

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**DESESTABILIZACIÓN ELECTROSTÁTICA CONTINUA DEL MATERIAL
DE LA FOSA DE PRODUCCIÓN ACEMA-100.**

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por la Br. González R., Mayerling J.
Para optar al Título
de Ingeniero Químico

Caracas, 2012

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**DESESTABILIZACIÓN ELECTROSTATICA CONTINUA DEL MATERIAL
DE LA FOSA DE PRODUCCIÓN ACEMA-100.**

TUTORES ACADEMICOS: Prof. José Ángel Sorrentino

Profa. María A. Rodríguez

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por la Br. González R., Mayerling J.
Para optar al Título
de Ingeniero Químico

Caracas, 2012

Caracas, junio de 2012

Los abajo firmantes, miembros del jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Química, para evaluar el trabajo especial de grado presentado por la Bachiller Mayerling González, titulado:

**DESESTABILIZACIÓN ELECTROSTATICA CONTINUA DEL MATERIAL
DE LA FOSA DE PRODUCCIÓN ACEMA-100.**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Químico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.



AGRADECIMIENTOS

A Dios todopoderoso, por todo lo bueno y las enseñanzas que me permitieron crecer a nivel personal en este camino.

A la ilustre Universidad Central de Venezuela por haberme permitido la excelente formación en esta carrera y permitir la realización de este Trabajo Especial de Grado demostrando ser la casa que vence las sombras!

A la Escuela de Ingeniería Química por brindarme un maravilloso cuadro de profesores que proporcionaron las herramientas necesarias en la formación como ingeniero integral. Y poder fortalecer aspectos intelectuales para desarrollarme como excelente profesional.

A mi tutor Prof. José Ángel Sorrentino, por su paciencia, apoyo en este proyecto y sus valiosos aportes.

A mi tutora Prof. María Alejandra Rodríguez, por ser incondicional, paciente, brindar ánimos, por sus grandiosas ideas y aportes. Gracias por todos los conocimientos dados, que Dios la bendiga!

A mis padres, pilares fundamentales de este triunfo. Por todo su amor, palabras sabias, regaños a tiempo y estar presentes en todo momento. Los amo!

A mis hermanos, por ser modelos a seguir, ayudarme en mi educación y formación como persona. Por sus consejos, cariño y apoyo brindado. Gracias!

A mis familiares todos, por siempre estar pendiente y estar en todo momento apoyándome y luchando conmigo en este largo camino.

A mi amigo José Gregorio, por todos los buenos momentos, muchas gracias por tu bonita amistad, por tu sinceridad. Te quiero mucho siamés.

A Saúl, mi negro bello por ser siempre tú! Gracias por tu incondicional apoyo y tus críticas constructivas tan oportunas. Te quiero!

A Naileth, por escucharme, ayudarme y estar en todo momento a mi lado, Te quiero mucho hermanita.

A Betty, por tu especial amistad, apoyo, consejos, por acompañarme en este bonito proyecto, ser guía en los momentos que estaba perdida. Muchísimas gracias. Se te quiere un montón Eres un sol!

A Axel, Armando, Ingemar, excelente equipo de trabajo. Gracias por los buenos momentos compartidos y los conocimientos brindados.

A Lessa y Myckol, muy buenos compañeros de laboratorio. Gracias por brindarme su amistad y apoyo. Son extraordinarios.

A mis amigos Yaquelin, Alvaro Gil, Jean Carlos, Daniela Blanco, Daniela Alayon, Yirvis, Paty, Anmary, Daniel Muñoz, Fercho, Jorge, Donna, Edgardo, Manolo, Luis, Newton, Rodolfo. Mil gracias por todo su apoyo y estar siempre presente en todo momento. Se que faltan muchos igual se les quiere y agradezco todo lo bonito que me han dado.

A mis profesores de carrera, por sus enseñanzas brindadas en toda la carrera y los ratos amenos que me brindaron.

+

González R, Mayerling J.

**DESESTABILIZACIÓN ELECTROSTÁTICA CONTINUA DEL MATERIAL
DE LA FOSA DE PRODUCCIÓN ACEMA-100.**

**Tutores Académicos: Prof. José Sorrentino y Profa. María Rodríguez. Tesis.
Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química. Año
2012, N° pág. 77**

Palabras Claves: Fosas de Producción, Desestabilización Electrostática, Coalescencia, Microscopía óptica.

Resumen: Para la realización de este trabajo se diseñó un montaje en continuo de calentamiento y campo eléctrico, para la parte de calentamiento se contó con una resistencia que proporcionaba calor al tanque y para evitar las pérdidas de calor hacia el ambiente se aisló con fibra de vidrio. En cuanto al campo eléctrico, fue dado por dos geometrías de celda, un campo eléctrico uniforme con una celda plana y en la celda cilíndrica un campo no uniforme. Se estableció una temperatura de operación para garantizar un tiempo de residencia de la muestra en la celda, y una viscosidad similar a las otras fosas en estudio paralelo, Guara-2 y Merey-31. Para obtener mayor información de la fosa Acema-100 se determinó la densidad, viscosidad y se realizó el análisis SARA, de modo de tener una base más sólida en la justificación de las causas de resultados obtenidos. Mediante el diseño experimental factorial 2ⁿ se calcularon los efectos más resaltantes en la desestabilización de la emulsión, como el crecimiento del tamaño de gotas de agua una vez aplicado el campo, con respecto a la muestra original, para las variables involucradas como: la geometría de la celda, el voltaje aplicado, tipo de corriente y tiempo de residencia en la celda. Se utilizó microscopía óptica para observar los cambios de la muestra ocasionados por los mecanismos de coalescencia. Los resultados más resaltantes para este Trabajo Especial de Grado relacionados al Diseño Factorial dan como efecto principal a la geometría de celda cilíndrica con un porcentaje de confiabilidad de 99,95%, en cuanto al efecto de dos variables es la interacción de celda cilíndrica y corriente AC que es relevante en un 99,82% de confiabilidad. En cuanto a la separación de fases obtenida luego de centrifugar las muestras solo se dio en las celdas planas, con la combinación de voltaje alto, corriente DC y tiempo de residencia bajo con un porcentaje de separación de agua de 9,6.

INDICE GENERAL

INDICE DE FIGURAS.....	xi
INDICE DE TABLAS.....	xiii
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I.....	2
FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	2
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
OBJETIVOS	3
OBJETIVO GENERAL	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
ANTECEDENTES.....	4
CAPITULO II	10
MARCO TEÓRICO.....	10
Fosas de Producción.....	10
Emulsión	10
Los factores que le dan estabilidad a las emulsiones	12
Fundamentos de la separación agua en crudo	14
— Gravedad.....	14
— Adición de calor.....	14
— Campo eléctrico	15
Mecanismos de Coalescencia.....	17
Interacciones originadas por la aplicación de campo eléctrico.	18
Efectos del campo eléctrico aplicado	21

Campo DC y AC	21
DESHIDRATADORES ELECTROSTÁTICOS	23
MICROSCOPIA ÓPTICA	24
ANÁLISIS DE PARTÍCULA.....	24
ANÁLISIS SARA.....	25
CAPITULO III.....	27
MARCO METODOLOGICO.....	27
DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS	27
Microscopio óptico NIKON MED-600	27
Cámara captadora de imágenes CCD.....	28
Imagen Pro Plus (Media Cybernetics)	28
Circuito eléctrico para la aplicación de campo eléctrico	29
METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	30
Diseñar un sistema en continuo que permita la aplicación de calentamiento y campo eléctrico.	30
Medida de la densidad de la mezcla.....	32
Medida de la viscosidad Aparente	33
Calculo del análisis SARA.....	33
Establecer la temperatura de operación que garantice la fluidez del material de fosa Acema-100.	35
Identificar las condiciones de operación más apropiadas para la fosa Acema-100 relacionadas con la geometría de la celda, el tiempo de residencia, voltaje y tipo de corriente mediante el método estadístico “Diseño Factorial 2 ⁿ ”.....	36
Cuantificar el grado de separación en el sistema continuo empleando técnicas de microscopia óptica y separación de fases.....	38

CAPITULO IV	41
RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.	41
DISEÑO DEL SISTEMA EN CONTINUO QUE PERMITA LA APLICACIÓN DE CAMPO ELECTRICO Y CALENTAMIENTO.	41
Medida de la Densidad de la mezcla.....	42
Determinación de la Viscosidad Aparente	43
ANÁLISIS SARA.....	44
TEMPERATURA DE OPERACIÓN.....	45
CONDICIONES DE OPERACIÓN MAS APROPIADAS DADAS POR EL DISEÑO FACTORIAL 2 ⁿ	47
Geometría de la celda.....	49
Tipo de corriente	50
Tiempo de residencia en la celda	52
GRADO DE SEPARACIÓN MEDIANTE MICROSCOPIA ÓPTICA Y SEPARACIÓN DE FASES	54
Separación de fases	57
CONCLUSIONES.....	60
RECOMENDACIONES.....	62
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63
APENDICES.....	65
APENDICE I: HOJA DE RESULTADOS	65
APENDICE II:-GRÁFICOS DE LOS RESULTADOS DEL SARA.....	68
APENDICE III: CÁLCULOS DE LA DENSIDAD DE LA MEZCLA, DENSIDAD ESTIMADA DEL HIDROCARBURO Y °API	69
APENDICE IV: CÁLCULO DEL TIEMPO DE RESIDENCIA EN LA CELDA	70

APENDICE V: CÁLCULO DE LOS FACTORES DE DESESTABILIZACIÓN
PARA LAS DISTINTAS COMBINACIONES..... 70

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Montaje en continuo utilizado Eow y Ghadiri (2002).....	6
Figura 2.Celda de trabajo. (Fung, 2011)	8
Figura 3.- Cantidad de agua en gotas grandes en función de la intensidad de campo eléctrico, para la fosa Acema-100. (Pérez, 2012)	9
Figura 4. Microfotografía de una emulsión agua en aceite. (PETEX, 1990).....	11
Figura 5. Representación grafica de la estabilización de una gota de agua por agentes emulsionantes presentes en el crudo (FIRP, 2004)	12
Figura 6. Composición y polaridad del de agua. (Manejo de producción en superficie, s.f.)	15
Figura 7. Atracción de dos gotas de agua por acción de dipolo inducido (Marfisi, 2009).	17
Figura 8. Electrocoalescencia entre gotas según el comportamiento tipo I de (Taylor, 1988)	17
Figura 9.- Fuerzas de Van der Waals presentes con las moléculas de agua, en la emulsión (Pérez, 2012).....	19
Figura 10 Fuerzas electrostáticas presentes con la aplicación de campo eléctrico. (Pérez, 2012)	20
Figura 11. Movimiento de las gotas en un campo con electrodos de polaridad dual. (FIRP, 2004).....	22
Figura 12.Deshidratador Electrostático. (FIRP, 2004).....	23
Figura 13. Distribución acumulada de tamaño de partículas (Sorrentino, 2002).....	25
Figura 14. Microscopio óptico NIKON MED-600.....	27
Figura 15.-Cámara captadora de imágenes CCD. (Fung, 2011).....	28
Figura 16.- Sistema de computador con el programa Image Pro Plus.	29
Figura 17.- Montaje para la aplicación de campo eléctrico (Pérez, 2012).....	29
Figura 18. Montaje del sistema en continuo	30
Figura 19. Tanque de calentamiento con resistencia.	31

Figura 20. (a) Viscosímetro de Brookfield, (b) Termosel, (c) Tipos de Spindle (IDEA).....	34
Figura 21. Varillas de Alúmina(a) (fase estacionaria) y Iatrosan MK-6s (b) (IDEA)	34
Figura 22.-Celda de electrodos de cilindros concéntricos (Izquierda.) y de placas planas (Derecha).....	37
Figura 23. Piezas que representan las aperturas de la Válvula V-2. (LSM)	38
Figura 24.-Zonas para la toma de imágenes en la muestra de crudo.	39
Figura 25.-Esquema del procedimiento para calcular la distribución de tamaño de gotas. (Fung, 2011)	40
Figura 26.- Tanque de calentamiento con aislamiento de fibra de vidrio.	41
Figura 27.-Grafico de la Viscosidad Aparente en función de la Temperatura.....	44
Figura 28.- Análisis SARA para la fosa Acema-100.	45
Figura 29.-Tiempo de residencia en la celda para las fosas Acema-100, Guara-2 y Merey-31 en función de la temperatura.	46
Figura 30.- Influencia del tipo de celda en el factor de desestabilización FD, a diferentes voltajes.....	50
Figura 31.-. Influencia del tipo de corriente en el factor de desestabilización FD, a diferentes voltajes para las celdas planas.	51
Figura 32.-Influencia del tipo de corriente en el factor de desestabilización con respecto al voltaje aplicado para las celdas cilíndricas.	52
Figura 33.-Influencia del tiempo de residencia en la celda para cada voltaje aplicado en las celdas planas.	53
Figura 34.- Influencia del tiempo de residencia en el factor de desestabilización FD, a diferentes voltajes.....	54
Figura 35.- Análisis de Imágenes con Macro Plantilla	55
Figura 36.- Distribución Acumulada de Tamaño de Gotas.....	57
Figura 37.- Separación de fases luego de centrifugar.	58
Figura 38.- Fenómenos producidos en la fase oleosa	59

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Variables a considerar y sus niveles para el Diseño Factorial.	37
Tabla 2.-Densidad de la mezcla y Densidad Estimada del Hidrocarburo.....	42
Tabla 3.-Medición de la Viscosidad a varios puntos de temperatura.	43
Tabla 4.- Tiempo de residencia en la celda para cada temperatura	46
Tabla 5.- Factor de Desestabilización (FD)	47
Tabla 6.-Estudio estadístico para los efectos del Diseño Factorial 2 ⁿ	48
Tabla 7.-Grado de separación de agua	58
Tabla 8.- Factor de Desestabilización en la Separación de Fases.	59

INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo tiene como finalidad evaluar el comportamiento de la fosa de producción Acema-100 a condiciones de calentamiento y campo eléctrico en continuo, observando el efecto sobre el crecimiento del tamaño de gotas reflejado en el Factor de Desestabilización. Para esto se diseñó un sistema que permitió lograr el calentamiento y a su vez la aplicación de campo eléctrico de forma continua, donde se estableció una temperatura de operación que garantizó la fluidez de la fosa y una viscosidad aproximada a la de las fosas Guara-2 y Merrey-31, trabajos realizados por Gómez y García paralelamente.

Se empleó el Diseño Experimental Factorial 2^n para poder identificar las variables de operación con mayor efecto en el cambio del tamaño de gotas de agua, dentro de las cuales están: geometría de la celda, voltaje aplicado, tiempo de residencia en la celda y tipo de corriente. Obteniendo la combinación más favorable según la interacción de las variables estudiadas y así poder establecer mejoras al sistema. Las muestras fueron analizadas mediante microscopía óptica con el fin de comparar la variación del tamaño de gotas con la aplicación del campo eléctrico y luego de su centrifugación.

Se presentarán los trabajos o investigaciones que se utilizaron como antecedentes para el desarrollo de este Trabajo Especial de Grado, al igual que una serie de definiciones a través de un marco teórico que permiten un mejor entendimiento de los fenómenos de coalescencia ocurridos en las experiencias, que son detalladas en la metodología experimental junto a todos los equipos utilizados. El factor de desestabilización fue el parámetro de respuesta para medir el mejor efecto de las variables analizadas, las cuales fueron celda cilíndrica, corriente AC, voltaje alto y tiempo de residencia en la celda mayor. Y se recomienda que para un mejor funcionamiento del sistema se cuente con recirculación del material de fosa para mantener la temperatura en el sistema constante.

CAPITULO I

FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad una de las actividades económicas más importantes en Venezuela es la Industria Petrolera, incluyendo la perforación y extracción del crudo junto a otras actividades que van relacionadas entre sí como la refinación y producción. Esta actividad petrolera se ha desarrollado considerablemente y de manera continua en las últimas décadas.

Una parte de la producción de petróleo, sale fuera de las especificaciones exigida por los centros de refinación y se considera como un desecho; este es almacenado en excavaciones que se encuentran en zonas adyacentes a los pozos, llamadas fosas de producción; allí se deposita el crudo mezclado con agua y otros sólidos, originando un gran problema ambiental por los compuestos volátiles que son expulsados hacia la atmósfera, al igual que la contaminación del suelo presente. Estas fosas, constituyen un inconveniente ambiental para la industria petrolera, y actualmente no han recibido tratamiento adecuado para su saneamiento y así evitar daños mayores al ambiente y la salud de los habitantes aledaños. Las fosas en el territorio nacional suman un gran número y durante décadas se han almacenado en ellas desechos formados entre otros por aceites, agua, lodos y otros sedimentos.

Los volúmenes contabilizados en el territorio nacional pueden ascender a los 10 millones de barriles de petróleo oxidado, 60 millones de barriles de agua y 80 barriles de lodos y sedimentos. Por la gran dificultad que implica la separación de los componentes de las fosas y los cambios ocurridos en el tiempo, existe una gran acumulación de desechos y un enorme problema para el saneamiento de áreas contaminadas, por lo tanto es necesario la aplicación de métodos de recuperación de estas fosas para lograr un menor impacto ambiental y obtener un crudo de mayor valor económico.

A nivel industrial en procesos de deshidratación y desalación de crudos se utiliza la separación electrostática como técnica de desestabilización de emulsiones

destacándose variables como: voltaje, tipo de corriente, geometría de los electrodos y frecuencia. El campo eléctrico permite que las gotas de agua reaccionen frente a este campo, según los diversos fenómenos: atracción dipolo-dipolo, electroforesis, dielectroforesis, promoviendo la ruptura de las gotas para su posterior coalescencia, formándose gotas más grandes, y así poder separarlas por sedimentación.

El presente Trabajo Especial de Grado se enfocó en realizar pruebas con el material de la fosa Acema-100, con el fin de desarrollar una separación en continuo conformada por un montaje que incluyó la aplicación de calentamiento y campo eléctrico de alto voltaje, con posterior centrifugación.

El mecanismo a utilizar para calentar es significativo ya que reduce la viscosidad de la fase continua, incrementa la diferencia de densidad entre el agua y el crudo y se disuelven las sustancias (asfaltenos) que pueden estabilizar las emulsiones. La aplicación de campo eléctrico de alto voltaje puede realizarse mediante corriente directa (DC) o corriente alterna (AC) (60 Hz), en este trabajo se incluyen las experiencias con las dos corrientes.

El proyecto global realizado en el Laboratorio de Separaciones Mecánicas de la UCV, abarca en su totalidad el estudio simultáneo de los materiales de las fosas Acema-100 (presente trabajo), Guara-2 y Merey-31 (trabajos en paralelo) con el fin de determinar las óptimas condiciones de separación empleando separación electrostática en continuo.

OBJETIVOS

Con el desarrollo del presente Trabajo Especial de Grado, se pretende alcanzar el siguiente objetivo general, apoyado en el alcance de los objetivos específicos presentados a continuación.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el comportamiento de la Fosa Acema-100 al aplicar calentamiento, campo eléctrico en continuo y centrifugación.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Diseñar un sistema en continuo que permita la aplicación de calentamiento y campo eléctrico.
2. Establecer la temperatura de operación que garantice la fluidez del material de fosa Acema-100.
3. Identificar las condiciones de operación más apropiadas para desestabilizar el material de la fosa Acema-100, relacionadas con la geometría de la celda, el tiempo de residencia, voltaje y tipo de corriente, implementando el método estadístico “Diseño Factorial 2ⁿ”.
4. Cuantificar el grado de separación en el sistema continuo empleando técnicas de microscopía óptica y separación de fases.

ANTECEDENTES

A continuación se presentan trabajos relacionados con el tema a desarrollar, los cuales se enfocan en entender las características más importantes del proceso de separación electrostática y fueron tomados como referencia para la ejecución del presente Trabajo Especial de Grado, por la analogía de las experiencias y la importancia de los resultados.

John S. Eow y Mojtaba Ghadiri (2000), en su trabajo titulado “*Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil: a review of the current understanding*” estudiaron el comportamiento de la coalescencia de gotas de agua en aceite, realizaron una revisión de los conocimientos actuales destacando los mecanismos de coalescencia de gotas que son influenciados por un campo eléctrico, así como también las fuerzas presentes entre las gotas como lo son: las dipolo-dipolo, electroforesis y dielectroforesis. El empleo de corriente directa (DC) y alterna (AC) desempeñan un papel importante que depende del diseño y puesta en marcha del sistema. También enfatizan otros factores como el tamaño de gotas y el tiempo de residencia de la muestra líquida expuesta en el campo eléctrico, en relación a la eficiencia de la coalescencia.

Presentan trabajos de algunos modelos y mecanismos de coalescencia, destacando a Cottrell y Speed que aplicaron alto potencial entre un par de electrodos de alambre. Waterman describió la coalescencia dipolo-dipolo y Galvin observó que en la aplicación de corriente alterna, mientras las gotas estén más unidas la fuerza de atracción es mayor. Otro punto resaltante en esta investigación fue el estudio por Nishiwaki, que realizó pruebas con AC a una frecuencia de 60 Hz y obtuvo una intensidad de campo crítica que no podía ser superada debido a que ocurría dispersión de gotas y por ende estabilidad de la emulsión.

John S. Eow y Mojtaba Ghadiri (2002), presentaron un estudio titulado *“Electrocoalesce-separator for the separation of aqueous drops from flowing dielectric viscous liquid”* cuyo objetivo se basaba en la coalescencia de gotas aplicando un campo eléctrico en un fluido viscoso, utilizando electrocoalescedores gravitacionales y de centrifugación con sus características específicas en cuanto a la disposición y geometría de los electrodos.

En este trabajo se observó que el campo eléctrico aplicado mejora la coalescencia gota-gota, si el campo se aplica en una dirección determinada a la dirección del flujo de las gotas. Para lograr la máxima fuerza de atracción entre las gotas adyacentes, el campo eléctrico se debe aplicar de tal forma que de un ángulo de 0° con la línea que une los centros de las gotas.

Desarrollaron un sistema en continuo, de dos tanques utilizando aceite de girasol con pequeñas gotas de agua que se encontraba almacenado en un tanque A, en donde se llevó a cabo la sedimentación, en el tanque B circulaba petróleo y era transportado por un sistema de válvulas y bombas que permitían llevarlo por todo el sistema, hasta llegar a la inyección de la fase acuosa realizada por una aguja hipodérmica, que formaba un ángulo de 90° con la tubería por donde circulaba el hidrocarburo. El tamaño de gotas se midió con una celda rectangular de metacrilato mediante una cámara de video digital de alta resolución y con buena iluminación proporcionada una lámpara halógena, la cámara estaba conectada a un ordenador para facilitar el

procesamiento de las imágenes. En la figura 1 se muestra el montaje realizado por estos autores:

Toda la experiencia se desarrolló bajo un régimen laminar en donde el número de Reynolds se encontraba en un rango de 100 a 690, para el flujo de petróleo que circulaba por la tubería de plexiglás.

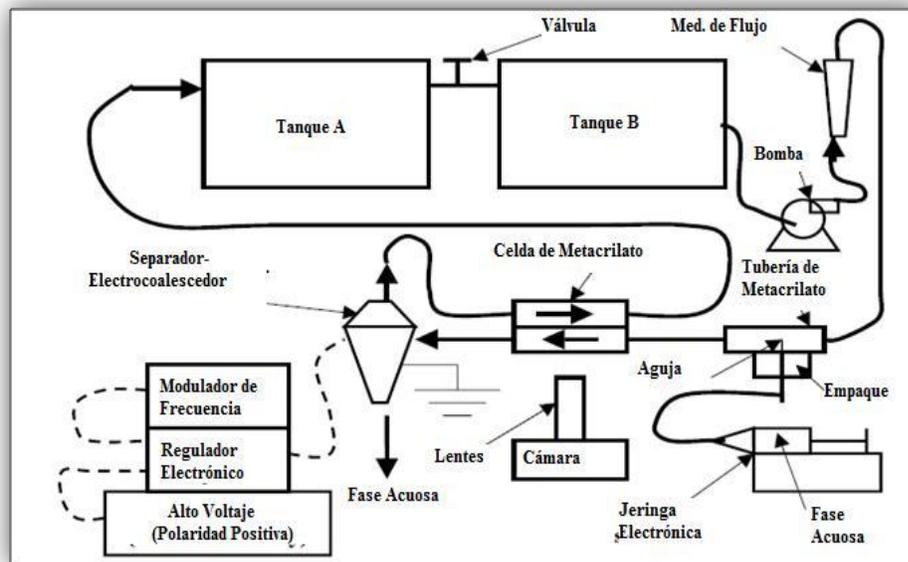


Figura 1.- Montaje en continuo utilizado Eow y Ghadiri (2002)

Padrón, Alida y Percy, Zúñiga (2005), en su trabajo titulado “*Aplicación de la técnica de microscopía óptica para la caracterización de sistemas dispersos formados por crudo, agua y sólidos*”, el cual plantea como objetivo “Caracterización del material proveniente de las fosas Acema-100, Merey-31 y Guara-2 ubicadas en el distrito San Tomé, en términos de su distribución de tamaños de partículas (gotas y sólidos), aprovechando al máximo la información obtenida por microscopía óptica acoplada a un sistema de análisis digital de imágenes”. Estas muestras presentan cantidades de agua y sólidos que pudieron ser contabilizadas por esta técnica, en donde desarrollaron un análisis de imágenes a través de un Microscopio Nikon Eclipse ME-600 en conjunto al programa Image Pro Plus de Media Cybernetics, que permite contabilizar las partículas (gotas), teniendo como base la diferencia de

colores de las partículas con respecto al crudo. También se realizó la caracterización mediante técnicas estándares como la ASTM, en donde se determinó la cantidad de agua por destilación y extracción.

En este trabajo los resultados de la caracterización obtenidos por microscopía, mostraron que para la fosa Acema-100, las gotas tienen una distribución de tamaño polidispersa (1,5-1,8 μm) y la cantidad de agua obtenida por destilación fue de 47 %. La realización de este trabajo logró un aporte para el estudio de sistemas dispersos, conociendo parámetros que por otras técnicas de medición de tamaños de partículas no se lograban.

Rivero L., Víctor A (2007), desarrollo una investigación llamada “*Desestabilización de emulsiones estables empleando diferentes temperaturas y relaciones de fases agua- aceite en combinación con campo eléctrico*”, en donde estudio la posible desestabilización de emulsiones de las fosas de producción del Distrito San Tomé, en el Estado Anzoátegui. Mediante el cambio en las variables en el contenido de las fases acuosa y orgánica, la temperatura como variable de formulación con la aplicación de campo eléctrico. Aunque no se llegaron a los resultados esperados debido a la gran estabilidad de las emulsiones y el fenómeno de percolación, Rivero pudo concluir que no es posible una aplicación de alto voltaje en las muestras que indican alto contenido de agua, ya que ocurre la percolación, sin embargo este hecho pudo ser disminuido mediante la agitación de la muestra.

En este estudio se realizó centrifugación como método de separación alternativo, observando la presencia de agua coalescida después de la aplicación de campo eléctrico para la fosa Acema-100 se observó mayor separación a 60 °C y tuvo la tendencia de disminuir la separación con el aumento de la temperatura.

Fung S., Edward J. (2011), llevo a cabo un trabajo titulado “*Desestabilización Electrostática con corriente directa de material de fosas de producción mezclado con solventes*” cuyo objetivo se basó en someter mezclas del material de las fosas con distintas proporciones de solventes alifáticos y aromáticos a varios voltajes de corriente continua.

Realizó pruebas con una celda denominada “celda de trabajo” presentada en la Figura N° 2, la cual opera en forma “batch”. Empleando esta celda se evalúa la reproducibilidad de los efectos observado en la “celda de observación” utilizando separación electrostática. Una vez establecida una viscosidad igual para todas las fosas con ayuda de los solventes, las muestras fueron sometidas a intensidades de campo eléctrico de 2, 4 y 6 KV/cm para definir el voltaje y solvente a ser usados en una celda de mayor tamaño. Utilizó la microscopía óptica para medir el aumento de tamaño de gotas, donde observó gran cantidad de agua en gotas grandes cerca del electrodo negativo, siendo la intensidad del campo escogida para Acema-100 de 2KV/cm, la duración del campo en la celda fue de 90s, arrojando un mayor porcentaje de agua en gotas de gran tamaño, el diámetro equivalente para un 50% de la fracción acumulada de agua fue de 67,39 μ m.

Igualmente se definió un Factor de Desestabilización (FD), para cuantificar la magnitud del cambio ocasionado por el campo eléctrico en el tamaño de gotas.

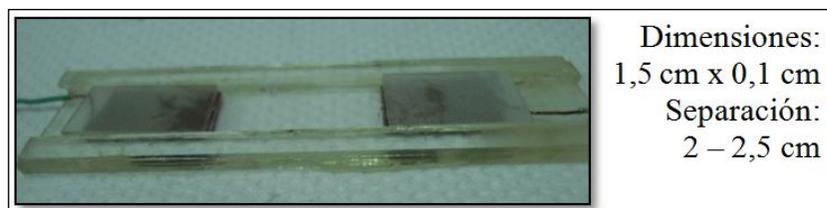


Figura 2.Celda de trabajo. (Fung, 2011)

Pérez, Violeta M (2012), realizo un trabajo con el título “*Desestabilización Electrostática con corriente alterna de material de fosas de producción mezclado con solventes*”. Aplica AC (60 Hz) a diferentes voltajes a muestras de material de distintas fosas de producción (Acema-100, Guara-2, Merey-31), empleando un montaje para el circuito eléctrico realizado con el apoyo de la Escuela de Ingeniería Eléctrica (Prof. Malpica). Utilizó una celda de trabajo (Figura N° 2) y analizó las imágenes mediante microscopía óptica para la observación del cambio de tamaño de gotas. Y así establecer un voltaje para este tipo de corriente.

Los resultados obtenidos en esta investigación fueron los siguientes: para la intensidad de campo igual a 6 KV/cm los valores obtenidos para los parámetros ϕ_w

(%) = 75,69 %; $\Phi_w(40\mu\text{m}) = 73,8 \%$ y un diámetro equivalente de 581,11 μm para el 50% de su fracción acumulada de agua. Esto indica que el porcentaje de agua total es alto y el contenido del agua en gotas grandes también lo es, mostrando que a 6 KV/cm de corriente alterna, es una intensidad apropiada para promover la desestabilización y coalescencia del agua emulsionada, en la fosa Acema-100, como se puede observar en la figura 3.

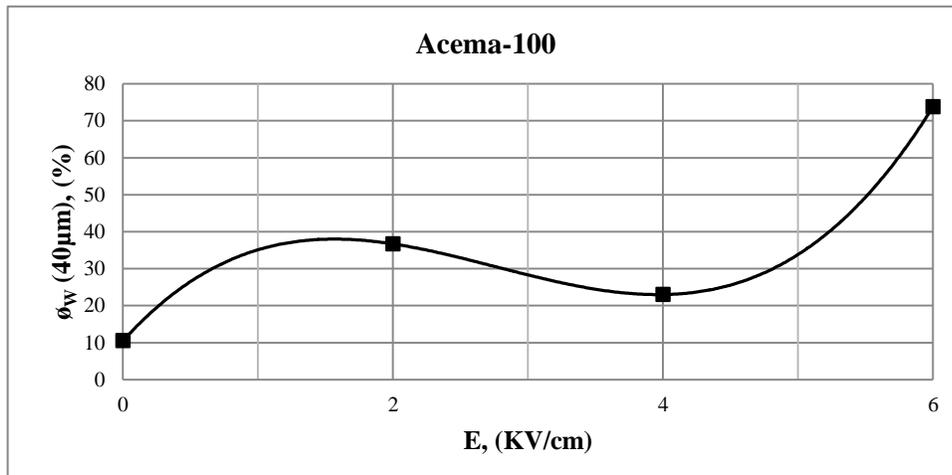


Figura 3.- Cantidad de agua en gotas grandes en función de la intensidad de campo eléctrico, para la fosa Acema-100. (Pérez, 2012)

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

El desarrollo del Trabajo Especial de Grado, se sustenta bajo los conceptos que a continuación se presentan, los cuales facilitan el entendimiento del tema.

Fosas de Producción: son desechos de las actividades de exploración y perforación que son depositados en excavaciones, en su mayoría adyacentes a los pozos, donde se encuentra petróleo oxidado junto a aceites, agua, lodos, piedras, metales y otros sedimentos. A modo de referencia en cuanto a las dimensiones de las fosas oscilan entre 200 y 850 m². Y en cuanto a la profundidad pueden variar de 1,5 a 6 metros. (VenEconomía, 2006) La fosa de producción en estudio, denominada “Acema-100”, se encuentra ubicada en el distrito San Tomé, del estado Anzoátegui.

En el proceso de deshidratación de crudos, una parte del agua producida por el pozo, llamada agua libre, se separa fácilmente por acción de la gravedad, tan pronto como la velocidad de los fluidos es suficientemente baja; sin embargo, otra parte del agua está íntimamente combinada con el crudo en forma de emulsión (gotas de agua dispersadas en el aceite), la cual es llamada emulsión agua en aceite o W/O.

Emulsión: es una mezcla íntima y estable de agua y aceite. Más rigurosamente, una emulsión en un sistema constituido por lo menos, por un líquido no miscible disperso íntimamente en otro en forma de gotas, cuyos diámetros son generalmente, mayores a 0,10 micras. La estabilidad de dicho sistema puede alterarse por medio de agentes activos de superficie, sólidos finamente divididos, etc.

En los campos petroleros las emulsiones de agua en aceite (W/O) son llamadas emulsiones directas, mientras que las emulsiones de aceite en agua (O/W) son llamadas emulsiones inversas. Esta clasificación simple no siempre es la adecuada, ya que las múltiples y complejas también pueden ocurrir (o/W/O) ó (w/O/W).

Las emulsiones clasificadas según el tamaño de gotas dispersas pueden considerarse como: macroemulsión cuando el rango de gotas es de 10 a 150 micras y como microemulsión cuando el tamaño de gotas varía de 0,5 a 50 micras. A continuación en la figura se presenta una emulsión W/O:

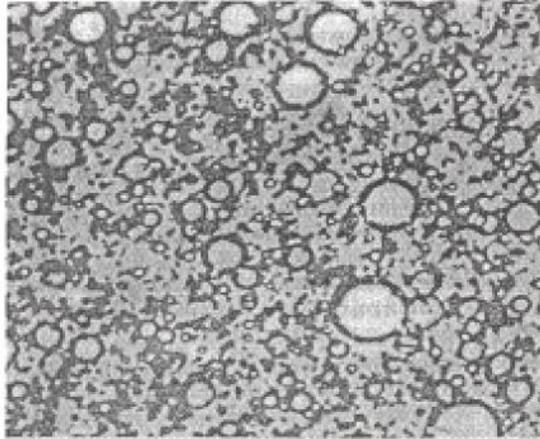


Figura 4. Microfotografía de una emulsión agua en aceite. (PETEX, 1990)

Existen tres mecanismos esenciales para formar una emulsión: (a) Dos líquidos inmiscibles, como el agua y aceite. (b) Suficiente agitación para dispersar uno de los líquidos en pequeñas gotas en el otro, (c) Un agente emulsionante para estabilizar las gotas en la fase continua.

En las emulsiones existen distintos agentes emulsionantes dentro de los que se pueden mencionar los compuestos naturales surfactantes, los sólidos finamente divididos y los químicos de producción añadidos.

Los agentes surfactantes son macromoléculas con actividad interfacial, que poseen un alto contenido de aromáticos, con al menos un grupo polar y colas lipofílicas. Pueden apilarse en forma de micelas y tienen gran actividad interfacial. Estos surfactantes se pueden absorber en la interface de la gota de agua, formando una película rígida ocasionando una estabilidad de la emulsión W/O formada, en poco tiempo.

En la figura 5, se presentan los diferentes agentes emulsionantes que colaboran con la estabilidad de una emulsión de agua en crudo.

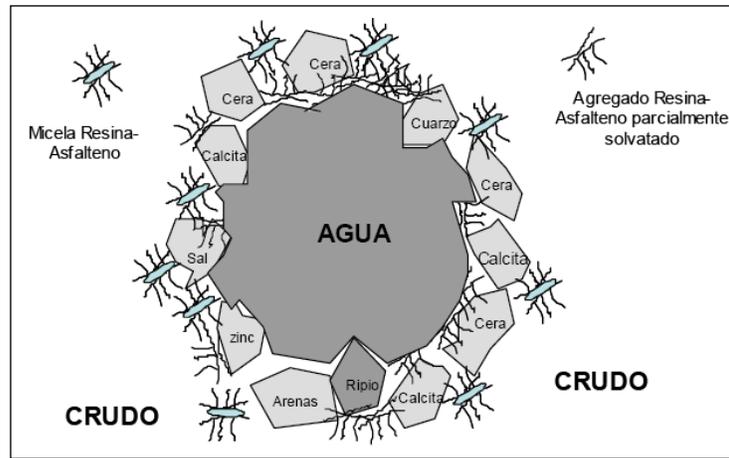


Figura 5. Representación grafica de la estabilización de una gota de agua por agentes emulsionantes presentes en el crudo (FIRP, 2004)

Los factores que le dan estabilidad a las emulsiones son enumeradas a continuación (Salager 1987):

1. **Tensión interfacial:** cuando esta propiedad disminuye también lo hace la estabilidad de la emulsión. Recientemente se ha encontrado que los sistemas de tensión ultra-baja producen emulsiones inestables. Estudios certifican que la tensión interfacial dinámica entre el agua y el crudo desciende con el tiempo y que se requieren de muchas horas de contacto para un valor estable.
2. **Viscosidad de la fase externa:** si la viscosidad de la fase externa es alta esto produce una disminución en el coeficiente de difusión y la coalescencia de las gotas, incrementando la estabilidad de la emulsión. Este efecto puede ser reducido calentado la emulsión.
3. **Tamaño de la gota:** la presencia de gotas menores a $10\mu\text{m}$ producen emulsiones estables, si por el contrario existe una amplia distribución de tamaño de gotas resulta una emulsión inestable.
4. **Relación de volumen de fases:** si se incrementa el volumen de la fase dispersa también lo hace el número de gotas, su tamaño y la tensión interfacial. La distancia de separación disminuye y favorece la coalescencia de gotas. Todos estos factores reducen la estabilidad de la emulsión.
5. **Temperatura:** comúnmente, esta variable tiene fuertes efectos en la estabilidad de la emulsión, ya que cuando se incrementa se reduce la

adsorción de surfactantes naturales y la viscosidad de la fase externa, la rigidez de la película interfacial y la tensión superficial. Todos estos cambios producen una disminución en la estabilidad de las emulsiones.

6. **pH:** la adición de ácidos o bases inorgánicos cambian radicalmente la formación de películas de asfaltenos y resinas que estabilizan las emulsiones agua-aceite. El ajuste del pH puede minimizar la rigidez de la película que estabiliza la emulsión y aumenta la tensión superficial. El pH de la fase acuosa logra estabilizar la tensión interfacial, por lo cual la adsorción de la interfase presenta una histéresis que indica que las diferentes moléculas emulsionantes poseen cinéticas de equilibrio distintas.
7. **Envejecimiento de la interfase:** mientras la interfase envejece adsorción de los surfactantes se mejora, al igual que la rigidez de la película debido a las interacciones laterales de las moléculas. Esta película o piel alrededor de la gota llega a ser fuerte y dura. La cantidad de agentes emulsionantes se incrementa por la acción de oxidantes, evaporación o bacterias.
8. **Salinidad de la salmuera:** la formación de una emulsión estable depende de la concentración de salmuera, cuando se encuentra una baja concentración de sal las emulsiones son estables. Por el contrario altas concentraciones de sal tienden a reducirla.
9. **Tipo de hidrocarburo:** los crudos con base parafínica no forman emulsiones estables, mientras que los nafténicos y de base mixta si lo hacen. Ceras, resinas, asfaltenos y otros sólidos pueden influenciar la estabilidad de las emulsiones.
10. **Diferencia de densidad:** la fuerza de gravedad que actúa en las gotas es directamente proporcional a la diferencia de densidades entre la gota y la fase continua. Cuando se incrementa esta diferencia por efecto de temperatura también lo hace la velocidad de sedimentación de las gotas y su coalescencia, lo que desfavorece la estabilidad de la emulsión.

11. Presencia de cationes: la presencia de cationes como calcio y magnesio producen una compactación de la película, bien sea por efecto de pantalla electrostática o por la precipitación de sales insolubles en la interfase.

12. Propiedades reológicas interfaciales: normalmente cuando una interfase con moléculas de surfactantes adsorbidas se estira o dilata se generan gradientes de tensión. Estos gradientes se oponen al estiramiento, intentando restaurar la uniformidad de la tensión interfacial. Como consecuencia la interfase posee elasticidad y se ve representado por el efecto llamado Gibbs-Marangoni.

Fundamentos de la separación agua en crudo

— **Gravedad.** La deshidratación de crudos es esencialmente un proceso de separación por gravedad, proporcionando la fuerza requerida para remover el agua del crudo. Los equipos empleados para la separación por gravedad son: los tanques deshidratadores, los eliminadores de agua libre, los separadores de tres fases, los coalescedores mecánicos y los coalescedores eléctricos. Ninguno de ellos separa totalmente el agua del crudo.

El tiempo necesario para que las gotas de menor tamaño se asienten es uno de los factores de diseño de mayor importancia. Esto se puede ilustrar mediante la ecuación de Stokes:

$$V = \frac{2gr^2(\gamma_w - \gamma_o)}{\mu_o} \quad \text{Ec. (1)}$$

donde:

V= velocidad de asentamiento del agua.

g= aceleración de la gravedad.

r= radio de la partícula.

γ_w = densidad relativa del agua.

γ_o = densidad relativa del crudo.

μ_o = viscosidad del crudo.

— **Adición de calor:** permite un asentamiento más rápido de las partículas de agua, a través de los efectos de: (a) Reducción de la viscosidad del crudo. (b)

Expansión del agua, donde la película que rodea la gota se rompe o se reduce su resistencia. (c) Aumento del movimiento de las moléculas. (d) Permite acentuar la diferencia de densidades entre las gotas de agua y crudo.

— **Campo eléctrico:** todas las refinерías que reciben crudo conteniendo sal, utilizan separadores electrostáticos, los cuales incorporan una sección eléctrica a los separadores convencionales.

La base para la coalescencia electrostática de las gotas la proporciona la propia molécula de agua, formada por una parte de oxígeno y dos de hidrógeno que al unirse configuran un dipolo eléctrico el cual responde a la aplicación de un campo eléctrico, tal como se presenta en la Figura 6a.

Bajo la influencia de un campo eléctrico las gotas se deforman de manera elipsoidal (Figura 6b), donde con este alargamiento de la gota, la película que la rodea puede romperse facilitando la coalescencia de las gotas adyacentes.

De mayor importancia es el desplazamiento de las gotas bajo el efecto eléctrico, ya que las gotas adyacentes se alinean con las líneas de la fuerza del campo eléctrico y con el voltaje de la corriente alterna, ese efecto se puede ver en la Figura 6c (Manejo de producción en superficie, s.f.)

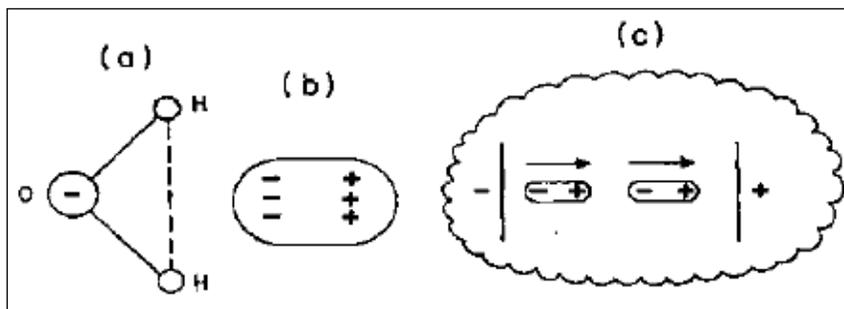


Figura 6. Composición y polaridad del de agua. (Manejo de producción en superficie, s.f.)

Al mismo tiempo el electrodo positivo atrae las gotas con carga negativa y los electrodos negativos las de carga positiva. La fuerza de atracción por gotas del mismo tamaño se puede expresar matemáticamente mediante la siguiente ecuación:

$$F = \frac{6KE^2r^6}{L^4} \quad \text{Ec. (2)}$$

donde:

F= fuerza de atracción.

K= constante dieléctrica.

E= radio de la gota.

L= la distancia entre los centros de las gotas.

Si la distancia entre las partículas disminuye, la fuerza de atracción aumenta en forma notable. La respuesta a la coalescencia ocurre rápidamente.

Un aumento en el gradiente eléctrico podría acelerar el proceso pero el voltaje fluctuara y variara proporcionalmente a la densidad del crudo y a la conductividad de la emulsión a tratar.

Existen varios mecanismos o procesos que permiten la separación o desestabilización de la emulsión agua en aceite (W/O), dependiendo del tipo de aceite y la disponibilidad de recursos, dentro de los que se pueden mencionar los siguientes:

Deshidratación electrostática: es el proceso mediante el cual se separa el agua asociada al crudo en forma de una emulsión agua en aceite (W/O) hasta reducir el contenido de agua a un porcentaje menor a 1% volumen. La emulsión se forma cuando la mezcla bifásica (agua/petróleo) que sale del yacimiento pasa por todo el equipo de producción (bombas, válvulas, restricciones, codos) durante el levantamiento y transporte en superficie. La emulsión se estabiliza por especies químicas hidrófobas presentes en el petróleo (asfaltenos y resinas) que se absorben en la interfase y se oponen a la coalescencia por diversos mecanismos (Kilpatrick y Spiecker, 2001)

En este proceso se aplica campo eléctrico entre dos electrodos en contacto con una emulsión, en equipo denominados coalescedores o deshidratadores electrostáticos. Waterman (1965), explicó que el principio de separación en estos equipos esta dado por dos mecanismos de coalescencia: el primero, es la coalescencia de dipolo

inducido, que ocurre tanto en campos eléctricos de corriente alterna (AC) como directa (DC) actuando sobre una gota cargada, el cual es ineficiente en un campo AC.

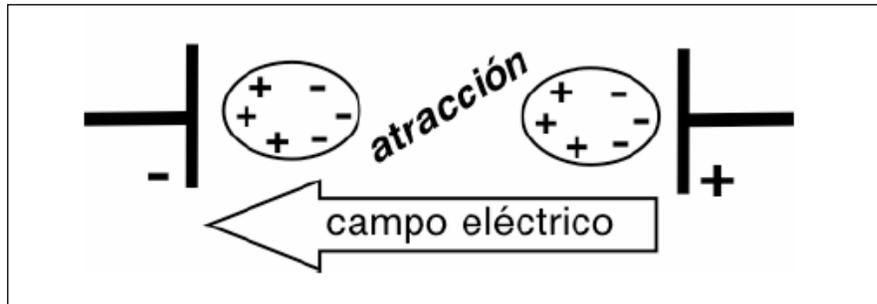


Figura 7. Atracción de dos gotas de agua por acción de dipolo inducido (Marfisi, 2009).

Taylor (1988), realizó pruebas con emulsiones de petróleo sometidas a altos campos eléctricos AC y encontró dos tipos de comportamiento en la desestabilización de la emulsión: el *tipo I* relacionado con la formación de cadenas de gotas generando puentes entre los electrodos, los cuales ocasionan un incremento sustancial de la conductividad de la emulsión; y el *tipo II* que indica la ausencia de formación de cadenas por la rápida coalescencia de gotas, atribuido a las mejoras en la movilidad de la película interfacial por la presencia de un surfactante añadido a la emulsión el cual actúa como desemulsificante.

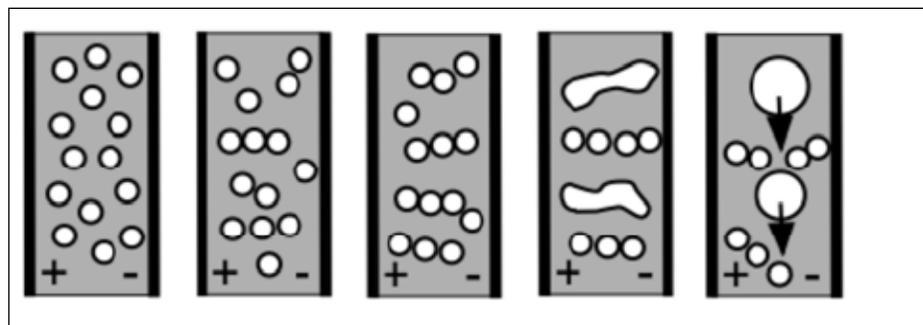


Figura 8. Electrocoalescencia entre gotas según el comportamiento tipo I de (Taylor, 1988)

Mecanismos de Coalescencia

Se establece que la coalescencia se da en un mecanismo de tres etapas, a saber:

Etapa 1. Acercamiento de las gotas: Ocurre cuando las gotas se acercan entre sí; si las gotas son más o menos grandes se aproximan por sedimentación gravitacional,

gobernadas por la ley de Stokes, pero si son menores a 5 μm este acercamiento se produce por el movimiento Browniano de las gotas.

Etapa 2. Drenaje de la película: Seguidamente de la etapa anterior, las gotas se deforman y se genera una película intergota, dando inicio a la segunda etapa, donde se encuentran involucrados fenómenos interfaciales relacionados con la presencia de surfactantes adsorbidos, por lo que la velocidad de drenaje de la película depende de las fuerzas interfaciales que actúan.

Cuando dos gotas de fase interna de una emulsión se aproximan una de la otra por acción de fuerzas gravitacionales, convección térmica o agitación se crea un flujo de líquido entre ambas interfases y el espesor de la película disminuye, la fuerza de Van der Waals dominan y ocurre la coalescencia.

Etapa 3. Coalescencia: Es el fenómeno irreversible en el cual las gotas pierden su identidad, lo cual solo se produce cuando se logran vencer las barreras asociadas con los emulsionantes adsorbidos y la película de la fase continua entre las gotas. Esta etapa puede considerarse instantánea con respecto a las otras dos etapas mencionadas anteriormente. Los mecanismos de coalescencia dependen de factores como la fracción volumétrica retenida de la fase dispersa, geometría del electrodo y tipo de campo eléctrico.

Interacciones originadas por la aplicación de campo eléctrico.

Dos mecanismos para la electrocoalescencia de gotas de agua en campos eléctricos, es decir, la coalescencia dipolo-dipolo y la electrodeposición han sido descritos por Waterman. La electrodeposición cubre la electroforesis, la coalescencia por dipolo, la colisión de gotas opuestamente cargadas que se mueven en direcciones opuestas y los choques de gotas de diferente tamaño que se mueven en la dirección del campo eléctrico. (Galindo, 2010). A continuación se realiza una breve descripción de estos fenómenos:

Coalescencia dipolo-dipolo: la ecuación clásica para la interacción dipolo-dipolo entre dos partículas similares generada por la fuerza electrostática, viene dada por la Ecuación 1, referente a la Ley de Stokes.

Un campo eléctrico externo, no importa cuán pequeño, induce cargas de signo opuesto en las superficies de las gotas más cercanas de dos gotas acuosas. Cuando dos gotas están cerca unas de la otra, la presencia de las gotas vecinas afecta el campo de potencial alrededor de la otra gota; causando una resistencia adicional hidrodinámica en cada gota, generando que las gotas fluyan alrededor una de otra. Si dos gotas están muy próximas la atracción Van der Waals influye de manera importante promoviendo el acercamiento de las gotas.

Cuando gotas de agua relativamente conductoras se encuentran dispersas en un fluido dieléctrico, están sujetas a un campo eléctrico externo. Se crea una polarización interfacial debido a la redistribución de las cargas superficiales de la gota, induciendo un momento dipolar entre ellos.

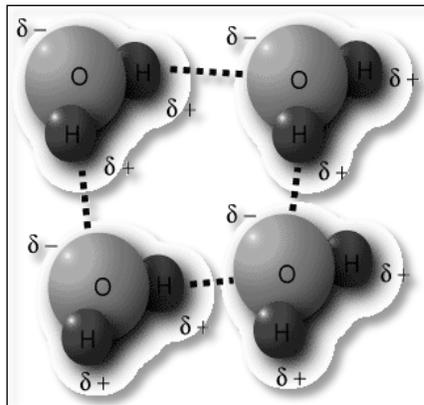


Figura 9.- Fuerzas de Van der Waals presentes con las moléculas de agua, en la emulsión (Pérez, 2012)

Dielectroforesis: es el movimiento de la materia causado por efectos de la polarización de un campo eléctrico no uniforme. Para gotas con una permitividad mayor a la del medio de suspensión, moviendo hacia donde se encuentre la mayor intensidad del campo. Esto no requiere partículas cargadas y depende de la fuerza ejercida por todos los materiales polares en un campo eléctrico no uniforme.

La dielectroforesis puede ocurrir cuando el campo es espacialmente uniforme como consecuencia de las perturbaciones del campo causado por la presencia de gotas. En situaciones donde las gotas probablemente no estén cargadas, como cuando se emplea

una excitación de corriente alterna o electrodos aislados, la dielectroforesis es de primordial importancia con respecto a la coalescencia.

La contribución de la dielectroforesis puede ser pequeña en comparación con la electroforesis, ya que la velocidad de una gota debido a la fuerza dielectroforética es relativamente bajo en un campo altamente divergente. Cuando la separación intergota se reduce, la aproximación dipolo pierde validez y algunos términos de orden superior deben ser considerados, tomando en cuenta la enorme interacción a separaciones muy pequeñas.

Electroforesis: este término se refiere al movimiento de las partículas cargadas en un fluido estacionario bajo la influencia de un campo eléctrico. El principio fundamental aquí es la separación de cargas entre la superficie de la partícula y el líquido que la rodea. Un campo eléctrico aplicado actúa sobre la densidad de la carga resultante, haciendo que el líquido que se encuentra bordeando a la partícula se mueva conjuntamente. La movilidad electroforética se define como la velocidad de la partícula dividida por la intensidad del campo eléctrico. A continuación en la Figura 10, se pueden apreciar las fuerzas electrostáticas que originan la coalescencia de las gotas de agua en la emulsión

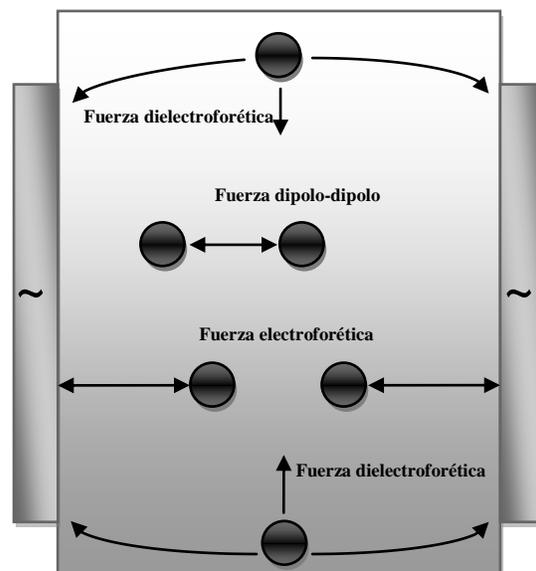


Figura 10 Fuerzas electrostáticas presentes con la aplicación de campo eléctrico. (Pérez, 2012)

Efectos del campo eléctrico aplicado

Los mecanismos de unión predominantes en un sistema también vienen dado por la naturaleza del campo eléctrico aplicado. La corriente alterna (AC) es la más común y antigua, se utiliza ampliamente en las emulsiones de crudo, mientras que la corriente directa (DC) se usa en el tratamiento de productos refinados con bajo contenido de agua, una corriente de campo pulsado se propone para emulsiones con alto contenido de agua.

En un campo eléctrico la fuerza electrostática inducida entre dos gotas es inversamente proporcional a aproximadamente a la cuarta potencia de la distancia de separación entre las gotas. Por lo tanto la fuerza de Van der Waals aumenta drásticamente cuando las gotas se acercan una a la otra. Sin embargo esta fuerza inducida también aumenta con el cuadrado del tamaño de la gota. El tipo de coalescencia mejora a medida que la intensidad del campo aplicado se incrementa. Si la intensidad es demasiado alta puede ocurrir la ruptura de algunos mecanismos, de los cuatro mecanismos identificados tres son de electrostática y uno hidrodinámico. La gota se deforma en forma de hilo delgado y estalla en gotas más pequeñas si el campo es demasiado alto.

El efecto de la conductividad en los dieléctricos es muy importante sobre los efectos de la distribución de las cargas tanto en la fase dispersa como en la continua. El uso combinado de diferentes tipos de campo también se ha aplicado para la deshidratación y desalado del crudo en general la eficiencia de la separación mejora con el aumento de la fuerza aplicada del campo. Sin embargo hay que tener presente que ocurre el efecto opuesto cuando este campo es elevado, actuando en función de las características físicas y propiedades de la superficie del sistema tales como la tensión interfacial y la reología.

Campo DC y AC

En un campo DC las gotas migraran en un patrón continuo a una velocidad determinada por la fase continua. Las gotas gradualmente perderán su carga, dependiendo del tiempo de relajación e la fase continua.

En la corriente continua AC, una gota cargada oscilara en una posición media entre los electrodos. Una gota puede cargarse con mecanismos como: ionización, adsorción preferencial de iones a la interfase (doble capa eléctrica) o transferencia de carga convectiva desde un electrodo por la fase orgánica (Burris 1977)

En investigaciones realizadas se ha podido estudiar el fenómeno que hace que los voltajes D.C sean tan efectivos y permitan remover cantidades de agua considerables. Este principio se puede observar en la Figura 11, donde el crudo fluye verticalmente con una sola gota de agua presente. A medida que la gota entra en el alto gradiente D.C, este le induce una carga a la superficie de la gota, que es igual al electrodo más cercano, por lo que inmediatamente ambos se repelen y la gota es atraída hacia el electrodo de la carga contraria.

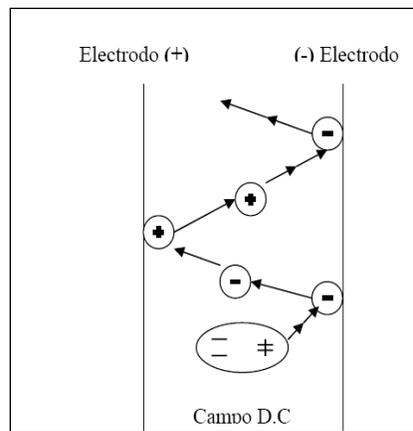


Figura 11. Movimiento de las gotas en un campo con electrodos de polaridad dual. (FIRP, 2004)

Cuando la gota se acerca al electrodo de carga contraria, la carga superficial de la gota se altera por el gran potencial del ahora electrodo más cercano lo que hace que sea repelida de nuevo y atraída por el electrodo de carga contraria. Este movimiento de las gotas es una migración ordenada entre los electrodos. Los altos potenciales de DC retienen a las gotas de agua hasta que sean lo suficientemente grandes como para sedimentar. Considerando lo anteriormente dicho para un sistema de emulsión W/O con muchas gotas de agua. Las gotas polarizadas (cargadas mitad positivamente y mitad negativamente) tenderán a colisionar entre sí, por lo cual la coalescencia tiende

a ocurrir más rápido. Este fenómeno también hace que las gotas en medios más viscosos colisionen siendo necesario calentar.

DESHIDRATADORES ELECTROSTÁTICOS

Los procesos de deshidratación electrostática consisten en someter la emulsión a un campo eléctrico intenso, generado por la aplicación de un alto nivel entre dos electrodos. Este dispositivo generalmente tiene características similares a los de los equipos de separación mecánica presurizados, añadiendo a estos el sistema de electrodos y de generación de un alto voltaje. La aplicación del campo eléctrico sobre la emulsión induce a la formación de dipolos eléctricos en las gotas de agua, lo que origina una atracción entre ellas, incrementando su contacto y su posterior coalescencia. Como efecto final se obtiene un aumento del tamaño de las gotas, lo que permite la sedimentación por gravedad.

En la Figura 12, se observa un deshidratador electrostático que está dividido en tres secciones. La primera sección ocupa aproximadamente el 50% de su longitud y es llamada “Sección de calentamiento”. La segunda sección es llamada “Sección central o Control de nivel” y esta ocupa alrededor del 10% de su longitud ubicada adyacente a la primera sección. La tercera sección ocupa el 40% de la longitud del deshidratador y se denomina “Sección de asentamiento” del agua suspendida para producir crudo limpio. Las parrillas de electrodos de alto voltaje están localizadas en la parte superior del recipiente, arriba de la interfase agua-aceite.

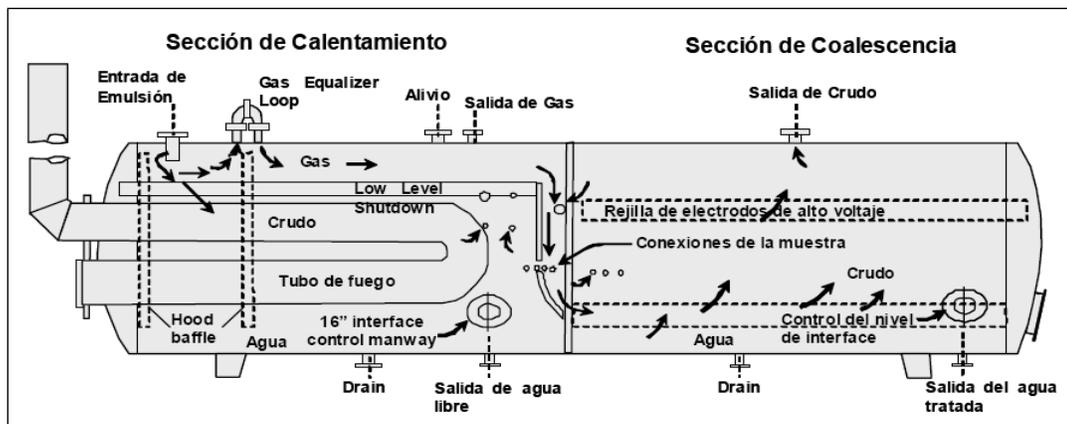


Figura 12. Deshidratador Electrostático. (FIRP, 2004)

MICROSCOPIA ÓPTICA

La video-microscopía es una técnica que combina el poder de una magnificación de un microscopio, con la capacidad de adquisición de imágenes de una video cámara. La matriz de datos resultante de la cual se obtiene la información de la muestra es una imagen o serie de imágenes. Esto relaciona la video microscopía con las técnicas de análisis, realizadas frecuente con la ayuda de un computador. El software de análisis de imágenes de hoy en día provee un amplio rango de funciones analíticas, con la adición del mejoramiento de la calidad de la imagen previa a su análisis (Sjoblom, 2002).

La información típica que se puede encontrar en las imágenes es el estado de la muestra, geometría y dispersión entre otros. Para emulsiones, esto generalmente significa tamaño de partícula y concentración. Además, el estado de floculación indicará las interacciones gota-gota. Series de imágenes o video continuo suministran información sobre las interacciones y cinética de las gotas de procesos importantes dentro de las emulsiones, como floculación y coalescencia, los cuales son parámetros fundamentales para el entendimiento del comportamiento de la emulsión y la estabilidad de la misma.

ANALISIS DE PARTÍCULA

Considerando parámetros como características geométricas (el volumen, la longitud, la superficie, el área proyectada) o propiedades físicas que dependen del tamaño (como la velocidad de sedimentación, coeficiente de difusión, ángulo de difracción de la luz), posible definir un tamaño de partícula en dimensión de longitud.

Un sistema de partículas se constituye por unidades elementales que no poseen el mismo tamaño, por lo que se habla de una distribución de partículas la cual es una propiedad intensiva de una dispersión, o más precisamente de las gotas y sólidos que la componen. Lo que permite describir la geometría de una dispersión a través de análisis estadísticos del conjunto de partículas. Las propiedades de tales sistemas

comúnmente caen dentro de la clase que pertenece a la partícula individual, en donde se encuentra el tamaño y forma de la partícula, su volumen y su área superficial.

La distribución de tamaño de gotas de partículas 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 , como se muestra a continuación en la Figura. (Sorrentino, 2002)

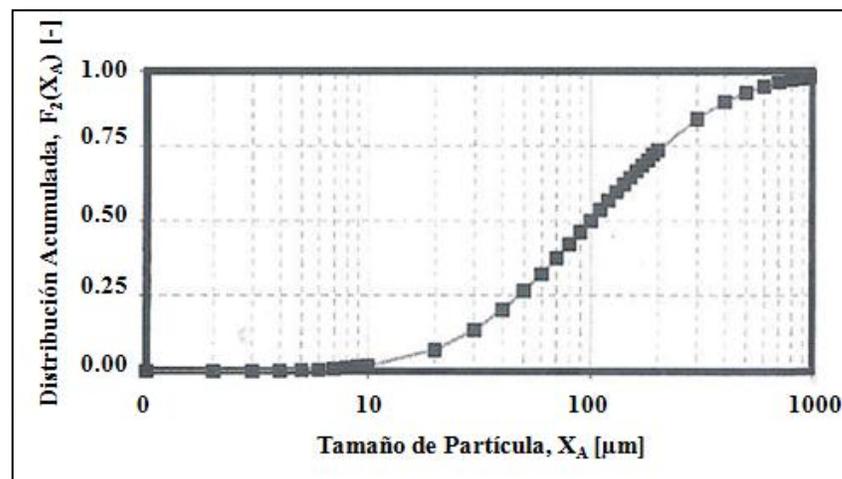


Figura 13. Distribución acumulada de tamaño de partículas (Sorrentino, 2002).

ANÁLISIS SARA

Parte de este estudio incluye el conocimiento de las características para la fosa de producción Acema-100 y el análisis SARA forma parte de ello. Ya que los componentes que designan sus siglas Saturados, Asfáltenos, Resinas y Aromáticos influyen en la estabilidad de la emulsión.

El análisis SARA comprende un fraccionamiento, seguido o no, de una cuantificación de cada fracción obtenida.

Primero se separan los asfaltenos mediante precipitación con diferentes solventes de hidrocarburos, usualmente n-parafinas.

Los asfaltenos se definen como la porción del crudo insoluble en n-alcanos liviano pero soluble en solventes aromáticos (por ejemplo tolueno). La cantidad, composición química y distribución de masa molecular (M.W) del asfalteno obtenido depende de la fuente del crudo y del método de precipitación.

Estructuralmente los asfaltenos consisten en anillos poliaromáticos condensados con cortas cadenas alifáticas y heteroatómicas

Una determinación de cuantitativa de los asfaltenos puede también efectuarse por el agregado de la n-parafina a una mezcla de crudo con benceno o tolueno.

Luego de ser separados los asfaltenos, los caminos analíticos más difundidos son tres:

- Cromatografía en columna abierta de adsorción en arcilla-gel.
- Cromatografía líquida de alta presión (HPLC) con detector de Índice de Refracción.
- Cromatografía de capa delgada (TLC), este método no requiere de separación previa de los asfaltenos. El detector empleado es FID.

CAPITULO III

MARCO METODOLOGICO

A continuación se presentan los equipos utilizados del LSM-UCV, en el desarrollo de la metodología experimental, los cuales permitieron el desarrollo de las pruebas planteadas para el cumplimiento de los objetivos de este Trabajo Especial de Grado.

DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS

Microscopio óptico NIKON MED-600

El microscopio que se muestra en la figura 14, es un instrumento óptico destinado a observar una imagen con aumento, de objetos minúsculos o detalles muy pequeños; con una combinación de sus lentes se produce el efecto de aumento de sus dimensiones, haciéndose visible lo que no lo es a simple vista.



Figura 14. Microscopio óptico NIKON MED-600.

El microscopio óptico está conformado por tres sistemas:

- (a) El sistema mecánico que está constituido por piezas en las que van instaladas las lentes que permiten el movimiento para el enfoque. La parte mecánica del microscopio comprende: el pie, el tubo, el revólver, el asa, la platina, el carro, el tornillo macrométrico y el tornillo micrométrico.

- (b) El sistema óptico comprende un conjunto de lentes dispuestos de tal manera que produce el aumento de las imágenes que se observan a través de ellas. Está formado por los objetivos y los oculares.
- (c) El sistema de iluminación comprende las partes del microscopio que reflejan, transmiten y regulan la cantidad de luz necesaria para efectuar la observación a través del microscopio. Comprende el espejo, el condensador y el diafragma.

Cámara captadora de imágenes CCD

Esta cámara permite tomar fotos de las imágenes que son observadas en el microscopio para transmitir los datos obtenidos a un computador, donde posteriormente son analizadas, a continuación se muestra en la figura 15 este equipo.



Figura 15.-Cámara captadora de imágenes CCD. (Fung, 2011)

Imagen Pro Plus (Media Cybernetics)

Image Pro Plus 6.0 (Media Cybernetics) fue el programa de análisis de imágenes que se utilizó en el estudio de esta investigación, cuya licencia fue adquirida por el LSM-UCV. Entre las características más importantes de Image Pro Plus se tienen: (a) Captura fácil de imágenes y video, con la cámara CCD, CD de fotos, instrumentos científicos y colección de imágenes guardadas en bases de datos. (b) Procesa imágenes asegurando alta calidad, precisión y resultados constantes. (c) Realiza mediciones geométricas simples y complejas (relaciones de estructura y función). (d)

Examina, compara y visualiza datos para alcanzar máximos resultados. En la figura 16 se muestra el computador utilizado (a) junto al programa Image Pro Plus (b).

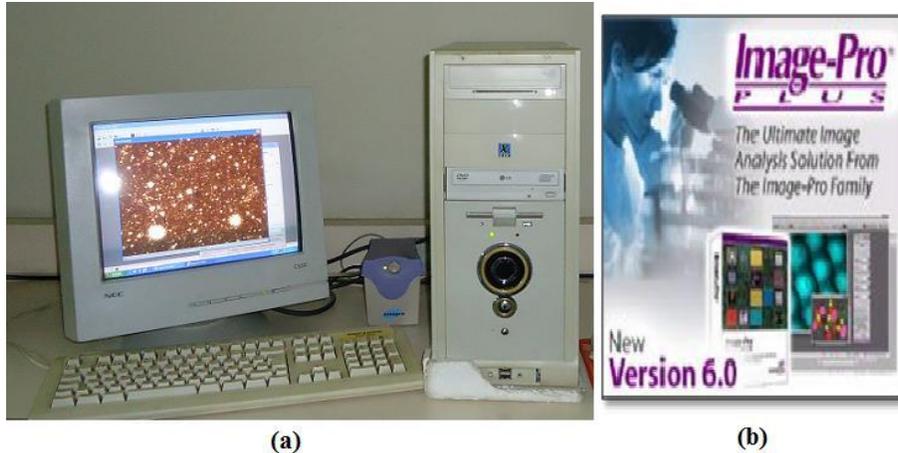


Figura 16.- Sistema de computador con el programa Image Pro Plus.

Circuito eléctrico para la aplicación de campo eléctrico

Para la aplicación de campo eléctrico de ambos tipos de corriente DC y AC, se contó con un circuito de corriente ensamblado en el LSM-UCV, con la ayuda de la Escuela de Ingeniería Eléctrica (Prof. Malpica), este sistema se muestra en la figura 17 el cual proporciona hasta un valor de voltaje de 7200V de AC y 3200V de DC.

Este circuito está conformado por una serie de equipos como lo son: variac, amperímetro, voltímetro, diodos, transformador, bombillo.



Figura 17.- Montaje para la aplicación de campo eléctrico (Pérez, 2012)

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Para llevar a cabo los objetivos planteados se realizaron una serie de experiencias con un sistema en continuo que engloba el calentamiento de la muestra, la aplicación del campo eléctrico a distintos tipos de corriente, variación en los tiempos de residencia y voltaje, junto a la centrifugación y microscopía óptica.

Para el cumplimiento del objetivo:

Diseñar un sistema en continuo que permita la aplicación de calentamiento y campo eléctrico.

Se procedió a construir un sistema continuo, con un tanque de calentamiento de material acero al carbono de dimensiones 9cm de altura x 5 cm de diámetro acoplado a una válvula que controla el flujo del tanque, posteriormente se ajusta una celda de geometría bien sea plana o cilíndrica que podrá cambiarse según la prueba que se realice. Estas celdas son de acrílico con un espesor de 0,3cm, a ellas se encuentran acoplados los electrodos para la formación de campo eléctrico. Finalmente una válvula que controla el flujo de salida, el montaje realizado se muestra en la siguiente Figura.

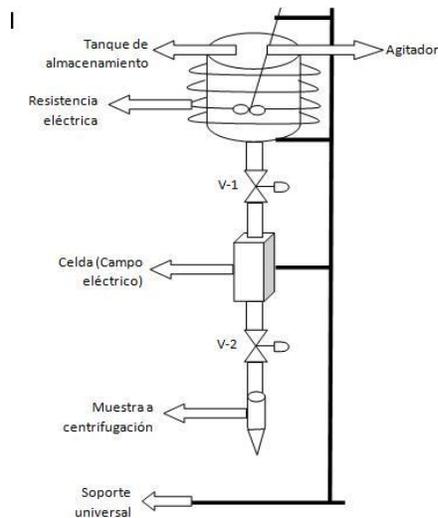


Figura 18. Montaje del sistema en continuo

El tanque que se muestra en la siguiente figura, tiene acoplado una resistencia que proporciona calor para así poder llegar a la temperatura que garantice la fluidez del material de la fosa Acema-100, esta temperatura se mide con un termómetro de mercurio y se mantiene uniforme con ayuda de un agitador. La resistencia cuenta con una aislante para evitar pérdidas de calor y llegar a una temperatura establecida en el tanque. Anterior a esta selección se realizaron pruebas con distintos materiales aislantes.

La resistencia conectada en la parte exterior del tanque proporciona el calor necesario mediante un control de voltaje suministrado para alcanzar la temperatura que garantice la fluidez de la fosa Acema-100, la longitud de la resistencia es de 245 cm.



Figura 19. Tanque de calentamiento con resistencia.

En la celda los electrodos de cobre se encuentran a una distancia de 0.8 cm, para ambos casos (plana y cilíndrica). Estos permiten el paso de corriente para la aplicación del campo eléctrico en los dos tipos de corriente DC y AC, así como la variación del voltaje. Con el cambio de geometría se varía también la dirección del campo, en la plana se presenta un campo uniforme, mientras que para la cilíndrica el campo es radial, no uniforme. Con estos electrodos incorporados en la celda se lleva a cabo el proceso continuo de calentamiento y campo eléctrico.

Finalmente en el sistema se presenta una válvula que controla el flujo de salida y a su vez el tiempo de residencia de la muestra en la celda.

No formando parte de los objetivos específicos de este trabajo de grado pero si es de gran importancia para la obtención de información acerca de las características de las muestra de la fosa Acema-100, se realizaron pruebas que dan base sólida a este estudio. A continuación se presentan los pasos requeridos para la determinación de la densidad, viscosidad y análisis SARA.

Medida de la densidad de la mezcla

Con ayuda de un picnómetro de 25ml se procedió a medir la densidad del material Acema-100, con la masa del picnómetro tanto vacío como lleno con la fosa y aplicando la ecuación descrita a continuación se obtuvo el valor de la densidad aparente de este material. Este procedimiento se realizó tres veces.

$$\rho_m = \frac{mp_{ll} - mp_v}{v_p} \quad \text{Ec. (3)}$$

donde:

ρ_m = densidad de la mezcla. (g/ml)

mp_{ll} = masa del picnómetro lleno. (g)

mp_v = masa del picnómetro vacío. (g)

v_p = volumen del picnómetro (25 ml)

El valor de esta densidad permite el cálculo de la densidad estimada del hidrocarburo mediante la siguiente ecuación:

$$\rho_{Hc} = \frac{\rho_m - (\rho_a * \varphi)}{1 - \varphi} \quad \text{Ec. (4)}$$

Donde:

ρ_{Hc} =densidad estimada del Hidrocarburo (gr/ml)

ρ_a = densidad del agua (se asume que es 1 gr/ml)

φ = cantidad de agua por destilación (adim)

(La cantidad de agua por destilación fue la obtenida por la Prof. María Rodríguez (en ejecución))

Con el valor de la densidad se calculan los grados API con la siguiente ecuación:

$$API = \frac{141,5}{\left(\frac{G_{Ec}}{G_{Ea}}\right)_{60 F}} - 131,5 \quad \text{Ec. (5)}$$

donde:

API= Grados API de la fosa.(adim)

GEc= Gravedad específica del crudo (gr/ml).

GEa= Gravedad específica del agua. (gr/ml) la cual se considero igual a 1 gr/ml.

Medida de la viscosidad Aparente

Para la determinación de la viscosidad, se utilizó un Viscosímetro de Brookfield que se muestra en la siguiente Figura 20(a), donde a condiciones de temperatura, revoluciones y número de spindle (eje) determinado, se midió el valor de la viscosidad.

La muestra de la fosa se coloca en la pieza del viscosímetro denominada Termosel, mostrada en la Figura 20(b), que permite mantener la temperatura en un punto determinado para la medición de la viscosidad. Otro factor que se toma en cuenta para este punto es el número de spindle, este mide el esfuerzo de rotación para vencer la resistencia viscosa por el movimiento producido. La viscosidad es proporcional a la velocidad del spindle y se relaciona a la forma y tamaño (ver Figura 20(c)).

Calculo del análisis SARA

En este punto se requiere separar en fracciones los componentes presentes en el crudo como lo son: Saturados, Aromáticos, Resinas y Asfaltenos. Para ello primero se realizó el desasfaltado de la muestra colocando en un embudo cierta cantidad de Acema-100 y agregando n-heptano, luego se calentó ligeramente a 40°C y se colocó en agitación por 2 horas (con reflujo). Se dejó en reposo hasta el día siguiente para luego ser filtrado y obtener la fracción de los Asfaltenos, quedando los maltenos que permanecen solubles en el solvente precipitante.

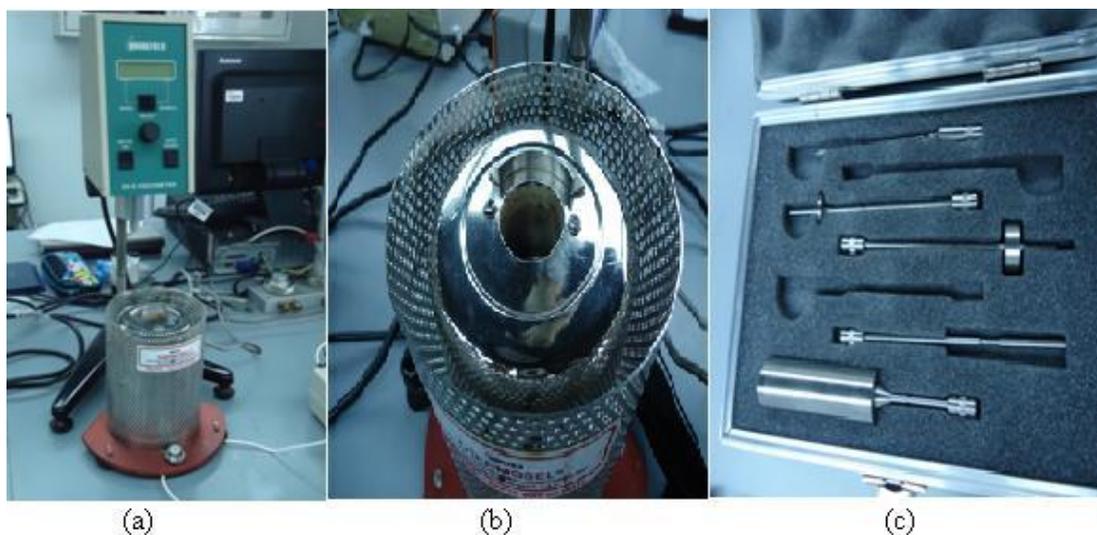


Figura 20. (a) Viscosímetro de Brookfield, (b) Termosel, (c) Tipos de Spindle (IDEA).

De los maltenos se tomaron 25 mg y se diluyeron en 1 ml de Cloroformo para luego con una jeringa medir 1 microlitro y colocarlo en las varillas de alúmina (fase estacionaria).

El juego de varillas son sumergidas en dos cámaras de desarrollo, la primera con n-heptano (fase móvil) por un tiempo de 35min, en esta cámara son arrastrados los saturados. La segunda cámara se sumergió en tolueno (fase móvil) por 15 min, en donde lo aromáticos son arrastrados y quedando las resinas en la parte baja de las varillas. La detección de estas fracciones es posible por Cromatografía TLC la cual permite separar los compuestos mediante los solventes afines que fueron empleados anteriormente. A continuación se muestra en la Figura 21 (a) las varillas de alúmina en donde se separan los saturados, aromáticos y resinas.

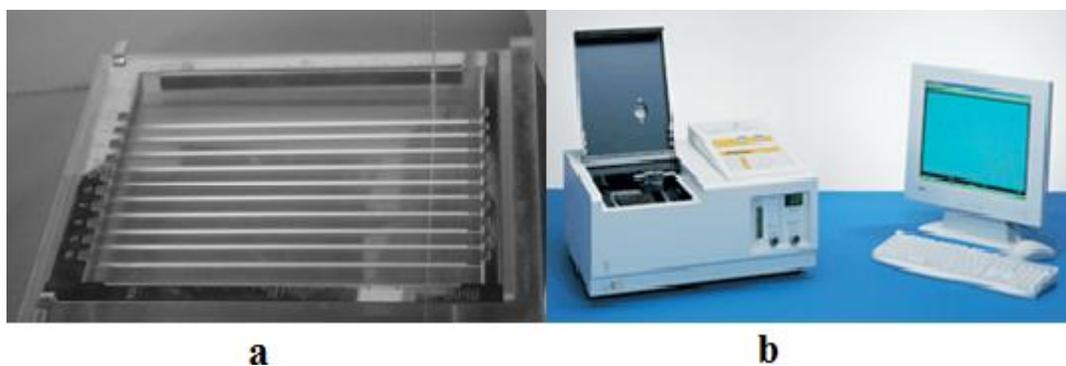


Figura 21. Varillas de Alúmina(a) (fase estacionaria) y Iatroscan MK-6s (b) (IDEA)

Las varillas posteriormente se colocan en un equipo llamado Iatroscan MK-6s (figura 21 (b)), que permite la separación e identificación de una muestra en nanogramos, donde por medio de una llama de Hidrógeno (llama ionizada) va quemando los componentes separados (aromáticos, resinas y saturados) en la varilla y mediante un traductor que está conectado a un computador se forman las gráficas que representan el área de estos componentes

Establecer la temperatura de operación que garantice la fluidez del material de fosa Acema-100.

Para este punto se dispuso primeramente la realización de los siguientes pasos:

La fluidez de la fosa se establece como la condición que facilita su transporte, logra un tiempo establecido de residencia en la celda y sea aproximado a los de las fosas Guara-2 y Merey-31(trabajos que se hacen de manera paralela por Gómez, B. y García A. respectivamente). Para esto se procedió a la realización de un barrido de temperatura de 35 hasta 75°C con el material de fosa Acema-100 en el sistema en continuo, de la siguiente manera:

- a) Se coloco el material de fosa Acema-100 a calentar en el tanque del sistema en continuo hasta llegar a la temperatura deseada.
- b) Con la válvula V-1 completamente abierta el hidrocarburo recorre todo el sistema hasta llegar al punto final, la salida de la válvula V-2.
- c) Con un beacker de 50 ml y un cronómetro se midió el tiempo que tardaba el material en llenar 10 ml, haciendo repeticiones (3 veces) para minimizar errores.
- d) Con este tiempo de recolección se calculaba el tiempo de residencia de la fosa en la celda.
- e) Una vez realizado esto para cada temperatura se obtuvo una gráfica de Tiempo de residencia de la celda vs. Temperatura en la celda.

De igual manera los trabajos realizados paralelamente con Guara-2 y Merey-31 lograron estas gráficas y se comparan para que las fosas trabajen a una viscosidad

muy similar y se garantizara la fluidez de la fosa Acema-100. El cálculo para el tiempo de residencia en la celda se llevo a cabo con las siguientes ecuaciones:

$$Q = \frac{V_r}{t_r} \quad \text{Ec. (6)}$$

donde:

Q= caudal de la muestra (ml/seg.)

V_r = volumen recolectado en el beacker (10 ml)

t_r = tiempo de recolección (seg.)

Con este valor de caudal se obtiene el tiempo de residencia en la celda, mediante el siguiente cálculo:

$$t_{rc} = \frac{V_{celda}}{Q} \quad \text{Ec. (7)}$$

donde:

t_{rc} = tiempo de residencia en la celda (seg.)

V_{celda} = volumen de la celda (4cm^3)

Una vez realizado el barrido con todas las temperaturas se realizan las gráficas mencionadas anteriormente de Tiempo de residencia en la celda vs. Temperatura en el tanque. El punto en común de fluidez es cuando se obtiene un tiempo de residencia similar para las fosas Acema-100, Guara-2 y Merey-31, estableciéndose la temperatura como la de operación.

Identificar las condiciones de operación más apropiadas para la fosa Acema-100 relacionadas con la geometría de la celda, el tiempo de residencia, voltaje y tipo de corriente mediante el método estadístico “Diseño Factorial 2ⁿ”.

Una vez obtenido la temperatura de operación tanto en el tanque como en la celda, se procede a incorporar las variables como la geometría de la celda, tiempo de residencia, el voltaje y tipo de corriente.

El diseño factorial 2ⁿ desarrollado para estas pruebas permite obtener mediante una combinación de variables, la más adecuada para la desestabilización. Estas pruebas son al azar y se evalúan en dos niveles, alto y bajo para cada variable. Los casos estudiados se pueden ver en la siguiente tabla:

Tabla 1: Variables a considerar y sus niveles para el Diseño Factorial.

Variable	Nivel
Geometría	Plana
	Cilíndrica
Tiempo de residencia	Tiempo mayor
	Tiempo menor
Tipo de corriente	Corriente Directa
	Corriente Alterna
Voltaje	Voltaje Alto
	Voltaje Bajo

Las geometrías de las celdas con las que se conto para la realización de pruebas en continuo son: Celda de electrodos de placas Planas (1cm*0,8cm*5cm) cuyo material es de acrílico y otra Celda de electrodos de cilindros concéntricos de tubos de cobre, en donde el cilindro exterior posee un diámetro interno de 1,12 cm y el cilindro interno su diámetro es de 0,32 cm. Se presentan en la figura 22 las celdas utilizadas.

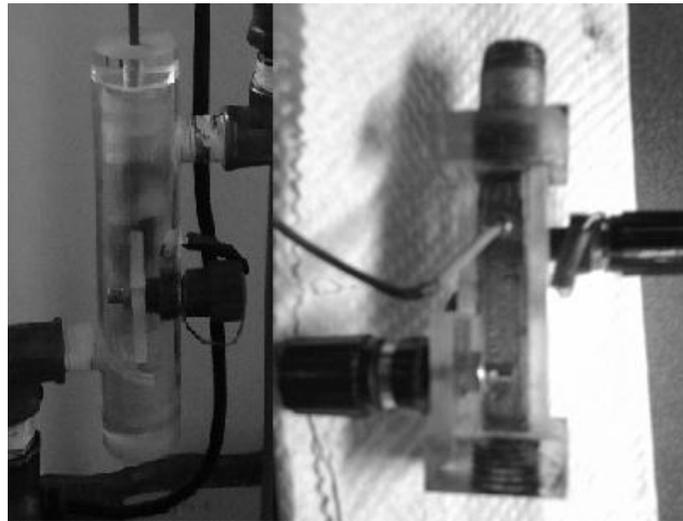


Figura 22.-Celda de electrodos de cilindros concéntricos (Izquierda.) y de placas planas (Derecha).

Para el tiempo de residencia en la celda se reemplazó la válvula V-2 por las piezas mostradas en la Figura 23, cada una con un orificio que determina un tiempo de residencia alto y bajo según la apertura. Para la apertura mayor el orificio es 3,4 mm y de 2,1mm para la menor.



Figura 23. Piezas que representan las aperturas de la Válvula V-2. (LSM)

Se realizaron pruebas con los modelos de celda (plana y cilíndrica), junto a todo el sistema en continuo de calentamiento y campo eléctrico. En donde se observaron cual es la influencia de las variables consideradas en la desestabilización de la emulsión. Los niveles para el campo eléctrico fueron dados para un voltaje bajo de 300V y un voltaje alto de 600V, para los dos tipos de corriente DC y AC. El valor de voltaje alto fue escogido porque es lo que para cada una de las celdas se lograba alcanzar en el sistema eléctrico mostrado mas adelante.

Cuantificar el grado de separación en el sistema continuo empleando técnicas de microscopía óptica y separación de fases.

Una vez que la muestra cae en el tubo cónico de centrifugación (zanahoria), luego de aplicado el campo eléctrico y antes de aplicar centrifugación, se tomó muestra para el análisis a través de microscopía óptica. Para esto se contó con el software Image Pro Plus, el cual permitió identificar el cambio en el tamaño de gotas al aplicarse el campo eléctrico, (se tomó como tamaño de gota referencial 40 micrones, en base al tamaño promedio que se observó en la muestra original). Luego de esto se procedió a la centrifugación por un tiempo de 10 minutos a 2600 rpm., y una vez finalizado este proceso se tomó directamente la muestra de la zanahoria y nuevamente se aplicó microscopía óptica.

En cada prueba se recolectaron 4 zanahorias con 5ml de muestra cada una. Al aplicarles microscopía a estas muestras, se tomaron fotos a una porción de las mismas colocada en un portaobjetos. Las zonas consideradas de la muestra, se especifican a

continuación en la Figura 24. A estas imágenes se les realizó el conteo de gotas mediante los lineamientos de la Pasantía de Investigación realizada por Fung, E. (2011).

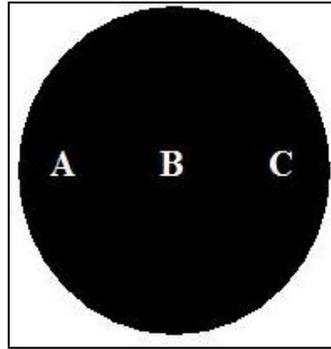


Figura 24.-Zonas para la toma de imágenes en la muestra de crudo.

En donde se obtienen varios factores que permiten cuantificar el cambio presentado por el tamaño de las gotas de agua, uno de ellos es el Factor de Desestabilización (FD), este término es la relación entre la cantidad de agua que hay después de aplicar campo y centrifugación con respecto a la cantidad que contiene la muestra original. Dependiendo del valor que este parámetro arroje se tienen los siguientes criterios (Fung, ,2011):

$$FD \in [0, \infty) \left\{ \begin{array}{ll} < 1 & \text{Disminuye la cantidad de agua en gotas grandes} \\ 1 & \text{No hay cambio} \\ > 1 & \text{Aumenta la cantidad de agua en gotas grandes} \end{array} \right.$$

Para los casos donde se evidenció la separación de fases, se realizó la contabilización del volumen de agua en la zanahoria, calculando el porcentaje de agua separada mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{Agua Separada} = \frac{V_{as}}{V_{Ho}} * 100 \quad \text{Ec. (8)}$$

donde:

V_{as} = Volumen de agua separada (ml)

V_{Ho} = Volumen inicial del hidrocarburo (ml)

En la Figura 25 se muestra el esquema del procedimiento para calcular la distribución del tamaño de gotas.

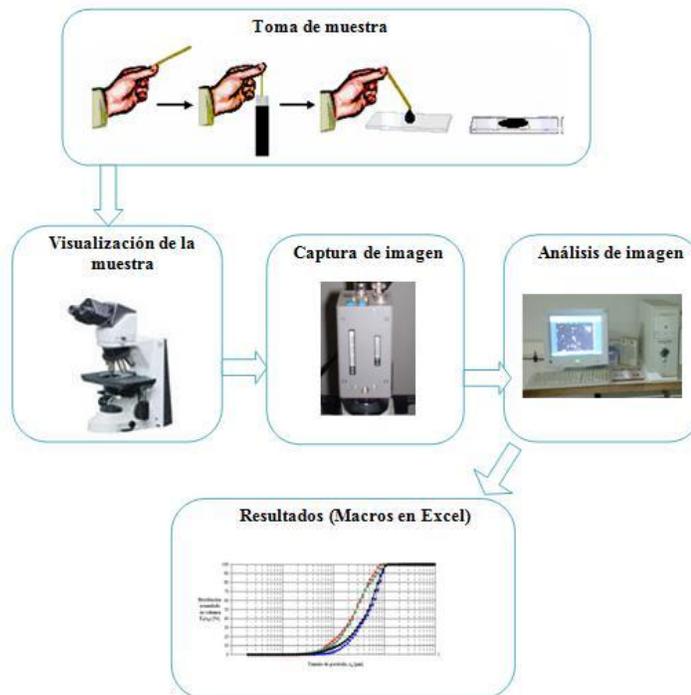


Figura 25.-Esquema del procedimiento para calcular la distribución de tamaño de gotas. (Fung, 2011)

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

En el siguiente capítulo se presentan los valores obtenidos en las experiencias realizadas, con el fin de cumplir los objetivos planteados anteriormente.

DISEÑO DEL SISTEMA EN CONTINUO QUE PERMITA LA APLICACIÓN DE CAMPO ELECTRICO Y CALENTAMIENTO.

El diseño final del sistema se obtuvo luego de una serie de modificaciones según las características de la fosa. Luego de varias pruebas para poder lograr las condiciones requeridas de temperatura, probando una serie de aislantes como lo fueron: guata, mecatillo, algodón y fibra de vidrio. La que presentó menos pérdidas de calor se utilizó para cubrir el tanque de calentamiento y la resistencia fue el aislante de Fibra de Vidrio, para así evitar pérdidas de calor hacia el ambiente y que la fosa llegara a la celda a la temperatura establecida garantizando su fluidez. En la figura 26 se observa el tanque con el recubrimiento de fibra de vidrio.



Figura 26.- Tanque de calentamiento con aislamiento de fibra de vidrio.

Otro cambio necesario en el sistema fue en la válvula final del sistema V-2, para ello se diseñaron piezas removibles de acrílico en forma cilíndrica de manera que representaran las aperturas de la válvula: completamente abierta (3,4mm) y una apertura mínima (2,1mm), con el fin de regular el tiempo de residencia en la celda.

Este cambio se realizó para minimizar los errores sistemáticos al momento de manipular la válvula y regular el flujo de salida. Los orificios son similares a los que formaba al estar abierta completamente y en una cierta apertura, se logró medir este diámetro y reproducirlo para las piezas removibles. Estas piezas se pueden observar en la Figura 23, descrita anteriormente en el Capítulo V, Metodología Experimental.

Para la medición de la temperatura en la celda se le acoplaron a ambas, una termocupla tipo K, que va conectada a un multímetro el cual permitió una mayor precisión para el valor de la temperatura y así garantizar llegar a la temperatura adecuada para las experiencias.

Los resultados presentados a continuación formaron parte del estudio de este trabajo con el fin de complementar los conocimientos y la información acerca del material de fosa de producción Acema-100, logrando obtener valores de densidad, viscosidad y un análisis SARA.

De forma paralela se obtuvo la cantidad de agua por destilación de las fosas de producción (Acema-100, Guara-2 y Merey-31), mediante pruebas realizadas por María Rodríguez. Obteniéndose para Acema-100 un 37% de agua.

Medida de la Densidad de la mezcla

Para la medición de la densidad se aplicó la Ecuación (3), los datos introducidos en ella se muestran en la siguiente tabla, estas mediciones se repitieron 3 veces para minimizar los errores asociados a la medición. El volumen del picnómetro fue de 25,17 ml.

Tabla 2.-Densidad de la mezcla y Densidad Estimada del Hidrocarburo.

Nº de Medición	Masa del Picnómetro vacío (g)	Masa del picnómetro lleno (g)	Densidad de la mezcla (g/ml)	Densidad estimada del Hidrocarburo (gr/ml)
1	23,35	47,65	0,965	0,944
2	23,37	46,72	0,927	0,884
3	23,36	47,70	0,967	0,948
		Promedio	0,953	0,925

Con estos valores de densidad se obtuvo un valor promedio de 0,953 g/ml para la mezcla. Según UNITAR un crudo pesado se encuentra en el rango de densidad 0,950-

0,975 g/ml(GPA, Estudios y servicios petroleros), por lo que la fosa Acema-100 por encontrarse su densidad dentro de este rango puede considerarse como un hidrocarburo con densidad aparente cercana a la de un crudo pesado. El valor promedio para el hidrocarburo se calculó a partir de la densidad de la mezcla siendo de 0,925 el resultado para la densidad estimada del crudo. Una vez obtenido este valor de densidad y usando la ecuación (5) el valor de los grados API fue de 21,5 y según la clasificación de los crudos: Condensados (mayor a 43 API), Livianos (30-42,9 API), Medianos (23-29,9 API), Pesados (10-22,9 API) y Extrapesados (menores a 10 API), la fosa de producción también puede ser comparada con los grados API de un crudo pesado.

Determinación de la Viscosidad Aparente

La viscosidad se determinó empleando el viscosímetro de Brookfield (IDEA), el cual alcanza rangos de viscosidad para fluidos muy viscosos. Los valores obtenidos se reportan en la tabla siguiente.

Tabla 3.-Medición de la Viscosidad a varios puntos de temperatura.

Temperatura (°C)	Viscosidad Aparente (cP)	%Torque	N° Spindle	Velocidad (rpm)
32,9	6020	30,1	64	30
35,0	5200	26,0	64	30
40,0	3840	19,2	64	30
45,0	2960	14,7	64	30
50,0	2140	10,7	64	30

Con un barrido de temperatura se obtuvo un valor de viscosidad, manteniendo fijo el N° de Spindle y la velocidad, a un % de torque dado. En la tabla anterior, se puede observar que a medida que la temperatura va aumentando la viscosidad disminuye. La viscosidad es una variable de gran influencia en la velocidad de sedimentación según la ley de Stokes, por lo que es necesario el reducir su valor. A continuación se evidencia el comportamiento de la viscosidad para el barrido de temperatura realizado, donde para un delta de temperatura de 5°C, la viscosidad varía en promedio alrededor de 1000 cP. Junto a la tendencia de las otras fosas de los trabajos paralelos

(García y Gómez) que de igual manera su viscosidad disminuye, pero a temperaturas mucho mayores.

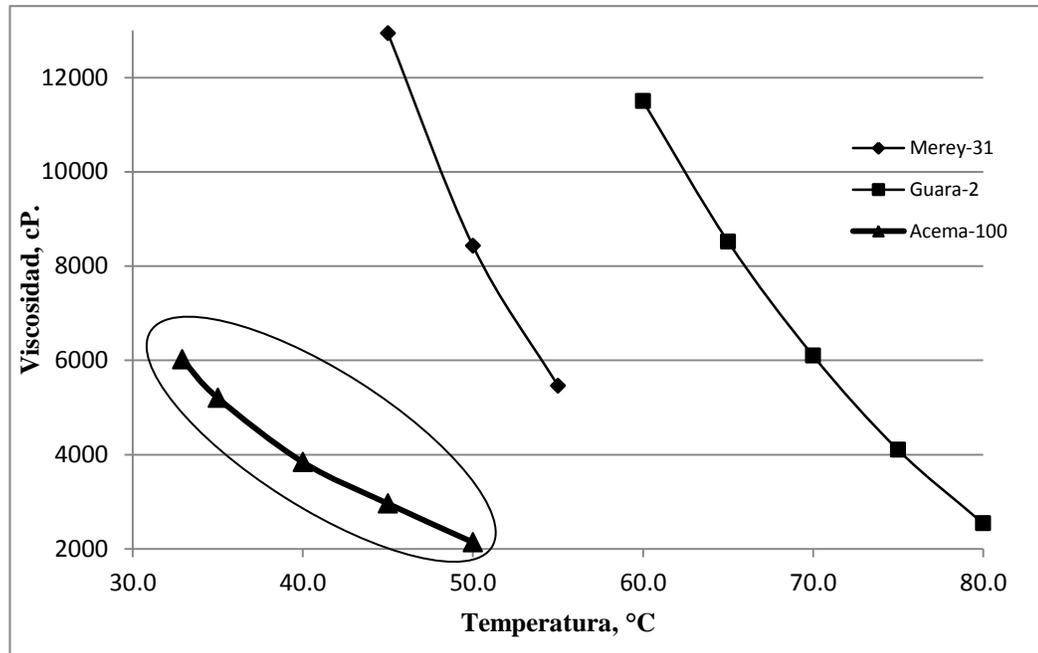


Figura 27.-Gráfico de la Viscosidad Aparente en función de la Temperatura.

El comportamiento que presenta la fosa Acema-100 en cuanto a la viscosidad aparente es muy similar a un crudo asfáltico ya que muestra un cambio permanente en la viscosidad con reducción en 50% cada 10°C. (Nota Técnica 75, GPA)

ANÁLISIS SARA

Las pruebas realizadas para lograr el fraccionamiento de la fosa de producción Acema-100 realizadas en el IDEA, proporcionaron la composición de los componentes pesados de la fosa en base a la diferencia de solubilidad, polaridad y peso molecular. Anteriormente se estableció que los asfaltenos y las resinas son componentes del hidrocarburo, que debido a su actividad interfacial y estructura, se acumulan en la interfase agua-aceite e influyen los procesos de estabilización y ruptura de las emulsiones (McLean y Kilpatrick, 1997).

En la siguiente figura se presentan los valores obtenidos en el análisis SARA, observándose que la fracción en conjunto de los asfaltenos y resinas alcanzan un 36,13%, estando los asfaltenos en menor proporción (6,91%) en relación al resto de las fracciones.

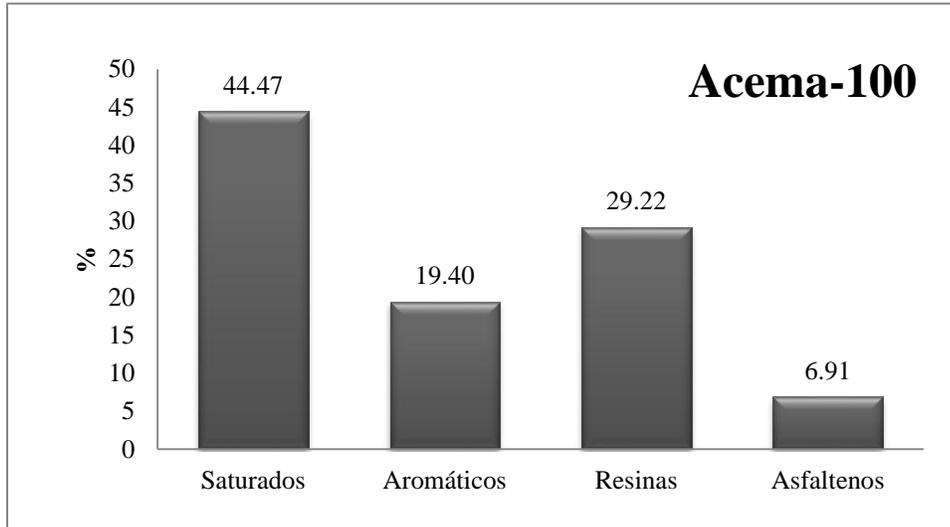


Figura 28.- Análisis SARA para la fosa Acema-100.

La fosa Acema-100, contiene un elevado porcentaje de saturados (44,47%), lo cual le puede conferir parte de características relativas a su viscosidad no tan elevada (en comparación con las otras fosas en estudio García y Gómez).

Con los valores de SARA reportados para este hidrocarburo, se tiene que según su porcentaje en asfaltenos, presenta una similitud al crudo Bachaquero ya que este tiene una gravedad API de 11,8 y su porcentaje de asfaltenos es de 7,1.

TEMPERATURA DE OPERACIÓN

La temperatura óptima de operación logra garantizar la fluidez de la fosa Acema-100 por el sistema, que permite tener un tiempo de residencia en la celda alrededor de 30seg. A continuación se muestra en la siguiente tabla los valores obtenidos de tiempo de residencia en la celda para cada temperatura.

Tabla 4.- Tiempo de residencia en la celda para cada temperatura

Temperatura en el tanque (°C)	Temperatura celda (°C)	Temperatura salida (°C)	Volumen recolectado (ml)	Tiempo de recolección (seg)	Caudal (ml/seg)	Tiempo de residencia en la celda (seg)
40	26	33,7	10	89	0,1124	35,6
44	28	35,3	10	73	0,1370	29,2
50	31	38,2	10	57	0,1754	22,8
55	32	39,1	10	52,5	0,1905	21

Con los datos de la tabla anterior se realizó la gráfica que se muestra en la Figura 29, al igual que para las fosas de estudios paralelos (García y Gómez) y así poder visualizar que la temperatura de operación para la fosa en estudio que estandariza las condiciones de fluidez y permite tener un tiempo de residencia en la celda en el orden de 30seg, con un rango mínimo de diferencia con las fosas Guara-2 y Merey-31, es una temperatura en la celda alrededor de 35°C.

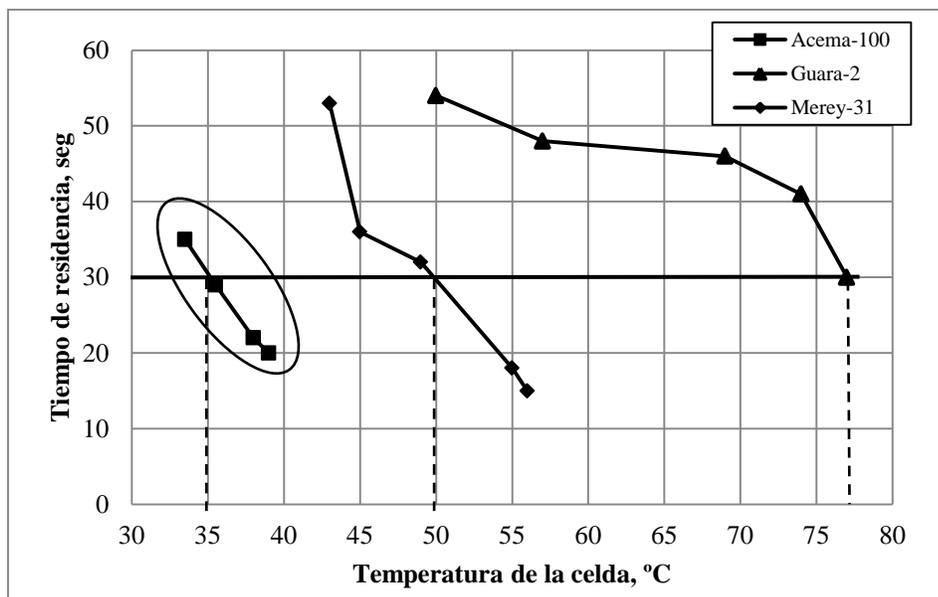


Figura 29.- Tiempo de residencia en la celda para las fosas Acema-100, Guara-2 y Merey-31 en función de la temperatura.

Adicionalmente, se puede observar en la Figura 29, que la fosa Acema-100, puede trabajar a una temperatura mucho menor y es menos sensible a cambios de temperatura que las otras fosas en estudio.

CONDICIONES DE OPERACIÓN MAS APROPIADAS DADAS POR EL DISEÑO FACTORIAL 2ⁿ

Para un conjunto de 16 combinaciones de las variables: geometría de la celda, voltaje, tipo de corriente y tiempo de residencia en la celda, orientadas a estudiar el efecto en la desestabilización de la emulsión empleando campo eléctrico, se logró obtener mediante el método de Diseño Factorial 2ⁿ las combinaciones más influyentes en este proceso. En la tabla 5, se presentan las combinaciones consideradas para las pruebas realizadas. A su vez estos datos fueron utilizados para la realización de los gráficos en donde se resalta cada variable con respecto al Factor de desestabilización (FD):

Tabla 5.- Factor de Desestabilización (FD)

Prueba	A	B	C	D	FACTOR DE DESESTABILIZACIÓN (FD)				
	Tipo de celda	Voltaje	Tipo de corriente	Tiempo de residencia	Replica 1	Replica 2	Replica 3	Promedio	Coefficiente de variación
1	Plana	Bajo	DC	Bajo	1,14	1,17	0,85	1,05	16,78
2	Cilíndrica	Bajo	DC	Bajo	0,69	0,54	1,11	0,78	37,88
3	Plana	Alto	DC	Bajo	3,97	3,89	6,49	4,78	30,91
4	Plana	Bajo	AC	Bajo	1,52	0,97	0,28	0,92	67,29
5	Plana	Bajo	DC	Alto	1,43	2,22	1,08	1,58	37,04
6	Cilíndrica	Alto	DC	Bajo	2,08	1,38	1,63	1,70	20,91
7	Cilíndrica	Bajo	AC	Bajo	0,57	1,62	0,03	0,74	109,26
8	Cilíndrica	Bajo	DC	Alto	1,06	1,35	0,54	0,98	41,74
9	Plana	Alto	AC	Bajo	4,54	5,71	2,62	4,29	36,37
10	Plana	Alto	DC	Alto	1,55	1,22	1,06	1,28	19,57
11	Plana	Bajo	AC	Alto	3,55	1,45	1,31	2,10	59,66
12	Cilíndrica	Alto	AC	Bajo	0	0,25	0	0,08	173,21
13	Cilíndrica	Alto	DC	Alto	2,94	2,48	0,95	2,12	49,07
14	Cilíndrica	Bajo	AC	Alto	0,43	1,2	1,32	0,98	49,11
15	Plana	Alto	AC	Alto	1,85	1,72	2,32	1,96	16,08
16	Cilíndrica	Alto	AC	Alto	1,23	1,72	3,2	2,05	50,03

En la tabla anterior se observan los valores para el Factor de Desestabilización en cada una de las replicas; es importante destacar que por cada experimento se tomaron 4 muestras o zanahorias, la primera fue descartada para minimizar errores y así poder garantizar que al material recolectado se le había aplicado campo eléctrico. El análisis se realizara solo a los efectos principales y las interacciones de dos factores, ya que los efectos de orden superior o interaccione de tres factores presentan un grado de error experimental asociado, como se observa en la tabla 5 para el coeficiente de variación los valores resaltados, este coeficiente es calculado en base a la desviación estándar relacionado con el promedio.

A continuación se presenta la tabla en la que se muestran los resultados referentes al factor de Fisher y la confiabilidad para cada uno de los efectos estudiados, al igual que los efectos principales y las interacciones presentes en las experiencias realizadas. Resaltando los efectos y las interacciones que dieron mas porcentaje de confiabilidad, según este método estadístico.

Tabla 6.-Estudio estadístico para los efectos del Diseño Factorial 2ⁿ

Origen de variación	Grado de libertad	suma de cuadrados	cuadrado medio	F	Confiabilidad
Replicas	2	1	1	0,48	36,91
Efecto principal					
A	2	18	18	13,37	99,95
B	2	0	0	0,00	0,31
C	2	2	2	1,39	72,03
D	2	1	1	0,75	51,14
Interacción de dos factores					
AB	2	0	0	0,21	18,92
AC	2	13	13	9,89	99,82
AD	2	1	1	0,74	50,56
BC	2	0	0	0,18	16,12
BD	2	4	4	3,17	92,87
CD	2	1	1	0,50	38,49
Interacción de tres factores					
ABC	2	3	3	2,14	84,78
ABD	2	6	6	4,45	96,95
ACD	2	0	0	0,04	3,60
BCD	2	18	18	12,98	99,95
Interacción de cuatro factores					
ABCD	2	2	2	1,66	77,74
Error	15	20	1		
Total	49	91			

Seguidamente se presentan los gráficos obtenidos de la tabla 5, con el fin de analizar cada efecto por separado el principal y los de interacción de dos factores, relacionado al voltaje aplicado en sus dos niveles (bajo y alto).

Para cada gráfico se consideraron los promedios de las réplicas realizadas en cada prueba, y se representan junto a la desviación estándar en cada punto para un voltaje bajo y alto. También se señala la tendencia lineal que tienen los puntos para cada condición.

Geometría de la celda.

En la figura 30 se indica el efecto de la geometría de la celda en el factor de desestabilización a los dos voltajes aplicados para todas las replicas hechas, y se representa un promedio de estos valores para indicar la tendencia del cambio de un voltaje bajo a uno mayor. Se tiene que a un voltaje menor de 300V el cambio no es tan significativo al cambiar de geometría de celda debido a que el crecimiento de las gotas reflejado en el factor de desestabilización no es significativo, sin embargo para un voltaje de 600V es más efectivo el uso de la celda plana que la cilíndrica aumentado notablemente el tamaño de gotas en la muestra. Esto indica que el campo eléctrico uniforme presente en las celdas planas tiene mayor efecto en el crecimiento de las gotas. Es atribuible este comportamiento a la presencia de las fuerzas electroforéticas, ya que cuando el voltaje es mayor, ayuda a que la tensión interfacial de las gotas aumente y se genere un gradiente de tensión, favoreciendo la desestabilización y posterior coalescencia de las mismas.

Este resultado para 95% tiene un valor de Fisher de $F= 3,68$ (para un nivel de significancia de 0,05), por lo que para un nivel de confiabilidad de 99,95% $F=13,37$, haciendo que este efecto sea significativo a este nivel de confiabilidad.

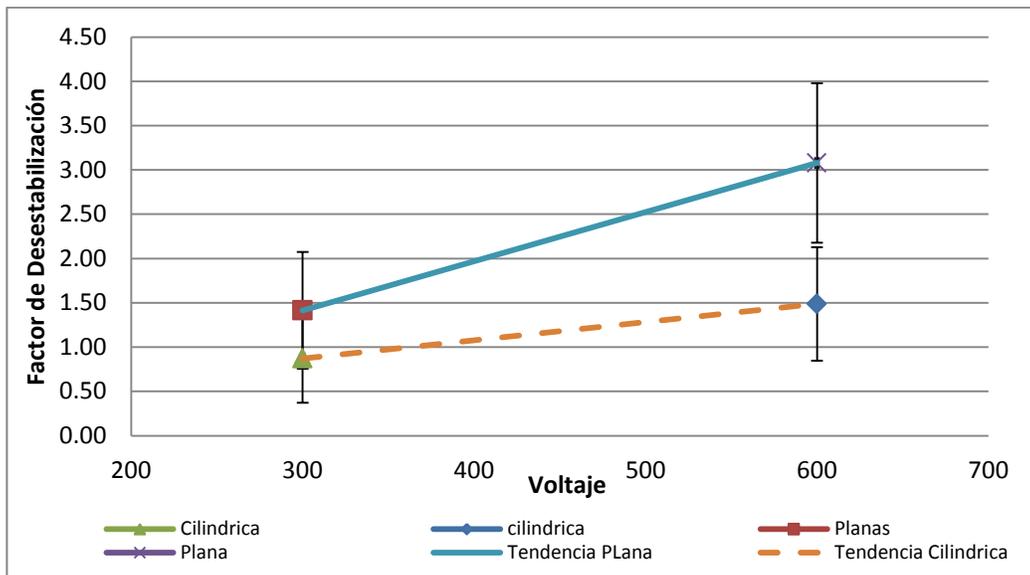


Figura 30.- Influencia del tipo de celda en el factor de desestabilización FD, a diferentes voltajes.

Una vez sabido que la geometría de la celda es un factor importante en las variables estudiadas en función el voltaje aplicado, siendo el efecto principal para el diseño factorial. Se realizó un grafico de cada geometría de la celda en función de las demás variables como el tipo de corriente, tiempo de residencia en la celda

Tipo de corriente

Otra de las variables que también afectan al factor de desestabilización, es el tipo de corriente aplicado. Primero se analizara esta variable con respecto a las celdas planas, como se muestra en la siguiente figura:

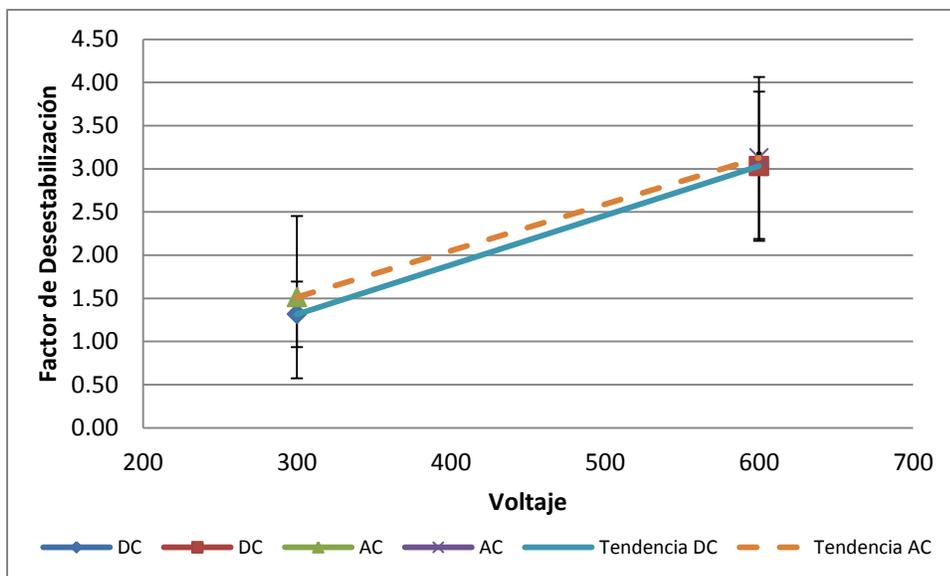


Figura 31.- Influencia del tipo de corriente en el factor de desestabilización FD, a diferentes voltajes para las celdas planas.

En los dos niveles de tipo de corriente considerados en este estudio DC y AC, se tiene que para un voltaje bajo (300V) el efecto de aplicar cualquiera de los tipos de corriente es insignificante en el cambio del tamaño de gotas. Igualmente se observa para un voltaje alto (600V) el cambio es mínimo en los dos tipos de corriente, presentan una tendencia de comportamiento similar, en donde una aplicación de voltaje alto afecta de manera positiva en el crecimiento de las gotas, ya que aumenta el factor de desestabilización. No existe ningún tipo de interacción para las celdas planas con respecto al tipo de corriente.

Para una geometría cilíndrica en la celda el efecto del tipo de corriente aplicado se puede observar en la figura 31, en donde el incremento del FD se da para el voltaje alto cuando se aplica DC. Pero para una variación del potencial eléctrico aplicado para la corriente AC no se incrementa el factor con el aumento del voltaje, permaneciendo relativamente constante.

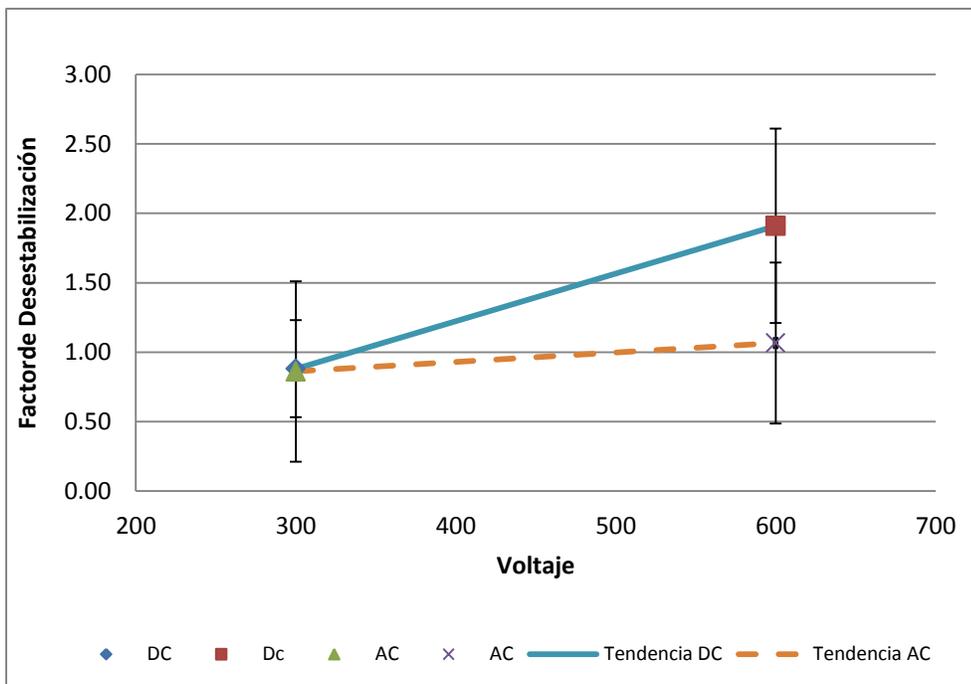


Figura 32.-Influencia del tipo de corriente en el factor de desestabilización con respecto al voltaje aplicado para las celdas cilíndricas.

Teóricamente, en el campo DC las gotas migran en un patrón continuo, a una velocidad determinada por la viscosidad de la fase continua. A medida que la gota entra en un alto gradiente DC entre los electrodos, este le induce una carga a la superficie de la gota, que es igual a la del electrodo más cercano, por lo que ambos se repelen y la gota ahora es atraída hacia el electrodo de carga contraria. Cuando esto ocurre la carga superficial de la gota se altera por el gran potencial del que ahora es el electrodo más cercano, siendo repelida y atraída por el electrodo de carga contraria. Esta migración ordenada de los electrodos con un alto potencial de corriente hace que las gotas aumenten su tamaño desestabilizando la emulsión. (FIRP, 2004).

Tiempo de residencia en la celda

El tiempo de residencia en la celda es una variable importante en el estudio del efecto del crecimiento del tamaño de las gotas de agua, por lo que en las siguientes figuras se representan las interacciones del tiempo de residencia para los voltajes alto y bajo según la geometría de las celdas.

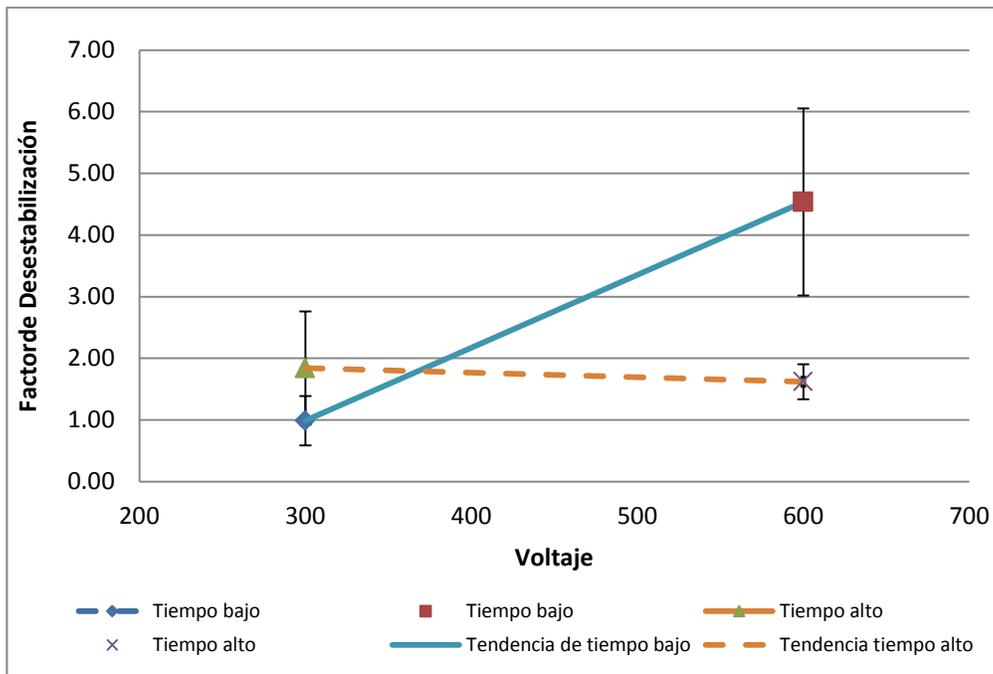


Figura 33.-Influencia del tiempo de residencia en la celda para cada voltaje aplicado en las celdas planas.

Se puede observar que para el método de diseño factorial existe interacción significativa entre los factores asociados al tiempo de residencia, debido a que las líneas se cruzan. Para un voltaje bajo (300V) se obtiene una mayor desestabilización a tiempos de residencia alto; mientras que a voltajes altos, el resultado obtenido es que a menor tiempo de residencia mayor es la desestabilización, siendo este último caso el que mejor efecto que existe. Lo anterior indica que las gotas se desestabilizan a un nivel alto de voltaje pero cuando la fosa pasa más lentamente por el campo eléctrico, permitiendo así que se formen las cadenas de gotas para luego dar paso a la coalescencia. Con un tiempo mayor de la fosa en la celda el campo eléctrico formado por el voltaje de 600V crea mayor posibilidad para que se den los efectos de coalescencia como la electroforesis, coalescencia dipolo-dipolo.

En cuanto a las celdas cilíndricas no hay interacción entre la geometría de la celda y el tiempo de residencia ya que las curvas no se cruzan entre sí, como se observa en la figura 34.

Sin embargo cuando se aplica voltaje y hay un mayor tiempo de residencia en la celda el tamaño de gota aumenta con el voltaje, de manera mas significativa con respecto al

tiempo bajo. Las interacciones de coalescencia en el campo no uniforme como la dielectroforesis actúan sobre las gotas de agua aumentando su tamaño, y como el hidrocarburo pasa un tiempo medianamente largo en la celda las líneas del campo interactúan con las gotas, afectando los agentes como la tensión interfacial de las gotas, disminuyéndola lo que favorece la formación de gotas de mayor tamaño.

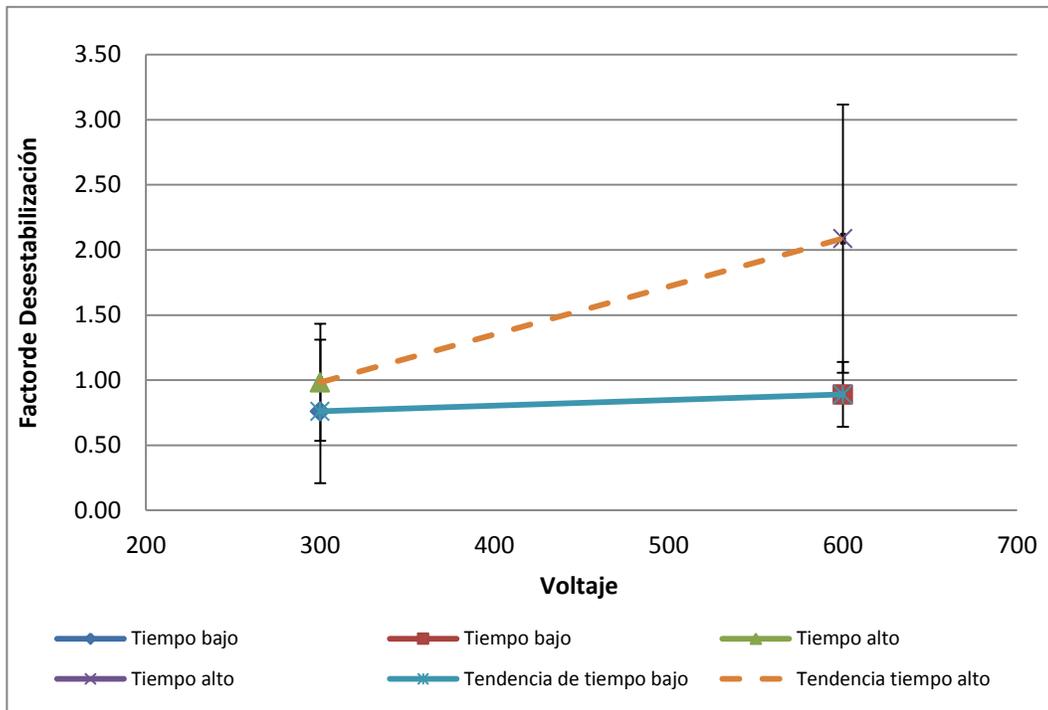


Figura 34.- Influencia del tiempo de residencia en el factor de desestabilización FD, a diferentes voltajes.

GRADO DE SEPARACIÓN MEDIANTE MICROSCOPIA ÓPTICA Y SEPARACIÓN DE FASES

Con el uso del programa Image Pro Plus y de la mano con la microscopía óptica se llevó a cabo el análisis del crecimiento de tamaño de las gotas de agua en las muestras estudiadas. Se llevaron a cabo 16 pruebas que engloban todas las combinaciones con las variables a sus dos niveles, mediante la toma de imágenes y con ayuda de la macro plantilla realizada en la Pasantía de Investigación (Fung, 2011) se obtuvieron valores de la distribución acumulada del tamaño de gotas, cantidad de agua en la muestra en gotas mayores al valor establecido, junto a otros parámetros.

En la Figura 35, muestra el resultado de la Macro plantilla de Excel, para cada prueba se llevó a cabo este procedimiento y así poder calcular el factor de desestabilización que es el principal indicador de un cambio en el tamaño de las partículas.

Para adquirir los valores de Factor de desestabilización se hace una relación entre la cantidad de agua después de aplicar el campo con la que tiene la muestra originalmente, considerando los parámetros mencionados anteriormente.

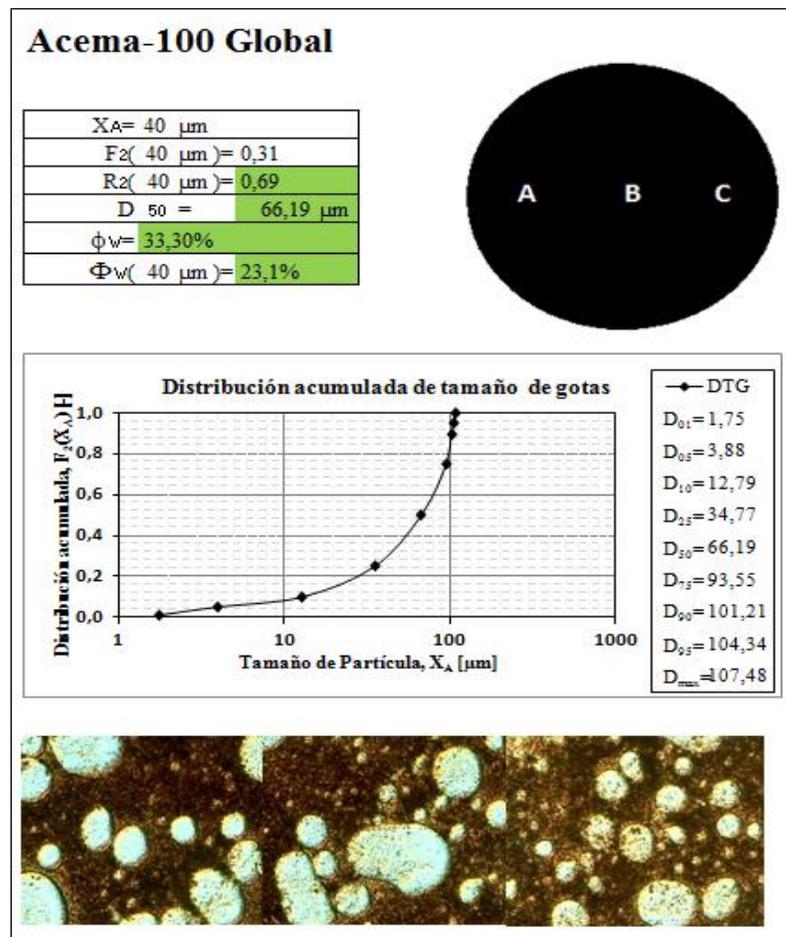


Figura 35.- Análisis de Imágenes con Macro Plantilla

En base a los valores de Factor de desestabilización se realizó una comparación de las combinaciones más resaltantes con respecto a la muestra original, tanto las pruebas que favorecían en el crecimiento de tamaño de gotas, como aquellas combinaciones

que no afectan de manera significativa el cambio en las gotas. En la figura 36 que se muestra a continuación se presentan las curvas para las combinaciones reflejadas en la tabla 5 comparadas con la fosa Acema-100 sin ningún efecto aplicado, es decir, la muestra original.

Para una distribución acumulada de tamaño de gotas, se observa que para la combinación 3, el promedio del factor de desestabilización es de 4,78 lo que indica crecimiento de gotas de agua significativamente mayor con respecto a las demás curvas. Una geometría plana, voltaje alto, corriente DC y tiempo de residencia en la celda menor logró aumentar el tamaño de las partículas. Lo que indica que cuando una emulsión es sometida a altos campos eléctricos DC se encuentran con dos tipos de comportamientos en la desestabilización de la emulsión: el tipo I relacionado con la formación de cadenas de gotas formando puentes entre electrodos, que ocasiona un incremento sustancial de la conductividad de la emulsión; y el tipo II que indica la ausencia de formación de cadenas por la rápida coalescencia de gotas, atribuido a las mejoras en la movilidad de la película interfacial por la presencia de un surfactante añadido a la emulsión el cual actúa como desemulsificante (Taylor, 1988), por lo que se da la electrocoalescencia para esta combinación de variables.

La combinación 9 también presenta un promedio de factor de desestabilización de 4,29, resaltando que difiere de la combinación anterior solo en el tipo de corriente, pudiendo inferirse que en para un campo eléctrico uniforme la corriente DC es más eficiente que la AC.

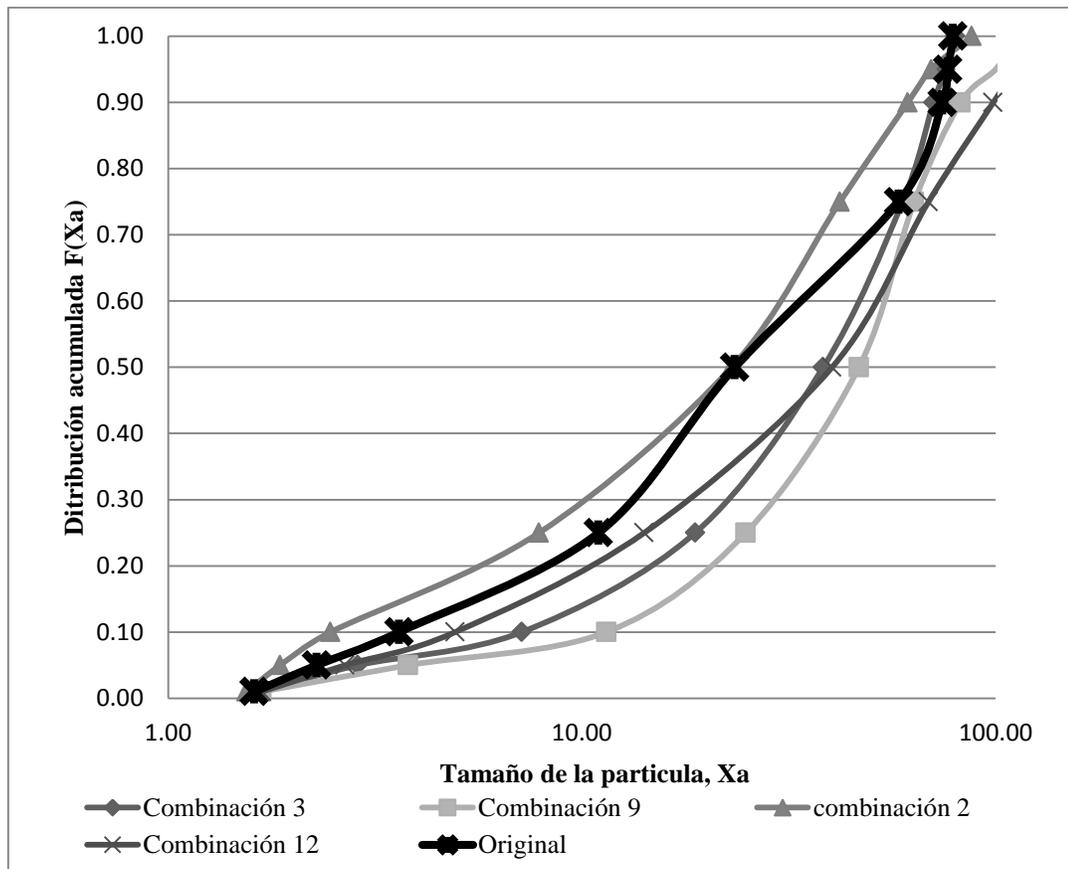


Figura 36.- Distribución Acumulada de Tamaño de Gotas.

Otras de las combinaciones que resalta en promedio por el FD es la combinación 2, que como se observa en la figura anterior no hay crecimiento significativo de las gotas presentes en la emulsión referente a la curva de la muestra original. Siendo su valor promedio para el FD de 0,78, menor a la unidad y según los parámetros de este factor para este valor disminuye la cantidad de agua en gotas grandes. Esta combinación no favorece en el tratamiento de la fosa Acema-100, ya que la emulsión con gotas más pequeñas se tiende a estabilizar.

Separación de fases

En la realización de los experimentos para cada combinación de variables, aparte del aumento en el tamaño de gotas observado a nivel microscópico, también se obtuvo separación de fase como la que se presenta en la figura 37, en donde se logró calcular el porcentaje de agua separada por medio de la ecuación 7.



Figura 37.- Separación de fases luego de centrifugar.

Las combinaciones que presentaron separación significativa de agua con la aplicación de campo eléctrico y centrifugación fueron son los mostrados en la tabla 6:

Tabla 7.-Grado de separación de agua

Condición experimental	Celda	Voltaje	Tipo de corriente	Tiempo de residencia	% de Agua separada	% de Agua recuperada
1	Plana	Alto	DC	Bajo	9,60	25,95
2	Plana	Alto	AC	Alto	4,54	11,95

En donde se observa que solo con la geometría de celda plana y voltaje alto para ambos casos se logró un crecimiento de gotas considerable de forma tal que con centrifugación estas lograran sedimentar y así poder cuantificar una cierta cantidad de agua separada. Con este valor se obtuvo el porcentaje de agua recuperada en base al agua adquirida por destilación

En cuanto al tipo de corriente se tiene que con DC la separación es mayor en porcentaje si el tiempo de residencia es bajo. Una mayor durabilidad de la muestra mientras se le aplica el campo logra que este pueda interactuar con las gotas de agua y hacer que aumente su tamaño para que las fuerzas gravitacionales permitan la coalescencia de las gotas y con ello la decantación. Lo que certifica que para un campo eléctrico aplicado mejora la coalescencia gota-gota, si el campo se aplica en una dirección determinada a la dirección del flujo de las gotas (Eow y Ghadiri, 2002)

Realizando comparaciones referentes al factor de desestabilización para estas muestras antes y después de centrifugar se tiene los valores promedios reportados en la siguiente tabla:

Tabla 8.- Factor de Desestabilización en la Separación de Fases.

Condición Experimental	Factor de Desestabilización	
	Antes de Centrifugar	Después de Centrifugar
1	1,28	1,20
2	4,29	1,79

Según los valores mostrados en la tabla anterior se tiene que el factor de desestabilización disminuye por lo que disminuye la cantidad de agua en la fase oleosa que es donde se toma la muestra para el análisis y cuantificación de este factor. Lo que puede indicar que no se contabilizó más cantidad de agua separada debido a posibles consecuencias como las observadas en la siguiente figura:

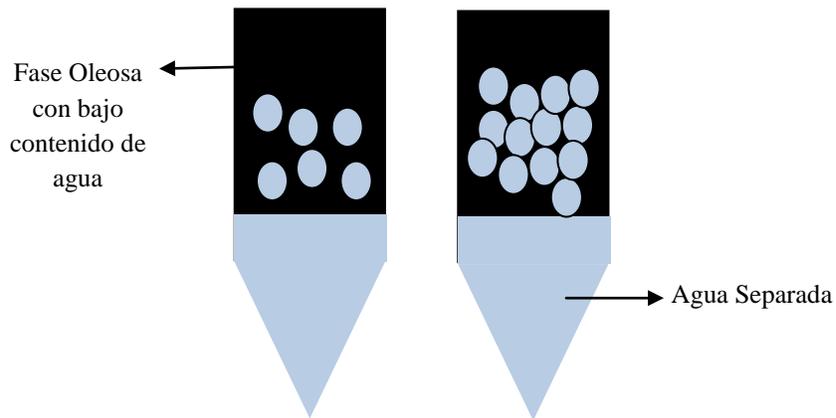


Figura 38.- Fenómenos producidos en la fase oleosa

Se observa para la parte izquierda de la figura que en la fase oleosa de la muestra hay gotas grandes pero no lo suficiente como para decantar el momento de aplicarle centrifugación o que hubo presencia de floculación en las gotas, sin embargo la película interfacial se mantuvo rígida lo que no permitió la coalescencia de las mismas.

CONCLUSIONES

Una vez alcanzado los objetivos planteados para este Trabajo Especial de Grado se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Es importante el conocimiento de las características de la fosa de producción Acema-100 en cuanto a la densidad, viscosidad y análisis SARA para poder establecer condiciones de operación adecuadas y permitir mejoras en los tratamientos aplicados.
- La temperatura de operación en la celda, que permitió acercar los valores de viscosidad con las otras fosas en estudio (Guara-2 y Merey-31) fue de 35°C para estandarizar las condiciones de operación de las fosas.
- El Diseño Factorial 2ⁿ arrojó como combinación de mayor efecto en el Factor de Desestabilización, la geometría de la celda como efecto principal para este caso Geometría Cilíndrica, en donde se produjo el aumento de tamaño de gotas, para lo que represento un 99,95% de confiabilidad con un 0,05 de significancia.
- Para interacciones de dos factores las variables fundamentales en el efecto del factor de desestabilización son cilíndrica para la geometría de la celda y en cuanto a la corriente, la AC. Siendo este efecto relevante en un 99,82% de confiabilidad.
- Un tiempo de residencia en la celda mayor con un voltaje aplicado alto da un mejor resultado, ya que permite el tiempo necesario para la formación de gotas grandes por los efectos de coalescencia dipolo-dipolo y mecanismos de tres etapas.
- Para un voltaje bajo el tipo de corriente en el efecto del Factor de estabilización no es significativo, mientras que cuando el voltaje es alto la corriente DC si logra que el tamaño de gotas con respecto a la muestra original aumente.

- Mediante un análisis de microscopía óptica el crecimiento del tamaño de gotas se vio favorecido bajo la condición de geometría de celda plana, voltaje alto, corriente AC y un tiempo de residencia en la celda alto, en donde los efectos de coalescencia como la inducción dipolo-dipolo y electroforesis lograron aumentar el tamaño de gotas considerablemente con respecto a la muestra original.
- La separación de fases se dio para las celdas planas en mayor cantidad para la corriente DC, a un voltaje alto y tiempo de residencia bajo con un valor de 25,95% de agua recuperada. Se asume que hubo presencia de crecimiento de gotas de agua y/o Floculación que con las fuerzas centrifugas aplicadas no fue suficiente para la coalescencia y sedimentaran. Disminuyendo su factor de desestabilización ya que había menos cantidad de agua en la fase de hidrocarburo recuperado.

RECOMENDACIONES

- Realizar un sistema con recirculación que permita mantener la temperatura estable durante la experiencia o un tanque con más capacidad y así poder garantizar unos mejores resultados.
- Considerar mas tomas de muestra para poder estudiar las condiciones estacionarias en la cual a cierto tiempo de estar sometida la muestra al campo eléctrico la separación sea mínima.
- Mantener la temperatura en los tubos cónicos de centrifugación, mediante un aislamiento en la centrifuga o con un baño térmico de los tubos para que así el efecto de la temperatura sea más efectivo en combinación con las fuerzas gravitacionales y obtener una mejor separación.
- Realizar un estudio para conocer los cambios a nivel de densidad, viscosidad y análisis SARA de la fosa de producción después de aplicar campo y asi poder mejorar las técnicas empleadas para la desestabilización de la emulsión.
- Medir el tamaño de los asfáltenos en la muestra de la fosa y así poder estudiar el efecto de estos en la estabilidad de la emulsión.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Burris D.R. (1977). Dual polarity oil dehydration. *Petroleum Engineer*, August, pp. 31-36.

Eow, Jhon S. y Ghadiri, Mojtaba (2000). *Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil: a review of the current understanding*. *Chemical Engineering Journal* 84 (2001) 173–192.

Eow, Jhon S. y Ghadiri, Mojtaba(2002). *Electrocoalesce-separators for the separation of aqueous drops from flowing dielectric viscous liquid*. *Separation and Purification Technology* 29 (2002) 63–77

Fung, Edward (2011). *Sistematizar las técnicas de caracterización de emulsiones de fosas: estudio de sistemas con análisis de imágenes*. Pasantía de Investigación. Facultad de Ingeniería, Escuela Ingeniería Química. Universidad Central de Venezuela. Caracas.

Fung, Edward (2011). *Desestabilización electrostática con corriente directa de material de fosas de producción mezclados con solventes* Trabajo Especial de Grado. Facultad de Ingeniería, Escuela Ingeniería Química. Universidad Central de Venezuela. Caracas.

Galindo, X. (2010). *Mecanismos de coalescencia electrostatica de gotas de agua e emulsiones W/O*. Postgrado de Ingeniería Química. Universidad Central de Venezuela. Caracas.

Marfisi y Salager (2009). *Deshidratador electrostático de laboratorio para pobrar formulaciones desemulsionantes*. *Revista Ciencia y tecnología*, Vol.30 (3), pp. 229-236.

Marfisi S. y Salager, J.L. (2004). Deshidratación de Crudo. Principios y Tecnología. Cuaderno FIRP S853-PP, Laboratorio FIRP. Escuela de Ingeniería Química, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.

Padrón, Alida y Zúñiga, Percy (2005). *Aplicación de la técnica de microscopía óptica para la caracterización de sistemas dispersos formados por crudos, agua y sólidos*. Trabajo Especial de Grado. Facultad de Ingeniería, Escuela Ingeniería Química. Universidad Central de Venezuela. Caracas.

Pérez, Violeta (2012). *Aplicación de separación electrostática con corriente alterna para desestabilizar emulsiones de agua en hidrocarburo w/o de fosas de producción mezcladas con solventes*. Trabajo Especial de Grado. Facultad de Ingeniería, Escuela Ingeniería Química. Universidad Central de Venezuela. Caracas.

Rivero, Victor (2007). Desestabilización de emulsiones estables empleando diferentes temperaturas y relaciones de fases agua-aceite en combinación con campo eléctrico. Trabajo Especial de Grado. Facultad de Ingeniería, Escuela Ingeniería Química. Universidad de Central de Venezuela. Caracas.

Sorrentino J. A. (2002). Advances in correlating filter cake properties with particle collective characteristics, Tesis Doctoral Universidad de Karlsruhe. Shaker Verlag. Alemania.

Sloblom J. (2002). Emulsions Stability. UK. Taylor & Francis. 668 páginas.

Waterman, L. (1965). Electrical coalescers, Chem. Eng. Prog. 61 (10) 51–57.

Capitulo VII. Tratamiento de crudo y gas.(sf). Consultado el 2 de mayo de 2011.
http://www.ingenieria.unam.mx/~jagomez/materias/ARCHIVOS_CONDUCCION/CAPITULO%20VII.pdf

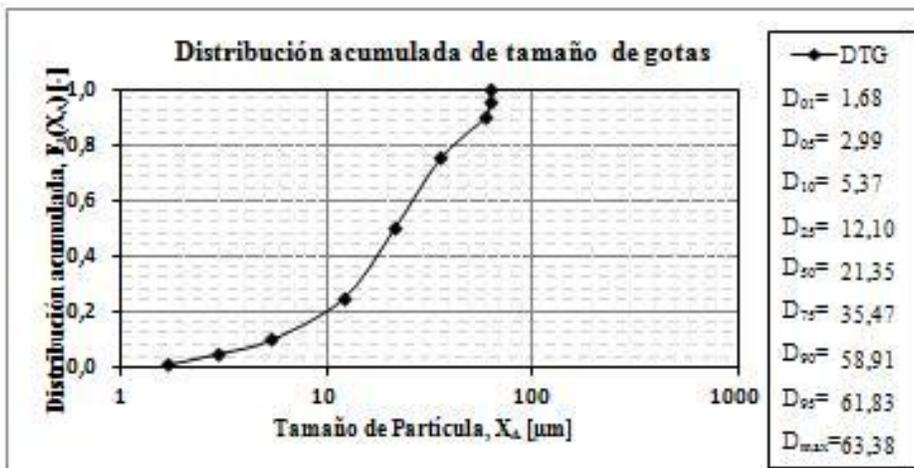
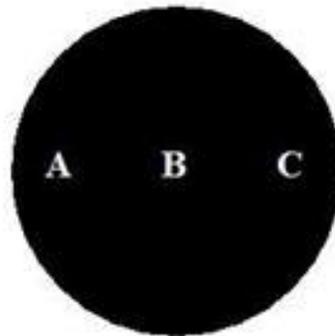
APENDICES

APENDICE I: HOJA DE RESULTADOS

En este apéndice se presentan las hojas de los resultados más relevantes para el factor de desestabilización:

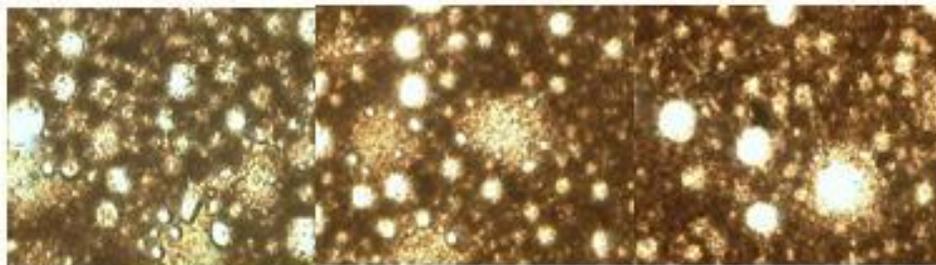
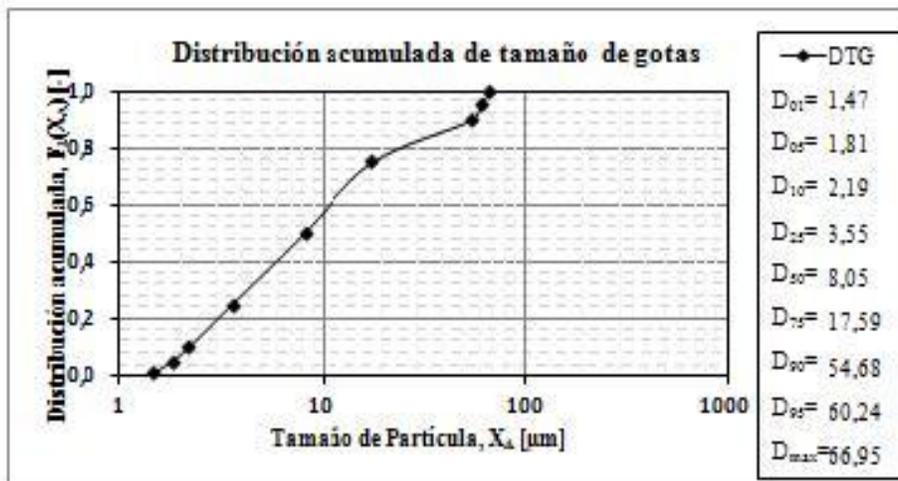
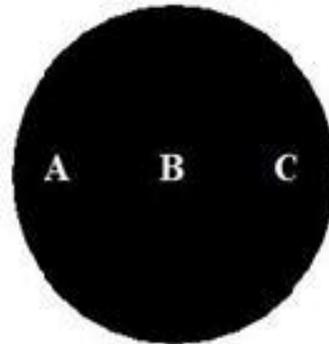
ACEMA GLOBAL, DC, Vb, Tb

$X_A = 40 \mu\text{m}$
$F_z(40 \mu\text{m}) = 0,79$
$R_z(40 \mu\text{m}) = 0,21$
$D_{50} = 21,35 \mu\text{m}$
$\phi_w = 16,42\%$
$\Phi_w(40 \mu\text{m}) = 3,5\%$



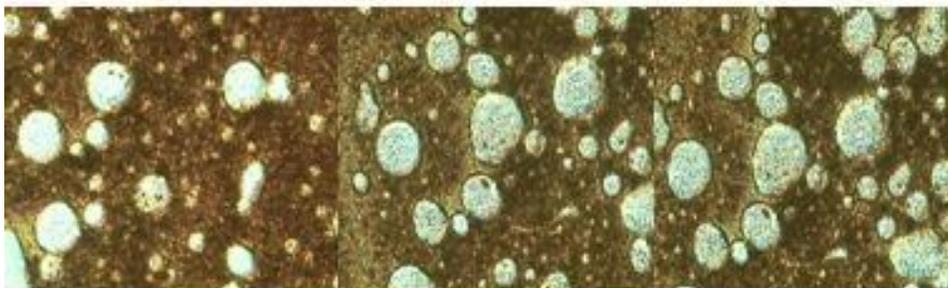
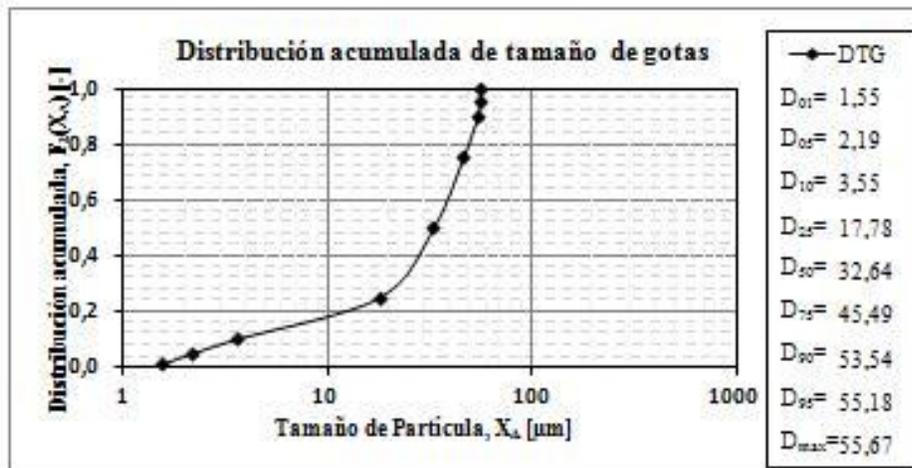
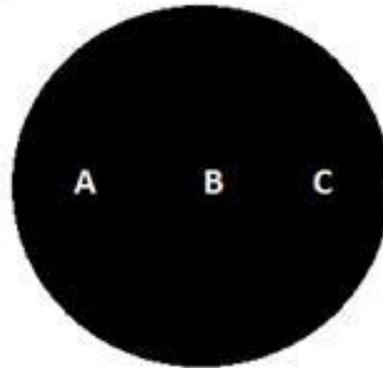
ACEMA GLOBAL, AC, Vb, Tb

$X_A = 40 \mu\text{m}$
$F_z(40 \mu\text{m}) = 0,80$
$R_z(40 \mu\text{m}) = 0,20$
$D_{50} = 8,05 \mu\text{m}$
$\phi_w = 18,33\%$
$\Phi_w(40 \mu\text{m}) = 3,7\%$



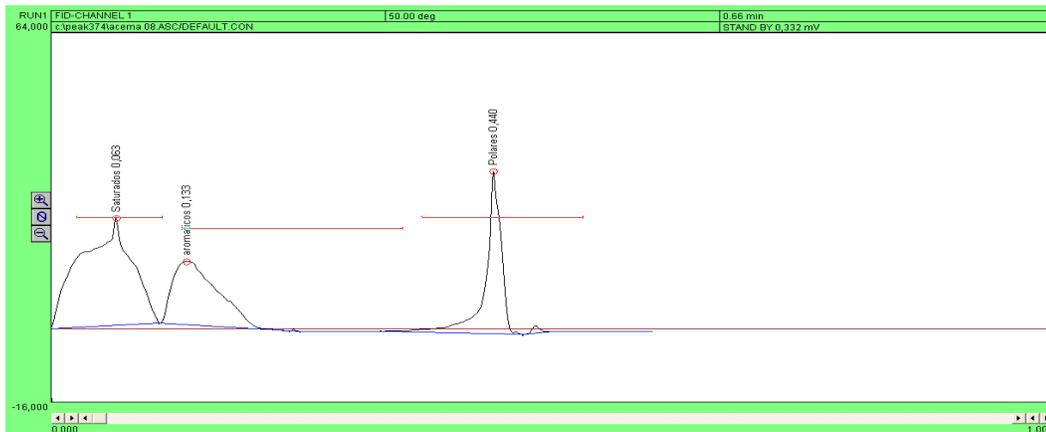
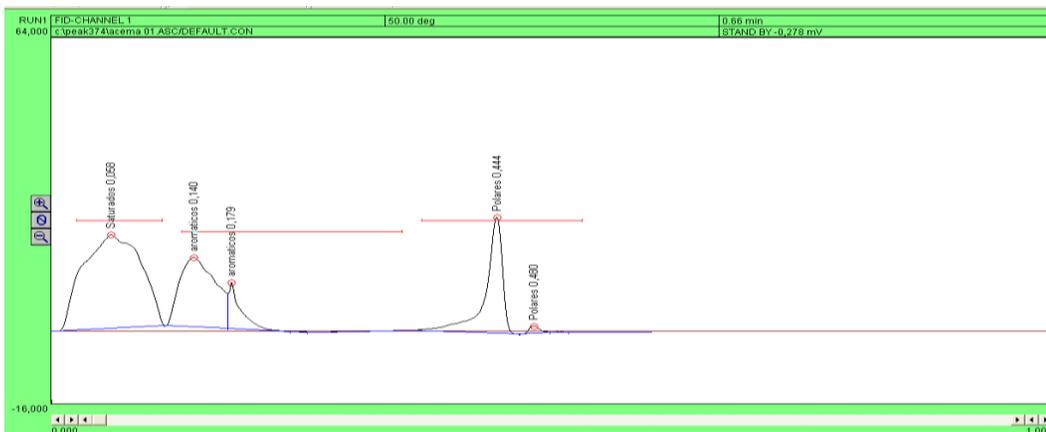
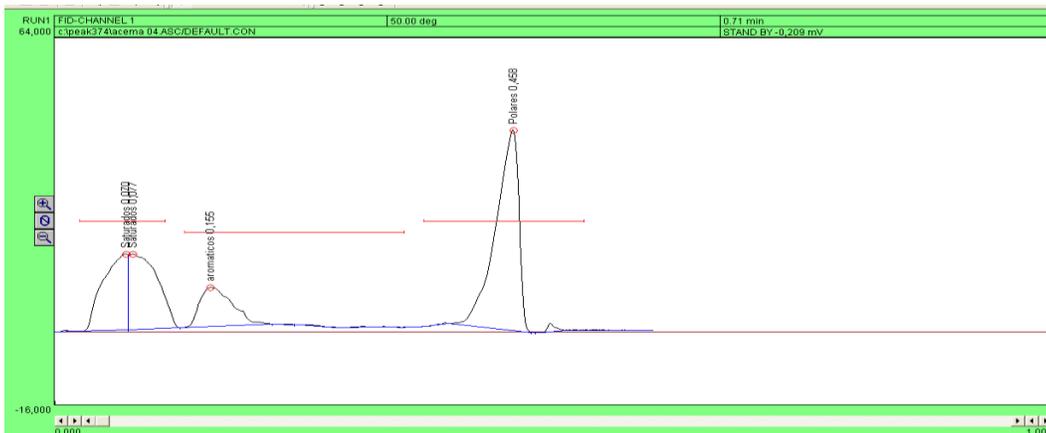
ACEMA GLOBAL, AC, Vb, Ta

$X_A = 40 \mu\text{m}$
$F_z(40 \mu\text{m}) = 0,63$
$R_z(40 \mu\text{m}) = 0,37$
$D_{50} = 32,64 \mu\text{m}$
$\phi_w = 25,47\%$
$\Phi_w(40 \mu\text{m}) = 9,4\%$



APENDICE II:-GRÁFICOS DE LOS RESULTADOS DEL SARA

Se presentan los resultados referentes a lo obtenido por la cromatografía de columna en los estudios realizados en el IDEA.



APENDICE III: CÁLCULOS DE LA DENSIDAD DE LA MEZCLA, DENSIDAD ESTIMADA DEL HIDROCARBURO Y °API

Densidad de la mezcla:

$$\rho_m = \frac{mp_{ll} - mp_v}{v_p} = \frac{(47,65 - 23,35)\text{gr}}{25,17\text{ml}} = 0,965\text{gr/ml}$$

donde:

ρ_m = densidad de la mezcla. (g/ml)

mp_{ll} = masa del picnómetro lleno. (g)

mp_v = masa del picnómetro vacío. (g)

v_p = volumen del picnómetro (25 ml)

Densidad Estimada del Hidrocarburo:

$$\rho_{Hc} = \frac{\rho_m - (\rho_a * \varphi)}{1 - \varphi} = \frac{0,965\text{gr/ml} - \left(0,37 * \frac{1\text{gr}}{\text{ml}}\right)}{(1 - 0,37)} = 0,944 \text{ gr/ml}$$

donde:

ρ_{Hc} =densidad estimada del Hidrocarburo (gr/ml)

ρ_a = densidad del agua (se asume que es 1 gr/ml)

φ = cantidad de agua por destilación (adim)

(La cantidad de agua por destilación fue la obtenida por la Prof. María Rodríguez, para Acema-100 fue de 37% de agua)

Grados °API:

$$API = \frac{141,5}{\left(\frac{GE_c}{GE_a}\right)_{60 F}} - 131,5 = \frac{141,5}{\frac{0,925\text{gr/ml}}{1\text{gr/ml}}} - 131,5 = 21,7^\circ\text{API}$$

API= Grados API de la fosa.(adim)

GEc= Gravedad especifica del crudo (gr/ml).

GEa= Gravedad especifica del agua. (gr/ml) la cual se considero igual a 1 gr/ml

APENDICE IV: CÁLCULO DEL TIEMPO DE RESIDENCIA EN LA CELDA

Caudal:

$$Q = \frac{V_r}{t_r} = \frac{10ml}{89 \text{ seg}} = 0,1124ml/seg$$

donde,

Q= caudal de la muestra (ml/seg.)

V_r= volumen recolectado en el beacker (10 ml)

t_r= tiempo de recolección (seg.)

Tiempo de residencia en la celda:

$$t_{rc} = \frac{V_{celda}}{Q} = \frac{4cm^3}{0,1124ml/seg} = 35,6seg$$

donde,

t_{rc}= tiempo de residencia en la celda (seg.)

V_{celda} = volumen de la celda = 5 cm*1cm*0,8cm = 4cm³

APENDICE V: CÁLCULO DE LOS FACTORES DE DESESTABILIZACIÓN PARA LAS DISTINTAS COMBINACIONES

$$FD = \frac{\Phi_w(XA)}{\Phi_w^0(XA)} = \frac{\Phi_w(40\mu m)}{\Phi_w^0(40\mu m)} = \frac{5,77}{6,5} = 0,88$$

Donde:

FD= Factor de desestabilización (Adim)

$\Phi_w(X_A)$ = porcentaje del área de la imagen en gotas mayores que (X_A) .