudo o gas), en un yacimiento marginal o maduro es la precipitación de parafinas. Estas fracciones que se encuentran disueltas en los hidrocarburos a ciertas condiciones de temperatura y presión de yacimiento comienzan a precipitarse. Lo anterior afecta el flujo de producción y la presión de la tubería por donde fluye el hidrocarburo, generando pérdidas económicas muy significativas.

En Colombia se promueve el desarrollo de investigaciones y uso de tecnologías, que permiten la explotación de campos maduros, para fortalecer la producción. Es el caso del proyecto Campo Escuela Colorado (CEC), el cual surge de un convenio interadministrativo entre Ecopetrol y la Universidad Industrial de Santander, con el fin de estimular la investigación, el desarrollo tecnológico y científico, y de esta manera apoyar la formación de profesionales capacitados en la industria de los hidrocarburos [4].

En el primer capítulo se muestra una revisión bibliográfica de los antecedentes relacionados con tratamientos aplicados en yacimientos, para controlar la precipitación de ceras parafínicas. En el segundo y tercer capítulo se muestran los estudios preliminares para determinar las bases de diseño del prototipo de una herramienta magnética y una herramienta eléctrica. Seguidamente en el capítulo cuarto, se realiza el informe del diseño y construcción del prototipo de una herramienta magnética, y finalmente en el capítulo quinto, se muestra el informe de las características del banco de pruebas y de cada uno de los componentes implementados para simular las condiciones de fondo de pozo.

1. ANTECEDENTES DE MÉTODOS IMPLEMENTADOS PARA EL CONTROL DE PRECIPITACIÓN DE CERAS

El Campo Escuela Colorado durante su historia productiva ha presentado problemas de precipitación y deposición de parafinas, generadas por la reducción de temperatura de los fluidos a lo largo del proceso de extracción y recolección. A partir de este problema se propaga la obstrucción y el taponamiento de las tuberías, debido a que la deposición de parafinas reduce el diámetro del conducto (ver figura 1), la productividad se afecta de forma negativa (disminución de la producción), hasta el punto de llegar a producción nula si el problema no se trata a tiempo, para corregir la precipitación de las parafinas. [4]

Desde los primeros pozos que se perforaron hace más de cien años atrás, la precipitación de parafinas ha sido reconocida a nivel mundial como un gran problema en la industria del petróleo, debido a que su acumulación en tuberías ocasiona complicaciones en las etapas de producción, almacenamiento y transporte de crudos [5] [6] [7].

A causa de las pérdidas de calor y presión en las muestras de crudo, sustancias orgánicas e inorgánicas llegan a depositarse en las paredes de la tubería de producción, de tal manera que pueden bloquear el diámetro de flujo (disminuyendo de esta manera el caudal de extracción), aparte de aumentar la tendencia a la corrosión en los materiales expuestos, causando así problemas de operación en las facilidades de producción de hidrocarburos [8] [9] [10] [11] [12].

La depositación de ceras se presenta cuando las componentes de parafina presentes en las muestras de crudo, comienzan a precipitarse y acumularse en las paredes de la tubería de producción debido a que, la temperatura al interior del conducto de flujo, cae por debajo del punto de nube, temperatura a la que se forma el primer cristal tipo parafina [13]. Haciendo citación, en el Campo Lasmo ubicado en Reino Unido, este fenómeno fue tan severo y frecuente, que llegó a causar el cierre por completo del campo a un costo de aproximadamente USD \$100 000 000 [14] [15].



Figura 1: Villabona C y González D. “Mejora de la movilidad del crudo parafínico mediante campos magnéticos” [13].

De acuerdo con lo anterior, es notorio, que en el proceso de la depositación de ceras tipo parafina, los cristales se acumulan sobre la superficie interior del tubo, por lo tanto, las características y el material de la superficie de la línea de transporte, son parámetros que determinan el comportamiento de las aglomeraciones.

En su estudio, Hernández [16] determina tres zonas demarcadas ubicadas en la parte interna del ducto por donde fluye el crudo (ver figura 2). La primera se denomina depósito antiguo, ubicada en la zona más cercana a la pared interna de la tubería; posteriormente, una zona más interna denominada nuevo depósito y por último, la zona por donde fluye el crudo denominada zona central de la tubería de producción. El mecanismo de depositación comienza cuando las muestras de crudo que fluyen por la parte central de la tubería pierden calor alcanzando la temperatura del punto de cristalización, produciendo así cristales de cera que se adhieren al nuevo y al antiguo depósito de la tubería. De esta forma, los depósitos aumentan en tamaño, dando lugar, en algunos casos al taponamiento por completo de las tuberías.

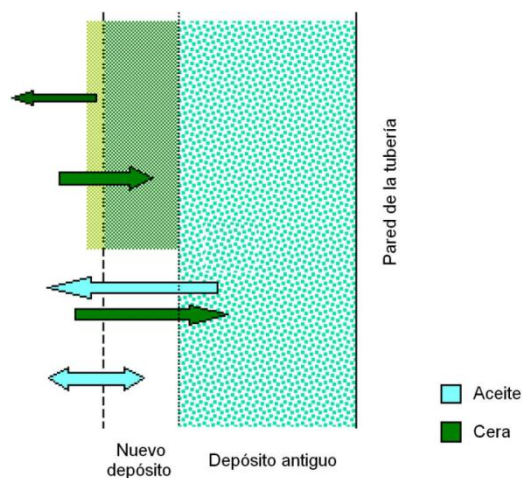


Figura 2: Modificado de O. Hernández [16]

Los métodos más utilizados en la actualidad en la industria del petróleo para eliminar o prevenir las ceras ocasionadas por la aglomeración de las precipitaciones se dividen en las siguientes categorías: 1) flujo en frío, 2) químicos reductores, 3) implementación de diferentes materiales de recubrimiento en las tuberías de producción, 4) remoción mecánica, 5) reacción química de fundición, 6) aplicación de calor en tuberías, 7) solventes, 8) dispersantes, 9) acondicionador de campos magnéticos, 10) aplicación directa de campos eléctricos y 11) la implementación de agentes micro-bacterianos [17].

Esta sección del documento es la revisión del estado del arte de los tratamientos aplicados para remover (corregir) e inhibir (prevenir) el depósito de cera en crudos parafínicos.

Para el control de las depositaciones de parafina se han establecido en la industria de los hidrocarburos métodos de corrección, los cuales buscan eliminar los aglomerados parafínicos presentes en las superficies internas de la tubería, y los métodos de inhibición o prevención, los cuales pretenden evitar la precipitación y acumulación de los cristales de cera en las líneas de producción.

Debido a las limitaciones que se presentan al momento de implementar cada una de estas técnicas para controlar este fenómeno, en esta sección del documento el autor pretende establecer una base que permita conocer cada una de las alternativas aplicadas para la solución de este problema [17].

1.1 Métodos correctivos para el control de parafinas

Para resolver los problemas operacionales que están relacionados con la depositación de sustancias orgánicas (principalmente parafinas y asfáltenos), la comunidad científica ha desarrollado algunos métodos y herramientas de control correctivo, los cuales se describen a continuación:

1.1.1 Remoción mecánica [18]

Tal vez considerado como el método más antiguo para eliminar los efectos de las depositaciones de cera; esta técnica correctiva implementa un “raspador” dentro de las líneas de transporte de crudo. En todas las herramientas existentes en el mercado, el principio de operación consiste en un raspado físico de los depósitos de cera adheridos a la superficie de la tubería sin interrumpir el proceso de producción. Es un método poco costoso que, mecánicamente puede remover todas las obstrucciones que se puedan presentar en el área seccional de la tubería. Desafortunadamente, esta manera de abordar el problema de las depositaciones ya aglomeradas podría no ser eficiente, ya que estos dispositivos presentan fallas en su funcionamiento en ambientes difíciles, es decir, donde la temperatura, la presión, la corrosión y la geometría de la línea de transporte impiden el desplazamiento de estas herramientas produciendo de esta manera atascamiento y paro en tuberías, además si la línea de producción es demasiado extensa y se debe hacer mantenimiento de manera muy frecuente, esta técnica puede convertirse en una opción económicamente inviable.

1.1.2 Reacción química exotérmica [19] [20] [21] [22]

Una manera eficiente para eliminar depósitos de parafina es a través de la reacción de fundición química con emisiones controladas de calor. Para hacer efectivo este método, es necesario conocer el espesor del depósito, así como también el corte de parafinas contenidas en los depósitos como una función del tiempo y la distancia axial de la tubería, ya que un análisis impreciso de la formación de aglomerados presentes en la tubería, puede conllevar a la incapacidad del método para disolver las ceras depositadas, siendo éste, el principal inconveniente en el momento de la aplicación.

1.1.3 Generadores de calor [23]

Uno de los métodos más conocidos es la aplicación de calor sobre muestras de crudo para disolver la formación de los acumulados de cera asentados en la superficie de la tubería. Una de las varias técnicas utilizadas para este fin es un generador de nitrógeno. Esta es una implementación correctiva y preventiva de las depositaciones de parafina en las líneas de transporte que usa una reacción de dos productos químicos de composición no conocida, las cuales contienen nitrógeno capaz de generar gran cantidad de calor para mantener la temperatura por encima del punto de nube, permitiendo la disolución de las parafinas y a la vez previniendo la formación de cristales disueltos [6]. Para mejores resultados, el tratamiento debe ser aplicado lo más tempranamente posible en el proceso de extracción antes que se empiecen a formar las primeras aglomeraciones de parafina cristalizada. El calentamiento se aplica de forma similar a través de varias técnicas diferentes a la descrita anteriormente, tales como: aceite caliente, inyección de vapor, calentamiento eléctrico resistivo, inducción magnética, entre otros. Para cada una de estas metodologías se debe tener en cuenta no sólo como calentar las muestras, sino también la manera de evitar las pérdidas de calor en el crudo tratado, lo cual hace necesario la implementación de un adecuado aislamiento térmico.

1.1.4 Productos microbianos [24]

Los productos microbianos son una de las técnicas recientemente empleadas para combatir el efecto indeseado de las depositaciones de ceras. Estos productos están compuestos de una solución bacteriana de microorganismos vivos. Cuando estos microorganismos o bacterias se introducen en el conducto de producción, trabajan para degradar los acumulados de los cristales de parafina presentes en la superficie del ducto. Esta técnica ha presentado gran acogida en la comunidad científica debido a que estos agentes no presentan características patógenas, ni inflamables, ni corrosivas, y adicionalmente son productos que operan a favor de la conservación el medio ambiente. Se debe tener en cuenta que periódicamente se necesita ingresar a la tubería de producción una nueva cantidad de tratamiento para mantener el tamaño de la colonia microbiana y evitar de esta manera, la extinción del proceso dentro del ducto.

1.1.5 Químicos dispersantes-solventes [25]

Dos tipos de químicos se emplean para la remoción de escamas orgánicas: dispersantes y solventes. Al aplicar químicos dispersantes sobre las facilidades de las tuberías no se busca disolver la parafina adherida a la superficie, sino disgregar y dispersar las ceras aglomeradas, de tal manera que puedan ser transportadas por el mismo flujo a lo largo del ducto. Por otra parte los solventes, muy comúnmente usados en la industria, son usados para disolver el bajo contenido de asfáltenos en los depósitos de parafina. Los más utilizados para este propósito son el tetra-cloruro de carbono (CCl_4), y el disulfuro de carbono (CS_2), denominados en este sector como los solventes universales.

1.2 Métodos de inhibición

Las técnicas de inhibición que en la actualidad operan en la industria, están orientadas a evitar la precipitación y aglomeración de ceras de parafina sobre las superficies internas de la tubería. Entre los principales métodos de mitigación se encuentran: el flujo en frío, reductores químicos de depositación de ceras, implementación de diferentes tipos de tuberías y recubrimientos, aplicación de campos eléctricos y la implementación de tratamientos magnéticos [13]. A continuación se describe cada uno de estos.

1.2.1 Flujo en frío [26] [27] [28] [29] [30] [31] [32]

Se afirma que si un lodo sólido se forma en el inicio del recorrido de extracción de la tubería, el flujo será transportado de manera estable sin más depositaciones sólidas de parafina. La propuesta del flujo en frío se basa en las observaciones realizadas por los autores referenciados en [26] en donde se muestra que al existir partículas externas al crudo se presenta una disminución en la tendencia de depositación de ceras orgánicas. Dichas partículas actúan como centros de nucleación limitando de esta manera, la cantidad de sólidos adheridos a la superficie de la línea de producción. Existen métodos diferentes para generar el lodo sólido, tales como: siembra en frío [27], removedor de cera [28] [29] [30], golpes de ariete [29], acondicionador magnético, inyección de solventes [23], intercambiadores de calor [29] y enfriamiento rápido [31].

1.2.2 Reductores químicos de deposición de ceras [33] [34] [35] [36] [37] [38]

Elementos como aditivos poliméricos, modificadores de redes cristalinas y surfactantes de inhibición son implementados como reductores de deposición de ceras.

Los aditivos poliméricos se comportan como centros de nucleación de los aglomerados, estos aditivos deben ser agregados en el crudo a una temperatura mayor a la de cristalización, lo cual puede resultar en el decremento de la temperatura de precipitación de las ceras. De igual manera los polímeros también pueden unirse a los bordes de formación de los cristales y en esta forma generar disturbio en las fronteras de crecimiento, por lo tanto los aditivos poliméricos no disminuyen la cantidad de precipitaciones de cera, sino que actúan alterando el crecimiento y la estructura de los cristales de parafina.

Los modificadores de redes cristalinas, según lo observado en algunos experimentos, tienen la capacidad de intervenir en el proceso de crecimiento y aglomeración de los cristales, y de esta manera inhibir la precipitación de orgánicos en la superficie de las tuberías de producción. Desafortunadamente los modificadores de redes cristalinas no son efectivos en todas las clases de crudo, por lo tanto, antes de la implementación del método, se debe realizar un estudio de factibilidad realizando experimentos de prueba y error.

Los surfactantes de inhibición son aplicados sobre la superficie interna de la línea de transporte para prevenir la adhesión de ceras. Para el mantenimiento de esta técnica deben ser inyectadas cantidades de este químico de forma periódica, de tal manera que se pueda mantener la película de surfactante en las paredes del ducto, lo cual no permite el contacto directo entre la parafina y la tubería. Algunos de estos compuestos tienen la capacidad de disolver los centros de nucleación parafínico y así corregir y prevenir la aglomeración de ceras.

1.2.3 Tuberías anti-adherentes

Por otra parte, Jessen y Howell [39], después de experimentar con distintos tipos de materiales de tubería, concluyeron que las deposiciones de escamas orgánicas, se dan en menor proporción sobre superficies lisas en comparación a las tuberías de acero implementadas en el proceso de extracción. En sus investigaciones Jorda [40], observó que el porcentaje de deposiciones de ceras tipo parafina, es directamente proporcional a la rugosidad de la superficie interna de la línea de producción. Parks [41], describe que

se puede mitigar el efecto adhesivo de las ceras, al agregar películas de ciertas características sobre la superficie metálica de la tubería. Adicionalmente a esto, Hunt [42] concluye que las superficies rugosas de la tubería actúan como retenedores de los aglomerados de parafina, más sin embargo, la cera tipo parafina no presenta adhesión al metal.

1.3 Influencia de campos eléctricos y magnéticos en crudos parafínicos

Recientemente se ha encontrado que algunos de estos fluidos responden a campos magnéticos y eléctricos, hecho que ha generado interés en la investigación de este fenómeno y su posible aplicabilidad tanto en la inhibición de depósitos de compuesto suspendido como en el transporte por oleoductos.

1.3.1 Campos magnéticos [43]

El efecto de un campo magnético sobre la viscosidad del crudo es muy controvertido. Algunos experimentos han encontrado que el campo magnético aumentó la viscosidad del crudo, otros no informaron ningún efecto o encontraron que el campo magnético tiene la capacidad de reducir la viscosidad bajo ciertas condiciones.

Badillo y Gómez [8], hicieron tratamiento magnético, químico y combinado (magnético-químico y químico-magnético) al crudo Campo Colorado 25 con el fin de evaluar las propiedades reológicas. En el tratamiento magnético se observó que el porcentaje de reducción en la viscosidad cambia de 70 al 20%, es decir, la reducción de la viscosidad disminuye con el paso del tiempo tendiendo a recuperar su estado inicial; con el tratamiento químico, el cambio fue de 48 al 37% y en el tratamiento combinado se presentó el mayor porcentaje en la reducción de la viscosidad aparente (75%), siendo este valor más alto que al aplicar los tratamientos individualmente sobre el crudo. Así, concluyen que el orden magnético-químico presenta los mejores resultados bajo las siguientes condiciones: una corriente de 9 A, un campo de 865 mT y un tiempo de exposición al campo magnético de 1,6 [s].

Según Villabona y González [13], encontraron valores bajos de viscosidad luego de varios días a una muestra de crudo sintético del crudo Colorado 63 tratada magnéticamente, analizaron que el efecto inhibidor de la precipitación de parafinas es prácticamente permanente. Esto brinda la posible aplicación de campos magnéticos estáticos como

alternativa viable de control de la precipitación de parafinas en la tubería de este pozo. Por otra parte, Tao y Xu [44] encontraron que el efecto del tratamiento a muestras de crudo de base asfáltica de la Shell Company (California) tuvo una duración de 8 horas, tiempo en el cual el estado reológico inicial fue recuperado.

La duración del efecto del tratamiento depende de las condiciones de aplicación, como intensidad de campo magnético, dirección del campo, tiempo de exposición, temperatura, entre otras.

Chow et al. [45] encontraron que la viscosidad aumenta bajo la influencia de un campo magnético cuando el tratamiento se realiza en o al menos cerca de la temperatura a la cual se forma la cera. Sin embargo, autores como Wang y Dong [46], Tao y Xu [44], Nguyen et al. [47], Villabona y González [13], Badillo y Gómez [8], demostraron experimentalmente que **la influencia de un campo magnético bajo ciertas condiciones reduce la viscosidad.**

Una de las razones que influye en la reducción de la viscosidad bajo el efecto de campos magnéticos, es la composición del crudo. Según Wang y Dong [46], para crudos con un contenido de cera inferior al 30% y cortes de agua superiores al 50% se encontró un mejor resultado de inhibición con el método magnético. Este resultado fue medido como distancia a la cual se precipitó la parafina, es decir, inicialmente se tenía un valor conocido de distancia respecto de cabeza de pozo y posteriormente al aplicar el método se observaron cambios en dicha distancia. Nguyen et al. [47] encontraron que los componentes determinantes en la reducción de la viscosidad, específicamente del crudo obtenido del pozo Dragon, son resinas y asfáltenos en contenidos bajos.

Por otra parte y de acuerdo con varios autores como Tao y Xu [44], y Rocha [48], la reducción de la viscosidad del crudo es causada por la presencia y alto contenido de parafina en el crudo, fuerte interacción entre el campo magnético y la muestra; sin embargo, Goncalves et al. [49], demostraron experimentalmente que dos muestras de crudo Brazilian con igual contenido de parafinas (11% p/p) tuvieron diferente respuesta reológica, en la primera muestra hubo una reducción de viscosidad de casi 40% después de haber sido expuesta a 1,3 T de campo magnético pero en la segunda muestra y con la misma intensidad no se presentó ninguna alteración con la viscosidad, por lo que concluyen que la reducción de la viscosidad de la primera muestra no es causada precisamente por la presencia de parafina en la muestra. En el intento de descubrir la influencia de otros factores se analizaron las muestras por Resonancia Magnética

Nuclear (RMN) y se obtuvo que la diferencia entre las muestras se deba a la gran cantidad de moléculas alifáticas⁶ en comparación con las moléculas aromáticas⁷, las cuales se encuentran presentes en la primera muestra y también al gran contenido de agua.

Considerando nuevamente los trabajos de Tao y Xu [44], y Rocha [48], los cuales reportan que la reducción de la viscosidad del crudo es causada principalmente por la interacción de la parafina con el campo magnético, se esperaría una reducción en la viscosidad de las muestras las cuales presentan alto contenido de parafinas (> 10% p/p⁸). Sin embargo, los resultados según Goncalves et al. [50] en el estudio de los factores responsables del cambio reológico del crudo de Brazilian (continuando con su trabajo anterior), mostraron que la parafina no es el único factor responsable en la interacción con el campo magnético y la modificación de las propiedades reológicas de la primera muestra. Las mediciones EPR (por sus siglas inglés o Resonancia Paramagnética Electrónica) de la primera muestra indican la presencia de iones Mn^{2+} que tienen gran momento magnético implicando que estas estructuras contenidas en el crudo interactuarán fuertemente con la aplicación de campo magnético.

Estas herramientas están fundamentadas en las fuerzas experimentadas por las cargas presentes en los compuestos adicionales que componen a las muestras de crudo, ya que de acuerdo a la ley de Lorentz, la fuerza experimentada por una carga en presencia de un campo magnético es perpendicular a la dirección en que circula la carga y perpendicular a la dirección del campo magnético sobre el cual se encuentra la carga [51]. En la figura 3 se ilustra lo expuesto anteriormente:

⁶ **Alifáticas:** moléculas orgánicas constituidas por carbono e hidrógeno cuyo carácter no es aromático.

⁷ **Aromáticas:** compuesto orgánico cíclico que tiene un total de $4n+2$ electrones pi en el anillo.

⁸ **p/p:** hace referencia a la razón del peso de soluto y peso de solución en una mezcla.

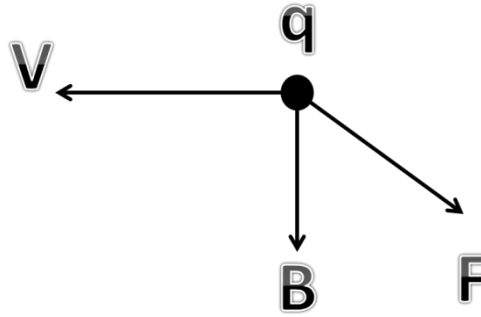


Figura 3: Dirección de la fuerza de Lorentz.

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B}) \text{ [N]} \quad (1)$$

En donde:

q = Carga en movimiento [C]

$\mathbf{E}$ = Vector de intensidad de campo eléctrico [$\frac{V}{m}$]

$\mathbf{V}$ = Vector de velocidad de la carga [$\frac{m}{s}$]

$\mathbf{B}$ = Vector densidad de campo magnético [T]

De acuerdo a las investigaciones realizadas por Rocha y González [48], basados en experimentos realizados en laboratorios de Brasil, los cuales observaron que cuando un crudo es colocado bajo el efecto de un “adecuado” campo magnético, este afecta a las moléculas de parafina, las cuales tienden a alinear sus polos con los del campo magnético presente, de tal manera que se produce de manera no excesiva lo que se denomina: agitación térmica, lo que consecuentemente produce una perturbación en el proceso de aglomeración de las ceras lo cual genera cambios en las propiedades reológicas y morfológicas en las muestras de crudo asociadas a la depositación y aglomeración de cristales de parafina. Pero debido a la gran cantidad y variedad de los componentes de las sustancias orgánicas e inorgánicas y a la complejidad en la naturaleza del crudo, es difícil evaluar el efecto de los campos magnéticos en términos generales. Los resultados de laboratorio han demostrado que las parafinas en las soluciones de hidrocarburos muestran susceptibilidad bajo el efecto de campos magnéticos. Estos datos, referentes a los efectos del campo magnético en las

precipitaciones de ceras en el crudo parafrínico fue posible gracias a la implementación del Barrido de Microscopía Electrónica (Scanning Electronic Microscopy, SEM), desarrollado por Thung N., Vuong N., Khanh B., Vinh N., Hue V. y Hoe L. [47].

1.3.2 Campos eléctricos

Por otra parte, en el caso de tratamientos eléctricos, la estrecha relación que existe entre la efectividad de un tratamiento con campo eléctrico con la temperatura y la velocidad de deformación del crudo, están argumentadas por Zhang J., Chen y Zhang N. [52]; quiénes revelan la presencia de un campo eléctrico natural inherente a los fluidos en el yacimiento, a las interfaces entre líquidos e incluso a los poros de la formación. En su trabajo llevaron a cabo un análisis experimental, utilizando un reómetro⁹ HAAKE RS-150H, una fuente de alto voltaje en DC (de 1 a 10 kV) y el crudo del campo Daqing en China. Al someter la muestra a un esfuerzo cortante constante, y variando la temperatura del crudo, la velocidad de deformación y el campo eléctrico, representado con la tensión aplicada (de 0 a 2500 V), encontraron una reducción en la viscosidad del crudo, para niveles de tensión hasta de 800 V; superado este umbral, debido al efecto Joule producido, las fracciones livianas del crudo se evaporan y la viscosidad del mismo aumenta considerablemente, este resultado plantea la posibilidad de la aplicación de campos de menor intensidad en busca de un mejor resultado y a su vez, una reducción del riesgo que implica los altos niveles de tensión.

En el estudio realizado por Tao R. et al. [44] sobre el crudo asfáltico de California (EE.UU.), resalta el efecto del campo eléctrico sobre los crudos parafrínicos, asfálticos e incluso mezclas de estos; para el tratamiento adecuaron un viscosímetro capilar, para someter al fluido a una intensidad de campo eléctrico de 1000 V/mm en DC durante 8 segundos, tiempo que tarda en ingresar el crudo al reservorio; el campo eléctrico se aplica por medio de un capacitor formado por dos mallas metálicas paralelas en contacto directo con el flujo de la muestra, es importante señalar que el bajo consumo del dispositivo, alrededor de 1 mW, evita el calentamiento del crudo durante el proceso. La muestra evidencia una reducción de 104,3 cSt en su viscosidad, efecto que se atenúa paulatinamente durante las 8 horas posteriores al procedimiento, siendo éste tiempo

⁹ **Reómetro:** Equipo que mide las propiedades viscosas y elásticas de un fluido, bajo la acción de fuerzas externas.

suficiente para realizar labores de transporte en unas mejores condiciones en comparación con un crudo sin tratar.

Tang Hong et al. [53] diseñaron un sistema para simular el flujo de crudo en tubería cuando es aplicado un campo eléctrico en contacto directo y en la misma dirección del fluido. El arreglo experimental permite medir el caudal y la viscosidad con y sin tratamiento de una muestra sometida a un campo eléctrico de 1200 V/mm. Los resultados muestran que el caudal aumenta significativamente entre un 21% y 26% después de aplicar el tratamiento y la viscosidad se reduce un 21%. En términos energéticos comparado con el método de calefacción es una técnica que consume menos energía (1%), es rápida y por tanto más eficiente.

Less Simone et al. [52] aplicaron campos eléctricos a emulsiones de agua en crudo con el fin de cuantificar el cambio en las propiedades reológicas. De acuerdo con los experimentos realizados se pudo observar que para una velocidad de deformación baja, en la medida que el campo eléctrico aumentó de intensidad, aumentando la tensión aplicada hasta unos 1300 V, la viscosidad del crudo también lo hizo pero hasta un cierto valor, luego se produjo la coalescencia¹⁰ de las gotas de agua y la viscosidad disminuyó irreversiblemente por debajo de su valor inicial. Finalmente se concluye que la viscosidad fue reducida en una pequeña proporción y para altos valores de velocidad de deformación (alrededor de 500 s^{-1}) el tratamiento es efectivo, ya que las estructuras formadas en presencia de campos eléctricos son rotas debido a la alta velocidad de deformación, mejorando la fluidez del crudo.

De acuerdo con algunos de los autores se puede concluir que al momento de aplicar campos eléctricos a petróleo crudo, es importante que los electrodos se encuentren en contacto directo con el fluido para evitar pérdidas en la intensidad del campo y que éste sea aplicado en la misma dirección del flujo [44]; de lo contrario puede generar un efecto contrario al deseado (aumento en la viscosidad). También es importante resaltar el hecho de que todos estos experimentos son realizados a altos valores de tensión.

La falta de estudios concluyentes reportada en la literatura científica sobre el efecto del campo eléctrico en los crudos no permite explicar el fenómeno satisfactoriamente para todos los hidrocarburos dada su naturaleza compleja, y por tanto, el estudio de

¹⁰ **Coalescencia:** Es el proceso en el que dos dominios de fase de composición esencialmente idéntica entran en contacto para formar un dominio de fase mayor.

aplicabilidad del método es empírico y los resultados obtenidos de cada estudio sólo son aplicables a cada crudo en particular.

La aplicación de campos eléctricos a muestras de crudo es una alternativa prometedora e interesante para solucionar el problema de la deposición de parafinas, esta técnica se encuentra actualmente en desarrollo, especialmente en países como China, EE.UU. y Canadá; es por esto que esta nueva tecnología posiblemente tendrá un papel importante en la inhibición de estos compuestos que contribuyen al aseguramiento de flujo del petróleo.

1.3.3 Herramientas magnéticas para el tratamiento de crudos parafínicos [54] [55]

En la figura 4 se muestra una herramienta implementada en la industria para aplicar campos magnéticos a diferentes fluidos a través de tuberías con el propósito de inhibir la precipitación de agentes orgánicos e inorgánicos.

- **Dispositivo sujeto a línea para tratamiento magnético de fluidos transportados en tubería. Patente No. 4367143 [54]**

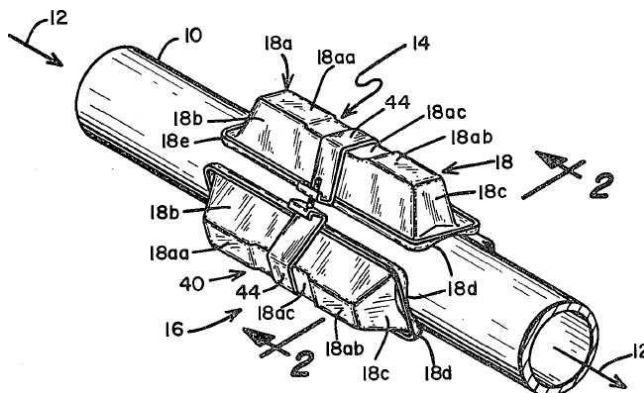


Figura 4: Dispositivo de patente US4367143. Fuente [54]

El dispositivo en la figura 4 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. Una variable muy influyente en los resultados obtenidos es el tiempo de aplicación del campo magnético a una molécula en particular, el cual se define como se describe a continuación:

$$t_{\text{exposición}} = \frac{x * \pi * d^2}{4 * Q} \text{ [s]} \quad (2)$$

En donde:

x = longitud de la herramienta [m]

d = diámetro interno de la tubería [m]

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

En la figura 8, se observa (vista de corte transversal), la instalación de cuatro aparatos magnéticos en una tubería de 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.

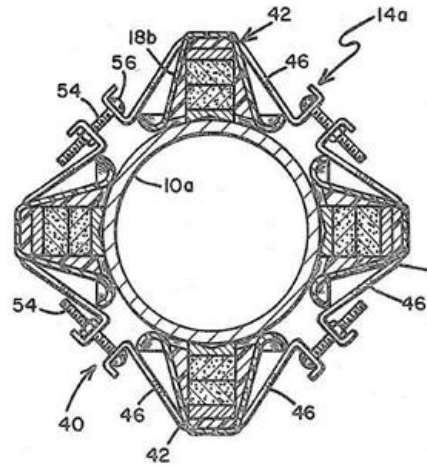


Figura 5: Corte transversal del dispositivo instalado en tubería de 3 pulgadas. Patente US4367143 [54]

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:

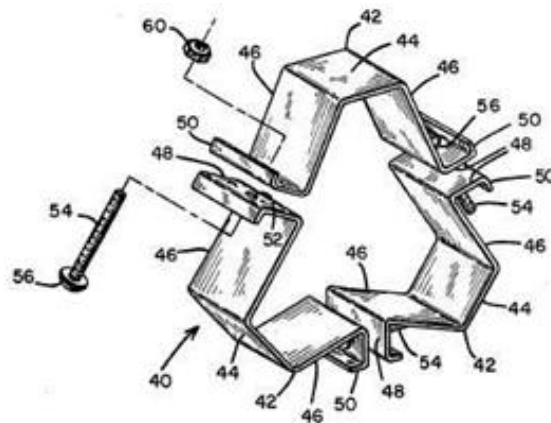


Figura 6: Correa de sujeción de dispositivo. Patente US4367143 [54]

- **Dispositivo de imanes permanentes para el control de ceras. Patente No. 5024271 [55]**

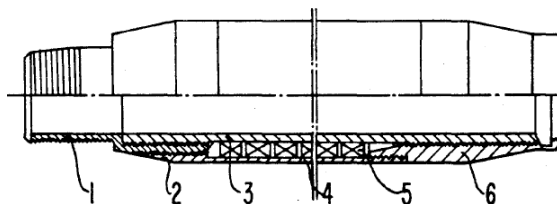


Figura 7: Carcasa de dispositivo patente 5024271 [55]

En la figura 7 se ilustra la carcasa de 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: polo norte y polo sur. 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 sencilla. 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.

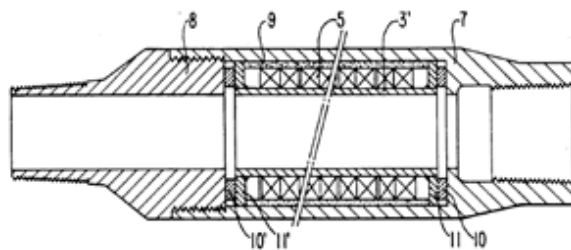


Figura 8: Corte transversal de prototipo. Patente No. 5024271 [55]

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. De esta manera se encuentran uno o más de un par de polos de un sistema del circuito magnético, los cuales están situados en el espacio entre el tubo del núcleo y dicho prototipo de prueba, alineados axialmente de tal forma que las líneas de flujo no presenten fugas, sino que por el contrario estén dirigidas a la muestra que atraviesa la tubería.

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 a la tubería del prototipo.

La inhibición de la precipitación de parafinas con tratamientos electromagnéticos al crudo, se basa en la hipótesis de exponer al crudo a ciertas magnitudes de campos magnéticos y eléctricos (hasta el momento aplicando cada uno por separado y de manera independiente), con el fin de evitar la formación de cristales y cambiar algunas propiedades físicas del crudo que beneficiarían a la movilidad del hidrocarburo por las tuberías.

Evaluar las propiedades que están directamente relacionadas con la precipitación y cristalización de componentes orgánicos es fundamental en el tratamiento de crudos parafínicos. El punto de fluidez es de gran trascendencia ya que determina la temperatura más baja a la cual el fluido (crudo) aún presenta movimiento. Por otro lado, el punto de nube determina la temperatura a la cual se forma el primer cristal de parafina e inicia la

propagación de las ceras. La viscosidad se define como la resistencia que tiene un fluido para ser deformado por un esfuerzo cortante. Los parámetros expuestos anteriormente serán usados para determinar de manera indirecta los cambios producidos en la movilidad de las muestras de crudo.

Estudios realizados anteriormente en el Campo Escuela-Colorado [7], a partir de los cuales se pudo observar en la experimentación bajo condiciones controladas de laboratorio, la efectividad de la aplicación de campos magnéticos para inhibir la precipitación de componentes parafínicos, se obtuvo que en el pozo Colorado 25 al aplicar un tratamiento magnético de 0,335 T por 12,24 s, se consiguió una reducción en el punto de nube de 5,3 °C y de 18 °C en el punto de fluidez, y en el pozo Colorado 63 al aplicar un campo magnético de 0,336 T por 12,37 s, a las muestras la viscosidad se redujo 52 cP, con lo cual se puede observar que el tratamiento podría ser una opción para solucionar el problema de la precipitación de las parafinas. A partir de estos estudios se decidió además estudiar la implementación de campos eléctricos como otra manera de prevenir la precipitación de parafinas.

Según la revisión del estado del arte, el efecto de la aplicación de campos magnéticos y eléctricos sobre la viscosidad del crudo ha sido un tema muy controversial, ya que diferentes autores han obtenido resultados contradictorios y aun no se ha logrado entender el fenómeno mediante el cual se logra la reducción o aumento de la viscosidad del crudo. En la presente investigación se plantea a partir de los resultados obtenidos por C. Villabona y D. González la construcción de un prototipo de una herramienta magnética, en la que se puedan replicar los resultados obtenidos previamente en un banco de pruebas instalado en la fecha de los experimentos en el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP). Adicionalmente se plantea un estudio para determinar bajo condiciones controladas de laboratorio, la incidencia de los campos eléctricos magnéticos en muestras de crudo parafínico del Campo Escuela Colorado en un viscosímetro de tipo capilar.

1.4 Antecedentes Campo Escuela Colorado

El Campo Colorado está localizado en la Cuenca del Valle Medio del Magdalena (VMM) en la Provincia Estructural del Piedemonte Occidental de la Cordillera Oriental, al sur este del municipio de Barrancabermeja (Santander) y al sur del Campo La Cira-Infantas entre las coordenadas X=1'036.000-1'040.500 Este y Y=1'238.000-1'247.500 Norte con origen Bogotá, en el área de la antigua concesión De Mares (Ver figura 9).

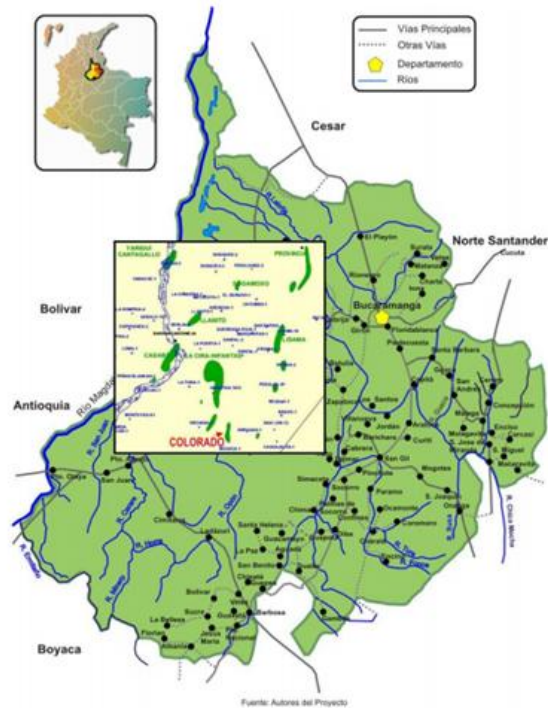


Figura 9: Localización Campo Colorado.

Para el Campo Escuela Colorado (CEC), se maneja un modelo geológico en el que el campo está dividido por 7 fallas formando 6 bloques como se muestra en la figura 10. Existen 75 pozos perforados, de los cuales solo 56 reportan algún tipo de producción, siendo muy pobre la producción acumulada por el campo, solamente Colorado 38, ha producido más de 500 000 BBL y únicamente 20 pozos han producido más de 200 000 BBL.

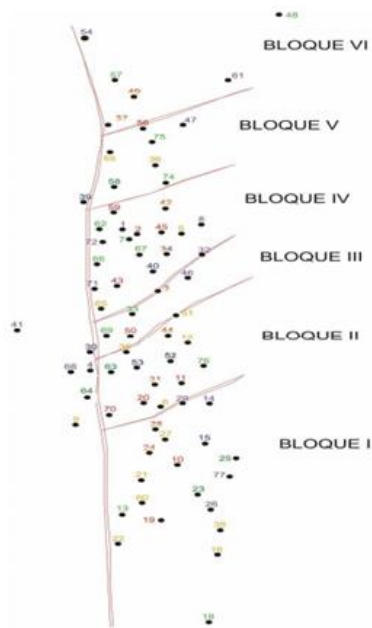


Figura 10: Mapa de los pozos de Campo Colorado

Las principales arenas productoras en el campo se han denominado como “Arenas B” y “Arenas C”, siendo los pozos complementarios en forma independiente o algunas en conjunto veces. También se tiene como horizontes productores las “Arenas D” y las “Arenas E” pero con muy bajas producciones.

El petróleo de Campo Colorado se extrae principalmente de la formación mugrosa (zonas B y C) y esmeraldas (zona D) de edad Oligoceno – Mioceno inferior, depositada en un sistema fluvial meándrico. En la tabla 1 se presentan datos de yacimiento de arena B y C de la formación mugrosa.

Tabla 1: Datos básicos de yacimiento (formación mugrosa).

CARACTERÍSTICA	UNIDADES	ARENA B	ARENA C
Presión estática*	(psi)	900	3000
Temperatura de yacimiento	°F	114	174
API promedio	°API	41,2	39,7
Sg gas en separador	Fracción (vol)	0,958	0,937
Presión de burbuja	Psia	648	2078
Viscosidad a Pb	Cp	1,64	0,462
Bo a Pb	Rb/Stb	1,091	1,401
Rs a Pb	Scf/Stb	140	648
Profundidad promedia	ft	1700	3500
Aceite original	MM Bls	20,0	37,3
Porosidad promedio	%	13,2	17,6
Espesor promedio arena	ft	22,5	33,6
Área	Acres	634	1083
Producción prom. / pozo perforado	MBls	112	
Espaciamiento / pozo	Acres	20-30	
Reservas remanentes	MBls	100-200	
Factor de recobro	%	14,83	
Pozos perforados		75	
Pozos activos		21	
Pozos produciendo		7	
Pozos cerrados		54	

*Tomado de estudio de Ecopetrol “diagnóstico y estrategias de recobro para ocho áreas de gerencia centro oriente” 2003.

La presente investigación hace parte de uno de los proyectos del CEC, que busca darle una alternativa de solución a la problemática de la precipitación y deposición de ceras en crudos parafínicos de pozos maduros.

Históricamente el Campo ha presentado problemas de taponamiento por parafinas, lo cual ha sido la causa principal de la caída de producción. Las componentes parafínicas que se encuentran disueltas en la solución de hidrocarburos a condiciones de temperatura y presión naturales de yacimiento comienzan a precipitarse, es decir, a cambiar de fase líquida a sólida debido a la disminución de temperatura (por debajo del punto de nube) que actúa sobre este mismo debido al proceso de explotación de las reservas naturales.

Partiendo del problema mostrado anteriormente y del estudio previo, la necesidad específica que pretende resolver con este proyecto de investigación, es la construcción de un prototipo de herramienta magnética a nivel de laboratorio para evaluar las condiciones de los pozos del CEC. En estudios realizados anteriormente por Villabona y González en CEC, se pudo observar la efectividad de la aplicación de campos magnéticos para inhibir la precipitación de componentes parafínicos de los pozos Colorado 25 y Colorado 63.

2. PRUEBAS PRELIMINARES: CAMPO MAGNÉTICO

Con el propósito de establecer las bases de diseño para la construcción del prototipo de una herramienta magnética, se realizó un estudio preliminar a muestras de crudo que fluyen en una tubería de tipo rectangular (2 cm de largo y 2 cm de ancho). Lo anterior con el fin de determinar los valores de campo magnético necesarios para producir cambios en la reología de las muestras de crudo tratadas y adicionalmente, establecer la geometría de la herramienta magnética en la que se presente el mayor cambio respecto a la movilidad del hidrocarburo en estudio.

Inicialmente se realizaron pruebas preliminares con el objetivo de validar los resultados obtenidos por C. Villabona y D. González [13], de tal manera que se pueda establecer la magnitud de la densidad de campo magnético en la que se comienza a observar cambios en las características que determinan la movilidad en las muestras de crudo. Como parte de esta investigación, se desarrolló una tesis de pregrado denominada: ESTUDIO DE LA RESPUESTA REOLÓGICA DE CRUDOS PARAFÍNICOS DE CAMPO ESCUELA COLORADO ANTE UN CAMPO MAGNÉTICO, desarrollada por los estudiantes: Johanna Almeyda Ramírez (Ingeniería Química) y Andrés Sebastián Ramírez Beltrán (Ingeniería Electrónica). [56]

La metodología que se utilizó para verificar los efectos de campos magnéticos sobre muestras de crudo parafínico fue la siguiente:

- Toma de muestras de los pozos en Campo Colorado:
- Selección del viscosímetro (medición de flujo másico):
- Simulación de distribución de flujo magnético aplicado a través de núcleo generador de campo estacionario:
- Adaptación de viscosímetro y herramienta generadora de campo estacionario:
- Diseño experimental:
- Pruebas en muestras de crudo parafínico:

Las características de las muestras antes de ser tratadas por campos magnéticos se describen en la tabla 2.

Tabla 2: Caracterización de muestras. [56]

Muestra	Densidad (g/ml) a Texperimento (°C)	Viscosidad (cP) a Texperimento (°C)	Punto de fluidez (°C)	Punto de nube (°C)
Col 36	0,812 @ 24°C	2,45 @ 24°C	-3	22,24
Col 36 + 2% (p/p) de parafina sólida	0,828 @ 24°C	3,03 @ 24°C	3	40,04
Col 36 + 10% (v/v) de agua destilada	0,864 @ 24,7°C	3,09 @ 24,7°C	--	--
Col 36 + 30% (v/v) de crudo pesado	0,84 @ 24,51°C	5,01 @ 24,4	--	--
Col 25	0,852 @ 24,6°C	10,41 @ 24,3	-24	23,67
Col 25 + 2% (p/p) de parafina sólida	0,8682 @ 24,7°C	10,86 @ 24	--	--

Según lo observado en la Tabla 2 se seleccionan seis escenarios en donde se pueda observar el efecto de otras sustancias que componen a la mayoría de los crudos en proceso de producción. Las sustancias añadidas fueron: parafina sólida del mismo yacimiento, agua destilada y crudo pesado proveniente de otro yacimiento. Para la caracterización de las muestras de crudo se observó la densidad, viscosidad, punto de fluidez y punto de nube antes y después del tratamiento magnético.

A estas muestras se le aplicó el tratamiento magnético (tanto para Colorado 25 como para Colorado 36) con el fin de observar posibles cambios en sus parámetros de movilidad previamente establecidos (Viscosidad, punto de fluidez y punto de nube). Los cambios se pueden inferir a partir de las tablas 3 y 4.

Tabla 3: Comportamiento de la viscosidad sin y con tratamiento magnético. [56]

Muestra	Viscosidad (cP) sin tratamiento magnético a T_{experimento} (°C)	Viscosidad (cP) con tratamiento magnético a T_{experimento} (°C)
Col 36	2,45 @ 24	2,49 @ 24,2
Col 36 + 2% (p/p) de parafina sólida	3,03 @ 24	3,03 @ 24
Col 36 + 10% (v/v) de agua destilada	3,09 @ 24,7	3,04 @ 24,7

Tabla 4: Comportamiento de la viscosidad sin y con tratamiento magnético. [56]

Muestra	Viscosidad (cP) sin tratamiento magnético a T_{experimento} (°C)	Viscosidad (cP) con tratamiento magnético a T_{experimento} (°C)
Col 36 + 30% (v/v) de crudo pesado	5,01 @ 24,4	5,15 @ 24,3
Col 25	10,41 @ 24,3	10,20 @ 24,4
Col 25 + 2% (p/p) de parafina sólida	10,86 @ 24	10,89 @ 24

De acuerdo con la tablas 3 y 4 se puede observar que para el crudo de los pozos Colorado 25 y Colorado 36 y sus modificaciones, el efecto de los campos fue variable dependiendo tanto del pozo de donde son tomadas las muestras como de la composición del flujo en estudio.

Finalmente con el propósito de obtener más datos concluyentes acerca del efecto de los campos magnéticos en las muestras de crudo del Campo Escuela Colorado se realizó la medición del punto de nube antes y después de las muestras de Colorado 36 con 2%

(p/p) de parafina sólida y las muestras iniciales de Colorado 25. Los resultados se muestran en la tabla 5, la cual está basada en la técnica de Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC por sus siglas en inglés).

Tabla 5: Comportamiento punto de nube sin y con tratamiento magnético. [56]

Tipo de muestra	Punto Nube sin Tratamiento [°C]	Punto Nube con Tratamiento [°C]	Cambio después de tratamiento [%]
Colorado 36 con 2% (p/p)	40,04	49,85	25%
Colorado 25	23,67	16,21	-32%

Dentro del proceso de investigación de la incidencia de un campo magnético en la reología de las muestras de crudo de los pozos Colorado 36 y Colorado 25 del Campo Escuela Colorado se obtuvieron los siguientes resultados:

- El crudo del pozo Colorado 36 no reporta ningún tipo de mejora en los parámetros de movilidad, ya que en la aplicación del tratamiento magnético a muestras con 2% (p/p) de parafina sólida y 10% (v/v) de agua destilada se observa inmutabilidad en el flujo másico de estudio. Adicionalmente se observó en el experimento realizado a las muestras de crudo con 30% (v/v) de crudo pesado (del pozo BH2 de Campo Jazmín), una desfavorabilidad del tratamiento debido a la reducción del 4,86% del flujo másico de las pruebas. La amplitud de la densidad aplicada en el experimento fue de 220 [mT] de flujo continuo.
- El crudo del pozo Colorado 25 reportó una disminución de la viscosidad en 2,4% situación que no se volvió a presentar al realizar el mismo tratamiento a muestras de crudo del mismo pozo modificada con 2% (p/p) de parafina sólida. Los datos obtenidos tienen concordancia a los experimentos realizados con muestras de crudo del mismo pozo por C. Villabona y D. González en un banco de pruebas del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) en 2009. [9]
- Los resultados obtenidos en la investigación muestran una disminución del flujo másico para Colorado 36 y un aumento del flujo másico para Colorado 25 lo cual permite concluir que la efectividad del tratamiento está determinada por las características particulares de cada pozo del yacimiento.

3. PRUEBAS PRELIMINARES: CAMPO ELÉCTRICO

Inicialmente se realizaron pruebas preliminares con el objetivo de validar los resultados obtenidos por C. Villabona y D. González [13], más sin embargo, al revisar la información en artículos de la comunidad científica a nivel mundial, es claro notar que el campo eléctrico es implementado en igual o mayor proporción en la industria del petróleo con diferentes fines dentro del proceso de producción de los hidrocarburos. Es por esto que se determinó observar de forma paralela a los estudios realizados anteriormente los posibles cambios en los parámetros de movilidad del crudo bajo el efecto de un campo eléctrico externo de tipo continuo. Como consecuencia se desarrollaron dos trabajos de investigación denominados: ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE UN CAMPO ELÉCTRICO EXTERNO EN LA MOVILIDAD DE CRUDOS PARAFÍNICOS [57] y ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL AGUA EN LA MOVILIDAD DE CRUDOS PARAFÍNICOS BAJO EL EFECTO DE UN CAMPO ELÉCTRICO EXTERNO [58]. A continuación en la figura 11 se presenta la metodología y los resultados obtenidos en tales trabajos.

INVESTIGACIÓN PARA DETERMINAR LOS EFECTOS DE CAMPOS ELÉCTRICOS EN CRUDOS

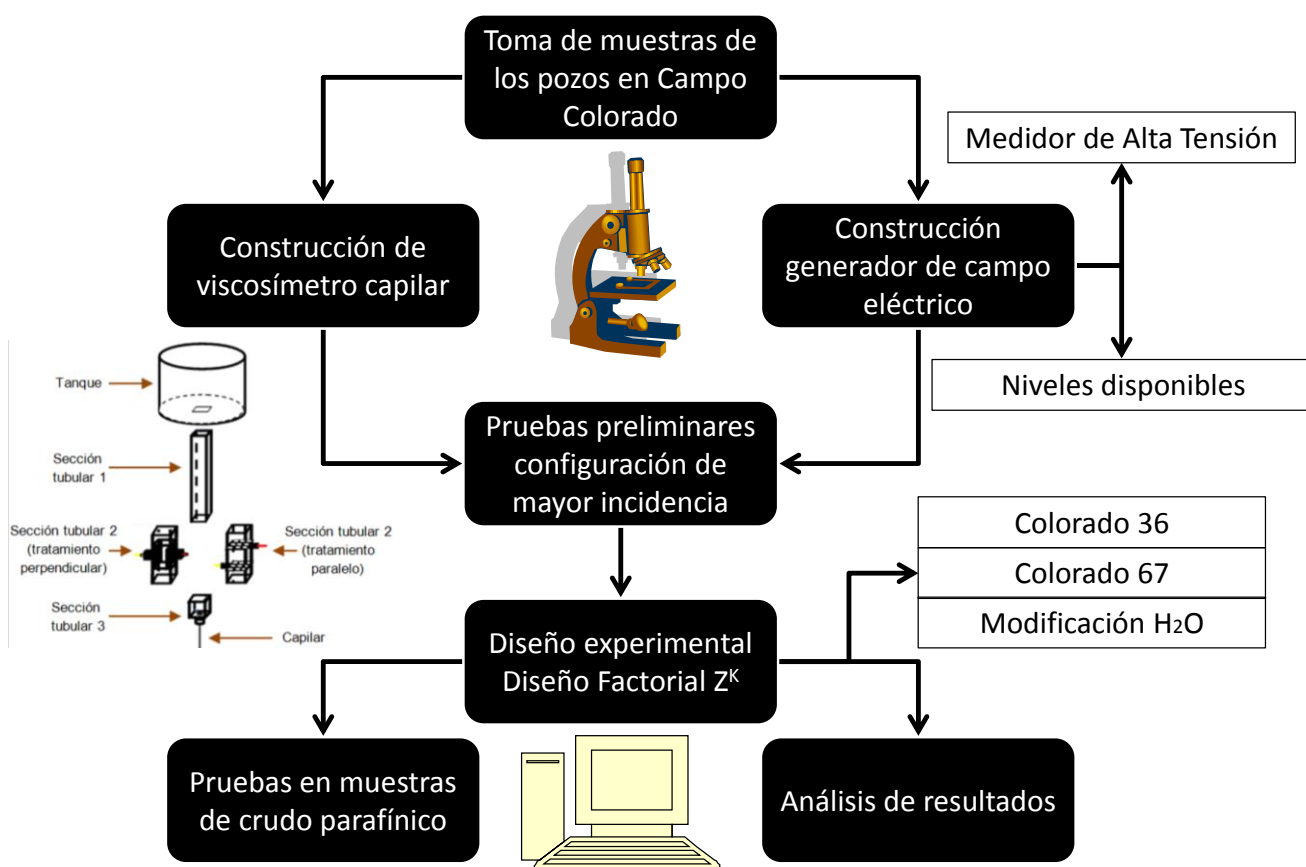


Figura 11: Metodología de aplicación de campos eléctricos en crudos.

La metodología descrita en la figura 11 se resume en los siguientes pasos:

- Construcción de viscosímetro capilar:
- Construcción fuente generadora de campo eléctrico:
- Caracterización de los crudos en estudio:
- Pruebas preliminares:
- Diseño experimental (muestras no modificadas):

El viscosímetro capilar de acrílico construido y utilizado para hacer las pruebas preliminares con campo eléctrico [57] se muestra en la figura 12.

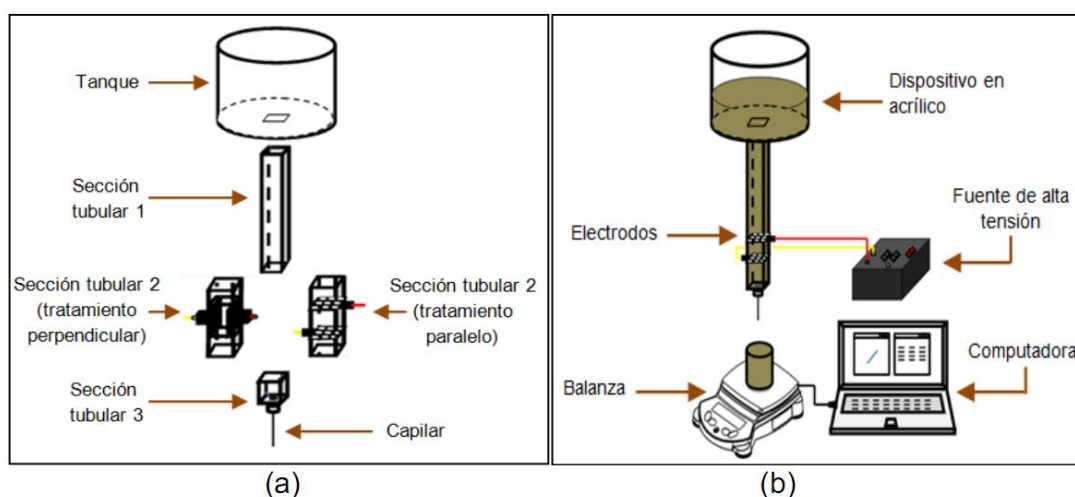


Figura 12: a) Sistema de aplicación de campo eléctrico. b) Sistema de experimentación y toma de datos. [57]

La caracterización del crudo sin tratamiento de los pozos Colorado 36 y Colorado 67 se describen en la tabla 6.

Tabla 6: Caracterización crudo en blanco Colorado 36 y Colorado 67. [57]

Propiedad	Unidad	Pozo		Método/técnica
		Col 36	Col 67	
Viscosidad (μ_o) (25°C)	cP	2	2,1	Medido por viscosímetro OFITE modelo 900
Punto de nube	°C	22,24	21,38	DSC [24]
Punto de fluidez	°C	-21	-27	ASTM D5853-95
Densidad (ρ) (25°C)	g/cm ³	0,8	0,81	ASTM D1480-62
BSW	% volumen	0,4	0,4	ASTM D96-88
Gravedad API	°API	37,7	37,1	ASTM D287

Después de ejecutar el diseño experimental realizado, se mide los posibles cambios en la viscosidad de las muestras tratadas. Los resultados se muestran en la tabla 7.

Tabla 7: Medición de la viscosidad en muestras representativas. Viscosímetro OFITE [57]

Crudo	Viscosidad en blanco (μ_o) [cP]	Viscosidad muestra tratada (μ_t) [cP]	Cambio porcentual de la viscosidad [%]
Col 36	2	2,9	45
Col 67	2,1	2,5	20

Adicionalmente teniendo en cuenta que el punto de nube es la temperatura a la que se presenta el inicio del fenómeno de la precipitación de ceras parafínicas, se procede a realizar la medición de este parámetro reológico en las muestras de crudo. Se obtuvieron los siguientes resultados mostrados en la tabla 8.

Tabla 8: Medición de Punto de nube a muestras en blanco y con tratamiento eléctrico. [57]

Crudo	Punto de nube en blanco [°C]	Punto de nube con tratamiento [°C]	Aumento [°C]
Col 36	22,24	30,51	8,27
Col 67	21,38	25,69	4,31

Así como en investigaciones anteriores la duración del efecto de un tratamiento magnético [13], se planteó identificar el tiempo de duración de los cambios efectuados por la

aplicación de un campo eléctrico en las muestras de crudo, dando los siguientes resultados mostrados en la figura 13:

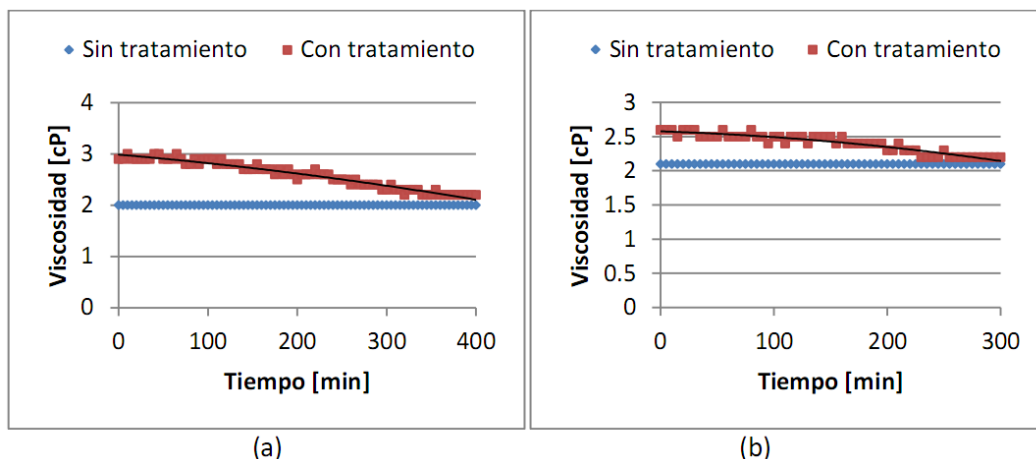


Figura 13: Viscosidad Pos-tratamiento a temperatura ambiente @ 25 [°C] y 600 [rpm]. (a) Col 36. (b) Col 67 [57]

En los estudios realizados a muestras de crudo de los pozos Colorado 36 y Colorado 67, que fueron sometidos a campos eléctricos con una fuente de alta tensión tipo “Fly-Back”, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Después de realizar las corridas experimentales en el acrílico de prueba con flujo laminar, se pudo establecer que para el experimento, las variables de mayor significancia en los resultados obtenidos fueron: el tiempo de exposición y la intensidad de campo eléctrico.
- Después del tratamiento eléctrico efectuado sobre las muestras en blanco, se pudo establecer que para Colorado 36 disminuyó el flujo másico en 29,72%; resultado similar encontrado en Colorado 67 en donde el decremento registrado fue de 29,30%.
- La viscosidad de las muestras de crudo tratadas aumentó después del tratamiento eléctrico, registrando un aumento de 45% y 20% para los pozos Colorado 36 y Colorado 67 respectivamente.
- Según los resultados obtenidos, el tratamiento con campo eléctrico aumenta el punto de fluidez de las muestras, es decir, el crudo dejará de fluir a una temperatura más alta que la temperatura de las muestras en blanco.

- El punto de cristalización que referencia la temperatura a la que se forma el primer cristal de parafina aumenta después del tratamiento eléctrico, siendo para Colorado 36 un aumento de 8,27 °C y para Colorado 67 de 4,31 °C.
- Los efectos alcanzados a través de este tratamiento no son permanentes, ya que ambas muestras de crudo volvieron a sus características iniciales, es decir, antes del tratamiento. El tiempo en el que las muestras retornaron a sus condiciones iniciales fue de 400 min para Colorado 36 y 300 min para Colorado 67.

Adicionalmente a los experimentos mostrados hasta el momento, se realizó un estudio para determinar la influencia del porcentaje de agua en la emulsión en los resultados obtenidos en un tratamiento eléctrico en las muestras de crudo.

Según lo definido por la literatura, una emulsión es un sistema heterogéneo, que está formado por lo menos de un líquido inmiscible íntimamente disperso, en otro en forma de gotas. Los diámetros internos de las gotas, por lo general exceden los 0,1 μm . Las emulsiones poseen una estabilidad mínima que puede ser acentuada por aditivos tales como productos tenso-activos (surfactantes), sólidos finamente divididos, etc. Para la obtención de una emulsión es necesaria la acción de un factor mecánico (agitación) que promueva la dispersión de los componentes del sistema [59].

Para la realización de los experimentos se seleccionaron dos emulsiones que tuviesen un tiempo de estabilidad mayor a 2 h, dadas las características de las muestras de crudo a ser tratadas, se obtuvieron los siguientes resultados de la tabla 9:

Tabla 9: Emulsiones del diseño experimental propuesto. Con crudo proveniente del pozo Colorado 67. [58]

Porcentaje de agua destilada [% v/v]	Velocidad del agitador [rpm]	Tiempo de agitación [min]	Observaciones
5	15000	10	La emulsión no se separó después de 2 semanas de reposo.
10	15000	10	La emulsión no se separó después de 2 semanas de reposo.

Para la caracterización de las emulsiones en blanco se midieron la viscosidad y la gravedad específica de las muestras, donde se obtuvieron los siguientes resultados de la tabla 10:

Tabla 10: Caracterización de emulsiones no tratadas. [58]

	Emulsiones		
Pruebas/actividad	Emulsión 5%	Emulsión 10%	Método
Viscosidad	3,5 cP a 600 rpm, 25°C	4,7 cP a 600 rpm, 25°C	Medido por Model 900 viscosimeter OFITE
Gravedad específica	1,209 a 25°C	1,200 a 25°C	ASTM D-5002

Finalmente, se determinó los niveles de los factores de entrada a los cuales se obtuvo la mayor disminución de la viscosidad en las muestras de las emulsiones, dando los siguientes resultados de la tabla 11:

Tabla 11: Tiempo de exposición a campo eléctrico. [58]

Factor	Nivel	Porcentaje de cambio de viscosidad
Intensidad de campo eléctrico [V/cm]	5200,0	-7,46%
Porcentaje de agua en emulsión [% v/v de agua]	10,0	
Radio interno del capilar [m]	0,000338	

En el estudio de los cambios en cuanto a las características reológicas de las muestras de crudo de Colorado 67 de Campo Escuela Colorado, se reportan los siguientes resultados en muestras de crudo modificadas (emulsiones de agua en crudo al 5% y 10% v/v), que fueron tratadas con un campo eléctrico, obteniendo los siguientes efectos:

- Realizando el estudio estadístico de los datos arrojados por el experimento, se determina que las variables que afectaron en mayor proporción a los resultados encontrados fueron en primera estancia el porcentaje de agua de la emulsión y seguidamente el radio interno del capilar del acrílico de prueba lo cual es, una medición indirecta del tiempo de exposición de las muestras de crudo al campo eléctrico.
- Haciendo una revisión de los resultados alcanzados en las corridas experimentales, se puede destacar la capacidad del tratamiento eléctrico para reducir la viscosidad de las muestras de crudo en 7,5%; logrando de esta forma mejorar la movilidad del crudo tratado. Este resultado se obtuvo en condiciones de tiempo de exposición alto (radio interno del capilar 0,000338 [m]), intensidad de campo eléctrico alto (5200 V/cm) y porcentaje de agua de la emulsión alto (10%). Esta reducción se logró sin alterar la temperatura de la muestra y sin destruir la emulsión formada entre el agua y el crudo, a temperatura ambiente.
- Para un porcentaje en emulsión de 10% de agua en crudo se obtuvo que para cualquier valor de campo eléctrico entre [3100-5200] V/cm y para cualquier tiempo de exposición dentro del rango [37,68-77,14] [s]; se registró una disminución de la viscosidad de las muestras tratadas.
- Para un porcentaje en emulsión de 5% de agua en crudo se obtuvo una reducción de la viscosidad para cualquier campo eléctrico dentro del rango de [3100-5200] V/cm y un tiempo de exposición promedio de 75,5 s mientras que para un tiempo de exposición promedio de 36,1 s se presentó un aumento en la viscosidad del hidrocarburo tratado.

4. CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE UNA HERRAMIENTA MAGNÉTICA PARA INHIBIR LA PRECIPITACIÓN DE PARAFINAS

Inicialmente, en el desarrollo de una herramienta preliminar se observó por [13] que la geometría óptima para la generación es aquella en donde se reduce el diámetro del núcleo, la longitud y se aumenta el número de devanados en la construcción de la herramienta.

Posteriormente en el proyecto de investigación de [56], realizado por J. Almeyda y A. Ramírez se construyeron dos herramientas de aplicación de campo magnético adaptadas al sistema de flujo de crudo vertical mostrado en el capítulo de pruebas preliminares con el propósito de medir los efectos en la viscosidad, el punto de nube y de fluidez de las muestras de crudo.

La primera herramienta implementada en los experimentos desarrollados fue una tipo electroimán en donde se construyó a partir de un núcleo de hierro laminado (acero al silicio), en forma de "G", teniendo un devanado de 1000 espiras de alambre de cobre esmaltado y calibre AWG # 18. La herramienta y sus dimensiones se muestran en la figura 14.

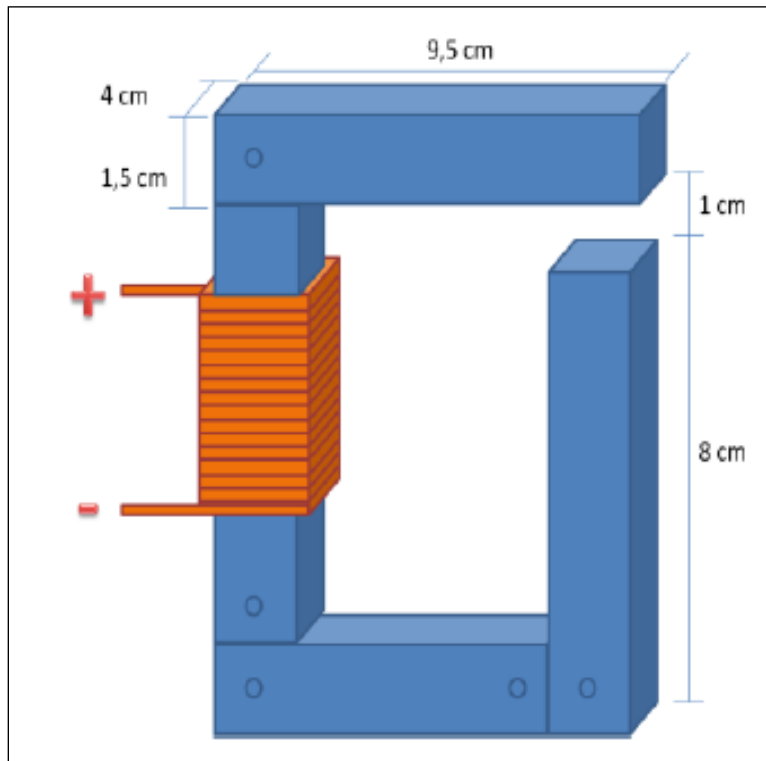


Figura 14: Herramienta tipo solenoide. [56]

Con la herramienta mostrada en la figura anterior se obtuvo un nivel de densidad de campo magnético de 110 mT en el punto de recorrido de la muestra en el sistema de flujo de crudo vertical, teniendo en cuenta la presencia de un entrehierro de 1 cm el cual corresponde a la longitud de separación entre los núcleos de hierro, con el propósito de dar el espacio para la circulación del crudo a través de una tubería.

De manera paralela se construyó una herramienta tipo imanes permanentes, la cual está formada por imanes de Neodimio¹¹ (Nd). A través de esta herramienta se pueden generar intensidades de campo magnético de 320 mT con un entrehierro de 0,4 cm, teniendo en cuenta que la única manera para poder variar la intensidad de campo es modificando la distancia de entrehierro entre los núcleos, lo cual es una limitante debido a la geometría del sistema de flujo de crudo. La herramienta y sus dimensiones se muestran en la figura 15.

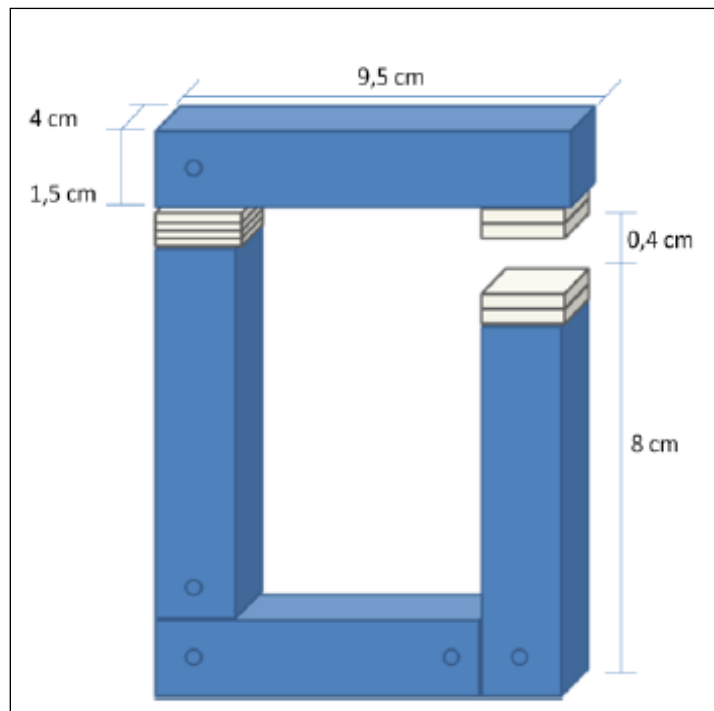


Figura 15: Herramienta tipo imán permanente. [56]

¹¹ Los imanes de neodimio es el tipo de imán de tierras raras más implementado, los cuales son producto de la aleación de elementos como neodimio, hierro y boro.

4.1 Geometría de núcleo magnético [60]

En la siguiente parte de este documento se presenta el tipo de geometría seleccionada para la construcción del prototipo de la herramienta magnética del presente proyecto.

4.1.1 Núcleos E-I

Los núcleos de este tipo son de los más económicos del mercado, adicionalmente permiten una fácil instalación de los devanados en la columna central o en las columnas laterales de la parte tipo E. Se encuentran comercializadas en láminas de poco espesor (0,5 mm), permitiendo de esta manera la construcción de núcleos de diferentes valores de espesor, haciendo de esta configuración una herramienta útil para el proceso de variar las dimensiones del núcleo de tal forma que se pueda obtener la mejor disposición que se pueda acoplar más fácilmente a los devanados de inducción de campo. Ver figura 16.

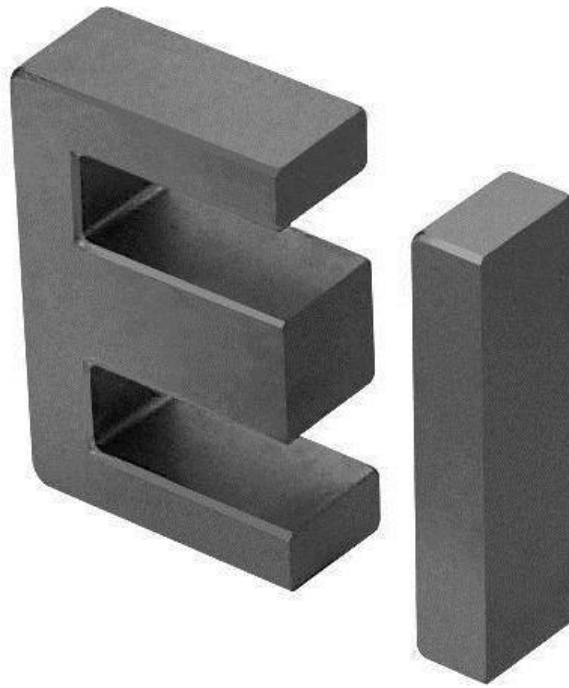


Figura 16: Núcleo de ferrita tipo E-I. [60]

Para la selección del material y la geometría del prototipo de una herramienta magnética se realizó un estudio de las diferentes opciones disponibles en el mercado, esto se hizo con el propósito de asegurar la disponibilidad y facilidad de adquisición de los materiales. De acuerdo con la información recopilada, se determinó el núcleo tipo E-I para la construcción de la herramienta, por las razones expuestas a continuación:

- Su presentación en láminas de 0,5 mm permite la construcción de herramientas con diferentes espesores, lo cual asegura la adaptación del prototipo a la cantidad

de espacio disponible dentro del banco de pruebas en donde se pretende instalar la herramienta.

- Disponibilidad del material y la geometría a nivel nacional lo cual permite una fácil adquisición para la construcción de herramientas y modificaciones adicionales.
- Con este tipo de geometría se puede realizar modificaciones que permitan adaptar la dirección de campo magnético de forma perpendicular al flujo másico de las muestras de crudo.
- Este tipo de núcleo es uno de los más usados y por lo tanto uno de los más económicos del mercado, facilitando la adquisición de material suficiente para las diferentes modificaciones geométricas que se pretenden realizar a la herramienta con el propósito de ajustar el máximo campo magnético hacía las muestras de crudo del banco de pruebas.

De acuerdo con lo observado en el mercado tanto técnica como económicamente se determinó implementar acero al silicio para la construcción del prototipo de la herramienta. Según catálogos observados, la permeabilidad relativa oscila entre 3000 y 7000. Las dimensiones de este tipo de núcleo se muestran en la figura 17.

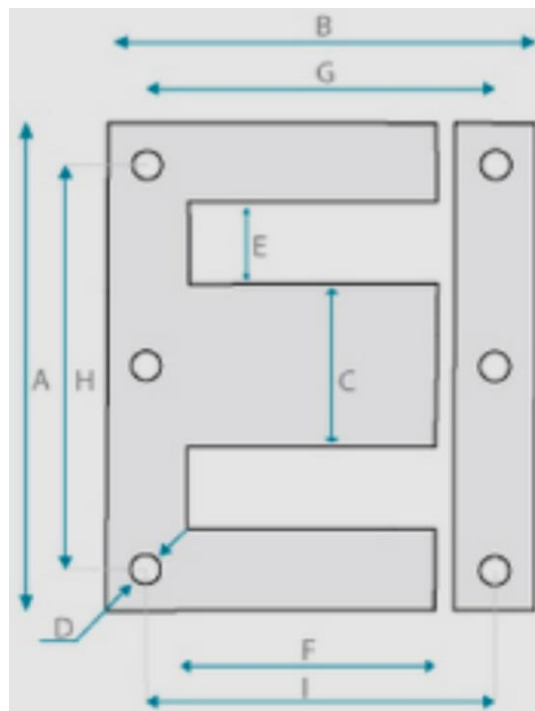


Figura 17: Núcleo acero al silicio. Fabricante: Frana International S.A.S. [61]

A continuación se presenta en la tabla 12 los valores de las longitudes mostradas en la figura anterior, la fila subrayada corresponde a las dimensiones de lámina seleccionadas sobre las bases del diámetro de la tubería del banco de pruebas, donde se implementará el prototipo. La tubería de circulación de las muestras de crudo tendrá un diámetro de ½ Pulgada.

Tabla 12: Dimensiones de lámina de acero al silicio escogida. [61]

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

A continuación se muestra la hoja de datos del material escogido (ver tablas 13 y 14), estas características están determinadas por el fabricante seleccionado del mercado y fueron seleccionadas debido a las necesidades geométricas y ferromagnéticas de la presente investigación. Ver figuras 13 y 14.

Tabla 13: Características generales del material seleccionado. [61]

ITEM	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS
1	Designación de material: Acero al silicio de grano no orientado.
2	Designación Internacional: M 530-50ª Y M400-50ª
3	Composición %: -Carbono ©: 0.003 - Manganese (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 2
8	Tratamiento térmico: No tiene. Si tuviera seria recocido. Se puede ofrecer con o sin recocido.
9	Tipo de trabajo de la superficie: Superficie aislante
10	Proceso de obtención: Laminado en frío

Tabla 14: Características ferromagnéticas del material seleccionado. [61]

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

Adicionalmente, el fabricante provee la curva de permeabilidad del material en función de su polarización interna, así como también la curva de las pérdidas de potencia por kilogramo de herramienta construida en función del campo interno experimentado por el material. Ver figuras 18 y 19.

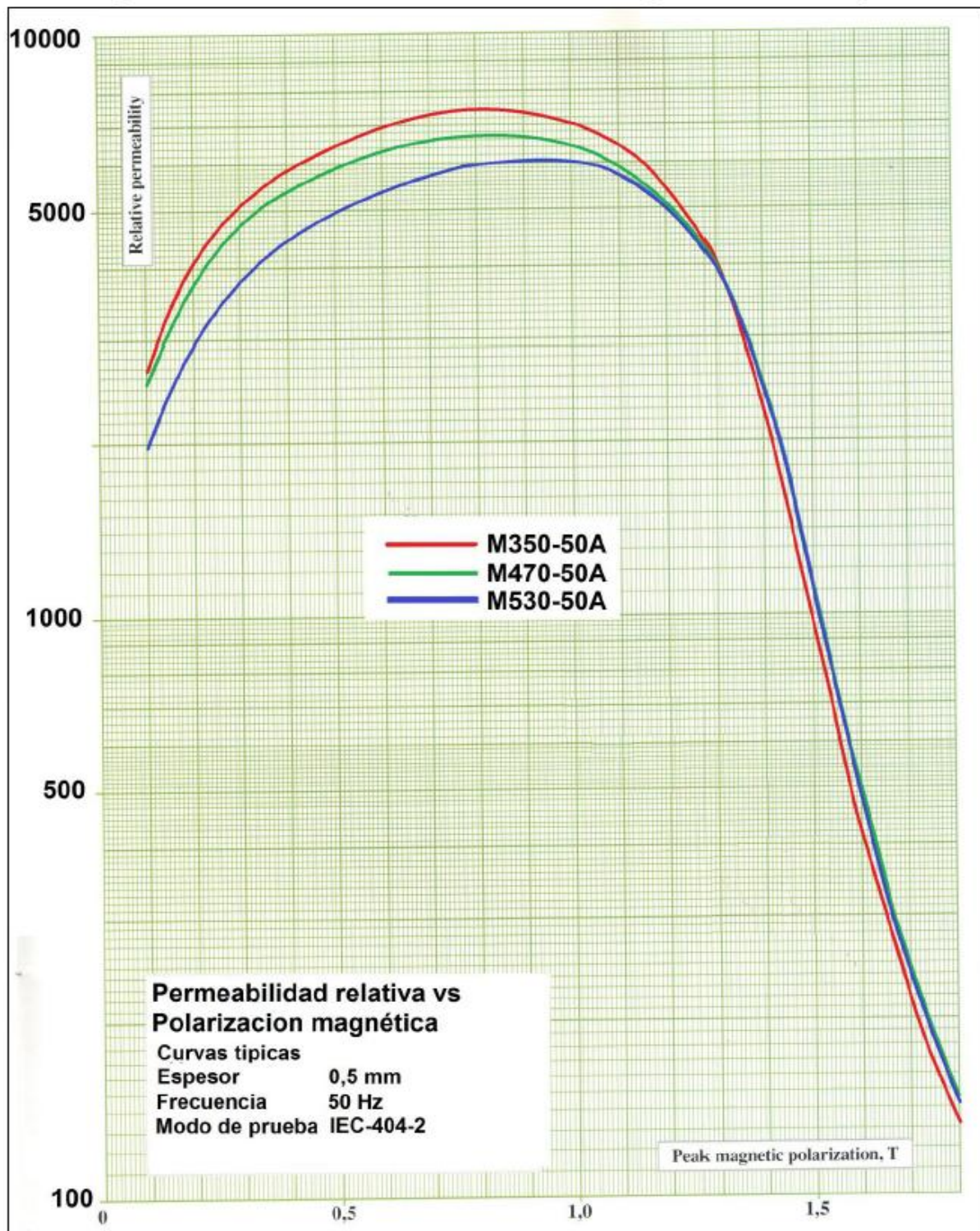


Figura 18: Curva de permeabilidad relativa del acero al silicio del núcleo. [61]

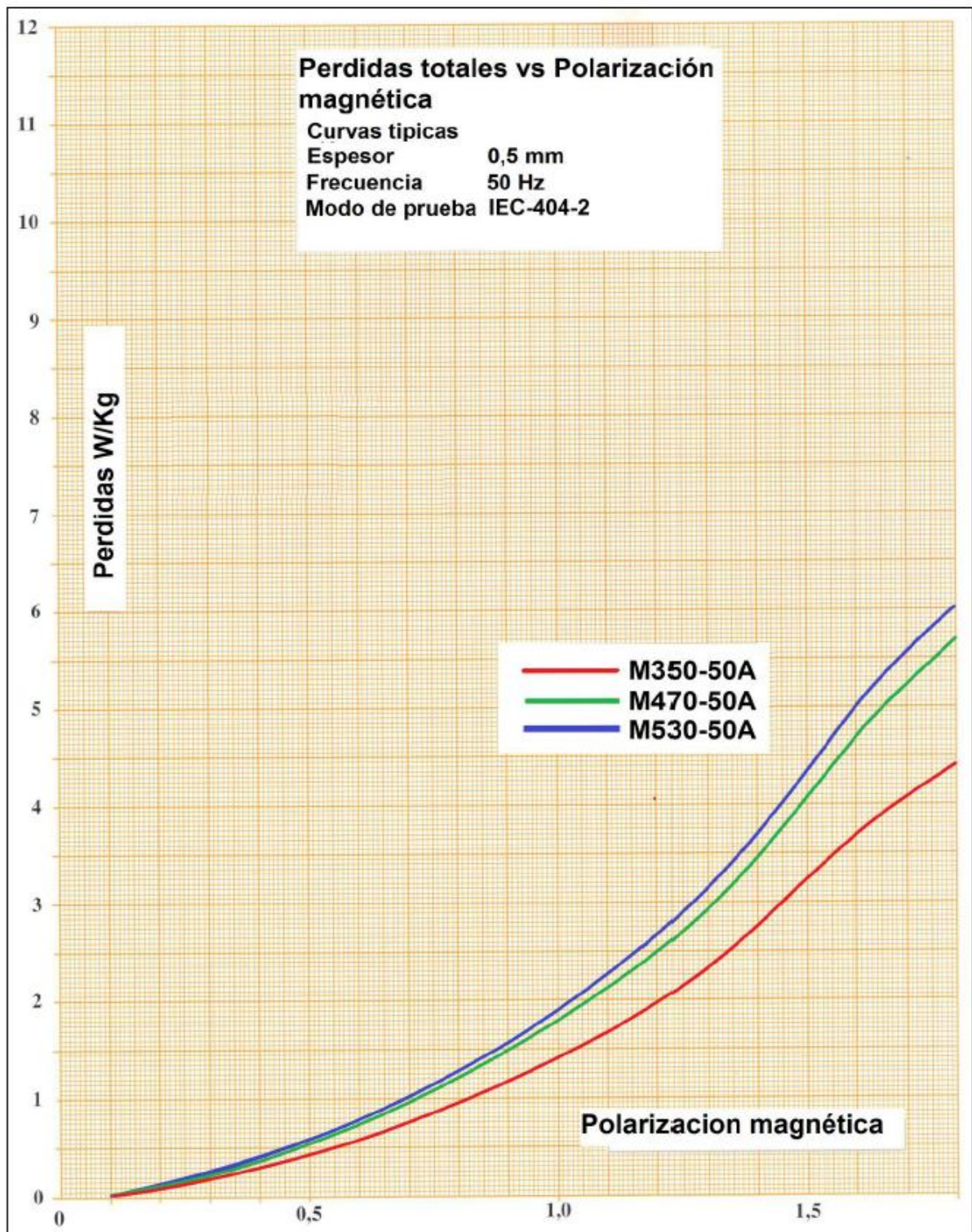


Figura 19: Curva de pérdidas por kilogramos del núcleo de la herramienta. [61]

Debido a la disponibilidad del mercado se optó por trabajar con acero al silicio M530-50A el cual posee una permeabilidad que varía entre los 2000 y 6000 de acuerdo con lo observado anteriormente en catálogos. Adicionalmente se presentará una pérdida en el punto de inicio de la saturación del material (la cual se presenta a partir de 1[T]), de aproximadamente 2 W/kg.

Utilizando la herramienta de dibujo SolidWorks (Software de diseño para el modelado mecánico de sólidos), en versión de prueba se realiza un dibujo esquemático de la forma geométrica del prototipo de la herramienta magnética con los conductores de corriente encargados de generar la densidad de campo magnético dentro de una tubería de ½ Pulgada del banco de pruebas. En la siguiente figura se puede observar la necesidad de construir un par de cuñas con las cuales se pueda ampliar la zona del entrehierro de la herramienta por donde estará ubicada la tubería de transporte de crudo del simulador. Ver figura 20.

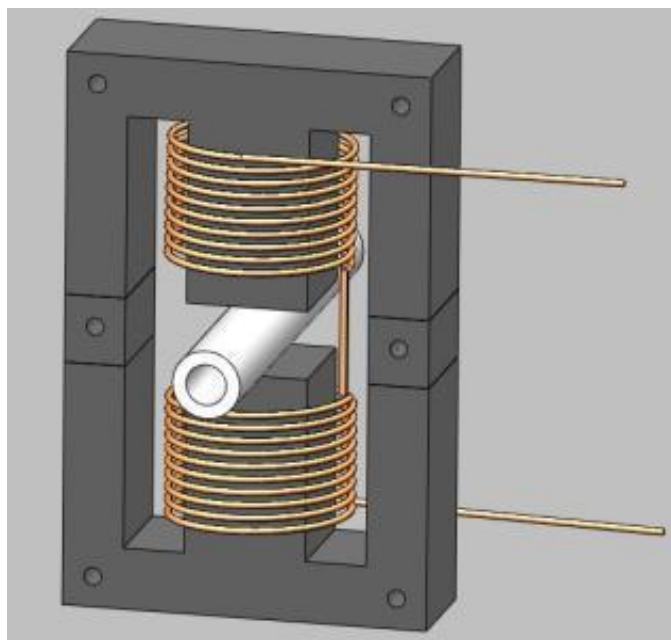


Figura 20: Dibujo esquemático del prototipo de la herramienta magnética. [62]

4.2 Diseño y simulación del prototipo de la herramienta

En esta parte de la investigación se realizaron las simulaciones de las diferentes configuraciones y geometrías llevadas a cabo con el fin de concentrar las líneas de flujo magnético en las muestras de crudo que han de recorrer las tuberías del banco de pruebas. A partir de estas simulaciones se busca observar el comportamiento aproximado de las líneas de campo en cada una de las diferentes herramientas propuestas y de esta

forma establecer el diseño del prototipo que finalmente se debe construir. En las simulaciones se consideran parámetros tales como: corriente de entrada en las bobinas de campo, temperatura, permeabilidad del material del núcleo y densidad de flujo magnético. Las simulaciones fueron realizadas en un simulador basado en diferencias finitas denominado FEMM 4.2 (Finite Element Method Magnetics), de licencia libre el cual simula el comportamiento del acero al silicio M530-50A el cual se encuentra por defecto en sus librerías. De igual manera para materiales que no se encuentren en la base de datos por defecto de las librerías, la herramienta de simulación permite caracterizar con la curva de magnetización y de permeabilidad propia del material de estudio.

Para la configuración de la geometría inicial de la herramienta se seleccionó [61], la lámina de acero al silicio E/114/75/38 M-43 y M-45.

A continuación se muestra la curva de magnetización del acero al silicio M-43 (M530-50A) que se encuentra en las bases de datos de la herramienta de simulación. Ver figura 21.

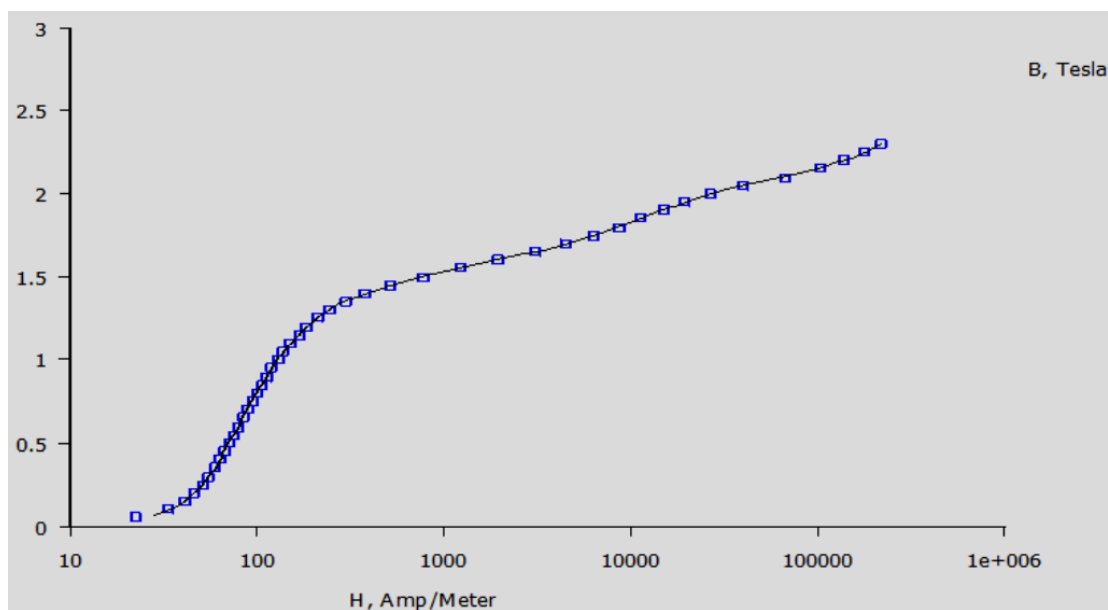


Figura 21: Curva de magnetización del acero al silicio. FEMM 4.2. [62]

Con el propósito de observar el comportamiento de la herramienta construida con otro material que pudiese ser considerado del mercado en caso de no poder contar con el acero al silicio (previamente seleccionado), se realizaron las primeras simulaciones con ferrita, tomando de los catálogos del fabricante la lámina tipo E55/28/25 la cual consta de las siguientes dimensiones mostradas en la figura 22.

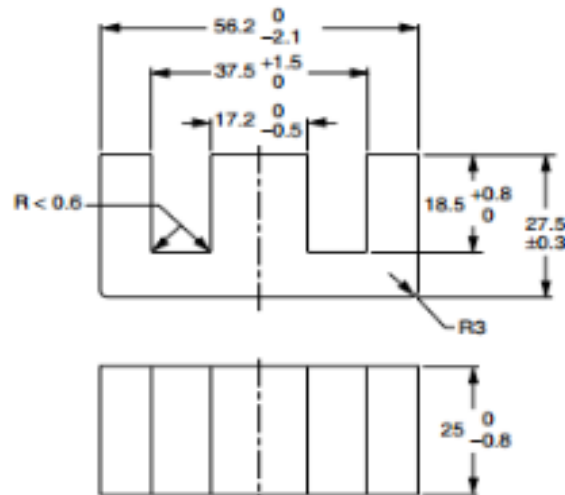


Figura 22: Dimensiones lámina de ferrita E55/28/25 Ferroxcube. [62]

Teniendo en cuenta las dimensiones de las láminas de ferrita que han de componer el núcleo se procede a realizar las simulaciones variando la permeabilidad relativa con el fin de tener en cuenta el efecto de la temperatura en las propiedades magnéticas del núcleo. A continuación, en la figura 23 se muestran las curvas de caracterización del material.

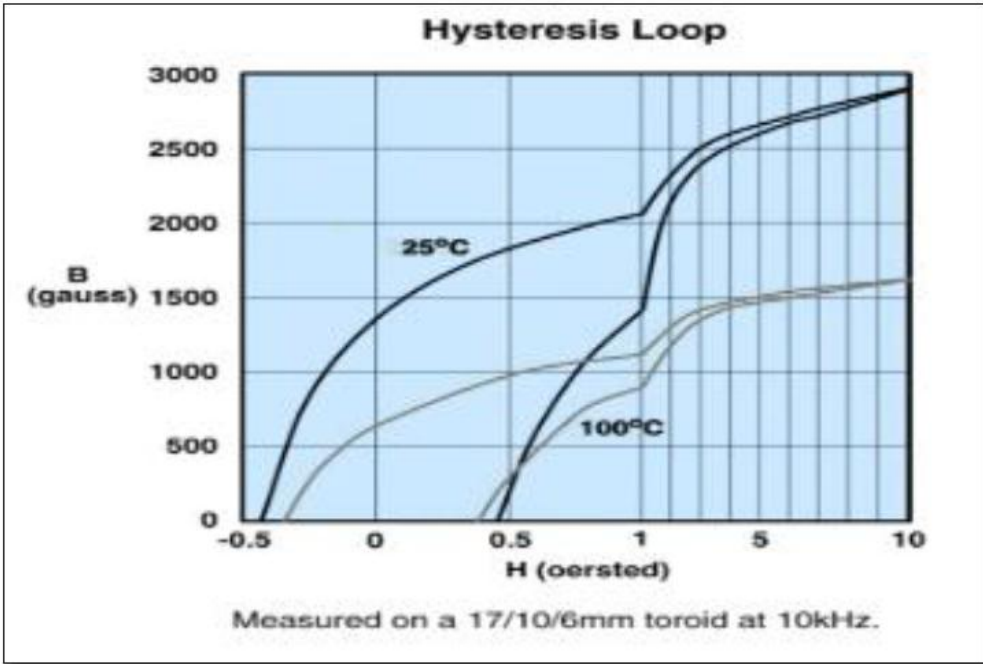


Figura 23: Curva de magnetización inicial de la ferrita 43. Ferroxcube. [62]

De acuerdo con las unidades manejadas por el fabricante de la ferrita 43 (Ferroxcube), la intensidad de campo magnético externo está dado en las unidades del sistema cegesimal,

es decir, en Oersted. Un Oersted equivale a $1000/4\pi$ [A/m] y la magnetización está dada en Gauss. Un Tesla es equivalente a 10 000 Gauss.

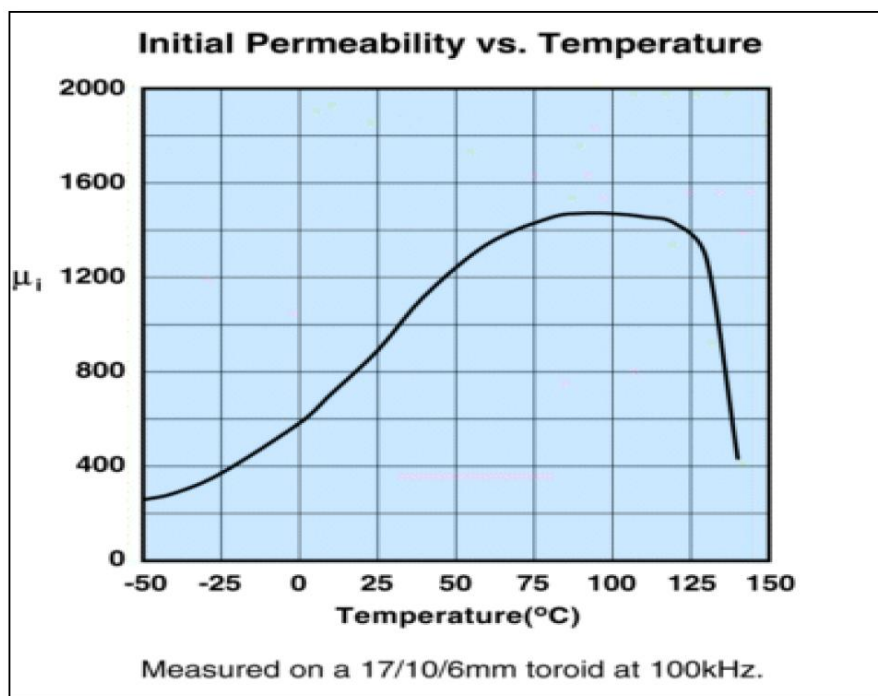


Figura 24: Curva de permeabilidad vs temperatura, ferrita 43. Ferroxcube. [62]

La primera simulación se realiza a temperatura ambiente (25 °C), en donde la permeabilidad inicial de la ferrita según la gráfica anterior tiene un valor de 900.

Para ajustar las características del simulador, se insertó este valor en el siguiente cuadro de dialogo de caracterización del material. Ver figura 25.

Field	Value
Name	ferrita
B-H Curve	Linear B-H Relationship
Relative μ_x	900
Relative μ_y	900
ϕ_{hx} , deg	0
ϕ_{hy} , deg	0

Figura 25: Configuración de la permeabilidad de la ferrita @25°C. [62]

Para esta simulación en particular se asumió un devanado de 235 espiras alrededor de la columna central y una corriente directa variable de 10 a 20 A.

Debido a los resultados reportados en la tesis de C. Villabona y D. González [13], se determinó que una densidad de campo de 400 mT es el objetivo de generación del prototipo de la herramienta magnética, esto se debe a que los resultados obtenidos con las muestras de crudo del pozo Colorado 25 del Campo Escuela Colorado, mostraron que el punto de nube del crudo tratado, presentó una disminución aproximada de 25% para un tiempo de exposición a campo de 17,24 s y una densidad de campo de 335 mT, lo cual se traduce en un retraso del proceso de precipitación y deposición de parafinas dentro de la tubería de producción.

En este orden de ideas se inició con una corriente máxima (20 A), observando en las simulaciones el valor de la densidad de campo magnético en el centro del entrehierro, en donde se espera, el mínimo valor de campo debido a que es el punto más lejano a los extremos de las fronteras físicas del núcleo ferromagnético. De esta manera en la simulación del prototipo se estableció disminuir el valor de la intensidad de corriente aplicada en el devanado de campo hasta encontrar el valor mínimo objetivo establecido previamente (400 mT).

Se determinó disminuir la intensidad de la corriente mas no el número de espiras en la bobina de campo ya que se pretende usar un conductor de menor calibre que permita en el espacio físico disponible un mayor número de vueltas posible, lo cual se traduce en un aumento en la fuerza magneto motriz externa, esto es debido a que es más fácil en cuanto a las características eléctricas de la herramienta aumentar una vuelta que aumentar un Ampere. De esta manera se obtuvo que a una corriente de 11 A se obtuvo en el centro de la tubería una densidad de flujo magnético de 404 mT, valor que asegura el cumplimiento del objetivo planteado después de analizar los resultados obtenidos por C. Villabona y D. González [13]. En la figura siguiente se muestran los resultados obtenidos con la herramienta de simulación, inicialmente sin tener en cuenta los parámetros de saturación. Ver figura 26 y 27.

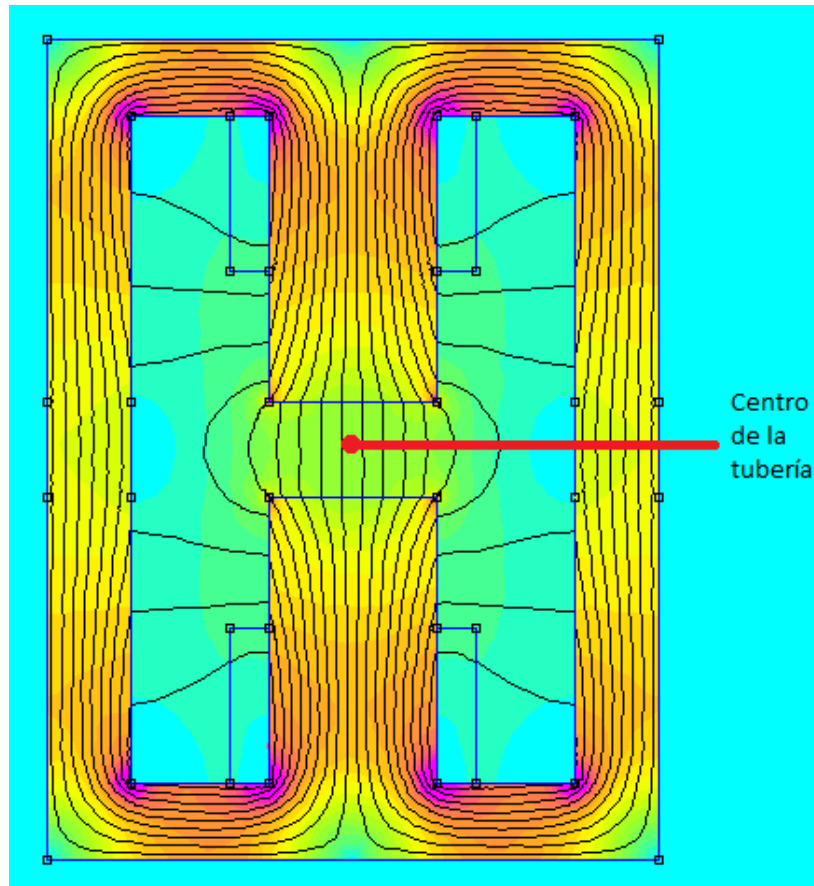


Figura 26: Distribución de campo magnético en núcleo de ferrita. [62]

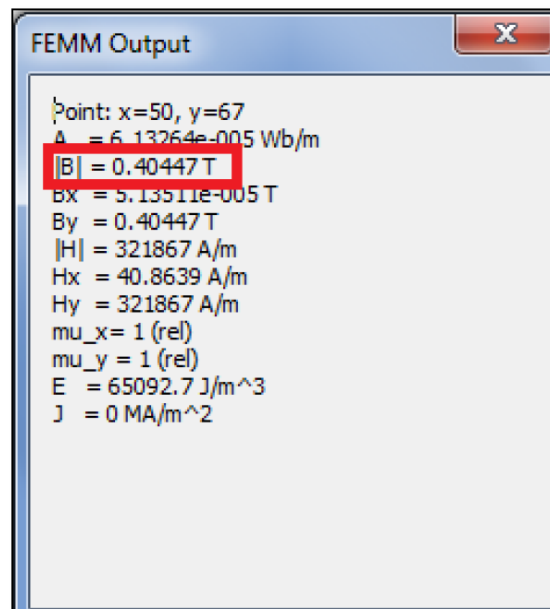


Figura 27: Resultados en centro de herramienta de ferrita propuesta. [62]

Los resultados de la simulación se muestran en la tabla 15.

Tabla 15: Resultados de simulación en núcleo de ferrita @ 25°C. [62]

DETALLE	VALOR
Corriente en devanado	11
Número de devanados	2
Espiras por devanado	235
Densidad de flujo [mT]	404

A continuación se procede con nuevas simulaciones teniendo en cuenta el efecto de la saturación del material con el fin de obtener resultados que más acordes con el verdadero comportamiento del material del núcleo del prototipo.

De esta manera se tomaron en cuenta los datos de la curva de magnetización inicial para la ferrita usada en las simulaciones anteriores y se procedió a interpolar los valores a una temperatura de 75°C con el fin de simular de igual manera el efecto Joule debido a la circulación de corriente en los devanados de campo. Los resultados obtenidos son los que se encuentran de color azul en la figura 28.

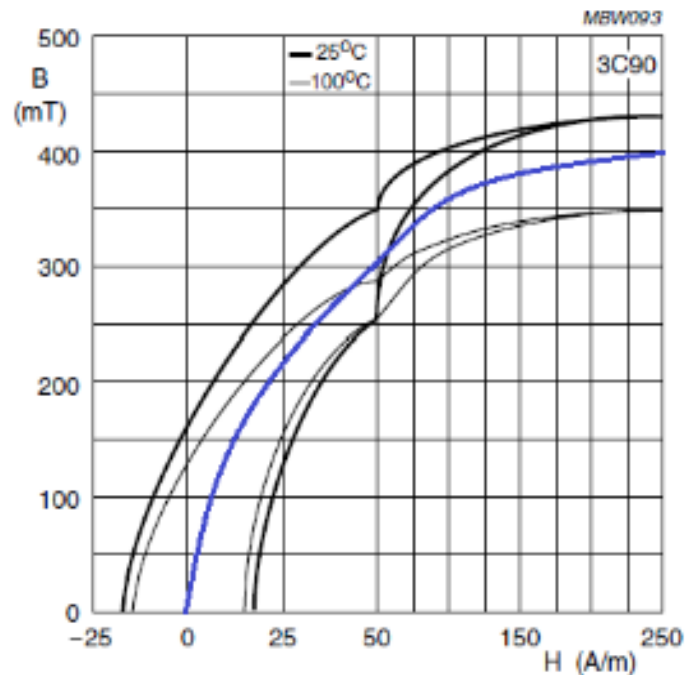


Figura 28: Interpolación de curva de magnetización @75 °C. [62]

Con el propósito de ingresar estos valores en la herramienta de simulación se realiza una tabulación a través de la inspección visual de la figura anterior y de esta forma adaptar las características de saturación del material dentro de las corridas de simulación. La tabla 16 corresponde a los resultados encontrados:

Tabla 16: Tabulación curva de magnetización de ferrita @ 75 °C. [62]

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	46,875	0,400	250
0,305	50		

Una vez se introducen estos valores en la herramienta de simulación se genera de manera consecuente una gráfica de saturación del material caracterizado, tal como se muestra a continuación (ver figura 29).

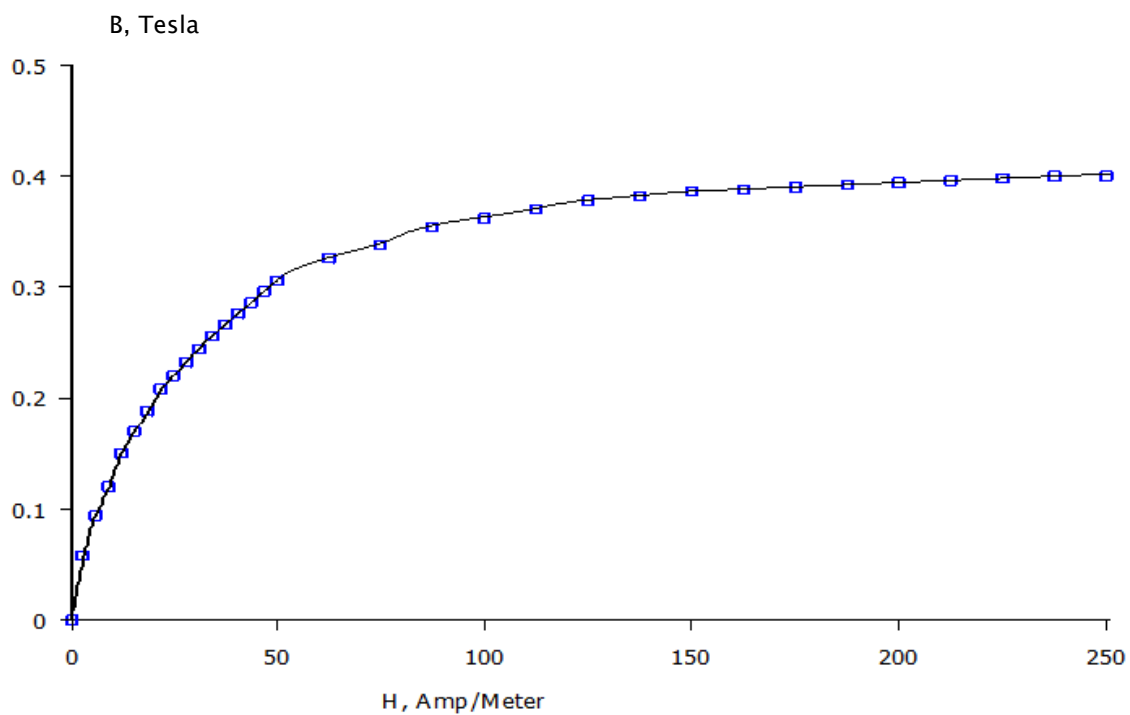


Figura 29: Curva de caracterización de la ferrita 3C90 @75 °C. [62]

Con la gráfica 29 se sigue con la simulación del prototipo propuesto con el fin de obtener un mínimo de 400 mT en el punto central del entrehierro, en donde se obtienen los siguientes resultados (ver figura 30 y 31).

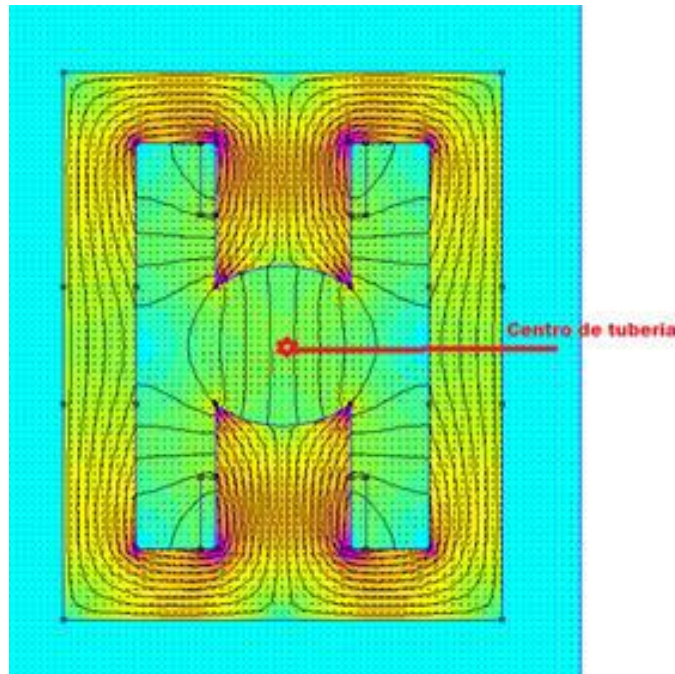


Figura 30: Comportamiento de prototipo con núcleo 3C90 @75 °C. [62]

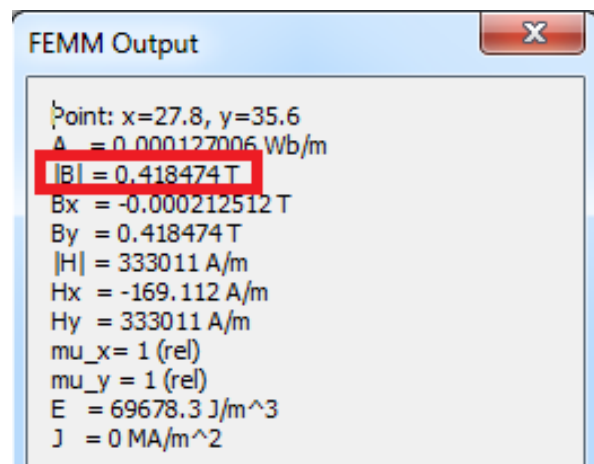


Figura 31: Resultados en centro de entrehierro de núcleo 3C90 @75 °C. [62]

En los resultados de la simulación realizada anteriormente (ver figuras 30 y 31), se debe tener en cuenta que la herramienta fue modificada en su geometría, ya que se realizaron cortes en curvatura en los dos extremos de la columna central, esto con el fin de acoplar la tubería con el prototipo de la herramienta y de esta forma disminuir el entrehierro presente. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 17.

Tabla 17: Resultados de simulación con efectos de saturación. [62]

DETALLE	VALOR
Corriente en devanado	10
Número de devanados	2
Espiras por devanado	350
Densidad de flujo [mT]	418

Una de las limitaciones de los prototipos planteados anteriormente radica en la imposibilidad física de contar con el espacio disponible para realizar el número de espiras que requiere el devanado, por lo tanto, teniendo en cuenta la necesidad de contar con todos los requisitos de construcción necesarios, se procedió a realizar la búsqueda de un núcleo en el mercado que contara con el espacio suficiente para el arrollamiento de los devanados, en donde se pudo encontrar las láminas de acero al silicio de grano no orientado M-43 o las también denominadas M530-50A. Encontrando una referencia geométrica denominada E/114/75/38, con las siguientes características:

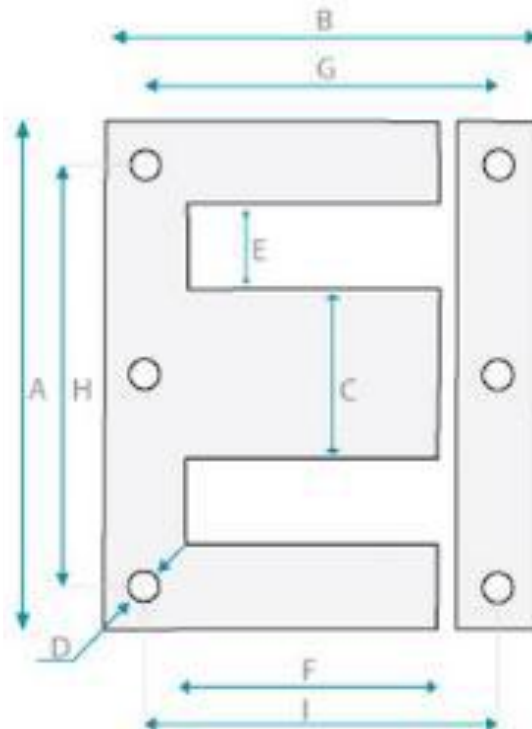


Figura 32: Características físicas de láminas E/114/75/38. [62]

En donde las dimensiones de la herramienta se establecen en la tabla 18.

Tabla 18: Dimensiones lámina de núcleo tipo E/114/75/38. [62]

DIMENSIÓN	[mm]
A	114,2
B	95,1
C	38,0
D	5,5
E	19,1
F	57,1
G	75,4
H	94,3
I	79,0

4.3 Diseño de herramienta (H6)

Después de lo anterior se procedió a realizar el devanado de la otra columna central del núcleo, teniendo presente realizar una configuración aditiva de los devanados con el fin de garantizar el aumento de la densidad de flujo. Los resultados se muestran en las figuras 33 y 34.

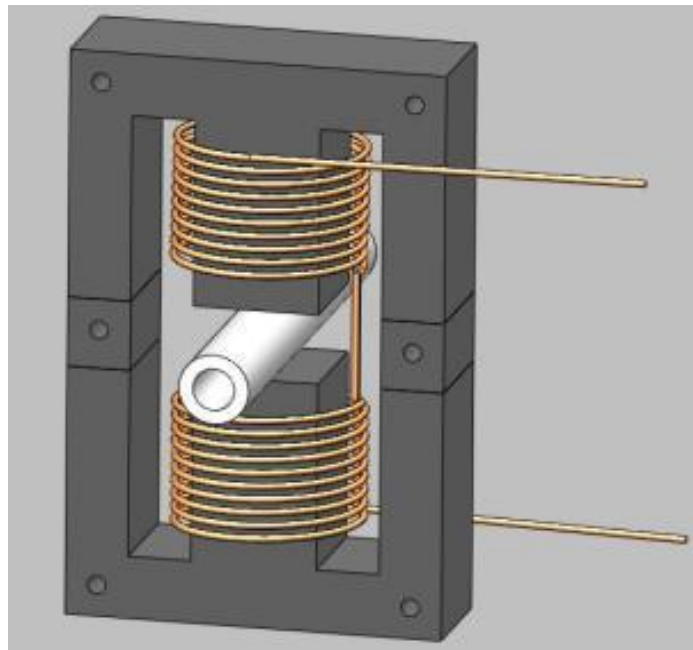


Figura 33: Propuesta de prototipo H6. [62]

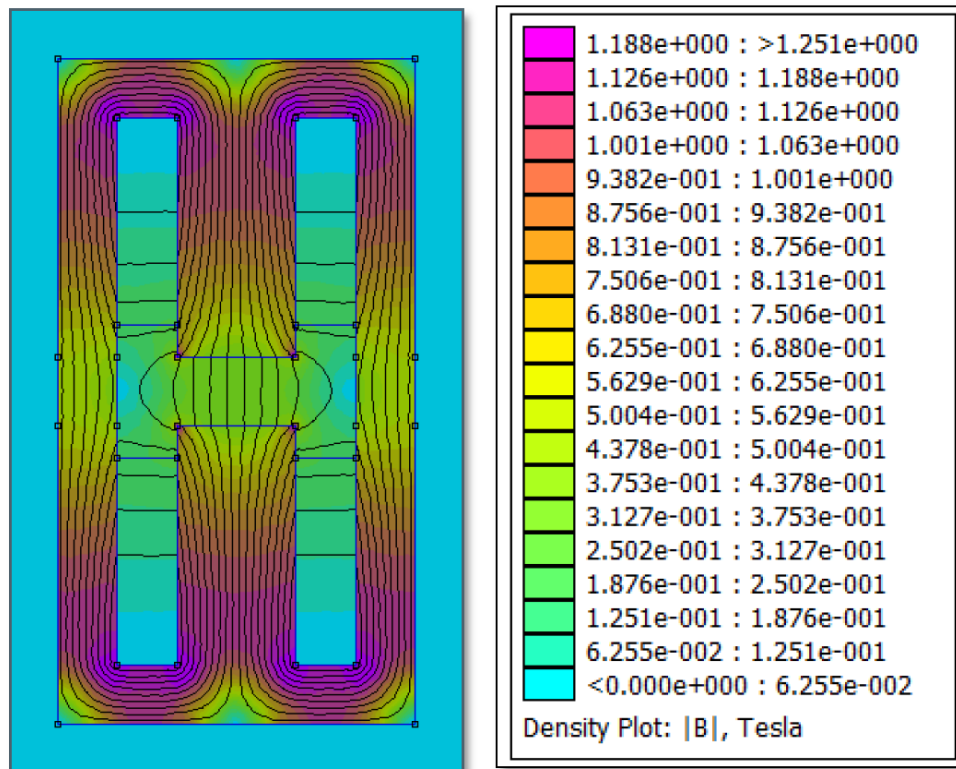


Figura 34: Resultados cromatografía de prototipo H6. [62]

Los resultados obtenidos en el centro de la tubería de transporte de crudo se muestran en la figura 35 generada en la herramienta de simulación:

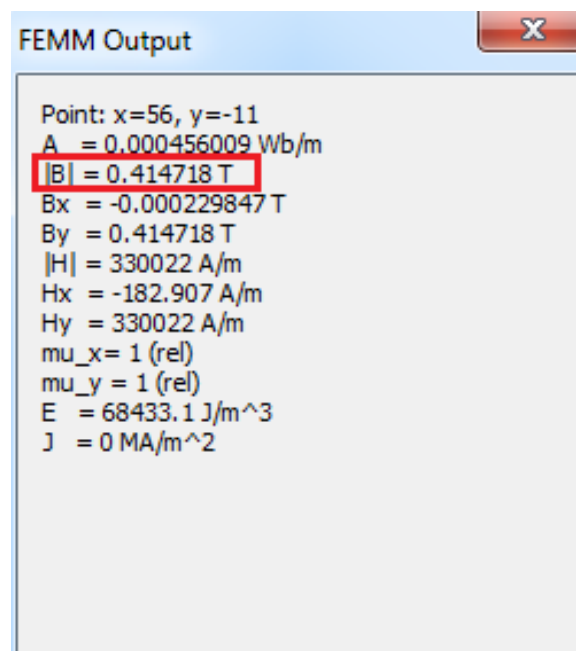


Figura 35: Resultados en centro de entrehierro de núcleo M-43. [62]

En esta parte de la herramienta se cuenta con dos devanados de generación de campo que están conectados de forma aditiva, de tal forma de generar el máximo nivel de campo en el centro de la tubería. Se cuenta con una bobina de 188 espiras y otra bobina de 198 espiras, valores diferentes debidos principalmente a las diferentes trayectorias llevadas a cabo en la construcción. Los materiales usados en la construcción y simulación del prototipo fue acero al silicio M-43. En la tabla 19 se resumen los resultados:

Tabla 19: Parámetros de construcción de prototipo H6. [62]

DETALLE	VALOR
Densidad de Campo [mT]	415
Número de bobinas	2
Corriente en devanado [A]	20
Calibre Conductor Cobre [AWG]	14
Número de espiras por devanado 1	188
Número de espiras por devanado 2	198

Una vez alcanzado el objetivo de generación en la simulación magnética, se procede a estudiar el comportamiento eléctrico del prototipo de tal manera que se buscó la reducción del calibre del conductor del devanado, lo cual permite un mayor número de espiras incidiendo de manera directa en el aumento de la fuerza magneto motriz externa.

4.4 Diseño de herramienta (H7)

Para este diseño adicional del prototipo se disminuyó el calibre de conductor, implementando un #16 AWG, con el cual se logró un mayor número de espiras por devanado (316 en cada uno), debido a lo anterior se logró aumentar en aproximadamente 60% la cantidad de fuerza magneto motriz externa generada. Igualmente que en simulaciones anteriores se procede con la simulación desde una entrada máxima de corriente de 20 A, disminuyendo hasta observar la generación en el centro de la tubería de 430 mT, esto debido a que se observó que los valores registrados en laboratorio

estuvieron 30 mT en promedio por debajo de las magnitudes reportadas en simulación. De esta manera se obtuvieron los siguientes resultados (ver figuras 36 y 37):

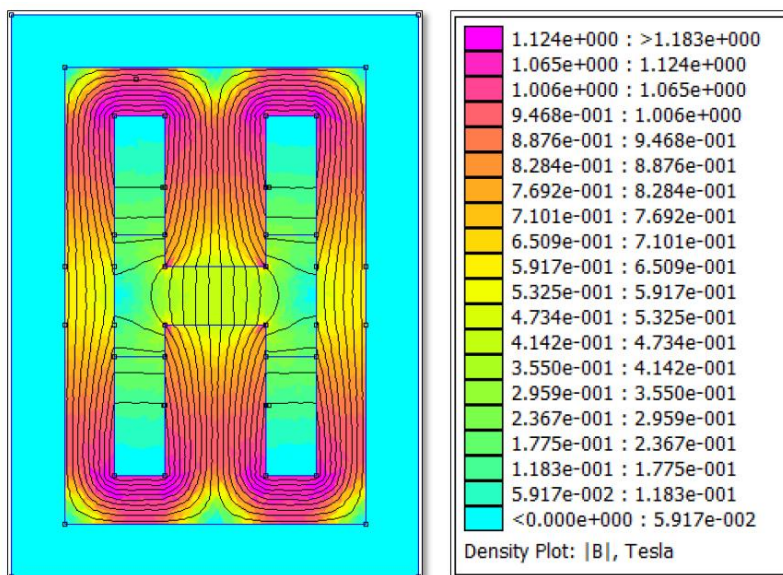


Figura 36: Resultados cromatografía de prototipo H7. [62]

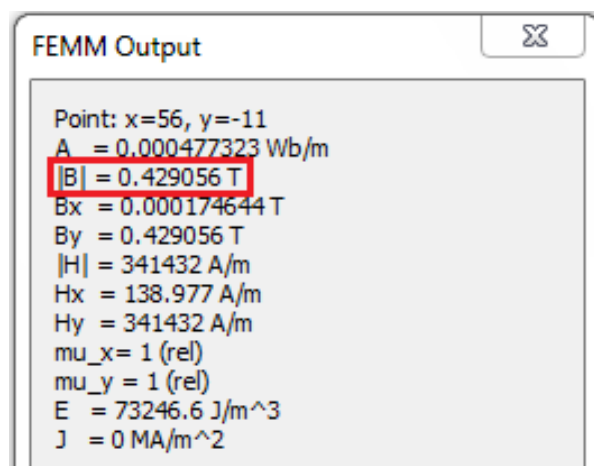


Figura 37: Resultados en centro de entrehierro de núcleo M-43 (H7). [62]

Tabla 20: Parámetros de construcción de prototipo H7. [62]

DETALLE	VALOR
Densidad de Campo [mT]	429
Número de bobinas	2
Corriente en devanado [A]	13
Calibre Conductor Cobre [AWG]	16
Número de espiras por devanado 1	316
Número de espiras por devanado 2	316

4.5 Cálculo de los parámetros básicos de la herramienta

Con el propósito de validar los resultados obtenidos a través de la herramienta de simulación FEMM 4.2 [63], se procede a realizar los cálculos matemáticos que sustenten los resultados obtenidos y de esta forma aumentar la certeza de generar la densidad de campo propuesta en el prototipo de la herramienta y de esta forma seguir con la construcción del prototipo.

Se empieza con la definición de los conceptos fundamentales del magnetismo que rigen el comportamiento de los circuitos magnéticos, dando inicio con la definición de flujo magnético y densidad de flujo magnético.

En el espacio libre o vacío se define la densidad de flujo de la siguiente manera:

$$\mathbf{B} = \mu_0 * \mathbf{H} \text{ [Wb/m}^2\text{]} \quad (3)$$

B: Densidad de campo magnético [Wb/m^2] o [T],

μ_0 : Permeabilidad magnética del aire o vacío igual a $4\pi * 10^{-7} [\text{H/m}]$,

H: fuerza magneto motriz externa en [A/m].

El flujo magnético es el flujo que pasa por un área determinada y se define con la letra griega ϕ y se halla de la siguiente manera:

$$\phi = \oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \text{ [Webber]} \quad (4)$$

Cuyas unidades como lo dicho anteriormente son Webber.

Adicionalmente la ley circuital de Ampere, la cual se aplica sobre una espira por la cual pasa una corriente I, quedando definido como:

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{L} = I [A - vuelta] \quad (5)$$

Se debe tener en cuenta que la corriente I es sólo para una espira, y dado el caso de encontrar un sistema de N espiras la anterior ecuación queda definida como:

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{L} = NI_{net} [A - vuelta] \quad (6)$$

$$H * l_c = NI_{net} [A - vuelta] \quad (7)$$

H : Intensidad de campo magnético [A/m],

l_c : Longitud media del núcleo [m],

N : Número de espiras de la bobina [vueltas],

I_{net} : Corriente neta por conductor [A].

Ahora, teniendo en cuenta que la herramienta que se va a construir es de tipo ferromagnético, la ecuación que define la generación de los 400 mT propuestos anteriormente es:

$$B = \mu * H \left[\text{Webber} / m^2 \right] \quad (8)$$

$$\Phi = B * A = \frac{\mu * N * I * A}{l_c} [\text{Webber}] \quad (9)$$

H : Intensidad campo magnético [A/m],

l_c : Longitud media del núcleo [m],

N : Número de espiras de la bobina [vueltas],

I : Corriente neta por conductor [A],

μ : Permeabilidad magnética del material del núcleo [H/m],

A : Área que atraviesan las líneas de flujo [m^2].

Además de la permeabilidad del espacio vacío o del aire descrita anteriormente, existe para cada material la denominada permeabilidad relativa, la cual es una comparación entre la permeabilidad del material estudiado con respecto a la del aire o vacío. Siendo así:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (10)$$

Esta permeabilidad magnética relativa es un parámetro de selección del material del núcleo del prototipo de la herramienta debido a que determinar la capacidad de generación de campo interno en el núcleo.

Para conocer el comportamiento del fenómeno que se va a presentar en el tratamiento del banco de pruebas, es necesario determinar las ecuaciones que rigen a los circuitos magnéticos, es por esto que a continuación se muestra las dimensiones del prototipo que permitan determinar su circuito equivalente. Ver figura 38.

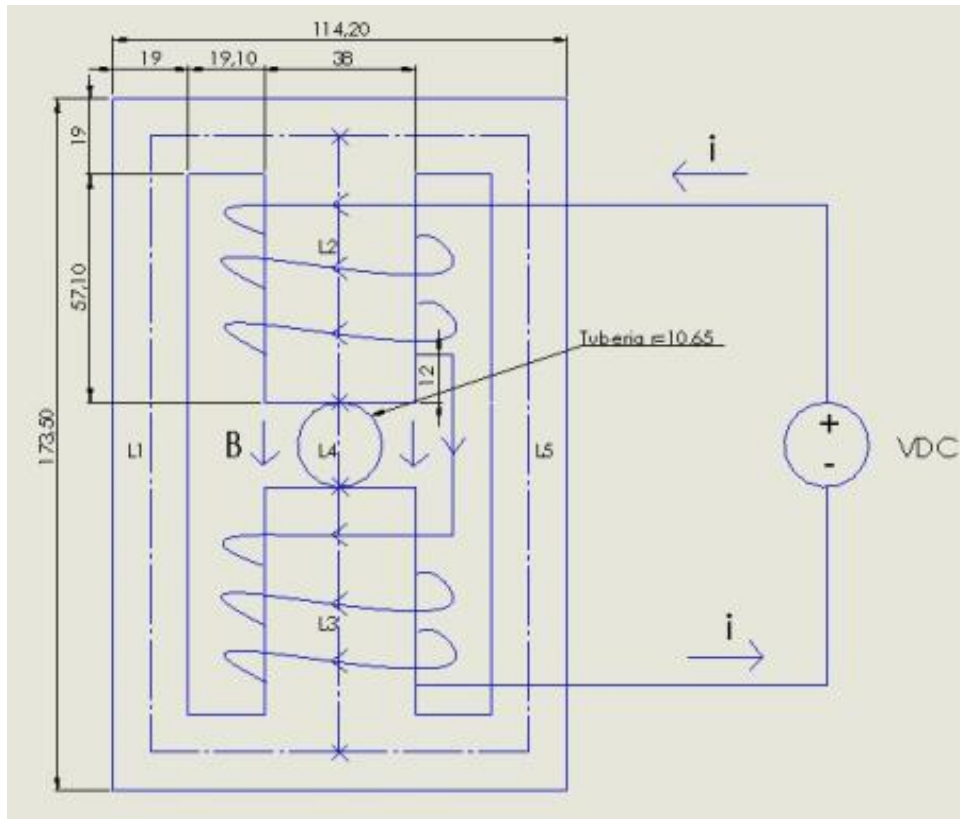


Figura 38: Dimensiones del prototipo de la herramienta magnética. [62]

4.6 Circuito magnético del prototipo de herramienta

Como se estableció anteriormente, con éste circuito magnético se requiere generar una densidad de campo magnético de 400 mT en el centro de una tubería de diámetro efectivo interno de ½ pulgada y un diámetro externo de 21,3 mm para el tratamiento magnético en las muestras de crudo. En la siguiente figura se muestra el esquema circuital que representa el comportamiento magnético de la herramienta. Ver figura 39.

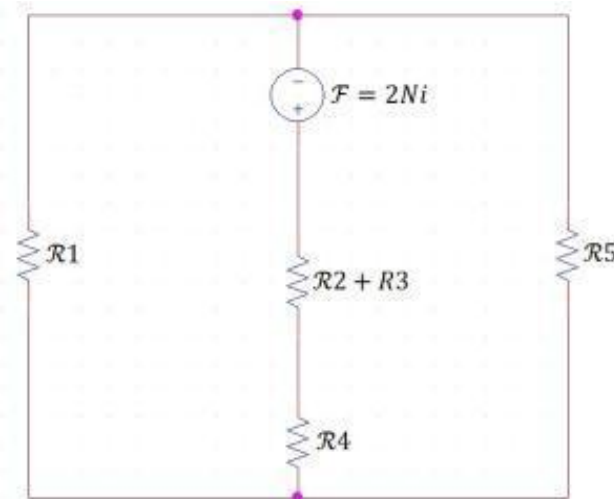


Figura 39: Esquema circuital de prototipo de herramienta magnética. [62]

En donde $R1$ y $R5$ representan la reluctancia en las columnas externas del prototipo, las cuales son iguales debido a que están hechas a partir del mismo material ferromagnético y tienen las mismas dimensiones. $R2$ y $R3$ representan las columnas centrales del prototipo antes del entrehierro, las cuales también son iguales por las mismas razones de material y dimensiones, finalmente $R4$ representa la reluctancia del entrehierro de la herramienta, el cual se encuentra en la parte intermedia de los extremos de las columnas centrales. Para el cálculo de cada una de las reluctancias anteriormente descritas se procede a implementar la siguiente ecuación:

$$R = \frac{l_c}{\mu * A} \left[\frac{\text{Ampere} * \text{vuelta}}{\text{Webber}} \right] \quad (11)$$

En donde R es la reluctancia de cada sección, l_c es la longitud media del núcleo magnético, μ es la permeabilidad magnética del material y finalmente, A es el área transversal que atraviesan las líneas de flujo magnético.

Para el cálculo de las diferentes reluctancias del circuito magnético de la herramienta se consulta la figura de magnetización del material (ver figura 18), en donde se puede observar, que para una densidad de campo de 750 mT en la columna central del núcleo (de acuerdo con la magnitud promedio observada en los resultados de simulación), la permeabilidad relativa del material es de 5900 en la columna central, mientras que en las columnas laterales se presenta una permeabilidad relativa de 4200 (densidad de flujo magnético 357 mT).

Ahora bien, teniendo en cuenta que $R1$ y $R5$ son de igual magnitud, se tiene:

$$R1 = R5 = \frac{l1}{\mu_r * \mu_0 * A1} \left[\frac{Av}{Wb} \right] \quad (12)$$

Teniendo en cuenta que los valores presentes en la herramienta magnética son:

$$\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} \text{ H/m}$$

$$\mu_r = 4200$$

$$l1 = l5 = 0,2497 \text{ m}$$

$$A1 = A5 = 0,000722 \text{ m}^2$$

Tomando los valores antes registrados en la ecuación anterior se obtienen el siguiente valor de reluctancia:

$$R1 = R5 = 65,53 * 10^3 \left[\frac{Av}{Wb} \right]$$

De igual manera teniendo en cuenta las dimensiones de la herramienta que se toman para el cálculo de las reluctancias $R2$ y $R3$:

$$\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} \text{ H/m}$$

$$\mu_r = 5900$$

$$l2 = l3 = 0,0666 \text{ m}$$

$$A2 = A3 = 0,00144 \text{ m}^2$$

Por lo tanto:

$$R2 = R3 = 6,22 * 10^3 \left[\frac{Av}{Wb} \right]$$

Para el cálculo de $R4$ se debe tener en cuenta que se presenta un entrehierro que afecta el valor de la reluctancia debido al aumento del área transversal que atraviesan las líneas de flujo, debido al denominador, efecto borde. Por lo tanto se tiene:

$$R4 = \frac{l4}{\mu_r * \mu_0 * A4} \left[\frac{\text{Ampere} - \text{vuelta}}{\text{Webber}} \right] \quad (13)$$

$$\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} \text{ H/m}$$

$$\mu_r = 1$$

$$l4 = 0,0213 \text{ m}$$

Para poder calcular la reluctancia del entrehierro, se debe determinar qué tipo de entrehierro se presenta en el prototipo de la herramienta, el cual puede ser de tipo largo o corto, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$A > 5EH \quad (14)$$

En donde A es el área del entrehierro en cm^2 y EH es la longitud del entrehierro en cm , tal como se muestra en la siguiente ilustración (ver figura 40).

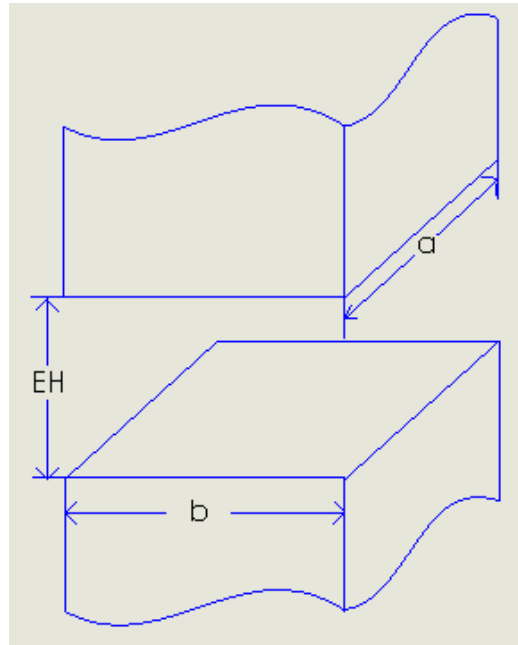


Figura 40: Entrehierro de un núcleo magnético de sección rectangular. [62]

Si la ecuación anterior se cumple, el entrehierro analizado es de tipo corto y se aplica una modificación al cálculo del área que atraviesan las líneas de flujo, aumentando con la longitud del entrehierro a cada lado de la sección rectangular. Si la anterior ecuación no se cumple, el entrehierro es de tipo largo, por lo tanto es necesaria la aplicación de cálculos complejos para el cálculo de la reluctancia [64]. Realizando el cálculo correspondiente, se tiene que:

$$A = 3,8 \text{ cm} * 3,8 \text{ cm} = 14,44 \text{ cm}^2$$

$$5 * EH = 5 * 2,13 \text{ cm} = 10,65 \text{ cm}$$

$$14,44 > 10,65$$

Al cumplirse la ecuación (15), se establece que el entrehierro presente en la herramienta magnética construida es de tipo corto, por lo tanto, para el cálculo de la reluctancia se procede de la siguiente manera:

$$A4 = (a + EH) * (b + EH) \text{ m}^2 \quad (16)$$

$$A4 = (0,038 + 0,0213) * (0,038 + 0,0213) \text{ m}^2$$

$$A4 = 0,00352 \text{ m}^2$$

Por último reemplazando el valor del área vista por el flujo en el entrehierro se realiza el cálculo de la reluctancia del entrehierro:

$$R_4 = \frac{l_4}{\mu_r * \mu_0 * A_4} \left[\frac{A \cdot v}{Wb} \right]$$

En donde:

$$\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} \left[\frac{H}{m} \right]$$

$$\mu_r = 1$$

$$l_4 = 0,0213 \left[m \right]$$

$$A_4 = 0,00352 \left[m^2 \right]$$

$$R_4 = 4,815 * 10^6 \left[\frac{A \cdot v}{Wb} \right]$$

Por lo tanto, el circuito magnético que representa el prototipo de la herramienta magnética se muestra a continuación y en base en los resultados calculados:

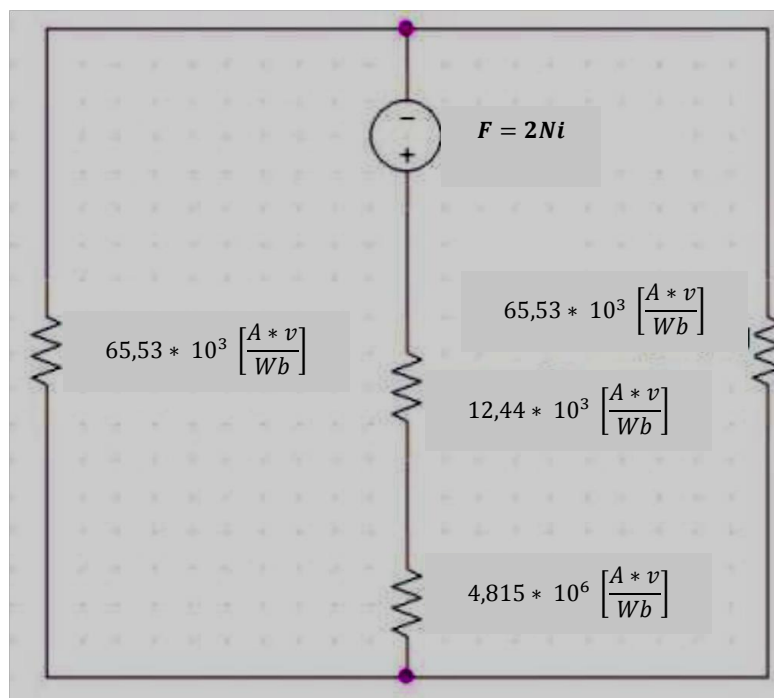


Figura 41: Circuito magnético de herramienta magnética construida. [62]

Para un mejor análisis del circuito resultante, se procede a realizar las reducciones necesarias de las reluctancias en serie y en paralelo presentes en el esquema, por lo que el circuito queda como se muestra a continuación (ver figura 42).

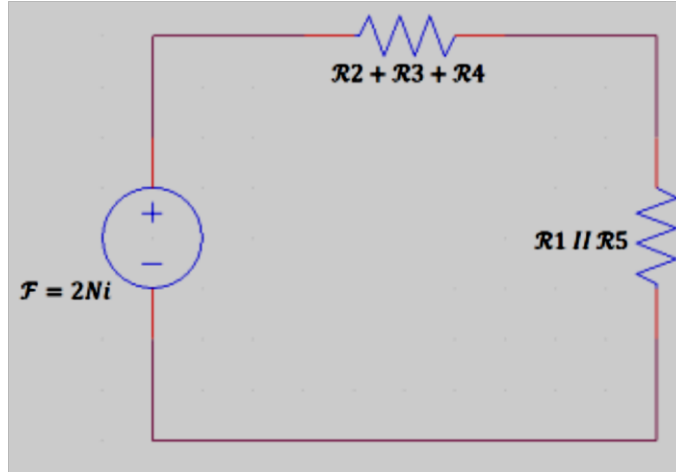


Figura 42: Circuito magnético resultante herramienta magnética construida. [62]

Quedando finalmente una sola reluctancia equivalente cuyo valor es el resultado de sumar el paralelo de la reluctancia $R1 // R5$ con la reluctancia equivalente de $R2 + R3 + R4$. Obteniendo así los siguientes resultados:

$$R1 // R5 = \frac{R1}{2} = \frac{R5}{2} = \frac{65,53 * 10^3}{2} \left[\frac{Av}{Wb} \right] = 32,76 * 10^3 \left[\frac{Av}{Wb} \right]$$

$$R2 + R3 + R4 = 6,22 * 10^3 + 6,22 * 10^3 + 4,815 * 10^6 = 4,83 * 10^6 \left[\frac{Av}{Wb} \right]$$

Por lo tanto:

$$R_{eq} = R2 + R3 + R4 + R1 // R5 = 32,76 * 10^3 + 4,83 * 10^6 = 4,86 * 10^6 \left[\frac{Av}{Wb} \right]$$

Ahora, teniendo en cuenta el circuito de la figura anterior, se puede deducir la ecuación de malla planteada a continuación:

$$F = 2Ni = \phi * (R2 + R3 + R4 + R1 // R5) \left[\frac{Av}{Wb} \right] \quad (17)$$

La fuerza magneto motriz inducida es el doble ya que se suman los efectos de cada una de las bobinas generadoras de campo, ya que se encuentran conectadas en polaridad aditiva, característica obtenida en la construcción de la herramienta, tal como se especifica en el siguiente capítulo.

De la anterior ecuación se puede despejar la corriente, obteniendo lo siguiente:

$$i = \frac{\phi * (R2 + R3 + R4 + R1 // R5)}{2N} \left[A \right] \quad (18)$$

Expresando el flujo como el producto de la densidad de campo magnético y el área transversal del núcleo se tiene:

$$i = \frac{B * A * (R2 + R3 + R4 + R1 // R5)}{2N} \quad [A] \quad (19)$$

Teniendo en cuenta que, los conductores pre-seleccionados para la construcción de la herramienta fueron el # 14, 16 y 18 AWG, esto, debido al espacio disponible en la columna central del núcleo. Se determinó el valor de la corriente necesaria para producir 400 mT en el punto central del entrehierro, magnitud objetivo establecida en la investigación para producir cambios en la reología de las muestras de crudo en estudio. A continuación en la tabla 21, se muestra los resultados obtenidos matemáticamente, teniendo en cuenta que el área transversal del núcleo es de $0,00352 \text{ m}^2$ y los valores de reluctancia encontrados son $R1 = R5 = 65,53 * 10^3 \left[\frac{A-v}{Wb} \right]$, $R2 = R3 = 6,22 * 10^3 \left[\frac{A-v}{Wb} \right]$ y $R4 = 4,815 * 10^6 \left[\frac{A-v}{Wb} \right]$.

Tabla 21: Corriente para generar 400 mT para diferentes calibres. [62]

AWG	VUELTAS	I NOMINAL [A]	I 400 [mT] [A]	% USO
14	220	21	16,1951	77,1
16	352	13	10,1219	77,9
18	533	8,1	6,6846	82,5

De acuerdo con la tabla 21, se observa que los conductores de calibre #14 y 16 AWG presentan un mayor rango de operación en la herramienta debido a que su porcentaje de utilización es de sólo el 78% aproximadamente, mientras que para el conductor #18 AWG se presenta una menor disponibilidad de trabajo debido a que su utilización es de 83%, estando más cerca del límite de conducción.

Partiendo de los anteriores resultados, se tomaron los valores de corriente hallados para generar una densidad de campo magnético de 400 mT, y se utilizaron para determinar los valores en el simulador y de esta manera encontrar el porcentaje de error entre los resultados matemáticos y los obtenidos a través de las simulaciones iniciales, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 22: Porcentaje de error entre cálculos matemáticos y simulación. [62]

CALIBRE [AWG]	VUELTAS POR BOBINA	I - 400 [mT] CALCULADA	DENSIDAD DE B EN SIMULADOR	% ERROR
14	220	16,1951	403	0,75%
16	352	10,1219	407	1,75%
18	533	6,6846	405	1,25%

Por los resultados obtenidos anteriormente (ver tabla 22), se puede observar la **validación** del software de simulación FEMM 4.2 debido a que se presenta un bajo porcentaje de diferencia entre los resultados matemáticos y los arrojados en la simulación del prototipo de la herramienta magnética.

4.7 Construcción de la herramienta magnética

Finalmente en el proceso de investigación se realizó la construcción del prototipo de la herramienta magnética de acuerdo con los resultados obtenidos en la etapa de simulación y cálculos matemáticos que determinaron las dimensiones y la geometría de la herramienta.

Se presentan los pasos llevados a cabo en la construcción de la herramienta magnética, teniendo en cuenta que se necesitan los siguientes materiales para el correcto ensamble y acople de cada una de las partes:

- ✓ Lámina tipo E de acero al silicio (E/114/75/38),
- ✓ Alambre de cobre esmaltado calibre #16 AWG,
- ✓ Barniz dieléctrico,
- ✓ Tornillos, tuercas, arandelas, brocha y llave de ajuste,
- ✓ Cartón Prespan¹² para formaleta,
- ✓ Cinta tipo aislante eléctrico Royal Diamont¹³,
- ✓ Máquina bobinadora,
- ✓ Prensa.

¹² **Cartón Prespan:** Material con capacidad de aislar térmicamente dos superficies en contacto.

¹³ **Aislante eléctrico Royal Diamont:** Material con la capacidad de aislar eléctricamente a las capas de conductores de cobre entre sí.

En el siguiente esquema de pasos se resume cada una de las etapas que componen la construcción del prototipo de la herramienta magnética, pasos que serán profundización a continuación (ver figura 43):



Figura 43: Esquema de construcción de herramienta magnética. Autor

Una vez aplicados los elementos de la metodología descrita en la figura 44, se termina la construcción del prototipo de la herramienta magnética objeto de la presente investigación, dando como resultado un elemento para el estudio de los efectos de un

tratamiento magnético en muestras de crudo de tipo parafínico. El prototipo construido se muestra a continuación (ver figura 44).



Figura 44: Prototipo de la herramienta magnética construido. [62]

Adicionalmente se hace énfasis en la necesidad de conectar ambos devanados generadores de campo en polaridad aditiva, de tal manera que los campos magnéticos inducidos sean mayores en el espacio del entrehierro, de otra forma la herramienta no estaría en capacidad de generar la densidad de campo requerida para producir cambios en la reología del crudo observados en el capítulo de las pruebas preliminares con campo magnético.

4.8 Pruebas de laboratorio a herramienta magnética

Con el fin de establecer los alcances logrados en la herramienta magnética construida, se procede a realizar las pruebas en laboratorio para poder medir la densidad de campo magnético generada y, adicionalmente compararla con los resultados arrojados en la simulación y en los cálculos del circuito magnético equivalente. De esta forma se procede a realizar el montaje del circuito mostrado en la figura 45.

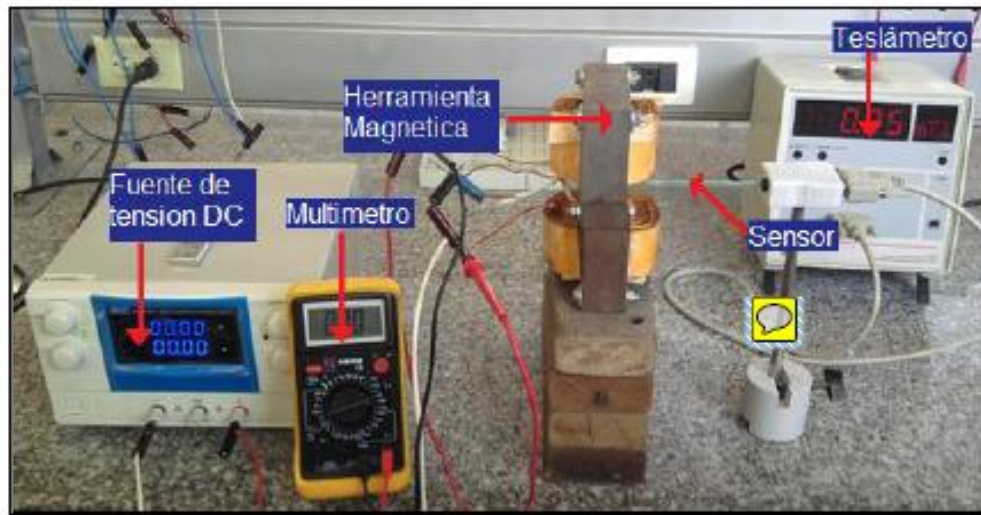


Figura 45: Circuito de prueba de herramienta magnética construida. [62]

Teniendo en cuenta que los elementos que componen el montaje son:

- **Multímetro marca FLUKE REF-175:** Instrumento implementado para la medición de la salida de la fuente de tensión regulada y de esta manera corroborar la corriente inyectada en la herramienta. Adicionalmente se implementó para la medición de la resistencia de los devanados generadores de campo ya que, debido al aumento de la temperatura la resistencia de los devanados tiende al aumento, disminuyendo así, la capacidad de generar flujo magnético.
- **Fuente regulada de tensión:** fuente de corriente utilizada para la alimentación de los devanados del prototipo. Para este caso en particular se implementó una herramienta marca MCP Laboratory Electronics M10-QS3020.
- **Medidor de densidad de campo magnético (Tm):** Elemento para medir la densidad de campo magnético generado por la herramienta. Para las pruebas de laboratorio se usó un medidor de marca UNIVERSAL MEASURING INSTRUMENT PHYSICS LD DIDACTICS, el cual cuenta con una sonda Hall tipo transversal con la que se puede tener acceso a la parte central del entrehierro en donde se encuentran las muestras de crudo del tratamiento.

- **Prototipo de herramienta magnética:** Elemento generador de campo magnético variable, a través del cual se pretende realizar el tratamiento a las muestras de crudo. El material del núcleo magnético es principalmente acero al silicio M-530A de grano no orientado.

Posteriormente se realizó la medición del campo generado por la herramienta construida en calibre #16 AWG para realizar una comparación con los resultados arrojados por la simulación, obteniendo del laboratorio los datos registrados en la tabla 23.

Tabla 23: Pruebas de laboratorio a herramienta magnética construida. [62]

TENSIÓN [V]	CORRIENTE [A]	B [mT]
1	0,47	15,6
2	0,95	31,1
3	1,42	46,3
...	...	...
28	12,3	396
29	12,6	400
30	12,88	407

Ahora, con el fin de realizar la comparación de los resultados obtenidos, en la tabla 24 se muestran los resultados obtenidos por simulación:

Tabla 24: Resultados de simulación de herramienta construida. [62]

DETALLE	VALOR
Densidad de Campo [mT]	429
Número de bobinas	2
Corriente en devanado [A]	13
Calibre Conductor Cobre [AWG]	16
Número de espiras por devanado 1	316
Número de espiras por devanado 2	316

Al comparar los resultados de simulación, en donde para una corriente de 13 A se espera una densidad de campo de 429 mT, con los datos obtenidos en las pruebas de laboratorio en donde, se genera una densidad de 407 mT para la misma corriente, se calcula un error de 5,1%.

De esta forma se da por finalizado el proceso de la construcción del prototipo de una herramienta magnética con la capacidad de generar una densidad de campo de 407 mT con un entrehierro máximo de 21,3 mm correspondiente al espacio generado por una tubería de ½", que se ha de implementar en la construcción del banco de pruebas en donde se realizarán los experimentos. Banco de pruebas que es explicado en el siguiente capítulo.

En el proceso de construcción del prototipo de una herramienta magnética se obtuvieron a los siguientes resultados:

- Se alcanzó el objetivo de diseñar y construir el prototipo de una herramienta magnética, que tiene la capacidad de generar 407 mT en la parte central de un entrehierro de 21,3 mm; teniendo en cuenta que en este punto, la magnitud de la densidad de flujo es la mínima, y debido a la geometría plana de la herramienta construida, se puede asumir una distribución de campo magnético constante, siempre y cuando se desprecie los efectos de borde del núcleo de la herramienta. Estas condiciones fueron logradas con una corriente en los devanados de campo de 13 A, dos bobinas de 316 vueltas, arrolladas con conductor de cobre calibre #16 AWG. Esta herramienta fue denominada H7.

- Al implementar con la herramienta magnética un banco de pruebas hecho a base de tuberías de acero inoxidable austenítico se presenta una atenuación de sólo 2,86% de la densidad de flujo generada, haciendo de este material una buena opción a la hora de implementar el prototipo.
- Disminuyendo los acoples de la herramienta magnética es posible aumentar el nivel de campo magnético generado. En pruebas realizadas se logró una densidad de campo de 1 [T] a una distancia de entrehierro de 3 mm.

5. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA HERRAMIENTA MAGNÉTICA.

A continuación se plantea las bases de diseño inicial del banco de pruebas escalado a nivel de laboratorio, las cuales se resume de la siguiente manera:

- Construir un banco de pruebas de disposición vertical de aproximadamente 3 metros largo y 2 metros de alto, con tres tramos paralelos permita la implementación de una herramienta magnética, una herramienta eléctrica o una combinación de las anteriores, que simule las condiciones de caudal de campo entre 0 y 300 barriles de crudo por día [BOPD] y temperatura de cara de la formación (40°C a 80 °C). Para que pueda circular 2000 cm³ de crudo liviano con una gravedad mayor a 31.1 °API.
- Obtener un registro de las variables: temperatura, presión, caudal, corriente y tensión por medio de sensores y transmisores de señales, que permita monitorear y estudiar el comportamiento del sistema.
- Implementar un control remoto de las variables del simulador (temperatura, caudal, corriente y tensión), con el fin de visualizar a través de una interfaz grafica didáctica que sea de fácil manejo para un usuario.

Partiendo de las bases de diseño especificadas anteriormente se dio lugar al primer diseño del banco de pruebas propuesto basado en el implementado en investigaciones anteriores por [4, 9]. Este diseño inicial fue modificado con el propósito de dar lugar al prototipo de una herramienta magnética. El resultado del diseño planteado se muestra a continuación (ver figura 46):

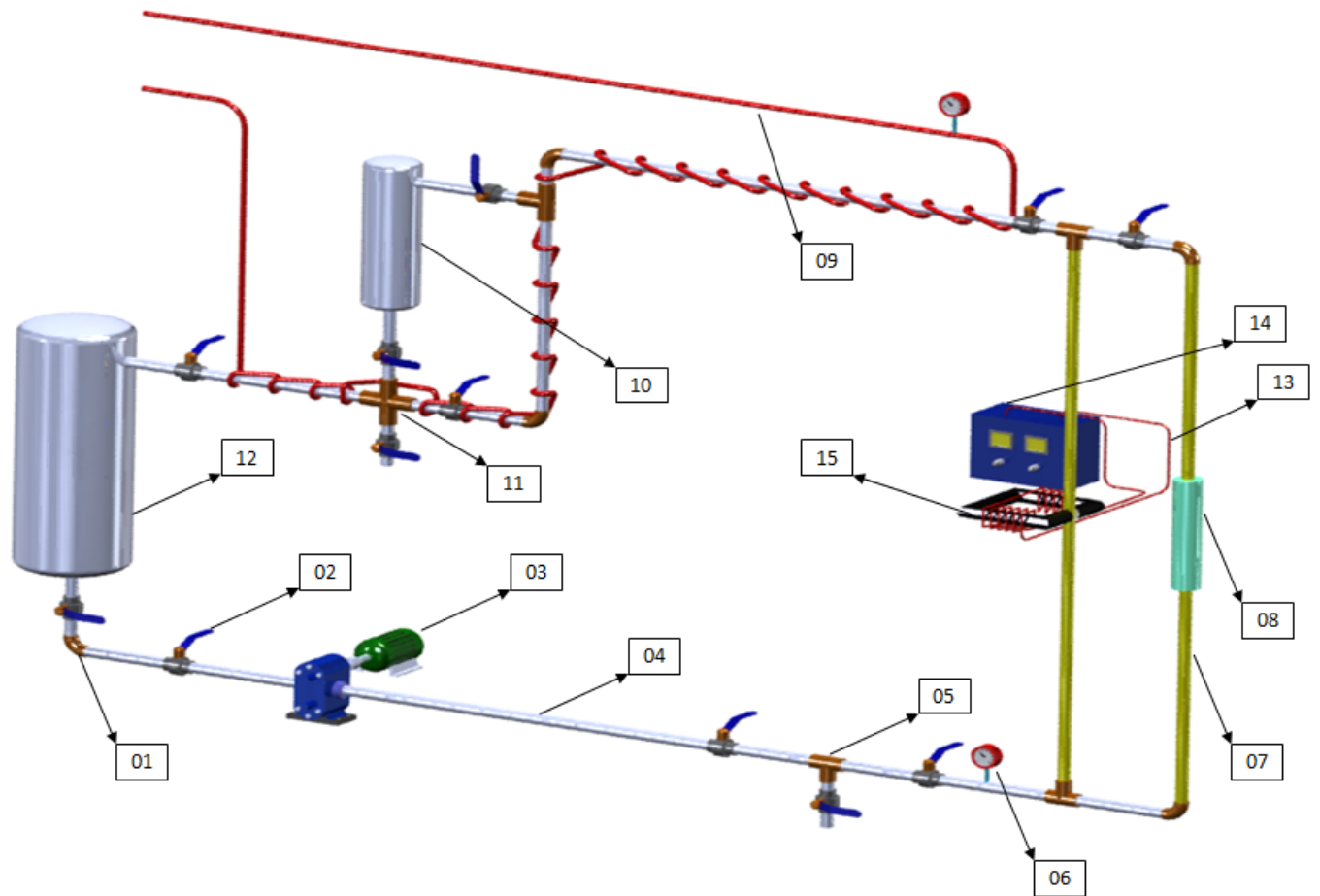


Figura 46: Esquema inicial de banco de pruebas para tratamiento magnético. Autor

5.1 Elementos del banco de pruebas

Cada una de las partes que componen el banco de pruebas se define con más detalles a continuación:

01. Codo para Cambio de dirección en tubería

Este es un elemento que permite el cambio de dirección al fluido a través de las tuberías del montaje.



Figura 47: Ilustración de un codo de tubería de acero.

Fuente: <http://www.directindustry.es>

02. Válvula tipo bola (llave de apertura y cierre)

La válvula de tipo bola o también conocida como válvula de tipo esfera es un mecanismo de llave de paso que contiene una esfera perforada con capacidad de giro de 90° permitiendo el paso o la obstrucción de una sustancia canalizada en tubería. Para su operación se acciona un eje que está conectado mecánicamente con una esfera perforada, de tal forma que se deja pasar el fluido de la tubería si la perforación se alinea con la tubería de transporte, mientras que se interrumpe el flujo cuando el eje de la esfera se encuentra perpendicular al eje axial de la tubería de transporte. Un ejemplo de válvula de bola se presenta a continuación:

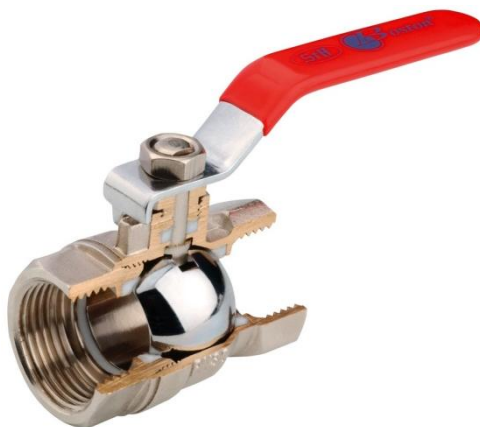


Figura 48: Ilustración de válvula tipo bola.

Fuente: <http://www.esacademic.com>

03. Bomba de desplazamiento positivo

La bomba de desplazamiento positivo o volumétrica, en la que el principio de funcionamiento está basado en la hidrostática, de modo que el aumento de presión se realiza por el empuje de las paredes de las cámaras que varían su volumen. En este tipo de bombas, en cada ciclo el órgano propulsor genera de manera positiva un volumen dado o cilindrada, por lo que también se denominan bombas volumétricas. En caso de poder variar el volumen máximo de la cilindrada se habla de bombas de volumen variable. Si ese volumen no se puede variar, entonces se dice que la bomba es de volumen fijo. A su vez este tipo de bombas pueden subdividirse en:

1. Bombas de émbolo alternativo, en las que existe uno o varios compartimentos fijos, pero de volumen variable, por la acción de un émbolo o de una membrana. En estas máquinas, el movimiento del fluido es discontinuo y los procesos de carga y descarga se realizan por válvulas que abren y cierran alternativamente. Algunos ejemplos de este tipo de bombas son la bomba alternativa de pistón, la bomba rotativa de pistones o la bomba pistones de accionamiento axial.
2. Bombas volumétricas rotativas o roto-estáticas, en las que una masa fluida es confinada en uno o varios compartimentos que se desplazan desde la zona de entrada (de baja presión) hasta la zona de salida (de alta presión) de la máquina. Algunos ejemplos de este tipo de máquinas son la bomba de paletas, la bomba de lóbulos, la bomba de engranajes, la bomba de tornillo o la bomba peristáltica.



Figura 49: Ilustración de bomba de desplazamiento positivo.

Fuente: <http://www.equigascr.com>

Este tipo de bomba se diferencia principalmente de las tipo centrifugas debido a que pueden manejar sin problemas fluidos muy viscosos y mantener una eficiencia relativamente buena en cambio las centrifugas disminuyen el rendimiento manejando este tipo de fluidos, los cuales se van a implementar en el desarrollo de los experimentos de la herramienta magnética en el “Loop” de prueba.

04. Tubería acero al carbono

Material en el que se encuentran el 90% de la producción mundial de acero. Al aumentar el contenido de carbono en el acero se incrementa su resistencia a la tracción, incrementa el índice de fragilidad en frío y hace que disminuya la tenacidad y la ductibilidad. En estos aceros son importantes ciertas propiedades de orden mecánico, como la resistencia a la fatiga y al alargamiento, la resistencia a la tracción y la tenacidad; estas propiedades dependen del grado de carbono y otros aleantes presentes.

05. Tubería de conexión tipo “T”

Este es un elemento que permite el cambio de dirección al fluido a través de las tuberías del montaje, así como también el desagüe del fluido dentro del “loop”.



Figura 50: Ilustración de tubería de conexión tipo “T”.

Fuente: <http://www.directindustry.es>

06. Termómetro

Es un elemento utilizado para medir la temperatura, en este caso la del crudo que ha de ser calentado a través de un cable de cobre flexible con el propósito de simular las condiciones de temperatura del crudo en la cara de la formación, punto en el cual no se han presentado precipitaciones de parafinas considerables. Por lo tanto, se considera como el lugar en donde se ha de implementar el tratamiento magnético.



Figura 51: Sensor y transmisor de temperatura.

Fuente: <http://www.directindustry.es>

07. Tubería acero inoxidable

En la industria metalurgia el acero inoxidable es el resultado de una aleación del hierro con el cromo en una proporción mínimamente del 10% contenido en masa. Este tipo de material es resistente a la corrosión debido a que posee gran afinidad por el oxígeno y reacciona con este mismo formando una capa que hace más lento el proceso de oxidación. Exteriormente éste es un material brillante y altamente resistente a la suciedad y a la corrosión.

08. Prototipo de herramienta magnética

En el presente proyecto se construyó el prototipo de una herramienta magnética para inhibir la precipitación de parafinas en muestras de crudo de los pozos del Campo Escuela-Colorado. Este prototipo será implementado en el banco de pruebas para observar su desempeño y el efecto logrado en las muestras de crudo tratadas. (Figura 52)



Figura 52: Prototipo de herramienta magnética. Autor.

09. Generador de vapor/conductor de cobre flexible/consigna temperatura

Sirve para el calentamiento, el crudo a la temperatura de aplicación del tratamiento magnético en la cara de la formación. Dicha temperatura oscila alrededor de 104°F. Este conductor de cobre flexible se encargará del transporte del vapor de agua que se usará para aumentar la temperatura a las muestras de crudo.

Este método se realiza con un generador de vapor, el dispositivo que transforma la energía química en energía térmica. Para este caso se genera vapor de agua, con

energía suficiente para llevar la temperatura del crudo a un nivel superior del punto de nube.

Otro método con el cual se llega a la consigna de la temperatura necesaria para la aplicación del tratamiento es a través de una resistencia de calentamiento, por medio de la cual se pueda irradiar calor a la muestra.

10. Tanque de almacenamiento de crudo (5 L)

Tanque fabricado en acero al carbono con capacidad para contener 5 litros de crudo. Este recipiente tiene como función almacenar el hidrocarburo que ya ha sido tratado magnéticamente al cual se le han de realizar las pruebas de punto de fluidez para verificar la efectividad del método.

11. Tubería de conexión tipo “cruz”

Este elemento permite el cambio de dirección al fluido a través de las tuberías del montaje, así como también el desagüe del fluido dentro del “Loop”.



Figura 53 : Tubería de conexión tipo cruz.

Fuente: <http://es.made-in-china.com>

12. Tanque de almacenamiento de crudo (10 L)

Tanque fabricado en acero al carbono con capacidad para contener 10 litros de crudo. Este recipiente tiene como función almacenar el hidrocarburo que ya ha sido tratado magnéticamente al cual se le han de realizar las pruebas de punto de fluidez para verificar la efectividad del método.

13. Conductor de Cobre THHN # 16 AWG

Elemento utilizado para el transporte de la corriente eléctrica que ha de generar el campo magnético para el tratamiento de las muestras de crudo.

14. Fuente regulada de tensión

Es el dispositivo que se usará para alimentar con corriente continua los devanados en los que se ha de generar el campo magnético en el tratamiento. El rango de valores que se implementará para los experimentos en el banco de prueba va de 0 a 20 A.



Figura 54: Fuente regulada de tensión.

Fuente: <http://es.made-in-china.com>

15. Circuito ferromagnético

Es el camino de baja reluctancia por donde ha de circular el flujo magnético antes de atravesar la tubería de acero inoxidable (la cual es de alta reluctancia para evitar fugas de líneas de flujo en el tratamiento).

5.2 Descripción técnica del banco de pruebas

El banco de pruebas se utiliza para simular las condiciones de extracción de los pozos de crudo, este sistema consta de un tanque principal de almacenamiento, con capacidad de carga de 10 litros de volumen, en este tanque se efectuará el calentamiento por medio de un cabezal de inmersión con rangos de temperatura entre 25 °C (temperatura ambiente) a 80°C (máxima temperatura designada a simular). Seguido a este tanque una bomba centrífuga de 1 hp impulsará el fluido a través del sistema.

La línea de tubería subsecuente a la bomba es el área de sensores, en ella se ubica: sensor de presión, swith de presión, sensor de flujo y sensor de temperatura, la ubicación de estos elementos permite tomar los datos eficaces para establecer los lazos de control necesarios para efectuar una correcta simulación manteniendo la ergonomía del diseño. El tramo de tubería intercambiable, ubicado después de la línea de sensores, permite usar este banco con el propósito de probar una variedad de prototipos, con un largo aproximado de 1000 mm y una base rígida es apta para sostener más de 50 kg de peso, a disposición del investigador.

En el último tramo se ubica una válvula de globo controlada, esta contribuye al control en el caudal del sistema, efectuando cambios más precisos y rápidos en la variación del caudal, y seguido a esto se encuentra el tanque de descarga. Este almacena el crudo expuesto al prototipo de investigación, para que se puedan realizar las pruebas pertinentes.

Anexo a esta estructura física, se asigna un módulo de control, que contiene: PLC protecciones, variador de velocidad, y interface de manejo.

Teniendo en cuenta la filosofía básica de operación del banco de pruebas se procede a la construcción del diagrama de tuberías y proceso mostrado a continuación (figura 55):

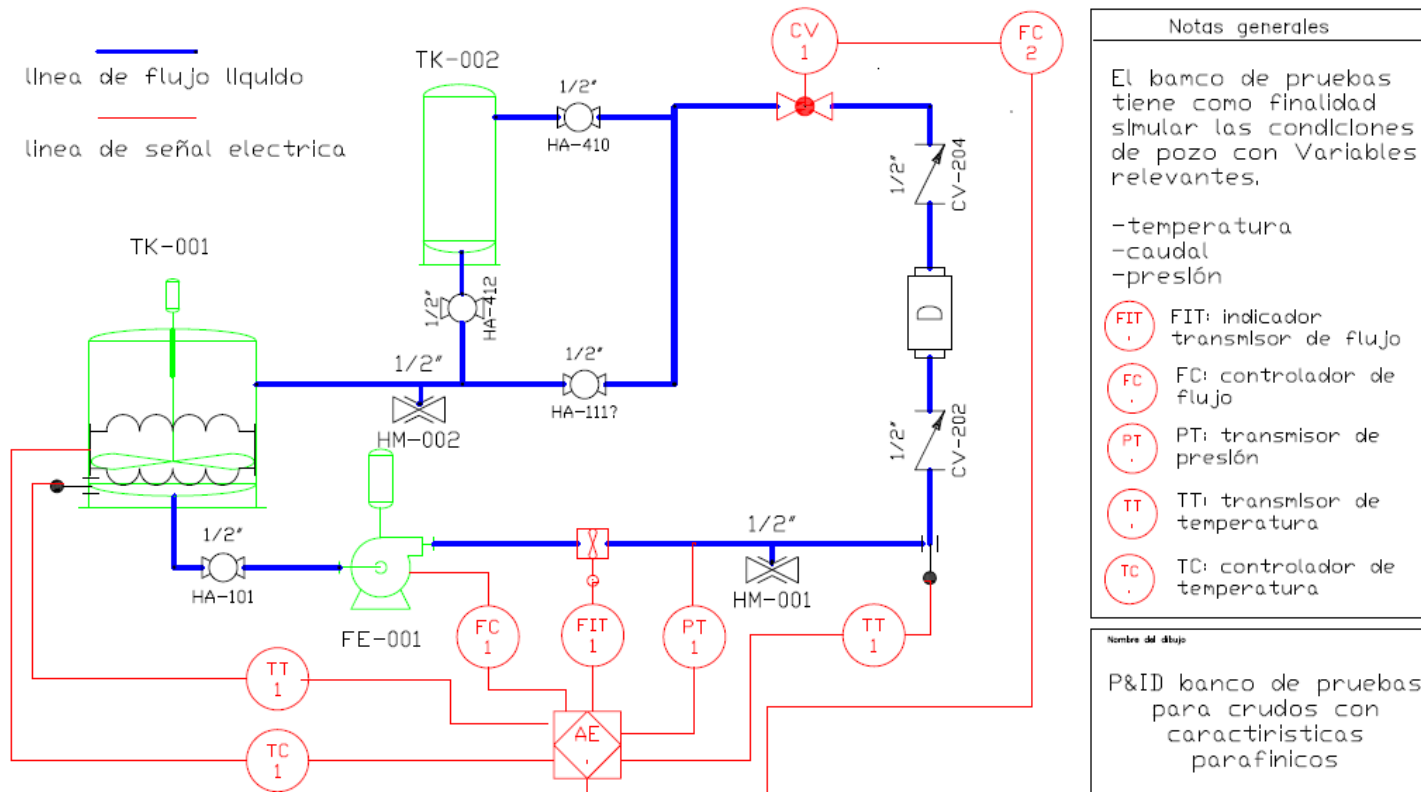


Figura 55: Diagrama de tuberías y procesos de banco de pruebas. Autor

Con la intención de mejorar el diseño original se realizaron cambios al simulador propuesto anteriormente, teniendo en cuenta que es de vital importancia:

- El óptimo aislamiento térmico.
- Construcción de elementos intrínsecamente seguros.
- Practicidad para realizar experimentos en laboratorio, en donde se cuenta con poco espacio disponible.
- Construcción bajo normas API y criterios de seguridad que hagan manipulable al simulador de manera segura.

A partir de los anteriores requerimientos generados en el desarrollo de la investigación, se plantea el nuevo diseño del banco de pruebas, donde se pretende implementar el prototipo de la herramienta magnética construida. A continuación se muestra el diseño final construido (ver figuras 56, 57, 58):

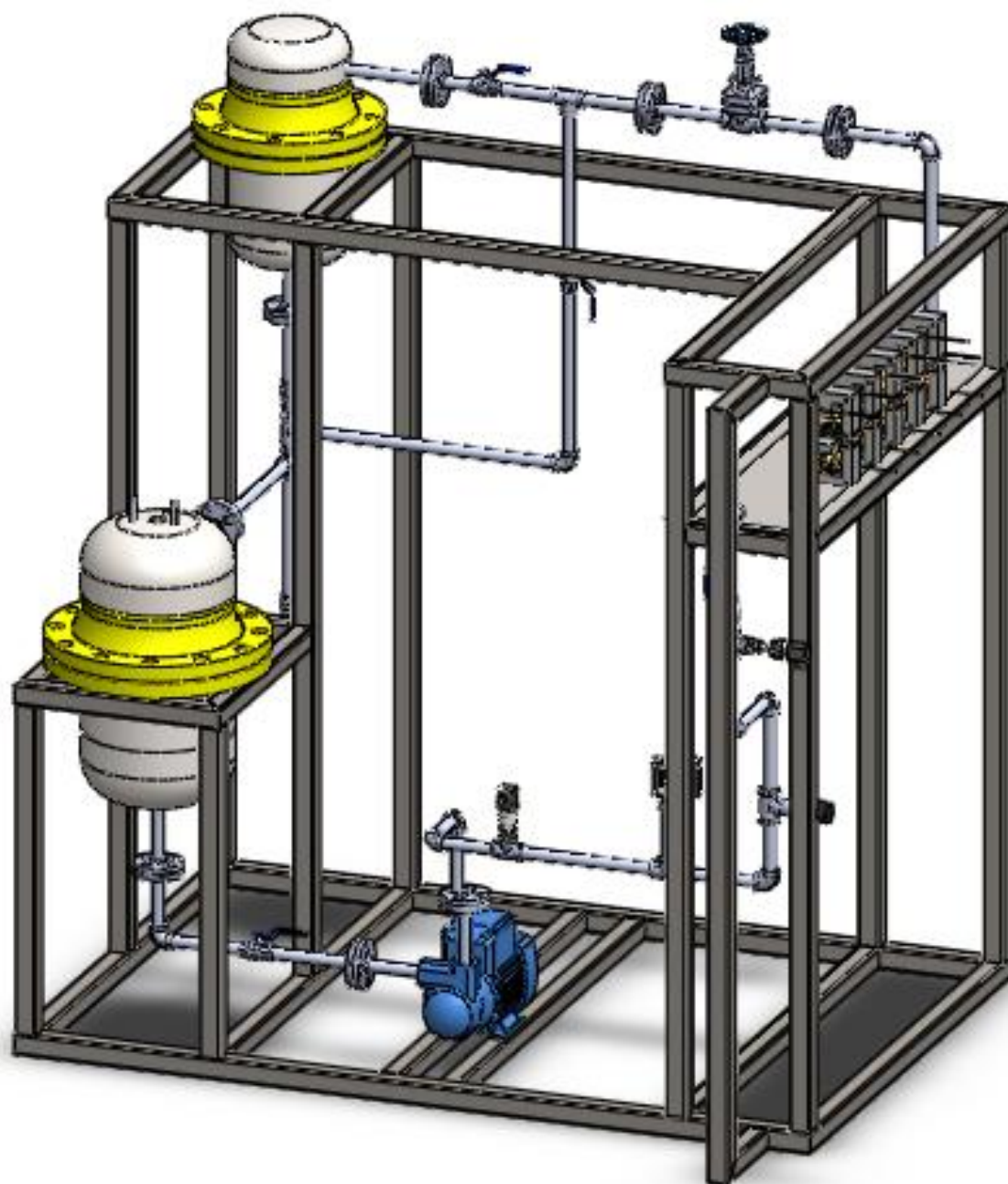


Figura 56: Esquema general de banco de pruebas construido. Autor.

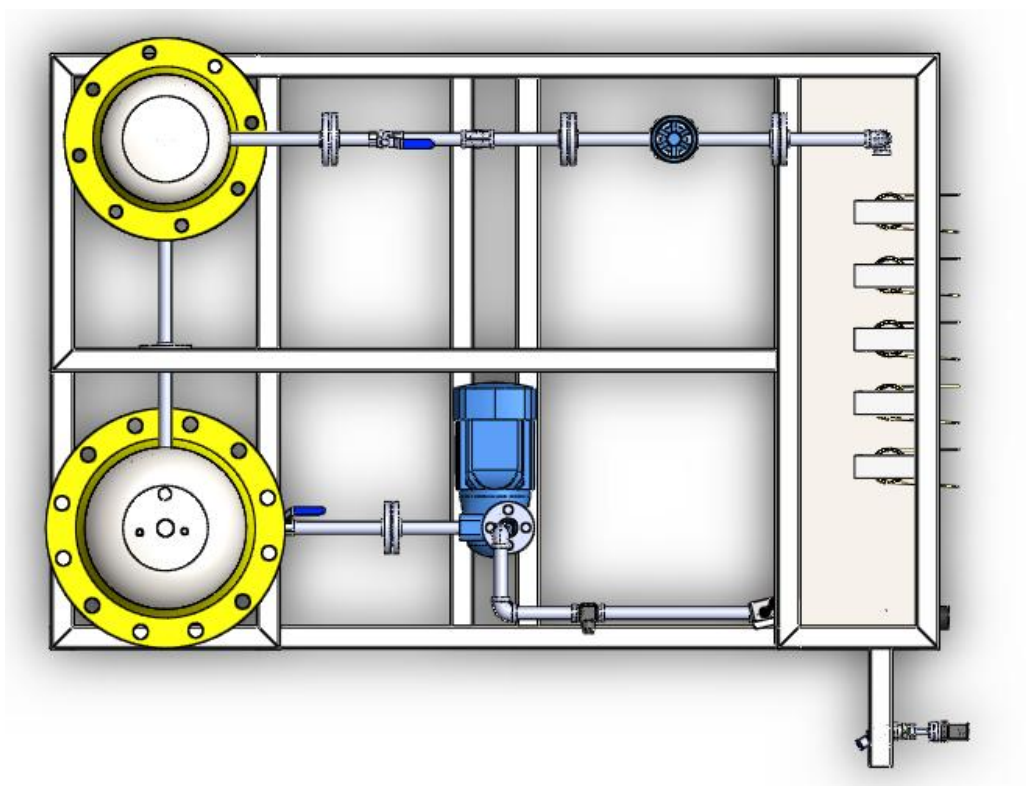


Figura 57: Vista superior de banco de pruebas construido. Autor.

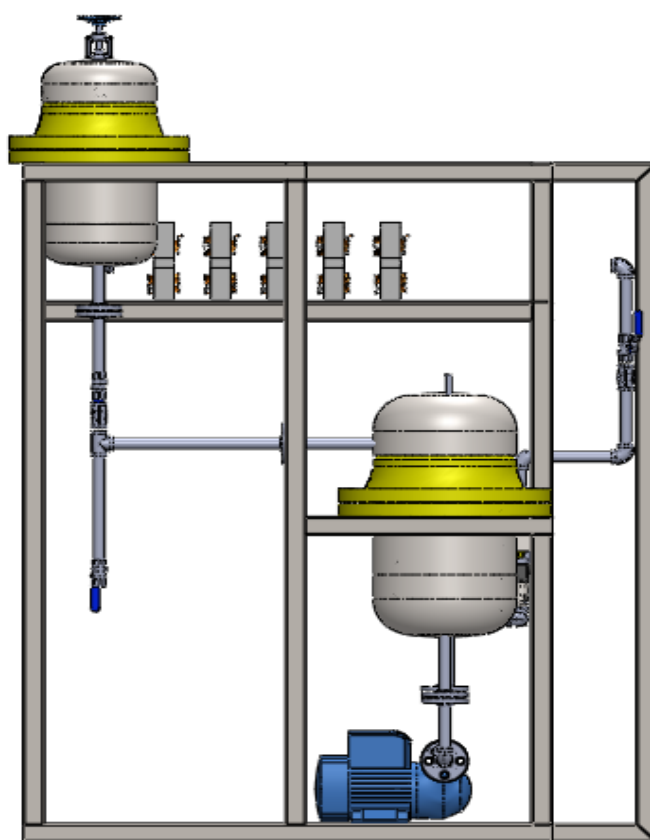


Figura 58: Vista lateral de banco de pruebas construido. Autor.

5.3 Estructura de soporte mecánico

La estructura de soporte mecánico externa, está diseñada para que las líneas de tuberías no se vean afectadas mecánicamente por cargas soportadas por errores en la operación del banco. Adicionalmente esta estructura es la que sirve de soporte para los diferentes elementos que componen el banco de pruebas. Las dimensiones requeridas en los soportes mecánicos, las cuales se encuentran en [mm], se muestran a continuación (ver figura 59):

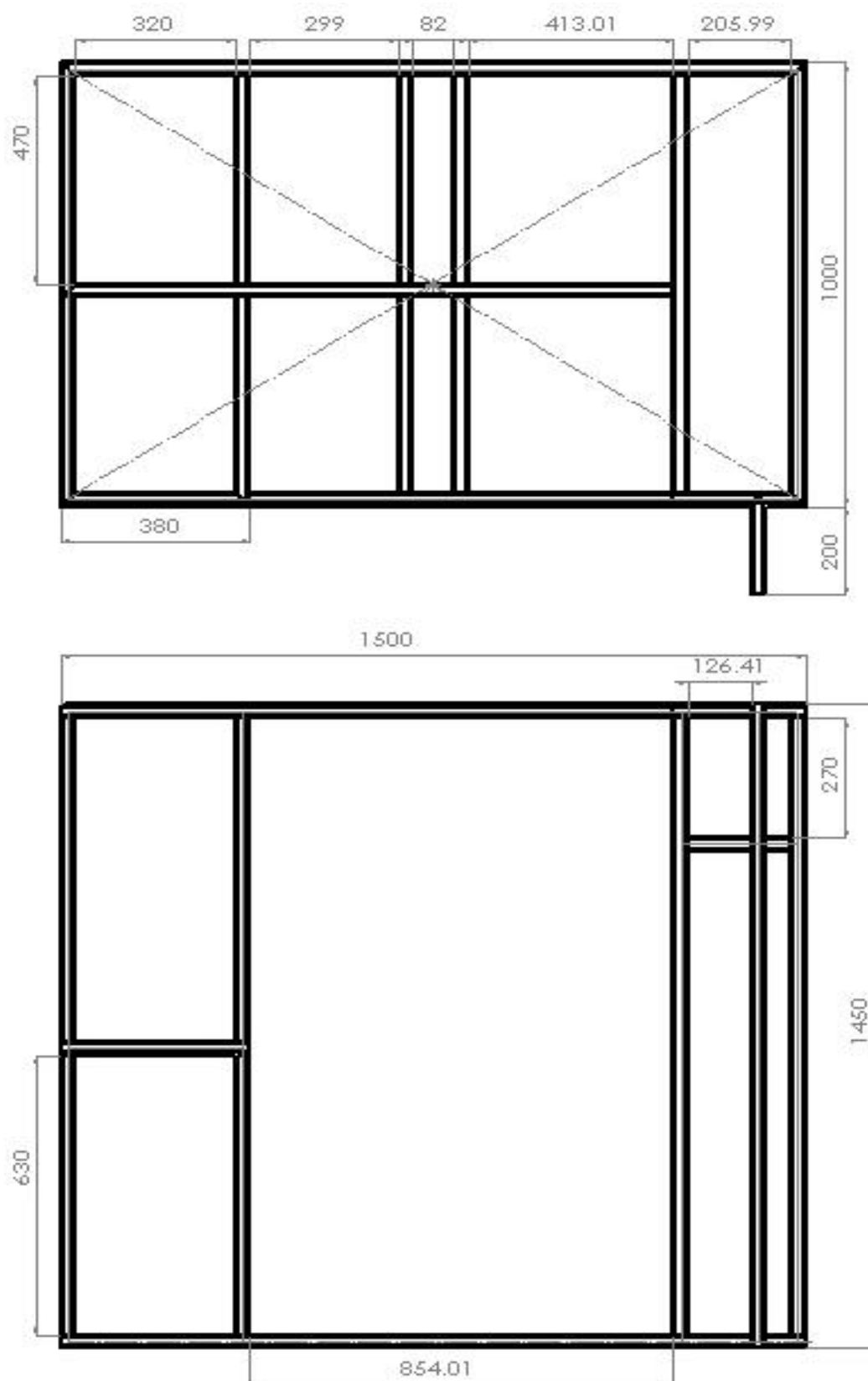


Figura 59: Dimensiones de la estructura de soporte mecánico del banco. Autor.

5.4 Selección de tubería de transporte de crudo

Debido a las características de operación de las tuberías de transporte de crudo, es necesaria la implementación de materiales con considerables capacidades de soportar altas temperaturas y presiones de fondo de pozo. Es por esto que el acero inoxidable es un material usado en grandes proporciones en la industria del petróleo para el transporte de hidrocarburos en proceso de extracción, ya que ofrece una alta resistencia a condiciones extremas de trabajo y corrosión. A su vez el acero inoxidable se divide en varias familias las cuales se describen a continuación:

Acero inoxidable martensítico: sus principales características son:

- Moderada resistencia a la corrosión,
- Capaces de desarrollar altos niveles de resistencia mecánica debido al tratamiento magnético recibido en su fabricación,
- Son de características magnéticas, es decir, en presencia de un campo magnético las líneas de flujo se desvían por la tubería sin llegar a las muestras que se están transportando,
- Poca capacidad para realizar soldaduras debido al alto contenido de carbono en sus estructuras atómicas.

Acero inoxidable ferrítico: este material ofrece características muy estables desde el punto de vista mecánico desde temperatura ambiente hasta la temperatura de fusión del material, sus principales características son:

- Buena resistencia a la corrosión, la cual puede ser incrementada en la medida en que se adiciona al compuesto del acero partículas de cromo, y algunas aleaciones a base de molibdeno,
- Son de características magnéticas, es decir, en presencia de un campo magnético las líneas de flujo se desvían por la tubería sin llegar a las muestras que se están transportando,
- Incapacidad de ser endurecidos por tratamiento térmico,
- Poca capacidad para realizar soldaduras debido al alto contenido de carbono en sus estructuras atómicas,
- Es de uso limitado debido a su característica de baja dureza.

Acero inoxidable austenítico: este tipo de acero abarca la mayoría de las aleaciones existentes en el mercado, debido a alta capacidad de resistencia a la corrosión y su característica no magnética, es decir, en presencia de un campo magnético deja traspasar las líneas de flujo a las sustancias transportadas. Sus características más relevantes son:

- Alta resistencia a la corrosión en ambientes de operación agresivos para el material,
- Fabricado con tratamiento de endurecimiento de trabajo en frío,
- Alta capacidad para la soldadura,
- Operación eficiente a altas temperaturas,
- Son de características no magnética, es decir, en presencia de un tratamiento magnético deja fluir las líneas de flujo a las sustancias tratadas.

Esta familia se divide en dos categorías:

- SERIE 200 AISI¹⁴: Aleaciones cromo – magnesio – nitrógeno,
- SERIE 300 AISI: Aleaciones cromo – níquel.

Debido a los materiales descritos anteriormente presentes en el mercado del acero inoxidable, se recomienda para la elaboración de las líneas de tubería del banco de pruebas, la implementación del acero inoxidable austenítico de las SERIE 200 y 300 debido a su alta resistencia a la corrosión en ambientes de operación agresivos para el material y adicionalmente por su característica no magnética, haciendo posible la aplicación de líneas de flujo magnético a las muestras de crudo sometidas al tratamiento.

5.5 Dimensiones finales del banco de pruebas

Con la intención de tener en cuenta los conceptos de flexibilidad, mantenibilidad, operatividad y ensamblabilidad en el diseño del banco de pruebas, se establecieron las dimensiones y el peso mostrados en la tabla 25.

¹⁴ AISI: acrónimo en inglés de *American Iron and Steel Institute* (Instituto Americano del hierro y el acero).

Tabla 25: Dimensiones y peso de banco de pruebas construido

DIMENSIÓN	LONGITUD [mm]	PESO [kg]
Largo	1500	300
Ancho	1000	
Alto	1400	

Adicionalmente en el banco de pruebas se cuenta con elementos que lo componen, los cuales son nombrados y cuantificados a continuación:

- ☐ Tanque 1: 10 (L).
- ☐ Tanque 2: 5 (L)
- ☐ 6 tramos de Tubería en acero al carbono de ½'
- ☐ 1 tramo de tubería en acero inoxidable de ½'
- ☐ 1 motobomba centrífuga de 1 Hp
- ☐ 1 sensor de presión
- ☐ 1 swicth de presión
- ☐ 1 sensor de flujo de paleta rotativa
- ☐ 1 sensor de temperatura PT 1000
- ☐ 1 válvula de globo
- ☐ 11 codos de ½"

Debido a las características de temperatura de operación del medidor de flujo rotativo de paletas, el cual es de material polimérico, las capacidades de temperatura y caudal quedan restringidas a:

- ☐ Temperatura de operación del banco: de 25 a 70 °C
- ☐ Caudales de simulación de campo: de 0 a 300 BOPD

Por último, se debe tener en cuenta que las necesidades de alimentación para el funcionamiento del banco de prueba son en corriente alterna, con frecuencia de 60 Hz en la red y con una tensión de alimentación en baja tensión de 120 y 208 V para el funcionamiento de cada una de las partes, que lo componen.

Finalmente se muestra el banco de prueba construido con sus dimensiones (ver figura 60, 61, 62):

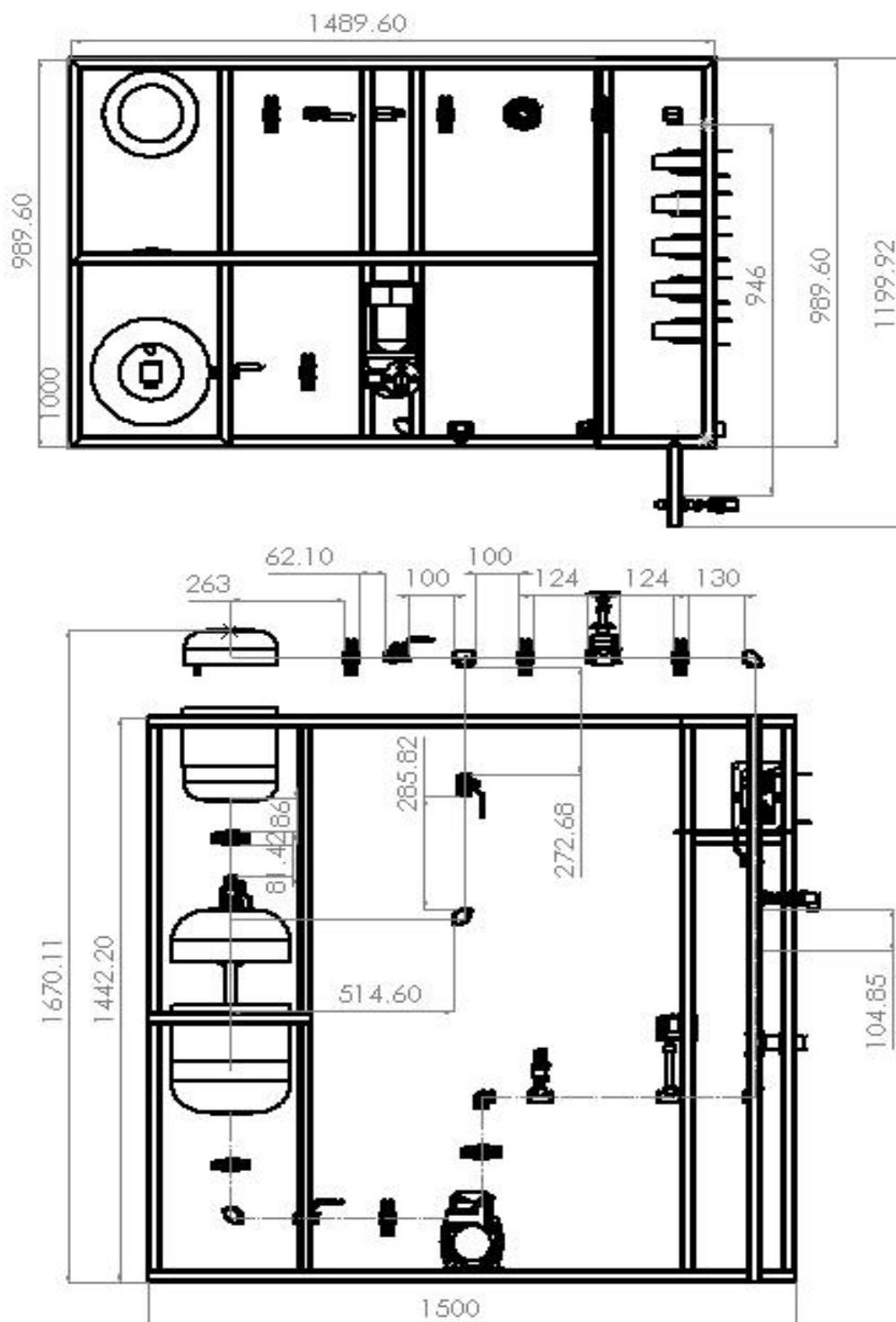


Figura 60: Dimensiones de banco de pruebas de experimentación. Autor.



Figura 61: Vista frontal de banco de pruebas construido. Autor.



Figura 62: Vista frontal 2 referenciada de banco de pruebas construido. Autor.

En el proceso del diseño y la construcción del banco de pruebas para la implementación de la herramienta magnética se obtuvieron los siguientes resultados:

- Se construyó un banco de pruebas que tiene la capacidad de simular a presión atmosférica, las condiciones de fondo de pozo. De esta manera, se puede llegar a simular un caudal variable dentro del rango de [0-300] [BOPD] en campo o [0-120] cm^3 en el simulador. Cuenta así mismo con la capacidad de variar la temperatura en un rango de [25-80] °C a través de una resistencia de calentamiento que se puede controlar.
- Se cuenta con los sensores y equipos necesarios para realizar el monitoreo y el control de las variables experimentales en el estudio de los efectos de un tratamiento en muestras de crudo parafínico. Ver tabla 26.

Tabla 26: Dimensiones y peso de banco de pruebas construido

ELEMENTO BANCO DE PRUEBA	CARACTERÍSTICAS GENERALES
Sensor de temperatura 1	Control digital de temperatura marca WATLOW. Rango de 0 a 200°C
Sensor de temperatura 2	Sensor + Transmisor de temperatura MBT 3560 con rango de 0 a 200°C Tipo PT1000 Clase B. Material de acero Inoxidable 316. Bulbo de 2" - 50 mm
Sensor de presión	Sensor y transmisor de presión con precisión de +/- 1% con rango de trabajo de temperatura 25 a 85 °C. IP65. Salida de señal de 4-20 mA con sobrecarga máxima de presión de 60 bar
Presostato	Presostato KPI marca DANFFOS implementado en sistemas de regulación, monitorización y alarma de equipo industrial como los del banco de pruebas. Temp de operación de -40 a 149 °F. Diferencial de operación 0,40 a 1,50 bar. Grado IP30, Presión de trabajo máxima 18,0 bar.

Sensor de flujo	Medidor de flujo tipo Paleta Rotativa con indicador, adaptación de 1/2 a 36". Capacidad de sensado caudal de 0,1 a 6 m/s. Transistor colector abierto de 49 Hz. Marca: GFSIGNET
Sensor de tensión	Multímetro de 0 a 1000 [V] Marca FLUKE-175.
Sensor de corriente	Pinza de 400 AC/600DC Marca FLUKE-321.
Variador de frecuencia	Convertidor de frecuencia de aplicación general que permite controlar el motor de CA del banco de pruebas. Potencia 2Hp. REF.: 132F 0005
Agitador mecánico	Adaptación de motor eléctrico en tanque de inicio de proceso (TK1) de baja potencia
Autómata de control	PLC. Element compact Logix packaged Ether Controller, 512 Kbyte Memory, 16 DI, 16 DO, 4HSC. 24VDC. REF.: 20CX1769-L23EQFC1B. Marca: ALLEN BRADLEY.
Generador corriente de campo	Fuente digital regulada de tensión de 0-20 A y 0-30 V variables. REF.: M10-QS3020
Resistencia eléctrica	Resistencia tubular en espiral en inloly para inmersión en crudo de diámetro 0,4375" con terminales rectos y rosca de montaje. Potencia 4000 W. Tensión de alimentación 220 V
Motobomba de circulación	Elemento motriz de caudal, cuerpo de bomba en hierro fundido, tapa del cuerpo en acero inoxidable AISI 304. Motor eléctrico de tipo asíncrono de elevado

	rendimiento, ventilación externa. Alimentación de tensión en 120/208 V. ½ Hp. Protección IP44.
--	---

6. CONCLUSIONES

En este capítulo se presentan las principales conclusiones y observaciones:

- Se encontró que los efectos de un campo magnético en las muestras de crudo del Campo Escuela Colorado dependen de las características particulares de cada pozo, es decir, que los rendimientos del tratamiento magnético están relacionados con aquellas componentes externas, variables y particulares de cada pozo (hasta ahora no establecidas), que polarizan las muestras afectadas por la líneas de flujo en el tratamiento.
- Los porcentajes de parafina en las muestras tratadas no es un factor que mejore la movilidad del crudo después del tratamiento, esto se observa a través de los resultados obtenidos en Colorado 36 y Colorado 25, pozos en los cuales después de ser modificados con parafina sólida en 2 y 10% (p/p) disminuyeron la tasa de flujo másico después de ser aplicado el tratamiento magnético.
- De acuerdo con la revisión del estado del arte, en la actualidad no se tiene un consenso acerca de los mecanismos físicos y químicos que describen las causas, que determinan el aumento o la disminución de la viscosidad y el punto de nube en muestras tratadas con campos eléctricos y magnéticos. Por tal motivo, es necesario realizar un estudio previo de factibilidad, con el que se pueda determinar la viabilidad de la aplicación de campos magnéticos y eléctricos, como método para inhibir la precipitación de parafinas en muestras de crudo.
- Un tratamiento magnético aplicado en muestras de crudo del pozo Colorado 25 de Campo Escuela Colorado es viable para reducir las precipitaciones de ceras tipo parafina, esto se concluye teniendo en cuenta los resultados obtenidos, en los cuales se redujo en 7,46°C el punto de nube, lo que se traduce como un retardo en el proceso de cristalización de las ceras, resultado que concuerda con los obtenidos en investigaciones anteriores.
- Un tratamiento magnético no es favorable para mejorar la movilidad del crudo del pozo Colorado 36, esto se puede concluir a partir de los resultados obtenidos, en donde, el tratamiento para unos casos no alteró la movilidad del crudo y en otros, disminuyó el flujo másico en el recorrido de las muestras a través de un acrílico de pruebas.

- La orientación de las líneas de campo magnético no fueron significativas en las muestras de crudo tratadas, por lo tanto no se pudo determinar para esta clase de tratamiento, la disposición óptima de flujo que permita obtener los mejores resultados.
- De forma contraria a lo ocurrido en las pruebas anteriores, para un campo eléctrico, la orientación, la intensidad de campo y el tiempo de exposición, son factores que determinan los resultados que se pueden obtener en la tasa de flujo de muestras de crudo tratadas. En esta investigación se obtuvo una reducción de aproximadamente 30% del flujo másico cuando la dirección del campo es paralela al flujo de crudo, aunque es necesario aclarar que para la aplicación de este tratamiento de manera paralela a la dirección del flujo conlleva a invadir la tubería, obstruyendo el paso del crudo, es decir, disminuyendo el caudal de extracción.
- El efecto de un tratamiento eléctrico en muestras de crudo del Campo Escuela Colorado es disminuir el flujo másico y aumentar la viscosidad, por lo tanto, no es una alternativa viable para ser aplicada en campo, al menos para los pozos Colorado 36 y Colorado 67, objeto de estudio en esta parte de la investigación, esto se debe a que el tratamiento acelera los mecanismos de precipitación de parafina.
- Los efectos obtenidos a través de un tratamiento eléctrico no son de tipo permanentes, es decir, el aumento de la viscosidad se pierde en un intervalo de tiempo de 4 a 6 horas, tiempo después del cual la viscosidad retornó a su valor inicial. Conclusión que concuerda con la tendencia de los resultados obtenidos por otros autores.
- Por otro lado, en pruebas realizadas sobre emulsiones de agua en crudo se pudo determinar que para el tratamiento con campo eléctrico, el aumento del porcentaje de agua (10% v/v) aumenta la efectividad del tratamiento, es decir, mejora la movilidad de las emulsiones tratadas. Caso contrario a los resultados del tratamiento sobre muestras deshidratadas, en donde se presentó una reducción de la movilidad de las muestras, después de la aplicación de campos eléctricos. Lo anterior sirve para concluir que el tratamiento es viable cuando se aplica sobre muestras de crudo con altas concentraciones de agua (>5%).
- El software FEMM 4.2, es una herramienta útil para realizar la simulación del comportamiento de un prototipo magnético para inhibir la precipitación de ceras

parafrías, teniendo en cuenta la validación realizada a través de los cálculos matemáticos, y las mediciones hechas en laboratorio en el núcleo construido.

- Se construyó el prototipo de una herramienta magnética con 316 vueltas por devanado en calibre #16 AWG, formada a partir de láminas de acero al silicio de grano no orientado tipo E/114/75/38, con la capacidad de generar 407 mT en un entrehierro de 21,3 mm; con el fin de ser instalado sobre un banco de pruebas que pueda simular las condiciones de fondo de pozo a presión de superficie (atmosférica).
- La efectividad de la herramienta magnética depende del material utilizado en el transporte de las muestras de crudo, ya que si éste último es de tipo ferromagnético, no se puede garantizar la densidad de campo magnético necesaria para producir los cambios reológicos obtenidos en las pruebas preliminares realizadas.

7. RECOMENDACIONES

De acuerdo con lo encontrado en el desarrollo del proyecto de investigación, se plantean las siguientes recomendaciones:

- Realizar nuevas pruebas del tratamiento magnético en disposición perpendicular y paralelo a la dirección de flujo de las muestras de crudo, a niveles mayores de campo, con el fin de determinar la aplicación óptima tal como se planteó en las pruebas preliminares con campo eléctrico.
- Realizar un estudio de los efectos de los campos eléctricos y magnéticos en modelos de precipitación de ceras desde el punto de vista de los fenómenos de transporte (transferencia de cantidad de movimiento) y en modelos que tengan en cuenta las ecuaciones de balance del equilibrio termodinámico en soluciones líquido-sólido.
- Implementar técnicas tales como: RMN (Resonancia Magnética Nuclear), o de cualquier otra técnica de caracterización para determinar que otros componentes a parte de la concentración del agua, pueden estar influenciando en los resultados obtenidos a partir de los tratamientos, con el fin de realizar un estudio más detallado del fenómeno de las precipitaciones, y de esta forma generar resultados más concluyentes a partir de la caracterización de las muestras de crudo tratadas.
- Se recomienda realizar el estudio de la respuesta de muestras de crudo pesado bajo el efecto de campos eléctricos y magnéticos, lo anterior se plantea, debido a que en la literatura científica se registran la mayor cantidad de experimentos realizados sobre este tipo de hidrocarburos.
- Se sugiere tener como variable adicional de entrada en futuros experimentos, la salinidad de las muestras de crudo, lo anterior se plantea porque se encontró en la literatura científica que, los iones presentes en las muestras del hidrocarburo podrían interactuar con los campos eléctricos y magnéticos, tal y como lo expresa la ecuación que modela la fuerza tipo Lorentz.
- Aplicar intensidades de campo eléctrico mayores a muestras de crudo deshidratado, con las que se puedan mejorar la movilidad de esta clase de hidrocarburos.

- Construir para el prototipo de herramienta magnética, cuñas de acople laterales de diferentes dimensiones, que permitan obtener mayores densidades de campo en el tratamiento. Para esto se debe tener en cuenta que se debe ajustar la tubería de transporte, dependiendo de las dimensiones seleccionadas en las cuñas.
- Construir en el banco de pruebas un recubrimiento de material ferromagnético con ventilación alrededor de las cinco herramientas instaladas, para garantizar el blindaje magnético del banco de pruebas y de esta forma evitar posibles fugas de líneas de flujo, que afecten la medición de los sensores instalados.
- En caso de usos prolongados de la herramienta magnética, se sugiere la implementación de una refrigeración forzada, para los prototipos de generación de campo magnético.
- Construir el prototipo de una herramienta magnética a base de imanes permanentes en nuevas geometrías, que permitan la aplicación de niveles de densidad de flujo magnético capaces, de modificar las características reológicas en hidrocarburos.
- Construir un módulo de alimentación eléctrico que sirva de acometida para el banco de pruebas y el módulo de control, esto con el fin de garantizar el correcto funcionamiento de las diferentes partes del banco construido, que en su mayoría pueden verse afectadas por señales con armónicos provenientes de la red eléctrica.

8. PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN REALIZADOS COMO SOPORTE DE LA TESIS DE MAESTRÍA

Tabla 27: Proyectos realizados como soporte de tesis de maestría.

PROYECTO	AUTORES	ESCUELA	DIRECCIÓN	RESULTADOS
Estudio de la respuesta reológica de crudos parafínicos de Campo Escuela Colorado ante un campo magnético	J. Almeyda, A. Ramírez.	Ingeniería química Ingeniería electrónica	Arlex Cháves Hermann Vargas Emiliano Ariza Cristian Jiménez	Reducción de viscosidad en pozo Colorado 25 en 32%
Estudio de la influencia de un campo eléctrico externo en la movilidad de crudos parafínicos	J. Rey, J. Pinzón.	Ingeniería química Ingeniería electrónica	Arlex Cháves Hermann Vargas Emiliano Ariza Cristian Jiménez	Aumento de viscosidad en pozo Colorado 67 en 20%
Estudio de la influencia del agua en la movilidad de crudos parafínicos bajo el efecto de un campo eléctrico externo	A. Ortiz, S. Riberos.	Ingeniería química Ingeniería química	Arlex Cháves Emiliano Ariza Cristian Jiménez	Reducción de viscosidad de 7,5% en pozo Colorado 67 con 10% v/v de agua destilada
Diseño y construcción del prototipo de una herramienta magnética para tratamiento a muestras de crudo del Campo Escuela Colorado	Y. Briceño, J. Díaz.	Ingeniería electrónica Ingeniería electrónica	Hermann Vargas Cristian Jiménez	Herramienta magnética con capacidad 407 mT en entrehierro de 21,3 mm. Alimentación 13 [A]. 2 bobinas de 316 vueltas. Calibre #16 AWG.
Construcción de un banco de pruebas escalado para simular las condiciones en la cara de la formación de pozo, del Campo Escuela Colorado	J. Suárez, A. Hernández.	Ingeniería mecánica Ingeniería electrónica	Hermann Vargas Jorge Meneses Cristian Jiménez	Construcción de banco de pruebas y módulo de control de elementos.
Medición de la movilidad del crudo parafínico del Campo Escuela Colorado bajo el efecto de campos eléctricos aplicados	B. Campo, M. Arias.	Ingeniería electrónica Ingeniería electrónica	Hermann Vargas Cristian Jiménez	Diseño de herramienta eléctrica, simulada en FEMM 4.2 con capacidad de generar 500 V/cm.

9. PUBLICACIONES REALIZADAS

- C. JIMÉNEZ, H. VARGAS, E. ARIZA, J. MENÉSES. “Campos Electromagnéticos Aplicados para Observar Cambios en la Movilidad de Muestras de Crudo Parafínico”. 1er Congreso Nacional de la Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Bucaramanga, Colombia. 2012.

10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] ISO 50001, in *Energy management*, International Organization for Standardization, 2011, pp. 4–20.
- [2] O. Probst, "Transferencia," *Revista Digital de Posgrado, Investigación y Extensión del Campus Monterrey*, Enero 2007. [Online]. Available: <http://www.mty.itesm.mx/die/ddre/transferencia/Transferencia53/eli2-53.html>. [Accessed 15 Noviembre 2012].
- [3] U. Ahmed, "Máximo Aprovechamiento de los Campos Maduros," 2003 Junio 2003. [Online]. Available: http://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/spanish04/aut04/editorial.pdf. [Accessed 20 Julio 2004].
- [4] Universidad Industrial de Santander, "Presentación de Campo Escuela Colorado," *Facultad Físico-Química*, 9 Septiembre 2012. [Online]. Available: <http://www.uis.edu.co/webUIS/es/academia/facultades/fisicoQuimicas/campoEscuela/index.html>. [Accessed 20 Octubre 2012].
- [5] B. Guo, S. Sopng, J. Chacko and A. Ghalambor, "Offshore Pipelines," *Oxford*, 2005.
- [6] W. Thomason, "Start-Up and Shyt-in Issues for Subsea Production of High Paraffinic Crudes," *Offshore Tecnology Conference*, 2000.
- [7] E. Ariza, "Determinación del Umbral de Cristalización de las Parafinas en el Crudo del Campo Colorado," Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2008.
- [8] J. Badillo and J. Gómez, "Efecto del Tratamiento Electromagnético y Químico sobre la Inhibición en la Formación de Cristales de Parafinas en Crudos de Alto Punto de Fluidéz," Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2011.
- [9] H. Lee, "Computational and Rheological Study of Wax Deposition and Gelation in Subsea Pipelines," *Chemical Engineering, University of Michigan*, 2008.
- [10] R. Venkatesan, P. Singh and H. Fogler, "Delineatingo the Pour Point and Gelaton Temperature of Waxy Crude Oils," *Society of Petroleum Engineers (SPE)*, 2002.
- [11] D. Merino and S. Correa, "Cold Flow: A Review of a Technology to Avoid Wax Deposition," *Petroleum Science and Technology*, pp. 446–459, 2008.
- [12] G. Borghi, S. Correa and D. Merino, "Proceedings OMC 2005 Offshore Mediterranean Conference and Exhibition," in *In-depth Investigation of Wax Deposition Mechanisms*, 2005.

- [13] C. Villabona and D. González, "Mejora de la Movilidad del Crudo Parafínico mediante Campos Magnéticos," Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2009.
- [14] P. Singh, R. Venkatesan, H. Fogler and N. Nagarajan, "Formation and Aging of Incipient Thin Film Wax–Oil Gels," *AIChE*, 2000.
- [15] A. Nguyen, H. Fogler and C. Sumaeth, "Fused Chemical Reactions," in *Encapsulation: Application to Remediation of Paraffin Plugged Pipelines*, 2001.
- [16] O. Hernández, "Improvements in Single–Phase Paraffin Deposition Modeling," *Society of Petroleum Engineers (SPE 84502)*, 2003.
- [17] M. Al–Yaari, "Paraffin Wax Deposition: Mitigation & Removal Techniques," *Society of Petroleum Engineers (SPE 155412)*, 2011.
- [18] G. Fung, W. Backhaus, S. McDaniel and M. Erdogmus, "To Pig or Not To Pig: The Marlin Experience with Stuck Pig," in *Offshore Tecnology Conference*, Houston, 2006.
- [19] P. Singh and H. Fogler, "The Use of Dispersion to Delay Reaction Time in Tubular Reactors," in *Fused Chemical Reactions*, 1998.
- [20] A. Nguyen, M. Iwaniw and H. Fogler, "Experimental and Theoretical Studies," in *Kinetics and Mechanism of the Reaction between Ammonium and Nitrite Ions*, 2003.
- [21] A. Nguyen, H. Fogler and C. Sumaeth, "Controlled Release of a Catalyst to Control the Temperature Profile in Tubular Reactors," in *Fused Chemical Reactions*, 2004.
- [22] A. Nguyen and H. Fogler, "Faciliated Diffusion in the Dissolution of Carboxylic Polymers," *AIChE*, 2005.
- [23] E. Evangelista, C. Chagas, J. Melo, J. Rocha, N. Filho and L. Marques, "Removal of a Hydrate Plug from a Subsea Christmas–Tree Located in Ultra–Deep Waters with the Aid of a Heat–Releasing Treating Fluid," in *Offshore Technology Conference (OTC) 19730*, 2009.
- [24] S. bailey, T. Kenney and D. Schneider, "Microbial Enhanced Oil Recovery: Diverse Succesfull Aplications of Biotechnology in the Oil Field," *Society of Petroleum Engineers (SPE 72129)*, 2001.
- [25] R. Lessard, G. DeMarco, R. Fiocco, T. Lunel and A. Lewis, "Recent Advances in Oil Spill Dispersant Technology with Emphasis on New Capability to Disperse Heavy Oil," *Society of Petroleum Engineers (SPE 46745)*, 1998.
- [26] C. Coberly, "Method for Preventing Wax Deposits in Tubing". United States Patent 2303823, 1942.
- [27] J. Nenniger, "Cold Seeding Laboratory Experiments," Deep Star Report, 2001.

- [28] R. Benson, "Method for Making Slurry". United States Patent 6070417, Marzo 2000.
- [29] G. Fung, R. Amin, B. Kalpakci, F. Fleyfel and J. O´ Sullivan, "Method for Reducing Solids Build-up in Hydrocarbon Streams Produced from Wells". United States Patent 6656366, December 2003.
- [30] R. Amin, T. Win and B. Kalpakci, "A Novel Approach for Treatment and Transport of Waxy Crude Oils in Single, Bare Subsea Flowlines," *Society of Petroleum Engineers (SPE 62947)*, 2000.
- [31] W. Knowles, "A Stream of Gas and Waxy Crude is Cooled by Expansion in a Choke and Form a Stable Slurry". United States Patent 4697426, October 1986.
- [32] J. Evans, "Apparatus and Technique for the Evaluation of Magnetic conditioning as a means of Retarding Wax Deposition in Petroleum Pipelines," Deep Star Report, 1997.
- [33] K. Pedersen and H. Ronningsen, "Influence of Wax Inhibitors on Wax Appearance Temperature, Pour Point, and Viscosity of Waxy Crude Oils," *Energy & Fuels*, pp. 321–328, 2003.
- [34] K. Wang, C. Wu, J. Creek, P. Shuler and Y. Tang, "Evaluation of Effects of Selected Wax Inhibitors on Wax Appearance and Disappearance Temperatures," *Petroleum Science and Technology* , 2003.
- [35] G. Holder, "Wax Crystallization from Distillate Fuels, Part II. Mechanism of Pour Depression," *Journal of the Institute of Petroleum*, pp. 235–242, 1965.
- [36] H. Ronningsen, B. Bjorndal, A. Hansen and W. Pedersen, "Wax Precipitation from North-Sea Crude Oils. Crystallization and Dissolution Temperatures, and Newtonian and Non-Newtonian Flow Properties," *Energy & Fuels*, pp. 895–908, 1991.
- [37] M. García, M. Orea, L. Carbognani and A. Urbina, "The Effect of Paraffinic Fractions on Crude Oil Wax Crystallization," *Petroleum Science and Technology*, pp. 189–196, 2001.
- [38] D. gentil, C. Khalil, N. Rocha and E. Lucas, "Evaluation of Polymeric Phosphoric Ester-Based Additives as Wax Deposition Inhibitors," in *Society Petroleum Engineers (SPE 94821)*, Brazil, 2005.
- [39] F. Jessen and J. Howell, "Effect of Flow Rate on Paraffin Accumulation in Plastic, Steel and Coated Pipe," *Society Petroleum Society (SPE 968-G)*, 1957.
- [40] R. Jorda, "Paraffin Deposition and Prevention in Oils Wells," *Society of Petroleum Engineers (SPE 1598)*, 1966.
- [41] J. Parks, "Chemical Inhibitors Combat Paraffin Deposition," *Oil & Gas Journal*, vol. 58, 1960.
- [42] E. Hunt, "Laboratory Study of Paraffin Deposition," *Society of Petroleum Engineers (SPE 279)*, 1962.
- [43] H. Tang, K. Juang and R. Tao, "Electrorheology Improves Transportation of Crude Oil," in *Journal of*

Intelligent Material Systems and Structures, Philadelphia, USA, 2011.

- [44] R. Tao and X. Xu, "Reducing the Viscosity of Crude Oil by Pulsed Electric and Magnetic Field," *Energy & Fuels*, pp. 2046–2051, 2006.
- [45] R. Chow, R. Sawatzky, D. Henry, A. Babchin, Y. Wang, L. Cherney and R. Humphreys, "Precipitation of Wax from Crude Oil Under the Influence of a Magnetic Field," *Journal of Canadian Petroleum Technology*, vol. 39, no. 6, 2000.
- [46] B. Wang and L. Dong, "Paraffin Characteristics of Waxy Crude Oil in China and the Methods of Paraffin Removal and Inhibition," in *International Meeting on Petroleum Engineering*, Beijing, China, 1995.
- [47] N. Tung, N. Vuong, B. Khanh, N. Vinh, P. Hung and V. Hue, "Studying the Mechanism of Magnetic Field Influence on Paraffin Crude Oil Viscosity and Wax Deposition Reductions," in *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*, Jakarta, Indonesia, 2001.
- [48] N. Rocha, G. González and D. Vaitsman, "Efeito do Campo Magnético na Precipitacao de Parafinas," in *Petrobras*, Rio de Janeiro, 1997.
- [49] J. Goncalves, A. Bombard, D. Soarez and G. Alcantara, "Reduction of Paraffin Precipitation and Viscosity of Brazilian Crude Oil Exposed to Magnetic Fields," *Energy & Fuels*, pp. 3144–3149, 2010.
- [50] J. Goncalves, A. Bombard, D. S. Carvalho, A. Nascimento, M. Silva, G. Alcantara, F. Pelegrini, E. Vieira, K. Pirola, M. Bueno, G. Lucas and N. Rocha, "Study of the Factors Responsible for the Rheology Change of a Brazilian Crude Oil under Magnetic Fields," *Energy & Fuels*, 2011.
- [51] Fundación Wikipedia, "Fuerza de Lorentz," 28 Junio 2013. [Online]. Available: http://es.wikipedia.org/wiki/Fuerza_de_Lorentz. [Accessed 1 Septiembre 2013].
- [52] S. Less, A. Hannisdal and J. Sjöblom, "An Electrorheological Study on the Behavior of Water in Crude Oil Emulsions Under Influence of a DC Electric Field and Different Flow Conditions," *Journal of Dispersion Science and Technology*, 2008.
- [53] J. Zhang, F. Chen and N. Zhang, "The Electrorheological Effect Study of Crude Oil Under the Applied Electric Field," in *Physical and Numerical Simulation of Geotechnical Engineering 2nd ISSUE*, China, 2011.
- [54] R. Carpenter, "Apparatus for Magnetically Treating Liquid Flowing Through a Pipe and Clamping means therefor". United States Patent 4367143, 1983.
- [55] M. Wang, "Permanent-Magnet Wax-Proof Device". United States Patent 5024271, 1991.

- [56] J. Almeyda and A. Ramírez, "Estudio de la Respuesta Reológica de Crudos Parafínicos de Campo Escuela Colorado ante un Campo Magnético," Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2013.
- [57] J. Rey and J. Pinzón, "Estudio de la Influencia de un Campo Eléctrico Externo en la Movilidad de Crudos Parafínicos," Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2013.
- [58] A. Ortiz and S. Riberos, "Estudio de la Influencia del Agua en la Movilidad de Crudos Parafínicos Bajo el Efecto de un Campo Eléctrico Externo," Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2012.
- [59] S. Salager, "Influencia de la Posición del Agitador y de la Agitación sobre Formación y Evolución incipiente de una Emulsión," Universidad de los Andes, Mérida, 1997.
- [60] MAGNETICS, "Ferrite Materials: Ferrite Cores," MAGNETICS, 2011. [Online]. Available: <http://www.mag-inc.com/products/ferrite-cores>. [Accessed 25 Enero 2012].
- [61] Frana International SAS, "Corte Núcleo Apilado," Frana International SAS, 2011. [Online]. Available: <http://www.franainternational.com/es/linea-industrial/corte-nucleo-apilado.html>. [Accessed 14 Enero 2012].
- [62] J. Díaz and Y. Briceño, "Diseño y Construcción del Prototipo de una Herramienta Magnética para Tratamiento a Muestras de Crudo del Campo Escuela Colorado," Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2013.
- [63] D. Meeker, "Finite Element Method Magnetics: Home Page," FEMM 4.2, 24 Junio 2011. [Online]. Available: <http://www.femm.info/wiki/HomePage>. [Accessed 3 Diciembre 2011].
- [64] MIT, Circuitos Magnéticos y Transformadores, Cambridge: Reverte S.A, 2003.
- [65] J. Corney, "Magnetic, Fluid Conditioning Tool". United States Patent 5178757, 1993.
- [66] R. Tao, "The Physical Mechanism to Reduce the Viscosity of Liquid Suspensions," *International Journal of Modern Physics*, vol. 21, pp. 28–29, 2007.
- [67] R. Tao, "Final Report: Reducing the Viscosity of Crude Oil by Pulsed Electric or Magnetic Field," Department of Physics (Temple University Philadelphia), Philadelphia, 2008.
- [68] C. Pérez, "Los Problemas de Emulsión y cómo afectan la Productividad en un Campo Productor. Campo JIBA_Occidental de Colombia," Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2006.
- [69] S. Ayala and D. Rincón, "Preparación de una Emulsión Polimérica a partir de Residuos Urbanos de Poliestireno Obtenido de Vasos de Yogurt con Aplicaciones a Pintuas," Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2010.

- [70] C. Dicharry, "Stability of Water/Crude Oil Emulsions Based on Interfacial Dilatational Rheology," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 297, pp. 785–791, 2006.
- [71] J. Fernández, "Electromagnetismo 2004," Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, 2004.
- [72] MACOR LTDA. Transformadores, *Fabrica de Bobinados*, Bucaramanga, Colombia +57 7 6332209 : Calle 3 # 15A – 26, 2013.