

Electrostatic Destabilization of W/O Emulsions: Evaluation of Influential Electrical Factors

María Alejandra Rodríguez¹; Cristina Palenzuela¹; Víctor Villalba¹; Aidaelena Smith¹

¹Universidad Metropolitana, Venezuela, marodriguezded@unimet.edu.ve, cpalenzuela@correo.unimet.edu.ve,
victor_villalba@correo.unimet.edu.ve, asmith@unimet.edu.ve

Abstract – *The presence of water-in-crude oil (W/O) emulsions represents a critical challenge for the petroleum industry due to operational costs and international quality requirements. This research evaluates the influence of various operational and geometric factors in the electrostatic destabilization process to improve the efficiency of phase separation, which is aligned with SDGs 7 and 9. Through a 2nd experimental design, variables such as residence time (60s and 120s), applied voltage (1000V and 2000V), electrode material (Copper and Stainless Steel), and electrode geometry (thickness and spacing) were analyzed. Process effectiveness was quantified using a Destabilization Factor (FD), which measures the proportional change in water droplet size. Crude oil characterization included water content (ASTM D4006), API gravity, and viscosity. The results indicated that copper electrodes achieved the highest performance with a FD of 5.0 under specific conditions (120s, 1000V, 0.4 mm thickness, and 0.5 cm spacing). The study concludes that optimizing electrode material and geometry is more effective than merely increasing the voltage, offering a sustainable alternative to the use of chemical demulsifiers.*

Keywords: *Electrostatic destabilization, W/O emulsions, Destabilization Factor, Coalescence, Crude oil dehydration.*

Desestabilización electrostática de emulsiones W/O: Evaluación de factores eléctricos influyentes

María Alejandra Rodríguez¹; Cristina Palenzuela¹; Víctor Villalba¹; Aidaelena Smith¹

¹Universidad Metropolitana, Venezuela, marrodriguezded@unimet.edu.ve, cpalenzuela@correo.unimet.edu.ve, victor_villalba@correo.unimet.edu.ve, asmith@unimet.edu.ve

Resumen– La presencia de emulsiones de agua en crudo (W/O) representa un desafío crítico para la industria petrolera debido a los costos operativos y las exigencias de calidad internacional. Esta investigación evalúa la influencia de diversos factores operativos y geométricos en el proceso de desestabilización electrostática para mejorar la eficiencia de la separación de fases, lo cual está alienado a los ODS 7 y 9. Mediante un diseño experimental 2ⁿ, se analizaron variables como el tiempo de residencia (60s y 120s), el voltaje aplicado (1000V y 2000V), el material de los electrodos (Cobre y Acero Inoxidable) y la geometría de los mismos (espesor y distancia). La efectividad del proceso se cuantificó a través de un Factor de Desestabilización (FD), que mide el cambio proporcional en el tamaño de las gotas de agua. La caracterización del crudo incluyó contenido de agua (ASTM D4006), gravedad API y viscosidad. Los resultados indicaron que los electrodos de cobre alcanzaron el mayor desempeño con un FD de 5,0 bajo condiciones específicas (120s, 1000V, 0,4mm de espesor y 0,5cm de distancia). El estudio concluye que la optimización del material y la geometría de los electrodos es más efectiva que el simple incremento del voltaje, ofreciendo una alternativa sostenible al uso de demulsificantes químicos.

Palabras clave: Desestabilización electrostática, Emulsiones W/O, Factor de Desestabilización, Coalescencia, Deshidratación de crudo.

I. INTRODUCCIÓN

La industria petrolera enfrenta desafíos críticos en la separación de emulsiones agua en crudo (W/O), un proceso esencial para cumplir los estándares de calidad exigidos a nivel internacional. La coalescencia de las gotas de agua bajo campo eléctrico homogéneo acelera la separación de fase, lo que permite reducir costos operativos [1].

El presente estudio busca profundizar los conceptos, aplicaciones, variables y limitaciones de la parte eléctrica del proceso y cómo mejorar su eficacia; aporta conocimientos técnicos respecto al área eléctrica.

En Venezuela, el proceso de separación de crudo y agua involucra técnicas como calentamiento, uso de demulsificantes, decantación y separación electrostática. El empleo de fuerzas externas como la electrostática, térmica o mecánica, estimulan y aceleran el movimiento de las gotas y por ende su coalescencia [2]. En el proceso de deshidratación de petróleo el agua debe removerse por debajo del 1 % generando la coalescencia de las gotas de agua y su consecuente separación [1].

Una emulsión química es la mezcla heterogénea de dos líquidos inmiscibles, los cuales forman una suspensión estable

donde la fase dispersa se distribuye en forma de pequeñas gotas en la fase continua [3]. La emulsión de agua en crudo (W/O) se produce cuando el agua y el petróleo entran en contacto, formando una emulsión de gotas de agua suspendidas en el aceite [1]; esto es común durante el proceso de extracción de petróleo en pozos, lo que puede complicarlo, debido a que esta mezcla cambia las propiedades reológicas del crudo y posteriormente se dificulta la separación de ambas fases (agua y crudo).

Las emulsiones W/O, se caracterizan en función de variables como viscosidad, densidad, pH, estabilidad, distribución acumulada del tamaño de las gotas, tensión interfacial y porcentaje de agua presente; estos parámetros, son necesarios para comprender su comportamiento [4].

La desestabilización de emulsiones rompe la estabilidad de la mezcla de agua y aceite. El estudio, aplica un campo eléctrico homogéneo para alterar la estabilidad de la emulsión, favoreciendo la coalescencia de las gotas de agua induciendo la separación de fases (agua-aceite); este fenómeno se origina gracias a la polarización de las gotas lo que provoca su atracción entre sí [5].

Para separar las fases de las emulsiones W/O, la práctica común es el uso de química demulsificante, donde la aplicación del campo eléctrico puede acelerar este proceso, debido a que la separación por gravedad de las pequeñas gotas de agua dispersas en el crudo hace más lento el proceso.

La separación electrostática, es un proceso que emplea un campo eléctrico de corriente continua (DC) o corriente alterna (AC), para forzar la coalescencia de las gotas de agua emulsionada; aprovecha los mecanismos de coalescencia (unión de las gotas) y floculación (contacto de las gotas de agua) para generar la separación eficiente de las fases (agua-aceite). Este método resulta ventajoso en el tratamiento de crudo a bajas temperatura, rapidez del efecto de coalescencia y facilidad de rompimiento de la película para la creación de gotas más grandes [6].

El trabajo con campo eléctrico conlleva el manejo de distintos términos, cómo: corriente eléctrica, diferencia de potencial, conductividad y resistividad [7, 8, 9]. La aplicación de campo eléctrico a la emulsión W/O se emplea para separar las fases de agua y aceite, al polarizar las gotas, generado dipolos que se alinean en la dirección del campo eléctrico, lo cual da paso a la coalescencia [10]; este es un método eficiente y limpio ampliamente investigado.

La coalescencia es el proceso de unión de las gotas pequeñas formando una gota grande; este se da en tres etapas: 1) aproximación de las gotas; 2) drenaje de la película de aceite entre las dos gotas; 3) ruptura de la película interfacial [10, 11].

En el proceso de separación electrostática, el tiempo de residencia representa el intervalo de tiempo durante el cual la emulsión W/O está expuesta a la influencia del campo eléctrico. Este intervalo es fundamental para permitir que las gotas de agua dispersas en la fase oleosa coalescan y se separen efectivamente. El efecto que tiene la aplicación del campo eléctrico en la desestabilización de la emulsión es proporcional al tiempo que se aplica el campo a la emulsión [12].

Dentro de este proceso desestabilizador, se define como variable de respuesta el Factor de desestabilización (FD); este es un parámetro que permite cuantificar la eficacia del tratamiento eléctrico aplicado, al evaluar el cambio proporcional de la cantidad de agua en gotas de mayor tamaño una vez aplicado el tratamiento eléctrico; según su valor, el FD indica: $FD < 0$, disminuye la cantidad de agua en gotas grandes; $FD = 0$, no hay cambio; $FD > 0$, aumenta la cantidad de agua en gotas grandes [13]. Este valor depende de la distribución acumulada del tamaño de gotas, que representa las fracciones de la muestra en función del tamaño de gotas [14].

En el diseño experimental 2^n , n son los factores (cuantitativos o cualitativos), cada uno con dos niveles (alto y bajo); donde una réplica completa de dicho diseño requiere $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^n$ observaciones [15]. En la aplicación de campo eléctrico, son factores por tomar en cuenta, el control del tiempo de exposición de la emulsión ante el campo eléctrico, la separación entre los electrodos, el voltaje aplicado, el espesor de los electrodos y el material de los electrodos, ya que son cruciales para garantizar la eficacia del proceso de coalescencia.

En función a lo indicado, el estudio se propone determinar la influencia de las variables asociadas al campo eléctrico en la desestabilización de emulsiones W/O para optimizar el proceso de separación de fases agua/crudo, lo cual se alinea a los ODS 7 (Energía asequible y no contaminante) y ODS 9 (Industria, Innovación e Infraestructura).

II. METODOLOGÍA

La investigación desarrollada en el estudio se caracteriza por ser aplicada [16], descriptiva [17], con fuente de datos primaria [18], prospectiva [19], cualitativa-cuantitativa [16], y experimental [17]. El desarrollo experimental contempló cuatro etapas, las cuales se detallan a continuación.

A. Establecer las variables asociadas a la aplicación del campo eléctrico.

A partir de una revisión de bibliografía, artículos y trabajos previos asociados al tema, se buscó entender el

fenómeno eléctrico y sus principales variables, así como las variables que son posibles manipular a nivel experimental.

El sistema empleado consiste en una celda de observación a nivel de microscopio, la cual está conectada a una fuente de poder que provee la diferencia de potencial a ser aplicado en el sistema; la celda se ubica en el microscopio óptico a fin de observar los cambios ante la aplicación del campo eléctrico.

B. Caracterización de la muestra de crudo emulsionado.

Se empleó una muestra de crudo emulsionado, la cual fue caracterizada en función de distintas propiedades. En la Tabla I, se presenta la técnica empleada para la determinación de las propiedades consideradas en la caracterización de la muestra.

TABLA I
TÉCNICAS EMPLEADAS EN LA CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA

Propiedad	Técnica
Estabilidad de la emulsión W/O	Centrifugación
Contenido de agua y sedimentos	ASTM D 4007 [21]
Contenido de agua	ASTM D 4006 [22]
Densidad aparente	Picnometría
Gravedad API	Cálculo a partir del contenido de agua y la densidad aparente
Viscosidad aparente	Viscosímetro rotacional
Distribución acumulada del tamaño de gota	Análisis de imagen obtenida por microscopía óptica

C. Aplicación del diseño experimental 2^n .

A partir de las variables definidas y considerando dos niveles para cada una de ellas (alto y bajo), se establecen las distintas experiencias a realizar con el diseño experimental factorial 2^n , empleando el sistema formado por una celda de observación a nivel de microscopio (Base de PLA - ácido poliláctico), donde se coloca un portaobjetos de $3,75\text{cm}^2$, el cual soporta los electrodos; esta celda está conectada a una fuente de poder que provee la diferencia de potencial (2,5 mA, cap máx. 3 kV, PHYWE) a ser aplicada al sistema; la celda se ubica en el microscopio óptico (SWIFT, modelo SW380, 4-10X) a fin de observar y llevar el registro de vídeos y fotografías (eyepiece EC 1.3MP), del antes, durante y después de la aplicación del campo eléctrico (CE) que permitan posteriormente evaluar el efecto del tratamiento aplicado. Se emplearon cables calibre 12 THW para conectar los electrodos a la fuente de poder y se colocó una gota de la emulsión W/O en el espacio entre los electrodos para observar bajo el microscopio. Se procedió a aplicar el CE usando la fuente de poder bajo las condiciones establecidas en el diseño experimental. En la Fig. 1 se presenta el montaje del sistema y la celda de observación bajo el microscopio.

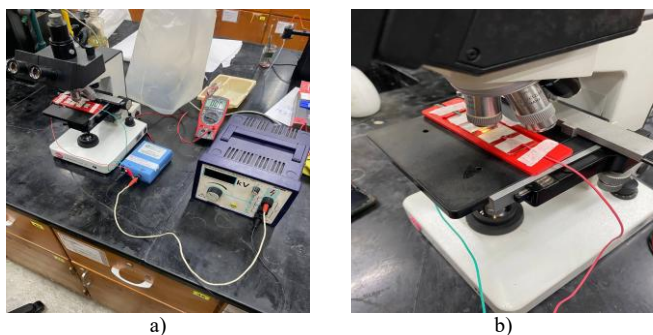


Fig. 1. Aplicación del tratamiento con campo eléctrico. a) Montaje del sistema. b) Celda de observación.

Se definieron como variables: el tiempo de aplicación del CE, la separación de los electrodos, el material de los electrodos, el área de los electrodos y diferencia de potencial aplicado; en la Tabla II, se presentan los valores de los niveles tomados en cuenta para el estudio.

TABLA II
NIVELES CONSIDERADOS PARA LAS VARIABLES EN ESTUDIO EN EL DISEÑO EXPERIMENTAL 2^N

Variable	Nivel	
	Bajo	Alto
Tiempo de aplicación del CE (seg)	60	120
Diferencia de Potencial (V)	1000	2000
Material de los electrodos	Cobre (C)	Acero inoxidable (Ai)
Espesor de los electrodos (mm)	0,4	0,6
Distancia entre los electrodos (cm)	0,5	0,7

En función a lo indicado, el diseño experimental considera la realización de 32 pruebas, parte de ellas se presentan en la Tabla III, siendo la variable de respuesta a determinar el Factor de destabilización (FD) [13].

TABLA III
DISEÑO EXPERIMENTAL PLANTEADO PARA EL DESARROLLO DE LA FASE EXPERIMENTAL, CONSIDERANDO COMO MATERIAL EL COBRE

Prueba	Variables				
	A	B	C	D	E
	Material de los electrodos	Espesor de los electrodos	Separación entre los electrodos	Tiempo de aplicación del CE	Diferencia de Potencial
1	C	0,4	0,5	60	1000
2	C	0,4	0,5	60	2000
3	C	0,4	0,5	120	1000

4	C	0,4	0,5	120	2000
5	C	0,4	0,7	60	1000
6	C	0,4	0,7	60	2000
7	C	0,4	0,7	120	1000
8	C	0,4	0,7	120	2000
9	C	0,6	0,5	60	1000
10	C	0,6	0,5	60	2000
11	C	0,6	0,5	120	1000
12	C	0,6	0,5	120	2000
13	C	0,6	0,7	60	1000
14	C	0,6	0,7	60	2000
15	C	0,6	0,7	120	1000
16	C	0,6	0,7	120	2000

Las pruebas de la 17 a la 32, consideran las mismas condiciones, solo que como material el Ai.

Para la determinación del FD, se llevó a cabo un registro fotográfico del antes y después de aplicado el tratamiento eléctrico a la muestra según la experiencia (Fig. 2.a y 2.b), para luego analizar la imagen de modo de obtener la distribución acumulada de gotas, a partir de donde se determina el FD. En la Figura 2.c, se presenta el comportamiento esperado de la distribución acumulada del tamaño de gotas, antes y después de aplicado el tratamiento.

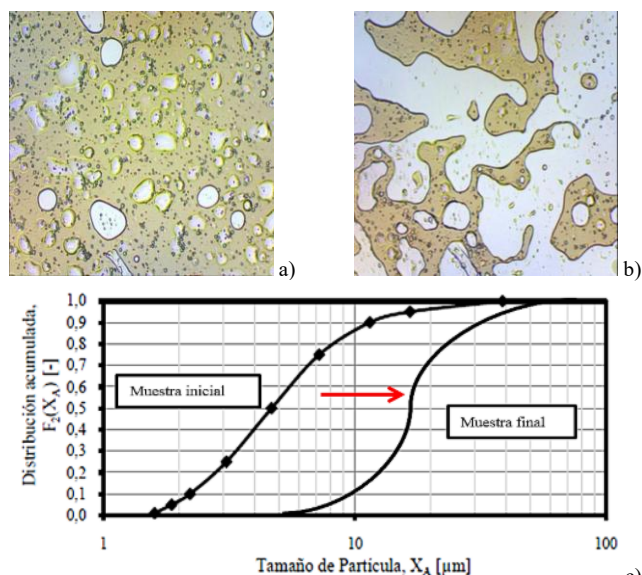


Fig. 2. Tamaño de gotas con la aplicación del campo eléctrico. a) Antes, b) Después, c) Curva de distribución acumulada antes y después del tratamiento.

Evaluar las variables de mayor influencia en la desestabilización de emulsiones W/O.

Para ello se aplicó el análisis estadístico de ANOVA de dos vías, con el fin de identificar la o las variables con mayor influencia así como la interacción que puede presentarse entre las variables consideradas; se indicó la experiencia con mayor FD con el fin de establecer la mejor combinación de variables que pueden promover este proceso.

Con el fin de determinar el FD se empleó (1), que introduce el Factor de Desestabilización Global (FDGa) en función al ajuste de la distribución acumulada de gotas [13].

$$FDGa = \frac{\lambda - \left(\int_{X_{min}}^{X_{max}} f_2(x) dx \right)}{\lambda - (X_{max} - X_{max}^{\circ}) + \left(\int_{X_{min}^{\circ}}^{X_{max}^{\circ}} f_2^{\circ}(x) dx \right)} \quad (1)$$

En la ecuación (1), Xmax y Xmin son respectivamente el máximo y el mínimo diámetro de la distribución acumulada de gotas después de la aplicación del campo eléctrico. Xmax° y Xmin° son respectivamente el máximo y el mínimo diámetro de la distribución acumulada de gotas antes de la aplicación del campo eléctrico; mientras que f2° y f2 son respectivamente la función de ajuste de distribución acumulada antes y después. El área máxima, está comprendida entre (Xmin°-Xmax) y (y2-y1), donde y2 siempre es igual a 1 y y1 es igual a cero, esto se describe con (2) y la Fig. 3.

$$\lambda = (y_2 - y_1) * (x_2 - x_1) \quad (2)$$

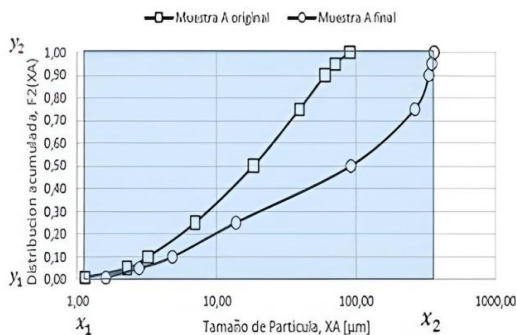


Fig. 3. Rectángulo de área λ para el cálculo del FDGa de una muestra

III. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del proceso metodológico indicado.

A. Establecer las variables asociadas a la aplicación del campo eléctrico.

En el proceso de desestabilización de emulsiones W/O aplicando campo eléctrico, se presentan variables que afectan de distinta forma la eficacia de este proceso.

Se puede mejorar la coalescencia y aumentar la velocidad de separación del agua contenida en el crudo al aplicar campo eléctrico AC o DC, en contraste con los casos no tratados. En emulsiones tratadas con 800 V para la separación de fases, se obtuvo mayor eficacia; sin embargo, a 900 V no apreciaron incremento en la velocidad de separación de fases, por lo que diferencias de 100 V no representan un cambio significativo [22]. En función a esto, puede resultar de interés comprobar que, entre la diferencia de potencial de 1000 V y 2000 V, una diferencia de 100 V puede o no ser significativa.

La distancia entre los electrodos puede afectar de manera importante la eficacia del campo eléctrico aplicado para la separación de fases en la emulsión W/O, ya que existe un efecto individual y combinado, de diferencia de potencial y distancia entre electrodos sobre el tiempo de separación electrostática de una emulsión W/O [2]. La distancia y la diferencia de potencial están relacionados con el tiempo requerido para que ocurra la separación de fases de la emulsión W/O, donde para ver resultados satisfactorios de separación se requiere de un tiempo 8,3 s, una distancia de 2 cm y 9000 V; mientras que fueron necesarios 45,0 s para 6 cm y 3000 V [2]. Estos resultados en función de cambios en la distancia y en la diferencia de potencial demuestran que el tiempo necesario para separar efectivamente las fases de la emulsión W/O va de la mano con estas variables.

El estudio considera como materiales de los electrodos el cobre (comercial) y acero inoxidable (304), debido a sus propiedades respecto a la conductividad y la corrosión. Por un lado, el cobre es un material altamente conductivo y resistente a la corrosión, es empleado en una amplia variedad de aplicaciones por tener poca actividad química y oxidarse en el aire húmedo de forma lenta [23]; esto lo convierte en un material adecuado para trabajos con posibles exposiciones a corrosión y con buena conductividad eléctrica. Por otro lado, el acero inoxidable fue seleccionado debido a que un ambiente con agua y surfactantes tiende a ser un ambiente corrosivo; aunque su conductividad no es menor que la del cobre. Por lo que se opta por su durabilidad frente a ambientes desfavorables, gracias a su resistencia a la corrosión, propiedad que alcanza gracias a la reacción del cromo con el oxígeno, lo que crea sobre la superficie una capa autoprotectora pasiva muy fina, que se regenera espontáneamente si resulta dañada [24].

El espesor de los electrodos seleccionado (0,4-0,6 mm), se fundamenta en el modelo de placas infinitas paralelas, en el que el campo eléctrico se considera uniforme y perpendicular entre las superficies, debido a que el área influenciada por el campo es mucho más pequeña que el espesor de los electrodos, por lo que se puede considerar que el campo resulta uniforme. Un mayor espesor incrementa el área efectiva de interacción electrostática, ampliando la región donde las líneas de campo se comportan de manera uniforme [6].

Por lo tanto, en Tabla IV, se presentan las variables consideradas en el estudio y su fuente de referencia.

TABLA IV
VARIABLES CONSIDERADAS EN EL ESTUDIO PARA LA DESESTABILIZACIÓN DE
LA EMULSIÓN W/O

Variable	Referencia
Tiempo de aplicación del CE (seg)	[2, 13]
Diferencia de Potencial (V)	[23]
Material de los electrodos	[24, 25]
Espesor de los electrodos (mm)	[8]
Distancia entre los electrodos (cm)	[2]

B. Caracterización de la emulsión W/O.

En la Tabla V se muestran los resultados obtenidos de la caracterización de la emulsión W/O a ser tratada con campo eléctrico.

TABLA V
CARACTERIZACIÓN DE LA EMULSIÓN W/O

Característica	Valor
Viscosidad aparente (cP) +/- 0,1	233,8
Densidad aparente (g/ml) +/- 0,004	0,912
Grados °API del crudo +/- 0,1	23,6
Contenido de agua por destilación (%v/v) +/- 1	32
Contenido de agua y sedimentos por centrifugación (%v/v) +/- 1	37
Tamaño de gota promedio (micras) +/- 0,1	12,9

De la caracterización de la emulsión W/O se obtuvo que: 1) la emulsión se mantiene estable y homogénea sin presentar una separación de fases detectable después de aplicar la centrifugación; 2) la densidad aparente presenta un valor cercano a la densidad del agua lo que dificulta la separación de fases; 3) la emulsión es moderadamente viscosa al presentar una viscosidad aparente en un rango entre 200-300 cP. A mayor contenido de agua, mayor interacción entre gotas y por lo tanto mayor viscosidad [25]; 4) según los estándares establecidos de American Petroleum Institute (API) indican que el rango entre 22,3 - 31,1 °API identifica a un crudo mediano, por lo que la muestra de crudo empleada tiene estas características [26]; 5) el contenido de agua por destilación fue del 32%, lo cual es un valor elevado para el tipo de crudo determinado [27]; 6) el contenido de agua y sedimentos por centrifugación es de 37%, siendo común que este valor sea mayor que el obtenido en la prueba de destilación; y 7) el tamaño de gota promedio de la muestra emulsionada es de 12,9 micras, lo que indica un tamaño de gota pequeño y por ende la emulsión es estable.

Es importante la caracterización de la muestra emulsionada a ser tratada, ya que al aplicar como proceso de

separación el campo eléctrico (CD o CA), para lograr la coalescencia de las gotas de agua emulsionada, conforme los valores de las propiedades físicas del crudo (viscosidad y densidad) son más altos, la aplicación de este proceso se dificulta [25].

C. Aplicación del diseño experimental 2ⁿ.

El análisis de imagen de las distintas pruebas consideradas en el diseño experimental 2ⁿ empleando el software *ImageJ*, requirió el uso de la cámara de Neubauer para su calibración, donde la distancia de referencia se seleccionó del cuadrado más pequeño (Fig. 4.a - 0,05mm de lado) y se midió esa misma distancia equivalente en píxeles (702 px) para establecer una relación de escalas precisas [28].

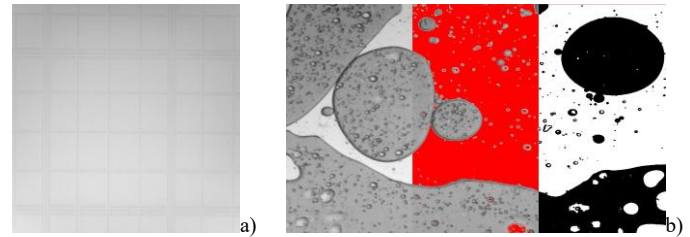


Fig. 4. Imágenes. a) Escala de referencia cámara de Neubauer. b) Proceso de edición y ajuste en el programa *ImageJ*.

De igual forma, fue necesario el ajuste de las imágenes a 8 bit, quedando en blanco y negro para su posterior análisis. Por otro lado, utilizando la herramienta *threshold* del programa y ajustando los parámetros se pudo extraer el área que cubre el agua en la imagen, siendo esta seleccionada en color rojo. Finalmente, el programa ajusta la imagen, quedando en blanco las zonas donde hay concentración de agua y en negro todo lo demás. En la Fig. 4.b se aprecia el proceso de análisis explicado.

El software *ImageJ* permite obtener el diámetro y área de cada gota, y con esta información se desarrollaron tablas de distribución y frecuencia, para poder analizar los datos y crear las gráficas de distribución de tamaño de gota para cada prueba, como las presentadas en la Fig. 5. A las curvas generadas en estos gráficos se les hizo un ajuste logarítmico neperiano para luego calcular el FD con (1).

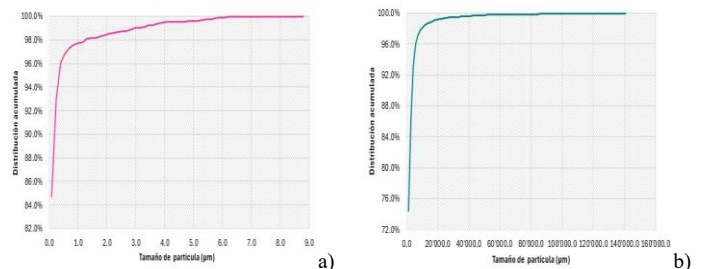




Fig. 5. Gráfico de distribución de tamaño de gota, para la Prueba 31 con Ai. a) Antes de aplicar CE. b) Después de aplicar CE. c) Comparación del antes y después de la aplicación del CE.

Luego de realizadas las distintas pruebas y determinado el FD, se obtienen los resultados presentados en la Fig. 6.

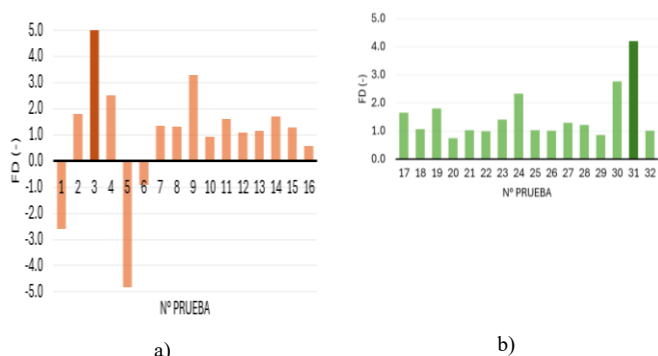


Fig. 6. Gráficos del Factor de Desestabilización. a) C b) Ai.

Se aprecia que para el C se obtiene como mejor FD el valor de 5,0 y para el acero inoxidable el mejor FD es 4,2 indicando con ello que, como material, es más eficaz el cobre que el acero inoxidable. Por lo que ambos materiales podrían ser empleados en los electrodos para generar la desestabilización de la emulsión, al obtenerse un valor para el FD mayor a 0; es por ello que se seleccionaron los mejores casos con el fin de verificar su repetibilidad.

En las pruebas de repetibilidad de los mejores casos se grafican la Fig. 7.

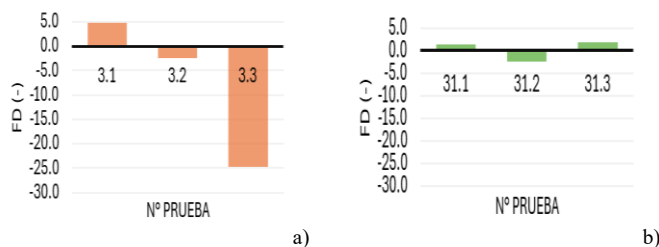


Fig. 7. Factor de Desestabilización (repetibilidad) de la mejor Prueba con C y Ai. a) Prueba 3. b) Prueba 31.

Esto indica que la prueba con acero inoxidable presenta mejor repetibilidad que la prueba con cobre bajo las mismas condiciones (diferencia de potencial, separación entre los electrodos, tiempo de aplicación del CE, espesor de los electrodos); esto se puede explicar apoyados en la Fig. 8,

donde el agua se acumula del lado izquierdo donde se encuentra el electrodo negativo, mientras que en el electrodo positivo casi no hay presencia de agua después de haber aplicado el campo eléctrico.

Si se utiliza el objetivo 10X del microscopio óptico antes de aplicar el campo eléctrico, es posible identificar las zonas A, B y C, tal como se aprecia en la Fig. 8. Cuando se selecciona una ubicación específica antes de aplicar el campo a la muestra, es posible observar una zona de enfoque donde ocurre mayor actividad (zona A) con una mayor concentración de agua o, por el contrario, esta se desplace a otra zona fuera de la vista del objetivo del microscopio óptico (zona B o zona C). Como resultado del proceso se obtienen diferentes FD debido a la falta de una vista general entre ambas placas. El objetivo 4X del microscopio óptico proporciona una vista más amplia del proceso, pero no es posible visualizar completamente lo que ocurre entre ambos electrodos y adicionalmente dificulta la medida del tamaño de gota.

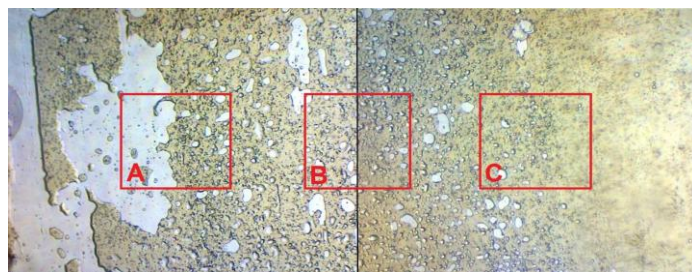


Fig. 8. Vista entre ambas placas con el objetivo 4X. Zonas A, B y C con la posible vista del objetivo 10X.

Evaluar las variables de mayor influencia en la desestabilización de emulsiones W/O.

De acuerdo con los análisis realizados al FD obtenido del diseño experimental (Fig. 6), se determinó que las condiciones para maximizar el FD corresponden a: espesor de los electrodos (0,4 mm), distancia entre los electrodos (0,5 cm), mayor tiempo de residencia (120 s) y diferencia de potencial bajo (1000 V), alcanzando un FD de 5,0. El acero inoxidable, bajo idénticas condiciones experimentales, exhibió un comportamiento similar en cuanto a la relación de variables: espesor de los electrodos (0,6 mm), distancia entre los electrodos (0,7 cm), mayor tiempo de residencia (120 s) y diferencia de potencial bajo (1000 V), alcanzando un FD de 4,2.

Con base en los resultados obtenidos por el método ANOVA de dos vías, se comparó el material como variable fija, para así verificar su efectividad con respecto a las otras variables, usando un nivel de significancia del 5% (ver Tabla VI).

TABLA VI
RESULTADOS DEL ANÁLISIS ANOVA

Combinac.	F material	valor de p	F Factor 2	valor de p	F Interac.	valor de p
-----------	------------	------------	------------	------------	------------	------------

Material x Diferencia de Potencial	0,724	0,402	0,0002	0,989	0,183	0,672
Material x Tiempo	0,844	0,366	3,46	0,074	1,191	0,284
Material x Distancia	0,826	0,371	0,65	0,426	3,284	0,081
Material x Espesor	0,761	0,390	1,12	0,300	0,339	0,565

Se determinó que, bajo las condiciones experimentales, los factores no alcanzaron el umbral de significancia, lo que puede indicar que el proceso es robusto ante pequeños cambios de voltaje o tiempo, o que el error experimental es alto debido a la naturaleza compleja de las emulsiones W/O (Fig. 8). En la Tabla VII se aprecian los valores más altos de F calculado, los cuales se atribuyen las razones indicadas.

TABLA VII
COMPARACIÓN DEL F CRÍTICO

Combinación	F Calculado	F Crítico ($\alpha=0.05$)	Diferencia	Significancia
Material x Diferencia de Potencial				
Material	0,724	4,20	-3,476	No
Diferencia de Potencial	0,0002	4,20	-4,199	No
Interacción	0,183	4,20	-4,017	No
Material x Tiempo				
Material	0,844	4,20	-3,356	No
Tiempo	3,46	4,20	-0,740	Casi
Interacción	1,191	4,20	-3,009	No
Material x Distancia				
Material	0,826	4,20	-3,374	No
Distancia	0,65	4,20	-3,55	No
Interacción	3,284	4,20	-0,916	Casi
Material x Espesor				
Material	0,761	4,20	-3,439	No
Espesor	1,12	4,20	-3,08	No
Interacción	0,339	4,20	-3,861	No

Dado que el análisis de varianza (ANOVA) reveló que, ningún factor alcanzó el nivel de significancia estadística ($p > 0,05$), se identificaron tendencias predominantes a través de los valores de F calculado, donde la interacción entre el material y la distancia entre electrodos ($F_{calc} = 3,284$) y el tiempo de aplicación ($F_{calc} = 3,46$) representaron las mayores fuentes de variación en el Factor de Desestabilización (FD) y la probabilidad de que su efecto sea debido al azar es menor que la de los otros factores..

Numéricamente, el cobre alcanzó un FD de 5,0, un 20% superior al acero; esta tendencia sugiere que, en un escalamiento industrial, la selección del material es un parámetro de diseño más crítico que el incremento del potencial eléctrico. Por lo que, la eficiencia del proceso está gobernada por la sinergia entre la intensidad del campo (V/d) y la cinética de coalescencia, más que por el incremento aislado del potencial eléctrico. Estos resultados señalan el camino para futuras mejoras, implica la priorización de la selección de materiales de alta conductividad y el diseño de tiempos de residencia adecuados en el escalamiento industrial.

IV. CONCLUSIONES

Se validó que la caracterización fisicoquímica de la emulsión W/O empleada constituye un modelo representativo de los crudos de difícil tratamiento industrial, ya que su estabilidad intrínseca permitió evaluar con rigor la capacidad de desestabilización del campo eléctrico DC frente a los límites de los métodos de separación convencionales.

A través del diseño factorial 2^n , se demostró que la eficiencia del proceso no depende de una sola variable, sino de la optimización multivariable. La interacción entre el material del electrodo y la distancia de separación ($F_{calc} = 3,284$) junto con el tiempo de exposición ($F_{calc} = 3,46$) resultaron ser los parámetros críticos que gobiernan la cinética de coalescencia, superando el impacto individual del potencial eléctrico.

Se identificó un umbral de saturación energética a los 1000V, ya que el incremento de la diferencia de potencial por encima de este valor no produjo mejoras significativas en el Factor de Desestabilización (FD), lo que sugiere que el escalamiento industrial de esta tecnología puede operar con bajo consumo energético, minimizando riesgos operativos y optimizando la relación costo-beneficio.

El prototipo alcanzó su máximo rendimiento ($FD = 5,0$) empleando electrodos de cobre de 0,4 mm con una configuración de campo intenso (0,5 cm de separación). No obstante, la variabilidad observada por la migración preferencial del agua hacia el electrodo negativo y la susceptibilidad química del material sugieren que, para aplicaciones de flujo continuo a largo plazo, el acero inoxidable se posiciona como el material más adecuado debido a su equilibrio entre conductividad y estabilidad frente a la corrosión.

Este estudio concluye que el tratamiento electrostático DC es un método altamente eficiente para la deshidratación de

crudos desafiantes. La capacidad de inducir coalescencia mediante parámetros geométricos y materiales optimizados ofrece una alternativa sostenible y técnicamente superior al uso intensivo de desemulsionantes químicos, alineándose con las tendencias actuales de química verde e ingeniería de procesos eficiente.

AGRADECIMIENTO

Se agradece a la Universidad Metropolitana, por brindar la oportunidad de sinergia entre las Escuelas de Ingeniería Química e Ingeniería Eléctrica, lo que permitió llevar a cabo este estudio.

REFERENCIAS

- [1] Velázquez, I. Pereira, J. (2014). Emulsiones de agua en crudo aspectos generales. *Revista Ingeniería UC*, 21(3), 45-54.
- [2] Lucho, C. S. J., & Huangal Scheineder, Ms. (2019). Separación electrostática de una emulsión de glicerina en biodiesel con aplicación de diferentes voltajes y distancias entre electrodos. <https://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/4059>
- [3] Álvarez, D. (2021). Emulsión Química - Conceptos, fases, tipos y ejemplos. Concepto <https://concepto.de/emulsion-quimica/#que-es-una-emulsion>
- [4] Marfisi, S., & Salager, J. L. (2004). Deshidratación de Crudo - Principios y Tecnología (Cuaderno FIRP N° 853PP) Laboratorio FIRP Escuela de Ingeniería Química, Universidad de Los Andes Mérida 5101 Venezuela.
- [5] Lanza, M. & Vilera, A. (2018). Desestabilización de electrostática de emulsiones de agua en crudo. [Tesis de Grado, Universidad Metropolitana de Venezuela]. <https://unimet.ent.sirsi.net/custom/web/tesis/12/ATTP155L297.pdf>.
- [6] Guardia B., Julio C. (2012). Estudio de la influencia de los asfaltenos en la estabilidad de emulsiones de agua en aceite sometidas a campo eléctrico DC. (2012, October 26). <http://saber.ucv.ve/handle/10872/1960>
- [7] Serway, R. & Jewett, J. (2008) Física para ciencias e ingeniería. Latinoamérica: McGraw Hill.
- [8] Coluccio, E. (2021). Campo Eléctrico - Concepto, historia, medición, fórmula, ejemplos. Concepto. <https://concepto.de/campo-electrico/>
- [9] Coluccio, E. (2021). Voltaje - Concepto, tipos de voltaje y cómo medirlo. Concepto. <https://concepto.de/voltaje/>
- [10] Mhatre, S., Vivacqua, V., Ghadiri, M., Abdullah, A., Al-Marri, M., Hassanpour, A., Hewakandamby, B., Azzopardi, B., & Kermani, B. (2015). Electrostatic phase separation: A review. *Process Safety and Environmental Protection*, 96, 177–195. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2015.02.012>
- [11] Sjöblom, J., Mhatre, S., Simon, S., Skartlien, R., & Sørland, G. (2021). Emulsions in external electric fields. *Advances in Colloid and Interface Science*, 294, 102455. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2021.102455>
- [12] Lesaint, C., Glomm, W. R., Lundgaard, L. E., & Sjöblom, J. (2009). Dehydration efficiency of AC electrical fields on water-in-model-oil emulsions. *Colloids and Surfaces A Physicochemical and Engineering Aspects*, 352(1–3), 63–69. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0927775709005937>
- [13] Rodríguez, M., Goncalves, F & Sorrentino, J. (2024) W/O Emulsions: Destabilizing Factor. LACCEL https://laccei.org/LACCEI2025-Mexico/full-papers/Contribution_2075_final_a.pdf
- [14] Sorrentino, J. (2002). Advances in correlating filter cake properties with particle collective characteristics. [Tesis Doctoral Universidad de Karlsruhe. Shaker Verlag. Alemania]. https://www.researchgate.net/publication/271964379_Advances_in_Correlating_Filter_Cake_Properties_with_Particle_Collective_Characteristics
- [15] Montgomery, D. C., & St. C. (2022). *Design and Analysis of Experiments* (9.a ed.). Wiley.
- [16] Haru, A. Chisag, E. Paul, J. & Caicedo, J. (2024). Tipos y clasificación de las investigaciones. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/9541046.pdf>
- [17] Guevara, G. Verdesoto, A & Castro, N. (2020). Metodologías de investigación educativa (descriptivas, experimentales, participativas, y de investigación-acción). *Revista Científica Mundo de la investigación y el conocimiento (RECIMUNDO)*. IV(3), 163-173. <https://www.recimundo.com/index.php/es/article/view/860/1363>
- [18] Torres, M. (2019). Métodos de recolección de datos para una investigación. <http://148.202.167.116:8080/jspui/handle/123456789/2817>
- [19] Fonseca, M. Corona, M. & Luis A. (2021). Acerca del carácter retrospectivo o prospectivo en la investigación científica. *MediSur*, 19(2), 338-341. Epub. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1727-897X2021000200338&lng=es&tng=es.
- [20] ASTM D 4007. (1995). *Manual of Petroleum Measurement Standards* (4007). United States. Annual Book of ASTM Standards.
- [21] ASTM D 4006. (2000). *Manual of Petroleum Measurement Standards* (4006). United States. Annual Book of ASTM Standards.
- [22] Martínez, A. M., Hernández, J. F., & Colás, V. N. (2006). Separación de agua del petróleo por acción del campo eléctrico. *Redalyc.org*. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=443543688007>
- [23] Royser. (2018). Trabajo de investigación sobre el cobre. *Scribd*. <https://www.scribd.com/document/435635845/TRABAJO-DE-INVESTIGACION-SOBRE-EL-COBRE-docx>
- [24] Meléndez, C. (2012). Obtención de películas delgadas de acero inoxidable 304 y su caracterización electroquímica. *Repositorio Institucional RIUPTC*.
- [25] Rebollo, F & Melania, J. (2007). Estudio del efecto de sólidos en la estabilidad de una emulsión de agua en aceite bajo un campo eléctrico DC. [Trabajo especial de grado, Universidad Central de Venezuela] https://saber.ucv.ve/bitstream/10872/16483/1/TESIS_MELANIA_REBOLEDO.pdf
- [26] Paredes, V. (2025). Propuesta de una correlación para la viscosidad de crudos muertos medianos en función de la temperatura y la gravedad °API. [Tesis de Grado, Universidad Metropolitana de Venezuela].
- [27] Schramm, L. (1992). *Emulsions: Fundamentals and Applications in the petroleum Industry*. Primera edición. Washington, D.C. American Chemical Society Books.
- [28] Gil, M. (2023). Cámara de Neubauer. *Lifeder*. <https://www.lifeder.com/camara-de-neubauer/>