

W/O Emulsions: Destabilizing Factor

María Rodríguez^{1,2}, Fatima Goncalves², José Sorrentino²

¹Universidad Metropolitana, Caracas, Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química.

²Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química.

Abstract- In order to have a parameter that allows quantifying the effect of destabilizing treatments on W/O emulsions, the Destabilizing Factor (FD) is defined. To this end, a compilation of information on the application of FD in treatments (electrical and microwave) of the research line: Separation of oil, water and solids, of the Mechanical Separations Laboratory (LSM) of the School of Chemical Engineering of the Universidad Central de Venezuela was carried out. The information collection period was seven years, taking into account variables such as: voltage, residence time, cell type, coalescer medium and wettability. Based on this information, a new image analysis was performed with the Image-Pro 10 program, obtaining the cumulative distribution of droplets with a template created for Excel. The Global Destabilization Factor (FDG) was established and compared with the FD reported by the authors of each of the analyzed images. Highlights that there are important differences in the calculations of the reported FD and the FDG; However, the latter allows us to have an analysis closer to reality of the effect of the destabilizing treatment applied to the emulsion, by considering all the droplet sizes of the cumulative distribution.

Keywords: W/O emulsion, destabilizing factor, droplet size, cumulative droplet distribution, percentage of water.

Emulsiones W/O: Factor de desestabilización

W/O Emulsions: Destabilizing Factor

María Rodríguez^{1,2}, Fatima Goncalves², José Sorrentino²

¹Universidad Metropolitana, Caracas, Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química.

²Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química.

Resumen- Con el fin de contar con un parámetro que permita cuantificar el efecto de los tratamientos desestabilizantes en las emulsiones W/O, se define el Factor de desestabilización (FD). Para ello, se realizó una recopilación de la información de la aplicación del FD en los tratamientos (eléctrico y de microondas) de la línea de investigación: Separación de aceite, agua y sólidos, del Laboratorio de Separaciones Mecánicas (LSM) de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Central de Venezuela (UCV). El periodo de recopilación de la información fue de siete años, tomando en cuentas variables como: voltaje, tiempo de residencia, tipo de celda, medio coalescedor y mojabilidad. A partir de esta información se realizó un nuevo análisis de imagen con el programa Image-Pro 10, obteniendo la distribución acumulada de gotas con una plantilla creada para Excel. Se estableció el Factor de desestabilización global (FDG_G) y se comparó con el FD reportado por los autores de cada una de las imágenes analizadas. Resalta que existen diferencias importantes en los cálculos del FD reportado y el FDG_G; sin embargo, este último permite tener un análisis más cercano a la realidad del efecto del tratamiento desestabilizante aplicado a la emulsión, al considerar todos los tamaños de gotas de la distribución acumulada.

Palabras clave: Emulsión W/O, factor de desestabilización, tamaño de gota, distribución acumulada de gotas, porcentaje de agua.

Abstract- In order to have a parameter that allows quantifying the effect of destabilizing treatments on W/O emulsions, the Destabilizing Factor (FD) is defined. To this end, a compilation of information on the application of FD in treatments (electrical and microwave) of the research line: Separation of oil, water and solids, of the Mechanical Separations Laboratory (LSM) of the School of Chemical Engineering of the Universidad Central de Venezuela was carried out. The information collection period was seven years, taking into account variables such as: voltage, residence time, cell type, coalesce medium and wettability. Based on this information, a new image analysis was performed with the Image-Pro 10 program, obtaining the cumulative distribution of droplets with a template created for Excel. The Global Destabilization Factor (FDG) was established and compared with the FD reported by the authors of each of the analyzed images. Highlights that there are important differences in the calculations of the reported FD and the FDG_G; However, the latter allows us to have an analysis closer to reality of the effect of the destabilizing treatment applied to the emulsion, by considering all the droplet sizes of the cumulative distribution.

Keywords: W/O emulsion, destabilizing factor, droplet size, cumulative droplet distribution, percentage of water.

I. INTRODUCCIÓN

El petróleo, es un recurso no renovable objeto de comercio entre países, siendo la principal fuente de energía a nivel mundial y una materia prima de relevante importancia. Venezuela, es conocido mundialmente como país productor y exportador de petróleo, por contar con una de las mayores reservas de petróleo probadas, de 303.805.745 millones de barriles en la Faja Petrolífera del Orinoco [1].

La mayor parte de estas reservas, corresponden a hidrocarburos pesados y extrapesados, los cuales al ser extraídos del yacimiento poseen agua; esta puede encontrarse en forma libre o formando una emulsión de agua en aceite (W/O). Las emulsiones son dispersiones líquido-líquido constituidas por dos fases líquidas inmiscibles, una de las cuales está fragmentada en forma de pequeñas gotas (fase dispersa) dentro de la otra (fase continua) y cuya estructura está estabilizada por un agente emulsionante [2, 3].

La formación de estas emulsiones es un problema que puede surgir durante la producción, tratamiento, transporte y refinación del crudo, ya que genera corrosión en equipos, incrustaciones en las tuberías y le resta valor comercial al crudo [4]. Por lo tanto, es importante encontrar alternativas para romper estas emulsiones, lo que contribuye a la optimización de las ganancias en la industria petrolera [5].

Mediante tratamientos de deshidratación se remueve el agua del crudo con el fin de adecuarlo para su posterior procesamiento en refinería, cumpliendo además con la especificación requerida para su comercialización (1% v/v).

Dependiendo del tipo de crudo y de la disponibilidad de recursos se combinan diferentes tratamientos para su deshidratación. Entre los tratamientos se encuentran: a) el tratamiento químico (aplicación de un agente químico: demulsificante), b) el tratamiento térmico (basado en el calentamiento del crudo), c) el tratamiento mecánico (uso de equipos de separación dinámica), y d) el tratamiento eléctrico (aplicación de campo eléctrico); todos estos tratamientos buscan acelerar el proceso de acercamiento de las gotas de la fase dispersa para su posterior coalescencia [3].

La Línea de investigación: Separación de agua, aceite y sólidos, en el LSM de la Escuela de Ingeniería Química de la UCV (Caracas, Venezuela), está orientada a desarrollar estudios que permitan entender los fenómenos y las variables asociadas a la desestabilización de emulsiones W/O, empleando tratamientos mecánico y eléctrico.

Sin embargo, debido a la necesidad de cuantificar la magnitud del cambio ocasionado por el tratamiento de deshidratación, en los casos en los que no es apreciable una separación de fases, se plantea el Factor de desestabilización

(FD). Este representa una relación entre el porcentaje de gotas con diámetro mayor a un tamaño determinado (micras) de la muestra tratada, respecto a la muestra original [6].

Una buena representación del tamaño de las gotas en una emulsión es la curva de distribución, en la que el intervalo del diámetro de las gotas, se divide en un número apropiado de intervalos de clase de cierta amplitud seleccionada, y se expresa una medida de las gotas (puede ser número, longitud, superficie o volumen) que se encuentran en cada intervalo de clase, preferiblemente como porcentaje del total. Las curvas de distribución más utilizadas son la curva de densidad de distribución y la curva de distribución acumulada.

La curva de densidad de distribución representa la fracción de partículas por unidad de tamaño, la cual se obtiene dividiendo la fracción de gotas entre el tamaño del intervalo. Con el fin de representar los datos de la cantidad relativa de las gotas que pertenecen a cada clase de tamaño en función del tamaño de la gota (x_i), se introduce una nueva variable llamada densidad de distribución ($fr(x_i)$), la cual se define como (1).

$$fr(\bar{x}_i) = \frac{\Delta Fr(\bar{x}_i)}{\Delta x_i} = \frac{d}{dx_i} Fr(\bar{x}_i) \rightarrow \Delta Fr(\bar{x}_i)|_{x_1}^{x_2} = \int_{x_1}^{x_2} fr(\bar{x}_i) * dx_i \quad (1)$$

Representando gráficamente $fr(x_i)$ en función de x_i es posible calcular el área bajo la curva entre dos valores de tamaño, x_1 y x_2 , la cual corresponde a la cantidad de partículas que pertenecen a ese intervalo. La curva de densidad de distribución es típicamente como se muestra en la Figura 1, en donde la moda es el punto crítico correspondiente al tamaño de partícula para el cual la curva presenta un máximo [7].

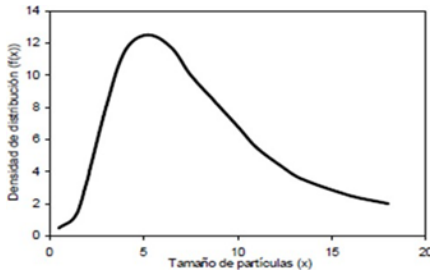


Figura 1 Curva de densidad de distribución.

Por otra parte, la curva de distribución acumulada es una representación de la fracción o porcentaje de las partículas que se encuentran por debajo o por encima de cierto tamaño. Una vez obtenidos los datos acumulados de la cantidad relativa de partículas que pertenecen a cada rango de tamaño, se puede decir que $Fr(x_i)$ representa la cantidad relativa de partículas más grandes (o más pequeñas) que x_i . Se calcula según se indica en (2), (3) y (4).

$$Fr(x_i) = \sum_0^{x_i} \Delta Fr(\bar{x}_i) = \sum_0^{x_i} fr(\bar{x}_i) * dx_i \quad (2)$$

$$\bar{x}_i = \sqrt{x_{i,low} * x_{i,high}} \quad (3)$$

$$F_r(x_i) = \int_0^{x_i} dF(\bar{x}_i) = \int_0^{x_i} F_r(\bar{x}_i) * dx_i \quad (4)$$

Para la nomenclatura de la integral, el límite 0 debe interpretarse como x_{min} y el límite ∞ debe interpretarse como x_{max} . La función $Fr(x_i)$ es la distribución acumulada de gotas y es típicamente como se muestra en la Figura 2, en donde la mediana corresponde al tamaño de partícula para el cual se presenta el 50% de las partículas [7].

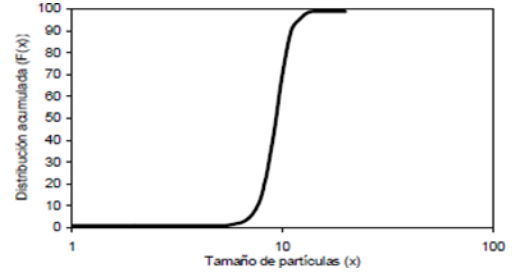


Figura 2. Curva de distribución acumulada.

La distribución de tamaños de gotas es la representación de la cantidad de gotas de cada tamaño que hay en una mezcla. Según la característica que se utilice para definir cuántas gotas pertenecen a cada tamaño, existen cuatro tipos de densidades de distribución [7]: en número ($f_0(x)$), en longitud ($f_1(x)$), en área o superficie $f_2(x)$, y en volumen o masa $f_3(x)$. Una representación gráfica de los tipos de densidad de distribución se muestra en la Figura 3, donde los valores como la moda y mediana del tamaño son diferentes para cada distribución, lo que corresponde a una dependencia de las distribuciones a las que pertenecen.

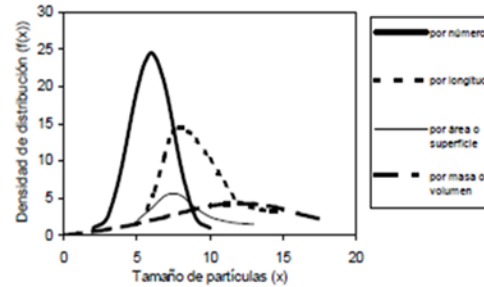


Figura 3. Tipos de distribución de curva.

De forma análoga, existen cuatro tipos de distribuciones acumuladas: en número ($F_0(x)$), en longitud ($F_1(x)$), en área o superficie ($F_2(x)$), en volumen o masa ($F_3(x)$) [7].

La densidad de distribución por definición (5) es,

$$\int_{x_{min}}^{x_{max}} f(x) * dx = 1 \quad (5)$$

Por lo tanto, se debe utilizar aquella distribución que represente mejor el proceso estudiado.

El Factor de desestabilización (FD) se define por la necesidad de cuantificar el efecto del tratamiento eléctrico aplicado a una emulsión W/O; este denota una relación entre el tamaño de gotas antes y después de la aplicación del tratamiento; representa el porcentaje de gotas con diámetro mayor a un cierto tamaño (μm) de la muestra tratada, respecto a la muestra original [6].

Este planteamiento define el FD como un parámetro que permite evaluar de manera directa el cambio proporcional de la cantidad de agua en gotas de mayor tamaño, una vez aplicado el tratamiento eléctrico.

El FD según su valor indica [6]:

FD < 1 Disminuye la cantidad de agua en gotas grandes.

FD = 1 No hay cambio.

FD > 1 Aumenta la cantidad de agua en gotas grandes.

La determinación del FD depende de la curva de distribución acumulada, que permite una representación de la fracción o tamaños de partículas que se encuentran por debajo o por encima de cierto tamaño. Una vez obtenidos los datos acumulados de la cantidad relativa de partículas que pertenecen a cada rango de tamaño, se puede decir que $Fr(x_i)$ representa la cantidad relativa de partículas más pequeñas que x_i (tamaño de la partícula) y que $Rr(x_i)$ representa la cantidad relativa de partículas más grandes que x_i . La suma de ambas fracciones es igual a uno [7].

Se estableció un procedimiento de análisis de imágenes con la ayuda de la microscopía óptica y el software de Image Pro Plus de Media Cybernetics, que permite contar automáticamente las partículas de interés, basándose en la diferencia de colores de las gotas de agua con respecto al crudo que es la fase continua de la emulsión W/O. Con un programa en Microsoft Visual Basic que enlazó Image Pro Plus con Microsoft Excel en el sistema operativo Windows, capaz de realizar automáticamente el análisis de imagen y la manipulación de los datos para la obtención de los resultados [8].

Fung [6], en su estudio establece que a los fines de cuantificar en un solo valor la idea de cuánto crecieron las gotas, define de manera arbitraria un tamaño de gota considerada como “gota grande”. Estableció dicho diámetro de gotas en 40 μm , debido a que todas las muestras usadas (con viscosidad similar) poseían al menos algunas gotas de ese tamaño. Debido a la necesidad de contar con un parámetro que relacione el tamaño de gotas antes y después de aplicado el campo eléctrico, se define el Factor de desestabilización (FD); este permite evaluar de manera directa el cambio proporcional de la cantidad de agua en gotas de mayor tamaño a un x_i establecido una vez aplicado el campo eléctrico [6]. La expresión para el FD (6).

$$FD_F = \frac{\Phi_w(x_A)}{\Phi_w(x_A)^\circ} = \frac{\Phi_w * R_2(x_A)}{(\Phi_w * R_2(x_A))^\circ} \quad (6)$$

Donde, $\Phi_w(x_A)$ es el porcentaje del área de la imagen en gotas mayores que (x_A) después de aplicar el tratamiento, Φ_w es el porcentaje de agua después de ser aplicado el tratamiento, $R_2(x_A)$ es la fracción de gotas con diámetro mayor a x_A micrones en la muestra luego de aplicar campo eléctrico, $\Phi_w(x_A)^\circ$ es el porcentaje del área de la imagen en gotas mayores que (x_A) antes de aplicar el campo eléctrico, Φ_w° es el porcentaje de agua antes de ser aplicado el tratamiento, $R_2(x_A)^\circ$ es la fracción de gotas con diámetro mayor a (x_A) micrones en la muestra antes de aplicar campo eléctrico, y FD_F es el FD establecido por [6].

Este FD_F se puede definir como el cambio absoluto en el porcentaje de gotas con diámetro mayor a cierta cantidad de micrones con respecto a la muestra original, por lo que contabiliza el cambio con respecto al porcentaje que representan dichas gotas en toda la muestra; esto tiene la desventaja de estar referido a la cantidad de agua que hay en la muestra, y esta tiene un error asociado al no considerar el espesor de la muestra en el portaobjetos.

García [9] plantea una modificación del FD, que tiene la ventaja de tener un menor error que el valor original donde ambos factores tienen el mismo significado; la diferencia es que el factor original (FD_F) se refiere al cambio absoluto y el nuevo se refiere al cambio relativo (FD_G) (7). En el caso de que el porcentaje de agua en la muestra tratada sea igual al de la muestra original (que es lo esperado), ambos factores tienen el mismo valor [9].

$$FD_G = \frac{R_2(\bar{x}_A)}{R_2^\circ(x_A)} \quad (7)$$

Donde, es el FD_G establecido [9].

Dorta y González [10], realizaron un estudio que incluyó un medio coalescedor micrométrico en la desestabilización electrostática, obteniendo un porcentaje de agua libre para un medio coalescedor hidrofílico. El agua libre no se tomó en cuenta a la hora de determinar la distribución de tamaño de partícula y el FD. Por esta razón el cálculo del FD a partir del planteamiento de Fung, presenta un error asociado. Sin embargo, los resultados obtenidos, a pesar de no considerar la cantidad de agua que se había separado, fueron favorables al desestabilizar la emulsión W/O, luego de la separación de agua inicial. Con el fin de minimizar el error, se planteó una modificación para calcular FD considerando la cantidad de agua libre y la exclusión de la cantidad de medios coalescedor del conteo (8), (9) [10]

$$FD_{D\&G} = \frac{(R_2(x_A) * \frac{\Phi_w}{1 - \Phi_w}) + \lambda}{(R_2(x_A) * \frac{\Phi_w}{1 - \Phi_w})^\circ} \quad (8)$$

$$\phi_w = \phi_{visible} - \phi_{mediocoalescedor} \quad (9)$$

Donde, $\phi_{visible}$ es el porcentaje de agua con medio coalescedor en la muestra, $\phi_{mediocoalescedor}$ es el porcentaje de medio coalescedor en la muestra, y λ es la cantidad de agua libre.

Alzate [11], establece arbitrariamente $40\mu m$ como diámetro para calcular de manera representativa la función del tamaño de gotas de la muestra antes y después de la aplicación de campo eléctrico; sin embargo, se obvia el hecho de que las curvas no ofrecen funciones del tamaño de gotas proporcionales para todos los diámetros que componen la distribución acumulada, obteniéndose diferentes FD con cada diámetro que se elige. Resulta apreciable que los valores de FD de una misma muestra poseen importantes diferencias, por lo que surgen como inquietudes: ¿Qué diámetro ofrece un FD más representativo? o ¿Por qué sería más representativo uno que otro? La respuesta a ambas preguntas es, ninguno es más representativo que otro.

Para evitar dejar un resultado o la magnitud del mismo a merced de un valor arbitrario, se introduce el Factor de Desestabilización Global (FDG_A) en función a un ajuste de distribución acumulada de gotas (10).

$$FDG_A = \frac{\lambda - (\int_{x_{min}}^{x_{max}} f_2(x) dx)}{\lambda - ((x_{max} - x_{min}^0) + (\int_{x_{min}}^{x_{max}} f_2^0(x) dx))} \quad (10)$$

Donde, λ es el área máxima, la cual es el rectángulo comprendido entre x_{min}^0 y x_{max} ; x_{max} es el máximo diámetro de la curva de distribución acumulada de gotas de la muestra después aplicación de campo eléctrico; x_{min} es el mínimo diámetro de la curva de distribución acumulada de gotas de la muestra después aplicación de campo eléctrico; x_{max}^0 es el máximo diámetro de la curva de distribución acumulada de gotas de la muestra antes aplicación de campo eléctrico; x_{min}^0 es el mínimo diámetro de la curva de distribución acumulada de gotas de la muestra antes aplicación de campo eléctrico; f_2 es la función de ajuste de distribución acumulada de gotas después de la aplicación del campo eléctrico; f_2^0 es la función de ajuste de distribución acumulada de gotas antes de la aplicación del campo eléctrico; y FDG_A es el Factor de Desestabilización establecido [11].

El área máxima (λ), rectángulo comprendido entre $(x_{min}^0 - x_{max})$ y $(y_2 - y_1)$ reportado entre ambas curvas (μ^2 , unidad ficticia de área) (Figura 4) se define mediante (11). El valor de y_2 es siempre igual a 1 y y_1 es siempre igual a 0.

$$\lambda = (y_2 - y_1) * (x_2 - x_1) \quad (11)$$

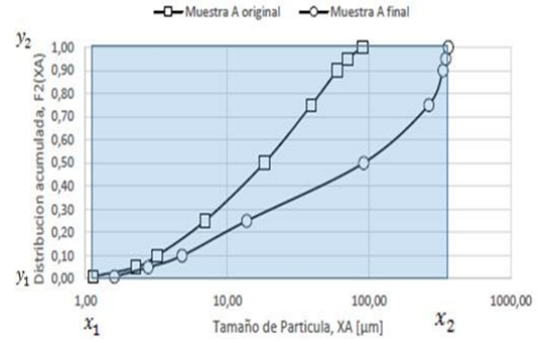


Figura 4. Rectángulo de área λ para el cálculo del FDG_A de una muestra.

En la Línea de investigación se han planteado distintas ecuaciones para el cálculo del FD [6, 9, 10, 11]. En función de ello se propone establecer una expresión general para el FD, que considere todos los casos estudiados en el LSM-UCV. El avance en este aspecto permitirá a futuro cuantificar el efecto ocasionado por el uso de cualquier tratamiento de deshidratación incluyendo el originado por la asistencia de un medio coalescedor.

II. METODOLOGÍA

A. Recopilación de la información

Se realizó la recopilación de información de la línea de investigación por un periodo de siete años, tomando en cuenta todas las variables consideradas en cada una de las metodologías desarrolladas en los estudios previos [6, 9, 10, 11], y se realiza una base de datos de las imágenes capturadas por microscopía óptica en estos estudios.

B. Influencia de las variables en el FD

Se realizó una matriz de comparación, que incluyó: autor, muestra, variables consideradas y FD obtenido, con el fin de encontrar coincidencias en las variables (tiempo de residencia, voltaje, tipo de corriente, tipo de celda, tipo de medio coalescedor, mojabilidad y salinidad) que afectan de forma favorable el FD.

C. Factor de desestabilización global (FDG)

A partir de la información obtenida, se establece una ecuación global para el cálculo del FD que representa los distintos casos de estudio, soportados en la distribución acumulada de gotas. Se cuantifica el efecto del campo eléctrico en algunos de los casos estudiados empleando el FDG y se compara con el FD reportado.

El programa Image-Pro Plus 6.0 de Media-Cybernetics, permitió en los estudios iniciales, analizar las imágenes capturadas al utilizar la microscopía óptica, determinando el área de cada gota en la imagen, mediante la diferencia de color entre la fase oleosa y el agua. Este programa determina el área de cada gota mediante la selección de píxeles que redefine mejor el contorno de la gota, los cuales

son marcados por el operador, permitiendo a la computadora realizar un conteo automático de las gotas basado en la diferencia de color.

En la Línea de investigación cada operador varía de acuerdo al trabajo de investigación, arrastrando un error asociado a la selección de los píxeles según cada operador. Con la finalidad de disminuir dicho error, se realizó el análisis del tamaño de gota, pero por un solo operador. Se utilizó la macro plantilla [6, 12] para determinar la distribución acumulada del tamaño de gotas y realizar el cálculo del FDG.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Recopilación de la información

En la Tabla 1, se presenta parte de la información

recopilada sobre los distintos estudios de desestabilización de emulsiones W/O, llevadas a cabo en el LSM-UCV. Se aprecia la heterogeneidad de las condiciones de operación del sistema de separación electrostática, sin y con medio coalescedor; de igual forma, no es apreciable una tendencia clara en relación al FD obtenido en los casos reportados.

B. Influencia de las variables sobre el FD

Para los primeros estudios realizados (Tabla 1), a un mayor voltaje se reporta la formación de cadenas de gotas de agua, que a su vez actúan como puente entre los electrodos, creando un cortocircuito en el sistema por lo que el voltaje aplicado cae drásticamente desfavoreciendo la separación. Se indica que al recubrir los electrodos se evita el cortocircuito, lo que permite trabajar con un voltaje elevado, originando mayor desestabilización.

Tabla 1. Recopilación de información de la Línea de investigación, Separación de agua, aceite y sólidos, en orden cronológico.

Autor	Muestra	Tiempo de residencia (s)	Voltaje (kV)	Tipo de corriente	Tipo de celda	Tipo de medio coalescedor	Mojabilidad	FD
Fung	Acema-100	90	2	DC	Celda de trabajo con electrodos planos	-		1,3
	Merrey-31	90	4	DC		-		2,0
	Guara-2	90	2	DC		-		0,3
Pérez	Acema-100	90	6	AC	Celda de trabajo con electrodos planos	-		7,3
	Merrey-31	90	4	AC		-		4,5
	Guara-2	90	6	AC		-		5,0
García	Merrey-31	22	0,8	DC	Cilíndrica	-		2,3
		22	0,4	DC	Cilíndrica	-		2,3
		32	0,4	AC	Plana	-		0,9
González	Acema-100	21	0,6	DC	Plana	-		4,8
		21	0,3	AC	Plana	-		0,9
		21	0,6	AC	Cilíndrica	-		0,1
Gómez	Guara-2	30	bajo	DC	Plana	-		1,1
		36	alto	DC	Plana	-		0,3
Quintero	Acema-100	alto		DC	Electrodos planos de cobre	Esferas de vidrio	Hidrofílico	
Gutiérrez y Sorondo	Acema-100	bajo	3	DC	1 celda plana	Lecho de aros de vidrio	Hidrofílico	8,4
		alto	1	DC	2 celdas plana			2,9
Dorta y González	Acema-100	60	1	DC	Electrodos planos de cobre	Vidrio	Hidrofílico	11,0
		60	1	DC		Coque	Hidrofóbico	0,1
Casanova y Leuzinger	Mezcla Acema - 100, Merrey-31 y Guara-2	97	0,5	DC	Plana	Vidrio	Hidrofílico	3,1
Pita y Donado	Agua destilada – kerosene	30	0,1	DC	Plana	-		6,5
Alzate	Emulsiones W/O con surfactante no iónico	60	0,1	DC	Celda con electrodos de cobre	-		29,0

Sin embargo, la desestabilización es cada vez mayor hasta llegar a un punto máximo en donde el aumento del voltaje no favorece la coalescencia de las gotas, sino que, ocasiona la fractura de las gotas, estabilizando la emulsión tal como es reportado [13].

De manera similar ocurre con la evaluación del efecto del tiempo de residencia, donde se presenta que la formación de las cadenas de gotas y posterior cortocircuito, tienen un tiempo mínimo de formación; es por ello que, en las primeras investigaciones donde no se utiliza recubrimiento de los

electrodos, un tiempo de residencia de 90 s origina un FD bajo. Con los electrodos recubiertos, a mayor tiempo de residencia de la emulsión en la celda, aumenta el FD.

El empleo de un campo eléctrico de corriente continua (DC) en la desestabilización electrostática de emulsiones es más efectiva que la aplicación de corriente alterna (AC), ambos a 60 Hz.

A través de estos estudios se ha comprobado que utilizar un medio coalescedor, incrementa el tamaño de las gotas más pequeñas existentes en la emulsión; esto es importante debido

a que las gotas más pequeñas generan mayor estabilidad en el sistema. Se observa que las gotas más pequeñas, captadas por el microscopio antes de añadir el medio coalescedor, tienen un tamaño aproximado de $1\mu\text{m}$, y luego de aplicar el campo eléctrico y añadir el medio coalescedor, las gotas más pequeñas observadas tienen un tamaño de $3\mu\text{m}$ [10].

Destaca en los estudios que involucran el medio coalescedor junto con la aplicación de campo eléctrico, que la mojabilidad hidrofílica favorece la desestabilización de la emulsión W/O, lo que se atribuye a la afinidad que presenta el agua con el medio coalescedor, generando así mayor coalescencia entre las gotas presentes en la emulsión W/O.

En relación al tipo de celda, se reportan resultados positivos para el FD; donde son mayores cuando se emplea la celda plana, la cual presenta un campo eléctrico homogéneo, predominio de fuerzas electroforéticas y de atracción dipolo-dipolo [14].

C. Factor de desestabilización global (FDG)

El FD fue planteado por primera vez en el año 2011 y desde entonces ha sufrido modificaciones. Luego de realizar el análisis de la información recopilada, se propone un Factor de desestabilización global (FDG) que permite cuantificar el efecto tanto del campo eléctrico como el generado por otro tipo de tratamiento desestabilizante, como es el caso del uso de un medio coalescedor.

La distribución acumulada de tamaños de gotas permite tener una representación de la fracción de las gotas que se encuentran por debajo o por encima de cierto tamaño. En un mismo gráfico (Figura 5) es posible representar dos curvas, la primera donde se ve reflejada la distribución de la fracción de gotas, muestra inicial ($f_2^o(x)$) y la segunda donde se observa la distribución de fracción de gotas después de ser aplicado el tratamiento, muestra final ($f_2(x)$).

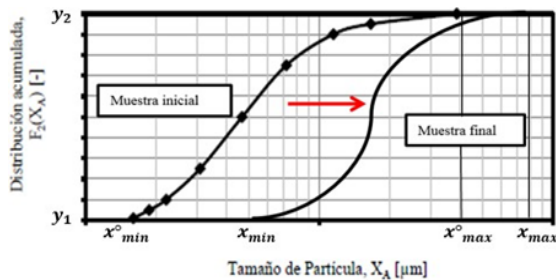


Figura 5. Distribución de tamaño de gotas, antes y después de aplicar el tratamiento.

El desplazamiento de la curva indica el efecto del tratamiento en la muestra, siendo reflejada por el área comprendida entre ambas curvas. Para cuantificar este efecto, se parte del área bajo la curva (trazo de la función ($f(x)$) y el eje x), seguido de la diferencia de área entre las curvas, para obtener el valor del área comprendida entre ambas (12).

$$A = A_{inicial} - A_{final} = \int_{x^o_{min}}^{x^o_{max}} f_2^o(x) dx - \int_{x_{min}}^{x_{max}} f_2(x) dx \quad (12)$$

Sin embargo, las curvas de distribución acumulada de gotas de la muestra inicial y la muestra final, no se encuentran limitadas en el rango $x^o_{max} - x_{max}$. De igual forma, el eje de las ordenadas representa la fracción o porcentaje de las gotas que se encuentran por debajo o por encima de cierto tamaño de gotas, por lo cual $y_{max}=1$. A partir de este planteamiento, se traza una línea ficticia donde $y_{max}=1$, definiendo los límites que reflejan el efecto del tratamiento en la muestra (Figura 6).

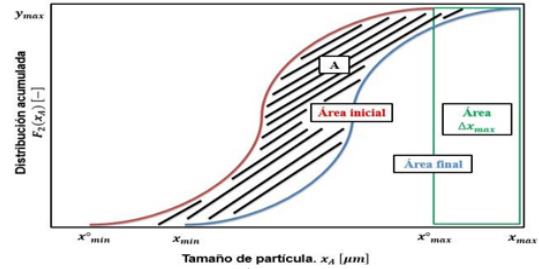


Figura 6. Área bajo la curva.

Reescribiendo (12), se tiene (13),

$$A = A_{inicial} + A_{\Delta x_{max}} - A_{final}$$

$$A = \int_{x^o_{min}}^{x^o_{max}} f_2^o(x) dx + x_{max} - x^o_{max} - \int_{x_{min}}^{x_{max}} f_2(x) dx \quad (13)$$

Se normaliza (13) dividiendo por el área inicial que se obtiene en la gráfica de distribución acumulada de gotas, más un área que se denomina como $A_{\Delta A}$. Se plantea el Factor de Desestabilización Global (FDG_G) como (14).

$$FDG_G = \frac{\int_{x^o_{min}}^{x^o_{max}} f_2^o(x) dx + x_{max} - x^o_{max} - \int_{x_{min}}^{x_{max}} f_2(x) dx}{A_{inicial} + A_{\Delta A}} \quad (14)$$

$$A_{\Delta A} = x^*_{max} - x^o_{max} \quad (15)$$

Donde,

Caso 1: el efecto del tratamiento causa la desestabilización de la emulsión, donde la curva final queda desplazada a la derecha sin ser interceptada por la curva inicial (Figura 7.a)

$$x^*_{max} = x_{max} \text{ si } x_{max} > x^o_{max}$$

Caso 2: el efecto del tratamiento causa a) la estabilización de la emulsión, en donde la curva final queda desplazada a la izquierda de la curva inicial, o b) no logra tener un mayor impacto, en donde las curvas inicial y final se intersectan (Figura 7.b)

$$x^*_{max} = x^o_{max} \text{ si } x^o_{max} > x_{max}$$

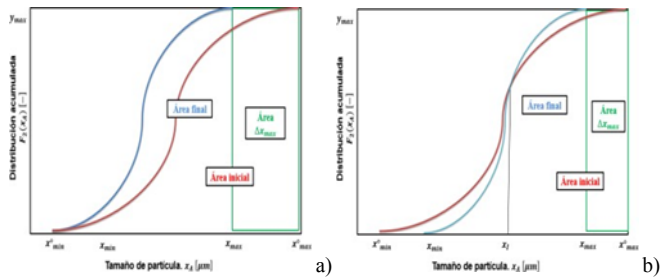


Figura 7. Distribución acumulada de gotas cuando el efecto es a) desestabilizante, b) de poco impacto.

El FDG_G indica:

$FDG_G < 0$ Estabilización de la muestra.

$FDG_G = 0$ No hay cambio.

$FDG_G = (0 - 1]$ Desestabilización de la muestra.

Se aprecia que para alcanzar un efecto desestabilizador en la emulsión W/O, el valor máximo del FDG_G estará acotado entre los valores 0 y 1. El mismo será igual a 1 cuando después de ser aplicado el tratamiento, todas las gotas aumentan a un tamaño igual a x_{max} (Figura 8).

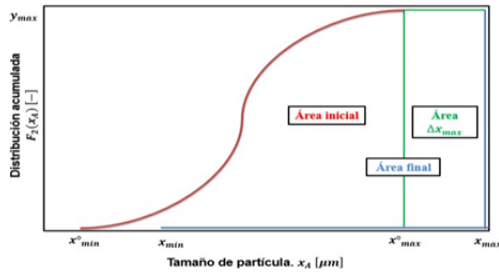


Figura 8. Curvas de distribución acumulada de gotas para un FDG_G igual a 1.

El FDG_G no solo permite evaluar la desestabilización de emulsiones W/O en la industria petrolera, también puede ser utilizado como un parámetro cuantificable en industrias donde las emulsiones tengan alguna aplicación, siendo la estabilidad una de las propiedades a controlar.

Se recopilieron las imágenes de microscopía óptica [15, 16] con el fin de realizar un nuevo análisis de imagen. El nuevo análisis fue realizado con el programa Image-Pro 10 de Media-Cybernetics, el cual permite realizar la máscara de la imagen obtenida por microscopía óptica de manera automática, siendo esta más precisa al realizar un conteo mínimo no menor de 20.000 objetos, lo que origina una tendencia más cercana a la realidad (Figura 9).



Figura 9. Análisis de imagen en el programa Image-Pro 10.

Al utilizar la macro plantilla [6, 12], se determinó la distribución del tamaño de gotas en la muestra para obtener la curva de distribución acumulada de gotas en función del diámetro, con lo cual se realiza el cálculo de FDG_G , mediante el cálculo de área bajo la curva a partir del método de los trapecios.

Se muestran los resultados obtenidos con el nuevo análisis de imagen junto a la comparación con el FD reportado previamente.

Gómez [15], trabajó con la muestra de la fosa Guara-2 y en la Figura 10.a se presenta el análisis para el resultado más favorable reportado antes y después de ser aplicado el campo eléctrico, considerando un tiempo de residencia de 30 s, voltaje bajo, CD y uso de celda plana; mientras que en la Figura 10.b se observa el análisis de muestra para el resultado menos favorable reportado antes y después de ser aplicado el campo eléctrico considerando un tiempo de residencia de 36 s, voltaje alto, CD y uso de celda plana.

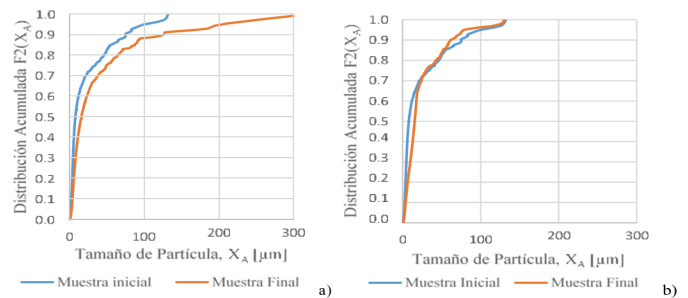


Figura 10. Curvas de distribución acumulada, antes y después del tratamiento con campo eléctrico, [15]. a) caso más favorable, b) caso menos favorable.

En la Tabla 2, se aprecia la comparación entre el FD y el FDG_G .

Tabla 2. Comparación del FD para el estudio de Gómez [15].

Tabla 2. Comparación del FDG_G para el estudio de Gómez [15].

Gómez (2012)	FD reportado	FDG_G	Efecto
Caso más favorable	1,05	0,06	Desestabilización
Caso menos favorable	0,32	-0,19	Estabilización

Estos resultados, aunque son cónsonos entre sí, reflejan que existen diferencias importantes entre el FD y el FDG_G ; sin embargo, este último permite cuantificar de manera general el efecto desestabilizador que ocasiona el tratamiento aplicado. El estudio realizado por Gómez con la muestra Guara-2, evidencia un comportamiento atípico en comparación al resto de los estudios. Una de las ventajas del uso del programa Image-Pro 10 y la aplicación del FDG_G , es que permite evaluar de manera eficaz el comportamiento de muestras como Guara-2, que como ha sido reportado en los estudios de la Línea de investigación, son complejos de estudiar.

VI. CONCLUSIÓN

El Factor de Desestabilización Global (FDG_G) es un parámetro que permite cuantificar el efecto de los tratamientos

deshidratantes, como a) campo eléctrico, b) campo eléctrico combinado con medio coalescedor, y c) microondas, cuando no se obtiene separación de fases, a partir del análisis de la curva de distribución acumuladas de gotas, antes y después de aplicar el tratamiento, siendo el uso del programa Image-Pro 10 una herramienta que facilita el análisis de imagen de la muestra más cercano a la realidad.

AGRADECIMIENTOS

El desarrollo de este trabajo contó con el apoyo del Departamento de Matemáticas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela.

REFERENCIAS

- [1] Ministerio del Poder Popular de Petróleo. “Ascienden reservas probadas de petróleo y gas de Venezuela”. <http://www.minpet.gob.ve/index.php/eses/comunicaciones/noticias-comunicaciones/47-noticias-del-ano2019/911-ascienden-reservas-probadas-de-petroleo-y-gas-de-venezuela> 2019.
- [2] Salager, J. “Emulsiones. Propiedades y Formulación”. Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela. 1993. Cuaderno FIRP 231.
- [3] Marfisi, S., y Salager, J. “Deshidratación de crudos. Principios y tecnología”. Cuaderno FIRP S853-PP. Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela. (2004) https://es.firp-ula.org/wp-content/uploads/2019/07/S853PP_Deshidratacion.pdf
- [4] Carrasquel, J. “Construcción de un sistema de deshidratación mecánico para crudo a escala de laboratorio”. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela. 2019.
- [5] Alzate, J. “Desestabilización electrostática de emulsiones W/O formuladas con surfactantes catiónico, aniónico y no iónico.” Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Caracas. 2016.
- [6] Fung E. “Desestabilización electrostática con corriente directa de material de fosas de producción mezclados con solventes”. Trabajo Especial de Grado. Caracas, Venezuela. 2011.
- [7] Sorrentino. “Advances in correlating filter cake properties with particle collective characteristics”. Tesis Doctoral Universidad de Karlsruhe. Shaker Verlag. Alemania. 2002.
- [8] Padrón A. y Zúñiga P. “Aplicación de la técnica de microscopía óptica para la caracterización de sistemas dispersos formados por crudos, agua y sólidos”. Trabajo Especial de Grado. Caracas, Venezuela. (2005). <http://saber.ucv.ve/handle/10872/15501>
- [9] García, A. “Desestabilización electrostática continua del material de fosa Merey-31”. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela. 2012. <http://saber.ucv.ve/handle/10872/2831>
- [10] Dorta M. y González K. “Evaluación microscópica de los mecanismos de desestabilización electrostática de una emulsión W/O combinada con coque o vidrio como medio coalescedor”. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela. 2016.
- [11] Alzate J. “Desestabilización electrostática de emulsiones W/O formuladas con surfactante catiónico, aniónico y no iónico”. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela. 2016.
- [12] Gutiérrez K. y Sorondo E. “Evaluación de un sistema de celda continua con lecho móvil para combinar desestabilización electrostática y medio coalescedor”. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela. 2015. <http://saber.ucv.ve/handle/10872/13288>
- [13] J. Eow, M. Ghadiri, A. Sharif y T. Willians, “Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil: a review of the current understanding.” Chemical Engineering Journal N°84. Elsevier. Pág. 173-192. 2001. [https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(00\)00386-7](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(00)00386-7)
- [14] Rodríguez, M. “Desestabilización electrostática de emulsiones en fosas de producción”. Trabajo especial de grado para optar al Título de Magister Scientiarum en Ingeniería Química. Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela. 2013.
- [15] Gómez B. “Desestabilización electrostática continua del material de fosa Guara-2”. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela. 2012. <http://saber.ucv.ve/handle/10872/2750>
- [16] Casanova G. y Leuzinger M. “Desestabilización de emulsiones W/O mediante combinación de campo eléctrico y medio hidrofílico soportado en estructura de baja resistencia al flujo”. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela. 2016.