

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

Arlex Chaves Guerrero<sup>1</sup>, John Edinson Rey Vargas<sup>2</sup>, Jerson Alexis Pinzón Amorochó<sup>3</sup>, Emiliano Ariza León<sup>4</sup>,  
Cristian Camilo Jiménez Leiva<sup>5</sup>

## RESUMEN

El propósito del presente trabajo fue determinar la viabilidad del uso de campos eléctricos como método para inhibir la precipitación y formación de depósitos de parafinas durante la producción y transporte de crudos parafínicos. 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 flujo másico, viscosidad, punto de nube y punto de fluidez. Se encontró que la aplicación de campos eléctricos al crudo de los pozos Colorado 36 y Colorado 67, produjo un incremento en la viscosidad, punto de nube y punto de fluidez. Estos resultados sugieren que con la exposición del crudo a campos eléctricos se acelera el proceso de precipitación de orgánicos, por lo cual no se recomienda su implementación en los pozos estudiados.

**Palabras Claves:** Crudos parafínicos, precipitación de parafina, campo eléctrico, viscosidad, punto de nube, punto de fluidez.

## STUDY OF THE INFLUENCE OF AN EXTERNAL ELECTRIC FIELD ON THE MOBILITY OF PARAFFINIC CRUDE OILS

## ABSTRACT

The purpose of this study was to determine the feasibility of using electric fields as a method for to inhibit the formation of paraffin deposits in the production and transport of paraffinic crude oils. A capillary viscometer was designed and constructed, and then adapted to an electric field generator. This experimental setup allowed generating electric fields of different amplitudes. Capillaries tubes of different diameters were used in order to obtain different exposures times of the oil to the electric field. The variables used to quantify the effect of the electric field on the oil were the mass flow, viscosity, cloud point, and pour point. The experimental data shows that the application of the electric field to oil from Colorado 67 and Colorado 36 wells resulted in an increase of viscosity, cloud point, and pour point. These results suggest that exposure of oil to the electric field accelerates the precipitation process of organics and therefore it is not recommended for implementation in the studied wells.

**Keywords:** Paraffin-base crude oil, wax precipitation, electric field, viscosity, cloud point, pour point.

1. Doctor en ingeniería Química, Profesor Universidad Industrial de Santander, UIS. Carrera 27 Calle 9, Bucaramanga, Colombia. Cel: 301 794 91 38. E-mail: arlexchaves@gmail.com
2. Ingeniero Químico. Universidad Industrial de Santander, UIS. Bucaramanga, Colombia. Cel: 320 204 13 48. E-mail: jervas1101@hotmail.com
3. Ingeniero Electricista. Universidad Industrial de Santander, UIS. Bucaramanga, Colombia. Cel: 317 729 55 17. E-mail: jerson9\_0@hotmail.com
4. Magister en Ingeniería de Hidrocarburos. Universidad Industrial de Santander, UIS. Carrera 27 Calle 9, Bucaramanga, Colombia. Cel: 315 360 47 54. E-mail: earizal@uis.edu.co
5. Ingeniero Electricista, Candidato a MSc. En ingeniería Eléctrica. Universidad Industrial de Santander, UIS. Bucaramanga, Colombia. Cel: 315 367 90 25. E-mail: cristian\_camilo\_mci12@hotmail.com

## INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, se ha inferido que los campos eléctricos pueden tener efectos beneficiosos sobre las propiedades del crudo, por esta razón algunos investigadores alrededor del mundo han estudiado dicho comportamiento. Por ejemplo, Tao [1] aplicó campos eléctricos de alta intensidad a una muestra de crudo asfáltico de California (EE.UU.), la cual presentó una reducción en su viscosidad, este comportamiento es ideal para el transporte por oleoductos. Tao [2] también aplicó campos eléctricos a tres muestras de diferentes crudos pesados y en todos los casos encontró que la viscosidad se redujo significativamente. Este mismo autor en otro trabajo [3] propone que el mecanismo físico responsable de la reducción en la viscosidad de los crudos, se encuentra directamente relacionado con la agregación de partículas pequeñas de parafina o asfaltenos, mediante la aplicación directa de un campo eléctrico o magnético. Sin embargo, esta teoría es puesta en duda por Evdokimov [4] quien afirma que el mecanismo de reducción de la viscosidad propuesto por Tao [3] no es correcto, pues existe una serie de observaciones documentadas sobre diferentes crudos, las cuales sugieren que la agregación de partículas de parafina y asfaltenos, conducen a un aumento progresivo en la viscosidad.

Por otra parte, Tang [5] observó un aumento significativo en el caudal del petróleo y una reducción importante de su viscosidad, luego de aplicar un campo eléctrico de alta intensidad en contacto directo y en la misma dirección del flujo. Otros investigadores como Zhang [6] pudieron observar que al someter una muestra de crudo, la cual contenía agua en emulsión, a un campo eléctrico de alta intensidad, presentaba una reducción en la viscosidad para bajos niveles de tensión, sin embargo, superado cierto umbral, la viscosidad de la misma aumentaba considerablemente. Less [7] aplicó campos eléctricos de corriente continua a emulsiones de agua en crudo y observó la formación de agregados de gotas de agua, alargados en la dirección del campo, lo cual aumentó significativamente la viscosidad de la emulsión hasta un valor crítico; posteriormente a esto se produjo la coalescencia de las gotas, haciendo que la viscosidad disminuyera irreversiblemente por debajo de su valor inicial.

A pesar de que se ha avanzado en la aplicación de campos magnéticos (de manera empírica), el mecanismo por medio del cual estos afectan las propiedades del crudo no está del todo claro; al respecto algunos autores sugieren que el factor responsable es el contenido de parafina y

asfaltenos [1], [2], [3], [5]; otros investigadores afirman que es la presencia de sustancias polares como el agua [6], [7]; y más recientemente Goncalves [8] basado en sus resultados experimentales propuso que la presencia de iones de magnesio sería la causa de dichos cambios. No obstante, estos mecanismos han sido propuestos para explicar el efecto de campos magnéticos sobre las propiedades del crudo, sin embargo podría esperarse que un mecanismo similar fuera el responsable del cambio de las propiedades físicas del crudo por campos eléctricos. Lo anterior sugiere, la necesidad de realizar un mayor esfuerzo investigativo, posiblemente a escala molecular para lograr identificar los componentes del crudo sobre el cual estos campos ejercen influencia de forma tal que se traduzca en cambios tanto del comportamiento reológico como de algunas de las propiedades físicas de estos.

De esta forma la información contradictoria encontrada en la literatura sobre el efecto del campo eléctrico en los crudos parafínicos, y la insatisfactoria explicación sobre los mecanismos por el cual se producen cambios en las propiedades físicas de algunos petróleos, planteó la necesidad de realizar un estudio sobre la efectividad del tratamiento para cada campo de producción o pozo en particular.

El Campo Escuela Colorado históricamente ha presentado serios problemas de precipitación y deposición de ceras parafínicas, ocasionando la obstrucción y el taponamiento de las tuberías [9]. En estudios realizados anteriormente con crudos de este campo petrolero [10], 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.

## METODOLOGÍA

### EQUIPO PARA LA APLICACIÓN DEL TRATAMIENTO

Para la aplicación del tratamiento con el campo eléctrico (CE), se tomó como referencia el dispositivo usado por Tang [5]. El cual permite medir el flujo másico y la viscosidad (en forma indirecta) de una

corriente de crudo, bajo un campo eléctrico estático. El sistema mostrado en la Figura 1(a), fue fabricado en acrílico cristal y está compuesto principalmente por dos secciones: un *tanque de almacenamiento* de 20 cm de diámetro y 16 cm de alto y un *tubo de descenso* de 50 cm de longitud y sección transversal cuadrada de 2 cm de lado. Este último, está conformado por tres secciones tubulares unidas entre sí, que permiten ubicar los electrodos fabricados en latón generadores del campo eléctrico, ya sea en dirección paralela o perpendicular respecto al flujo. Con el fin de obtener diferentes tiempos de exposición del crudo al campo eléctrico se utilizaron agujas hipodérmicas de diferentes diámetros, acopladas al final del tubo. Además, se usó una balanza Adventurer Pro AV812 y un computador para registrar los datos de masa del crudo en función del tiempo, información necesaria para el cálculo del flujo másico. En la Figura 1(b), se muestra un esquema del equipo utilizado para el desarrollo experimental. La fuente de alta tensión usada para generar el campo eléctrico, fue diseñada con base en un probador “flyback”, el cuál fue construido a partir de un transformador de tubo de rayos catódicos, adecuado sobre un circuito oscilador generando valores de voltaje hasta de 12.000 V en corriente directa. En la Figura 2 se presentan dos posibles configuraciones para los electrodos, la correspondiente al tratamiento perpendicular (Figura 2. (a)) consta de dos placas de 4 cm<sup>2</sup> y 2 mm de espesor, mientras que la construida para el tratamiento paralelo al flujo (Figura 2. (b)), tiene las mismas dimensiones de la del tratamiento paralelo, pero se diferencia en que a las placas se les hicieron orificios circulares de 1,5 mm de diámetro para permitir el paso del crudo. En ambos casos los electrodos se encuentran separados 2 cm.

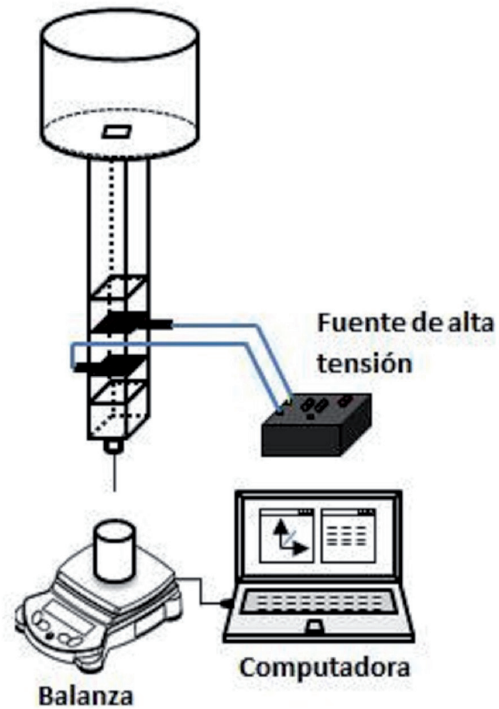


Figura 1. (a) Dispositivo para la aplicación del tratamiento, (b) montaje para los ensayos.

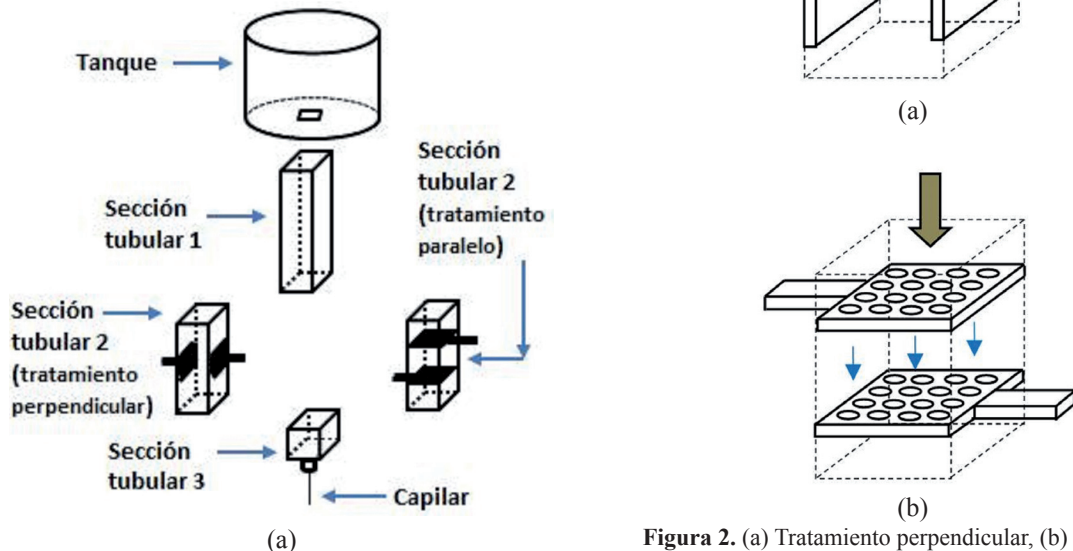


Figura 2. (a) Tratamiento perpendicular, (b) tratamiento paralelo.

La intensidad del CE entre los dos electrodos se calculó con la ecuación 1, encontrando valores hasta de 523,2 V/mm; este cálculo fue verificado mediante simulación, con la cual se encontró una distribución uniforme del campo eléctrico en la región de interés y una diferencia de menos del 2%

$$E = \frac{V}{d} \left( \frac{V}{mm} \right) \quad (1)$$

En la Ecn. (1),  $E$  representa la intensidad del campo eléctrico en voltios por milímetro (V/mm),  $V$  es la tensión aplicada a los electrodos en voltios (V) y  $d$  la distancia entre los electrodos medida en milímetros (mm).

## CARACTERIZACIÓN DEL CRUDO

El crudo estudiado corresponde a muestras de tomadas del pozo Colorado 36. La caracterización inicial del crudo comprende medidas de viscosidad, punto de fluidez, punto de nube, contenido de agua y sedimentos (BSW), densidad y gravedad API, cuyos valores se presentan en la Tabla 1; el propósito de esta caracterización, fue establecer valores de referencia para las muestras sin tratamiento. Este pozo fue seleccionado porque presentaba el problema de precipitación de parafinas y no le habían aplicado ningún otro tipo de tratamiento (químico o térmico) que pudiera interferir con los resultados de esta investigación.

Tabla 1. Propiedades físicas del crudo Colorado 36

Propiedad	Unidad	Resultado	Técnica
Viscosidad ( $\mu_o$ ) (25°C)	cP	2	Medido por viscosímetro OFITE modelo 900
Punto de nube	°C	22,24	DSC [11]
Punto de fluidez	°C	-21	ASTM D5853-95
Densidad ( $\rho$ ) (25°C)	g/cm <sup>3</sup>	0,8	ASTM D1480-62
BSW	% volumen	0,4	ASTM D96-88
Gravedad API	°API	37,7	ASTM D287

## SELECCIÓN DE LA CONFIGURACIÓN PARA EL TRATAMIENTO CON CAMPO ELECTRICICO

Para seleccionar la disposición del campo eléctrico con mayor efecto sobre el flujo másico, se realizaron pruebas a muestras del pozo Colorado 36 con un campo perpendicular y uno paralelo respecto a la dirección del flujo, para una intensidad de 523,2 V/mm y un tiempo de exposición de 18,5 s. Los resultados se presentan en la Tabla 2, donde  $\Delta\dot{m}$  representa el flujo másico en g/s, que equivale a la diferencia entre el flujo másico de una corrida en blanco (sin campo eléctrico)  $\dot{m}_o$  en g/s y una corrida con tratamiento  $\dot{m}_t$  en g/s.

Las medias de los dos experimentos fueron estadísticamente diferentes, este hecho se verificó por medio de una *prueba t* de dos muestras, con un nivel de confianza de 95%.

Tabla 2. Cambio en el flujo másico para las dos configuraciones de campo eléctrico.

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

\* Promedio de 3 corridas

Estos resultados sugieren que la orientación espacial del campo eléctrico respecto a la dirección del flujo, tiene influencia sobre el flujo másico del crudo, siendo mayor cuando éste es aplicado de forma paralela. Para el caso en el cual el flujo y el campo son perpendiculares, el cambio fue solo de 2,12% en comparación con el 11,64% de la configuración paralela y aunque hay un efecto, no es la disposición más significativa. En consecuencia, se seleccionó como configuración para aplicar el tratamiento *las placas que generan el campo eléctrico paralelo a la dirección del flujo*, este resultado es acorde con la orientación del campo dada por otros autores [1], [2], [5].



## PROTOCOLO EXPERIMENTAL

La aplicación del tratamiento con la configuración en paralelo, inicia con el montaje del equipo, la adecuación del capilar y la conexión de la fuente de alta tensión a los electrodos; se carga el dispositivo con 1000 ml de crudo, se establece la comunicación entre la balanza y el computador para iniciar la toma de datos de masa y finalmente se realiza la prueba dejando fluir el crudo por 1 min 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 ensayo. Durante la estimación del flujo másico de una corrida en blanco, el campo eléctrico no es activado y la prueba tiene una duración de 5 min.

La variable elegida como respuesta es el cambio en el flujo másico  $\Delta\dot{m}$  en 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.

$$\Delta\dot{m} = \dot{m}_o - \dot{m}_t \text{ (g/s)} \quad (2)$$

Así, un  $\Delta\dot{m}$  positivo se interpreta como una disminución del flujo másico una vez aplicado el tratamiento, por otra parte, valores negativos de  $\Delta\dot{m}$  indican un aumento del flujo luego de ser tratado el crudo.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tomando el tiempo de exposición y el campo eléctrico como factores de entrada, se realizó un diseño de experimentos factorial para estudiar el efecto de estas variables sobre el crudo [12], tomando 3 niveles para cada factor: 279,1 V/mm, 310,1 V/mm y 523,2 V/mm, para el campo eléctrico y 3,79 s, 18,5 s y 37,89 s, para el tiempo de exposición; cada experimento se replicó dos veces. Con base en los resultados obtenidos, se realizó un análisis estadístico, por medio del cual se obtuvo un diagrama de Pareto estandarizado (ver Figura 3), buscando determinar el efecto de los factores, incluyendo su interacción.

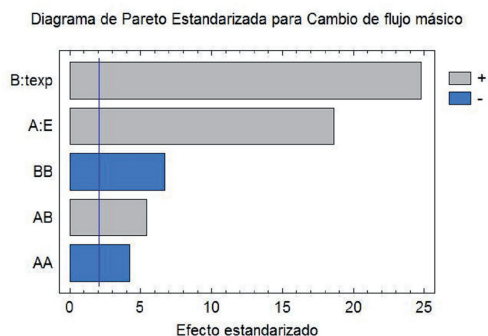


Figura 3. Diagrama de Pareto estandarizado Colorado 36.

Las barras muestran la relación entre el factor analizado **A** para la intensidad del campo eléctrico (**E**) y **B** para el tiempo de exposición (**texp**). El color gris claro indica una proporcionalidad directa entre las dos variables, mientras que las barras de color oscuro representan una proporcionalidad inversa; cualquier barra más allá de la línea vertical, es estadísticamente significativa. El esquema señala que el tiempo de exposición representa el mayor efecto sobre el cambio en el flujo másico, seguido por la intensidad del campo eléctrico.

El análisis estadístico realizado incluyó el respectivo ANOVA (Análisis de Varianza), que se desarrolló con el fin de 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, manejando un nivel de significancia de 0,05.

Por otra parte, la Figura 4 muestra el cambio en el flujo másico presentado al someter las muestras del crudo Colorado 36 a los diferentes ensayos del diseño experimental. La tendencia de  $\Delta\dot{m}$  muestra un incremento a medida que el campo o el tiempo aumentan, siendo el máximo cambio encontrado en el flujo másico de 0,0497 g/s; este cambio se presenta para el nivel alto de campo (523,2 V/mm) y el mayor tiempo de exposición (37,89 s).

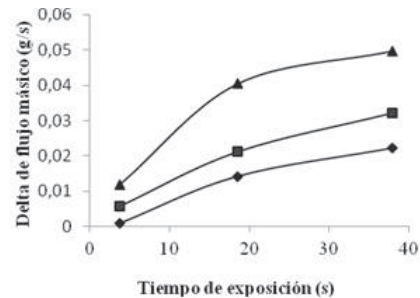


Figura 4. Cambio del flujo másico para E=279,1 (V/mm) (◆), E=310,1 (V/mm) (■) y E=523,2 (V/mm) (▲).

La Tabla 3 resume las condiciones y resultados del ensayo que presentó el mayor cambio en el flujo másico y por lo tanto, un mayor efecto sobre el crudo en el tratamiento.

Tabla 3. Condición representativa.

Crudo Colorado 36	
<b>E (V/mm)</b>	523,2
<b>t<sub>exp</sub>(s)</b>	37,89
<b>Flujo másico en blanco <math>\dot{m}_o</math> (g/s)</b>	0,1699
<b>Delta de flujo másico (<math>\Delta\dot{m}</math>) (g/s)</b>	0,0497
$\frac{\Delta\dot{m}}{\dot{m}_o} * 100$ (%)	29,25

Este escenario se seleccionó como la *muestra representativa* del estudio y con el propósito de evaluar el método aplicado como alternativa de solución al problema de precipitación de parafinas, a esta muestra se le realizaron medidas de la viscosidad, el punto de fluidez, el punto de nube (ver Tabla 4) y seguimiento de la viscosidad en el tiempo (ver Figura 5), para así evaluar los cambios de dichas propiedades y establecer conclusiones.

**Tabla 4.** Cambio de las propiedades del crudo.

Propiedad	Muestra en blanco	Muestra tratada	Cambio
Viscosidad (cP)	2	2,9	0,9
Punto de fluidez (°C)	-21	-15	6
Punto de nube (°C)	22,24	30,51	8,27

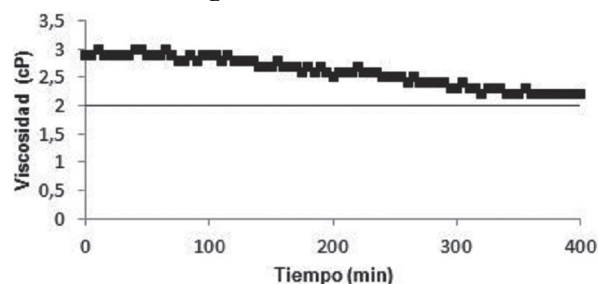
Como se observa, el cambio en la viscosidad equivale a un aumento del 45%, dicha respuesta evidencia una disminución en la movilidad del crudo, desde este punto de vista, el resultado es acorde con los planteamientos hechos por Evdokimov [4], quien afirma que la agregación de parafinas debido a la interacción del crudo con un campo magnético o eléctrico genera un aumento de la viscosidad. Por otro lado un resultado similar de aumento de la viscosidad por efecto del campo eléctrico fue observado por Zhang [6] quien además mostró que para bajos niveles de tensión, se presenta una disminución en esta propiedad. No obstante, los resultados de la Tabla 4 para la viscosidad, difieren de las observaciones reportadas por otros autores [1], [5], [7] quienes, para diversas condiciones, siempre encontraron una reducción al aplicar un tratamiento eléctrico.

Los ensayos para el punto de fluidez (temperatura a la cual el crudo pierde su fluidez) mostraron un aumento de 6 °C luego de ser aplicado el tratamiento, esto puede ser interpretado como una reducción en la movilidad a una temperatura más alta comparado con el crudo sin exposición al campo eléctrico, lo cual es un efecto contrario al esperado. Por otra parte, el punto de nube es un indicador directo de la temperatura a la que inicia el proceso de precipitación [11]; en la Tabla 4, se observa que el punto de nube para el crudo es inicialmente de 22,24 °C y luego de ser aplicado el tratamiento eléctrico, éste aumenta hasta 30,51 °C. Este cambio se puede entender de la siguiente manera, al aplicar el tratamiento al crudo, se va a presentar la depositación 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 depositación y no es recomendado para el pozo productor con el cual se hizo el estudio.

El proceso anteriormente descrito se desarrolló también para el crudo Colorado 67, que presenta características físicas y químicas similares al Colorado 36, los resultados obtenidos fueron aumentos del 20% en la viscosidad, 6 °C en el punto de fluidez y 4,31 °C en el punto de nube, evidenciándose así una respuesta equivalente a la del crudo ya estudiado. 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 [1], [2], [5], [7]; contrario al caso en cuestión, donde los crudos Colorado 36 y Colorado 67 son livianos, parafínicos y con baja cantidad de agua en emulsión.

La duración del efecto del tratamiento eléctrico se obtuvo midiendo la viscosidad de la muestra de crudo en función del tiempo luego de ser tratada, el resultado se observa en la Figura 5.



**Figura 5.** Cambio de la viscosidad para Colorado 36 a 25°C y 600 rpm, sin tratamiento (—) y con tratamiento (■).

Se muestra como la viscosidad del crudo Colorado 36 parte de 2,9 cP y se reduce en el tiempo, tomándole aproximadamente 6 horas en retornar a su valor original; por su parte, el crudo Colorado 67 presentó un comportamiento similar, siendo de 4 horas la duración del efecto. Esto es contrario con los resultados reportados por Tao [1] en donde la viscosidad de un crudo asfáltico se redujo inicialmente al aplicar el tratamiento y luego aumentó por 8 horas hasta llegar a su valor inicial.

## CONCLUSIONES

La orientación en la que es aplicado el el campo eléctrico respecto a la dirección del flujo, 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 del 30%). Bajo estas condiciones, la aplicación de campos eléctricos en los crudos de los pozos Colorado 36 y Colorado 67, produjo un aumento de la viscosidad, que conllevó 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.

Finalmente, 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 indican que la técnica acelera el proceso de deposición de orgánicos, por lo tanto no se recomienda implementarla en los pozos estudiados. Sin embargo, se sugiere realizar un estudio a crudos parafínicos con diferentes cortes de agua y salinidad.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a las escuelas de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Ingeniería Química e Ingeniería de Petróleos de la Universidad Industrial de Santander, el Campo Escuela Colorado (CEC) y el Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica (GISEL) por el apoyo a la presente investigación.

## REFERENCIAS

1. TAO R. et al. Reducing the viscosity of crude oil by pulsed electric or magnetic field. *Energy & Fuels*. 2006, vol 20, p. 2046-2051.
2. 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.
3. TAO, R. The physical mechanism to reduce viscosity of liquid suspensions. *International Journal of Modern Physics B*. 2007, vol 21, p. 4767-4773.
4. EVDOKIMOV I. et al. Apparent disaggregation of colloids in a magnetically treated crude oil. *Energy & Fuels*. 2009, vol 23, p. 4016-4020.
5. TANG H. et al. Electro rheology improves transportation of crude oil. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2011, vol 22, p. 1673-1676.
6. ZHANG J. et al. The electrorheological effect study of crude oil under the applied electric field. *Physical and Numerical Simulation of Geotechnical Engineering 2nd ISSUE*. China, 2011.
7. LESS S. et al. An electro rheological study on the behavior of water in crude oil emulsions under influence of a DC electric field and different flow conditions. *Journal of Dispersion Science and Technology*. 2008, vol 29, p. 106-114.
8. GONCALVES, J. et al. Study of the factors responsible for the rheology change of a Brazilian crude oil under magnetic fields. *Energy & Fuels*, 2011, vol 24, p. 3144-3149.
9. ARIZA, E. Determinación del umbral de cristalización de las parafinas en el crudo del Campo Colorado. Tesis de Maestría. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería de Petróleos, 2008.
10. VILLABONA C. y GONZALEZ G., D. Mejora de la movilidad del crudo parafínico mediante campos magnéticos. Trabajo de Grado. Director: Hermann Raul Vargas Torres, Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2009.
11. OUTLAW J. et al. Wax appearance temperature detection by DSC. Application note, Perkin Elmer, Inc., 2011.
12. MONTGOMERY, D. Diseño y análisis de experimentos. 2 ed. México, D.F.: Grupo Noriega Editores, 2004. ISBN 968-18-6156-6.

---

*Recepción:* 19 de Mayo de 2013  
*Aceptación:* 19 de Diciembre de 2013