

**ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE UN CAMPO ELÉCTRICO EXTERNO EN LA
MOVILIDAD DE CRUDOS PARAFÍNICOS**

JOHN EDINSON REY VARGAS

JERSON ALEXIS PINZÓN AMOROCHO

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

**ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE UN CAMPO ELÉCTRICO EXTERNO EN LA
MOVILIDAD DE CRUDOS PARAFÍNICOS**

JOHN EDINSON REY VARGAS

JERSON ALEXIS PINZÓN AMOROCHO

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero
Químico e Ingeniero Electricista**

Director

Dr. ARLEX CHAVES GUERRERO

Codirectores

Dr. HERMANN RAÚL VARGAS TORRES

M.Sc. EMILIANO ARIZA LEÓN

M.Sc.(c). CRISTIAN CAMILO JIMÉNEZ LEIVA

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

2013

Dedicatoria

A Dios, por darme la oportunidad de vivir y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el período de estudio.

A mi madre Nelly Vargas y mi padre Heli Rey, por darme la vida, quererme mucho, creer en mí y porque siempre me estuvieron apoyando. Gracias por darme una carrera para mi futuro, todo esto se los debo a ustedes dos.

A mis hermanos, Mónica Rey y Wilson Rey, por estar siempre conmigo y apoyarme en los momentos difíciles, los quiero mucho.

A mis amigos Carlos Hernández, Camila Báez y Andrés Arévalo, por todas las vivencias compartidas y su sincera amistad durante todo este tiempo.

A mi compañero de proyecto y amigo Jerson quien llegó en el momento indicado y estuvo siempre apoyándome durante el transcurso de este trabajo.

*Y a todos aquellos que participaron directa o indirectamente en la elaboración de esta tesis.
¡Gracias a ustedes!*

John Edinson Rey Vargas

Dedicatoria

“Nadie puede decirte en quién te convertirás. Solo tú, con los caminos que elijas tomar, con cada vez que prefieras el querer sobre el deber, con los obstáculos que te propongas vencer, con los sueños que hagas realidad y con cada sonrisa que logres regalar o recibir de los demás; te otorgarás la oportunidad que en cada ocasión que mires hacia atrás, puedas ver tranquilamente el ser que has decidido forjar, y notar que has llegado a dónde estabas destinado a llegar”.

Dedicado a Dios y a ustedes, que hicieron de cada circunstancia, la oportunidad perfecta para dar un paso hacia la meta que hoy logro alcanzar:

A mi madre, Margen Amorocho, quién con su hermoso esfuerzo para salir adelante con sus dos hijos, me ha regalado lo que sólo ella, de la mano del altísimo me podía regalar: los principios y valores necesarios para construir un futuro para mí y toda mi familia. Te debo mi todo.

*A toda mi familia,
a mi hermana Sofía, por su compañía
a mis 13 primos, por sacarme una sonrisa durante los tiempos difíciles,
en especial a Silvia por ser mi mejor amiga,
a mi tío Edwin, mis tíos y abuelita, por su inigualable apoyo
y a mi padre, cuyo recuerdo siempre me ha llenado de fortaleza para luchar por mis sueños.*

*A mis grandes amigos, por siempre estar ahí
a Diego, por mostrarme que el esfuerzo, la inteligencia y la perseverancia, nos pueden llevar lejos
a David, por mostrarme que la universidad es la posibilidad de vivir grandes experiencias
a Jose, por ser una persona y un profesional de admirar, y motivarme a no desistir
a Andrea, Andreita y Lau, por las sonrisas regaladas cada vez que tropecé.*

*A mi compañero de proyecto y amigo, John
quién con su compromiso, optimismo y colaboración, me permitió hacer realidad este logro.*

*A todos mis compañeros y a todas las personas que durante todo este proceso, me regalaron
cientos de enseñanzas e hicieron posible la elaboración de este trabajo.*

Jerson Alexis Pinzón Amorocho

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos:

A *Dios*, por darnos la fuerza y el coraje de hacer realidad este proyecto.

A *nuestras familias*, por su paciencia, comprensión y apoyo incondicional.

A la *Universidad Industrial de Santander*, la *Escuela de Ingeniería Química* y la *Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones*, por la formación personal y profesional, y por permitirnos emplear sus instalaciones y el talento humano durante la ejecución de este proyecto.

Al profesor *Arlex Chaves Guerrero* y al Ingeniero *Cristian Jiménez Leiva*, por su ayuda, enseñanza, apoyo, asesoría y gran dedicación.

A los profesores *Emiliano Ariza León* y *Hermann Raúl Vargas Torres*, por su colaboración e invaluable aportes.

A los técnicos de laboratorio, *Eduardo Carreño*, *Wilson Carreño* y *Alexander Beltrán*, por su asesoría, disposición y paciencia.

A los ingenieros *Guillermo Acero* y *Natalia Bedoya*, por su ayuda oportuna e incondicional en el desarrollo de las pruebas experimentales y análisis de las mismas.

A nuestros amigos y compañeros de trabajo; *Ángela Ortiz*, *Johanna Almeyda*, *Sergio Riberos*, *Andrés Ramírez*, *Marco Arias*, *Byron Campo*, *José Suárez* y *Andrés Hernández*.

Al Grupo de Investigación *Campo Escuela Colorado – CEC* y el Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica – *GISEL* de la Universidad Industrial de Santander, por su apoyo y respaldo.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	22
1. FUNDAMENTO TEÓRICO	24
1.1 PROPIEDADES A EVALUAR DENTRO DEL TRATAMIENTO	24
1.2 CRUDOS PARAFÍNICOS	24
1.3 CERAS PARAFÍNICAS	25
1.4 CAMPO ELÉCTRICO	25
1.5 ESTADO DEL ARTE	26
2. METODOLOGÍA	30
2.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	30
2.2 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN	31
2.2.1 Dispositivo para la aplicación del tratamiento	31
2.2.2 Fuente de alta tensión	32
2.3 PRUEBAS PRELIMINARES	33
2.3.1 Caracterización de los crudos	33
2.3.2 Caracterización del campo eléctrico	33
2.3.3 Elección de las placas paralelas al flujo como configuración de mayor efecto en el crudo	34
2.4 EJECUCIÓN DEL DISEÑO FACTORIAL	34
2.4.1 Pruebas a Col 36 y Col 67	34
2.4.2 Caracterización de muestras representativas	35
3. RESULTADOS	36
3.1 PRUEBAS PRELIMINARES	36
3.1.1 Caracterización de los crudos	36
3.1.2 Capilares y tiempos de exposición	36

3.1.3	Caracterización del campo eléctrico.....	37
3.1.4	Elección de la configuración con mayor efecto	37
3.2	RESULTADOS EXPERIMENTALES	39
3.3	CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS REPRESENTATIVAS.....	42
	CONCLUSIONES	46
	RECOMENDACIONES.....	47
	BIBLIOGRAFÍA.....	48
	ANEXOS.....	52

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Caracterización de los crudos Col 36 y Col 67.	36
Tabla 2. Dimensiones de los capilares y tiempos de exposición.	37
Tabla 3. Niveles de campo eléctrico.	37
Tabla 4. Resultados para la selección de la configuración con mayor efecto.	37
Tabla 5. Prueba t para las dos configuraciones de campo eléctrico aplicado.	38
Tabla 6. Cambio en el flujo másico para las dos configuraciones de campo eléctrico.	38
Tabla 7. Diseño de experimentos para el crudo Col 36.	39
Tabla 8. Diseño de experimentos para el crudo Col 67.	39
Tabla 9. Condiciones representativas.	42
Tabla 10. Viscosidad estimada in situ para las pruebas representativas.	42
Tabla 11. Viscosidad medida con el viscosímetro OFITE para las pruebas representativas.	43
Tabla 12. Punto de fluidez para las muestras de crudo en blanco y con tratamiento eléctrico.	44
Tabla 13. Punto de nube para las muestras de crudo en blanco y con tratamiento eléctrico.	44
Tabla 14. Permitividad de los diferentes materiales involucrados en el modelo. ...	62
Tabla 15. Punto de fluidez para las muestras en blanco y con tratamiento.	76
Tabla 16. Agua y sedimentos de los pozos Col 36 y Col 67.	77
Tabla 17. Densidad de los crudos de los pozos Col 36 y Col 67 a temperatura ambiente.	78
Tabla 18. Determinación de la gravedad API, pozos Col 36 y Col 67.	79
Tabla 19. ANOVA Col 36.	80
Tabla 20. ANOVA Col 67.	81

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Metodología de experimentación.....	30
Figura 2. (a) Dispositivo para la aplicación del tratamiento, (b) montaje para los ensayos.....	32
Figura 3. Diagrama de bloques del circuito de la fuente de AT.	33
Figura 4. (a) Diagrama de pareto estandarizado Col 36, (b) diagrama de pareto estandarizado Col 67.	40
Figura 5. Superficie de respuesta y de contorno, para el cambio del flujo másico del crudo Col 36.	41
Figura 6. Superficie de respuesta y de contorno, para el cambio del flujo másico del crudo Col 67.	41
Figura 7. (a) Cambio de la viscosidad en el tiempo para Col 36 a 25°C y 600 rpm. (b) Cambio de la viscosidad en el tiempo para Col 67 a 25°C y 600 rpm.	45
Figura 8. Sistema para el tratamiento eléctrico.....	52
Figura 9. Tanque de almacenamiento (dimensiones en mm).	53
Figura 10. Sección 1, del tubo de descenso (dimensiones en mm).....	54
Figura 11. Sección 2, acoplamiento de los electrodos (a) tratamiento paralelo, (b) tratamiento perpendicular (dimensiones en mm).	54
Figura 12. Sección 3, acoplamiento de los capilares (dimensiones en mm).....	54
Figura 13. Esquema básico del transformador flyback.	58
Figura 14. Circuito de la fuente de alta tensión.....	58
Figura 15. Fuente de alta tensión.	59
Figura 16. Electrodos para el tratamiento perpendicular (dimensiones en mm). ...	60
Figura 17. Electrodos para el tratamiento paralelo (dimensiones en mm).	61
Figura 18. Prototipo para la simulación del campo eléctrico perpendicular al flujo.	63
Figura 19. Resultados de la simulación del campo eléctrico perpendicular al flujo.	63

Figura 20. Puntos de prueba de la simulación para el tratamiento perpendicular, campo eléctrico en V/mm y coordenadas en mm.....	65
Figura 21. Prototipo para la simulación del campo eléctrico paralelo al flujo.	66
Figura 22. Resultados de la simulación del campo eléctrico paralelo al flujo.	67
Figura 23. Puntos de prueba de la simulación para el tratamiento paralelo, campo eléctrico en V/mm y coordenadas en mm.	67
Figura 24. (a) Esquema de conexión, (b) sonda de medición de alta tensión.	70
Figura 25. Viscosímetro OFITE modelo 900.	71
Figura 26. Curva de flujo para Col 36 sin tratamiento. T=25°C.....	72
Figura 27. Curva de flujo para Col 67 sin tratamiento. T=25°C.	72
Figura 28. Curva de flujo para Col 36 con tratamiento eléctrico. T=26°C.	73
Figura 29. Curva de flujo para Col 67 con tratamiento eléctrico. T=27°C.	73
Figura 30. Calorímetro diferencial de barrido DSC Q10.	74
Figura 31. Termograma del crudo Col 36 antes y después del tratamiento.....	75
Figura 32. Termograma del crudo Col 67 antes y después del tratamiento.....	75
Figura 33. Determinación del punto de fluidez de una muestra de crudo.	76
Figura 34. Recipientes y centrifuga para realizar la medida BSW.	77
Figura 35. Picnómetro para medir la densidad de crudos.....	78
Figura 36. Hidrómetro.	79
Figura 37. (a) Interacción de los factores para Col 36, (b) interacción de los factores para Col 67.	81
Figura 38. Gráfico de probabilidad normal para los efectos, (a) Col 36 y (b) Col 67.	82
Figura 39. Residuos vs Valores predichos, (a) Col 36 y (b) Col 67.....	83
Figura 40. Gráfico de probabilidad normal para los residuos, (a) Col 36 y (b) Col 67.	84

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A. Sistema para la aplicación del tratamiento.....	52
ANEXO B. Fuente de AT y generación del campo eléctrico.	56
ANEXOC.Caracterización del campo eléctrico.	62
ANEXO D. Caracterización de crudos	71
ANEXO E. Análisis estadístico.....	80

NOMENCLATURA

AT: Alta tensión

BT: Baja tensión

BSW: Contenido de agua y sedimentos (Basic Sediment and Water)

CE: Campo eléctrico

Col 36: Colorado 36

Col 67: Colorado 67

d: Distancia entre electrodos

DSC: Calorimetría diferencial de barrido

E: Intensidad de campo eléctrico

FEMM: Finite Element Method Magnetics

g: Gravedad

L: Longitud del capilar

N_{RE} : Número de Reynolds

T: Temperatura

ṁ: Flujo másico

ṁ_o: Flujo másico de crudo en blanco

ṁ_t: Flujo másico de crudo con tratamiento

Δṁ: Cambio de flujo másico

Δh: Diferencia de altura entre el nivel superior del crudo en el tanque y el inicio del capilar

ρ: Densidad

R: Radio interno del capilar

t_{exp} : Tiempo de exposición

μ_o : Viscosidad dinámica crudo en blanco

μ_t : Viscosidad dinámica crudo tratado

V_o: Tensión aplicada a los electrodos

V_{ol} : Volumen de crudo entre las placas

GLOSARIO

ACRÍLICO CRISTAL: Es un polímero termoplástico transparente, fácil de trabajar, con alta resistencia a la intemperie, bajo peso, resistente al impacto y altamente aislante del calor y la electricidad.

AGREGADOS: Partículas individuales que se agrupan para formar otras de mayor tamaño.

ALTA TENSIÓN (AT): Toda instalación eléctrica cuya tensión nominal es mayor a 1000 [V].

ASFALTENOS: Son macromoléculas insaturadas heterocíclicas que contienen principalmente carbono, hidrógeno y componentes menores como el azufre, oxígeno, nitrógeno y varios metales pesados. El contenido de asfaltenos en el petróleo generalmente disminuye al aumentar la gravedad API.

BAJA TENSIÓN (BT): Toda instalación eléctrica cuya tensión nominal es mayor o igual a 25 [V] y menor o igual a 1000 [V].

BSW: Cantidad de agua en emulsión y sedimentos que se encuentra asociado con el crudo. Un alto valor de BSW causa problemas en el transporte y tratamiento de crudos elevando los costos de producción.

CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO: Es una técnica termoanalítica en la que se sigue la evolución del flujo de calor intercambiado entre la muestra y el calorímetro en función de la temperatura (o el tiempo). Con esta técnica es posible determinar el punto de nube en una muestra de crudo gracias a que permite detectar la cristalización de la parafina como un cambio de fase exotérmico.

CAPACITOR: Es un elemento eléctrico constituido por dos placas (planos) de un material conductor, enfrentadas paralelamente sin hacer contacto y un material dieléctrico (no conductor), entre ellas que puede ser aire.

CICLO DE TRABAJO: Es la relación entre el tiempo de conducción del transistor (t_{ON}) y un periodo completo de operación ($t_{ON} + t_{OFF}$).

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.

COLOIDE: Es la mezcla formada por diminutas partículas suspendidas de manera estable entre moléculas de otra materia.

CRUDOS ASFÁLTICOS: También conocidos como nafténicos, son crudos pesados, viscosos, mal olientes y de color negro. Casi siempre están contaminados por compuestos orgánicos e inorgánicos, en cantidades relativamente altas.

CRUDOS INTERMEDIOS: Son aquellos en donde los grados API están entre 20 y 30.

CRUDOS LIVIANOS: Son aquellos que tienen más de 30 grados API.

CRUDOS PARAFÍNICOS: Son crudos livianos, inodoros y de colores claros. Generalmente están libres de contaminantes orgánicos e inorgánicos. Dan un alto rendimiento de productos livianos (gasolina, disolventes y querosenes) y aceites de buena calidad.

CRUDO PESADO: Son aquellos crudos densos que tiene menos de 20 grados API.

DIVISOR DE TENSIÓN: Es un circuito eléctrico cuya configuración distribuye una tensión aplicada desde una fuente, entre una o más impedancias conectadas en serie.

ELECTRODOS: Pieza fabricada de un material conductor, utilizada para ser energizada con una tensión y generar un campo eléctrico; así, al aplicar una diferencia de potencial a un par de electrodos, se establece un campo dirigido del electrodo positivo hacia el negativo.

ELECTROREOLOGÍA: Es la ciencia que estudia la posibilidad de controlar los fluidos utilizando la electricidad.

EMULSIÓN: Es un sistema heterogéneo, que está formado por lo menos de un líquido inmiscible íntimamente disperso en otro, en forma de gotas.

ESFUERZO CORTANTE: Se define como la relación entre la fuerza aplicada tangencialmente sobre un área determinada. También se le conoce como esfuerzo de corte, de cizalla o cortadura.

FLUJO MÁSSICO: Es la magnitud que expresa la variación de la masa en el tiempo.

FUENTE DE ALTA TENSIÓN: Sistema eléctrico que genera un nivel de tensión superior a 1000 [V] entre sus terminales, en este caso particular, dicho nivel de tensión es de aproximadamente 10 000 [V] y el sistema se basa esencialmente en el transformador flyback del tubo de rayos catódicos de un televisor común.

GRAVEDAD API: Es una escala arbitraria de valores para indicar la densidad del crudo, se da en grados y aumenta en sentido contrario a la densidad o gravedad específica. Varía de un crudo a otro (entre 11 y 45 [°API]). El conocimiento de esta propiedad tiene un importante valor comercial ya que la cotización del crudo depende en gran parte de esta propiedad.

PARAFINAS: Son una mezcla de hidrocarburos de cadenas lineales y ramificados, en mayor proporción son alcanos, cuyo número de carbonos van de C18 a C60.

POTENCIÓMETRO: Consiste en una resistencia eléctrica cuyo valor se puede variar fácilmente con la manipulación de un cursor que lleva la resistencia desde un valor máximo a un mínimo o viceversa.

PUNTO DE FLUIDEZ: Es la temperatura a la cual el crudo deja de fluir.

PUNTO DE NUBE: Es la temperatura a la cual aparece el primer cristal de parafina en el crudo, cuando es enfriado bajo ciertas condiciones previstas.

RECTIFICADOR: Circuito electrónico conformado generalmente por diodos, que permite la conversión de señales de corriente alterna en corriente continua.

REOLOGÍA: Es la ciencia que estudia el flujo y la deformación de los materiales.

REÓMETRO: Equipo que mide las propiedades viscosas y elásticas de un fluido bajo la acción de fuerzas externas.

SUSPENSIÓN: Es una mezcla heterogénea constituida por una fase homogénea continua en la cual se encuentra dispersa una segunda fase discontinua. En una suspensión la fase discontinua se deposita en el fondo del recipiente cuando se deja reposar y esta puede ser separada mediante el uso de papel de filtro.

TERMOGRAMA: Representación gráfica de una variación de la energía de un material con la temperatura.

TIEMPO DE EXPOSICIÓN: Es el tiempo durante el cual el crudo atraviesa los electrodos y es directamente afectado por el campo eléctrico.

TRANSISTOR: Es un elemento electrónico construido con materiales semiconductores, que se comporta como una resistencia no lineal que se utiliza generalmente como un conmutador operado por una señal de tensión o de corriente, dependiendo su naturaleza.

TRASFORMADOR: Dispositivo eléctrico que permite la reducción o elevación de una tensión aplicada a sus terminales, transmitiendo a su vez una potencia eléctrica determinada por sus características y las del circuito en el que trabaja.

VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN: Es una magnitud que mide el cambio en la deformación de un material con respecto al tiempo. También se le conoce como velocidad de cizalla.

VISCOSIDAD: Se define como la resistencia de un fluido a su movimiento o deformación y su valor depende de la temperatura y en menor medida de la presión.

VISCOSÍMETRO: Es un instrumento empleado para medir la viscosidad y algunos otros parámetros de flujo en un fluido.

VISCOSÍMETRO CAPILAR: Instrumento utilizado para determinar la viscosidad, en el cual un volumen de fluido es obligado a pasar a través de un capilar y la viscosidad se mide por medio del flujo másico y la presión aplicada de acuerdo con la ecuación de Hagen-Poiseuille.

YACIMIENTO PETROLERO: Es un cuerpo rocoso subterráneo que tiene porosidad y permeabilidad suficientes para almacenar y transmitir fluidos.

RESUMEN

TÍTULO: *ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE UN CAMPO ELÉCTRICO EXTERNO EN LA MOVILIDAD DE CRUDOS PARAFÍNICOS.**

AUTORES: John Edinson Rey Vargas, Jerson Alexis Pinzón Amorocho. **

PALABRAS CLAVES: Crudo parafínico, campo eléctrico, viscosidad, punto de nube, punto de fluidez, flujo másico, precipitación de parafina, Campo Escuela Colorado.

DESCRIPCIÓN:

El Campo Escuela Colorado a lo largo de su vida productiva ha presentado serios problemas de precipitación y deposición de ceras parafínicas, ocasionando la obstrucción y el taponamiento de las tuberías. En estudios realizados anteriormente con crudos de este campo petrolero, se encontró que la aplicación de campos magnéticos previene la precipitación de las parafinas y de acuerdo con los resultados obtenidos en publicaciones recientes sobre este tema alrededor del mundo, se planteó la hipótesis que los campos eléctricos podrían causar un efecto similar. El propósito del presente trabajo fue observar la respuesta del crudo parafínico cuando es sometido a campos eléctricos y analizar la aplicabilidad del tratamiento como método inhibidor de depósitos de parafina.

Para esto, se diseñó y construyó un viscosímetro capilar, el cual permite la aplicación directa de campos eléctricos de diferentes intensidades en dos orientaciones distintas; además, se utilizaron capilares de diferentes diámetros para variar el tiempo de exposición al tratamiento. Las variables utilizadas para cuantificar el efecto en el crudo fueron el cambio del flujo másico, la viscosidad, el punto de nube y el punto de fluidez.

Se encontró que la aplicación de campos eléctricos al crudo de los pozos Colorado 36 y Colorado 67, bajo condiciones ambientales, produjo un incremento en la viscosidad, el punto de nube y el punto de fluidez. Este resultado sugiere que la técnica acelera el proceso de deposición de orgánicos, por lo que no se recomienda implementarla en los pozos estudiados.

*Proyecto de Grado. Modalidad investigación.

**Faculta de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química y Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Ph.D.Arlex Chaves Guerrero. Codirectores: Ph.D.Hermann Raúl Vargas Torres, M.Sc. Emiliano Ariza León, Ing. Cristian Jiménez Leiva.

ABSTRACT

TITLE: *STUDY OF THE INFLUENCE OF AN EXTERNAL ELECTRIC FIELD IN THE MOBILITY OF PARAFFINIC CRUDES.**

AUTHORS: John Edinson Rey Vargas, Jerson Alexis Pinzón Amorocho.**

KEYWORDS: Paraffin-base crude oil, electric field, viscosity, cloud point, pour point, mass flow, paraffin precipitation, Campo Escuela Colorado.

DESCRIPTION:

The Campo Escuela Colorado has presented serious problems of precipitation and deposition of paraffin waxes along its existence, causing blockage and clogging of pipes. In previous studies with crude oil from this field, it was found that the application of magnetic fields prevents the precipitation of paraffins and according to the results of recent publications about this topic around the world, it was hypothesized that electric fields may cause a similar effect. The purpose of this study was to observe the response of paraffinic crude when it is subjected to electric fields and to analyze the applicability of the treatment as inhibitor method of paraffin deposits.

A capillary viscometer was designed and constructed for this purpose, which allows the direct application of electric fields of different intensities in two different orientations; it was also used capillaries of different diameters in order to vary the exposure time to the treatment. The variables used to quantify the effect on the crude oil were the change of mass flow, viscosity, cloud point and pour point.

Thus it was found that the application of electric fields to the crude oil of the wells in Colorado 36 and Colorado 67, under environmental conditions, resulted in an increase in viscosity, cloud point and pour point. This result suggests that the technique accelerates the process of deposition of organic and therefore it is not recommended to be implemented in the studied wells.

*Work Degree

**Physical-Chemistry Engineering Faculty. Chemical Engineering School and Physical-Mechanical Engineering Faculty. Electrical Engineering School. Director: Ph.D. Arlex Chaves Guerrero. Co directors: Ph.D.Hermann Raúl Vargas Torres, M.Sc. Emiliano Ariza León, Ing. Cristian Jiménez Leiva.

INTRODUCCIÓN

El petróleo es un recurso natural no renovable que contribuye con el mayor porcentaje de la energía total que se consume en el mundo. En la actualidad existe una gran incertidumbre por las reservas futuras y una gran preocupación por el clima a nivel global, debido a los efectos negativos generados en la combustión de este recurso fósil. Adicionalmente, existen otros problemas como su alto costo, la alta variación del precio en el mercado y problemas geopolíticos que se han generado por el hecho que las mayores reservas de petróleo y gas a nivel mundial, se encuentran en países de gran inestabilidad política [7].

La necesidad de desarrollar nuevas fuentes de energía renovable y sostenible que reemplacen o reduzcan la dependencia energética que se tiene con este recurso no renovable es evidente; sin embargo, a pesar del gran esfuerzo investigativo que se ha realizado en los últimos años, las actuales tecnologías son aún costosas e ineficientes, lo que permite augurar que los combustibles fósiles seguirán siendo la principal fuente energética a nivel mundial [20]. Además, la gran disminución de hallazgos de campos gigantes con más de mil millones de barriles, especialmente en Colombia, ha hecho que sea necesario el desarrollo e implementación de nuevas tecnologías para mejorar la explotación de los llamados campos maduros¹[11].

El Campo Escuela Colorado por sus características, es reconocido como un campo maduro. Éste a lo largo de su vida productiva ha presentado serios problemas de precipitación y deposición de ceras parafínicas, generadas básicamente por la reducción de la temperatura en los fluidos a lo largo del proceso de extracción y recolección; esto ocasiona la obstrucción y el taponamiento de las tuberías, debido a que la parafina precipitada reduce el diámetro y el área de la sección transversal del conducto, causando la declinación

¹Se refiere a un yacimiento que lleva más de 20 años de explotación, con problemas en la producción y que ha alcanzado el límite económico.

en la producción e incluso llegando a impedir completamente el flujo de crudo en algunos pozos [32].

Entre los métodos más utilizados para corregir o minimizar este tipo de problema se encuentran: el uso de inhibidores químicos, la inyección de solventes, el calentamiento con resistencias y los raspadores mecánicos, entre otros. Estos métodos tradicionales son muy costosos y en algunos casos contaminantes [22]; por lo tanto, una técnica que supla este tipo de inconvenientes y que además sea económica, rápida y eficiente, es evidentemente necesaria.

La inhibición en la precipitación de parafinas con tratamientos eléctricos al crudo, se basa en el supuesto que con la aplicación de dichos campos, se puede interrumpir la formación de cristales sin afectar las propiedades químicas del fluido, debido a que la polarización de sustancias orgánicas en su interior, pueden generar dispersión molecular en el petróleo crudo y de este modo prevenir la deposición de parafina en las paredes de la tubería, similar al tratamiento con campos magnéticos [13].

En estudios realizados anteriormente con crudos del Campo Escuela Colorado [32], se encontró que la aplicación de campos magnéticos previene la precipitación de las parafinas y de acuerdo con los resultados obtenidos en publicaciones recientes sobre este tema alrededor del mundo [28], [29], [33], se planteó la hipótesis que los campos eléctricos podrían causar un efecto similar. Por tal motivo, se ha propuesto el uso de una herramienta generadora de campos eléctricos, como posible técnica de inhibición en la precipitación de parafinas. Sin embargo, cabe resaltar que este tipo de tecnología se fundamenta en datos empíricos, de modo que cada caso debe ser estudiado y analizado de forma individual, debido a que no existen estudios concluyentes sobre el efecto del campo eléctrico en los crudos, por su naturaleza compleja.

El propósito del presente trabajo es observar la respuesta del crudo parafínico de los pozos Colorado 36 y Colorado 67, cuando son sometidos a campos eléctricos

y analizar la posible aplicabilidad del tratamiento desde el punto de vista técnico como método inhibitor de depósitos de parafina en estos pozos productores, debido a que éste es el principal problema que presenta el Campo Escuela Colorado, y de este modo sentar las bases a una futura implementación de la técnica como una alternativa de solución pionera e innovadora en la región.

1. FUNDAMENTO TEÓRICO

1.1 PROPIEDADES A EVALUAR DENTRO DEL TRATAMIENTO

Evaluar la efectividad de una nueva técnica ya sea preventiva o correctiva, es una tarea dispendiosa. Por lo tanto, es fundamental la correcta elección de las propiedades modificables durante el tratamiento para que el proceso de investigación sea lo más acertado posible [32]. En este trabajo se busca evaluar las propiedades afectadas con el campo eléctrico, tales como la viscosidad, el punto de fluidez y el punto de nube. El punto de fluidez es relevante, ya que determina la temperatura más baja a la cual se observa fluir el crudo; esta propiedad refleja la capacidad de la parafina dentro del crudo, de desarrollar una red cristalina lo suficientemente resistente para retener e inmovilizar la fase de aceite [9]. Por otra parte, el punto de nube estima la temperatura a la cual aparece el primer cristal de parafina en el crudo e inicia el proceso de precipitación y deposición; depende de la composición del fluido que contiene la parafina y de la cantidad de gas disuelto [32].

1.2 CRUDOS PARAFÍNICOS

El petróleo crudo es una compleja mezcla de largas cadenas de hidrocarburos (parafinas), aromáticos, resinas, asfálticos y nafténicos [10]. Los crudos parafínicos se caracterizan por contener cantidades superiores al 50% de hidrocarburos saturados y dentro de estos más del 40% son del tipo alcano, los cuales forman cadenas lineales unidas por enlaces sencillos. Normalmente estos crudos son de color claro, fluidos y de baja densidad (0,75 a 0,85 [g/ml]); de los cuales se extrae gran cantidad de gasolina, queroseno y aceites lubricantes [3].

1.3 CERAS PARAFÍNICAS

Las parafinas son valiosas como derivados del petróleo y de amplio uso industrial, pero el gran reto es producir y transportar el crudo que las contiene en gran medida, como es el caso particular del Campo Escuela Colorado [3]. Las parafinas que contienen alto peso molecular y largas cadenas de carbonos, tienden a cristalizar y precipitar cuando la temperatura del crudo cae por debajo del punto de nube [10], lo cual causa serias pérdidas económicas debido a la reducción o suspensión de la producción. Inicialmente, la parafina está disuelta en el crudo en equilibrio termodinámico a la presión y temperatura del yacimiento, con la explotación del mismo, se rompe este equilibrio generando daños a la formación y se inicia el proceso de precipitación [3]. Los factores con mayor efecto en este proceso son la disminución en la presión, la inyección de aceite caliente, la acidificación y la disminución en la temperatura, siendo este último factor el de mayor relevancia [4].

El proceso que sufren las moléculas de parafina en una muestra de crudo que se somete a una reducción paulatina de la temperatura, es el que sigue: para temperaturas superiores al punto de nube, la cera permanece suspendida en el aceite sin llegar a precipitar, una vez que el primer cristal de cera se forma, se alcanza el punto de nube y empieza el mecanismo de precipitación de parafina, formándose más cristales de cera en la medida que la temperatura desciende; finalmente una red de cristales es formada, atrapando el aceite y evitando así su fluidez, esta temperatura es conocida como punto de fluidez. La formación de cristales de parafina se lleva a cabo mediante tres procesos: nucleación, crecimiento y aglomeración de los cristales [32].

1.4 CAMPO ELÉCTRICO

Se considera que una carga eléctrica Q modifica de algún modo el espacio. A este espacio perturbado por la carga se le llama campo eléctrico (**CE**), el cual actúa sobre cualquier otra carga q ejerciendo una fuerza electrostática sobre ella. Una configuración de placas planas paralelas, es la herramienta propuesta para la

aplicación de los campos eléctricos al crudo, la cual consta de dos placas conductoras, cada una con un área A , separadas por una distancia d . La intensidad del campo eléctrico (E) entre las dos placas tiene una magnitud dada por la diferencia de potencial ΔV_0 dividida entre la separación de las placas. Cabe aclarar, que el campo eléctrico es uniforme cerca del centro pero no lo es en los extremos, debido al “efecto borde” que se presenta [26].

1.5 ESTADO DEL ARTE

Durante los últimos años, se ha afirmado que los campos eléctricos pueden tener efectos beneficiosos sobre las propiedades del petróleo crudo. Con el objetivo de responder a esta afirmación Tao R. y Xu X. [28] aplicaron campos eléctricos a una muestra de crudo asfáltico de California (EE.UU.). Para este experimento, ellos adecuaron un viscosímetro capilar con un dispositivo generador de CE estático (corriente directa), el cual permitió someter el fluido al tratamiento durante 8 [s]; la intensidad del CE fue de 1000 [V/mm] dispuesto en dirección paralela al flujo. El dispositivo generador de CE consiste en un capacitor formado por dos mallas metálicas paralelas en contacto directo con el fluido; cabe resaltar el bajo consumo del dispositivo (alrededor de 1 [mW]), lo cual evita el calentamiento del crudo durante el proceso. La muestra evidenció una reducción del 13,5% en su viscosidad, efecto que se atenúa paulatinamente durante las 8 horas posteriores al tratamiento, siendo éste tiempo suficiente para realizar labores de transporte por oleoductos, en unas mejores condiciones. Estos investigadores sugieren que este tratamiento puede dar buenos resultados en crudos parafínicos y mezclas de estos.

Basado en los resultados obtenidos, Tao R. [30] plantea que el nuevo mecanismo físico, responsable de la reducción de la viscosidad en los crudos, tiene que ver con la agregación de partículas pequeñas de parafina o asfaltenos, en otras de mayor tamaño, mediante la aplicación directa de un campo eléctrico o magnético, lo cual genera un cambio en la reología del petróleo. Si estas partículas agregadas se encuentran en el rango micrométrico, se presenta una reducción en la

viscosidad, en cambio, si la interacción con el campo es muy fuerte, se producen cadenas macroscópicas que atascan el flujo del crudo, lo cual conlleva a un aumento en la viscosidad. Este autor afirma que las pruebas de laboratorio son acordes con su teoría, ya que la viscosidad puede ser reducida efectivamente si *el flujo y el campo aplicado son paralelos*, puesto que al ser las partículas alargadas en la dirección del campo, se mejora la movilidad del crudo desde el punto de vista de la mecánica de fluidos.

En la misma investigación, Tao R. [29] aplica campos eléctricos a tres muestras diferentes de crudo pesado, con el propósito de determinar la influencia simultánea del campo eléctrico y la temperatura, en la viscosidad. Las muestras se hicieron pasar a través de dos mallas metálicas ubicadas a lo largo de un tubo, la tensión fue aplicada entre estas dos mallas para producir un fuerte campo eléctrico de hasta 800 [V/mm]. En todos los casos, la viscosidad se redujo significativamente, sin embargo, en algunas pruebas se presentaron cambios en la temperatura; para estos casos la reducción de la viscosidad fue atribuida en gran parte al tratamiento eléctrico (19%) y en menor proporción al aumento de la temperatura (15%) para una reducción total del 34% en la viscosidad. Finalmente concluye que con esta técnica se podría reducir teóricamente la viscosidad (en un 30%) de crudos asfálticos con API similares.

Por otra parte, Less *et al.* [17] utilizaron un reómetro comercial con la posibilidad de aplicar directamente campos eléctricos de corriente continua a emulsiones de agua en crudo, con el fin de cuantificar el cambio en las propiedades reológicas. Los experimentos mostraron que a baja velocidad de cizallamiento, el campo externo conduce a la formación de agregados de gotas de agua, alargados en la dirección del campo, lo cual aumenta significativamente la viscosidad de la emulsión hasta un valor crítico; posteriormente a esto se produce la coalescencia de las gotas, haciendo que la viscosidad disminuya irreversiblemente por debajo de su valor inicial. En experimentos a alta velocidad de cizallamiento, ninguna estructura fue observada debido a que la turbulencia impidió cualquier formación;

sin embargo, la coalescencia y posterior reducción de la viscosidad se pudo verificar. Finalmente concluyen que en los dos casos, la viscosidad fue reducida en una pequeña proporción y que para altos valores de velocidad de deformación el tratamiento es efectivo, debido a que las estructuras formadas en presencia de campos eléctricos son rotas por la alta velocidad, mejorando la fluidez del crudo.

Evdokimov y Kornishin [13] realizaron mediciones ópticas indirectas a crudos tratados con campos magnéticos y pudieron apreciar de forma cualitativa la desagregación de partículas coloidales en una suspensión de crudo, lo cual condujo a una reducción de la viscosidad. Adicionalmente, ellos afirman que dicho hallazgo es más coherente con otros trabajos de reología de suspensiones, que muestran que la agregación de partículas de asfaltenos y parafinas en el interior del crudo conduce a un aumento progresivo de la viscosidad. Estas evidencias dieron paso a que Evdokimov y Kornishin afirmaran que: ***“el mecanismo de reducción de la viscosidad propuesto por Tao R. [30] no es más que una simple teoría basada en supuestos y malas interpretaciones de la reología de agregación de suspensiones, pues no se justifica correctamente y está en desacuerdo con el conocimiento establecido, y de hecho, hay múltiple evidencia, la cual sugiere que la agregación de partículas de asfaltenos y parafinas en el interior del crudo, conduce a un aumento progresivo de la viscosidad”***. Concluyen que este "mecanismo físico" en los crudos tratados magnéticamente parece ser inexistente y sugieren que la circulación de “explicaciones” científicamente insostenibles, producen desconfianza en los efectos beneficiosos del tratamiento del petróleo con campos eléctricos o magnéticos.

Zhang J., Chen F. y Zhang N. [33]; llevaron a cabo un análisis experimental utilizando un reómetro HAAKE RS-150H, una fuente de alta tensión en corriente directa (de 1 a 10 [kV]) y un crudo de baja viscosidad (8 [cP]) del campo Daqing en China. Al someter una muestra, la cual contenía agua en emulsión, a un esfuerzo cortante constante, variando la temperatura del crudo, la velocidad de deformación

y el campo eléctrico, representado por la tensión aplicada (0 a 2500 [V]), encontraron una reducción en la viscosidad del crudo para niveles de tensión hasta de 800 [V]; superado este umbral, *la viscosidad del mismo aumentó considerablemente*, este cambio es atribuido al efecto Joule térmico, haciendo que las fracciones livianas del crudo se evaporen por el aumento de la temperatura. Concluyen finalmente que el efecto electroreológico del petróleo crudo es evidente, ya que un campo eléctrico aplicado puede inducir su polarización, cambiando su estructura interna y propiedades reológicas; sin embargo, estas afirmaciones se basan únicamente en los cambios de viscosidad observados.

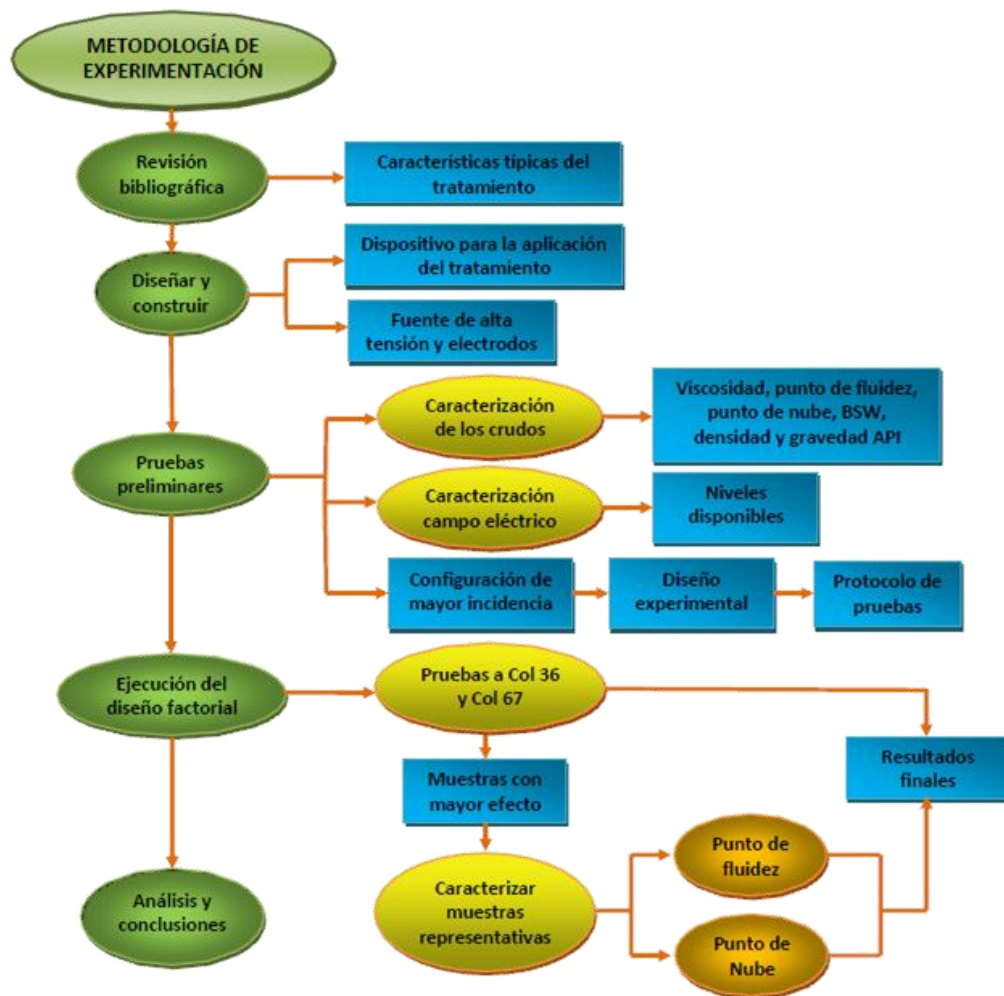
Tang H., Huang K. y Tao R. [27] diseñaron un sistema para simular el flujo de crudo en tubería cuando es aplicado un campo eléctrico en contacto directo y en la misma dirección del fluido. El arreglo experimental permite medir el caudal y la viscosidad, con y sin tratamiento a una muestra (°API 21), la cual es sometida a un campo eléctrico de 1200 [V/mm]. Los resultados muestran que el caudal aumenta significativamente entre 21% y 26% después de aplicar el tratamiento y la viscosidad se reduce un 21%. Para este sistema, el número de Reynolds es muy pequeño, por lo tanto su régimen de flujo siempre será laminar y estos resultados pueden ser extendidos a tuberías reales con un régimen de flujo similar. En términos energéticos comparado con el método de calefacción, es una técnica que consume menos energía (un 1% del método de calefacción), es rápida y por tanto más eficiente.

La falta de datos concluyentes en la literatura sobre el efecto de campo eléctrico en los crudos parafínicos hace que sea necesario realizar un estudio sobre la efectividad del tratamiento, adicionalmente, hasta el momento no ha podido ser explicado satisfactoriamente el mecanismo por el cual se produce tal cambio en las propiedades del petróleo, debido a su naturaleza compleja, esto hace que cada estudio de aplicabilidad del método sea empírico; por tal motivo, los resultados obtenidos de cada experimentación, solo son aplicables a cada crudo en particular.

2. METODOLOGÍA

Este capítulo resume la metodología utilizada durante el proceso de investigación y experimentación, todo el desarrollo se llevó a cabo en cinco etapas o procesos generales, que van desde la revisión bibliográfica hasta el análisis y conclusiones de los resultados finales; la Figura 1 sintetiza la secuencia y relación de los diferentes procesos y los resultados de los mismos.

Figura 1. Metodología de experimentación.



2.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Una vez realizado el estado del arte, se extrajo la información pertinente acerca de las diferentes disposiciones utilizadas para la aplicación del campo eléctrico al

crudo, seleccionando finalmente como guía para el trabajo, el equipo utilizado por Tao R. [27]; igualmente, se encontró que los niveles típicos del campo eléctrico aplicado al crudo van hasta unos 1200 [V/mm], por lo tanto, fue necesario considerar el uso de una fuente especial, para generar un alto nivel de tensión. Esta información preliminar fue la base principal sobre la cual se desarrollaron las etapas de diseño y construcción.

2.2 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

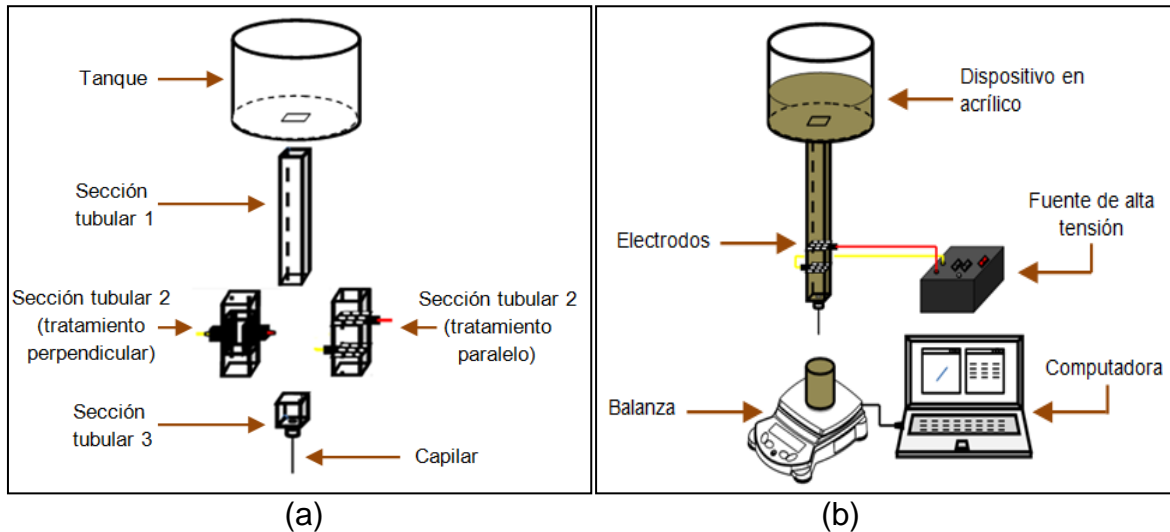
2.2.1 Dispositivo para la aplicación del tratamiento

Como se mencionó antes, para el diseño del equipo que permite el flujo del crudo y la aplicación del campo eléctrico, se tomó como referencia el dispositivo presentado por Tao R. [27], basado en un sistema tubular para aplicar el tratamiento y medir la viscosidad de la muestra. No obstante, el diseño aquí elaborado se encaminó a tener la posibilidad de aplicar el CE de forma paralela y perpendicular al flujo de crudo, la adecuación de diferentes capilares para variar el tiempo de exposición, garantizar el aislamiento de los puntos energizados y simplificar la instalación de todo el montaje. Vale la pena aclarar que este diseño se realizó dentro de la tesis de maestría “CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE UNA HERRAMIENTA MAGNÉTICA PARA INHIBIR LA PRECIPITACIÓN DE PARAFINAS DEL CRUDO DEL CAMPO COLORADO” en colaboración con otro trabajo de grado[23], desarrollado paralelamente.

El sistema está compuesto por dos partes fabricadas en acrílico cristal, la Figura 2(a) muestra el dispositivo completo; la parte superior es el *tanque de almacenamiento*, éste se conecta a un *tubo de descenso* de sección transversal cuadrada, que corresponde a tres secciones tubulares unidas entre sí, los detalles de las dimensiones de cada una de las partes del equipo se presentan en el Anexo A. Por otra parte, se utilizaron agujas hipodérmicas de diferentes diámetros como capilar, acopladas al final del tubo para variar el tiempo de exposición del crudo al CE; la recolección de los datos de la masa del crudo en el tiempo, necesaria para la estimación del flujo másico, se realizó por medio de una balanza

Adventurer Pro AV812, registrando la información directamente en un computador. La Figura 2(b), muestra un esquema de todo el montaje necesario para los ensayos, incluyendo la fuente de alta tensión descrita en la siguiente sección.

Figura 2. (a) Dispositivo para la aplicación del tratamiento, (b) montaje para los ensayos.



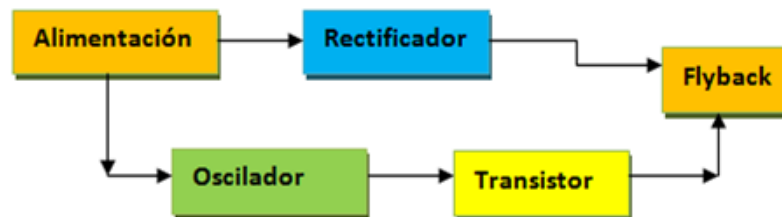
Fuente: Modificado de [23]

2.2.2 Fuente de alta tensión

La fuente de alta tensión necesaria para generar el campo eléctrico, se diseñó con base en un probador de flyback [6]. El circuito completo se divide en 5 bloques, como se presenta en la Figura 3; la primera etapa, es el bloque de alimentación que consiste en un transformador reductor para disminuir la tensión de 120 [V] a 12 [V] en el secundario; la etapa posterior equivale a un puente rectificador, el cual proporciona la tensión en corriente continua de entrada al devanado primario del transformador flyback; el bloque oscilador consiste básicamente en el circuito integrado LM555, el cual genera un tren de pulsos de una frecuencia de 15 [kHz], que funciona como señal de control para la apertura y cierre del circuito a través del bloque del transistor; el último bloque, corresponde al transformador flyback del tubo de rayos catódicos de un televisor, el nivel de tensión esperado a la salida es de unos 15 [kV] y se varía indirectamente por medio de un potenciómetro que modifica la frecuencia del oscilador. La

descripción completa del circuito electrónico y el principio de funcionamiento, se presentan en el Anexo B.

Figura 3. Diagrama de bloques del circuito de la fuente de AT.



2.3 PRUEBAS PRELIMINARES

2.3.1 Caracterización de los crudos

La caracterización de los crudos Col 36 y Col 67, comprende las medidas de la viscosidad, el punto de fluidez, el punto de nube, el contenido de agua y sedimentos (BSW), la densidad y la gravedad API. El propósito de esta caracterización, fue establecer valores de referencia para las muestras sin tratamiento, los resultados obtenidos se presentan en el capítulo 3. Cabe aclarar que estos pozos fueron seleccionados porque no les había sido aplicado ningún otro tipo de tratamiento que pudiera interferir con los resultados de esta investigación y adicionalmente, se encontraban en normal operación durante la recolección de las muestras.

2.3.2 Caracterización del campo eléctrico

El campo eléctrico entre los electrodos, se estimó indirectamente con base en la tensión aplicada y la separación de 2 [cm] entre ellos, para esto se tomó la aproximación dada por la ecuación 1 [26]; para la estimación de la tensión fue necesaria la construcción de un divisor de tensión para reducir el potencial en un factor de 100:1, permitiendo así, la posibilidad de realizar la medición con un voltímetro de baja tensión; las especificaciones técnicas del divisor se presentan en el Anexo C junto con las simulaciones preliminares realizadas con el software FEMM 4.2, para determinar la intensidad del campo eléctrico en la región de interés.

$$E = \frac{V_o}{d} \left[\frac{V}{mm} \right] \text{Ecuación. 1}$$

2.3.3 Elección de las placas paralelas al flujo como configuración de mayor efecto en el crudo

Esta selección se llevó a cabo luego de desarrollar una serie de ensayos sobre muestras de crudo Col 36, con las dos configuraciones para la aplicación del campo eléctrico. Se realizaron tres pruebas para cada uno de los arreglos, con el CE en el nivel 1 (alto) y el tiempo de exposición dado por el capilar 2 (medio), dejando fluir el crudo durante un minuto sin tratamiento y activando posteriormente el CE durante cuatro minutos.

2.4 EJECUCIÓN DEL DISEÑO FACTORIAL

2.4.1 Pruebas a Col 36 y Col 67

El diseño factorial realizado, se elaboró con base en las pautas generales presentadas por Montgomery [19]. Siguiendo estas recomendaciones, se seleccionó la intensidad del CE y el tiempo de exposición, como factores del diseño; para cada uno de ellos se establecieron 3 niveles, una vez contempladas las 9 combinaciones posibles entre los dos factores, todos los escenarios se replicaron en dos oportunidades, produciendo un total de 27 pruebas para cada uno de los crudos.

La propiedad elegida como variable respuesta fue el cambio en el flujo másico $\Delta\dot{m}$ en [g/s], que equivale a la diferencia entre el flujo másico de una corrida en blanco \dot{m}_o [g/s] y una con tratamiento \dot{m}_t [g/s] tal como lo indica la ecuación 2; la razón de esta elección, radica en poder evaluar el efecto en la movilidad del crudo después de exponerlo a un campo eléctrico. No se hizo directamente con la viscosidad, ya que su estimación es diferente para cada uno de los capilares utilizados, y por tanto, los resultados no son comparables.

$$\Delta\dot{m} = \dot{m}_o - \dot{m}_t [g/s] \text{ Ecuación. 2}$$

Así, un Δm positivo en la ecuación anterior se interpreta como una disminución del flujo másico una vez aplicado el tratamiento, por otra parte, valores negativos de Δm indican un aumento del flujo másico luego de ser tratado el crudo.

Todas las corridas del experimento, se realizaron con el siguiente protocolo:

- I. Se realiza el montaje del equipo, la adecuación del respectivo capilar y la conexión de la fuente y selección del nivel de intensidad del CE.
- II. Se carga el dispositivo con 1000 [ml] de crudo.
- III. Se establece la comunicación entre la balanza y la computadora para iniciar la toma de datos de masa, cada segundo.
- IV. Se inicia la prueba dejando fluir el crudo por un minuto luego del cual, se activa el campo eléctrico para llevar a cabo el tratamiento durante 4 [min], para un tiempo total de 5 [min] por prueba.
- V. Se desactiva el campo y se descargan los conectores de la fuente, para evacuar pequeñas cargas estáticas allí acumuladas.

Vale la pena aclarar que durante la estimación del flujo másico de una corrida en blanco, el campo eléctrico no fue encendido y la prueba tuvo una duración de 5 [min]. Por otra parte, también se debe señalar que todas las pruebas se realizaron a temperatura ambiente, ya que por las limitaciones de los instrumentos, el control de esta variable no era posible.

2.4.2 Caracterización de muestras representativas

Con el propósito de evaluar el método como alternativa de solución al problema de precipitación de parafinas, se extrajo del total de las pruebas, la condición que presentó mayor efecto en el tratamiento para cada crudo. A estas muestras se les realizaron medidas de la viscosidad, el punto de fluidez, el punto de nube y seguimiento de la viscosidad en el tiempo, para así evaluar los cambios de dichas propiedades en los casos más representativos del diseño de experimentos.

3. RESULTADOS

3.1 PRUEBAS PRELIMINARES

3.1.1 Caracterización de los crudos

En la Tabla 1 se presentan los resultados de la caracterización de los crudos de los pozos Col 36 y Col 67, seleccionados para determinar la efectividad del tratamiento con campos eléctricos. Tal como se puede observar, las propiedades son muy similares entre las dos muestras. En el Anexo D se describen con mayor detalle los métodos y técnicas utilizados.

Tabla 1. Caracterización de los crudos Col 36 y Col 67.

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

3.1.2 Capilares y tiempos de exposición

El tiempo de exposición al tratamiento se calculó por medio de la ecuación 3, con base en el flujo másico de las condiciones en blanco \dot{m}_o [g/s] de cada uno de los crudos, su densidad ρ [g/cm³] y el volumen de exposición V_{ol} [cm³]. La Tabla 2 presenta los resultados obtenidos junto con las dimensiones de cada una de las agujas; de estos resultados se evidencia que para un menor radio del capilar, se tiene un mayor tiempo de exposición, y de forma equivalente, para el crudo más denso (Col 67), el tiempo de exposición es mayor, ya que el crudo tarda más tiempo en atravesar la región entre las placas.

$$t_{exp} = \frac{V_{ol} * \rho}{\dot{m}_o} [s] \text{ Ecuación. 3}$$

Tabla 2. Dimensiones de los capilares y tiempos de exposición.

Aguja	Radio externo [mm]	Radio interno (R) [mm]	Longitud (L) [cm]	Tiempo de exposición (t_{exp}) Col 36 [s]	Tiempo de exposición (t_{exp}) Col 67 [s]
1 (Alto)	0,45	0,34	3,8	37,89	41,72
2 (Medio)	0,55	0,41	3,8	18,50	20,94
3 (Bajo)	0,8	0,64	3,8	3,76	3,87

3.1.3 Caracterización del campo eléctrico

La Tabla 3 muestra los valores de intensidad del CE (E) determinados para tres posiciones diferentes del potenciómetro del bloque oscilador, con base en la tensión proporcionada por la fuente; estos niveles de campo estuvieron determinados por las características del dispositivo, por esta razón no están igualmente espaciados.

Tabla 3. Niveles de campo eléctrico.

Posición del potenciómetro	Tensión medida en BT* [V]	Tensión de AT** (Vo) [V]	Intensidad de campo eléctrico estimada (E) [V/mm]
1 (Alto)	104,64	10464	523,20
2 (Medio)	62,11	6211	310,05
3 (Bajo)	55,82	5582	279,10

*Baja tensión

**Alta tensión

3.1.4 Elección de la configuración con mayor efecto

Con el fin de seleccionar la mejor disposición para aplicar el tratamiento (perpendicular o paralelo a la dirección del flujo), se realizaron pruebas con el crudo Col 36 para una intensidad de CE de 523,2 [V/mm] y un tiempo de exposición de 18,5 [s], siguiendo la metodología descrita en el capítulo 2. En la Tabla 4 se presentan los resultados para las dos configuraciones.

Tabla 4. Resultados para la selección de la configuración con mayor efecto.

Configuración	Delta de flujo másico ($\Delta\dot{m}$)			Promedio de $\Delta\dot{m}$
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	
Perpendicular	0,0063	0,0068	0,0078	0,0070± 0,0008
Paralela	0,0394	0,0414	0,0405	0,0404± 0,0010

Con base en los datos de la Tabla 4, se realizó un análisis para verificar que la diferencia en los resultados de los tratamientos, se debe realmente a una significancia estadística y no al error de experimentación; mediante el procedimiento estadístico de prueba *t* de dos muestras, se evalúa la relevancia de dicha diferencia [2], partiendo del supuesto que las dos poblaciones (tipos de tratamiento) tienen la misma varianza y las muestras tienen una distribución normal. Los resultados obtenidos por medio de Microsoft Excel 2007, son mostrados en la Tabla 5.

Tabla 5. Prueba *t* para las dos configuraciones de campo eléctrico aplicado.

Configuración	Media	Grados de libertad	Probabilidad de igualdad entre las medias	Estadístico <i>t</i>	Valor crítico
perpendicular	0,0070	4	1,3337*10 ⁻⁶	46,0183	3,4954
paralela	0,0404				

La probabilidad de igualdad entre las dos medias es aproximadamente cero (1,3337*10⁻⁶) y menor que el nivel de significancia seleccionado ($\alpha=0,05$), resultado que nos lleva a concluir que las dos configuraciones producen un efecto diferente (en magnitud) sobre el flujo másico del crudo, rechazando así la hipótesis nula ($H_0: X_1 - X_2 = 0$, donde *X* representa la media de las poblaciones). Una vez verificada la diferencia entre los dos tratamientos, se presentan los resultados obtenidos, la Tabla 6 muestra el promedio del delta de flujo másico para las dos disposiciones, junto con el cambio porcentual que representa dicho delta.

Tabla 6. Cambio en el flujo másico para las dos configuraciones de campo eléctrico.

Configuración	Promedio de flujo másico en blanco (\dot{m}_0) [g/s]*	Promedio de $\Delta\dot{m}$ [g/s]*	$\frac{\Delta\dot{m}}{\dot{m}_0} * 100$ [%]
Perpendicular	0,3300 ± 0,0011	0,0070 ± 0,0008	2,12
Paralela	0,3470 ± 0,0018	0,0404 ± 0,0010	11,64

*Promedio de 3 corridas

Estos resultados sugieren que la disposición espacial del CE respecto a la dirección del flujo, tiene influencia sobre el efecto en el crudo, siendo mayor cuando éste es orientado de forma paralela. En consecuencia, para el caso en el

cual el flujo y el campo son perpendiculares, el cambio fue solo de 2,12% y aunque hay un efecto no es la disposición más relevante. Por lo tanto, se seleccionó como mejor configuración para aplicar el tratamiento *las placas que generan el CE paralelo a la dirección del flujo*, este resultado es acorde con la orientación del campo dada por algunos autores [27], [28], [30].

3.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES

Las Tablas 7 y 8 presentan la información recopilada en la ejecución de los ensayos propuestos en el diseño factorial.

Tabla 7. Diseño de experimentos para el crudo Col 36.

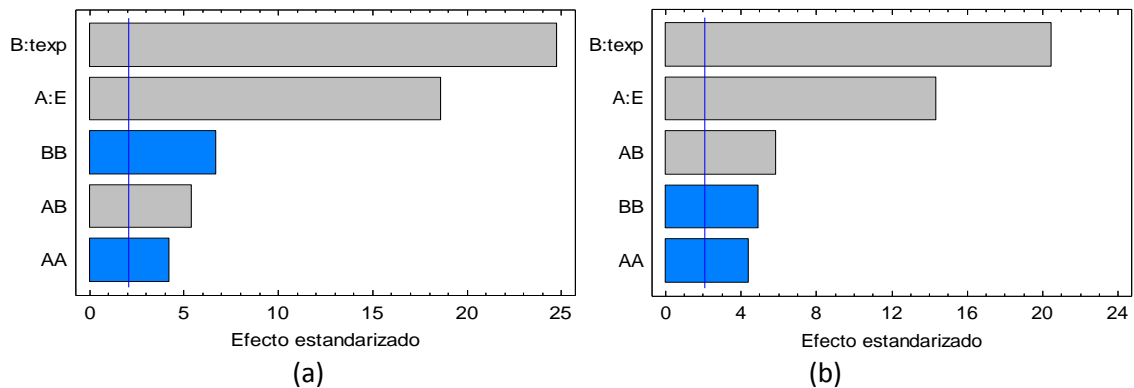
Intensidad de CE (E) [V/mm]	Tiempo de exposición (t_{exp}) [s]	Delta de flujo másico ($\Delta\dot{m}$) [g/s]			Promedio de $\Delta\dot{m}$ [g/s]
		Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	
279,1	3,76	0,001	0,0016	-0,0013	0,0009 \pm 0,0025
310,1		0,0064	0,0054	0,0058	0,0059 \pm 0,0025
523,2		0,0126	0,0131	0,0098	0,0118 \pm 0,0025
279,1	18,5	0,0149	0,0123	0,0153	0,0142 \pm 0,0025
310,05		0,0227	0,0188	0,0222	0,0212 \pm 0,0025
523,2		0,0394	0,0414	0,0405	0,0404 \pm 0,0025
279,1	37,89	0,0226	0,0213	0,0227	0,0222 \pm 0,0025
310,05		0,0337	0,0310	0,0315	0,0321 \pm 0,0025
523,2		0,0505	0,0498	0,0489	0,0497 \pm 0,0025

Tabla 8. Diseño de experimentos para el crudo Col 67.

Intensidad de CE (E) [V/mm]	Tiempo de exposición (t_{exp}) [s]	Delta de flujo másico ($\Delta\dot{m}$) [g/s]			Promedio de $\Delta\dot{m}$ [g/s]
		Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	
279,1	3,87	0,0011	0,0018	0,0004	0,0007 \pm 0,0028
310,05		0,0042	0,0039	0,0054	0,0045 \pm 0,0028
523,2		0,0091	0,0062	0,0052	0,0068 \pm 0,0028
279,1	20,94	0,0103	0,0116	0,0082	0,0100 \pm 0,0028
310,05		0,0219	0,0194	0,0185	0,0199 \pm 0,0028
523,2		0,0369	0,0357	0,0327	0,0351 \pm 0,0028
279,1	41,72	0,0170	0,0192	0,0183	0,0182 \pm 0,0028
310,05		0,0289	0,0292	0,0283	0,0288 \pm 0,0028
523,2		0,0432	0,0451	0,0441	0,0441 \pm 0,0028

Con base en estos resultados se realizó un análisis estadístico con el software STATGRAPHICS Centurion, por medio del cual, se obtuvo el diagrama de pareto estandarizado para cada uno de los crudos (ver Figura 4), buscando determinar el efecto de los factores, incluyendo su interacción. Las barras de color gris indican una proporcionalidad directa entre el factor analizado y el cambio en el flujo, mientras que las barras de color azul representan lo contrario; cualquier barra más allá de la línea vertical azul, es estadísticamente significativa. En los dos casos, los esquemas señalan que el tiempo de exposición representa el mayor efecto sobre el cambio en el flujo másico, seguido por la intensidad del CE y por último los demás factores²; estos resultados se sustentan en el análisis de varianza realizado (ver Anexo E), donde la prueba estadística F muestra que dichos efectos son diferentes de cero, con un nivel de confianza del 95% [2].

Figura 4. (a) Diagrama de pareto estandarizado Col 36, (b) diagrama de pareto estandarizado Col 67.



Por otra parte, una vez conocida la significancia de los diferentes factores, se puede establecer un modelo matemático para predecir la respuesta de los crudos a diferentes condiciones del tratamiento, las ecuaciones 4 y 5, son el resultado de la regresión para los datos del crudo Col 36 y Col 67, respectivamente:

$$\Delta \dot{m}_{Col\ 36} = -0,126324 + 0,000626 * E + 0,0012 * t_{exp} - 7,12436 * 10^{-7} * E^2 + 0,000002 * E * t_{exp} - 0,000024 * t_{exp}^2 \text{ Ecuación. 4}$$

²El término AB representa la interacción entre el E y t_{exp} , el término AA equivale al efecto cuadrático de E y finalmente, BB corresponde al efecto cuadrático del t_{exp} .

$$\Delta m_{Col67} = -0,139505 + 0,000714 * E + 0,000719 * t_{exp} - 8,45626 * 10^{-7} * E^2 + 0,000002 * E * t_{exp} - 0,000016 * t_{exp}^2 \text{Ecuación. 5}$$

Las Figuras 5 y 6 representan con mayor claridad el comportamiento del *cambio del flujo másico* para los dos crudos, los puntos señalados en las superficies de contorno corresponden a las combinaciones estudiadas en el diseño de experimentos (Tablas 7 y 8); en los dos casos, la tendencia de Δm muestra un aumento a medida que la E o el tiempo aumentan, de tal forma, que el máximo cambio predicho en el flujo másico equivale a 0,052 [g/s] para el Col 36 y 0,0464 [g/s] para el Col 67. En los dos crudos, este cambio se presenta para el nivel alto de campo (523,2 [V/mm]) y el mayor tiempo de exposición (37,89 y 41,72 [s], para el Col 36 y Col 67, respectivamente). Estos escenarios se seleccionaron como las *muestras representativas* del estudio, y sus características se analizan en la siguiente sección.

Figura 5. Superficie de respuesta y de contorno, para el cambio del flujo másico del crudo Col 36.

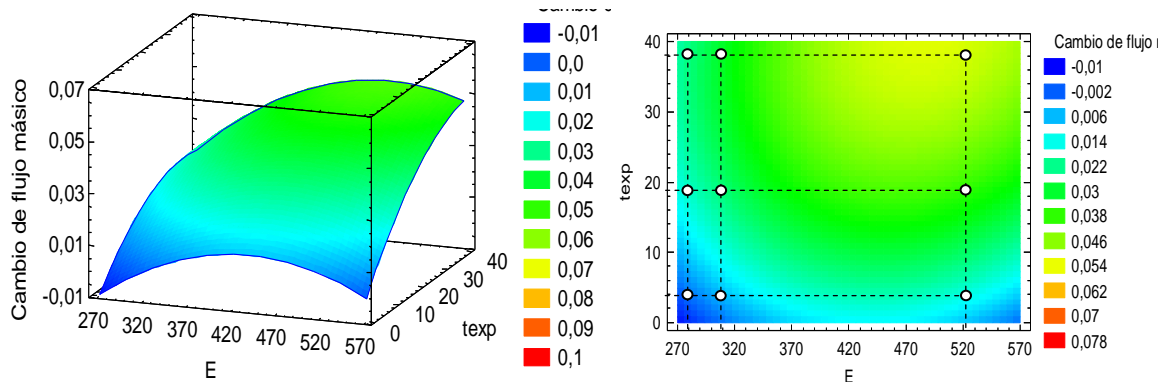
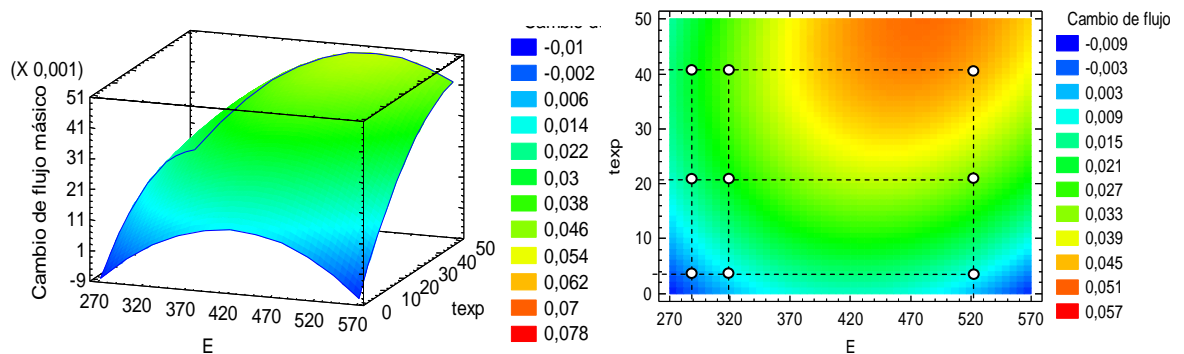


Figura 6. Superficie de respuesta y de contorno, para el cambio del flujo másico del crudo Col 67.



3.3 CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS REPRESENTATIVAS

La Tabla 9 muestra las condiciones y resultados de los ensayos que presentaron el mayor cambio en el flujo másico y por lo tanto, un mayor efecto en el tratamiento.

Tabla 9. Condiciones representativas.

Crudo	E [V/mm]	t_{exp} [s]	Flujo másico en blanco (\dot{m}_o) [g/s]	Delta de flujo másico ($\Delta\dot{m}$) [g/s]	$\frac{\Delta\dot{m}}{\dot{m}_o} * 100$ [%]
Col 36	523,2	37,89	0,1699	0,0505	29,72
Col 67	523,2	41,72	0,1539	0,0451	29,30

Adicionalmente, a partir del flujo másico, se pudo realizar una estimación *in situ* de la viscosidad de los crudos; para los dos ensayos representativos, se evaluó con la ecuación 6 [5], la viscosidad en blanco y con tratamiento. La Tabla 10, muestra los resultados junto con el cambio porcentual que se presentó en la viscosidad, una vez las muestras son sometidas al tratamiento; también se presenta la estimación del número de Reynolds, con el propósito de verificar que el flujo es laminar ($N_{Re} < 2100$) y la ecuación 6 se puede aplicar correctamente.

$$\mu = \frac{\pi * R^4 * \rho^2 * g * \Delta h}{8 * \dot{m} * L} \text{ [cP]} \text{ Ecuación. 6}$$

Donde μ es la viscosidad dinámica, R [cm] el radio interno del capilar, ρ [g/cm³] la densidad del crudo, g [cm/s²] la gravedad, Δh [cm] corresponde a la diferencia de altura entre el nivel superior del crudo en el tanque y el inicio del capilar, \dot{m} [g/s] flujo másico y finalmente L [cm] es la longitud del capilar.

Tabla 10. Viscosidad estimada *in situ* para las pruebas representativas.

Crudo	Viscosidad en blanco (μ_o) [cP]	Viscosidad muestra tratada (μ_t) [cP]	Cambio porcentual de la viscosidad [%]	Número de Reynolds muestras en blanco	Número de Reynolds muestras tratadas
Col 36	2,7684	3,9393	42,29	227,10	111,31
Col 67	3,1331	4,4318	41,45	185,04	92,48

Estos resultados muestran que la respuesta de los dos crudos ante el tratamiento eléctrico es similar, y equivale a un aumento de la viscosidad; dicha respuesta es acorde con las observaciones realizadas por Zhang *et al.* [33] en donde superado cierto valor de campo eléctrico, la viscosidad presentó un aumento; sin embargo, para bajos niveles de tensión, ellos observaron una disminución en esta propiedad. Por otra parte, los resultados de la Tabla 10 difieren de las observaciones reportadas por otros autores [17], [27],[28] quienes, para diversas condiciones, siempre encontraron una reducción en la viscosidad.

Al hacer un análisis riguroso, posiblemente la ecuación 6 puede no representar bien las medidas de viscosidad, debido a que es obtenida bajo la presunción que la única fuerza que afecta al fluido es la producida por el campo gravitacional, sin tener en cuenta otros tipos de fuerzas como la generada por el campo eléctrico, posiblemente en el mismo concepto de una fuerza tipo Lorentz. Por esta razón, se realizaron medidas con ayuda del viscosímetro OFITE, con el fin de confirmar el efecto encontrado; en la Tabla 11 se presentan las medidas de viscosidad obtenidas para cada uno de los crudos, justo después de aplicado el tratamiento.

Tabla 11. Viscosidad medida con el viscosímetro OFITE para las pruebas representativas.

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

Estos datos al ser de mayor precisión, corroboran la observación de un aumento en la viscosidad. No obstante, las estimaciones obtenidas con la ecuación 5, pueden ser tomadas como una evaluación preliminar de la viscosidad de los crudos, ya que al igual que las medidas del viscosímetro OFITE, evidencian un aumento de la viscosidad cercano al 40% en las muestras sometidas a un campo eléctrico de 523,2 [V/mm] durante aproximadamente 40 [s]. Por otro lado, es importante señalar que otras investigaciones han encontrado resultados favorables, donde la movilidad del crudo se mejora al ser expuesto a un campo

eléctrico, realizando sus estudios sobre crudos pesados y emulsiones [9], [27],[28], [29]; contrario al caso en cuestión, donde el Col 36 y Col 67 son crudos livianos parafínicos con baja cantidad de agua en emulsión.

Adicionalmente, se realizó de nuevo el tratamiento bajo las condiciones de E y t_{exp} de mayor efecto, para determinar posibles cambios en el punto de nube y el punto de fluidez, de los crudos. Así mismo, se hizo un seguimiento de la viscosidad en el tiempo, con el fin de determinar la duración del efecto del CE.

Los resultados del punto de fluidez para las muestras representativas, después del tratamiento, se muestran en la Tabla 12:

Tabla 12. Punto de fluidez para las muestras de crudo en blanco y con tratamiento eléctrico.

Crudo	Punto de fluidez en blanco [°C]	Punto de fluidez con tratamiento [°C]	Aumento [°C]
Col 36	-21	-15	6
Col 67	-27	-21	6

Para los dos casos el punto de fluidez aumentó en 6 [°C] luego de ser aplicado el tratamiento eléctrico, esto puede ser interpretado como una reducción en la movilidad a una temperatura más alta, lo cual es contrario al efecto deseado.

Por otra parte, el punto de nube es un indicador directo de la temperatura a la que inicia el proceso de precipitación [24]. En la Tabla 13, se puede ver que el punto de nube para el crudo Col 36 es inicialmente de 22,24 [°C] y luego de ser aplicado el tratamiento eléctrico, éste aumenta hasta 30,51 [°C]. Igualmente se puede observar el cambio para el crudo Col 67, en esta ocasión el punto de nube aumentó de 21,38 [°C] a 25,69 [°C].

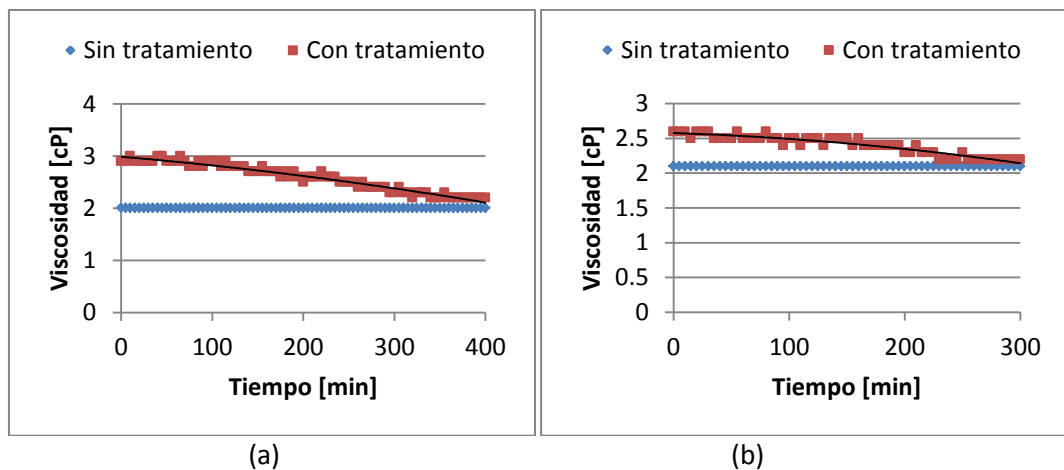
Tabla 13. Punto de nube para las muestras de crudo en blanco y con tratamiento eléctrico.

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

Este cambio se puede entender de la siguiente manera, al aplicar el tratamiento al crudo se va a presentar la deposición de orgánicos en la tubería a temperaturas más altas, cuando lo apropiado es que esto se alcance a temperaturas más bajas o no suceda. Por lo tanto, bajo las condiciones planteadas, este tratamiento produce una aceleración del proceso de deposición y no es recomendado para los pozos productores con los cuales se hizo el estudio.

La duración del efecto del tratamiento eléctrico se obtuvo midiendo la viscosidad de las muestras de crudo en función del tiempo luego de ser tratadas, el resultado se observa en la Figura 7.

Figura 7. (a) Cambio de la viscosidad en el tiempo para Col 36 a 25°C y 600 rpm. **(b)** Cambio de la viscosidad en el tiempo para Col 67 a 25°C y 600 rpm.



Para los dos casos se ve una reducción en la viscosidad a medida que pasa el tiempo, siendo de 4 horas para el crudo Col 67 y 6 horas, aproximadamente para el crudo Col 36. Esto se puede contrastar con los resultados reportados por Tao R. y Xu X. [28] en donde la duración del efecto fue de 8 horas para un crudo asfáltico. Sin embargo, como la viscosidad fue menor luego del tratamiento, ellos observaron un aumento progresivo en el tiempo hasta retomar su valor original, lo cual difiere con los resultados de esta investigación.

CONCLUSIONES

- La orientación en la que es aplicado el tratamiento, el tiempo de exposición y la intensidad del campo eléctrico, influyen en el comportamiento del flujo de crudo; así, se encontró que cuando la dirección del campo y del flujo son la misma, y se tiene el mayor tiempo de exposición (aproximadamente 40 [s]) junto con un alto nivel de campo eléctrico (523,2 [V/mm]), se presenta la disminución más significativa en el flujo másico (alrededor de 30%).
- La aplicación de campos eléctricos en el crudo de los pozos Col 36 y Col 67, produjo un aumento de la viscosidad, que conlleva a una menor movilidad del crudo. El efecto de este tratamiento duró aproximadamente entre 4 y 6 horas, tiempo después del cual la viscosidad retornó a su valor original.
- Al aplicar el tratamiento eléctrico en los dos crudos, a las condiciones que mostraron un mayor cambio en el flujo másico, se obtuvo un aumento en el punto de nube y el punto de fluidez. Estos resultados sugieren que la técnica acelera el proceso de deposición de orgánicos, por lo tanto no se recomienda implementarla en los pozos estudiados.

RECOMENDACIONES

- Realizar estudios de aplicabilidad del tratamiento eléctrico sobre crudos diferentes a los utilizados en esta investigación, especialmente sobre crudos pesados colombianos, ya que de acuerdo con algunas publicaciones recientes esta técnica es efectiva y podría mejorar la movilidad de dichos crudos.
- Se recomienda dar continuidad a estudios que permitan simular las condiciones de pozo, debido a que las pruebas experimentales se realizaron en condiciones ambientales, por la limitación en los equipos e instrumentos.
- Investigar acerca de los mecanismos por medio de los cuales un campo eléctrico produce cambios en las propiedades del petróleo (viscosidad, punto de fluidez y punto de nube), puesto que hasta el momento no ha podido ser explicada satisfactoriamente la causa de este efecto, y así poder determinar el tipo de crudos con los cuales el tratamiento es efectivo.
- Se recomienda diseñar y construir una fuente de alta tensión con un rango de operación más amplio y una mayor precisión, debido a que en esta investigación no se lograron aplicar los niveles de campo eléctrico reportados por algunos autores.

BIBLIOGRAFÍA

- [1]. ACRILICO 100%. Propiedades. En: Propiedades mecánicas. [En línea]. Consultado el 10 de junio de 2012. Disponible en: <http://uruguay334.wordpress.com/category/informacion-tecnica/>
- [2]. ANDERSON, David R.; SWEENEY, Dennis J. y WILLIAMS, Thomas A. Estadística para administración y economía. 10 ed. México: Cengage Learning Editores, S.A., 2008. 1004p.
- [3]. ARIZA LEÓN, Emiliano. Determinación del umbral de cristalización de las parafinas en el crudo del Campo Colorado. Tesis de Maestría. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2008. 153p.
- [4]. BARKER, K.M., *et al.* Crude Oils of Kentucky and Tennessee: Characteristics, Problems and Solution. Society of Petroleum Engineers. Lexington, Kentucky USA, 2007.
- [5]. BIRD, R. Byron; STEWART, Warren E. y LIGHTFOOT, Edwin N. Transport phenomena. 2 ed. USA: WILEY John & Sons, 2006. 1062p.
- [6]. BOTELLO, Luis H. Artículo, Probador de flyback, escrito por José Luis Orozco. [Correo electrónico]. Mensaje enviado a Jerson A. Pinzón. 18 de mayo de 2012.
- [7]. BRITISH PETROLEUM COMPANY. BP statistical review of world energy, June 2009. Consultado el 8 de julio de 2012. Disponible en: www.bp.com
- [8]. COMUNIDAD DE ELECTRÓNICOS. Sonda para medición de alto voltaje. En: comunidad de electrónicos. [En línea]. Consultado 28 de junio de 2012. Disponible en: <http://www.comunidadelectronicos.com/proyectos/sonda-AV.htm>
- [9]. CRISTANCHO VELASCO, Diana y HOYOS ROMÁN, Jorge Mario. Procedimientos metodológicos para la caracterización de campos maduros. Aplicación a los fluidos del campo Colorado. Trabajo de grado Ingeniero de Petróleos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos, 2008. 177p.
- [10]. DOTTO, M.E.R., *et al.* Influence of hydrogenated amorphous carbon coatings on the formation of paraffin deposits. Universidad federal do rio de janeiro, brazil. 2006.

- [11]. ECOPETROL S.A. La hora de los maduros. Carta petrolera. Edición 108. Bogotá D.C. Abril-Mayo, 2004. [En línea]. Consultado el 8 de julio de 2012. Disponible en: http://www.ecopetrol.com.co/especiales/carta_petrolera108/rev_produccion.htm
- [12]. ELÉCTRICOS ONLINE. Tabla de constantes dieléctricas. En: Eléctricos OnLine. [En línea]. Consultado el 10 de junio de 2012. Disponible en: http://electricosonline.com/Privado/Utilidades/constantes_dielectricas.htm
- [13]. Evdokimov, Igor y Kornishin, Konstantin. Apparent disaggregation of colloids in a magnetically treated crude oil. Energy&Fuels. Moscow, Russia, 2009.
- [14]. GOLDWASSER, Samuel M. Los transformadores flyback. 3.6 La construcción del flyback. En: Comunidad de electrónicos. [En línea]. Consultado el 20 de junio de 2012. Disponible en: <http://www.comunidadelectronicos.com/articulos/flyback.htm>
- [15]. HAYT, William H.; KEMMERLY, Jack E. y DURBIN, Steven M. Análisis de circuitos en ingeniería. 7 ed. México. McGraw Hill, 2007. 827p.
- [16]. KRONJAEGER, Jochen. Flyback transformers. En: Jochen's High Voltage. [En línea]. Consultado 24 de junio de 2012. Disponible en: <http://www.kronjaeger.com/hv/hv/src/fly/index.html>
- [17]. Less, Simone; Hannisdal, Andreas y Sjöblom Johan. 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, September 2008.
- [18]. MEEKER, David. Finite Element Method Magnetics: User's Manual, 2010. 158p. [En línea]. Consultado el 10 de junio de 2012. Disponible en: <http://www.femm.info/Archives/doc/manual42.pdf>
- [19]. MONTGOMERY, Douglas C. Diseño y análisis de experimentos. 2 ed. México. WILEY John & Sons, 2004.681p.
- [20]. NARVÁEZ RINCÓN, Paulo César. Fuentes convencionales y no convencionales de energía: estado actual y perspectivas. Universidad Nacional de Colombia, Ingeniería e Investigación., Vol. 30, No. 3, Diciembre 2010. 165-173 p.
- [21]. NATIONAL PROGRAMME ON TECHNOLOGY ENHANCED LEARNING. Module 3, DC to DC Converters, lesson 22. Fly-back Type switched mode power supply. Version 2 EE IIT. [En línea]. Consultado 24 de junio de 2012. Disponible en: [http://nptel.iitm.ac.in/courses/Webcourse-contents/IIT%20Kharagpur/Power%20Electronics/PDF/L-22\(DP\)\(PE\)%20\(\(EE\)NPTEL\).pdf](http://nptel.iitm.ac.in/courses/Webcourse-contents/IIT%20Kharagpur/Power%20Electronics/PDF/L-22(DP)(PE)%20((EE)NPTEL).pdf)

- [22]. NGUYEN, Phuong Tung, et al. Studying the mechanism of magnetic field influence on paraffin crude oil viscosity and wax deposition reductions, paper prepared for presentation at SPE Asia pacific oil and gas conference and exhibition held in Jakarta, Indonesia, 17-19 April. 2001.
- [23]. ORTIZ CASTRO, Ángela Marcela y RIBEROS MONTERO, Sergio Mario. Estudio de la influencia del agua en la movilidad de crudos parafínicos bajo el efecto de un campo eléctrico externo. Tesis de grado Ingeniero Químico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2012. 82p.
- [24]. Outlaw James, Ye Peng. Wax appearance temperature detection by DSC. Application note, Perkin Elmer, Inc., 2011.
- [25]. SANDOVAL CAMACHO, Efraín y SUÁREZ MAYORGA, Jairo. Control magnético de parafinas en el campo Lisama. Tesis de grado Ingeniero de Petróleos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos, 1991. 95p.
- [26]. SERWAY, Raymond A. y BEICHNER, Robert J. Física para ciencia e ingeniería. 4 ed. México. McGRAW-HILL, 2002. Tomo II.
- [27]. TANG, Hong; HUANG, Ke y TAO R. Electrorheology improves transportation of crude oil. Journal of Intelligent Material Systems and Structures. Philadelphia, USA, 2011.
- [28]. TAO, R. y XU, X. Reducing the viscosity of crude oil by pulsed electric or magnetic field. Energy & Fuels. Philadelphia, USA, 2006.
- [29]. TAO, R. Final report: Reducing the viscosity of crude oil by pulsed electric or magnetic field. Department of Physics, Temple University Philadelphia, Philadelphia, USA, 2008.
- [30]. TAO, R. The physical mechanism to reduce viscosity of liquid suspensions. International Journal of Modern Physics B Vol. 21, Nos. 28 & 29. Philadelphia, USA, 2007.
- [31]. UNIVERSIDAD DE LAS AMERICAS PUEBLA. Capítulo 5 análisis y resultados. En: La Catarina. [En línea]. Consultado 06 de diciembre de 2012. Disponible en: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lmnf/de_d_ac/capitulo5.pdf

[32]. VILLABONA, César y GONZÁLEZ, Diana. Mejora de la movilidad del crudo parafínico mediante campos magnéticos. Tesis de grado Ingeniero Electrónico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica Y Telecomunicaciones 2009. 117p.

[33]. ZHANG, Jihong; CHEN, Fangfang y ZHANG Nan. The electrorheological effect study of crude oil under the applied electric field. Physical and Numerical Simulation of Geotechnical Engineering 2nd ISSUE. China, 2011.

ANEXO A

SISTEMA PARA LA APLICACIÓN DEL TRATAMIENTO

A.1 SISTEMA DE TRATAMIENTO ELÉCTRICO

El presente anexo muestra en detalle las características del equipo utilizado para la aplicación del tratamiento eléctrico, la construcción del mismo se llevó a cabo en acrílico cristal, calibre 5 [mm]; el sistema en general se divide en dos partes: tanque de almacenamiento y tubo de descenso (ver Figura 8), el tanque consiste en un cilindro de 20 [cm] de diámetro interno y 16 [cm] de altura, las dimensiones exactas se muestran en la Figura 9, el propósito de éste, es almacenar un volumen considerable de crudo, de tal forma que el flujo a través del capilar no represente variaciones significativas del nivel del líquido.

Figura 8. Sistema para el tratamiento eléctrico.

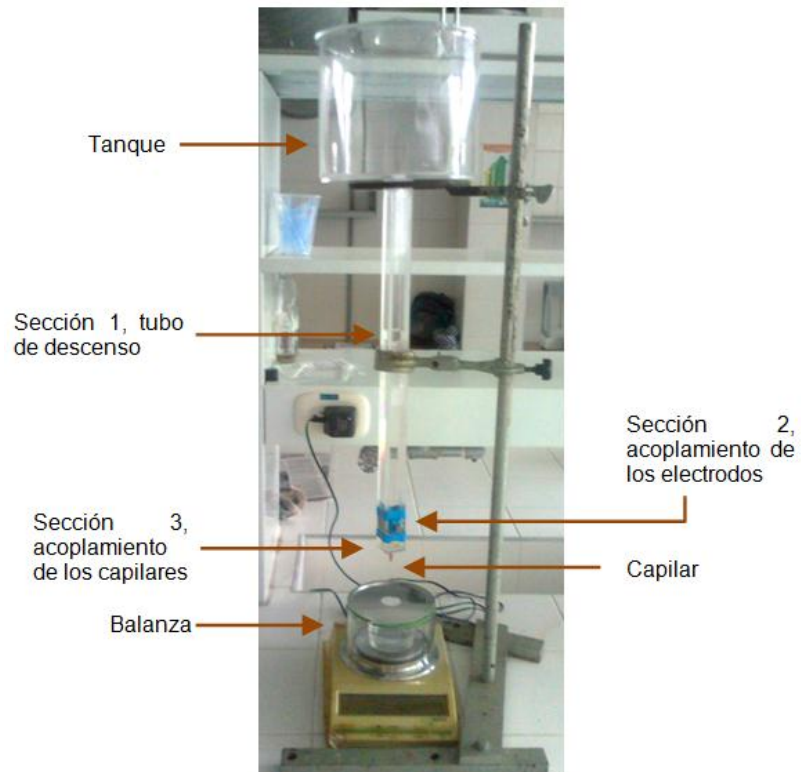
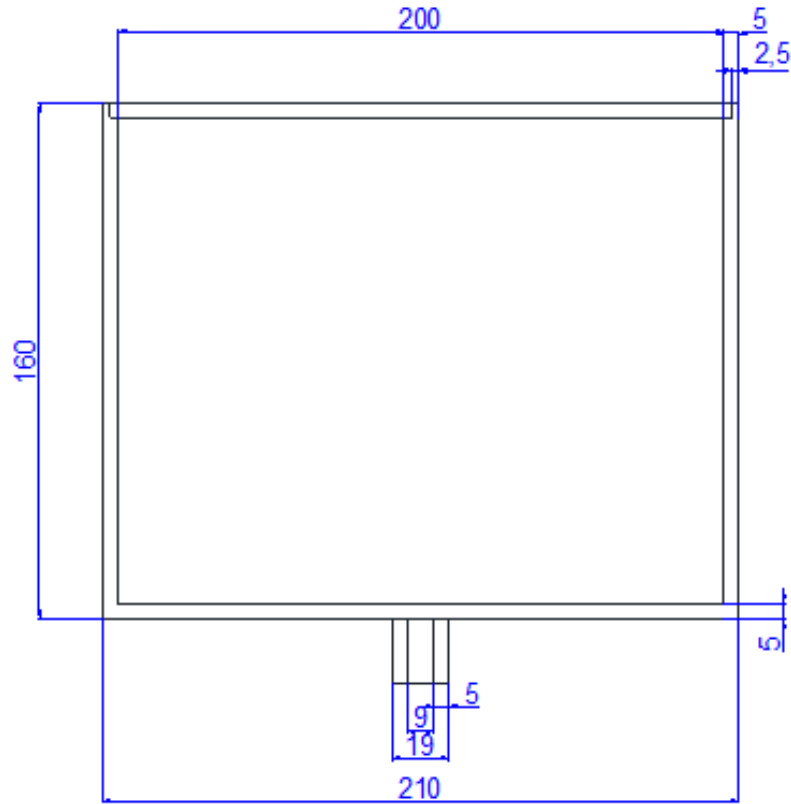


Figura 9. Tanque de almacenamiento (dimensiones en mm).



El tubo de descenso, consiste en un ducto de sección transversal cuadrada (2cm*2cm) y se compone de tres piezas, la primera de ellas, mostrada en la Figura 10, es un tramo de 45 [cm] de largo, que se acopla en su parte superior al tanque de almacenamiento. La segunda sección del tubo tiene dos configuraciones, una para cada par de electrodos, permitiendo así, la variación de la dirección del tratamiento; para el campo paralelo, los electrodos se ajustan en la parte superior e inferior de esta pieza, por medio de dos ranuras, cada una en una cara opuesta del ducto, ver Figura 11 (a). Para el campo perpendicular, las placas encajan en las caras opuestas del tubo, ambas ubicadas al mismo nivel, para garantizar la uniformidad del campo, la Figura 11 (b) muestra esta sección.

Figura 10. Sección 1, del tubo de descenso (dimensiones en mm).

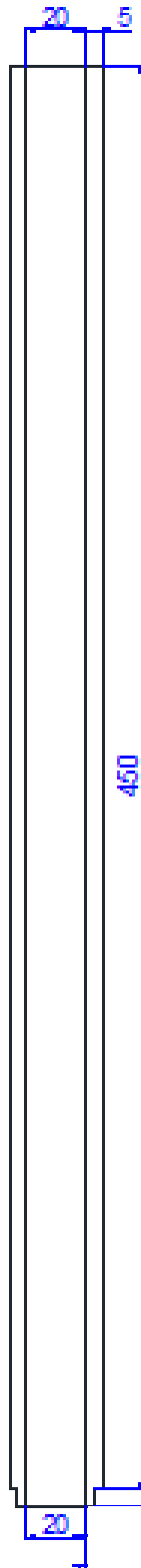


Figura 11. Sección 2, acoplamiento de los electodos (a) tratamiento paralelo, (b) tratamiento perpendicular (dimensiones en mm).

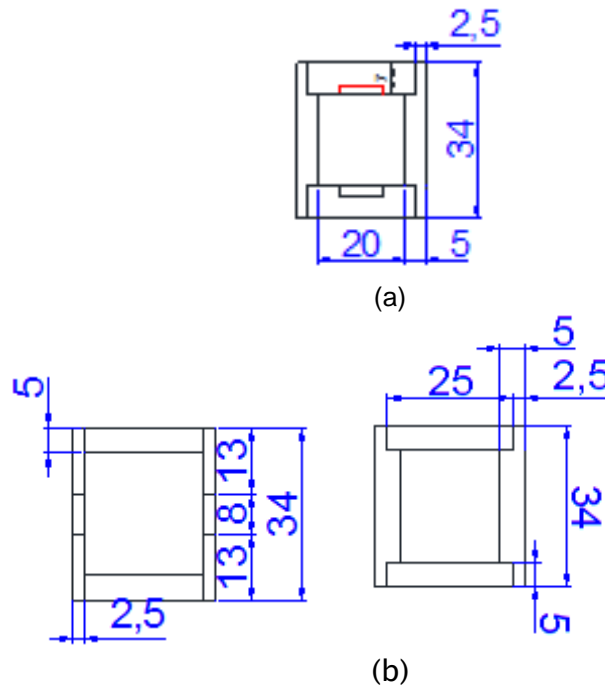
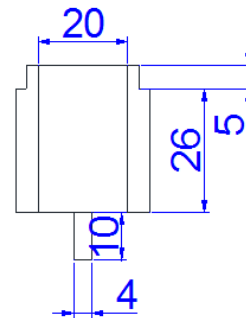


Figura 12. Sección 3, acoplamiento de los capilares (dimensiones en mm).



La tercera pieza, cierra el tubo de descenso y permite la adecuación de los capilares; en su base tiene acoplada la boquilla de una jeringa, facilitando así, la instalación de las agujas hipodérmicas que se usaron como capilar para el viscosímetro. Las dimensiones de esta pieza se muestran en la Figura 12.

ANEXO B

FUENTE DE AT Y GENERACIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO

B.1. FUENTE DE ALTA TENSIÓN

Para generar un campo de 1200 [V/mm] entre dos electrodos en forma de placas, separados 2 [cm], es necesario energizar aproximadamente con una tensión de 24000 [V], este valor es bastante elevado y difícil de obtener sin las adecuadas instalaciones eléctricas, como un transformador de este nivel de tensión y el respectivo sistema de protección y puesta a tierra; por esta razón, se buscó una solución más sencilla y segura, que consiste en un probador de transformadores flyback, este tipo de transformador se utiliza comúnmente en el circuito del tubo de rayos catódicos de un televisor, éste genera cerca de 15000 [V] de naturaleza continua y con el cual se pueden producir aproximadamente 750 [V/mm] con los electrodos a la distancia ya mencionada.

El flyback, consiste en dos bobinados arrollados sobre un núcleo de ferrita con un pequeño entrehierro; los valores detallados de las características de este equipo son difíciles de definir para un dispositivo en particular, ya que su construcción varía de un fabricante a otro y de una aplicación a otra; no obstante, típicamente el entrehierro es de unos pocos milímetros, el devanado primario es comúnmente de 100 vueltas, mientras que el devanado secundario o de alta tensión, está constituido por miles de vueltas [14].

El principio de funcionamiento de este transformador, se fundamenta esencialmente en la característica tensión-corriente de una bobina y en el efecto inductivo en un transformador común, el modelo matemático que describe estas características se muestra en las ecuaciones 7 y 8 [21]:

$$v = L \frac{di}{dt} [V] \text{Ecuación. 7}$$

Donde: v , tensión de la bobina

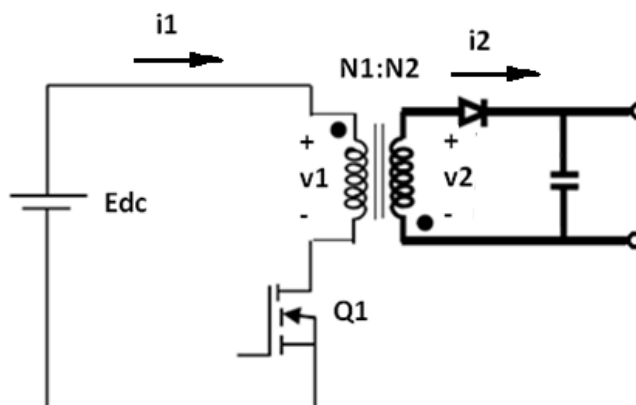
i , corriente a través de la bobina
 L , inductancia equivalente de la bobina

$$\frac{v_1}{N_1} = \frac{v_2}{N_2} \text{Ecuación. 8}$$

Donde: v_1 , tensión del devanado primario
 v_2 , tensión del devanado secundario
 N_1 , número de vueltas del devanado primario
 N_2 , número de vueltas del devanado secundario

Por su parte, la Figura 13 presenta el esquema básico de este sistema; cuando el transistor **Q1** está cerrado, el devanado o bobina primaria se alimenta con una corriente directa i_1 , ésta crece linealmente mientras que en el devanado secundario no aparece corriente por la acción del diodo; de forma equivalente, en el devanado primario se establece un voltaje igual al de alimentación **Edc**, y en el secundario no se induce tensión ya que v_1 es constante. Una vez se corta el suministro de corriente, abriendo el transistor, la corriente i_1 sufre una caída abrupta y el valor de $\frac{di}{dt}$ toma un valor negativo muy grande, haciendo que la tensión del devanado primario alcance una magnitud alrededor de 700 [V] [16], este cambio induce una tensión en el secundario igual a $v_2 = \frac{N_2}{N_1} * v_1$ [21], que equivale a la salida de alta tensión que se busca aprovechar; esta tensión produce una corriente i_2 para cargar el condensador, permitiendo que éste mantenga aproximadamente constante el nivel de voltaje a la salida del circuito, una vez la tensión inducida ha desaparecido; posteriormente el transistor se cierra nuevamente y el ciclo se reinicia, obteniéndose a la salida una tensión de naturaleza continua con un valor entre 10 y 20 [kV], de acuerdo al flyback que se esté utilizando [14].

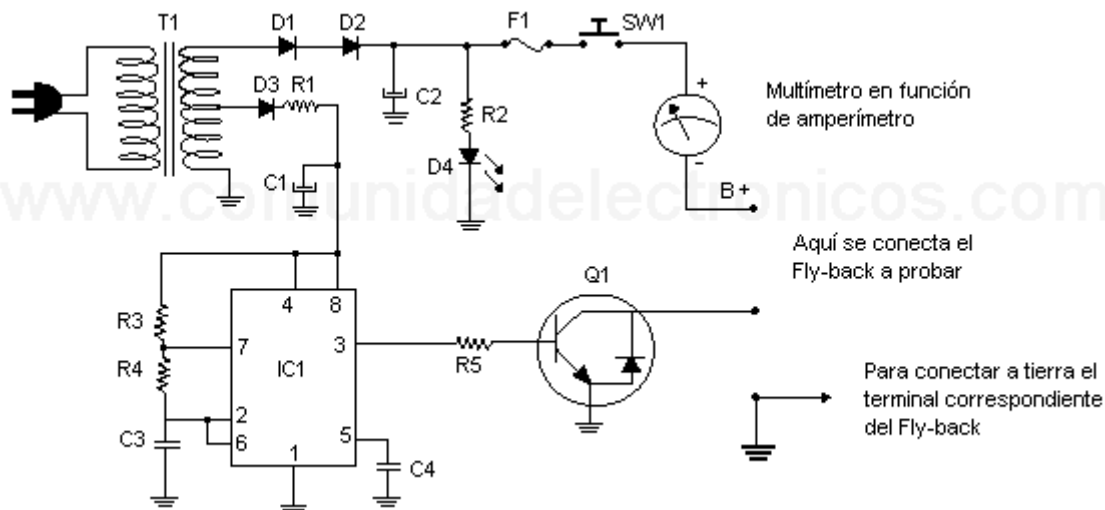
Figura 13. Esquema básico del transformador flyback.



Fuente: Modificado de [21]

La Figura 14 corresponde al circuito del probador, la tensión en el secundario del transformador T1, es de 12/24 [V], y se rectifica por medio de los diodos D1, D2 y D3, para alimentar los componentes electrónicos del sistema; el circuito integrado IC1 hace referencia al oscilador LM 555, que genera la señal de control para el transistor Q1, el pulsador SW1 acciona el flyback permitiendo que la salida de alta tensión sea aplicada a los electrodos. El fusible de protección opera una vez la corriente supera los 500 [mA], para evitar cualquier accidente o daño durante la operación del equipo; igualmente, el diodo LED (D4), advierte al operario que el circuito está energizado.

Figura 14. Circuito de la fuente de alta tensión.



Fuente: Tomado de [6]

Es importante señalar que la resistencia R4 conectada a los terminales 2 y 7 del LM 555 (IC1, en la figura), se reemplaza por un potenciómetro de 10 [kΩ] con el propósito de variar la frecuencia de trabajo del transistor Q1, en aras de modificar el nivel de tensión de salida, ya que ésta se relaciona con el ciclo de trabajo de acuerdo a las ecuaciones 9 y 10 [21]:

$$\delta = \frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}} \text{ Ecuación. 9}$$

$$V_o = \frac{E_{dc} * \delta}{1 - \delta} * \frac{N_2}{N_1} \text{ Ecuación. 10}$$

Donde: **E_{dc}**, Tensión de alimentación en corriente directa

δ, Ciclo de trabajo

t_{on}, Tiempo de conducción del transistor

t_{off}, Tiempo de estado “abierto” del transistor

V_o, Voltaje de salida

La Figura 15 muestra el equipo finalmente construido:

Figura 15. Fuente de alta tensión.



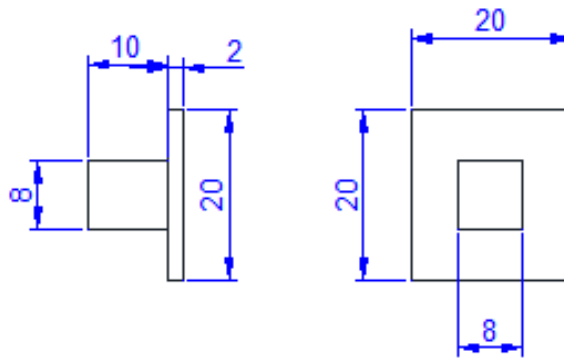
B.2. CONFIGURACIÓN DE LOS ELECTRODOS

La aplicación del campo eléctrico sobre el crudo, se realiza por medio de un par de placas metálicas, energizadas por la fuente de alta tensión anteriormente descrita; las placas están elaboradas en latón, material que por su cualidad de buen conductor de la electricidad, posee gran cantidad de cargas libres que facilitan la formación del campo eléctrico en el espacio entre las dos placas. Las características de cada par de placas (configuración del tratamiento paralelo y perpendicular al flujo), se presentan a continuación.

B.2.1. Placas para el tratamiento perpendicular al flujo del crudo

Los electrodos para el tratamiento perpendicular, corresponden a dos placas cuadradas completamente planas de 2cm*2cm con un espesor de 2 [mm] y un terminal de conexión en forma de prisma rectangular, ubicado en el centro de la placa, tal como se muestra en la Figura 16:

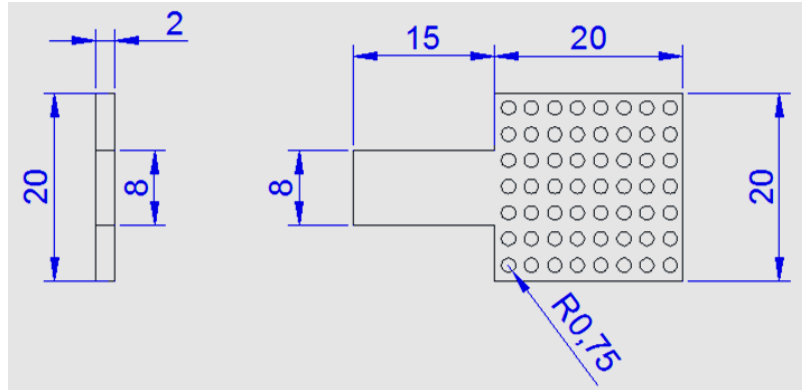
Figura 16. Electrodo para el tratamiento perpendicular (dimensiones en mm).



B.2.2. Placas para el tratamiento paralelo al flujo del crudo

Para el caso del tratamiento paralelo, las placas son igualmente cuadradas, de 2cm*2cm con 2 [mm] de espesor, con la diferencia en que en este caso, las placas fueron perforadas para realizar agujeros circulares de 0,75[mm] de radio, con el fin de permitir el flujo del crudo a través del espacio influenciado por el campo eléctrico. Las dimensiones y características físicas de los electrodos se resumen en la Figura 17:

Figura 17. Electrodo para el tratamiento paralelo (dimensiones en mm).



ANEXO C

CARACTERIZACIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO

C.1 CARACTERIZACIÓN PRELIMINAR

C.1.1 Placas perpendiculares al flujo

Al inicio del diseño del equipo, se elaboró una caracterización preliminar del campo eléctrico con ayuda de simulaciones realizadas con el software FEMM 4.2 (Finite Element Method Magnetics), la descripción del sistema se hace a partir de su disposición física y de las características eléctricas de los materiales que lo conforman [18]. En este caso, la simulación se hizo para una porción de 6 [cm] del tubo de descenso, en la sección donde se encuentran los electrodos; para cada región del espacio, se señaló el material correspondiente, dando como dato de entrada la permitividad relativa de cada uno de ellos, los valores para el aire, el acrílico y el crudo, se resumen en la Tabla 14. Para los dos electrodos era necesario establecer condiciones de frontera, ya que el voltaje en cada uno de ellos iba a ser establecido en un valor fijo y uniforme; de esta forma, el electrodo de la izquierda se fija con una tensión de 10 000 [V] y el de la derecha con 0 [V] (ver Figura 18).

Tabla 14. Permitividad de los diferentes materiales involucrados en el modelo.

Material	Permitividad relativa ϵ
Aire	1
Acrílico [1]	4
Crudo [12]	2,2

El software aplica el método de elementos finitos para resolver la ecuación de Poisson en la región entre las placas, los resultados obtenidos corresponden al valor del potencial, el campo y desplazamiento eléctrico para cada uno de los puntos dentro de la región analizada; la Figura 19 muestra parte de los resultados arrojados por el programa, dando una escala de colores para las intensidades del CE y el valor de estas en el centro de la región, que corresponde a 489,89 [V/mm].

Figura 18. Prototipo para la simulación del campo eléctrico perpendicular al flujo.

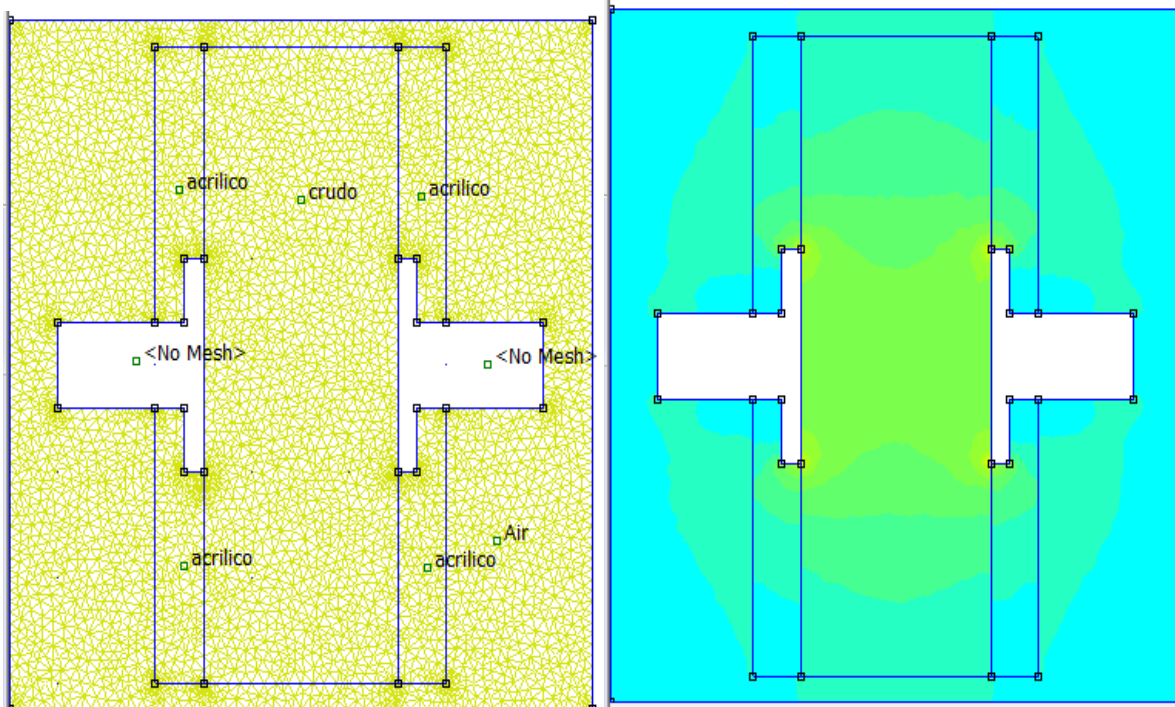
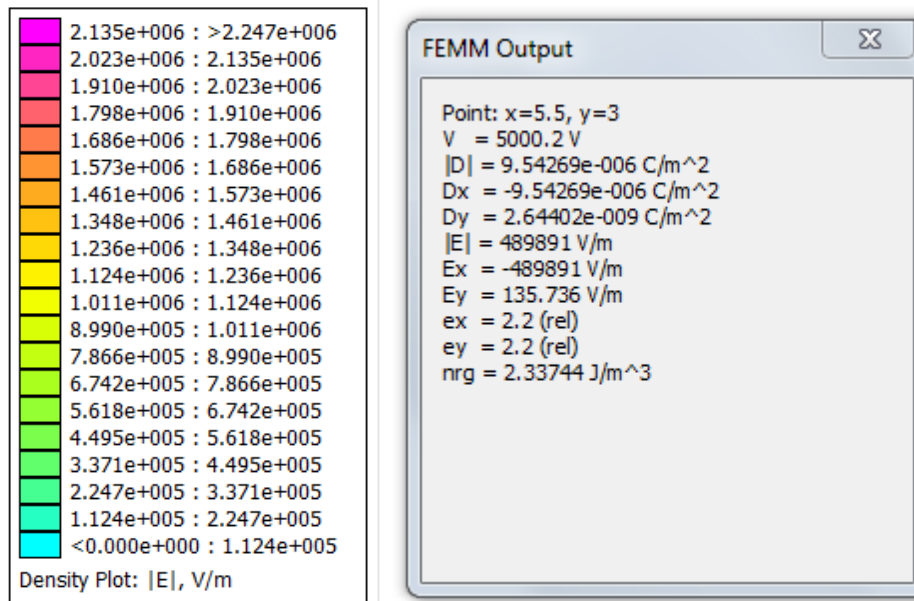


Figura 19. Resultados de la simulación del campo eléctrico perpendicular al flujo.



No obstante, el campo se evaluó en los cinco puntos mostrados en la Figura 20, buscando verificar la uniformidad de la intensidad en la región del tratamiento; el mínimo valor obtenido fue 476,48 [V/mm] y el máximo equivale a 500,12 [V/mm], dando como resultado un rango de 23,64 [V/mm] que corresponde tan solo a un 4,82%, al tomar como referencia el valor del centro. El valor equivalente del campo se toma como el promedio de los 5 puntos de prueba $E=488,75$ [V/mm], esta intensidad es muy cercana al resultado que se obtendría con la aproximación de considerar los dos electrodos como placas planas e infinitamente grandes [26]:

$$E = \frac{V_0}{d} \left[\frac{V}{mm} \right] \text{Ecuación. 11}$$

Donde: E , intensidad de campo eléctrico

V_0 , voltaje entre las placas

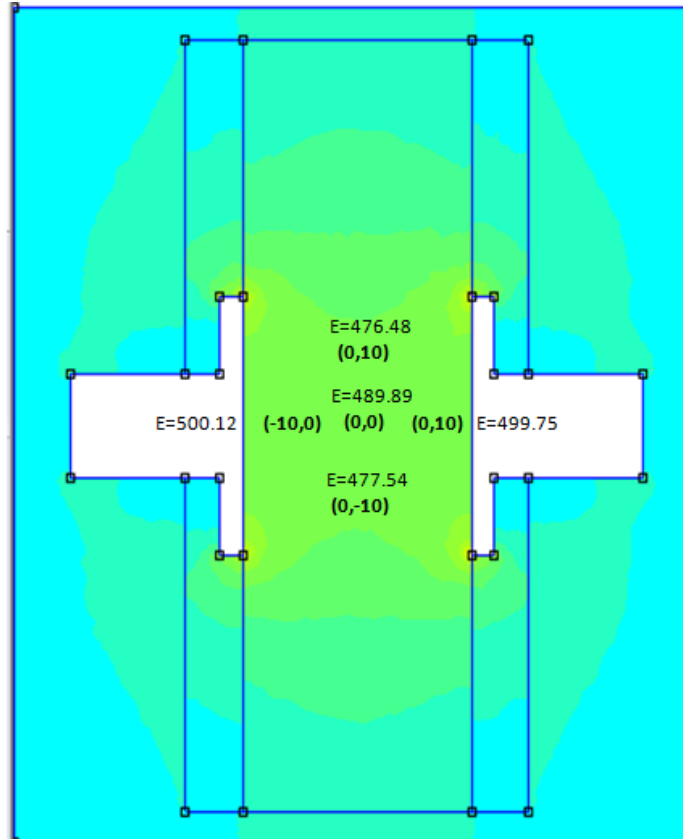
d , separación de las placas

Esta aproximación equivale a tener un campo de:

$$E = \frac{10\,000\text{ V}}{20\text{ mm}} = 500\text{ [V/mm]}$$

El error que se comete con la aproximación es de 2,3%, valor que es aceptable ya que este modelo simplifica significativamente las características de los electrodos y del espacio evaluado; no obstante, se decide que el valor del campo aplicado en los experimentos, se estime indirectamente como la tensión aplicada entre las placas sobre la separación (20 [mm] para los dos pares de electrodos).

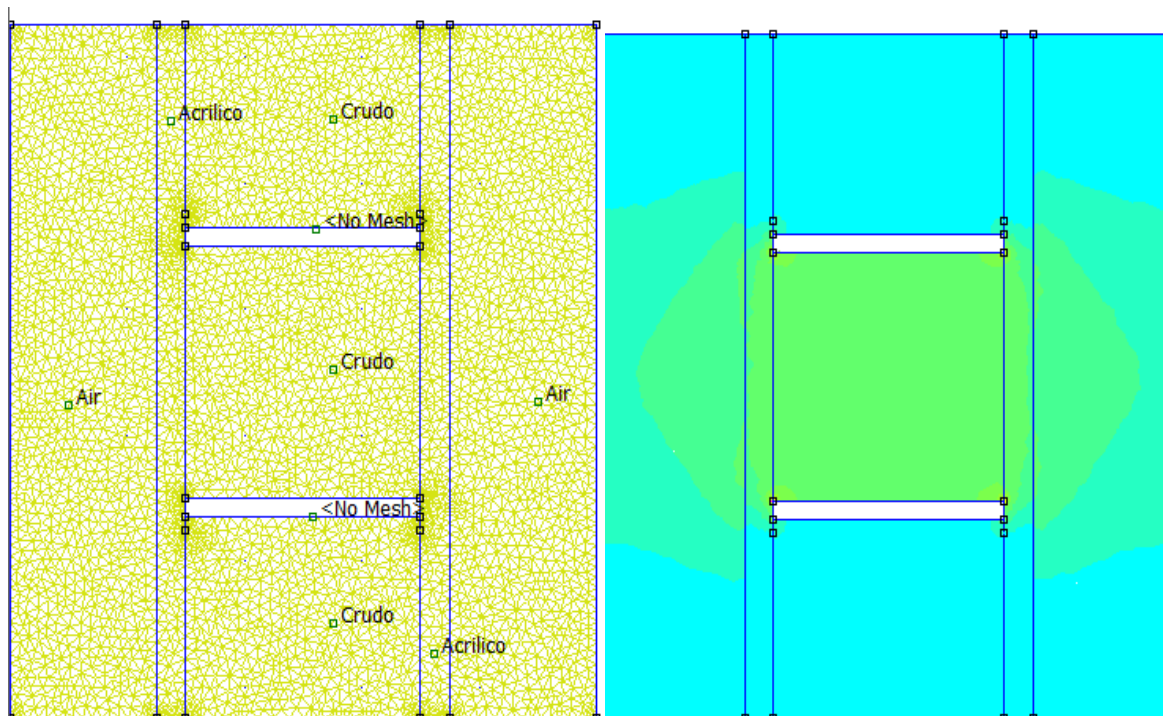
Figura 20. Puntos de prueba de la simulación para el tratamiento perpendicular, campo eléctrico en V/mm y coordenadas en mm.



C.1.2 Placas paralelas al flujo

Para el caso de las placas del tratamiento paralelo, la simulación se realizó sin tener en cuenta las perforaciones de los electrodos, ya que el software no permite tal punto de detalle; sin embargo, la simulación se puede validar al pensar en que los espacios no perforados de las placas generan un campo de una placa a otra, que se distorsiona cerca de las placas por el efecto borde de las perforaciones, pero que se hace uniforme hacia el centro del espacio entre las placas. Al igual que en el caso anterior, se identificó cada región con el material allí presente, y se fijó la tensión de los electrodos a 10 000 [V] para el superior y 0 [V] para el inferior, con el fin de establecer el campo en el mismo sentido del flujo (ver Figura 21).

Figura 21. Prototipo para la simulación del campo eléctrico paralelo al flujo.



Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 22, allí se presenta la escala de colores para el rango de intensidades y los valores de las diferentes magnitudes físicas en el punto central; realizando el mismo análisis que en el caso anterior, la Figura 23 muestra el valor del campo eléctrico en los diferentes puntos de prueba, el mínimo encontrado fue de 482,1 [V/mm] y el máximo de 500,04 [V/mm], el rango de trabajo es de 17,94 [V/mm] resultando en un 3,64% del valor de referencia 492,31 [V/mm] (centro de la configuración). Por su parte, el valor estimado de E, es tomado como el promedio en la región analizada y equivale a 491,29 [V/mm], así, haciendo la aproximación descrita para las placas perpendiculares al flujo, se toma el campo como 500 [V/mm], y el error que se comete es de 1,77%, validando de esta forma que la aproximación se puede considerar como una estimación acertada del campo eléctrico en la región del tratamiento.

Figura 22. Resultados de la simulación del campo eléctrico paralelo al flujo.

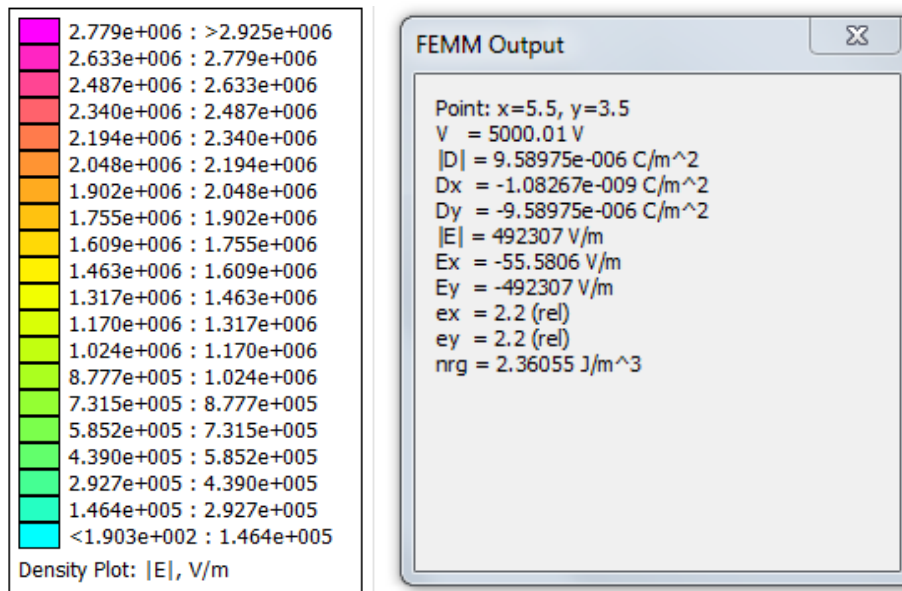
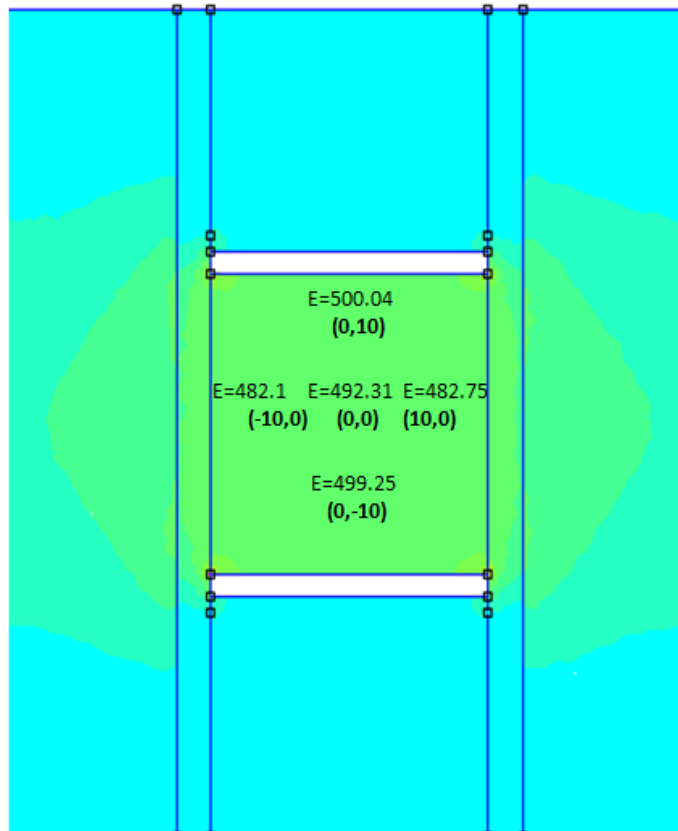


Figura 23. Puntos de prueba de la simulación para el tratamiento paralelo, campo eléctrico en V/mm y coordenadas en mm.



C.2 CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL

C.2.1 Divisor de tensión

Para caracterizar el campo durante las pruebas experimentales, se trabajó con una sonda de medición, determinando la tensión aplicada a los electrodos y estimando indirectamente la intensidad del CE en la zona de interés, con ayuda de la aproximación ya planteada. El sistema se basa en el principio de lo que comúnmente se conoce como divisor de tensión, el esquema del circuito utilizado se presenta en la Figura 24; al aplicar el voltaje a todas las resistencias en serie, se establece una corriente que genera una caída de potencial en cada una de ellas, que de acuerdo con la ley de ohm [15] corresponde a:

$$V_i = R_i * I[V] \text{Ecuación. 12}$$

Donde: V_i , caída de potencial de la resistencia i

R_i , resistencia i

I , corriente del circuito

Adicionalmente, de acuerdo a la ley de voltajes de Kirchhoff [15], podemos encontrar que:

$$V_o = (R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_{12} + R_{13}) * I[V] \text{Ecuación. 13}$$

Donde: V_o , tensión de salida de la fuente

Para finalmente obtener:

$$V_i = R_i * \frac{V_o}{R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_{12} + R_{13}} [V] \text{Ecuación. 14}$$

Así, la tensión de la resistencia R_i , está relacionada directamente con la tensión de salida de la fuente, por un factor igual a la proporción entre la resistencia analizada y la equivalente del circuito (sumatoria de todas las resistencias); de esta forma, si se mide la tensión de la resistencia R_i , se puede encontrar el voltaje aplicado a los electrodos como:

$$V_o = (R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_{12} + R_{13}) * \frac{V_i}{R_i} [V] \text{Ecuación. 15}$$

Para posteriormente hallar E a partir de:

$$E = \frac{V_o}{d} \left[\frac{V}{mm} \right] \text{Ecuación. 16}$$

C.2.2 Sonda de medición

El diseño real para la sonda, fue tomado de la comunidad de electrónicos [8], adecuándolo para que la relación entre la tensión medida V_i y la tensión V_o , fuera de un factor de 1 a 100, es decir, la tensión medida es 100 veces menor que la tensión aplicada a los electrodos; los valores de las resistencias y su conexión se presentan en la Figura 24(a).

Los dos bornes inferiores se conectan al voltímetro para realizar la medida de la tensión en R12, la flecha superior indica la salida de la punta hacia el borne positivo de la fuente. Para sintetizar el procedimiento, se muestra el siguiente ejemplo:

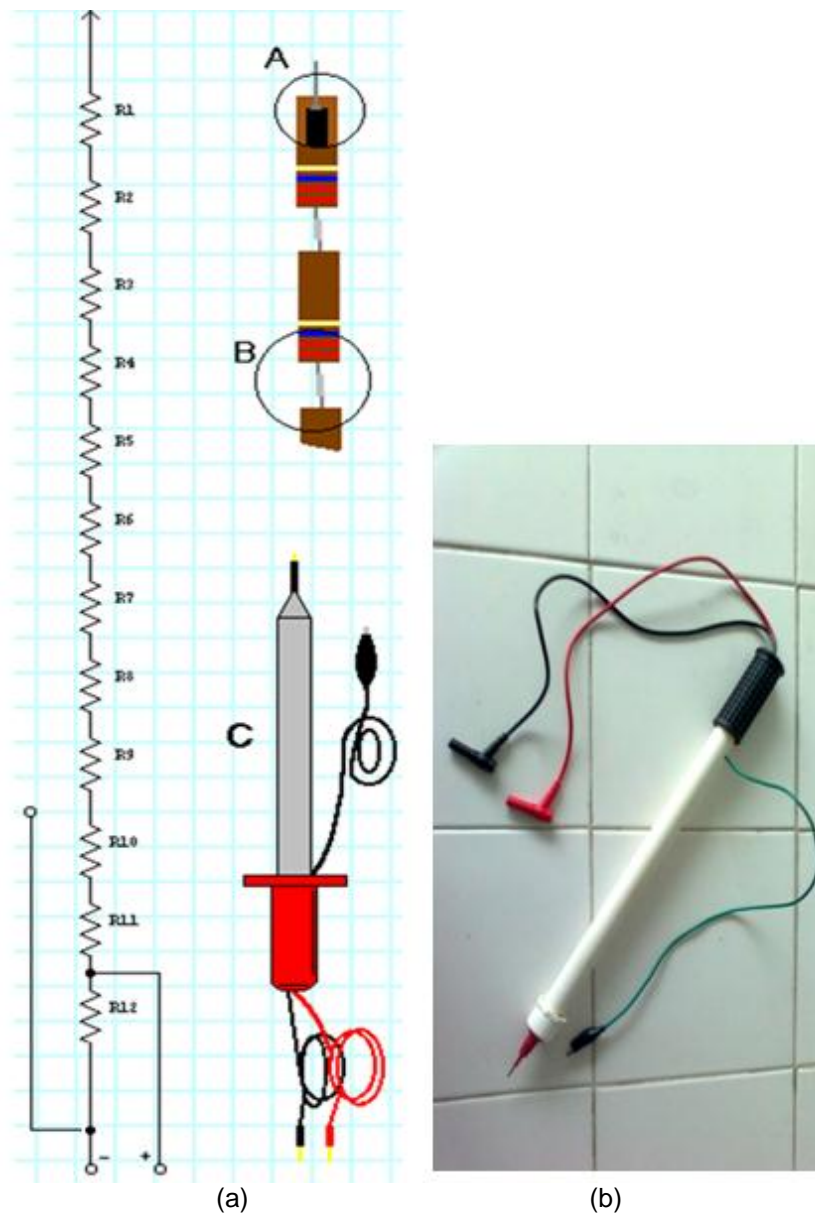
Una vez energizados los electrodos, se realiza la conexión de la sonda en la etapa de AT, y se mide la tensión de la resistencia R12 (BT), y se obtiene un voltaje de 120 [V] en el voltímetro utilizado, así, la tensión que se tiene aplicada a los electrodos del tratamiento se puede hallar como:

$$V_o = (10 * 9 + 6,8 + 2,2 + 1) * \frac{120}{1} [V] = 12000 [V]$$

Y el campo presente en la zona entre las placas se puede aproximar por:

$$E = \frac{12000 V}{20 mm} = 600 \left[\frac{V}{mm} \right]$$

Figura 24. (a) Esquema de conexión, (b) sonda de medición de alta tensión.



Fuente: (a) tomado de [8]

R1-R9: Resistencias de 10 [MΩ] -1 [W]

R10: Resistencias de 6,8 [MΩ] -1 [W]

R11: Resistencia de 2,2 [MΩ] -1 [W]

R12: Resistencia de 1 [MΩ] – 1 [W]

ANEXO D

CARACTERIZACIÓN DE CRUDOS

D.1 VISCOSIDAD DINÁMICA

La viscosidad de las muestras de crudo fue determinada mediante el uso de un viscosímetro comercial marca OFITE modelo 900 (ver Figura 25), disponible en el laboratorio de lodos y cementos de la escuela de ingeniería de petróleos. Para medir esta propiedad son necesarios 200 [ml] de muestra, la cual se carga al viscosímetro, posteriormente se enciende el dispositivo para su calibración automática y se ajustan las revoluciones deseadas. El equipo permite conocer los valores de viscosidad, esfuerzo de corte y velocidad de deformación. Todas las pruebas fueron realizadas a temperatura ambiente y esta fue medida durante cada experimento.

Figura 25. Viscosímetro OFITE modelo 900.



A continuación se presenta la caracterización viscosa de los crudos utilizados en las pruebas de laboratorio, esto se hizo antes y después de aplicar el tratamiento eléctrico con el fin de determinar las características reológicas y propiedades de los fluidos. Debido a que el viscosímetro no se encontraba en el mismo laboratorio, fue necesario trasladar bajo condiciones controladas las muestras

tratadas para realizar la medición de la viscosidad, esta situación implicó que las medidas se realizaran 5 minutos después de aplicado el tratamiento.

En las Figuras 26 y 27, se muestran las curvas de flujo obtenidas para los crudos de los pozos Col 36 y Col 67, respectivamente. En ellas se puede observar que la relación entre el esfuerzo de corte y la velocidad de deformación se describe adecuadamente con una línea recta que pasa por el origen, lo que indica que estos crudos tienen un comportamiento newtoniano inicialmente. Cabe aclarar que la pendiente de estas curvas representa la viscosidad del fluido, que es de $0,002$ $[Pa*s]$ para Col 36 y de $0,0021$ $[Pa*s]$ para Col 67, siendo muy similar en los dos casos.

Figura 26. Curva de flujo para Col 36 sin tratamiento. $T=25^{\circ}C$.

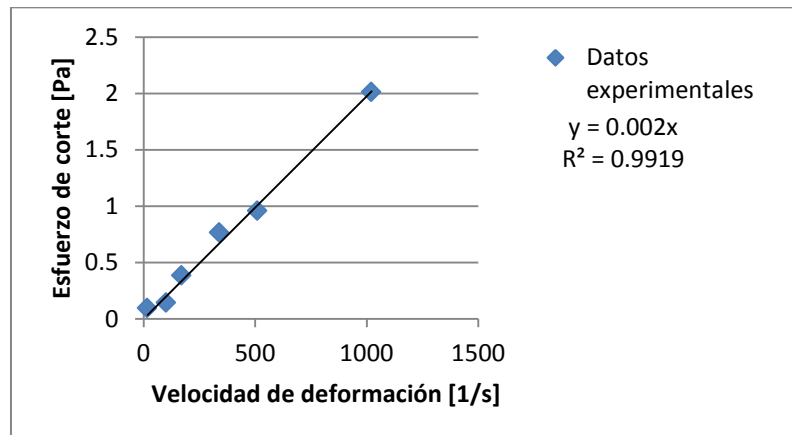
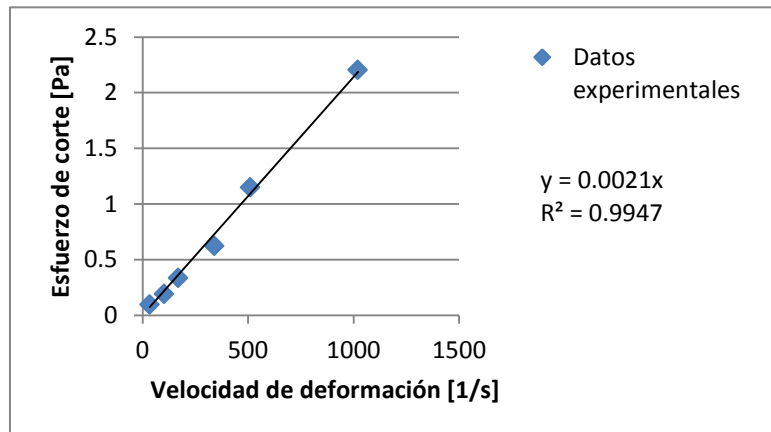


Figura 27. Curva de flujo para Col 67 sin tratamiento. $T=25^{\circ}C$.



En las Figuras 28 y 29, se pueden apreciar las curvas de flujo para los dos crudos una vez ha sido aplicado el tratamiento eléctrico. En este caso el comportamiento reológico es el mismo puesto que la relación entre el esfuerzo de corte y la velocidad de deformación sigue siendo lineal, por lo tanto el fluido conserva su comportamiento newtoniano aun cuando el campo eléctrico ha hecho que la viscosidad de los dos crudos aumente.

Figura 28. Curva de flujo para Col 36 con tratamiento eléctrico. $T=26^{\circ}\text{C}$.

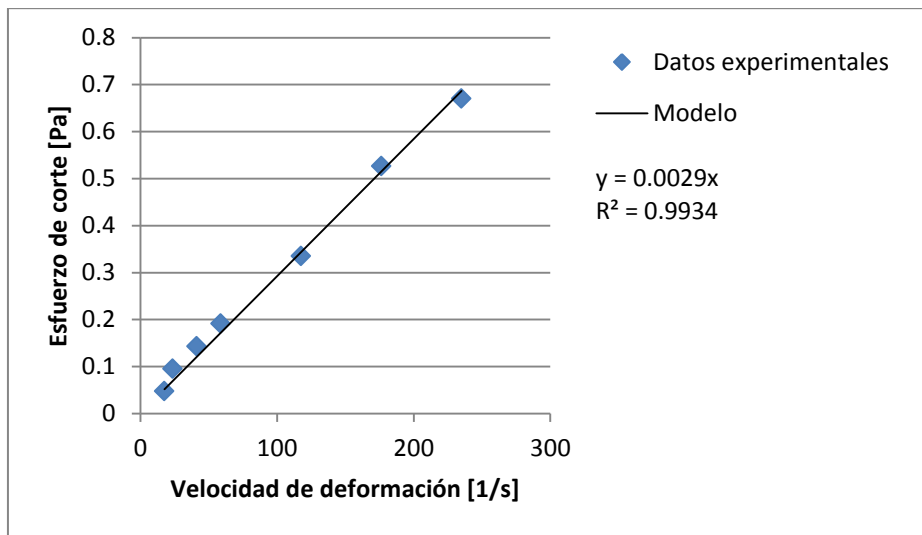
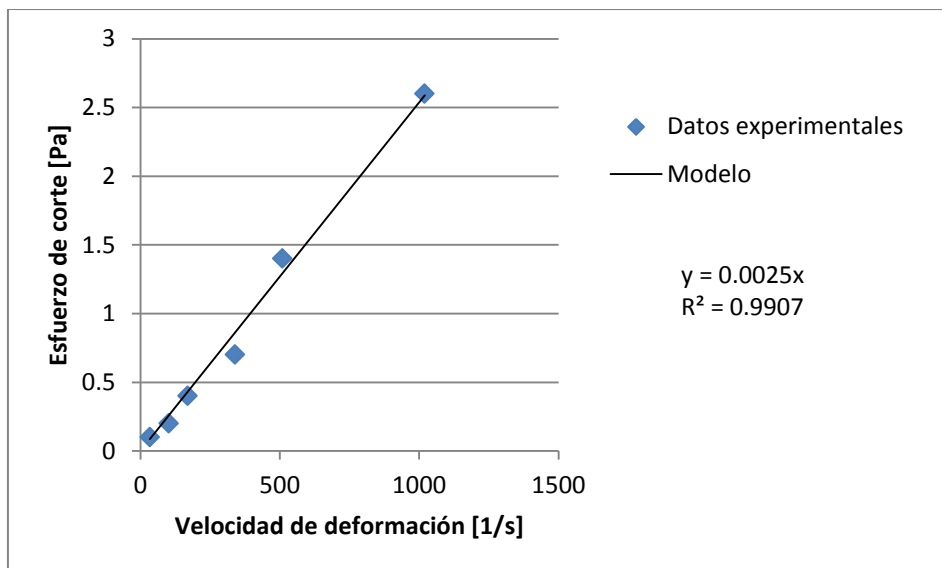


Figura 29. Curva de flujo para Col 67 con tratamiento eléctrico. $T=27^{\circ}\text{C}$.



D.2 PUNTO DE NUBE

La técnica que se utilizó para determinar el punto de nube en las muestras de crudo fue la calorimetría diferencial de barrido (DSC); la cual, mide el flujo de calor desde o hacia la muestra cuando esta se calienta o enfría. Puesto que la cristalización de parafinas es un proceso que genera calor (exotérmico), se muestra en la curva DSC (termograma) como un cambio de pendiente durante el enfriamiento. Sólo una pequeña cantidad de crudo es necesaria para realizar el análisis. El equipo utilizado en estas pruebas es el DSC Q 10 ubicado en el laboratorio de calorimetría y termogravimetría de la escuela de Ingeniería Química (Figura 30), el cual es operado empleando el siguiente método: inicialmente la muestra es colocada en el equipo a 25 [°C], luego mediante una rampa de calentamiento es llevada a 120 [°C], para después ser reducida a -20 [°C] por medio de una rampa de enfriamiento y finalmente se lleva la muestra nuevamente a 120 [°C]. Todo esto a razón de 10 [°C/minuto][24].

Figura 30. Calorímetro diferencial de barrido DSC Q10.



En las siguientes gráficas se pueden ver los resultados de la caracterización antes y después de aplicado el tratamiento. En la medida que la temperatura disminuye desde 120 [°C] hasta -20 [°C], se presenta el cambio o la variación en el flujo de calor de la muestra. El punto de nube puede identificarse como el primer cambio significativo en la pendiente de estas curvas de enfriamiento y se encuentra señalado con su valor correspondiente según sea el caso. En la Figura 31, se puede ver que el punto de nube para crudo Col 36 es inicialmente de 22,24 [°C] y luego de ser aplicado el tratamiento eléctrico, este aumenta hasta 30,51 [°C]. De forma análoga, en la Figura 32 se puede observar el cambio para el crudo Col 67, en esta ocasión el punto de nube aumentó de 21,38 [°C] a 25,69 [°C].

Figura 31. Termograma del crudo Col 36 antes y después del tratamiento.

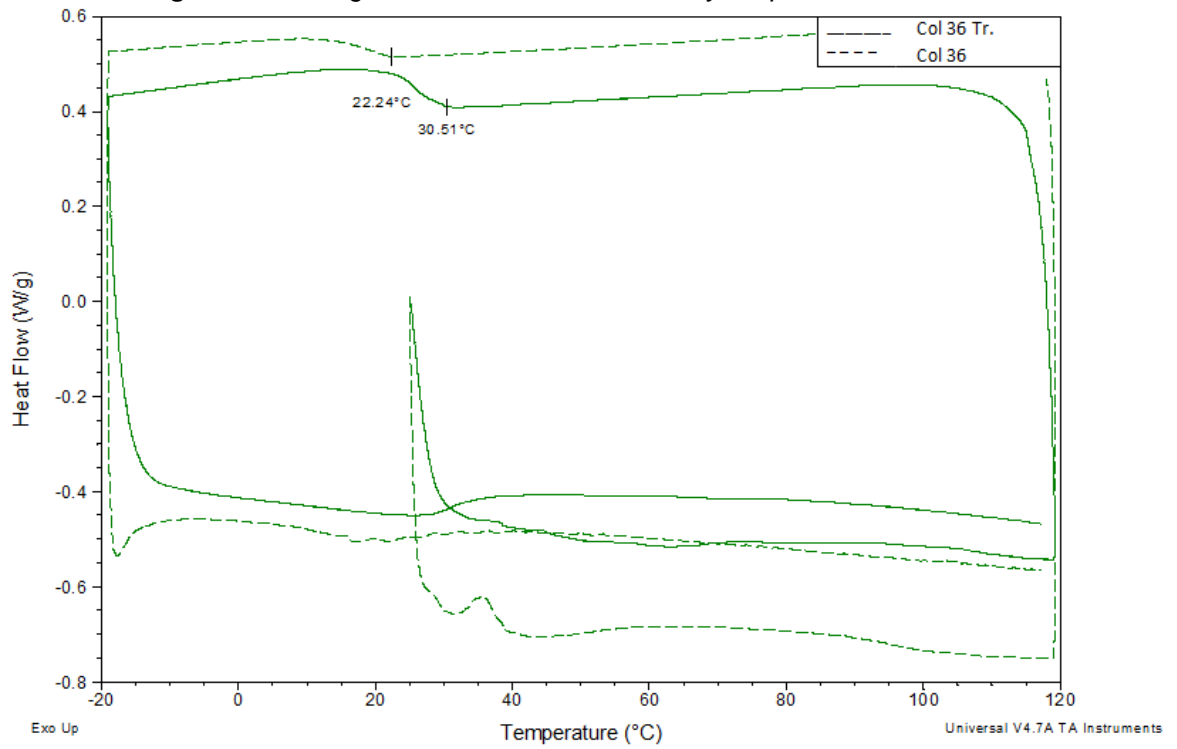
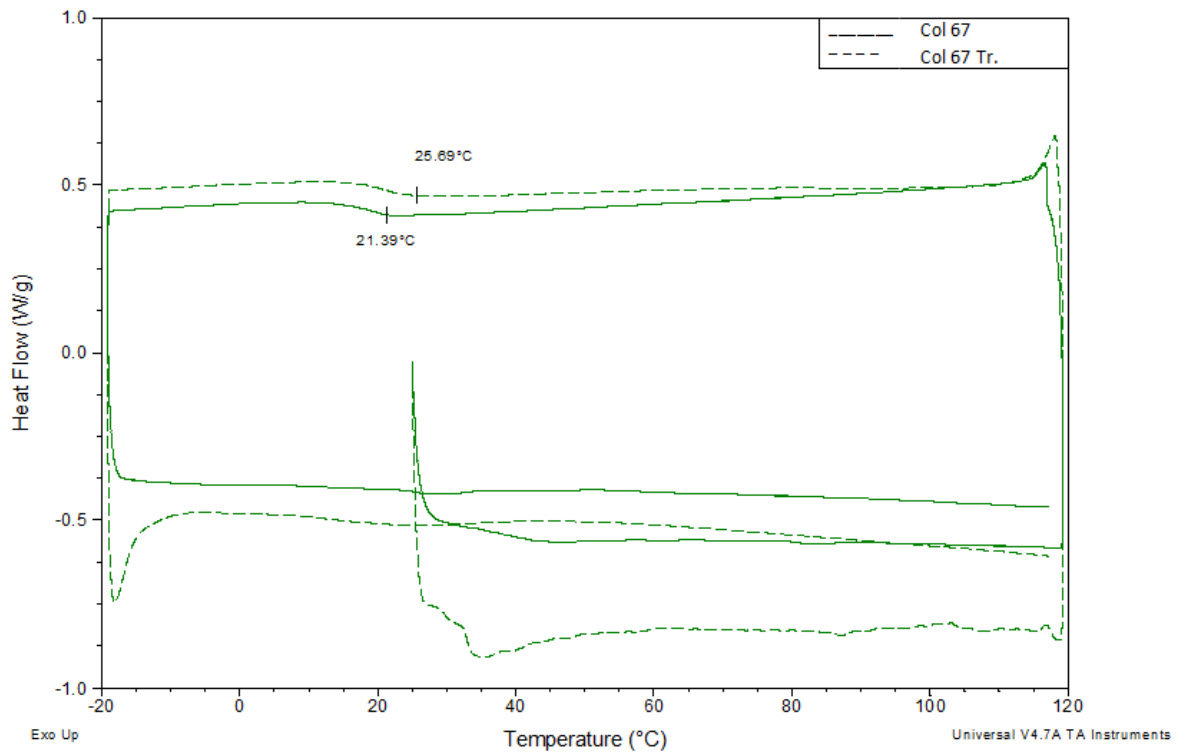


Figura 32. Termograma del crudo Col 67 antes y después del tratamiento.



D.3 PUNTO DE FLUIDEZ

La norma ASTM D5853-95 describe la metodología utilizada para determinar el punto de fluidez en los crudos. El procedimiento de manera general consiste en el enfriamiento gradual de un recipiente de prueba en donde se encuentra contenido el fluido, se examina la apariencia del crudo cuando la temperatura esta 9 [°C] por encima del punto de fluidez esperado, el cual se expresa en términos de números enteros positivos o negativos múltiplos de 3 [°C], luego se inclina el recipiente lo suficientemente para determinar si hay algún movimiento del crudo; tan pronto como la muestra deje de fluir, se debe inclinar el recipiente de prueba horizontalmente durante 5 segundos, si no fluye se ha encontrado el punto de congelamiento, por lo tanto, el punto de fluidez se hallará 3 [°C] por encima de éste.

Figura 33. Determinación del punto de fluidez de una muestra de crudo.



El punto de fluidez para las muestras de crudo parafínico antes y después del tratamiento eléctrico se observa en la Tabla 15:

Tabla 15. Punto de fluidez para las muestras en blanco y con tratamiento.

Pozo	Punto de fluidez sin tratamiento (°C)	Punto de fluidez con tratamiento (°C)
Col 36	-21	-15
Col 67	-27	-21

Se puede ver que en los dos casos este aumentó en 6 [°C] una vez ha sido aplicado el tratamiento.

D.4 AGUA Y SEDIMENTOS EN CRUDO (BSW)

Se determinó siguiendo la norma ASTM D 96-88, en la cual se describe la metodología utilizada. Una vez conocidos los volúmenes de crudo y solventes, estos se colocan en tubos de centrifuga graduados y se calientan en un baño de maría a $60 [^{\circ}\text{C}] \pm 3 [^{\circ}\text{C}]$, luego se realiza la centrifugación, se lee el volumen de la capa de agua y sedimentos en el fondo del tubo de centrifuga. En la Figura 34 se muestra los recipientes y la centrifuga usados. Estas pruebas se realizaron en el laboratorio de fluidos de la escuela de Ingeniería de petróleos.

Figura 34. Recipientes y centrifuga para realizar la medida BSW.



En la Tabla 16 se presenta el contenido de agua y sedimentos de los crudos estudiados. El BSW de los dos pozos analizados es de 0,4 %.

Tabla 16. Agua y sedimentos de los pozos Col 36 y Col 67.

Pozo	BSW(%)
Col 36	0,4
Col 67	0,4

D.5 DENSIDAD A PRESIÓN ATMOSFÉRICA (MÉTODO DEL PICNÓMETRO DE BINGHAM)

El procedimiento se realizó según la norma ASTM D1480-62 y de manera general consiste en llenar un picnómetro con la muestra de crudo y pesarlo, se registra la temperatura del laboratorio para luego reportar la medida a dicha temperatura y a 60 [°F] (15,5 [°C]). La densidad se calcula con la diferencia entre el peso del picnómetro lleno de crudo menos la masa de éste vacío y se divide en el volumen del picnómetro. En la Figura 35 se muestra el instrumento utilizado para determinar la densidad de los fluidos.

Figura 35. Picnómetro para medir la densidad de crudos.



La siguiente tabla muestra la densidad a temperatura ambiente de los crudos utilizados, siendo esta muy similar en los dos casos.

Tabla 17. Densidad de los crudos de los pozos Col 36 y Col 67 a temperatura ambiente.

Pozo	Densidad a 25°C [g/ml]
Col 36	0,8
Col 67	0,81

D.6 GRAVEDAD API

El método para determinar esta propiedad se describe en la norma ASTM D287, esta se basa en el principio de que la gravedad API de un líquido varía directamente con la profundidad de inmersión de un cuerpo flotante en el mismo.

El cuerpo flotante esta graduado en unidades API y se denomina Hidrómetro (ver Figura 36). La gravedad API se lee observando la graduación más cercana en la intersección del plano de la superficie del líquido con la escala vertical del hidrómetro, luego de que la temperatura de equilibrio se ha alcanzado.

Figura 36. Hidrómetro.



En la Tabla 18 se presenta la gravedad API de los crudos utilizados en este proyecto, si se comparan los dos valores producto de la caracterización se puede observar que varían entre sí, en menos de un grado API, por lo que se les puede considerar muy semejantes.

Tabla 18. Determinación de la gravedad API, pozos Col 36 y Col 67.

Pozo	°API
Col 36	37,7
Col 67	37,1

ANEXO E

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

E.1 ANÁLISIS DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Este anexo se presenta con el propósito de complementar el análisis de los resultados estadísticos obtenidos con STATGRAPHICS; anteriormente se mostraron las superficies de respuestas y los diagramas de pareto para señalar los efectos con significancia, a continuación se exponen los resultados del análisis ANOVA y algunos gráficos de diagnóstico.

De esta forma, se inicia con las tablas del análisis de varianza, que contienen las sumas de cuadrados y los grados de libertad para cada uno de los efectos, en base a estos datos, se obtienen los cuadrados medios que se utilizan para realizar la prueba estadística F que permite determinar si cada uno de los efectos es relevante para un modelo de regresión de la variable de salida; si el valor p de la distribución F, es menor que el valor del nivel de significancia seleccionado ($\alpha=0.05$, para un nivel de confianza del 95%), se rechaza la hipótesis nula:

Ho: $\beta_i=0$, donde β_i es el respectivo coeficiente para la regresión [19].

Al p ser menor que α se puede concluir que la razón entre la suma de cuadrados del efecto analizado y la suma de cuadrados del error total, no pertenece a la distribución F, y el efecto analizado es significativo para el modelo [2]. Las Tablas 19 y 20 contienen los datos obtenidos en el ANOVA realizado para el diseño factorial de cada crudo.

Tabla 19. ANOVA Col 36.

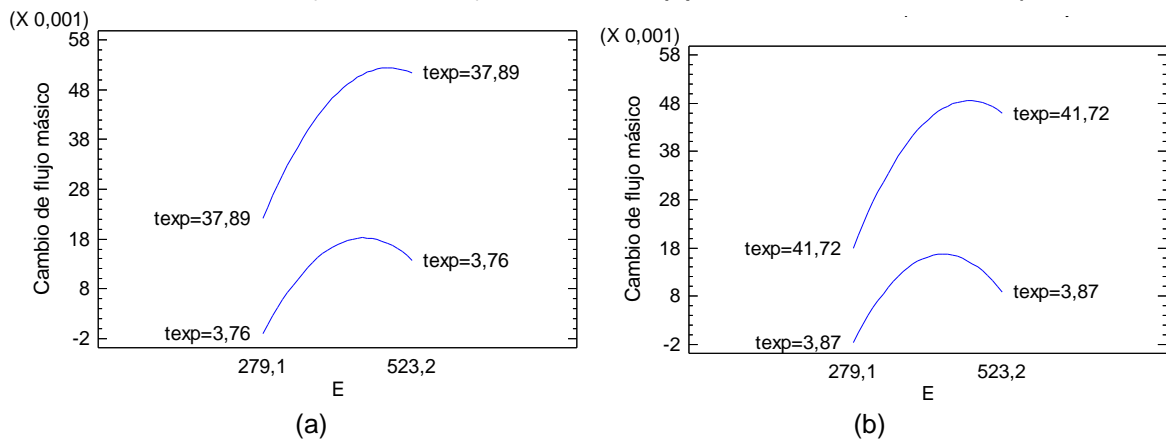
Fuente	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: E	0,00218416	1	0,00218416	346,33	0,0000
B: t_{exp}	0,00386091	1	0,00386091	612,21	0,0000
AA	0,00011177	1	0,00011177	17,72	0,0005
AB	0,00018476	1	0,00018476	29,30	0,0000
BB	0,00028161	1	0,00028160	44,65	0,0000
bloques	0,00000569	2	0,00000284	0,45	0,6431
Error total	0,00011982	19	0,00000631		
Total (corr.)	0,00633753	26			

Tabla 20.ANOVA Col 67.

Fuente	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: E	0,00165851	1	0,00165851	205,77	0,0000
B: t_{exp}	0,00337133	1	0,00337133	418,28	0,0000
AA	0,00015747	1	0,00015747	19,54	0,0003
AB	0,00027831	1	0,00027831	34,53	0,0000
BB	0,00019558	1	0,00019558	24,27	0,0001
bloques	0,00000939	2	0,00000469	0,58	0,5682
Error total	0,00015314	19	0,00000806		
Total (corr.)	0,00527742	26			

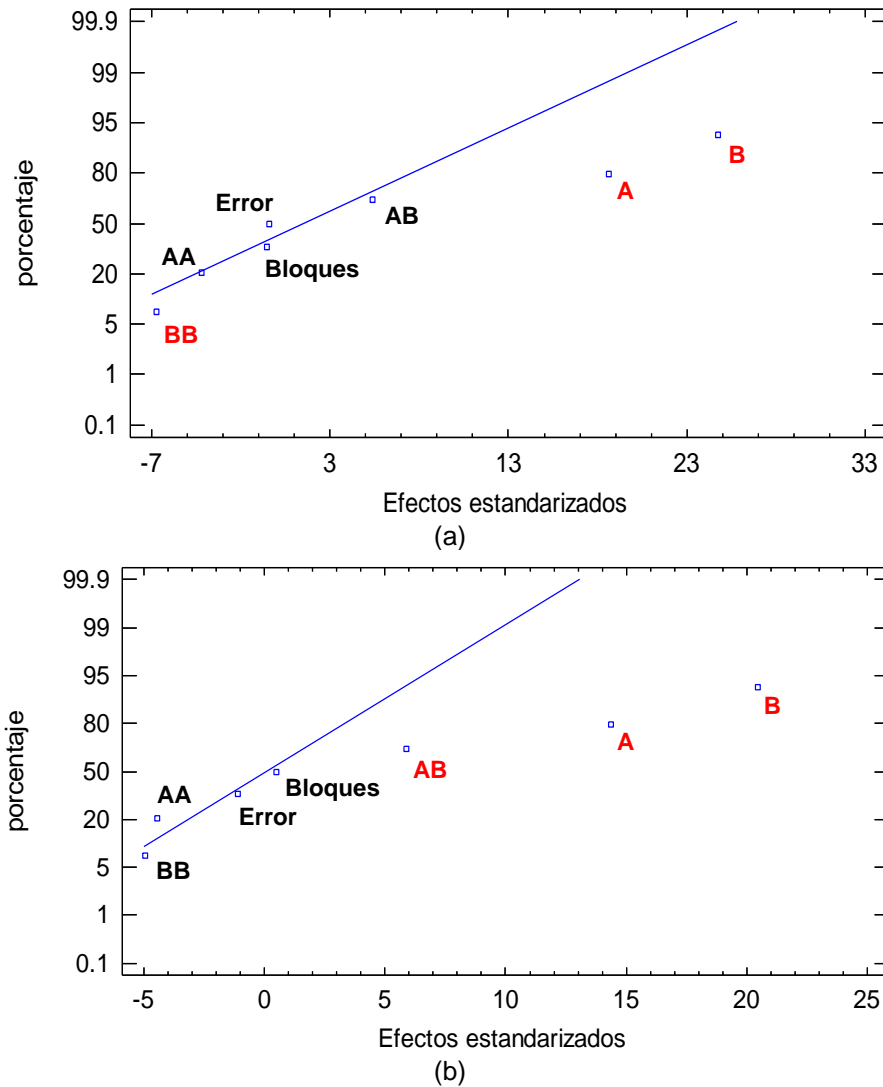
Por su parte, las curvas de interacción de la Figura 37, contienen información del comportamiento del cambio de flujo másico para los niveles alto y bajo de cada factor; la significancia de la interacción entre el campo eléctrico y el tiempo de exposición, señalada en el análisis de varianza como **AB**, se ratifica y se evidencia claramente, ya que para los dos crudos, las dos curvas, cada una para un nivel de tiempo, no son paralelas y se comportan de forma independiente.

Figura 37. (a) Interacción de los factores para Col 36, **(b)** interacción de los factores para Col 67.



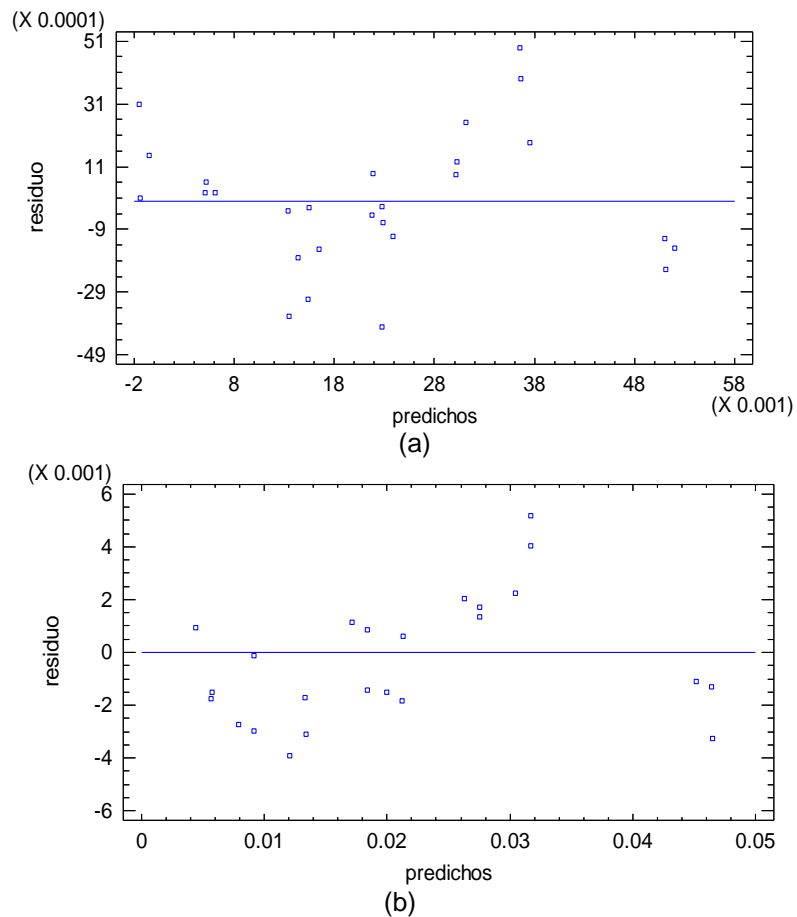
Otra forma de señalar la significancia de los diferentes efectos, consiste en realizar un gráfico de probabilidad normal para los efectos estandarizados, ver Figura 38; los puntos que se alejan de la recta representada, corresponden a los efectos más significativos, t_{exp} , **E** y t_{exp}^2 para el Col 36, y el t_{exp} , **E** y la interacción $t_{exp} * E$ para el Col 67; respaldando así, los resultados obtenidos en el ANOVA.

Figura 38. Gráfico de probabilidad normal para los efectos, (a) Col 36 y (b) Col 67.



Finalmente, se revisa la validez de los datos y los resultados, por medio del gráfico de los residuales contra los valores predichos, Figura 39, la cual muestra, para ambos crudos, que no existe algún patrón, que pueda señalar alguna relación entre la varianza de los datos y el cambio en el flujo másico.

Figura 39. Residuos vs Valores predichos, **(a)** Col 36 y **(b)** Col 67.



Adicionalmente, el gráfico de probabilidad normal para los residuales o prueba Anderson-Darling [31], permite verificar el supuesto de normalidad para el error de los ensayos de un diseño experimental, el cuál es parte esencial para el desarrollo de un análisis de varianza. La prueba ajusta los residuales a una línea recta, si algunos residuales se apartan significativamente de dicha recta, se puede atribuir a errores de tabulación o recopilación de los datos [19], las Figuras 40 (a) y (b) no muestran problemas particulares para ninguno de los dos crudos.

Figura 40. Gráfico de probabilidad normal para los residuos, **(a)** Col 36 y **(b)** Col 67.

