

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**DESESTABILIZACIÓN ELECTROSTÁTICA CON CORRIENTE  
ALterna DE MATERIAL DE FOSAS DE PRODUCCION  
MEZCLADO CON SOLVENTES**

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por la Br. Pérez Y., Violeta M.  
Para optar al Título  
de Ingeniero Químico

Caracas, 2012

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **DESESTABILIZACIÓN ELECTROSTATICA CON CORRIENTE ALterna DE MATERIAL DE FOSAS DE PRODUCCION MEZCLADO CON SOLVENTES**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. José Ángel Sorrentino

COTUTOR ACADÉMICO: Profa. María Rodríguez

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela

Por la Br. Pérez Y., Violeta M.

Para optar al Título  
de Ingeniero Químico

Caracas, junio de 2012

Caracas, junio 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 Pérez Y. Violeta M., titulado:

**“DESESTABILIZACIÓN ELECTROSTATICA CON CORRIENTE  
ALTERNA DE MATERIAL DE FOSAS DE PRODUCCION  
MEZCLADO CON SOLVENTES”**

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.

Prof. Andrés Rosales  
Jurado

Prof. Armando Vizcaya  
Jurado

Prof. José Ángel Sorrentino  
Tutor Académico

Profa. María Rodríguez  
Co-Tutor Académico

**Dedicatoria.**

A mis Padres, Hermanos y Sobrinas.

## **Agradecimientos**

Al profesor José Ángel Sorrentino por haberme brindado la oportunidad de realizar el Presente Trabajo Especial de Grado.

A la Profesora María Alejandra Rodríguez, por toda su valiosa orientación y dedicación que hicieron posible la culminación del presente Trabajo de Tesis.

A mi eterna Amiga Carolina, por su permanente disposición a estimularme en el desempeño de mi carrera.

Al Profesor Humberto Kum, simplemente por ser mi amigo incondicional.

**Pérez Y., Violeta M.**

**DESESTABILIZACIÓN ELECTROSTATICA CON CORRIENTE ALTERNA  
DE MATERIAL DE FOSAS DE PRODUCCION MEZCLADO CON  
SOLVENTES**

**Tutores Académicos: Prof. José Ángel Sorrentino y Profa. María Rodríguez.  
Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química.  
Año 2012, N° págs. 96.**

**Palabras Claves:** Fosas de producción, desestabilización electrostática, coalescencia, corriente alterna, solvente parafínico, solvente aromático, desestabilización de emulsiones.

**Resumen.** Se aplicó campo eléctrico de corriente alterna al material de las fosas de producción (Acema-100, Merey-31 y Guara-2), en algunos casos mezclado con solvente (parafínico y aromático), con el fin de igualar las viscosidades entre las fosas; con ello se logró desestabilizar en cierto grado la emulsión. Se estableció la viscosidad de la fosa Acema-100 como valor patrón, el cual fue alcanzado por las fosas Merey-31 y Guara-2 mediante la dilución con hexano (parafínico) y xileno (aromático). 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. Se estudió la variación en el tamaño de gotas, haciendo uso de una celda de observación microscópica, donde se empleó la técnica de microscopía óptica en combinación con el análisis de tamaño de partículas. En la celda de observación, se tomaron videos de algunas experiencias seleccionadas con el fin de observar los fenómenos presentes (electroforesis, dielectroforesis, atracción dipolo-dipolo, entre otros) y luego se escalaron las pruebas en una celda de trabajo (volumen 50 veces mayor que en la celda de observación). Se cuantificaron los resultados obtenidos en la celda de trabajo con el fin de evaluar la reproducibilidad los fenómenos manifestados en la celda de observación, y de este modo poder sugerir criterios de diseño de una celda continua. A nivel microscópico los resultados fueron favorables para todas las fosas. El uso de solventes tanto parafínico como aromático, generó una desestabilización de las emulsiones, observado en el incremento del tamaño de las gotas presentes en las mismas. Las intensidades de campo seleccionadas fueron 6KV/cm para Acema-100, 4KV/cm para Merey-31: xileno (18:1) y 6KV/cm para Guara-2: xileno (13:1). Se observaron fenómenos como coalescencia por dipolos, aglomeraciones de gotas, fuerzas electroforéticas. Se trabajó con el factor de desestabilización (FD) establecido por Fung (2011) para cuantificar la magnitud del cambio ocasionado por el campo eléctrico en el tamaño de gotas. Se evidenció un mayor FD en la celda de observación en comparación con la celda de trabajo, originado por el incremento del volumen tratado y la separación entre los electrodos.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CONTENIDO.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	x
ÍNDICE DE TABLAS .....	xiii
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO I.....	2
FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	2
I.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
I.2. ANTECEDENTES .....	3
I.3. OBJETIVOS.....	9
I.3.1. Objetivo general .....	10
I.3.2. Objetivos específicos.....	10
CAPÍTULO II .....	11
MARCO TEÓRICO.....	11
II.1. FOSAS DE PRODUCCIÓN .....	11
II.2. ESTABILIDAD DE LAS EMULSIONES W/O .....	14
II.3. TECNICAS PARA DESESTABILIZAR LAS EMULSIONES W/O.....	17
II.3.1. Tratamiento mecánico.....	17
II.3.2. Tratamiento térmico .....	18
II.3.3. Tratamiento químico .....	18
II.3.4. Tratamiento eléctrico .....	19
II.4. SEPARACIÓN ELECTROSTÁTICA.....	20
II.4.1. Campo eléctrico .....	21
El campo eléctrico .....	21
II.4.2. Corriente Alterna.....	24

II.4.3. Procesos involucrados en la desestabilización de emulsiones. ....	25
II.4.3.1. Mecanismo de coalescencia de las gotas en una emulsión. ....	26
II.4.3.2. Interacciones de la fase dispersa ante un campo eléctrico .....	28
II.5. SOLVENTES ORGANICOS.....	31
II.6. MICROSCOPIA OPTICA.....	32
II.7. ANALISIS DE PARTICULAS.....	33
II.7.1. Distribución acumulada de tamaño de partículas Frxi.....	34
CAPITULO III.....	36
METODOLOGIA EXPERIMENTAL .....	36
III.1. EQUIPOS EMPLEADOS.....	36
III.1.1. Microscopio óptico NIKON MED-600 .....	36
III.1.2. Programa IMAGE PRO PLUS. ....	37
III.1.3. Circuito de corriente alterna de alto voltaje.....	37
III.2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....	39
III.2.1. Preparación de mezclas fosas-solvente, con solvente aromático y parafínico que posean iguales viscosidades.....	40
III.2.1.1. Medición del tiempo de escurrimiento de las muestras diluidas. ....	40
III.2.2. Comparar el tipo de diluyente, al aplicar corriente alterna a diferentes voltajes.....	41
III.2.3. Identificar los fenómenos presentes en el proceso de separación electrostática, en la “celda de observación” .....	42
III.2.4. Evaluar la presencia de los fenómenos observados en la “celda de observación” en la “celda de trabajo” .....	43
III.2.5. Cuantificar el grado de separación en la “celda de trabajo”, empleando técnicas de microscopía óptica .....	43
III.2.5.1. Preparación de la muestra para su observación en el microscopio.....	44

III.2.5.2. Análisis de imágenes .....	46
III.2.6. Identificar las limitaciones de la “celda de trabajo” usada y proponer mejoras para el diseño de una nueva celda. ....	47
CAPITULO IV .....	48
RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS. ....	48
IV.1. PREPARACION DE MEZCLAS FOSAS-SOLVENTE, CON SOLVENTE AROMATICO Y PARAFINICO CON IGUALES VISCOSIDADES.....	48
IV.2. COMPARAR EL EFECTO DEL TIPO DE DILUYENTE, AL APLICAR CORRIENTE ALTERNA A DIFERENTES VOLTAJES.....	55
IV.3. IDENTIFICACIÓN DE LOS FENÓMENOS PRESENTES EN EL PROCESO DE SEPARACIÓN ELECTROSTÁTICA. ....	65
IV.4. REPRODUCIBILIDAD DE LOS FENÓMENOS OBSERVADOS EN LA “CELDA DE OBSERVACIÓN”, EN LA “CELDA DE TRABAJO”.....	68
IV.5. CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE UNA NUEVA CELDA. ....	76
CAPITULO V .....	78
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	78
V.1. CONCLUSIONES .....	78
V.2. RECOMENDACIONES.....	80
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	81

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1. Elongación de una gota ante un campo eléctrico de corriente alterna. (Elaboración propia).....	4
Figura N° 2. Efectos al aplicar campo eléctrico de corriente alterna. (Chen et al, 1994) .....	7
Figura N° 3. Fosa de producción. (WOSS, 2011) .....	11
Figura N° 4. Algunos de los factores que contribuyen a la estabilización de las emulsiones. (Elaboración propia).....	15
Figura N° 5. Sistemas de tratamiento empleados a nivel industrial para la desestabilización de emulsiones W/O. (Elaboración propia).....	17
Figura N° 6. Deshidratador electrostático industrial. (Marfisi, 2005).....	20
Figura N° 7. (a) Campo eléctrico homogéneo. (b) Campo eléctrico no homogéneo. (Sjoblom, 2006) .....	22
Figura N° 8. Efecto de la polarización ante un campo eléctrico uniforme. (a) Sin campo eléctrico. (b) Con campo eléctrico. (Sjoblom, 2006) .....	24
Figura N° 9. Tipos de onda de corriente alterna AC. ....	25
Figura N° 10. Onda senoidal de corriente alterna (AC). (Serway, 2004) .....	25
Figura N° 11. Esquema del mecanismo en tres etapas de la desestabilización de las gotas emulsionadas. (a) acercamiento. (b) y (c) drenaje de la película. (d) coalescencia. (Méndez, 2004).....	28
Figura N° 12. Fuerzas electrostáticas presentes con la aplicación de campo eléctrico. (Elaboración propia).....	29
Figura N° 13. Distribución acumulada de tamaño de partículas (Sorrentino, 2002). .	35
Figura N° 14. a) Microscopio NIKON MED-600. b) Software Image Pro Plus. (Elaboración propia).....	36
Figura N° 15. Esquema del circuito de corriente alterna de alto voltaje. (Elaboración propia) .....	38
Figura N° 16. Circuito de corriente alterna de alto voltaje. (Elaboración propia) .....	39

Figura N° 17. Montaje para determinar tiempo de escurrimiento (Fung, 2011).....	41
Figura N° 18. Celda de observación. (Elaboración propia) .....	42
Figura N° 19. Posiciones a considerar para la captura de imágenes en la celda de observación. (Elaboración propia) .....	42
Figura N° 20. Posiciones a considerar para la captura de imágenes en la celda de observación. (Elaboración propia). .....	43
Figura N° 21. Celda de trabajo. (Elaboración propia).....	43
Figura N° 22. Posiciones a considerar para la toma de las muestras en la “celda de trabajo”. (Elaboración propia).....	43
Figura N° 23. Posiciones a considerar para la toma de las muestras en la celda de trabajo. (a) antes y (b) después de aplicado el campo eléctrico (Elaboración propia)	44
Figura N° 24. Distribución acumulada de gotas de la fosa Guara-2, original y diluida con solventes (hexano, xileno).....	50
Figura N° 25. Imágenes de la fosa Guara-2 con los solventes considerados (a) xileno y (b) hexano, sin aplicación de campo eléctrico en la celda de observación. ....	52
Figura N° 26. Distribución acumulada de gotas de la fosa Merey-31 original y diluida con solventes (hexano y xileno).....	53
Figura N° 27. Imágenes de la fosa Merey-31 con los solventes considerados (a) xileno y (b) hexano, sin aplicación de campo eléctrico en la celda de observación. ....	54
Figura N° 28. Imágenes de la fosa Acema-100 en la zona C luego de aplicar distintas intensidades de campo eléctrico.....	56
Figura N° 29. Cantidad de agua en gotas grandes en función de la intensidad de campo eléctrico, para la fosa Acema-100. ....	57
Figura N° 30. Cantidad de agua en gotas grandes en función de la intensidad de campo eléctrico para (a) Guara-2:xileno (13:1) y (b) Guara-2:hexano.....	59
Figura N° 31. Imágenes de la fosa Guara-2:xileno (13:1) en las zonas en estudio de la celda de observación, (a) antes y (b) después de aplicar la intensidad de campo eléctrico de 6 KV/cm. ....	60

Figura N° 32. Imágenes de la fosa Guara-2:hexano (7:1) en las zonas en estudio de la celda de observación, (a) antes y (b) luego de aplicar la intensidad de campo eléctrico de 2 KV/cm. ....	60
Figura N° 33. Cantidad de agua en gotas grandes en función de la intensidad de campo eléctrico para (a) Merey-31:xileno (18:1) y (b) Merey-31:hexano (10:1). ....	62
Figura N° 34. Imágenes de la fosa Merey-31:xileno (18:1) en las zonas A, B y C, (a) antes, (b) después de aplicar la intensidad de campo eléctrico de 4 KV/cm. ....	63
Figura N° 35. Imágenes de la fosa Merey-31:hexano (10:1) en las zonas A, B y C, (a) antes, (b) después de aplicar la intensidad de campo eléctrico de 6 KV/cm. ....	63
Figura N° 36. Factor de desestabilización. (Fung, 2011).....	64
Figura N° 37. Acema-100 a distintos tiempos de aplicación de campo eléctrico, y diferentes intensidades de corriente (a) 15s, (b) 18s, (c) 20s, (d) 26s y (e) 31s.....	66
Figura N° 38. Muestra de Acema-100 sin aplicación y con aplicación de campo eléctrico de 6KV/cm, en las distintas zonas de la celda de trabajo.....	70
Figura N° 39. Muestra de Guara-2:xileno (13:1) sin aplicación y con aplicación de campo eléctrico de 6KV/cm, en las distintas zonas de la celda de trabajo. ....	73
Figura N° 40. Muestra de Merey-31:xileno (18:1) sin aplicación y con aplicación de campo eléctrico de 4KV/cm, en las distintas zonas de la celda de trabajo. ....	75

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1. Clasificación de los crudos según su conducta ante un campo eléctrico alterno. (Taylor, 1987). .....	5
Tabla N° 2. Características de las fosas Acema-100, Guara-2 y Merey-31. (Padrón y Zúñiga, 2007). .....	8
Tabla N° 3. Análisis SARA para el hidrocarburo presente en distintas fosas de producción. (García, Gómez, González, 2012).....	12
Tabla N° 4. Clasificación de los solventes orgánicos. (Elaboración propia). .....	32
Tabla N° 5. Elementos del circuito de corriente alterna. (Elaboración propia) .....	38
Tabla N° 6. Descripción de parámetros utilizados en los resultados del análisis de imágenes.....	47
Tabla N° 7. Tiempos de escurrimiento, para las fosas en estudio. (Elaboración propia) .....	49
Tabla N° 8. Distribución acumulada de gotas para la fosas Acema-100, Guara-2 y Merey-31 sin adición de solvente. (Fung, 2012). .....	50
Tabla N° 9. Resultados para las fosa Guara-2, con la adición de solventes.....	51
Tabla N° 10. Resultados de las fosa Merey-31 con la adición de solventes. ....	53
Tabla N° 11. Resultados para la fosa Acema-100 en celda de observación, con corriente alterna a diferentes intensidades de campo eléctrico. ....	56
Tabla N° 12. Resultados para la fosa Guara-2 diluida con hexano y xileno a diferentes voltajes en celda de observación. (*Fosa sin dilución).....	58
Tabla N° 13. Resultados para la fosa Merey-31 diluida con xileno y hexano a diferentes voltajes. (*Fosa sin dilución).....	61
Tabla N° 14. Resultados de la fosa Acema-100 a 6KV/cm, en la celda de trabajo. ...	69
Tabla N° 15. Resultados de la fosa Guara-2:xileno (13:1) en la celda de trabajo.....	71
Tabla N° 16. Resultados de la fosa Merey-31:xileno (18:1) en la celda de trabajo. ....	74
Tabla N° 17. Comparación del efecto desestabilizador de los tipos de corriente. ....	76

## INTRODUCCIÓN

El siguiente Trabajo Especial de Grado tiene como finalidad comparar el comportamiento del material proveniente de tres fosas de producción (Acema-100, Merey-31 y Guara-2) sometidas a desestabilización electrostática con corriente alterna en condiciones de viscosidad análoga, lograda mediante la dilución con solventes (aromático y parafínico).

Se estableció una viscosidad común para hacer las comparaciones en función de garantizar una fluidez que permitiera la manipulación adecuada de las muestras de fosa a temperatura ambiente. Luego en la celda de observación, se aplicó corriente alterna a distintos voltajes a las muestras con la viscosidad definida anteriormente, para establecer una intensidad de campo y tipo de diluyente que favorecieran la separación del agua emulsionada en el hidrocarburo. Se tomaron videos para observar su comportamiento y en función de ello se realizó un escalamiento a un volumen mayor en la celda de trabajo.

Se realizaron pruebas que permitieron determinar el grado de eficiencia en la reproducción de los resultados manifestados en un volumen microscópico; esto con el fin de identificar las fallas cometidas y proponer mejoras pertinentes en beneficio de trabajos posteriores en el área.

Este trabajo presenta inicialmente el planteamiento del problema de las fosas de producción y de la separación electrostática como alternativa de procesamiento; se establecen allí los objetivos que persigue este trabajo. Luego se presenta el marco teórico necesario para el entendimiento de los diferentes conceptos en los que se apoya esta investigación, seguido de la metodología establecida para el alcance de los objetivos. Siguen los resultados y su discusión, para culminar con las conclusiones y recomendaciones.

# CAPÍTULO I

## FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

### I.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En Venezuela, durante los años de producción petrolera, se han depositado los residuos de dicho proceso en excavaciones denominadas fosas de producción; estos residuos están formados entre otros elementos por hidrocarburo emulsionado, sedimentos, lodos petrolizados, aceites usados, lodos contaminados con hidrocarburos y agua salada proveniente del proceso de deshidratación. Se estima que en Venezuela existen alrededor de 10 mil fosas de producción, las cuales contienen alrededor de 6 millones de barriles de petróleo oxidado, 55 millones de barriles de agua, y 45 millones de barriles de sedimento y lodo (PDVSA, 2010). Las emulsiones de agua en hidrocarburo (W/O) que allí se encuentran son muy estables debido a varios factores, donde entre los más relevantes se pueden citar, la presencia de sustancias químicas (naturales o sintéticas) llamadas emulsionantes, la alta viscosidad del hidrocarburo, y el largo tiempo que tienen en las fosas, lo que favorece el envejecimiento de la interfase agua-hidrocarburo. Adicionalmente, las fosas constituyen un problema de contaminación ambiental, por lo que la tendencia actual es cegarlas y sanearlas, y en consecuencia se puede recuperar el hidrocarburo proveniente de ellas mediante tecnologías que permitan eliminar el agua emulsionada, ya que la presencia del agua en el hidrocarburo causa corrosión en bombas y tuberías, aumentos en los costos de transporte y aumento de la viscosidad.

En este sentido, es posible identificar la amplia aplicación de corriente eléctrica en la industria petrolera para desestabilizar las emulsiones de agua en hidrocarburo (W/O). En particular, el campo eléctrico de corriente alterna (AC) es empleado como agente

de separación en sistemas donde el contenido de agua en fase dispersa supera el 20%, debido principalmente a la limitación en el uso del campo eléctrico de corriente directa (DC) donde se presentan arcos eléctricos originados por la alta conductividad del agua presente. El hidrocarburo proveniente de las fosas Acema-100, Merey-31 y Guara-2 ubicadas en el distrito San Tomé, al norte del estado Anzoátegui contienen porcentajes considerables de agua, a saber, 47%, 22%, 40% respectivamente (Padrón y Zúñiga. 2005).

El uso de la corriente alterna (AC) presenta la ventaja de que según el contenido de agua de la emulsión, se pueden usar valores de voltaje; entre 600 y 800 V/cm siendo el campo eléctrico más eficiente mientras las gotas sean más grandes y estén muy próximas dentro de la fase dispersa con altos contenidos de agua, generando un alto efecto polarizante en las gotas. Sin embargo, en el caso de las fosas de producción Acema-100, Guara-2 y Merey-31, el efecto de la viscosidad es un punto importante a considerar para las experiencias con campo eléctrico, es por ello que se propone reducir su viscosidad empleando el uso de solventes aromático y alifático. Por todo lo expuesto anteriormente, el presente Trabajo Especial de Grado, se va a enfocar en estudiar el efecto de la aplicación de corriente alterna (AC), en la desestabilización de emulsiones agua en hidrocarburo (W/O) a temperatura ambiente, de las fosas de producción Acema-100, Guara-2, y Merey-31.

## **I.2. ANTECEDENTES**

A continuación se mencionan los trabajos más relevantes que han sido referencia para el desarrollo del presente trabajo.

**Cottrell y Speed (1911)**, presentaron la primera patente para coalescencia eléctrica. En sus experiencias produjeron un dipolo inducido en presencia de un campo eléctrico de corriente alterna, aplicando alto voltaje a una gota de agua, por lo que la deslocalización de la carga produjo un esfuerzo de elongación en dirección del campo (ver Fig. N°1). Concluyen que cuando varias gotas tienen polos de signo contrario se atraen y ocurre la coalescencia.

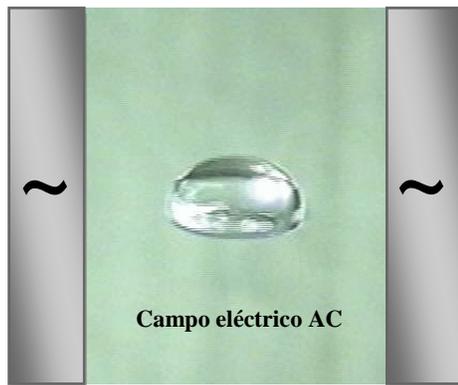


Figura N° 1. Elongación de una gota ante un campo eléctrico de corriente alterna.  
(Elaboración propia).

**Cottrell (1911)**, obtuvo en sus investigaciones que un campo eléctrico solo se puede utilizar para aumentar la coalescencia de la fase dispersa en una emulsión, cuando la fase continua tiene una constante dieléctrica mucho más baja que la fase dispersa. Al mismo tiempo la fase continua debe tener baja conductividad y actuar como un aislante entre los electrodos.

**Waterman (1965)**, describió los mecanismos de la separación de las dispersiones de baja conductividad en presencia de un campo eléctrico. Concluyó que existen dos tipos de coalescencia: (1) coalescencia por dipolo inducido la cual consiste en la separación debido a las fuerzas entre partículas polarizadas en un campo de corriente alterna o directa; y (2) electrofining o coalescencia resultante de las fuerzas producidas por un campo eléctrico unidireccional sobre una película cargada.

**Bailes y Larkay (1981)**, realizaron investigaciones sobre los diferentes tipos de corriente y la frecuencia del campo eléctrico utilizando sistemas de extracción con solvente sin transferencia de masa. En relación con los trabajos sobre corriente alterna, concluyen que la separación máxima ocurre a una frecuencia óptima en la región de 8 a 10 Hz.

Los cambios en la frecuencia de pulsación no alteran la magnitud de la fuerza del campo a lo largo de la dispersión para un voltaje dado, pero si influyen en la conducción de la corriente que se hace máxima a la frecuencia óptima.

**Taylor (1987)**, realizó experimentos con voltajes de corriente alterna (1 a 5 KV). Construyó celdas de observación y de trabajo. La primera consistió en un par de electrodos planos, con terminales conectados a la fuente de alto voltaje AC, con una ranura donde la emulsión puede ser introducida, para ser observada al microscopio. Esta celda permite observar la emulsión antes y después de los efectos del campo eléctrico. Por otra parte, la celda de trabajo está provista de electrodos cilíndricos, el electrodo interno está conectado a la fuente de alto voltaje; el electrodo externo está conectado a tierra. La separación de los electrodos fue de 26 mm. Trabajó con crudos de: Kuwait, Ninian y Romashkino, con y sin demulsificantes químicos. En este trabajo solo se reportaron los resultados sin demulsificantes. Clasificó los crudos según su conducta en presencia del campo eléctrico, en tipo I y tipo II, tal como se indica en la Tabla N°1.

Tabla N° 1. Clasificación de los crudos según su conducta ante un campo eléctrico alterno. (Taylor, 1987).

<b>Tipo I</b>	Ninian, Kuwait, Romashhkino
Caracterizada por la formación de cadenas. Entre los 5 y hasta 10 seg se observó un incremento en la conducción de la corriente eléctrica; después de este tiempo, la corriente alcanzó el máximo, para luego producirse un cortocircuito con evolución de calor. Observó la formación de cadenas, la coalescencia y sedimentación de gotas.	
<b>Tipo II</b>	Romashhkino
Caracterizada por la coalescencia de gotas, eficiente desde los primeros 5 seg; pero con la presencia de una conducta reversible que lleva a la formación de cadenas.	

**Hauertmann, Degener, Schuger (1989)**, sugieren que usando electrodos aislados se incrementa la eficiencia de la coalescencia, con la potencia del campo eléctrico alterno y la frecuencia. Sin embargo, **Abou-Nemeh, Moors, Peterghem (1992)**, definen un voltaje óptimo en la región donde se uso frecuencia de 1 KHz y electrodos sin aislamiento.

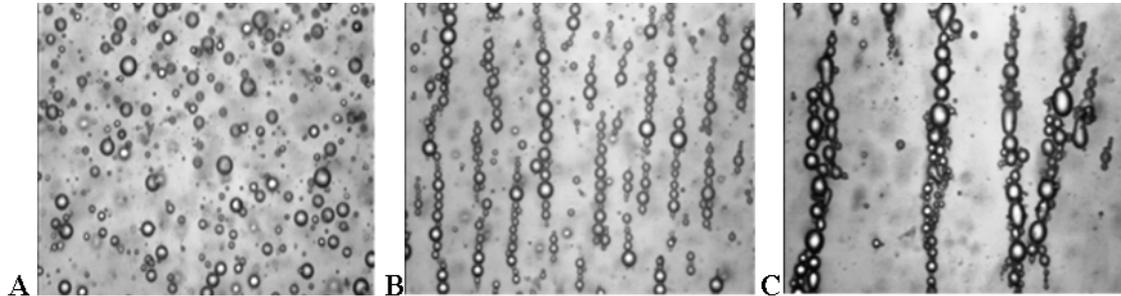
**Taylor (1991)**, estudió los factores que rigen la deshidratación eléctrica de las emulsiones W/O, los efectos del campo eléctrico, el volumen y la salinidad de la fase acuosa, el tiempo de tratamiento y la presencia de surfactantes; para ello utilizó los perfiles corriente-tiempo. Del análisis de estos perfiles concluyó que el período inicial donde se alinean las gotas, es capacitivo, resultando más un fenómeno de conducción superficial de las gotas que se tocan, más que de la conducción de las

gotas; este fenómeno está influenciado por la viscosidad de la película interfacial, el volumen de la fase dispersa, y el voltaje aplicado. Además en sus experimentos con corriente alterna, evidencia la presencia de cadenas de gotas que forman un puente entre los electrodos. Ocurre un aumento en la conductividad de la emulsión, donde se presenta el punto máximo de conducción que es un punto de conductividad altamente errática, eventualmente, disminuye a cero como consecuencia de la disminución del nivel de agua en la emulsión por la coalescencia. La conducción ocurre a través de las gotas y la duración de esta zona se ve afectada por el voltaje y aditivos químicos.

**Chen, Mohammed, Barley, Taylor (1994)**, estudiaron el efecto de la aplicación de un campo eléctrico de corriente alterna sobre las emulsiones W/O de forma experimental y simulada. Usaron como emulsión modelo para la simulación, una fase dispersa que consiste en gotas de agua con un diámetro fijo y una constante dieléctrica establecida; una fase continua de crudo con constante dieléctrica conocida. La emulsión se introduce entre electrodos paralelos. Las fuerzas que se consideran en este estudio son: fuerzas de largo alcance, como electrostáticas, térmicas; y de corto alcance, como las fuerzas hidrodinámicas. El modelo de la esfera rígida es usado para la interacción entre las gotas que se suponen están cubiertas por una delgada capa de asfaltenos. Para simular la coalescencia se supone un procedimiento donde las gotas no están cubiertas por asfaltenos. En la figura N°2 se presentan imágenes del efecto de aplicación de campo AC a una emulsión W/O.

Chen y otros, concluyeron que en presencia de un campo eléctrico y empleando electrodos aislados, las gotas de agua se elongan en una figura elipsoidal típica de la inducción dipolo-dipolo; a altas frecuencias (16–20 Hz) se forman cadenas más cortas, porque las gotas no tienen tiempo para responder a los cambios rápidos de la corriente alterna; mientras las frecuencias bajas (2-10 Hz) pueden ser más efectivas para promover la formación de cadenas más largas (5 a 15 gotas); a bajas frecuencias también se observa la coalescencia de las gotas. Así mismo realizaron experimentos a altas frecuencias (por encima de 1000 Hz) donde se formaron cadenas de (5 a 10 gotas). Además, acotaron que todas las cadenas son transversales de electrodo a

electrodo y paralelas al campo eléctrico. Aducen que la película interfacial rígida impide la coalescencia.



**A:** Muestra la distribución de las gotas sin aplicar campo eléctrico AC.

**B:** Al aplicar campo eléctrico AC, se observa la polarización de las gotas, a medida que éste aumenta.

**C:** El campo eléctrico aplicado produce la ruptura irreversible de la película interfacial; las gotas de agua se unen formando las cadenas entre los electrodos.

Figura N° 2. Efectos al aplicar campo eléctrico de corriente alterna. (Chen et al, 1994)

**Tadros (2004)**, observó que cuando las gotas emulsionadas de agua son sometidas al campo eléctrico alterno ocurren dos fenómenos: floculación (formación de cadenas) y coalescencia.

**Marfisi (2005)**, realizó el diseño de un deshidratador eléctrico para desestabilizar la emulsión de agua en crudo, aplicando campo eléctrico y química deshidratante. Se deshidrató para contrarrestar la acción estabilizante de los agentes emulsionantes presentes en el crudo, como surfactantes naturales, asfaltenos, resinas y sólidos que se forman por la precipitación de sales, parafinas y asfaltenos. Aplicó un campo eléctrico AC para acelerar el proceso de acercamiento de las gotas de la fase dispersa usando alto voltaje en los electrodos. De este trabajo se concluye que las gotas se alinean de acuerdo a la polaridad. Cuando no hay influencia del campo eléctrico las gotas regresan a la forma esférica original. También concluye que la corriente alterna aumenta la velocidad de asentamiento de las gotas de agua, por lo que se favorece la

coalescencia. Aplicando campo eléctrico, la emulsión puede ser rota a temperaturas muy por debajo de la que requeriría si se emplease tratamiento térmico.

**Padrón y Zúñiga (2005)**, desarrollaron un procedimiento basado en la técnica de microscopía óptica con análisis de imagen; dicha técnica permite determinar la distribución de tamaño de las partículas, específicamente, gotas y sólidos, además de determinar la cantidad de agua y sedimentos contenidos en emulsiones W/O. Determinaron los tamaños de las gotas, el contenido de agua y el contenido de sólidos para las fosas Acema-100, Guara-2 y Merey-31, tal como se puede apreciar en la Tabla N°2.

Tabla N° 2. Características de las fosas Acema-100, Guara-2 y Merey-31. (Padrón y Zúñiga, 2005).

Fosa	% de agua	% de sólidos	Distribución del tamaño de gotas
Acema-100	47,1	-	1,5-1,8 $\mu\text{m}$
Guara-2	40,0	1,4 <sub>M</sub> – 1,7 <sub>E</sub>	1,5-100 $\mu\text{m}$
Merey-31	22,1	0,59 <sub>M</sub> – 0,67 <sub>E</sub>	moda 1,7 $\mu\text{m}$

M: microscopía óptica

E: extracción

**Less y Hannisdal (2008)**, estudiaron la floculación y la coalescencia mediante reología, llegaron a la conclusión que la formación de cadenas de gotas de agua (floculación) aumenta la resistencia de la emulsión para fluir, por lo tanto, aumenta su viscosidad; mientras que un aumento del tamaño de la gota (coalescencia) conduce a la disminución de la viscosidad.

**Lesaint, Glomm, Lungaard y Sjöblom (2009)**, disertaron sobre la desestabilización de emulsiones sintéticas de agua en aceite, con 70% Nitro 10 XN para la fase aceite y 30% de la fase acuosa, usando como estabilizador Span 80. El tamaño de las gotas de la emulsión sintética fue de  $(20 \pm 2)$  nm. Las condiciones de trabajo fueron temperaturas entre 20°C y 60°C; intensidades del campo eléctrico alterno entre 2 y 10 KV/cm; las frecuencias fueron entre 50 y 5000 Hz; los tiempos de aplicación del campo fueron entre 5 y 20 seg. Este estudio comprende el análisis de varios parámetros como el tiempo de aplicación del campo eléctrico; la influencia de la

forma de la onda, la temperatura, la frecuencia, la intensidad del campo eléctrico aplicado sobre la desestabilización y la viscosidad de la emulsión. Las propiedades reológicas de las emulsiones se midieron utilizando un reómetro rotatorio Physica MCR-301 y utilizando el software RheoPlus. Este reómetro rotacional, equipado con un instrumento para medir la temperatura, está conectado a una fuente de alto voltaje de corriente alterna, un generador y un osciloscopio. El electrodo de alto voltaje está ubicado en la parte giratoria del reómetro. La copa del instrumento de diámetro 14,46 mm está conectada a tierra y se mantiene aislada con una delgada capa de PVC.

Con respecto al efecto que tiene la duración del campo eléctrico aplicado los autores concluyeron que la desestabilización de la emulsión es proporcional al tiempo que se aplique el campo eléctrico. En relación a la influencia del campo eléctrico aplicado se realizaron los experimentos a una temperatura constante de 40°C con un tiempo de duración de 20 segundos, a 50 Hz, los voltajes aplicados fueron desde 2 KV/cm a 10 KV/cm; hallaron que a 2 KV/cm solo se observó la floculación reversible, mientras que para mayores intensidades del campo se observó la floculación inmediata seguida por la coalescencia. De la experiencia anterior concluyeron que a mayor magnitud del campo eléctrico mayor reducción de la viscosidad y mejor separación. En relación con la variable frecuencia trabajaron a temperatura fija de 40°C, con un tiempo de duración de 20 segundos y la frecuencia se varió entre 100-5000 Hz; en todos los casos se observó floculación inmediata seguida de disminución de la viscosidad y coalescencia, excepto a frecuencia de 50000 Hz que solo se observó la floculación sin coalescencia. Concluyeron que la eficacia de la demulsificación aumenta con la frecuencia.

### **I.3. OBJETIVOS**

Con el desarrollo del presente Trabajo Especial de Grado, se desea alcanzar el objetivo general a partir del desarrollo de los siguientes objetivos específicos.

### **I.3.1. Objetivo general**

Desestabilizar mezclas de material de fosas con distintas proporciones de solventes alifático ó aromático, empleando campo eléctrico de corriente alterna.

### **I.3.2. Objetivos específicos**

- (a) Preparar mezclas de fosa-solvente, con solvente aromático y parafínico a diferentes proporciones.
- (b) Comparar el efecto del tipo de diluyente, al aplicar corriente alterna a diferentes voltajes.
- (c) Identificar los fenómenos presentes en el proceso de separación electrostática, en la “celda de observación”.
- (d) Evaluar la reproducibilidad en la “celda de trabajo” de los fenómenos identificados en la “celda de observación”.
- (e) Cuantificar el grado de separación en la “celda de trabajo”, empleando técnicas de microscopía óptica.
- (f) Identificar las limitaciones de la “celda de trabajo” usada y proponer mejoras para el diseño de una nueva celda.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presenta la serie de conceptos teóricos que son necesarios para el entendimiento de los aspectos involucrados en el desarrollo de este proyecto.

#### II.1. FOSAS DE PRODUCCIÓN

Las fosas son todas aquellas excavaciones que se realizan en el terreno para almacenar los desechos del proceso de producción y explotación de la actividad petrolera. Estos depósitos de desechos están situados en los alrededores de los taladros, donde se encuentran principalmente hidrocarburo, agua de producción, lodos, ripios, metales, solventes, aceites usados, sustancias radiactivas, además residuos sólidos como tambores vacíos, entre otros. Actualmente, en Venezuela existen más de 10.000 fosas, las cuales fueron diseñadas de manera precaria, donde por más de sesenta años se han vertido sin control estos desechos. (PDVSA, 2010)



Figura N° 3. Fosa de producción. (WOSS, 2011)

De acuerdo al tipo de residuo que se produce en las operaciones de perforación o producción, las fosas se clasifican en fosas de perforación, producción, servicio, muros quemadores y macrofosas.

Las fosas de producción, como la presentada en la Fig N° 3, se caracterizan por ser excavaciones en el suelo construidas con muros de contención. En estas fosas es posible encontrar: hidrocarburo emulsionado, sedimentos y agua salada, procedente de los procesos de deshidratación del crudo.

El crudo presente en las fosas de producción tiene características físicas y químicas muy variables de una fosa de producción a otra e incluso dentro de la misma fosa. Dado que el crudo está constituido por una mezcla compleja de componentes puros, aumenta la complejidad de la descripción de esta mezcla.

Es por ello que para caracterizar los crudos se emplean diversas técnicas; entre ellas el análisis SARA, el cual es una herramienta importante en cuanto a la caracterización de las fracciones más pesadas del crudo; este se basa en la diferencia de solubilidad, polaridad y peso molecular de los constituyentes presentes en el petróleo y de esta manera suministra el contenido de las fracciones de Saturados (S), Aromáticos (A), Resinas (R), y Asfaltenos (A), presentes. En la Tabla N°3, se puede apreciar el análisis SARA reportado de las fosas de producción Acema-100, Guara-2 y Merey-31.

Tabla N° 3. Análisis SARA para el hidrocarburo presente en distintas fosas de producción. (García, Gómez, González, 2012)

	<b>Acema-100</b>	<b>Guara -2</b>	<b>Merey-31</b>
Saturados (S)	44,47%	43,11%	15,84%
Aromáticos (A)	19,70%	18,79%	47,46%
Resinas (R)	29,22%	28,38%	24,96%
Asfaltenos (A)	6,91%	9,73%	11,74%

La fracción de los *Saturados*, son los hidrocarburos alcanos o parafinas, que constituyen la mayoría de los hidrocarburos del petróleo, están caracterizados por cadenas de átomos de carbono rectas (n-alcanos) o ramificadas (iso-alcanos). El contenido de cadenas ramificadas (isoalcanos) presentes en el crudo puede ser igual o mayor que el contenido de n-alcanos. Alcanos comunes en el petróleo pueden ser: metano, propano e isobutano. Los cicloalcanos (cicloparafinas o naftenos) son los compuestos más abundantes y abarcan típicamente cerca de 50% del petróleo crudo. Generalmente son estables y relativamente insolubles en agua.

El grupo de los *Aromáticos* está integrado por los hidrocarburos aromáticos o bencénicos, constituidos por núcleos de benceno y derivados alquil-sustituidos, usualmente constituyen alrededor de un 20 % del petróleo crudo. También están presentes compuestos aromáticos polinucleares o policíclicos. Los compuestos aromáticos son considerados como los componentes más tóxicos del crudo y se asocian a efectos crónicos y carcinógenicos. Muchos compuestos aromáticos de bajo peso son solubles en el agua, aumentando el potencial para la exposición a los recursos acuáticos. Como ejemplo de compuestos aromáticos mononucleares se puede nombrar el Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno (BTEX); y como ejemplo de compuestos aromáticos polinucleares se encuentran el naftaleno, antraceno, pireno y otros.

Las *Resinas*, son la fracción que se solubiliza cuando el petróleo se disuelve en un n-alcano pero se adsorbe en un material activo superficialmente. Las resinas son oscuras semisólidas, muy adhesivas, de peso molecular alto y su composición depende del precipitante empleado. Las resinas disuelven a los asfaltenos en la porción destilable del crudo y proveen de una transición entre las fracciones polares (asfaltenos) y las no polares del petróleo, es decir que previenen la acumulación de agregados polares que no pueden dispersarse en el crudo.

Por último, los *Asfaltenos*, son la fracción del crudo insoluble en solventes alifáticos de bajo peso molecular (pentano-heptano pero soluble en tolueno). Los asfaltenos son hidrocarburos cuya parte polar es un anillo aromático con grupos funcionales mientras que las partes apolares son cadenas alifáticas, tienen una alta complejidad macromolecular, por lo que solo se conocen las estructuras químicas promedio. Son la fracción sólida depositada de un crudo debido a la adición en exceso de n- pentano. Se caracterizan por ser moléculas planas, policromáticas, policíclicas que contienen heteroátomos y metales. Están en estado de agregación y suspensión estabilizados y rodeados por resinas, cargados eléctricamente. El contenido de compuestos aromáticos en los asfaltenos está entre 40%-60%. Un alto porcentaje de los anillos aromáticos están conectados en la estructura intermolecular, por eso las moléculas de asfaltenos presentan formas aplanadas. La matriz aromática está formada por los

aromáticos rodeados por anillos nafténicos y cadenas alifáticas con incorporación de grupos multifuncionales como: alcoholes, aminas primarias, aminas secundarias, ácidos, éteres, esterres y cetonas, así como heteroátomos de Azufre (S), Nitrógeno (pirrólicos, piridinilos y quirolícos), Oxígeno (hidroxilo, carbonilo, carboxílico y éter). En los asfaltenos se encuentran metales como níquel y vanadio.

El crudo bajo ciertas condiciones de presión, temperatura y composición hace que las resinas que se encuentren adsorbidas a la superficie de los asfaltenos, se transfieran a la fase líquida, por lo que los asfaltenos al quedar desprotegidos puedan agregarse y floculan. Para un crudo en particular, la cantidad de material precipitado generalmente es mayor mientras menor es la cantidad de carbonos del agente precipitante. Los problemas asociados con la precipitación de los asfaltenos están asociados a todo el proceso y causa daños, a la formación y taponamiento en sitio de pozo, en líneas de transporte y en equipos como columnas de separación así como la desactivación de catalizadores.

Existe una significativa diferencia entre los asfaltenos precipitados con n-heptano respecto a los precipitados con n-pentano, la relación H/C de los primeros es más baja, lo que indica su alto grado de aromaticidad. Las relaciones N/C, O/C y S/C son usualmente más altas en los asfaltenos precipitados con n-heptano, lo que se debe a la alta proporción de heteroátomos en esta fracción.

## **II.2. ESTABILIDAD DE LAS EMULSIONES W/O**

En las fosas de producción, el hidrocarburo presente se encuentra mezclado con agua, formando una emulsión. Una emulsión no es más que una mezcla de dos fases inmiscibles, la cual genera una fase continua y una fase dispersa; en el caso de una emulsión W/O, la fase continua es el aceite y la fase dispersa es el agua. Las emulsiones no son termodinámicamente estables porque su energía libre de formación es mayor que cero ( $\Delta G > 0$ ); esto le confiere, la tendencia natural a la separación de las fases; dicha inestabilidad, es el resultado de la energía asociada a la gran área interfacial de las gotas en el interior de la emulsión. Esta energía es

consecuencia del área total por la tensión interfacial que existe entre las fases de agua y aceite. (Marfisi y Salager, 2004)

La emulsión W/O presente en las fosas de producción, se encuentran estabilizadas por muchos factores entre ellos, los presentados en la Fig N°4, los cuales se explican a continuación.

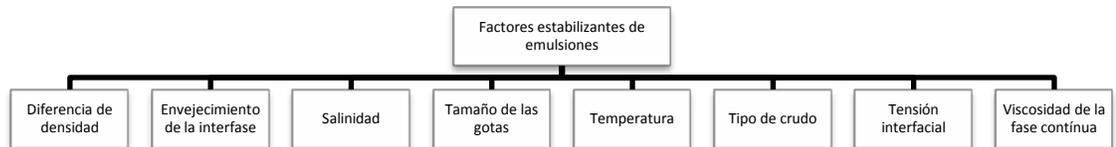


Figura N° 4. Algunos de los factores que contribuyen a la estabilización de las emulsiones.

(Elaboración propia)

(a) *Tensión interfacial*: es la energía libre existente en la zona de contacto de dos líquidos inmiscibles. Esta energía es consecuencia de las tensiones superficiales de los dos líquidos, y evita que se emulsionen espontáneamente. Cuando dos líquidos inmiscibles están en contacto, las moléculas en el interior del líquido se atraen unas a otras en todas direcciones. Sin embargo, en la zona de contacto de los líquidos las moléculas de cada líquido están en contacto con las del otro y experimentan fuerzas distintas, unas debidas a las moléculas de su fase y otras debidas a las moléculas de la otra fase. Al formarse la emulsión, el área de contacto entre los líquidos se incrementa notablemente, incrementándose la tensión interfacial. En consecuencia, la tensión interfacial tenderá a unir las gotas y reducir el área de contacto. Cuanta más alta sea la tensión interfacial del aceite, más difícil será romper la interfase y formar la emulsión, y, una vez conseguido, lograr que la emulsión sea estable será igualmente difícil.

(b) *Emulsionantes*: a mayor cantidad de emulsionantes mayor será la estabilidad de la emulsión.

(c) *Viscosidad de la fase continua*: a mayor viscosidad de la fase continua (hidrocarburo) mayor es la estabilidad de la emulsión. Las gotas de agua

encuentran mayor resistencia a su desplazamiento por eso se disminuye la capacidad de coalescencia y la decantación resulta más lenta.

- (d) *Tamaño de la gota*: gotas muy pequeñas menores de 10  $\mu\text{m}$  producen emulsiones muy estables.
- (e) *Relación volumen de las fases*: las emulsiones se hacen más estables cuando el volumen de la fase dispersa es menor. Esto implica menor tamaño del número de gotas; menor número de gotas y menor área interfacial. La distancia de separación aumenta esto disminuye la probabilidad de choques entre ellas.
- (f) *Temperatura*: al aumentar la temperatura se reduce la estabilidad de la emulsión W/O. El aumento de temperatura tiene el efecto de reducir la adsorción de surfactantes naturales y disminuir la viscosidad de la fase externa.
- (g) *pH*: La adición de ácidos o bases inorgánicos cambia radicalmente la formación de películas de asfaltenos y resinas que estabilizan las emulsiones agua-aceite, por lo que ajustando el pH se puede minimizar la rigidez de la película que estabiliza la emulsión y aumentar la tensión superficial.
- (h) *Envejecimiento de la interfase*: A mayor edad de la interfase mayor estabilidad porque el tiempo permite que los surfactantes migren a la interfase de la gota. La rigidez y el grosor de la película aumentan alrededor de la gota debido a la adsorción de los surfactantes y emolientes.
- (i) *Salinidad de la salmuera*: bajas concentraciones de sal favorecen la estabilidad de la emulsión W/O. Altas concentraciones de sal desestabilizan la emulsión.
- (j) *Tipo de aceite*: los hidrocarburos de base parafínica no forman emulsiones estables. Los hidrocarburos de bases nafténicas y mixtas forman emulsiones estables. Ceras, resinas, asfaltenos y otros sólidos tienen influencia en la estabilidad de la emulsión.
- (k) *Diferencia de Densidad*: La fuerza neta de gravedad que actúa en una gota es directamente proporcional a la diferencia de densidades entre la gota y la fase

continua. Aumentando la diferencia de densidades por incremento de la temperatura se logra aumentar la velocidad de sedimentación de las gotas y por ende se acelera la coalescencia.

- (1) *Presencia de cationes*: los cationes divalentes de calcio y magnesio tienen tendencia a producir una compactación de las películas adsorbidas, probablemente por efecto de pantalla electrostática por un lado, y por el otro, la precipitación de sales insolubles, en la interface, haciendo más rígida la película interfacial.

### II.3. TECNICAS PARA DESESTABILIZAR LAS EMULSIONES W/O

Dependiendo del tipo de aceite y de la disponibilidad de recursos, se combinan cualquiera de los métodos de deshidratación de crudo, presentados en la Fig. N° 5 y descritos a continuación.

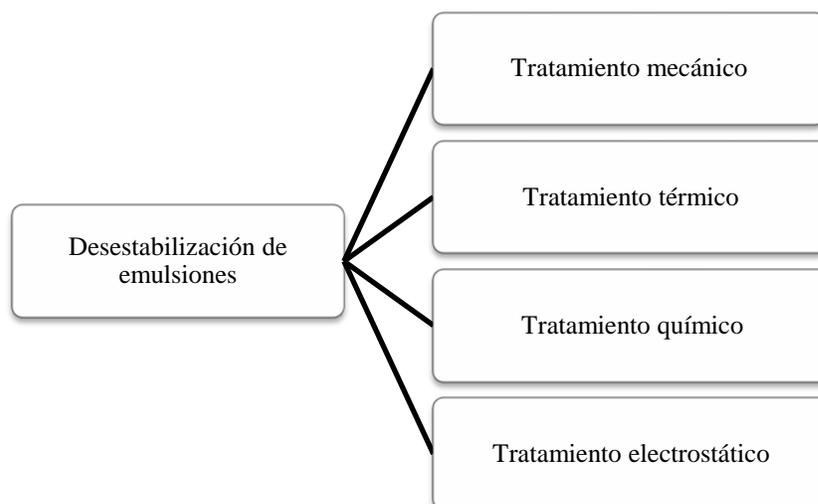


Figura N° 5. Sistemas de tratamiento empleados a nivel industrial para la desestabilización de emulsiones W/O. (Elaboración propia)

**II.3.1. Tratamiento mecánico:** se caracteriza por utilizar equipos de separación dinámica que permite la dispersión de las fases de la emulsión y acelera el procesos de separación gravitacional; entre ellos se encuentran los tanques de lavado, los cuales pueden tener tiempos de retención de horas. El tratamiento mecánico está acompañado en algunos casos del uso de demulsificantes químicos para obtener

mejores resultados. Su principal ventaja es el bajo costo asociado a su operación, sin embargo, requiere de tiempos de residencia elevados.

**II.3.2. Tratamiento térmico:** consiste en el calentamiento del crudo mediante equipos de intercambio de calor. El diseño de los calentadores cumple las siguientes funciones: a) desgasificado de la emulsión de entrada. b) remoción de arenas, sedimentos, y agua libre previo al calentamiento. c) lavado de la emulsión con agua. d) calentamiento de la emulsión. e) coalescencia y asentamiento de las gotas de agua. f) el aceite deshidratado caliente puede ser usado para calentar la emulsión. Como ventajas del tratamiento térmico, se puede mencionar que reduce la viscosidad de la fase continua, favorece la coalescencia, incrementa la diferencia de densidad entre la salmuera y el crudo, y debilita la película de emulsificante que rodea las gotas de agua. Sin embargo, un calentador requiere alrededor de 350 BTU para calentar un barril de crudo en 1°F. Adicionalmente, el calentamiento de agua provoca incrustaciones, lo que ocasiona el uso de un tratamiento químico aparte para prevenir las incrustaciones.

**II.3.3. Tratamiento químico:** Consiste en el uso de agentes tensoactivos constituidos por moléculas con carácter hidrofílico/lipofílicos parcialmente solubles en la fase continua (crudo) y en la fase dispersa (agua), debido a esta propiedad el químico empleado o demulsificante, se sitúa en la interfase de la emulsión y rompe la película interfacial que rodea a las partículas de la fase dispersa.

El demulsificante se caracteriza por presenta una fuerte atracción hacia la interfase agua-aceite, desplaza y neutraliza al emulsificante presente en la película interfacial; facilita la floculación de las gotas al neutralizar las cargas eléctricas repulsivas entre las gotas dispersas permitiendo el contacto entre las mismas; conduce a la coalescencia, al permitir que pequeñas gotas se unan a gotas más grandes, para esto se requiere que la película que rodea la gota sea rota. Los crudos pesados requieren mayor dosificación de desestabilizantes que los crudos medianos y ligeros. No obstante, un exceso de demulsificante incrementa los costos, incrementa el contenido de aceite en la salmuera separada y estabiliza la emulsión regular (agua/aceite)

pudiendo producir emulsiones inversas. La inyección temprana del demulsificante en la cabeza o fondo del pozo, permite mayor tiempo de contacto y previene la formación de emulsiones aguas abajo.

Como ventajas del tratamiento químico, cabe destacar que es un tratamiento preventivo que se puede utilizar desde tempranas etapas del proceso; la emulsión puede ser rota en frío, reduciendo los costos de calentamiento y la pérdida de gravedad asociada con el calentamiento. Sin embargo, como desventajas del tratamiento químico se tienen que sobredosificaciones de demulsificante causan producción de nuevas emulsiones más difíciles de desestabilizar; casi siempre implica un costo adicional ya que hay que separar usando calentamiento o electricidad para reducir el costo del tratamiento químico.

**II.3.4.Tratamiento eléctrico:** una de las técnicas más empleadas para el tratamiento de los crudos emulsionados, es el proceso de deshidratación electrostática, el cual consiste en someter una emulsión de agua en crudo (W/O) a un campo eléctrico intenso, generado por la aplicación de un alto voltaje entre dos electrodos. El dispositivo empleado en este proceso, generalmente tiene características similares a los equipos de separación mecánica presurizados, añadiendo a éstos el sistema de electrodos y de generación de 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. Generalmente un deshidratador electrostático está dividido en tres secciones (ver Fig. N°6).

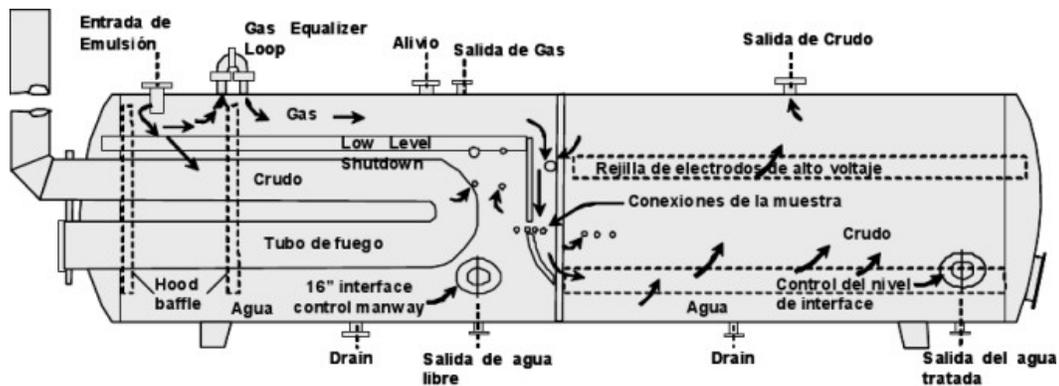


Figura N° 6. Deshidratador electrostático industrial. (Marfisi, 2005).

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 sección de calentamiento. La tercera sección ocupa el 40% de la longitud del deshidratador y es denominada “*Sección de asentamiento*” del agua suspendida para producir crudo limpio. Las parrillas o placas de electrodos de alto voltaje están localizadas en la parte superior del recipiente, por encima de la interfase agua-aceite. El deshidratador electrostático en comparación con el sistema de tanque de lavado, es menos afectado en su operación por las características del crudo (densidad, viscosidad), agua o agentes emulsionantes; ofrece mayor flexibilidad de operación; el tiempo de residencia asociado al proceso es relativamente corto y por otra parte, sus dimensiones son menores. Con el tratamiento electrostático se obtiene una mejor calidad del agua separada (Guzmán et al., 1996) y la emulsión presente puede ser rota a temperaturas muy por debajo de la requerida en el equipo que utiliza solo calentamiento, por lo que provocan menores problemas de corrosión e incrustación. (FIRP SS853, 2004)

#### II.4. SEPARACIÓN ELECTROSTÁTICA

La separación electrostática es un método de separación basado en la diferente atracción o repulsión de partículas cargadas bajo la influencia de un campo eléctrico. La aplicación de una carga electrostática o polarización de las partículas es un paso

necesario antes de que su separación pueda tener lugar. Tres son las técnicas más utilizadas para dotar a las partículas de dicha carga: a) electrificación por contacto entre materiales con propiedades muy diferentes. b) inducción conductiva. c) bombardeo de iones de gases atmosféricos.

Para el caso particular de la emulsión W/O, se cuenta con un material dieléctrico (crudo) el cual se caracteriza por no conducir la electricidad, este material se vuelve conductor cuando se sobrepasa el campo de ruptura del dieléctrico. Esta tensión máxima se denomina *rigidez dieléctrica*, es decir, si aumenta mucho el campo eléctrico que pasa por el dieléctrico convertiremos dicho material en un conductor. Los diferentes materiales que se utilizan como dieléctricos tienen diferentes grados de *permitividad*. La *constante dieléctrica* de una sustancia da una idea de la resistencia que ejerce la sustancia al campo eléctrico. El crudo es un material dieléctrico y las gotas de agua emulsionada incrementan su constante dieléctrica, y por lo tanto su *capacitancia*. Puesto que la constante dieléctrica del agua (80 A/cm) es mucho mayor que la del crudo (2.2 A/cm), la inducción del agua emulsionada en el crudo es más rápida que si estuviera únicamente presente el crudo. Esto disminuye la resistencia eléctrica del crudo, por lo cual aumenta la rapidez de la coalescencia eléctrica. Las propiedades del dieléctrico son producto de la polarización de la sustancia, ya que al colocar el crudo bajo la influencia de un campo eléctrico las moléculas que lo forman se polarizan produciendo una deformación, que se conoce como polarización producida por deformación.

#### **II.4.1. Campo eléctrico**

El campo eléctrico se define, como la región del espacio en la que cualquier carga situada en un punto de dicha región experimenta una acción o fuerza eléctrica. El tipo más simple de campo eléctrico es el campo electrostático inducido por cargas estacionarias. Dos cargas eléctricas puntuales se repelen una a la otra cuando son de la misma polaridad y se atraen cuando son opuestas. Estos fenómenos siguen la ley de Coulomb, la cual enuncia que dos cargas ( $q_1$ ,  $q_2$ ), de tamaño mucho menor que la distancia que las separa ( $d$ ), la fuerza entre ellas varía en forma directa con el producto de sus cargas e inversa con el cuadrado de las distancias entre ellos.

$$F = \frac{q_1 \cdot q_2}{4\pi\epsilon_0 d^2} \quad (\text{Ecuación 1})$$

donde,

$\epsilon_0$  : permitividad del vacío cuyo valor es  $8,85 \times 10^{-12} \frac{F}{m}$

Los campos generados, pueden ser homogéneo y no homogéneo. El campo eléctrico homogéneo, es el generado por dos electrodos planos o un condensador de placas paralelas, donde las líneas de campo son paralelas; este campo mueve cargas libres hacia los electrodos donde el campo eléctrico se calcula como:

$$E = \frac{V}{D} \quad (\text{Ecuación 2})$$

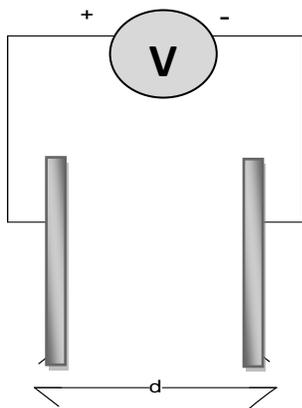
donde,

E: campo eléctrico (V/m)

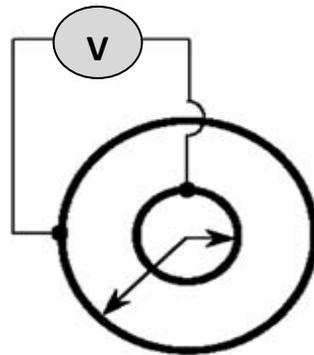
V: voltaje (V)

D: distancia entre los electrodos (m)

Por otra parte, el campo eléctrico no homogéneo, es aquel en donde las líneas de fuerza tienen una trayectoria arbitraria, es decir, no son paralelas. En la Fig N° 7 se presenta un ejemplo de campo homogéneo y no homogéneo.



(a) Condensador de placas paralelas



(b) . Cilindros coaxiales

Figura N° 7. (a) Campo eléctrico homogéneo. (b) Campo eléctrico no homogéneo. (Sjoblom, 2006)

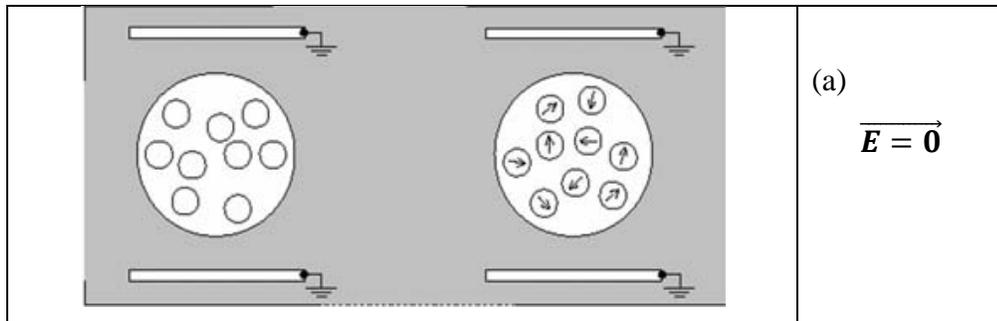
Un campo eléctrico aplicado polariza el medio, por lo que, la polarización es directamente proporcional al campo eléctrico. En los líquidos hay dos mecanismos de polarización.

- (a) El primero de ellos, la polarización electrónica, la cual es universal y surge del campo inducido por el reordenamiento de las nubes electrónicas de las moléculas.
- (b) El segundo mecanismo se llama polarización de orientación, y es específico de los materiales polares, ya que sus moléculas tienen un momento dipolar permanente (caso del agua), por lo que al aplicar el campo, tiende a alinear los dipolos a lo largo de su dirección.

Dentro de un material dieléctrico, la polarización induce un campo eléctrico que, en parte contrarresta el campo eléctrico aplicado. La constante dieléctrica da una medida de la capacidad de compensación.

Las gotas de agua presentes en el crudo se pueden cargar por otros procesos como la transferencia carga de otros organismos, la transmisión de la electrificación, la adsorción de los iones polares en la superficie de una gota (adsorción preferencial), y por la ruptura de la gota debido a la polarización.

En la Fig N° 8 se puede apreciar la polarización de una esfera conductora (derecha) y una esfera aislada (izquierda). En ausencia de campo eléctrico (Fig N° 8(a)), las cargas libres están uniformemente distribuidas y orientadas al azar dipolos. Con la aplicación del campo eléctrico (Fig N° 8(b)) la esfera conductora se polariza por el desplazamiento de las cargas negativas libres, ya que los dipolos tratan de alinearse con las líneas de campo eléctrico. Como la gota se ioniza la gota tendrá dos polos uno positivo y el otro negativo, los cuales se separarán de la superficie la gota y proporcionara una carga neta.



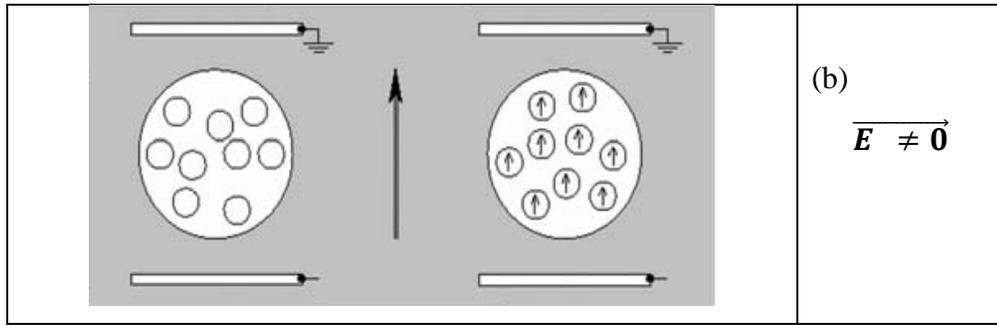


Figura N° 8. Efecto de la polarización ante un campo eléctrico uniforme. (a) Sin campo eléctrico. (b)

Con campo eléctrico. (Sjoblom, 2006)

Las cargas negativas libres se han trasladado al electrodo positivo, y la esfera conductora se queda con carga neta positiva. Cuanto más alargada sea la partícula que se encuentra en la dirección del campo mayor será la carga. La esfera dieléctrica no tiene cargas libres y se queda con carga neta cero.

Cuando un cuerpo conductor, como una gota de agua golpea un plano metálico con un campo eléctrico, la partícula recibirá una carga neta  $Q$ . Para una esfera de radio  $a$  en un líquido de *permitividad*  $\epsilon$  se trata de

$$Q = \frac{\pi^2}{6} \pi E_0 4 \epsilon r^2 \quad (\text{Ecuación 3})$$

donde,

$E_0$ : campo eléctrico aplicado.

$\epsilon$ : permisividad

$r$ : radio de la gota

Las distintas fuerzas electrostáticas que pueden actuar en una gota, dependen de la carga, la polarización de un cuerpo (gota de agua) y la distribución del campo eléctrico externo. En el caso de una gota de agua, que siempre es mucho más conductora que el medio de suspensión, el campo eléctrico dentro de la gota es cero y la situación es formalmente equivalente a un medio de permitividad infinita. (Sjoblom, 2002).

#### II.4.2. Corriente Alterna.

Se denomina corriente alterna (**AC**) a la corriente eléctrica donde la magnitud y dirección varían cíclicamente. Dado que este tipo de corriente varía cíclicamente, es

posible encontrar diferentes tipos de onda para corriente AC, según su aplicación. En la Fig N° 9, se pueden observar los distintos tipos de ondas.

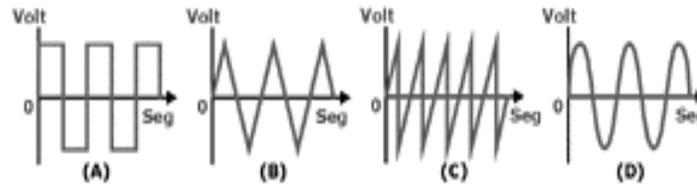


Figura N° 9. Tipos de onda de corriente alterna AC.

A) Pulsante, B) Triangular, C) Diente de sierra. D) Senoidal. (Serway, 2004)

La forma de onda de la corriente alterna más utilizada es la onda senoidal (Fig N° 10), puesto que se consigue una transmisión más eficiente de la energía, es por ello que este tipo de onda se utiliza para distribuir la electricidad a los hogares y empresas.

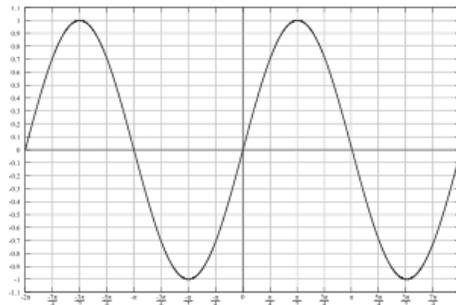


Figura N° 10. Onda senoidal de corriente alterna (AC). (Serway, 2004)

La razón del amplio uso de la corriente alterna (AC) viene determinada por su facilidad de transformación, cualidad de la que carece la corriente continua (DC). En el caso de la corriente continua la elevación de la tensión se logra conectando dínamos en serie, lo cual no es muy práctico; al contrario en corriente alterna se cuenta con un dispositivo, el transformador, que permite elevar la tensión de una forma eficiente. En Venezuela, la tensión de la corriente es de 110 ó 120 volt, con una frecuencia de 60 Hz.

#### II.4.3. Procesos involucrados en la desestabilización de emulsiones.

En la desestabilización de emulsiones se presentan en conjunto los procesos de sedimentación, floculación y coalescencia. La prevalencia de cualquiera de ellos, depende de la presencia de los factores de estabilización de las emulsiones.

(a) Sedimentación: se produce debido a la diferencia de densidades entre las fases, en este fenómeno el tamaño de la gota no cambia y por agitación el proceso es reversible. Las emulsiones con tamaño de gota menor de 0,1  $\mu\text{m}$  tienen estabilidad cinética porque predomina el movimiento browniano. El proceso de sedimentación es descrito mediante la ecuación de Stokes.

(b) Floculación: Se origina por formación de agregados de gotas, tienen un efecto aparente de aumentar el tamaño de las partículas, es aparente porque acelera la velocidad de sedimentación pero no las separa definitivamente del sistema.

(c) Coalescencia: proceso irreversible donde se fusionan dos o más gotas más grandes y conduce a la separación de las fases de la emulsión.

(d) Maduración de Ostwald: este mecanismo ocurre en la inestabilización de nanoemulsiones. Consiste en la difusión de la fase interna de las gotas más pequeñas hacia las más grandes debido a una diferencia de presión. Este proceso depende de la solubilidad del agente emulsionante en la fase externa; mientras este sea menos soluble en la fase continua, la maduración será más retardada. La presión dentro de la gota de emulsión se llama presión de Laplace y para emulsiones mono dispersas, viene dada por la expresión.

$$\Delta P = \frac{2*\gamma}{r} \quad (\text{Ecuación 4})$$

donde,

$\Delta P$ : presión de Laplace

$\gamma$ : Tensión interfacial

#### *II.4.3.1. Mecanismo de coalescencia de las gotas en una emulsión.*

La desestabilización o ruptura de una emulsión se plantea como un mecanismo que se lleva a cabo en tres etapas (Marfisi, 2005), las cuales se describen a continuación:

(a) Acercamiento macroscópico de las gotas: consiste en el acercamiento de dos o más gotas con diámetros entre 1 y 100  $\mu\text{m}$ . En el fenómeno intervienen la sedimentación gravitacional, descrita por las leyes de Stokes, considerando el movimiento conectivo interno de las gotas y el efecto de viscosidad de las gotas.

(b) Drenaje de la película intergota: al final de la etapa de acercamiento macroscópico de las gotas, éstas sufren deformaciones que consisten en adelgazamientos del orden de las 0,1 micras o menores y se genera una película de grosor de 500 Å, entre dos gotas. Comienza la etapa de drenaje de películas intergota, donde básicamente, están involucrados fenómenos interfaciales relacionados con los surfactantes adsorbidos, donde se produce un gradiente de concentración que reduce el valor local de la tensión interfacial. La velocidad de drenaje de la película intergota depende la viscosidad interfacial y el gradiente de tensión; sin embargo hay factores retardadores del drenaje como:

- Repulsión electrostática: se refiere a la repulsión que ejercen mutuamente los cationes que constituyen la bicapa.
- Repulsión estérica: interacciones que ejercen los grupos lipofílicos de las moléculas de surfactantes u otros compuestos de actividad interfacial con cadenas laterales voluminosas que impiden la coalescencia a causa de los efectos del volumen de las moléculas en el espacio.
- Efectos electroviscosos: se presenta debido a la disociación del surfactante natural en un ion adsorbido (catión) y un ion liposoluble presente en la doble capa del lado del aceite. Al drenarse la película intergota, ocurre un arrastre de los iones de la doble capa lo que produce una deslocalización de la carga y resulta el efecto llamado potencial de flujo.
- Aumento de la viscosidad interfacial: se produce por la formación de una película interfacial rígida por las interacciones laterales entre las moléculas de surfactantes adsorbidas y por la movilización de la capa de aceite que solvata las colas lipofílicas del surfactante.

(c) Coalescencia: es un fenómeno irreversible donde las gotas se unen unas con otras perdiendo su identidad. El área interfacial se reduce, se reduce la energía libre del sistema. Se produce al vencerse las barreras energéticas asociadas con las capas de emulsionante adsorbido y se drena la película de la fase continua entre

dos gotas. Involucra la presión de Laplace que es la presión producida por la curvatura de una superficie.

En la Fig N° 11, se presenta un esquema de las etapas del mecanismo de desestabilización de emulsiones, descritas anteriormente.

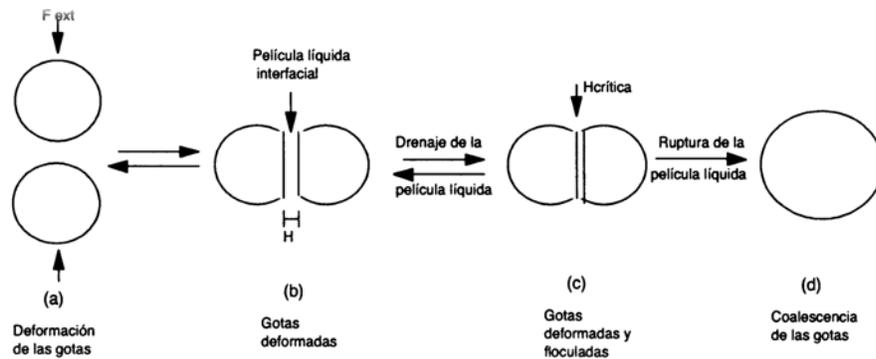


Figura N° 11. Esquema del mecanismo en tres etapas de la desestabilización de las gotas emulsionadas.

(a) acercamiento. (b) y (c) drenaje de la película. (d) coalescencia. (Méndez, 2004)

#### II.4.3.2. Interacciones de la fase dispersa ante un campo eléctrico

Una gota suspendida entre dos electrodos es afectada por fuerzas electrostáticas e hidrodinámicas. Las *Fuerzas electrostáticas*, donde se consideran la electroforesis, dielectroforésis y dipolo-dipolo (ver Fig N° 12).

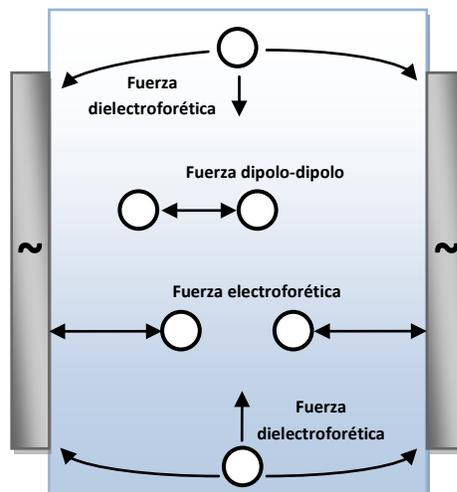


Figura N° 12. Fuerzas electrostáticas presentes con la aplicación de campo eléctrico.

(Elaboración propia)

(a) Electroforesis: las fuerzas electroforéticas son las causantes del movimiento resultante de un campo eléctrico que actúa sobre una gota cargada. Consiste en fuerzas repulsivas y atractivas que se presentan en campos eléctricos uniformes de corriente tanto directa como alterna. Estas fuerzas decaen con la distancia. La fuerza electroforética es proporcional al campo aplicado y a la carga; por lo que la dirección de la fuerza depende de la polaridad de la carga y la dirección del campo eléctrico. El campo eléctrico aplicado depende de distintos parámetros, donde al basándose en la ley de Ohm se tiene que,

$$V=I \times R \qquad \text{(Ecuación 5)}$$

donde,

V: diferencia de potencial (V)

R: resistencia ( $\Omega$ )

I: intensidad de corriente (A)

En el caso de que la partícula se someta a un campo homogéneo de corriente alterna la partícula oscila, pero no se observa un desplazamiento neto. Este tipo de fuerzas, no dependen de las propiedades de los materiales.

La fuerza electroforética entre dos gotas cargadas cae inversamente con el cuadrado de la distancia que las separa. La carga máxima que una gota de agua podrá adquirir a partir de un electrodo en un campo homogéneo, sin tener en cuenta la desintegración debido a la caída de las fuerzas eléctricas, es directamente proporcional al radio de la gota. En función de la polaridad de las gotas, las fuerzas pueden ser atractivas o repulsivas. Estas fuerzas sólo desempeñan un papel en el proceso de electrocoalescencia cuando las gotas son adyacentes y llevan cargas de polaridad opuesta. Además, las gotas cargadas, pierden su carga por conducción a través del transporte en la fase continua. Otro factor que afecta significativamente a la electroforesis es la temperatura, ya que por el efecto Joule

el paso de una corriente eléctrica va a producir calor y este es directamente proporcional a la diferencia de potencial y a la resistencia. Por lo tanto, es necesario controlar de manera estricta la temperatura para que esta no afecte a la muestra.

(b) Dielectroforésis: son fuerzas que no requieren de carga neta, sino que dependen de las propiedades de los materiales. Estas fuerzas sólo se plantean para los campos no homogéneos de corriente continua o alterna, ya que genera un movimiento de partículas causado por los efectos de la polarización. Es un fenómeno que decae con la distancia.

Las fuerzas dielectroforéticas entre las gotas de agua se deben al momento dipolar de las gotas inducidas por el campo externo. Para ambos tipos de corriente es igual de relevante. Asumimos como una primera aproximación que las gotas de agua son esferas conductoras en una fase continua de crudo, sin tener en cuenta la conductividad del crudo. Cuando las gotas son sometidas a un campo externo se debe inducir la carga entre ellos para que el campo interior de la gota se aproxime a cero. Las cargas en cada hemisferio tendrán la misma magnitud pero polaridad opuesta. El campo en cada polo o extremo de las placas será mayor que el campo del medio por un factor de 3; cuando dos gotas polarizadas se acercan entre sí, las gotas experimentan el campo no homogéneo, y cualquiera de las gotas puede atraerse o repelerse, dependiendo de su posición relativa en el campo externo.

Las fuerzas electroforéticas y las dielectroforéticas decaen con la distancia. Cuando las gotas están lejos unas de las otras éstas fuerzas pueden ser despreciables. A cortas distancias, deben ser consideradas las distribuciones de la carga y la geometría de la gota.

(c) Interacciones Dipolo –Dipolo: consiste en la atracción electrostática entre el extremo positivo de una molécula polar y el negativo de otra, sólo son eficaces a distancias muy cortas. Los átomos no combinados y las moléculas poco polares experimentan fuerzas de atracción débiles a causa del movimiento desordenado que los electrones tienen en el átomo. Cuando los electrones se mueven en un átomo, existe la posibilidad de que en un instante haya más densidad electrónica

en un lado del núcleo que del otro. El dipolo instantáneo de una molécula induce un momento dipolar de la molécula adyacente al distorsionar su distribución electrónica. Esto genera un dipolo transitorio y los dipolos instantáneos se atraen entre sí.

*Fuerzas hidrodinámicas*, se consideraran cuando hay movimiento del fluido de la fase continua. Las fuerzas consideradas en este caso son las fuerzas mecánicas y de arrastre.

*Fuerzas mecánicas*: como fuerzas mecánicas están presentes las fuerzas de la gravedad, la inercia, y los efectos viscosos. La fuerza de empuje es función de la densidad de las fases, la fuerza de gravedad y el volumen de la gota. En las emulsiones con gotas muy finas ( $<10 \mu\text{m}$ ), la sedimentación se ve obstaculizada por la absorción de pequeñas partículas en la superficie de la gota.

*Fuerza de arrastre*: en el estado estacionario, las fuerzas de arrastres son las fuerzas que actúan sobre una gota en un campo de presión uniforme cuando no hay la aceleración de la gota en relación con el fluido de transporte. La fuerza de arrastre es función de la velocidad relativa de las partículas en el medio, la densidad de la gota, el número de Reynolds de la gota. (Sjoblom, 2006)

## **II.5. SOLVENTES ORGANICOS**

En general el término solvente se refiere a sustancias capaces para disolver otras sustancias, es decir, capaces de destruir la agregación de un cuerpo soluble. Los solventes orgánicos son compuestos orgánicos volátiles basados en el elemento químico carbono. Se utilizan solos o en combinación con otros agentes para disolver gases, líquidos o sólidos, utilizándose en algunos casos para reducir la viscosidad. La disolución se da frecuentemente cuando las interacciones soluto-disolvente son similares a las interacciones disolvente-disolvente, lo que se refleja en la expresión *lo semejante disuelve a lo semejante*. De ahí que los solutos polares se disuelvan en disolventes polares, mientras que los solutos no polares se disuelven en disolventes no polares. En la Tabla N° 4, se presenta una clasificación de los solventes orgánicos más comunes.

Al diluir el material de fosa con un solvente parafínico, se genera la precipitación de asfaltenos, mientras que al emplear un solvente aromático la fracción de asfaltenos se diluye. Esto es motivado a la afinidad de los compuestos asfaltenicos con los compuestos aromáticos y a la repulsión o poca afinidad que tienen los mismos con los compuestos parafínicos. (Méndez, 2005)

Tabla N° 4. Clasificación de los solventes orgánicos. (Elaboración propia).

<b>Grupo Químico</b>	<b>Nombre del solvente</b>
Aromáticos	benceno, tolueno, xileno, etilbenceno, estireno
Alifáticos	hexano, heptano, octano, nonano, decano, undecano, dodecano, tridecano, tetradecano
Hidrocarburos clorinados	tricloroetileno, tetracloroetileno, metilcloroformo
Éteres	dietil éter, dioxano
Esteres	metil acetato, etil acetato, butil acetato
Clorofluorocarbonos	fluorotriclometano, trifluoroetanol
Misceláneas	n-hexano, disulfuro de carbono, dimetilformamida

## II.6. MICROSCOPIA OPTICA

La microscopía óptica es la técnica que emplea el microscopio óptico para el análisis de imágenes. El microscopio óptico por su parte, es un instrumento que aumenta el tamaño de la imagen y permite ver con más detalle lo que sería imposible ver a simple vista. Al incorporar una cámara de video al microscopio, surge la técnica de la video-microscopía, la cual combina el poder de magnificación de un microscopio con la capacidad de adquisición de imágenes de la cámara de video. De una imagen o serie de imágenes, se obtiene un conjunto de datos con información de la muestra. Para el caso donde la muestra es una emulsión, la información típica que se puede encontrar en las imágenes es el estado de la muestra, geometría y dispersión, tamaño de partícula y concentración. 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, percolación y coalescencia, los cuales son parámetros fundamentales para el entendimiento del comportamiento de la emulsión y la estabilidad de la misma, frente a un campo eléctrico. Es por ello que, la video-microscopía se relaciona con las técnicas de análisis de imágenes, realizadas frecuentemente con la ayuda de un computador. El software de análisis de imágenes

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

En esta técnica, la toma apropiada de la muestra es un paso crítico, ya que de ella depende la imagen a analizar. La muestra en estudio (emulsión) es tridimensional y mientras que la imagen obtenida por el microscopio es en dos dimensiones, por lo que para proveer información sobre el volumen de las gotas, se hace necesario considerar la profundidad de campo a cierta magnitud.

Una imagen contiene mucha información que puede ser útil de diferentes maneras cuando se intenta describir la muestra; sin embargo, para determinar el tamaño de partícula y distribución de tamaño, el procedimiento de medición utiliza solo una pequeña cantidad de toda la información.

El procedimiento de análisis de muestras emulsionadas, busca distinguir las gotas de sus alrededores (fondo) y de sí mismas; para ello se definen parámetros con el fin de distinguir las gotas del fondo. Esto típicamente se logra por la definición de un umbral en la escala de colores o valores de pixel característicos de las gotas. Luego se representan las medidas de cada una de las gotas definidas, basado en un criterio de forma, donde una gota posee una curvatura monótona y una ruptura en su monotonía representa un contacto gota-gota (Sjoblom, 2006). El empleo de software, automatiza el procedimiento y facilita el proceso de decisión al definir las gotas. En este estudio, se utiliza el software Imagen PRO PLUS para el análisis de las imágenes. Muestras fácilmente analizables son típicamente diluidas y no floculadas, con una estrecha distribución de tamaño de gotas. (Fung, 2011)

## **II.7. ANALISIS DE PARTICULAS**

Para analizar los fenómenos de separación electrostática mediante el uso de corriente alterna, se debe hacer uso del análisis estadístico; esto se hace empleando la distribución de frecuencias, automatizando la manipulación de resultados con una macro elaborada en Excel, por Fung (2011). Para este caso en particular la agrupación está dada por el tamaño de partículas medida en micras ( $\mu m$ ).

El tamaño de las partículas se define en términos de una característica geométrica como volumen, longitud, superficie y área proyectada, pero es habitual referir el tamaño de las partículas a dimensiones de longitud. De esta manera se introduce el concepto de diámetro equivalente lo cual se refiere al tamaño de una esfera que tiene que misma propiedad medida que la partícula. (Sorrentino, 2002).

La distribución de tamaño de partículas, es un parámetro importante ya que indica la mezcla de diferentes tamaños y formas de partículas, esta característica de la muestra, o grupo de partículas afectan su conducta en los procesos.

Para establecer la distribución del tamaño de partículas se consideran dos criterios:

- (a) El criterio de pertenencia, el cual establece cómo las partículas están agrupadas en tamaños de clases; se utilizan las graficas de Densidad de Distribución y Distribución Acumulada.
- (b) El criterio de cuantificación, el cual se refiere a la cantidad de partículas determinadas, que se cuentan en cada clase, denota si la cantidad está basada en número, volumen, masa o área de partículas. (Sorrentino, 2002).

### **II.7.1. Distribución acumulada de tamaño de partículas $Fr(x_i)$ .**

En general, la distribución acumulada muestra la cantidad de datos que tienen un valor menor o igual al límite superior de cada clase. Por lo tanto, la distribución acumulada en la muestra emulsionada, se refiere a la cantidad de partículas (gotas de agua) que son más pequeñas que un cierto tamaño de partículas. En la figura N° 13 se presenta la representación gráfica de la distribución acumulada de partículas.

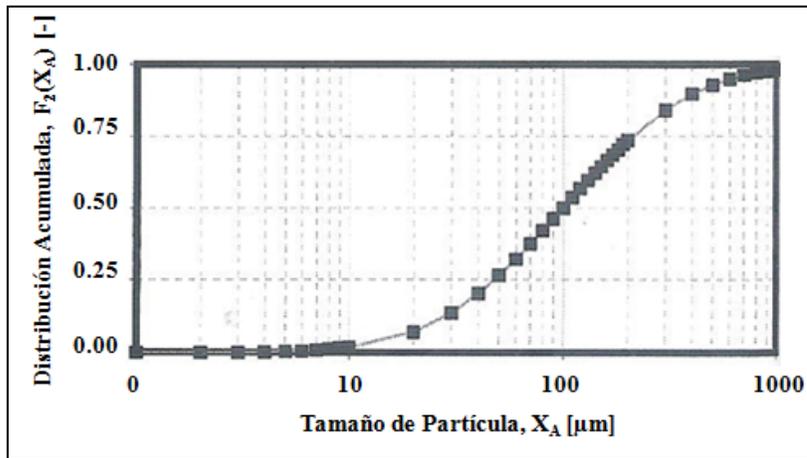


Figura N° 13. Distribución acumulada de tamaño de partículas (Sorrentino, 2002).

La distribución de frecuencia acumulada  $F_r(x)$  debe ser adimensional, pero tiene dimensiones de fracción total de partículas cuantificadas que pertenecen a un intervalo.

## CAPITULO III

### METODOLOGIA EXPERIMENTAL

En este capítulo presenta la metodología experimental desarrollada, comenzando con la descripción de los equipos empleados en el desarrollo del Trabajo Especial de Grado.

#### III.1. EQUIPOS EMPLEADOS

Los principales equipos empleados son:

- El microscopio óptico en combinación con el software Imagen ProPlus.
- El circuito eléctrico de corriente alterna de alto voltaje.

##### III.1.1. Microscopio óptico NIKON MED-600

El microscopio óptico **NIKON MED-600**, se utilizó con el fin de capturar las imágenes para analizar, de las emulsiones con los hidrocarburos provenientes de las fosas de producción. Este microscopio, el cual se puede observar en la Fig N°15.a), consta de los siguientes sistemas:

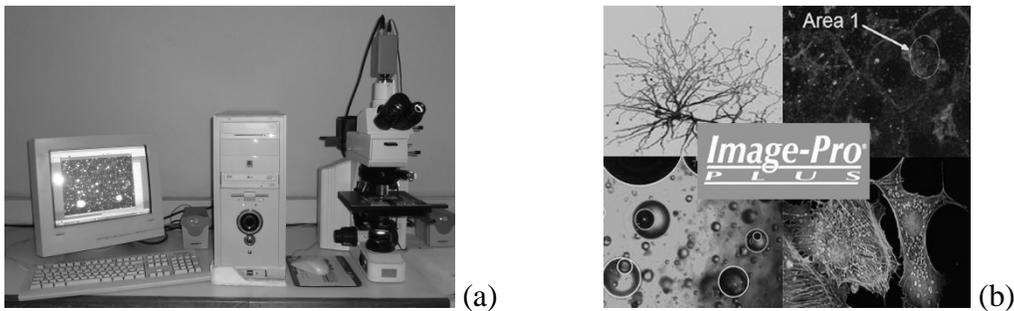


Figura N° 14. a) Microscopio NIKON MED-600. b) Software Image Pro Plus. (Elaboración propia)

*Sistema óptico:* constituido por los lentes oculares, los objetivos de 5x, 10x, 20x y 100x, diafragma, condensador. Estas piezas son las responsables de producir el aumento de las imágenes observadas.

*Sistema mecánico:* constituye la parte que ofrece un soporte a la parte óptica y permiten la movilidad de la muestra para lograr el enfoque óptimo. Entre ellas se encuentran: platina, carro, tubo, revolver y tornillos de ajuste.

*Sistema de iluminación:* tiene como finalidad dirigir la luz hacia la muestra que se desea observar. Está integrado por: lámpara, condensador, diafragma.

El microscopio óptico, consta adicionalmente de una cámara captadora de imágenes CCD; esta cámara permite tomar fotos de las imágenes que son observadas en el microscopio.

### **III.1.2. Programa IMAGE PRO PLUS**

El programa de análisis de imágenes empleado fue Image Pro Plus de Media Cybernetics (Fig N°14.b), cuya licencia fue adquirida por el Laboratorio de Separaciones Mecánicas de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Central de Venezuela.

Entre las características más importantes de este software se tienen:

- (a) Captura fácilmente imágenes y videos, tomadas 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 tanto simples como complejas (relaciones de estructura y función).
- (d) Examina, compara y visualiza datos para alcanzar máximos resultados.

### **III.1.3. Circuito de corriente alterna de alto voltaje**

El montaje del circuito de corriente alterna, fue ensamblado en el Laboratorio de Separaciones Mecánicas de la Escuela de Ingeniería Química de la UCV, con la colaboración de la Escuela de Ingeniería Eléctrica (Departamento de Potencia: Prof. W. Malpica). En la Fig N° 16, se puede observar un esquema del circuito de corriente alterna de alto voltaje empleado, el cual puede proporcionar hasta un voltaje de 7200 voltios.

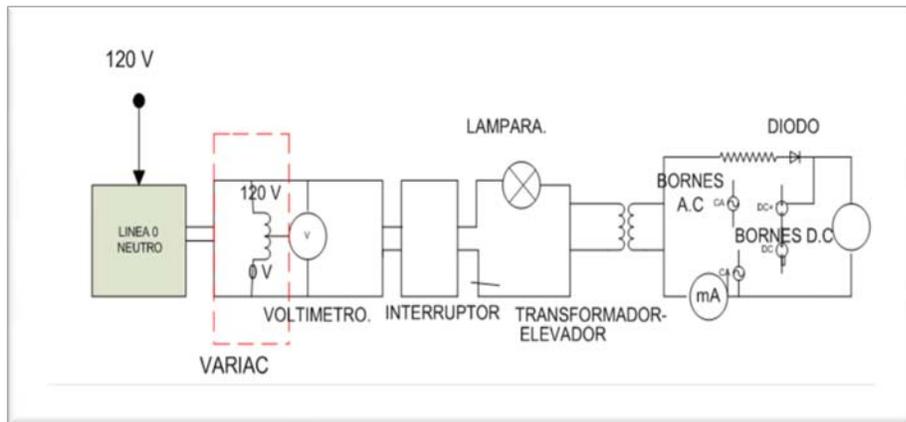


Figura N° 15. Esquema del circuito de corriente alterna de alto voltaje. (Elaboración propia)

Este circuito está integrado por los siguientes equipos: variac, voltímetro, amperímetro, diodos, transformado, bornes, lámpara. En la Tabla N° 5, se presentan algunos de los elementos que constituyen el circuito eléctrico de corriente alterna.

Tabla N° 5. Elementos del circuito de corriente alterna. (Elaboración propia)

	<p>El variac, es un transformador que varía o disminuye la tensión en los circuitos de corriente alterna.</p>
	<p>El voltímetro, es un dispositivo empleado para medir la diferencia de potencial.</p>
	<p>El amperímetro, es un dispositivo que se usa para medir la la intensidad de corriente, en el circuito.</p>

	<p>El transformador es un dispositivo empleado en los circuitos eléctricos para cambiar e voltaje (aumentarlo o disminuirlo), que fluye en el circuito. En este caso se utiliza para incrementar el voltaje de 120V a un máximo de 7200V.</p>
	<p>Dispositivos de seguridad, los cuales alertan sobre algún evento como la presencia de corto circuito dentro del sistema empleado. Estos son un breaker y un bombillo de alarma.</p>

El uso integrado de estos dispositivos, constituye el circuito de corriente alterna de alto voltaje, presentado en la Figura N° 16.



Figura N° 16. Circuito de corriente alterna de alto voltaje. (Elaboración propia)

### III.2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Luego de presentados los principales equipos empleados, a continuación se establece la metodología implementada para el alcance de los diferentes objetivos del presente Trabajo Especial de Grado.

### **III.2.1. Preparación de mezclas fosas-solvente, con solvente aromático y parafínico que posean iguales viscosidades.**

Se fijó como referencia la viscosidad de la fosa Acema-100 debido a que fluye con facilidad de manera continua y permite obtener una buena imagen en el microscopio. Se determinó su tiempo de escurrimiento, usando el principio Saybolt, el cual da una idea de la viscosidad. Este principio se basa en la facilidad que tiene un fluido de fluir a través de un orificio de diámetro pequeño; es una medida de carácter relativo ya que aunque se basa en un principio no expresa la viscosidad en sus unidades fundamentales. Se prepararon diluciones en volumen, con dos de los materiales de fosas en estudio (Guara-2 y Merey-31) y los solventes considerados: aromático (xileno) y parafínico (hexano), en proporción tal que se obtuviera un tiempo de escurrimiento similar al de la fosa Acema-100.

Para la preparación de las diluciones, se tomaron las medidas de seguridad al manipular los solventes y las muestras, por lo que se trabajó dentro de la campana, usó lentes de seguridad, tapaboca y guantes. Se etiquetaron los frascos de vidrio para identificar las muestras con el nombre de la fosa, la dilución y el nombre del disolvente. Luego de colocarse las proporciones de las diferentes diluciones en los envases identificados se agitó la mezcla durante 10 minutos, utilizando agitación manual para homogeneizar.

#### *III.2.1.1. Medición del tiempo de escurrimiento de las muestras diluidas.*

Se consideró como tiempo de escurrimiento de referencia, el obtenido por la fosa Acema-100 sin diluir. En este sentido se compararon los valores de las mediciones realizadas por dos experimentadores. Por lo que se tomaron mediciones independientes del parámetro tiempo de escurrimiento para las fosas Acema-100, Guara-2 y Merey-31, (estas dos últimas diluidas con los dos tipos de solventes: hexano, xileno). El montaje realizado para medir los tiempos de escurrimiento se presenta en la figura N° 17.

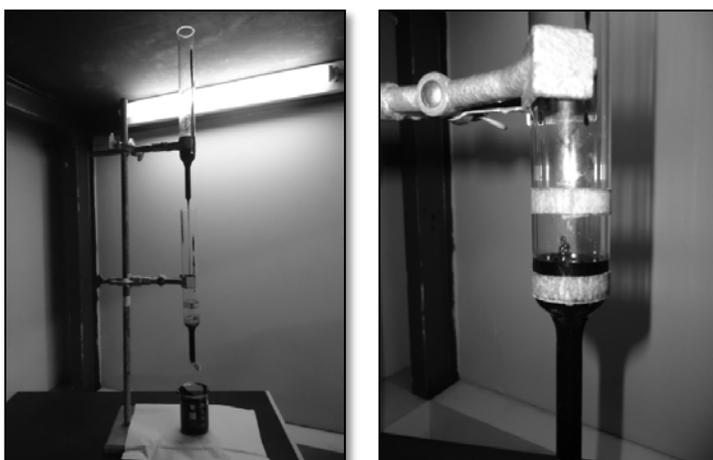


Figura N° 17. Montaje para determinar tiempo de escurrimiento (Fung, 2011).

Los materiales de las muestras de las fosas son fluidos opacos, por lo que se midió el tiempo en el cual la muestra ascendía desde la marca inferior hasta la marca superior del cilindro ubicado en la parte baja del sistema.

Una vez obtenido el tiempo de escurrimiento de la muestra Acema-100 sin diluir, se prepararon las diluciones de los materiales de las fosas Merey-31 y Guara-2, usando hexano o xileno, hasta conseguir diluciones que tuvieran la fluidez similar a la de la muestra de referencia: Acema-100 sin diluir.

### **III.2.2. Comparar el tipo de diluyente, al aplicar corriente alterna a diferentes voltajes**

Para realizar esta comparación se analizaron las muestras en el microscopio óptico, antes y después de la aplicación de la corriente eléctrica alterna. Para ello se sometieron en la “celda de observación” (Fig. N° 18), las muestras del material de las tres fosas Acema-100, Guara-2 y Merey-31, (estas dos últimas diluidas con los dos tipos de solventes: hexano o xileno) a voltajes de corriente alterna de 2, 4 y 6 KV/cm a una frecuencia fija de 60 Hz, durante un tiempo de 90 segundos, con una separación entre los electrodos de 0,5 cm. Se utilizó el montaje del circuito de corriente alterna (Fig. N° 16) acoplado al microscopio óptico (Fig. N° 14.a)).

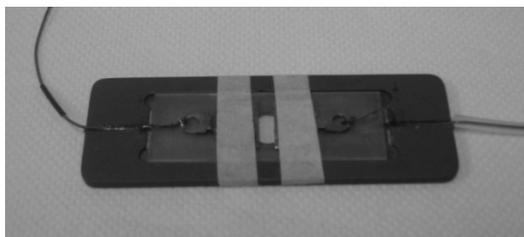


Figura N° 18. Celda de observación. (Elaboración propia)

Esto se realizó con el fin de comparar el tamaño y cantidad de gotas de agua, en determinadas zonas de la muestra (Fig. N° 19). Para calcular el porcentaje de agua se utilizó la macro en Excel elaborada por Fung (2011). El conjunto de todos estos parámetros permitió identificar las condiciones de voltaje y dilución, que favorecen la coalescencia del agua presente en la emulsión.

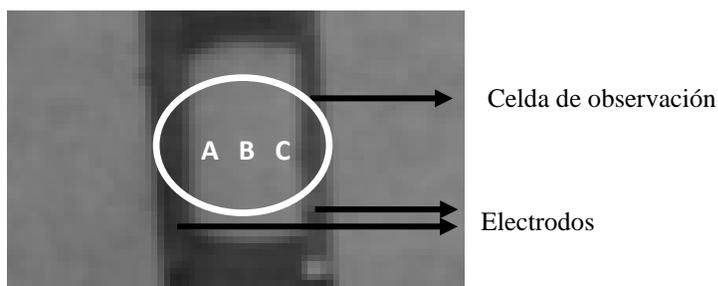


Figura N° 19. Posiciones a considerar para la captura de imágenes en la celda de observación. (Elaboración propia)

### III.2.3. Identificar los fenómenos presentes en el proceso de separación electrostática, en la “celda de observación”

Una vez establecidas las condiciones óptimas de voltaje, dilución y solvente, se realizaron videos y fotos de las muestras durante la aplicación del campo eléctrico alterno. Esto con el fin de identificar fenómenos como formación de dipolos, formación de cadenas, formación de agregados, dirección de las cadenas, vibración, movimiento y choque de gotas, coalescencia; así como la presencia de las fuerzas electrostáticas (Fig. N° 12).

Se observaron con especial interés las zonas: superior, media e inferior de la celda, en los puntos adyacentes a los electrodos y en el centro, para reportar lo observado, tal como se puede apreciar en el esquema establecido para la captura de imágenes en la “celda de observación”, presentada en la Fig. N°20.

<b>A1</b>	<b>B1</b>	<b>C1</b>
<b>A2</b>	<b>B2</b>	<b>C2</b>
<b>A3</b>	<b>B3</b>	<b>C3</b>

Figura N° 20. Posiciones a considerar para la captura de imágenes en la celda de observación.

(Elaboración propia).

### III.2.4. Evaluar la presencia de los fenómenos observados en la “celda de observación” en la “celda de trabajo”

Para llevar a cabo esta evaluación, se sometieron a campo eléctrico alterno, considerando las condiciones óptimas de voltaje, dilución y solvente, el material de las tres fosas en la “celda de trabajo”, la cual se puede apreciar en la Fig. N°21.

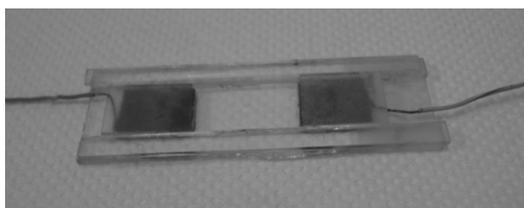
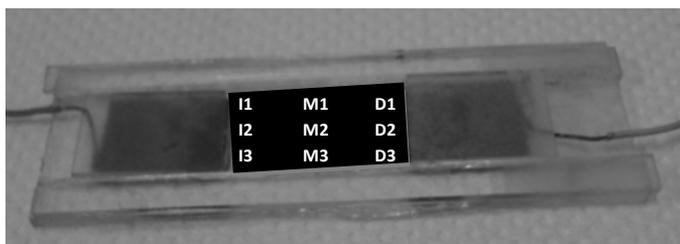


Figura N° 21. Celda de trabajo. (Elaboración propia)

Se realizaron imágenes de las muestras en la celda de trabajo, antes y después de aplicado el campo eléctrico, en las posiciones indicadas en la figura N°22.



I:izquierda      M:medio      D:derecha

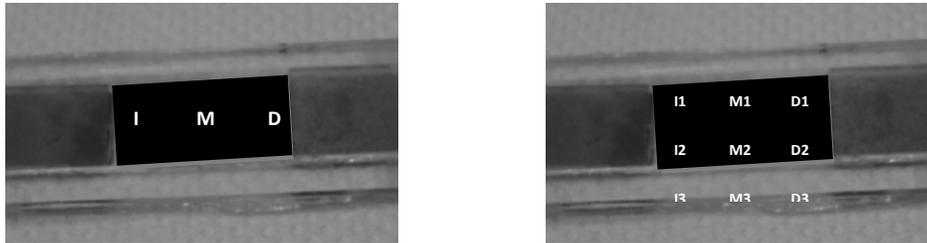
Figura N° 22. Posiciones a considerar para la toma de las muestras en la “celda de trabajo”.

(Elaboración propia)

### III.2.5. Cuantificar el grado de separación en la “celda de trabajo”, empleando técnicas de microscopía óptica

Se comparó el efecto de aplicar el campo eléctrico de corriente alterna, a los distintos materiales de fosas, antes y después de aplicado el campo eléctrico. Antes de la aplicación del campo, se consideró para la toma de las muestras, la zona media de la

celda, en los puntos adyacentes a los electrodos y en el centro de la celda. Mientras que luego de aplicado el campo, se consideraron las zonas superior, media e inferior de la celda, en los puntos adyacentes a los electrodos y en el centro de la celda, a fin de contabilizar el agua coalescida ó el incremento del tamaño de las gotas. Las posiciones consideradas para el muestreo en la “celda de trabajo” se observan en la Fig. N° 23.



(a) Antes de aplicar el campo

(b) Después de aplicar el campo

Figura N° 23. Posiciones a considerar para la toma de las muestras en la celda de trabajo. (a) antes y (b) después de aplicado el campo eléctrico (Elaboración propia)

Para la observación de las muestras en el microscopio óptico, es muy importante considerar varios aspectos como: (1) preparación de la muestra, (2) calibración del microscopio, (3) calibración de la escala de medición.

El procedimiento detallado contemplado para estos aspectos se presenta en la Pasantía de Investigación titulada “Sistematización de las técnicas de caracterización de emulsiones de fosas. Estudio de sistemas con análisis de imágenes”. Fung (2011).

Se tomaron las imágenes de la muestra y se calibró la escala en la imagen, para luego proceder a cuantificar la cantidad de agua, empleando la macro en Excel (Fung, 2011) que utiliza los datos aportados de la imagen, por el programa Imagen Pro Plus.

Se realizaron pruebas preliminares con el fin de obtener la destreza en el uso del Microscopio Nikon MED-600 y de todos sus componentes, así como también para determinar las condiciones óptimas de la preparación de cada una de las muestras a analizar.

### III.2.5.1. Preparación de la muestra para su observación en el microscopio

Luego de aplicado el campo eléctrico en la “celda de trabajo”, se empleó un clip modificado con el fin de disponer una pequeña cantidad de muestra en el portaobjeto,

con el fin de obtener una película lo suficientemente fina que permitiera el paso de la luz a través de ella para ser analizada.

*(a) Colocación del cubreobjeto*

Para colocar el cubreobjeto sobre la muestra se debe realizar con especial cuidado ya que este es un paso fundamental en la preparación de la muestra. Se debe evitar la formación de burbujas de aire que afecten el análisis visual así como también, se debe asegurar la correcta distribución de toda la muestra agregada en el portaobjetos para obtener la mayor área de estudio posible.

Para ello, se colocó el portaobjeto con la muestra sobre el mesón. Con los dedos pulgar e índice se sostuvo cuidadosamente el cubreobjeto por los bordes anterior y posterior sin tocar la superficie del mismo, apoyando el borde inferior en el borde del portaobjeto más próximo a la muestra. Luego se dejó caer suavemente el cubreobjetos sobre la muestra.

*(b) Obtención de la película fina*

Para obtener una película lo suficientemente fina y uniforme se recomienda no hacer presión con los dedos, se debe colocar un grupo de portaobjetos sobre la muestra preparada y ya cubierta con el cubreobjetos. Esto permita distribuir la muestra de manera uniforme.

*(c) Aplicación del programa IMAGEN PRO PLUS. Adquisición de datos.*

Una vez preparadas las muestras se realizó un barrido del área de las mismas para llevar a cabo el análisis de imagen con la ayuda del programa Image Pro Plus (IPP) y su aplicación Stage Pro para la captura de imágenes, con la cámara CCD (Charge Couple Device) y el microscopio Nikon MED-600. La técnica de observación utilizada para realizar la caracterización por microscopía óptica fue campo claro aplicando luz transmitida, ya que fue la técnica que ofreció la calidad de imagen adecuada para realizar los análisis. Se empleo el objetivo 20X para el análisis de las muestras del material de las fosas Acema-100, Guara-2 y Merey-31.

### *III.2.5.2. Análisis de imágenes*

Se realizó la calibración de la escala de medición de cada foto de acuerdo al objetivo 20X utilizado y se seleccionaron las partículas deseadas para el análisis.

#### *(a) Manipulación de datos*

Una vez obtenidos los datos se procesó la información para obtener los resultados necesarios con el fin de caracterizar el material de las fosas; resultados tales como la distribución de tamaños de partículas (gotas), los diámetros equivalentes promedio, la cantidad relativa de las mismas.

#### *(b) Determinación de la distribución de tamaños de partículas*

A partir de los datos de área de cada una de las partículas, se determinó el diámetro equivalente de cada una y el total de éstos fueron clasificados en intervalos de diámetros en los que fue dividido el campo total de tamaños de las muestras. Se determinaron los datos acumulados de la cantidad relativa de partículas y de área de las mismas que pertenecen a cada intervalo de tamaño para obtener las curvas de distribución acumulada en número área  $F_2(x)$ .

Los parámetros utilizados para definir los resultados se describen en la Tabla N°6.

Tabla N° 6. Descripción de parámetros utilizados en los resultados del análisis de imágenes.  
(Fung, 2011).

Parámetro	Descripción
$F_2(40\mu\text{m})$	Fracción de gotas con diámetro $\leq 40 \mu\text{m}$
$R_2(40\mu\text{m})= 1- F_2(40\mu\text{m})$	Fracción de gotas con diámetro $> 40 \mu\text{m}$
$D_{01}$	Diámetro de gota para una fracción acumulada del 1 %
$D_{05}$	Diámetro de gota para una fracción acumulada del 05 %
$D_{10}$	Diámetro de gota para una fracción acumulada del 10 %
$D_{25}$	Diámetro de gota para una fracción acumulada del 25 %
$D_{50}$	Diámetro de gota para una fracción acumulada del 50 %
$D_{75}$	Diámetro de gota para una fracción acumulada del 75 %
$D_{90}$	Diámetro de gota para una fracción acumulada del 90 %
$D_{95}$	Diámetro de gota para una fracción acumulada del 95 %
$D_{\text{max}}$	Diámetro de gota para una fracción acumulada del 100 %
$\phi_w$ (%)	Porcentaje de agua total visible
$\Phi_w(40\mu\text{m})= R_2(40\mu\text{m}) \cdot \phi_w$	Porcentaje de agua en gotas con diámetro mayor a $40\mu\text{m}$ en la muestra, después de aplicado el campo eléctrico
$\Phi_w^0(40\mu\text{m})= R_2^0(40\mu\text{m}) \cdot \phi_w$	Porcentaje de agua en gotas con diámetro mayor a $40\mu\text{m}$ en la muestra, sin aplicación de campo eléctrico

### III.2.6. Identificar las limitaciones de la “celda de trabajo” usada y proponer mejoras para el diseño de una nueva celda.

En base a los resultados obtenidos anteriormente, se propusieron diseños para una celda continua, en conjunto con los valores presentados en los antecedentes reportados, con el objetivo de escalar el proceso en batch a un proceso en continuo.

Se realizaron pruebas preliminares que permitieron señalar las limitaciones y mejoras del nuevo sistema, para aumentar el proceso de la separación del agua emulsionada. Las sugerencias estuvieron enfocadas en sugerir el voltaje óptimo, tiempo de residencia, configuración de los electrodos, materiales a utilizar para la construcción de la celda, y volumen de fosa a tratar.

## **CAPITULO IV**

### **RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.**

A continuación se presentan los resultados obtenidos al realizar las pruebas pautadas en la metodología experimental.

#### **IV.1. PREPARACION DE MEZCLAS FOSAS-SOLVENTE, CON SOLVENTE AROMATICO Y PARAFINICO CON IGUALES VISCOSIDADES.**

Se estableció en un principio determinar la viscosidad de las muestras utilizando el viscosímetro marca BROOKFIELD, las medidas obtenidas fueron poco reproducibles o no pertenecían al rango del equipo. Por ello, se decidió medir el tiempo de escurrimiento basado en el principio de Saybolt, de manera que se obtuvieran medidas de la viscosidad que aunque basadas en un principio físico, no están expresadas en las unidades de la viscosidad. Tomando en cuenta que solo se necesitaban valores que sirvieran de referencia, se resolvió utilizar el tiempo de escurrimiento como medida de la viscosidad. Por lo tanto, se estableció como referencia la viscosidad de la fosa Acema-100 debido a que fluye de forma continua y esta característica le otorga a la muestra, facilidad a la hora de ser dispuesta en el portaobjeto para ser analizada en el microscopio; debido a que se desea una distribución homogénea del material de la fosa, en película fina que permita el paso de la luz de manera adecuada, al emplear el microscopio óptico.

El tema de preparación de las diluciones es un punto importante, ya que la dilución con solvente es un método eficiente para reducir la viscosidad, por lo que le confiere a la muestra de la fosa, el beneficio de una mayor fluidez y facilidad de manipulación. Adicionalmente, las proporciones de las diluciones, están relacionadas con el hecho de tener tiempos de escurrimiento semejantes al del material de la fosa Acema-100. Este criterio (igual viscosidad) es útil a la hora de establecer semejanzas y diferencias

en los comportamientos del hidrocarburo de las diferentes fosas ante la aplicación de la corriente eléctrica alterna.

Se consideró adecuado efectuar pruebas de manera independiente por dos experimentadores, Fung y Pérez, (ver Tabla N°7) obteniéndose valores en el mismo rango.

Tabla N° 7. Tiempos de escurrimiento, para las fosas en estudio. (Elaboración propia)

Muestra	Proporción	Cantidad de solvente [%]	Tiempo de escurrimiento [s] (Fung, 2011)	Tiempo de escurrimiento [s] (Pérez, 2012)	Error relativo (%)
Acema-100	-	-	88	89	-
Merey-31:hexano	10:1	9,0	93	92	3,4
Guara-2:hexano	7:1	12,5	91	93	4,5
Merey-31:xileno	18:1	5,0	84	86	3,4
Guara-2:xileno	13:1	7,0	82	84	5,6

El error relativo en los resultados obtenidos respecto al tiempo de escurrimiento de la fosa Acema-100, es menor al 6%, lo cual se considera como un valor aceptable. Por lo tanto, las diluciones realizadas tienen un tiempo de escurrimiento similar al de la fosa Acema-100 y las diluciones presentadas en la Tabla N°7, son las diluciones a considerar para la realización de las experiencias posteriores.

Cabe destacar que para alcanzar tiempos de escurrimientos similares, la cantidad de solvente aromático a añadir es menor que la cantidad de solvente parafínico, indicando esto que la cantidad de aromático añadida colabora con la desagregación de grupos asfálticos-resínicos que al estar agregados aumentan la viscosidad del material de la fosa. A continuación se presentan en la Tabla N°8, los valores de distribución acumulada de gotas para las fosas Acema-100, Guara -2 y Merey-31, sin la adición de solvente (Fung, 2011).

En esta tabla, se puede observar una clara diferencia en el tamaño de gotas de las diferentes fosas, donde las gotas de mayor tamaño se reportan en la fosa Acema-100, por lo tanto, una mayor cantidad de agua en dicha fosa. Lo expresado anteriormente se aprecia claramente al observar el porcentaje de agua visible ( $\phi_w$ ) que para el caso de Acema-100 es 21,7%, para Guara-2 es 15,0% y para Merey-31 es 10,0%.

Tabla N° 8. Distribución acumulada de gotas para la fosas Acema-100, Guara-2 y Merey-31 sin adición de solvente. (Fung, 2012).

Parámetro	Acema-100	Guara-2	Merey-31
$D_{10}$ ( $\mu\text{m}$ )	2,99	1,98	1,81
$D_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	21,51	7,39	3,79
$D_{90}$ ( $\mu\text{m}$ )	62,40	32,11	17,23
$D_{\text{max}}$ ( $\mu\text{m}$ )	76,94	52,84	36,53
$F_2(40\mu\text{m})$	0,72	0,93	1,00
$R_2(40\mu\text{m})$	0,28	0,07	0,00
$\phi_w$ (%)	21,7	15,0	10,0
$\Phi_w^0(40\mu\text{m})$ (%)	6	1	0

La fosa Merey-31 presenta los tamaños de gotas más pequeño y una ausencia de gotas mayores a  $40 \mu\text{m}$ , por lo tanto la menor cantidad de agua. La fosa Guara-2 presenta un tamaño de las gotas entre las de Acema-100 y Merey-31, con una fracción de gotas grandes ( $R_2(40\mu\text{m})$ ) del 0,07%. Según el criterio de estabilización de las emulsiones por el tamaño de gotas, las fosas en estudio en orden creciente de estabilidad, sería: Acema-100, Guara-2 y Merey-31.

Evaluado el efecto de los diferentes solventes empleados, se observa en la Fig. N°24, el comportamiento comparativo del material de la fosa Guara-2 en ausencia de solvente y en presencia de solvente aromático (xileno) y parafínico (hexano).

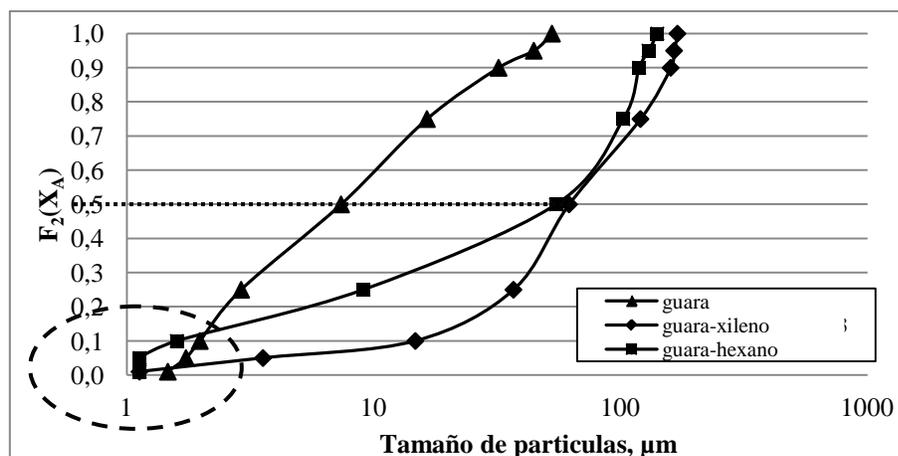


Figura N° 24. Distribución acumulada de gotas de la fosa Guara-2, original y diluida con solventes (hexano, xileno).

En esta figura, se aprecia en general, un mayor desplazamiento de la curva de distribución acumulada de gotas hacia gotas de mayor tamaño al diluir la fosa con el

solvente xileno, indicando que dicho solvente es un mejor desestabilizante de la emulsión que el hexano. También se observa que se incrementa el número de gotas de menor tamaño con el uso de ambos solventes.

A continuación en la Tabla N° 9, se puede observar entre otros parámetros, el porcentaje de agua en gotas grandes con un diámetro mayor a 40  $\mu\text{m}$  ( $\Phi_{\text{W}}^0(40\mu\text{m})$ ), para la fosa Guara-2, con y sin diluyente.

Tabla N° 9. Resultados para las fosa Guara-2, con la adición de solventes.

Parámetro	Guara-2	Guara-2	
		hexano (7:1)	xileno (13:1)
$D_{10}$ ( $\mu\text{m}$ )	1,98	1,60	14,78
$D_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	7,39	54,87	61,95
$D_{90}$ ( $\mu\text{m}$ )	32,11	119,02	159,73
$D_{\text{max}}$ ( $\mu\text{m}$ )	52,84	141,02	170,25
$F_2(40\mu\text{m})$	0,93	0,40	0,31
$R_2(40\mu\text{m})$	0,07	0,60	0,69
$\phi_{\text{W}}$ (%)	15,0	7,08	10,08
$\Phi_{\text{W}}^0(40\mu\text{m})$ (%)	1	4,2	7,0

Se observa que la dilución con xileno tiene mayor cantidad de gotas grandes, con un 7,0%, mientras que con hexano este porcentaje es de 4,2%; para la muestra sin aplicación de ningún tipo de solvente el valor de este parámetro es del 1%. La fracción de gotas con diámetro mayor que 40  $\mu\text{m}$ , es mayor en la muestra diluida con xileno, con un valor de 0,69 mientras que con la muestra diluida con hexano es de 0,60; mientras que para la muestra sin aplicar ningún tipo de solvente es de 0,07.

Se aprecia un incremento del tamaño de gotas con diámetro mayor a 40  $\mu\text{m}$ , siendo mayor para el caso del uso del xileno como solvente. El diámetro de gota cuya fracción acumulada es del 50% es del 61,95  $\mu\text{m}$  para la muestra con xileno; mientras que se reporta un 54,87  $\mu\text{m}$  para la muestra con hexano y 7,39  $\mu\text{m}$  para la muestra sin ningún tipo de solvente.

Lo anterior muestra que la fosa Guara-2, diluida con xileno, presentan un mayor contenido de agua, al presentar gotas más grandes, por lo que la emulsión es menos

estable. Esto es claramente observable en las imágenes presentadas a continuación en la Figura N° 25

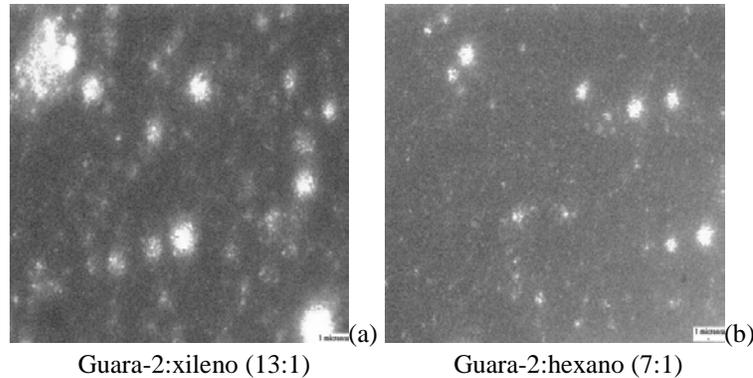


Figura N° 25. Imágenes de la fosa Guara-2 con los solventes considerados (a) xileno y (b) hexano, sin aplicación de campo eléctrico en la celda de observación.

En la figura N°25 se puede observar la diferencia de tamaños de las gotas de agua emulsionada de la fosa Guara-2 debido a la adición del solvente. Se aprecia como con el solvente aromático (xileno), el tamaño de las gotas es más grande para todas las regiones y distribuciones de tamaño de gota, con un porcentaje de agua igual a 10,08% (ver Tabla N°9)

En la figura N°25 (b) se aprecian las fotos de la fosa Guara-2 usando disolvente parafínico hexano, se observa al comparar con las imágenes de la figura N° 25 (a) como el tamaño de las gotas de agua emulsionada dentro del hidrocarburo es menor usando solvente hexano. El contenido de agua en este caso es del 7,0%. Para la fosa Guara-2 la dilución con xileno favorece el aumento del tamaño de la gota.

Continuando con el análisis de la interacción de los materiales de fosas con los distintos solventes empleados, se presenta a continuación el caso de la fosa Merey-31, diluida con solvente parafínico (hexano) y solvente aromático (xileno) en las proporciones definidas anteriormente.

En la Figura N°26 se puede observar que para la fosa Merey-31 el uso del solvente hexano favorece la coalescencia, es decir, desestabiliza la emulsión. Esto se aprecia al definir una distribución acumulada en el eje de las ordenadas ( $F_2(x_A)$ ) y ver el valor del tamaño de las partículas en el eje de abscisas. Para un valor de  $F_2(x_A)$  igual a 0,5 se obtiene para la muestra de Merey-31 sin dilución un tamaño de partículas de  $3,79\mu\text{m}$ ;

mientras que para la muestra diluida con xileno (18:1) un tamaño de partículas de 7,31 $\mu\text{m}$  y la diluida con hexano (10:1) un tamaño de partículas de 44,50 $\mu\text{m}$ .

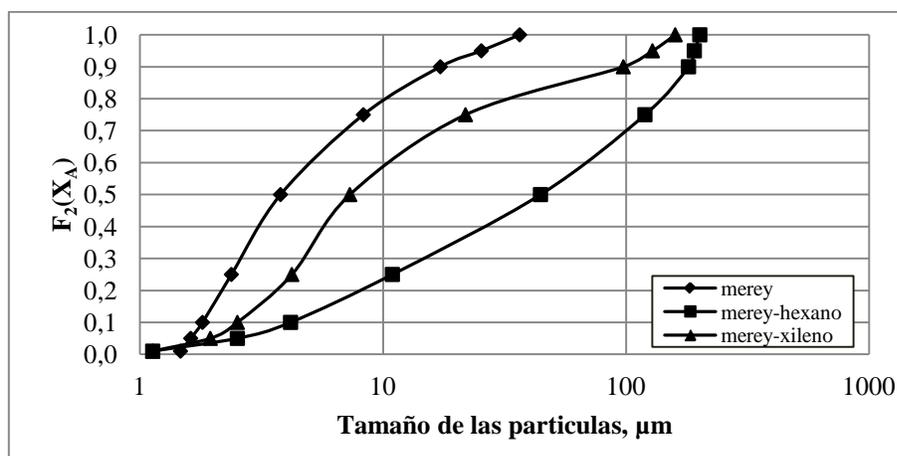


Figura N° 26. Distribución acumulada de gotas de la fosa Merey-31 original y diluida con solventes (hexano y xileno).

Se presentan a continuación en la Tabla N°10, los resultados de la fosa Merey-31 sin y con dilución con solventes parafínico y aromático. Se observa que el mayor porcentaje de agua ( $\phi_w$ ) se obtiene para la dilución con hexano con un valor de 14,04% y el porcentaje de agua en gotas grandes ( $\Phi_w^0(40\mu\text{m})$ ) igual a 7,6%.

Tabla N° 10. Resultados de las fosa Merey-31 con la adición de solventes.

Parámetro	Merey-31	Merey-31	
		hexano (10:1)	xileno (18:1)
$D_{10}$ ( $\mu\text{m}$ )	1,81	4,17	2,52
$D_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	3,79	44,50	7,31
$D_{90}$ ( $\mu\text{m}$ )	17,23	180,86	97,55
$D_{\text{max}}$ ( $\mu\text{m}$ )	36,53	201,30	159,44
$F_2(40\mu\text{m})$	1,00	0,46	0,77
$R_2(40\mu\text{m})$	0,00	0,54	0,23
$\phi_w$ (%)	10,0	14,04	9,53
$\Phi_w^0(40\mu\text{m})$ (%)	0	7,6	2,2

Mientras que para la dilución con xileno el porcentaje de agua es de 9,53% y el porcentaje de agua en gotas grandes tiene un valor de 2,2%. Los valores de estos parámetros son menores para la muestra de Merey-31, sin dilución.

En la figura N°27, se puede observar el efecto de los diluyentes en la fosa Merey-31, donde es apreciable un mayor tamaño de gotas en la dilución con hexano (Fig. 27 b), en comparación con la dilución con xileno (Fig. 27 a).

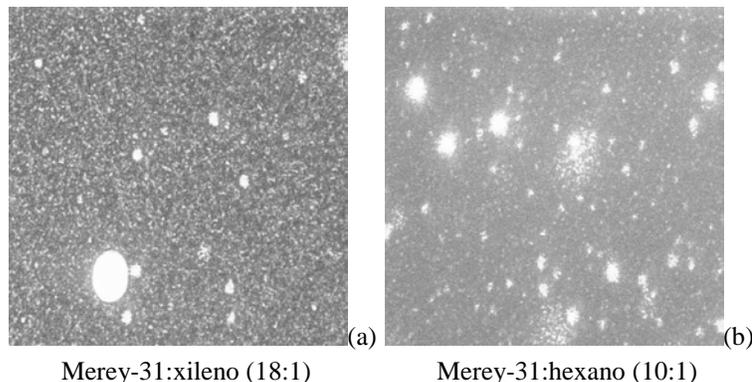


Figura N° 27. Imágenes de la fosa Merey-31 con los solventes considerados (a) xileno y (b) hexano, sin aplicación de campo eléctrico en la celda de observación.

Por lo tanto, si se revisan las composiciones de las diferentes fracciones de saturados, aromáticos, resinas y asfaltenos presentes en las fosas (Tabla N°3), se obtiene que el contenido de aromáticos en Guara-2 (18,79%) es menor al contenido de aromáticos en Merey-31(47,46%), por lo tanto al diluir con un solvente aromático, el efecto es más notable en la fosa Guara-2 que en Merey-31.

El caso contrario ocurre al diluir con un solvente parafínico, ya que el contenido de saturados en Guara-2 (43,11%) es considerablemente mayor al contenido de saturados en Merey-31 (15,84%), originando esto un efecto notorio en la desestabilización de esta fosa con un solvente parafínico.

Para estas fosas, Guara-2 y Merey-31, el contenido de resinas y asfaltenos, es similar y en el promedio está en el orden del 37,4%. Es por ello, que se considera que el efecto del solvente se debe a la cantidad de saturados y aromático presentes, lo cual difiere considerablemente de una fosa a otra. En este análisis no participa la fosa Acema-100, ya que a la misma no se le diluyó con ningún solvente, según lo explicado en puntos anteriores.

En general, el material de las fosas, presenta una interacción distinta con cada diluyente (hexano o xileno), esto es debido a la naturaleza química de cada fosa (SARA) y a la naturaleza química de los solventes utilizados.

## **IV.2. COMPARAR EL EFECTO DEL TIPO DE DILUYENTE, AL APLICAR CORRIENTE ALTERNA A DIFERENTES VOLTAJES.**

Se aplicó corriente alterna a las muestras de las fosas Acema-100, Guara-2 y Merey-31, estas últimas con sus diluciones empleando hexano y xileno. Se aplicaron en las celdas de observación intensidades de campos eléctricos alternos de 2, 4, 6 KV/cm, con el fin de estudiar el fenómeno de coalescencia, relacionada con el tipo de diluyente y la intensidad de campo eléctrico alterno que favorecen este fenómeno.

El resultado de cada experiencia fue determinado con la distribución acumulada de las gotas de agua presentes, antes y después de aplicado el campo eléctrico. Los parámetros a considerar fueron los listados desde la Tabla N°8. Estos parámetros muestran el cambio que experimenta la muestra con la aplicación de la corriente alterna.

La herramienta usada para analizar las imágenes fue el programa IMAGE PRO PLUS 6.0. Se creó una máscara para cada imagen y se usaron los mismos colores sistemáticamente durante todo el trabajo para minimizar el error asociado por las diferencias de los mismos. En relación a la máscara se eligieron colores contrastantes para el hidrocarburo y el agua, sin embargo, el poder de resolución del ojo humano es limitado, siempre habrá un error asociado. Además, se debe mencionar que luego de la aplicación de la corriente eléctrica alterna las posición A, B y C en la celda de observación, son sencillamente descriptivas, ya que en la corriente alterna la polaridad cambia constantemente, en este caso a razón de 60 veces cada segundo lo que indica una frecuencia de 60 Hz, por lo que no tiene sentido asociar de manera inalterable una posición a el electrodo positivo y otra al negativo, dado que este tipo de corriente se caracteriza por la alternabilidad de la polaridad.

Los resultados de la fosa Acema-100 a diferentes intensidades de campo eléctrico alterno, se observan en la Tabla N°11. Allí se puede apreciar que para la intensidad de campo igual a 6 KV/cm los valores obtenidos para los parámetros de porcentaje de agua visible ( $\phi_w$ ) el valor es de 75,69 %, para la fracción de gotas mayores a 40  $\mu\text{m}$

( $\Phi_w(40\mu\text{m})$ ) se obtuvo un 73,8 % y para el 50% de su fracción acumulada de agua se reporta un diámetro equivalente de 581,11  $\mu\text{m}$ .

Tabla N° 11. Resultados para la fosa Acema-100 en celda de observación, con corriente alterna a diferentes intensidades de campo eléctrico.

Parámetro	Acema-100			
	0	2	4	6
E ( KV/cm)				
D <sub>10</sub> ( $\mu\text{m}$ )	6,19	17,69	6,68	195,63
D <sub>50</sub> ( $\mu\text{m}$ )	65,90	164,96	42,97	581,11
D <sub>90</sub> ( $\mu\text{m}$ )	229,70	298,81	179,31	667,02
D <sub>max</sub> ( $\mu\text{m}$ )	268,14	310,26	280,19	695,25
F <sub>2</sub> (40 $\mu\text{m}$ )	0,41	0,16	0,47	0,03
R <sub>2</sub> (40 $\mu\text{m}$ )	0,59	0,84	0,53	0,97
$\phi_w$ (%)	17,65	43,54	43,62	75,69
$\Phi_w(40\mu\text{m})$ (%)	10,5	36,7	23,0	73,8
<b>FD</b>		<b>3,49</b>	<b>2,19</b>	<b>7,03</b>

Lo anterior indica que el porcentaje de agua total es alto y el contenido del agua en gotas grandes es también alto, por lo que señala que al tratar la muestra de Acema-100 a 6 KV/cm de corriente alterna, se promueve la desestabilización y coalescencia del agua emulsionada.

Las imágenes que se presentan a continuación en la Fig. N° 28, fueron captadas luego de aplicar intensidades de campo de 2, 4 y 6 KV/cm, de corriente eléctrica alterna durante 90 segundos, ubicándose las imágenes en la región C, con el fin de establecer comparaciones en una misma zona de la celda de observación.

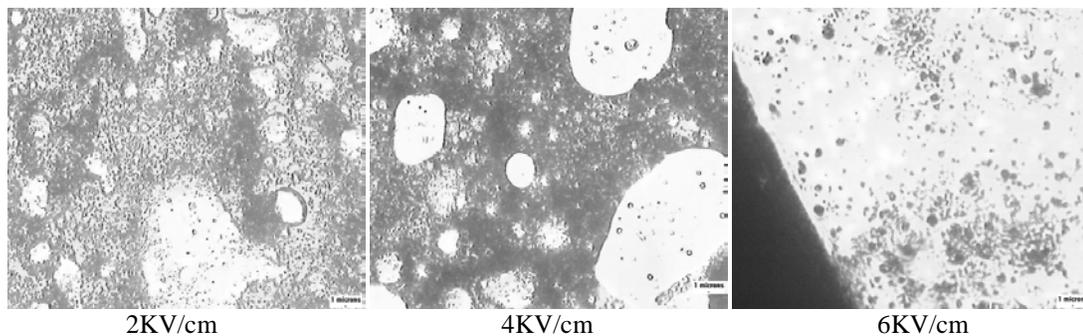


Figura N° 28. Imágenes de la fosa Acema-100 en la zona C luego de aplicar distintas intensidades de campo eléctrico.

En esta figura se aprecia claramente como al incrementar la intensidad del campo, incrementa también el tamaño de las gotas en esta zona, y particularmente a 6 Kv/cm el tamaño de la gota crece y pasa a ser la fase continua, ya que se aprecian gotas de hidrocarburo atrapadas dentro del agua. Por lo que, visualmente a mayor campo eléctrico aplicado, mayor tamaño de la gota de agua.

Observando la figura N°28, particularmente la foto ubicada a la derecha (6 KV/cm) se observa que hay ausencia del contenido de hidrocarburo, el cual se desplazó como un todo hacia el otro electrodo, quedando pequeñas gotas de hidrocarburo dentro del agua. Este desplazamiento del hidrocarburo hacia un lado u otro de la celda, es totalmente aleatorio, no sistemático, y es el resultado de los constantes cambios de la polaridad en la corriente alterna.

A continuación se presentan gráficamente estos resultados, en la Fig. N°29.

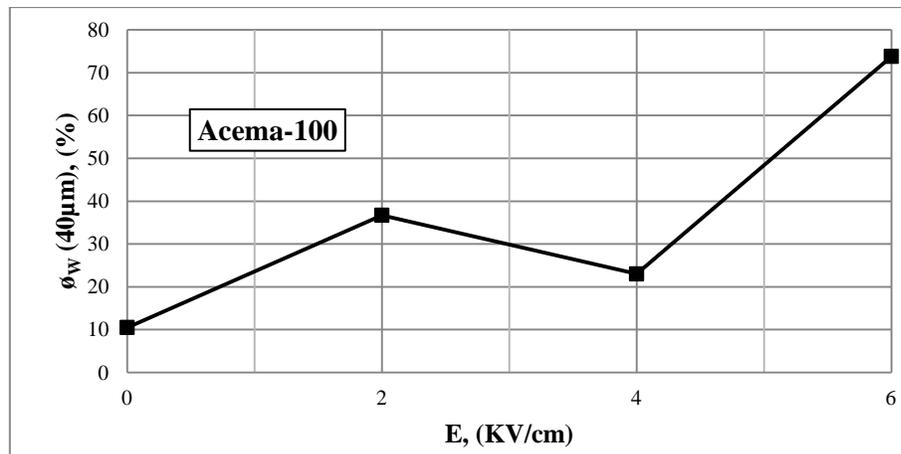


Figura N° 29. Cantidad de agua en gotas grandes en función de la intensidad de campo eléctrico, para la fosa Acema-100.

En la figura N°29, se grafica la cantidad de agua en gotas mayores a 40 micrones en función de la intensidad de campo eléctrico para la fosa Acema-100. Se aprecia claramente que a 6KV/cm es donde se obtiene mayor porcentaje de agua en gotas grandes (73,8%); pero le sigue en orden decreciente la intensidad de campo de 2KV/cm (36,7%) y finalmente la intensidad de 4 KV/cm (23%).

Estos resultados contrastan con los obtenidos por Fung (2011), donde para esta fosa y corriente directa, la intensidad de corriente que mayor desestabilización produjo fue de 2 KV/cm, con una fracción de gotas mayores a 40  $\mu m$  ( $\Phi_w(40\mu m)$ ) igual al 21%.

Continuando el análisis para las distintas fosas, se presentan a continuación en la Tabla N°12, los resultados obtenidos para la fosa Guara-2 diluida con xileno y hexano respectivamente a distintos voltajes aplicados de corriente alterna, por un tiempo de 90 segundos.

Tabla N° 12. Resultados para la fosa Guara-2 diluida con hexano y xileno a diferentes voltajes en celda de observación. (\*Fosa sin dilución)

Dilución	Guara-2*	Guara-2:xileno (13:1)				Guara-2:hexano (7:1)			
		0	2	4	6	0	2	4	6
E (KV/cm)	0	0	2	4	6	0	2	4	6
D <sub>10</sub> ( μm)	1,98	14,78	69,02	2,76	42,57	10,31	4,63	1,85	2,99
D <sub>50</sub> ( μm)	7,39	61,95	145,51	60,20	198,09	108,53	106,23	41,02	30,09
D <sub>90</sub> ( μm)	32,11	159,7	282,38	183,81	201,30	184,02	181,54	129,82	124,35
D <sub>max</sub> ( μm)	52,84	170,3	314,87	183,81	201,62	201,30	201,30	201,30	201,30
F <sub>2</sub> (40μm)	0,93	0,31	0,08	0,45	0,09	0,20	0,22	0,51	0,53
R <sub>2</sub> (40μm)	0,07	0,69	0,92	0,55	0,91	0,80	0,78	0,49	0,47
φ <sub>w</sub> (%)	15,0	10,08	26,12	11,26	38,11	11,83	13,58	5,95	12,73
Φ <sub>w</sub> (40μm) (%)	1	7,0	24,1	6,2	34,70	9,4	10,6	2,9	5,9
<b>FD</b>			<b>3,44</b>	<b>0,89</b>	<b>4,96</b>		<b>1,13</b>	<b>0,31</b>	<b>0,63</b>

En la Tabla anterior se puede apreciar que para la dilución Guara-2:xileno (13:1), se obtiene a la intensidad de campo eléctrico de 6 KV/cm, un mayor porcentaje de agua por área total de la imagen (φ<sub>w</sub>) con un 38,11% y un mayor porcentaje de agua en gotas grandes (Φ<sub>w</sub>(40μm)) con un 34,70 %. También se puede constatar en la Tabla N°12, que para la dilución con hexano la intensidad de corriente donde se obtienen mejores resultados es a 2 KV/cm, donde el porcentaje de agua con relación al área total de la imagen (φ<sub>w</sub>) es del 13,58% y la fracción de gotas grandes (Ø<sub>w</sub> (40μm)) obtenida es igual al 10,6%.

En la Figura N° 30, se muestra gráficamente como varía la fracción de gotas grandes en función de la intensidad de campo aplicado.

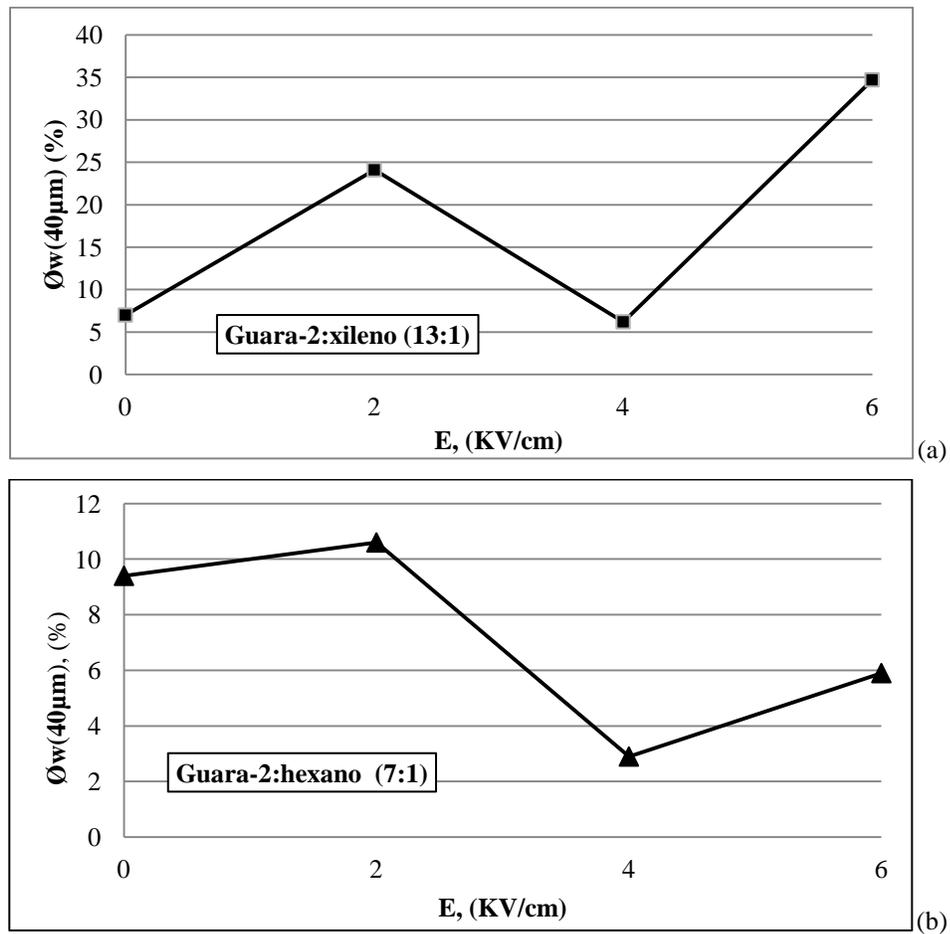
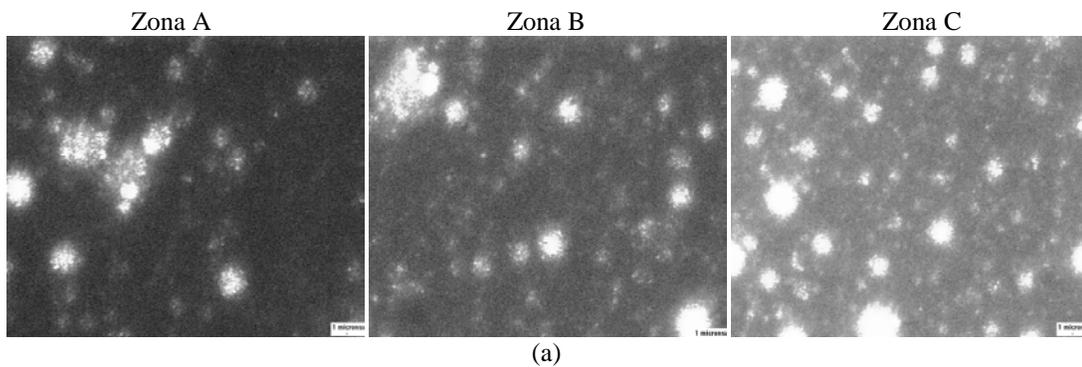
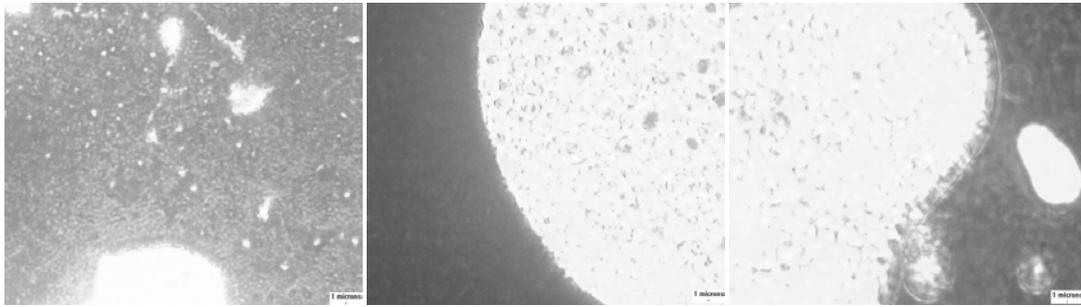


Figura N° 30. Cantidad de agua en gotas grandes en función de la intensidad de campo eléctrico para (a) Guara-2:xileno (13:1) y (b) Guara-2:hexano (7:1).

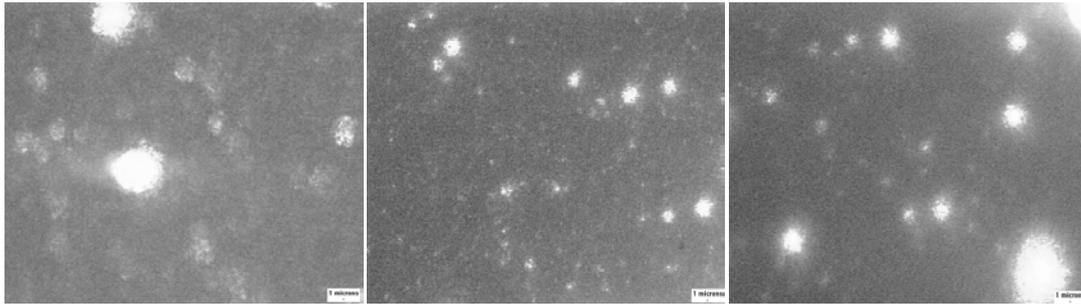
En las Figs. N°31 y N°32 se puede observar claramente, los mejores casos indicados en los gráficos anteriores.



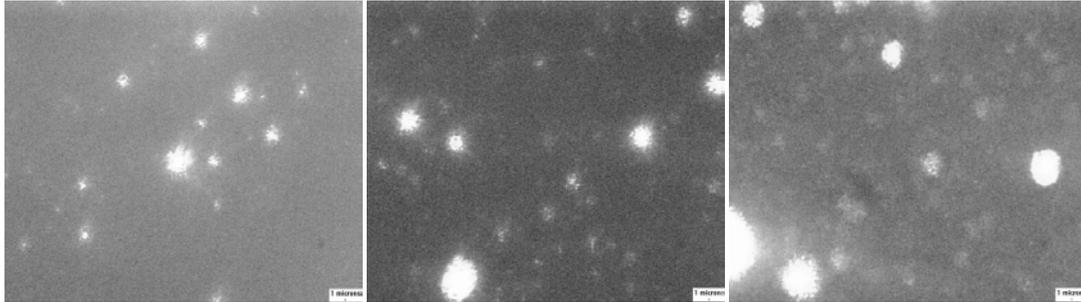


(b)

Figura N° 31. Imágenes de la fosa Guara-2:xileno (13:1) en las zonas en estudio de la celda de observación, (a) antes y (b) después de aplicar la intensidad de campo eléctrico de 6 KV/cm.



(a)



(b)

Figura N° 32. Imágenes de la fosa Guara-2:hexano (7:1) en las zonas en estudio de la celda de observación, (a) antes y (b) luego de aplicar la intensidad de campo eléctrico de 2 KV/cm.

Dándole continuidad al análisis de los resultados obtenidos con la aplicación de diferentes voltajes de corriente alterna, a las fosas en estudio, se presentan en la Tabla N°13, los resultados obtenidos, para la fosa Merey-31 diluida con xileno y hexano, por un período de tiempo de 90 segundos.

Se puede apreciar que en el caso de la dilución de Merey-31:xileno (18:1), no hay un comportamiento uniforme del crecimiento de las gotas al aumentar la intensidad del campo eléctrico, esto se puede observar al considerar el tamaño de las gotas de la fracción acumulada del 50% ( $D_{50}$ ), donde para la aplicación de 0 KV/cm se obtiene

un valor de 7,31  $\mu\text{m}$ ; para 2 KV/cm se obtiene un valor de 5,53  $\mu\text{m}$ ; para 4 KV/cm se obtiene un valor de 66,21  $\mu\text{m}$  y por último para 6 KV/cm se obtiene un valor de 31,62  $\mu\text{m}$ . El mismo comportamiento se repite para el caso de la dilución con hexano. Sin embargo, de los datos arrojados, cabe resaltar que para la mayor fracción de gotas con diámetros mayores a 40  $\mu\text{m}$  ( $\Phi_w(40\mu\text{m})$ ), se obtiene en la dilución con xileno a 4KV/cm, mientras que se alcanza para la dilución con hexano a 6KV/cm.

Tabla N° 13. Resultados para la fosa Merey-31 diluida con xileno y hexano a diferentes voltajes.  
(\*Fosa sin dilución).

Parámetros	Merey-31*	Merey-31:xileno (18:1)				Merey-31:hexano (10:1)			
		0	2	4	6	0	2	4	6
E ( KV/cm)	0*	0	2	4	6	0	2	4	6
D <sub>10</sub> ( $\mu\text{m}$ )	1,81	2,52	2,26	4,07	4,92	4,17	6,60	3,54	5,53
D <sub>50</sub> ( $\mu\text{m}$ )	3,79	7,31	5,53	66,21	31,62	44,50	85,38	16,57	27,79
D <sub>90</sub> ( $\mu\text{m}$ )	17,23	97,55	52,01	220,20	161,40	180,86	184,39	119,07	85,06
D <sub>max</sub> ( $\mu\text{m}$ )	36,53	159,44	82,08	238,04	175,98	201,30	201,30	201,30	127,29
F <sub>2</sub> (40 $\mu\text{m}$ )	1,00	0,77	0,77	0,42	0,56	0,46	0,28	0,58	0,62
R <sub>2</sub> (40 $\mu\text{m}$ )	0,00	0,23	0,23	0,58	0,44	0,54	0,72	0,42	0,38
$\phi_w$ (%)	10,0	9,53	6,42	17,03	15,72	14,04	11,57	12,55	28,79
$\Phi_w(40\mu\text{m})(\%)$	0	2,2	1,5	9,9	6,8	7,6	8,4	5,3	11,0
FD			0,68	4,5	3,09		1,10	0,70	1,44

Un resumen del comportamiento expresado para la fosa Merey-31 con las diluciones en estudio, se presenta en la Fig. 33, donde se aprecia claramente lo indicado anteriormente. Se observa que para la fosa Merey-31:xileno (18:1) a 4KV/cm se obtiene un porcentaje de agua en gotas grandes igual a 9,9%; mientras que para Merey-31:hexano (10:1) a 6KV/cm se indica un porcentaje de agua en gotas grandes del 11%. Estos valores, que son los mayores para ambas diluciones son muy similares.

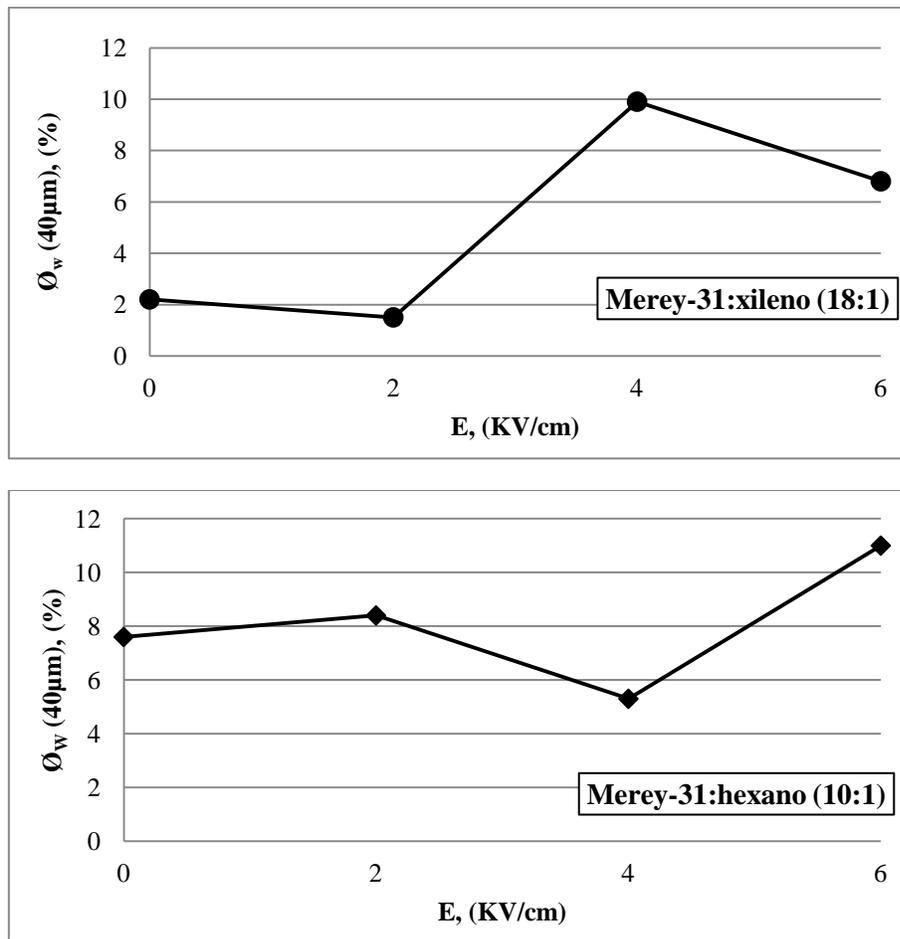


Figura N° 33. Cantidad de agua en gotas grandes en función de la intensidad de campo eléctrico para (a) Merrey-31:xileno (18:1) y (b) Merrey-31:hexano (10:1).

Comparando visualmente las imágenes de las diluciones de Merrey-31, antes y después de aplicadas las intensidades de campo más representativas en la desestabilización de la emulsión W/O, se observa sin duda un incremento en el tamaño de la gotas, donde visualmente es apreciable el mejor efecto desestabilizador en la dilución Merrey-31:xileno (18:1).

Zona A

Zona B

Zona C

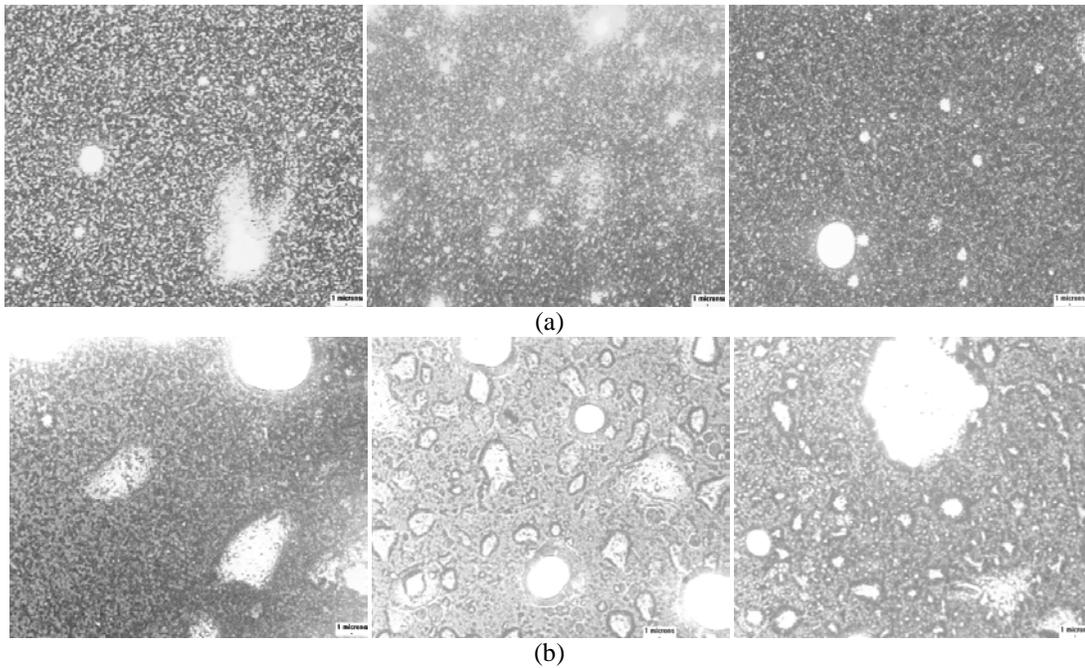


Figura N° 34. Imágenes de la fosa Meray-31:xileno (18:1) en las zonas A, B y C, (a) antes, (b) después de aplicar la intensidad de campo eléctrico de 4 KV/cm.

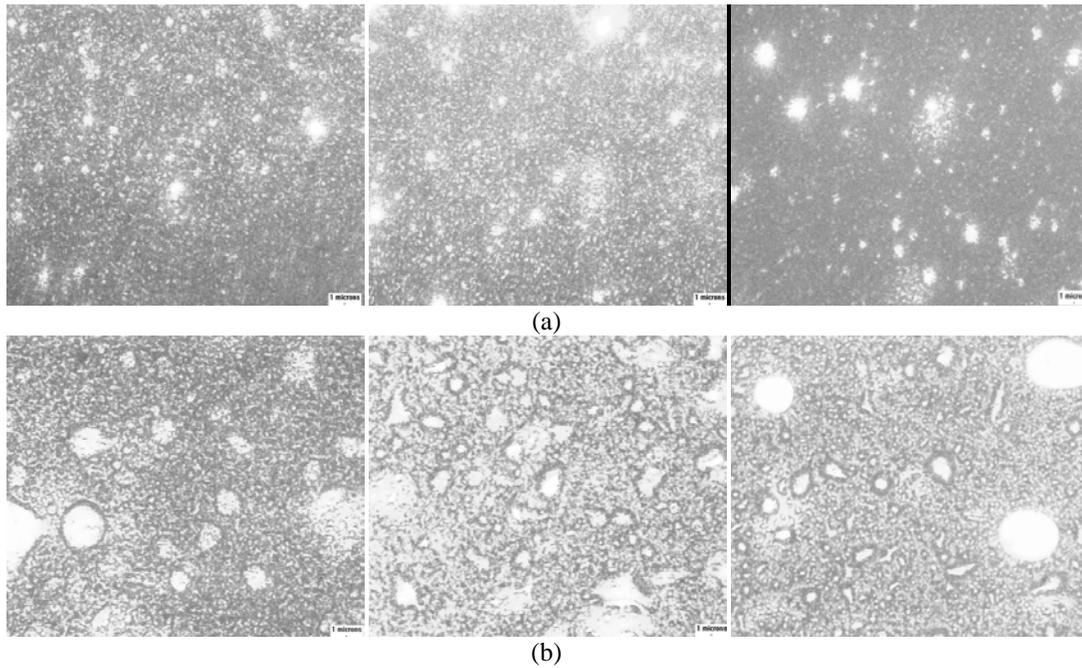


Figura N° 35. Imágenes de la fosa Meray-31:hexano (10:1) en las zonas A, B y C, (a) antes, (b) después de aplicar la intensidad de campo eléctrico de 6 KV/cm.

En este estudio es importante evaluar los cambios en tamaño de gotas antes y después de aplicado el campo eléctrico, es por ello que se emplea el factor de

desestabilización (FD) establecido por Fung (2011), el cual es calculado mediante la ecuación 6 y denota lo indicado en la Fig. N°36.

$$FD = \frac{\Phi_W(X_A)}{\Phi_W^0(X_A)} \quad \text{(Ecuación 6)}$$

FD < 1	Disminución de la cantidad de agua en gotas grandes
FD = 1	No hay cambio
FD > 1	Aumento de la cantidad de agua en gotas grandes

Figura N° 36. Factor de desestabilización. (Fung, 2011)

Recordando que  $\Phi_W(X_A)$  representa el porcentaje del área de la imagen en gotas mayores que ( $X_A$ ), FD representa físicamente la cantidad de veces que las gotas después de aplicado el campo eléctrico, son del tamaño de las gotas sin aplicar campo eléctrico; por tanto da una idea de que tan efectivo es el campo eléctrico alterno en la desestabilización de las gotas emulsionadas.

Las intensidades de campo eléctrico más adecuadas para la desestabilización, son aquellas donde se presentan los valores para el factor de desestabilización mayor a 1 (Fig. N°36). Por lo tanto, para la fosa Acema-100 aunque a todas las intensidades trabajadas los valores son mayores que 1, es a 6 KV/cm donde el tamaño de las gotas de agua después de aplicado este campo es mayor e igual a 7,03 veces el tamaño de las gotas de agua de la muestra original.

Para la dilución Guara-2:xileno (13:1) a 6 KV/cm se obtiene que después de aplicado este campo las gotas aumentan a 4,96 veces el tamaño de las gotas sin aplicar campo, siendo la mayor desestabilización alcanzada; mientras que para la dilución Guara-2:hexano (7:1) a 2 KV/cm se observa el factor de desestabilización mayor con un valor de 1,13.

La muestra diluida Merey-31:xileno (18:1) presenta el mayor factor de desestabilización a 4 KV/cm con un valor de 4,5 y la muestra Merey-31:hexano (10:1) a 6 KV/cm tiene que aumenta el tamaño de sus gotas grandes 1,44 veces el tamaño de las gotas de agua de la muestra original.

Es importante señalar que los mayores valores en el factor de desestabilización (FD), se obtuvieron para las diluciones con el solvente aromático y para la fosa sin dilución.

Por lo que en este caso, el conjunto de dilución con aromático y aplicación de campo eléctrico favorece la desestabilización de la emulsión W/O, ya son estos mayores valores del factor de desestabilización que favorecerán la coalescencia. (ver Tablas N° 11, 12 y 13).

### **IV.3. IDENTIFICACIÓN DE LOS FENÓMENOS PRESENTES EN EL PROCESO DE SEPARACIÓN ELECTROSTÁTICA.**

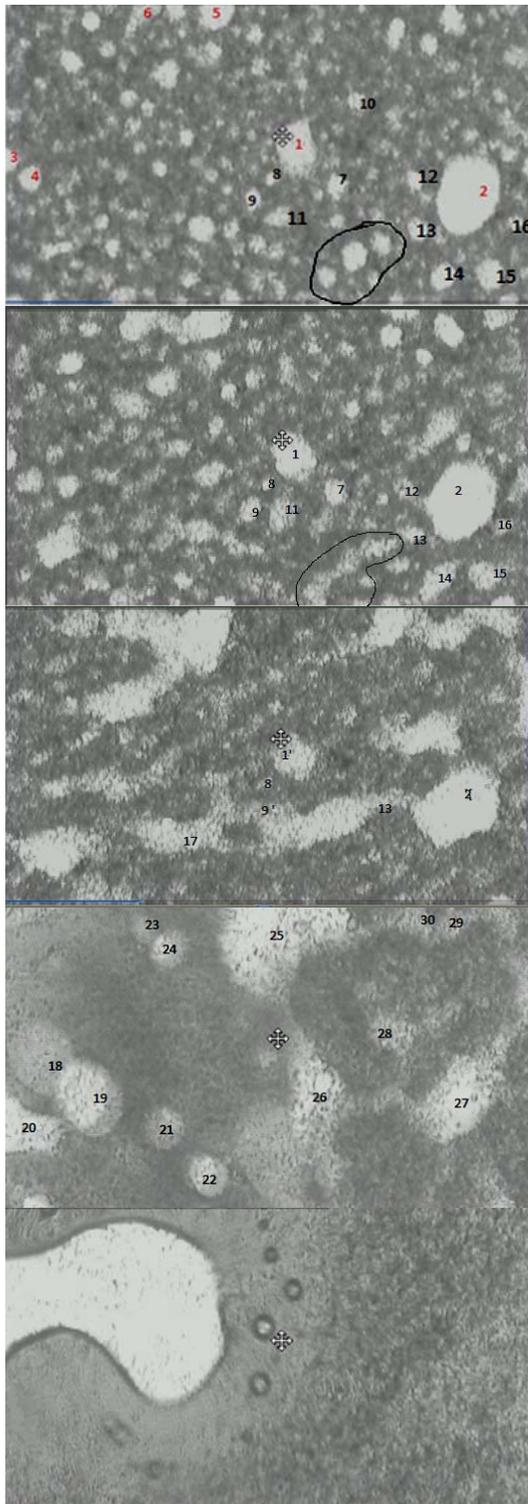
Para el desarrollo de este objetivo se reportan los fenómenos presentes en las experiencias luego de analizar los videos tomados la celda de observación con las diluciones y voltajes fijados en los objetivos anteriores.

Se utilizó el material proveniente de la fosa Acema-100, usando el objetivo de 5X, con el fin de abarcar en su totalidad la muestra en el microscopio considerando un tiempo de exposición al campo eléctrico alterno de 33 segundos y una intensidad de campo aplicado desde 2 hasta 6 KV/cm. Es preciso recordar que en este caso no se hace énfasis en la posición de la celda de observación, debido al cambio constante de la polaridad.

En la realización de la prueba, inicialmente se aplicó una intensidad de campo eléctrico de 2 KV/cm, durante un tiempo de 15 segundos.

A los 15 segundos, se observó un desplazamiento del hidrocarburo de manera que este se movía como un todo. No se observaron cambios en la dirección del movimiento, debido a los cambios de polaridad de la corriente alterna. No se evidenció cambio de tamaño de las gotas. Las gotas seleccionadas dentro del círculo están perfectamente delimitadas. (ver Fig. 37 (a))

A los 18 segundos de aplicación del campo, se evidenciaron cambios de tamaño de las gotas identificadas con los números 9, 11, 12, 13, 14, 15 y 16 (crecimiento) y forma.



(a)  $t = 15$  segundos  
2 KV/cm

(b)  $t = 18$  segundos  
2 KV/cm

(c)  $t = 20$  segundos  
6 KV/cm

(d)  $t = 26$  segundos  
6 KV/cm

(e)  $t = 31$  segundos  
6KV/cm

Figura N° 37. Acema-100 a distintos tiempos de aplicación de campo eléctrico, y diferentes intensidades de corriente (a) 15s, (b) 18s, (c) 20s, (d) 26s y (e) 31s.

Las gotas marcadas dentro del círculo que anteriormente estaban bien delimitadas, han perdido su individualidad. Entre las gotas 2 y 12 se establecen atracciones del tipo dipolo-dipolo acercándose mediante el extremo positivo de una y el extremo negativo de otra. (ver Fig. 37 (b))

A los 20 segundos, entre las gotas 17 y 9 se genera un movimiento de partículas causado por los efectos de la polarización. Es un fenómeno que decae con la distancia. Es el fenómeno conocido como dielectroforesis. Dos gotas polarizadas se acercan entre sí, cualquiera de las gotas puede atraerse o repelerse, dependiendo de su posición relativa en el campo. (ver Fig. 37 (c))

A los 26 segundos, luego de incrementar la intensidad de campo a 6KV/cm se observa que las gotas han coalescido con tamaños cada vez mayores, estando bien delimitadas. Se establecen interacciones debidas a fuerzas electroforeticas, las cuales consisten en fuerzas repulsivas y atractivas que se presentan en campos eléctricos uniformes de corriente tanto directa como alterna. Estas fuerzas decaen con la distancia y son proporcionales al campo aplicado y a la carga presente en las gotas.

Por lo que la dirección de la fuerza depende de la polaridad de la carga que adquiere la gota de agua y la dirección del campo eléctrico alterno aplicado. A bajas frecuencias, cuando una partícula se somete a un campo homogéneo de corriente alterna, esta oscila debido a los cambios de polaridad de los electrodos. Sin embargo, en este caso, dada la frecuencia de cambio (60 veces por segundo) dicha oscilación no se observa a simple vista, con la magnificación empleada. Lo que si se apreció fue un desplazamiento neto de las gotas, donde se observó que las gotas 18 y 19 (se atraen) y en las gotas 26 y 27 se repelen. Evidenciando las fuerzas de atracción y repulsión electroforéticas. (ver Fig. 37 (d))

A los 31 segundos y 6 KV/cm se observa como las gotas coalescen en una gota mas grande que se expande hacia la parte superior izquierda, evidenciando esto el efecto positivo de la aplicación de campo eléctrico alterno en la desestabilización de la emulsión W/O. (ver Fig. 37 (e))

#### **IV.4. REPRODUCIBILIDAD DE LOS FENÓMENOS OBSERVADOS EN LA “CELDA DE OBSERVACIÓN”, EN LA “CELDA DE TRABAJO”.**

Con el fin de evaluar la reproducibilidad de los fenómenos presentes en la “celda de observación”, se aumentó el volumen de muestra a ser tratada en más de un 5000% utilizando la “celda de trabajo”; para ello en las distintas zonas de la “celda de trabajo” se cuantificó el grado de separación con el fin de hacer un análisis de los resultados obtenidos en estas experiencias y de este modo poder relacionar el comportamiento de la muestra en todas estas zonas, con lo apreciado en la “celda de observación” de modo de poder determinar las posibles causas en su comportamiento a mayor escala.

Una vez que se definieron las variables de viscosidad (tiempo de escurrimiento), solvente (mejor dilución) y voltaje óptimo (mejor factor de desestabilización), se experimentó con un volumen más grande, a las condiciones más favorables al proceso y con un tiempo de aplicación del campo eléctrico AC de 90 segundos. Se utilizaron técnicas de microscopía óptica para el análisis del tamaño de partículas.

A continuación se presentan los resultados y las imágenes, después de las experiencias realizadas a las intensidades de campo eléctrico definidas y en las distintas zonas de la “celda de trabajo”, estudiando el comportamiento de la muestra por secciones (I: izquierda, M: media, D: derecha), para la fosa Acema-100 y para las diluciones de las fosas Merey-31:xileno (18:1) y Guara-2:xileno (13:1).

En la Tabla N° 14 se presentan los resultados para la fosa Acema-100 correspondientes a la “celda de trabajo”, sin y con aplicación de campo eléctrico, donde se puede resaltar que los mayores valores para el factor de desestabilización (FD) se observan en la región del electrodo izquierdo y en el medio de la celda; mientras que para la región derecha estos valores son pequeños. Adicionalmente, en comparando el FD global de la celda de trabajo con el FD de la celda de observación, para el material de fosa Acema-100 a 6 KV/cm, se observa que este valor es 0,18, lo cual es atribuible a los efectos de la viscosidad que están presentes. Comparando de igual manera la media de la fracción acumulada ( $D_{50}$ ), para la celda de observación

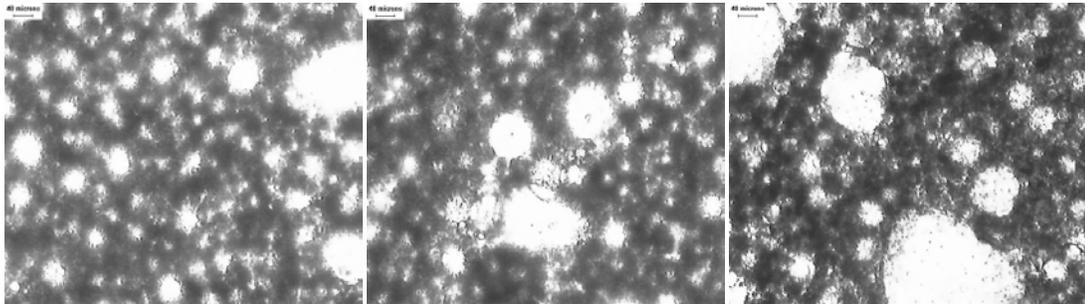
este valor es 8 veces mayor que el reportado para la celda de trabajo, evidenciando que aún cuando se aplica la misma intensidad de campo eléctrico, la distancia entre los electrodos juega un papel importante, para los efectos eléctricos que se manifiestan con la aplicación del campo eléctrico.

Tabla N° 14. Resultados de la fosa Acema-100 a 6KV/cm, en la celda de trabajo.

Parámetros	Patrón (0 KV)	Zonas a 6KV/cm									Global
		Electrodo Izquierdo			Intermedio			Electrodo derecho			
		I1	I2	I3	M1	M2	M3	D1	D2	D3	
D <sub>10</sub> (μm)	6,96	5,18	16,18	18,38	1,13	3,74	10,25	5,17	7,41	6,08	6,96
D <sub>50</sub> (μm)	44,79	60,35	83,25	102,89	76,59	26,96	100,14	28,96	36,51	31,44	71,95
D <sub>90</sub> (μm)	166,73	184,24	149,19	185,32	132,63	103,78	162,57	114,48	95,40	94,71	151,48
D <sub>max</sub> (μm)	183,49	237,78	151,57	201,98	150,95	107,14	179,80	166,04	126,95	120,94	237,78
F <sub>2</sub> (40μm)	0,45	0,38	0,22	0,22	0,38	0,59	0,22	0,59	0,52	0,60	0,31
R <sub>2</sub> (40μm)	0,55	0,62	0,78	0,78	0,62	0,41	0,78	0,41	0,48	0,40	0,69
φ <sub>w</sub> (%)	22,09	27,65	26,63	25,07	17,29	16,75	33,09	27,28	19,15	20,30	22,82
Φ <sub>w</sub> (40μm) (%)	12,1	17,20	20,90	19,50	10,7	6,90	25,70	11,10	9,20	8,20	15,8
Φ <sub>w</sub> <sup>0</sup> (40μm) (%)	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1
<b>FD</b>	<b>1</b>	<b>1,41</b>	<b>1,73</b>	<b>1,61</b>	<b>0,88</b>	<b>0,57</b>	<b>2,14</b>	<b>0,92</b>	<b>0,76</b>	<b>0,68</b>	<b>1,30</b>

Mediante el conjunto de imágenes de la Figura N°38, se observa la muestra de Acema-100 sin y con aplicación de campo eléctrico, donde se aprecia como las gotas al aplicar la corriente eléctrica se deforman para unirse con otras y forman canales de agua que son la unión de gotas deformadas (región I2).

Se observa que en las regiones, izquierda, media y derecha el porcentaje de agua en relación al área total de la imagen (φ<sub>w</sub>) oscila entre los valores de 16,75% y 33,09%. Sin embargo, el mayor porcentaje de agua en gotas grandes (Φ<sub>w</sub>(40μm)) se encuentra en la región del electrodo izquierdo con valores entre el 17,20% y 20,90% en comparación con los porcentajes de agua en gotas grandes de la zona media y derecha.



Sin aplicación de campo eléctrico

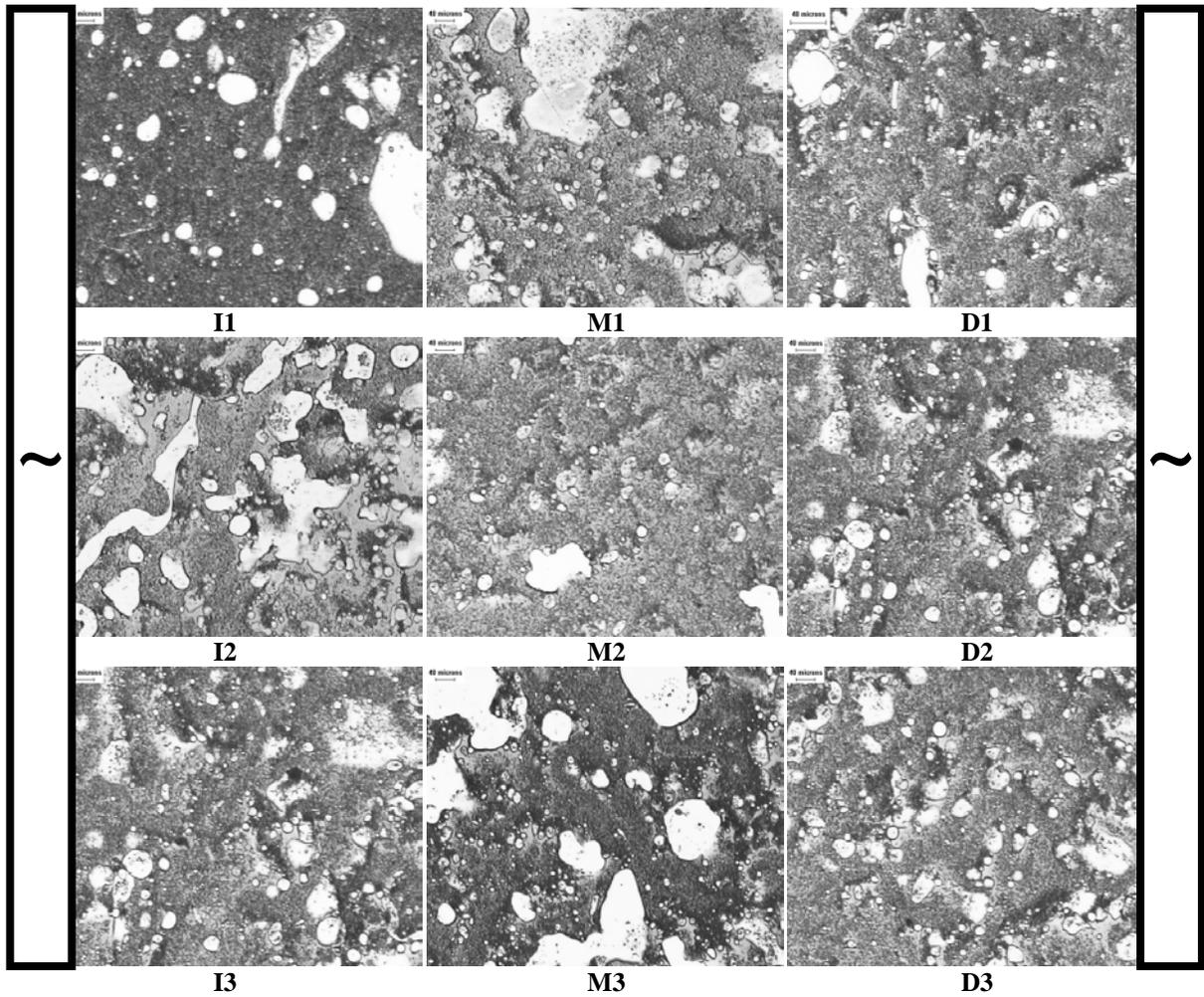


Figura N° 38. Muestra de Acema-100 sin aplicación y con aplicación de campo eléctrico de 6KV/cm, en las distintas zonas de la celda de trabajo.

Esta disposición de las gotas grandes hacia el electrodo izquierdo explica el porqué el factor de desestabilización en esta zona es más alto (casi el doble) que el patrón

(muestra sin campo eléctrico) y más alto que en las zonas media y derecha, donde se encuentra que el factor de desestabilización es bajo.

Un detalle que vale la pena comentar es el hecho de que en las imágenes presentadas en la figura N°38, se observan algunas zonas que presentan relieve, por lo que pareciera indicar que la película de la muestra no es lo suficientemente delgada, pudiendo estar varias capas juntas, conteniendo gotas de agua bajo la película de hidrocarburo, siendo en estos casos imprecisa la cuantificación del agua presente.

Por otra parte, en la Tabla N° 15 se presentan los resultados para la dilución de la fosa Guara-2:xileno (13:1) correspondientes a la “celda de trabajo”, sin y con aplicación de campo eléctrico.

Tabla N° 15. Resultados de la fosa Guara-2:xileno (13:1) en la celda de trabajo.

Parámetros	Patrón (0 KV)	Zonas a 6KV/cm									Global
		Electrodo Izquierdo			Intermedio			Electrodo derecho			
		I1	I2	I3	M1	M2	M3	D1	D2	D3	
D <sub>10</sub> (μm)	4,65	6,77	6,08	21,02	4,37	4,22	9,06	5,33	2,99	6,68	4,37
D <sub>50</sub> (μm)	30,48	39,45	29,82	160,98	21,51	23,96	75,32	19,04	24,03	74,50	21,51
D <sub>90</sub> (μm)	122,73	193,45	171,55	253,20	69,11	137,70	194,90	71,95	60,99	276,50	69,11
D <sub>max</sub> (μm)	176,22	221,93	182,05	263,65	115,58	156,71	222,38	115,58	75,37	328,60	115,58
F <sub>2</sub> (40μm)	0,57	0,20	0,55	0,20	0,69	0,57	0,35	0,69	0,70	0,40	0,69
R <sub>2</sub> (40μm)	0,43	0,51	0,45	0,80	0,31	0,43	0,65	0,31	0,30	0,60	0,31
φ <sub>w</sub> (%)	35,62	42,58	37,19	40,06	25,36	28,74	21,41	44,09	10,67	79,81	25,90
Φ <sub>w</sub> (40μm) (%)	14,00	21,00	16,90	32,00	7,9	12,30	13,90	13,90	3,20	47,90	8,00
Φ <sub>w</sub> <sup>0</sup> (40μm) (%)	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00
<b>FD</b>		<b>1,50</b>	<b>1,21</b>	<b>2,29</b>	<b>0,56</b>	<b>0,88</b>	<b>0,99</b>	<b>0,99</b>	<b>0,23</b>	<b>3,42</b>	<b>0,57</b>

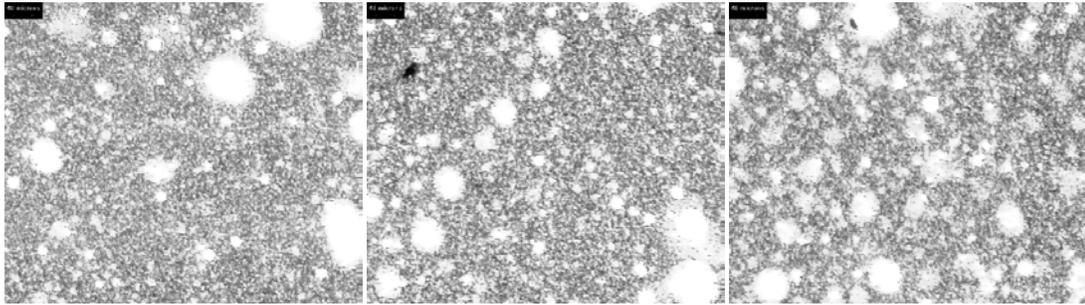
Es apreciable que los valores del factor de desestabilización en la celda de observación son mayores que los obtenidos en la celda de trabajo, esto posiblemente sea originado por la diferencia tanto del volumen procesado como por la separación de los electrodos en ambos sistemas. Se puede resaltar que los valores para el factor de desestabilización que se observan en la región del electrodo izquierdo son más

altos que para las regiones media y derecha. Sin embargo, si se comparan con los valores de la región derecha, estos están más próximos que los valores de la región media. Para todas las regiones de la muestra el porcentaje de agua en relación al área total de la imagen ( $\phi_w(\%)$ ) muestra valores relativamente altos, con un global del 25,90%. En relación al porcentaje de agua en gotas grandes ( $\Phi_w(40\mu\text{m})$ ), para el electrodo derecho se obtiene en promedio el valor de 21,67%; mientras que para la zona media 11,37% y la izquierda 23,30%.

Para las regiones, izquierda y derecha, los valores del factor de desestabilización son relativamente similares, no siendo así para la región media donde se obtienen los valores más bajos.

En la siguiente figura (Fig. N°39), se puede apreciar visualmente los cambios originados por la aplicación del campo eléctrico alterno, a la dilución Guara-2:xileno (13:1), donde se observa lo poco significativo que es la aplicación del campo eléctrico para esta dilución; por lo tanto, se evidencia porque los valores del FD obtenidos son muy cercanos o menores a 1.

En las imágenes presentadas, la fase hidrocarburo es más homogénea que las discutidas anteriormente, por lo que la medidas realizadas por microscopía son más confiables.



Sin aplicación de campo eléctrico

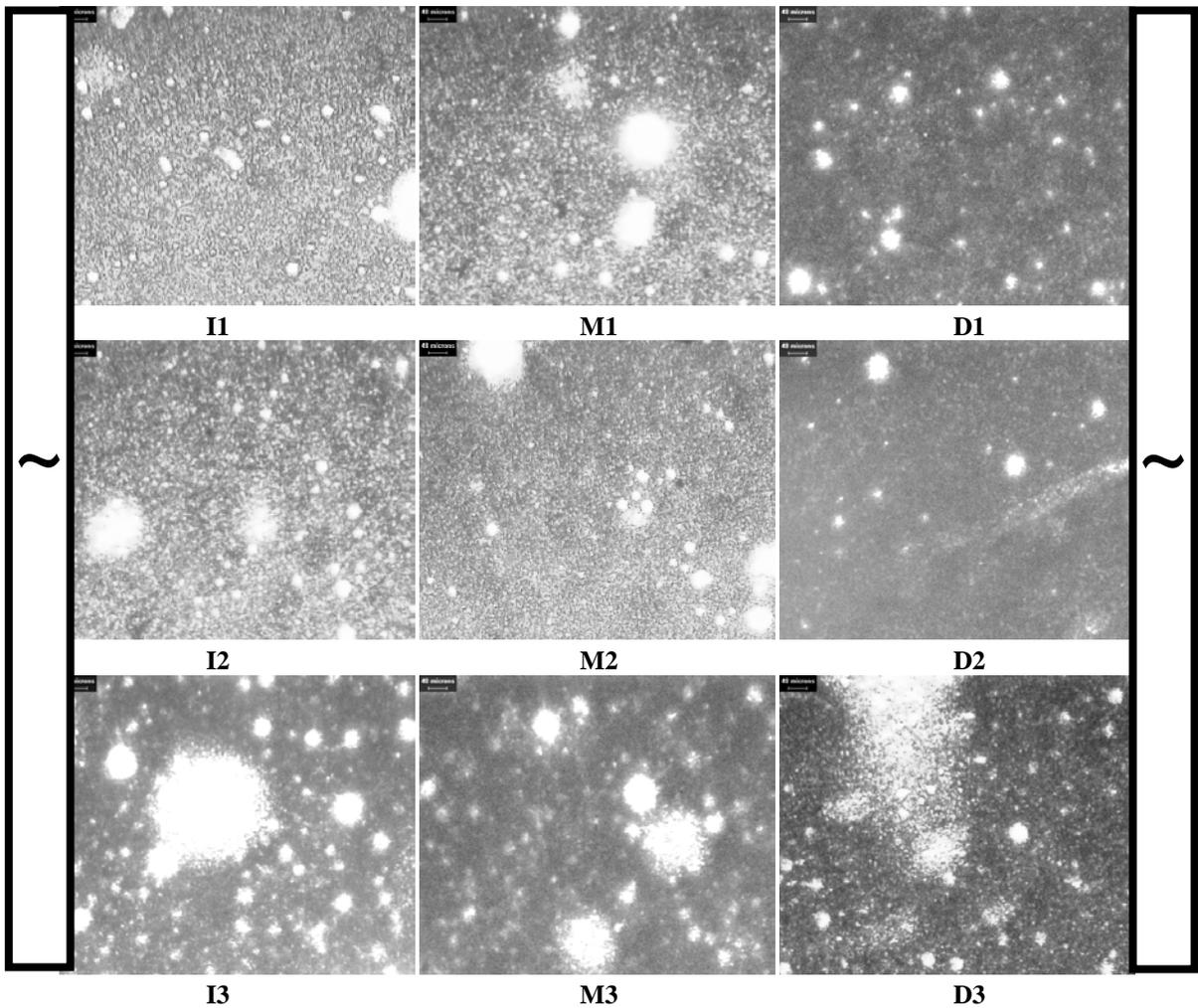


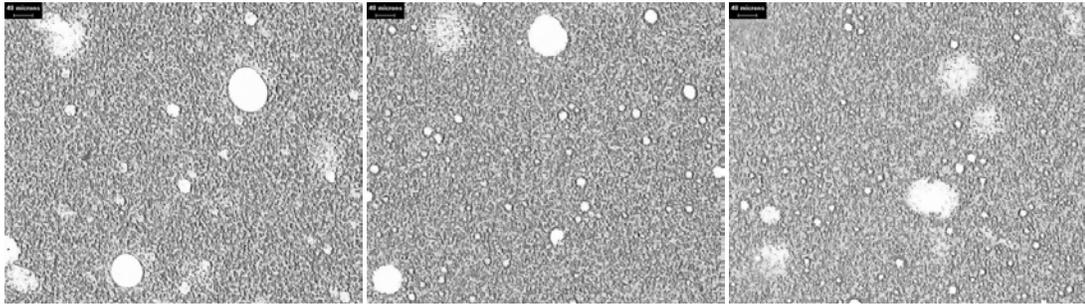
Figura N° 39. Muestra de Guara-2:xileno (13:1) sin aplicación y con aplicación de campo eléctrico de 6KV/cm, en las distintas zonas de la celda de trabajo.

En la Tabla N° 16 se presentan los resultados para la dilución de la fosa Merey-31:xileno (18:1) correspondientes a la “celda de trabajo”, sin y con aplicación de campo eléctrico.

Tabla N° 16.Resultados de la fosa Merey-31:xileno (18:1) en la celda de trabajo.

Parámetros	Patrón (0 KV)	Zonas a 4KV/cm									Global
		Electrodo Izquierdo			Intermedio			Electrodo derecho			
		I1	I2	I3	M1	M2	M3	D1	D2	D3	
D <sub>10</sub> ( μm)	3,57	2,26	2,99	4,07	2,26	3,39	3,39	3,57	2,99	4,22	2,26
D <sub>50</sub> ( μm)	8,14	26,77	10,59	11,11	8,21	8,52	32,17	10,83	8,60	63,25	26,77
D <sub>90</sub> ( μm)	82,18	186,63	110,88	49,74	47,30	37,92	114,48	110,08	95,10	167,08	186,63
D <sub>max</sub> ( μm)	98,36	231,18	163,95	127,72	59,31	74,55	115,39	177,82	101,82	218,01	231,73
F <sub>2</sub> (40μm)	0,81	0,55	0,61	0,85	0,77	0,91	0,55	0,68	0,79	0,47	0,55
R <sub>2</sub> (40μm)	0,19	0,45	0,39	0,15	0,23	0,09	0,45	0,32	0,21	0,53	0,45
φ <sub>w</sub> (%)	19,04	17,80	15,93	25,12	10,92	17,32	14,41	33,23	14,90	28,94	12,02
Φ <sub>w</sub> (40μm) (%)	3,70	8,1	6,30	3,90	2,50	1,60	6,50	10,5	3,20	15,40	5,5
Φ <sub>w</sub> <sup>0</sup> (40μm) (%)	3,70	3,70	3,70	3,70	3,70	3,70	3,70	3,70	3,70	3,70	3,70
<b>FD</b>	<b>1</b>	<b>2,19</b>	<b>1,70</b>	<b>1,05</b>	<b>0,67</b>	<b>0,43</b>	<b>1,76</b>	<b>2,84</b>	<b>0,86</b>	<b>4,16</b>	<b>1,48</b>

En la tabla anterior, se puede distinguir que los mayores valores para el factor de desestabilización (FD) se observan en la región del electrodo derecho, ya que en esta región se encuentra el mayor porcentaje de agua en relación al área total de la imagen (promedio 25,69%) y adicionalmente allí está distribuida la mayor cantidad de agua en gotas grandes (9,7%).



Sin aplicación de campo eléctrico.

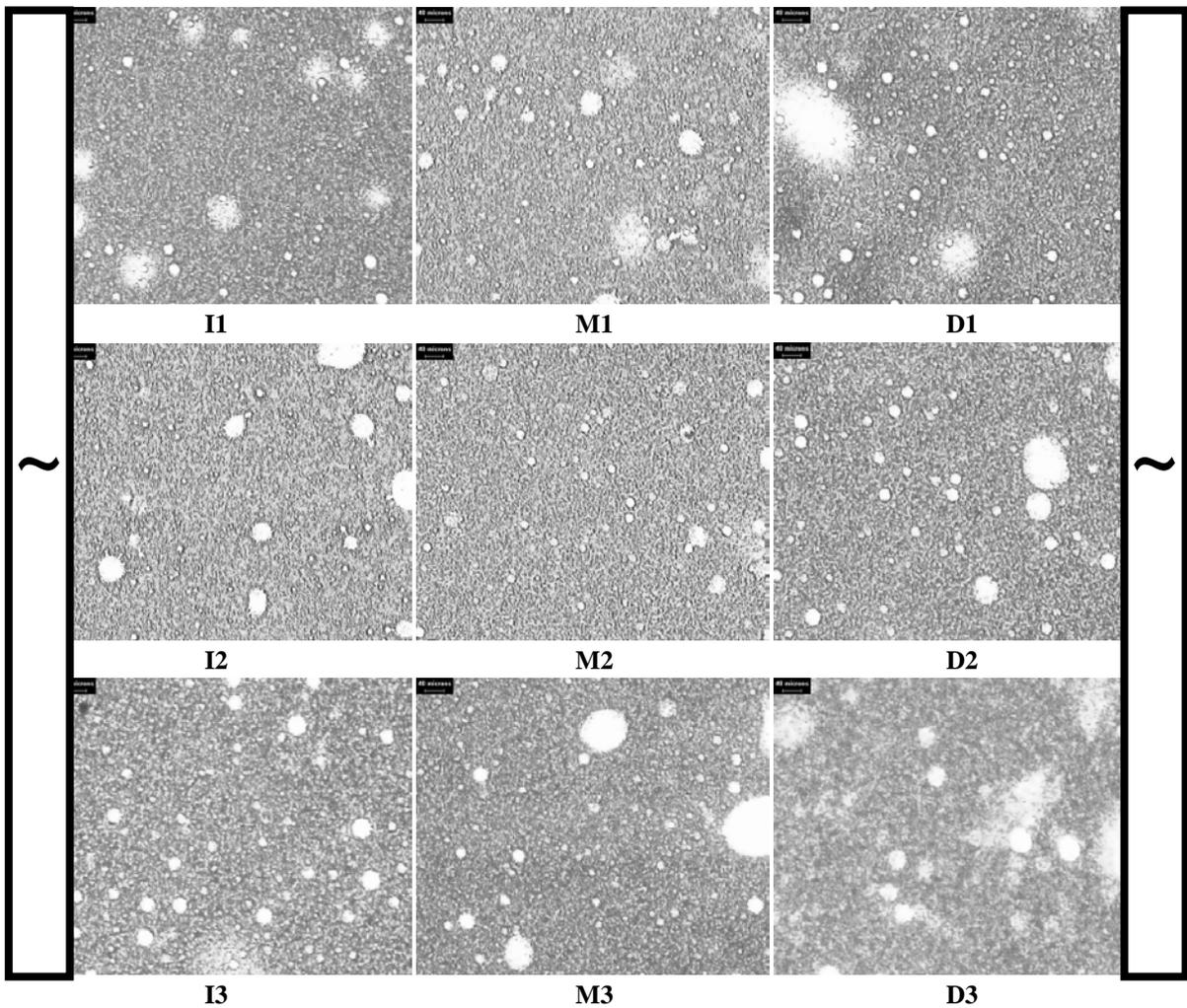


Figura N° 40. Muestra de Merely-31:xileno (18:1) sin aplicación y con aplicación de campo eléctrico de 4KV/cm, en las distintas zonas de la celda de trabajo.

En comparación con la dilución de Guara-2:xileno (13:1), se obtienen valores mayores para el FD, pudiendo indicar esto que los efectos viscosos son menos importantes en la dilución de Merey-31 que en la de Guara-2, aún cuando ambos tienen similares tiempos de escurrimiento.

En las imágenes presentadas en la figura 40, se observa que hay crecimiento del tamaño de las gotas pero no hay deformación de ellas ni formación de canales de agua con la aplicación de una intensidad de campo eléctrico igual a 4KV/cm.

Al comparar el efecto de los tipos de corriente (directa y alterna) en el efecto desestabilizador de la emulsión para la fosa de producción Acema-100, con un porcentaje de agua visible del 22% se obtiene que para alcanzar el mismo grado de desestabilización en esta fosa, la corriente alterna es más efectiva a voltajes elevados (6KV/cm) en relación a la corriente directa que es efectiva a bajos voltajes (2KV/cm); sin embargo, la mediana de la distribución es mayor para el caso de la corriente alterna. (ver tabla N°17)

Tabla N° 17. Comparación del efecto desestabilizador de los tipos de corriente.

Material de fosa	Voltaje aplicado (KV/cm)	FD	D <sub>50</sub> (µm)	ϕ <sub>w</sub> (%)
Corriente directa				
Acema-100	2	1,3	27,16	22,30
Corriente alterna				
Acema-100	6	1,3	71,95	22,82

#### **IV.5. CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE UNA NUEVA CELDA.**

En el transcurso de este trabajo se presentaron varias limitaciones en el uso de la celda de trabajo, por lo que se proponen algunas ideas que pueden mejorar el sistema empleado, para el desarrollo de experiencias que faciliten el estudio del fenómeno de desestabilización electrostática. Se plantea:

- (a) Disminuir la viscosidad del material de fosa usando un sistema térmico como por ejemplo una chaqueta de calentamiento, ya que la interacción con los solventes (parafínico o aromático) tiene un efecto en el proceso de coalescencia.
- (b) Al usar corriente alterna como la polaridad cambia a una frecuencia de 60 Hz, es posible que las gotas se dirijan hacia la parte media entre los electrodos de la celda, aumentando la probabilidad de coalescencia y evitando corto circuito; este fenómeno estuvo presente motivado a la percolación de la gotas de agua en la celda de trabajo para el caso del material de fosa Acema-100, debido a su alto contenido de agua.
- (c) El uso de un medio coalescedor en combinación con la celda de aplicación de campo eléctrico podría favorecer la separación.
- (d) Considerar el uso de ambos tipos de corriente en el diseño de la celda, es decir, incluir tanto corriente directa como corriente alterna.
- (e) Dado que el material de fosa Acema-100 presento la formación de cadenas de agua (percolación) se sugiere trabajar en una celda de flujo continuo para evitar este fenómeno.
- (f) El material de la fosa Guara-2 diluido con xileno (13:1) presento una especial interacción con el material de vidrio de los portaobjetos, ya que las gotas de agua se esconden o escurren por fuerzas de atracción con este material.
- (g) Con el diseño de una celda en continuo es posible incrementar o disminuir el tiempo de residencia de modo de definir cuál es la mejor condición para el proceso de separación electrostática.

## CAPITULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### V.1. CONCLUSIONES

Luego de realizada la metodología planteada con este Trabajo Especial de Grado y presentados tanto los resultados como la discusión de los mismos, se llega a las siguientes conclusiones:

- El tiempo de escurrimiento usando el principio de Saybolt, resultó ser una medida sencilla y efectiva para el establecimiento de viscosidad similar para los diferentes materiales de fosa en estudio.
- Cada material de fosa presentó un comportamiento particular en función del solvente empleado.
- El mejor solvente desestabilizante en cuanto al incremento del tamaño de las gotas, para el material de la fosa Guara-2 fue el solvente aromático (xileno) y para el material de la fosa Merey-31 fue el solvente parafínico (hexano).
- La dilución con un solvente aromático fue más efectiva para fosa con menor contenido de aromáticos (Guara-2) y la dilución con un solvente parafínico fue más efectiva para la fosa con menor contenido de saturados (Merey-31), independiente del contenido de resinas y asfaltenos por ser similares.
- El incremento en la intensidad del campo eléctrico en la celda de observación, no origina de forma lineal un incremento en el tamaño de las gotas ni de la cantidad de agua presente en la muestra.
- Para el material de las fosas Acema-100 y Guara-2:xileno (13:1) la intensidad de campo eléctrico más favorables para la desestabilización en la celda de

trabajo fue de 6 KV/cm, mientras que para el material de la fosa Merey-31:xileno (18:1) fue de 4 KV/cm.

- Las zonas más efectivas para la desestabilización en la celda de trabajo fue la izquierda para todos los casos, seguida de la derecha para las diluciones de Guara-2 y Merey-31 con xileno; y por último la zona media para la muestra Acema-100 sin dilución.
- En el escalamiento de la celda se obtiene un factor de desestabilización menor, dada una mayor separación entre los electrodos y una muestra de mayor volumen, aun cuando se mantiene la misma intensidad de campo eléctrico.
- El tiempo de aplicación del campo eléctrico de 90 segundos es suficiente para desestabilizar los materiales de fosa en estudio; sin embargo, se presenta corto circuito a medida que el contenido de agua en la muestra es mayor.
- El factor de desestabilización (FD) es un parámetro sencillo y efectivo, que permite identificar el efecto de la aplicación del campo eléctrico en la muestra.
- La desestabilización electrostática es más efectiva al emplear voltajes altos de corriente alterna.
- En la desestabilización electrostática con campo eléctrico alterno, están presentes los fenómenos de electroforesis, dielectroforésis, atracción dipolo-dipolo, atracción y repulsión, rompimiento, colaescencia y percolación.
- Con el uso de técnicas de video y de microscopia óptica es posible detectar y analizar los fenómenos electrostáticos que suceden cuando el material de fosa es sometido a un campo eléctrico de corriente alterna.
- La toma y preparación de la muestra para aplicación de microscopía es un paso vital que determina los resultados a obtener.

## **V.2. RECOMENDACIONES**

Con el fin de mejorar futuras experiencias en el proyecto de investigación al cual está asociado este Trabajo Especial de Grado, se recomienda:

- Automatizar la captura de imágenes mediante el uso de una platina motorizada.
- Disminuir la viscosidad del material de las fosas con un sistema de calentamiento.
- Incorporar medios coalescedores en la nueva celda de trabajo con el fin de, aumentar la coalescencia.
- Desarrollar una celda de trabajo que trabaje en flujo continuo, evitando la presencia de corto circuito.
- Evaluar la influencia del campo eléctrico no homogéneo, en una celda cilíndrica

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. ABOU-NEMEH I., MOORS M., VAN PETERGHEM A. (1992). Electrostatic splitting of metals separation. Sep. Sci. Technol. 27. September, pages 13-19.
2. ALMEIDA A., RODRIGUEZ N. (2006). Estudio de la coalescencia y sedimentación de emulsiones de agua en aceite bajo efecto del campo eléctrico DC. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
3. BAILES P., LARKAY S. (1981) Trans. Inst. Chem. Eng. (59), pág. 29.
4. CHEN T., MOHAMMED R., BARLEY A., LUCKMAN P., TAYLOR S. (1994). Dewatering of crudo oil emulsions 4, emulsions resolution by the application of an electric field. Colloids and Surfaces A. (83), pages 273-284.
5. COTTRELL R. (1911). Processs for separating and collecting particles of one liquid suspended in another liquid. US Patent 98 (1911), pages 421,721.
6. COTTRELL F., SPEED J., (1911). Separating and collecting particles of one liquid suspended in another liquid.US patent 987, pág. 115.
7. FUNG E. (2011). Sistematización de las técnicas de caracterización de emulsiones de fosas. Estudio de sistemas con análisis de imágenes. Pasantía de Investigación. Universidad Central de Venezuela. Caracas.
8. FUNG E. (2011). Desestabilización electrostática con corriente directa de material de fosas de producción mezclados con solventes. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Caracas.

9. HAUERTMANN H., DEGENER W., SCHUGERL K. (1989). Electrostatic coalescence: reactor, process control, and important parameters. *Sep. Sci. Technol.* 24, pages 253-273.
10. LESS S., HANNISDAL A., BJØRKLUND E., SJÖBLOM J. (2008). Electrostatic destabilization of water-in-crude oil emulsions: application to a real case and evaluation of the Aibel VIEC technology, *Fuel* 87, pages 2572–2581.
11. LESAIN C., GLOMM W., LUNGAARRD L. (2009). Dehydration efficiency of AC electrical fields on water-in model-oil emulsions. *Colloids and Surfaces A*.352, pages 63 -69.
12. GARCÍA A. (2012). Desestabilización electrostática continua de la emulsión agua.en hidrocarburo de la fosa de producción Merey-31. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Caracas.
13. GÓMEZ B.(2012). Desestabilización electrostática continua de la emulsión agua.en hidrocarburo de la fosa de producción Guara-2. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Caracas.
14. GÓNZALEZ M.(2012). Desestabilización electrostática continua de la emulsión agua.en hidrocarburo de la fosa de producción Acema-100 Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Caracas.
15. MARFISI S. (2005). Estabilidad de las emulsiones relacionada con los procesos de deshidratación de crudos. Tesis Doctoral. Universidad de los Andes. Mérida.
16. MARFISI S., SALAGER J.(2004). Deshidratación de crudos. Cuaderno FIRP N° 853-PP. Universidad de los Andes. Mérida.

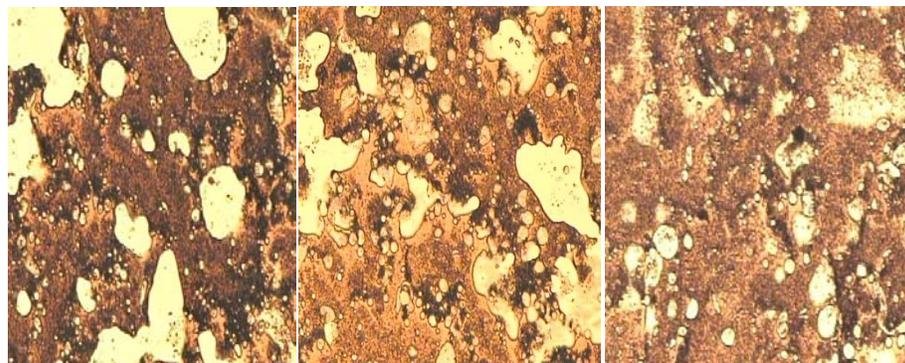
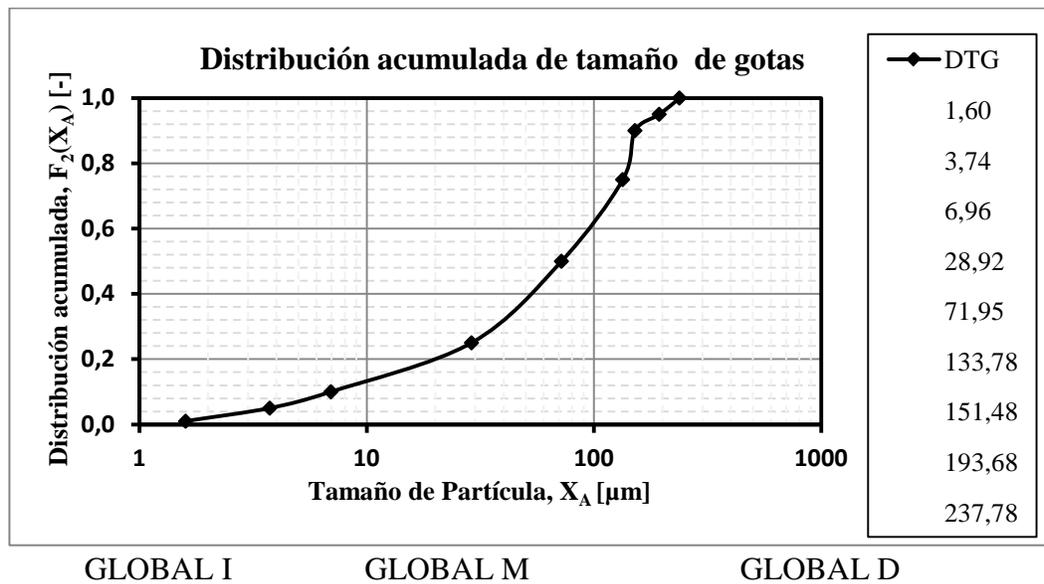
17. MÉNDEZ A.(2005). Desestabilización de emulsiones provenientes de los lodos de fosas para la recuperación de crudo usando solventes orgánicos y sales. Trabajo Especial de grado. Universidad Central de Venezuela. Caracas.
18. P
19. ADRÓN A., ZÚÑIGA P. (2005). Aplicación de la técnica de microscopía óptica para la caracterización de sistemas dispersos formados por crudo, agua y sólidos. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Caracas.
20. SERWAY R. ,FAUGH J.(2004). Fundamentos de Física. Tercera Edición. México. Cengage Learning Editores. 448 páginas.
21. SORRENTINO J. A. (2002). Advances in correlating filter cake properties with particle collective characteristics, Tesis Doctoral Universidad de Karlsruhe. Shaker Verlag. Alemania.
22. SLOBLOM J. (2006).Emulsions and emulsions stability.UK. Taylor & Francis. 668 páginas.
23. TADROS T. (2004). Application of rheology for assessment and prediction of the long-term physical stability of emulsions. Adv Colloid interfase sci. 108-109, pages 227-258.
24. TAYLOR S. (1991). Conductivity and coalescence of water in crude oil emulsion under high electric fields. Inst Phys.Conf.Ser.118 (3), pages 185-190.
25. WATERMAN L. (1965). Electrical coalecers. Chem. Eng. Prog. 61 (10) pages 51-57.

## ANEXOS

## ANEXOS

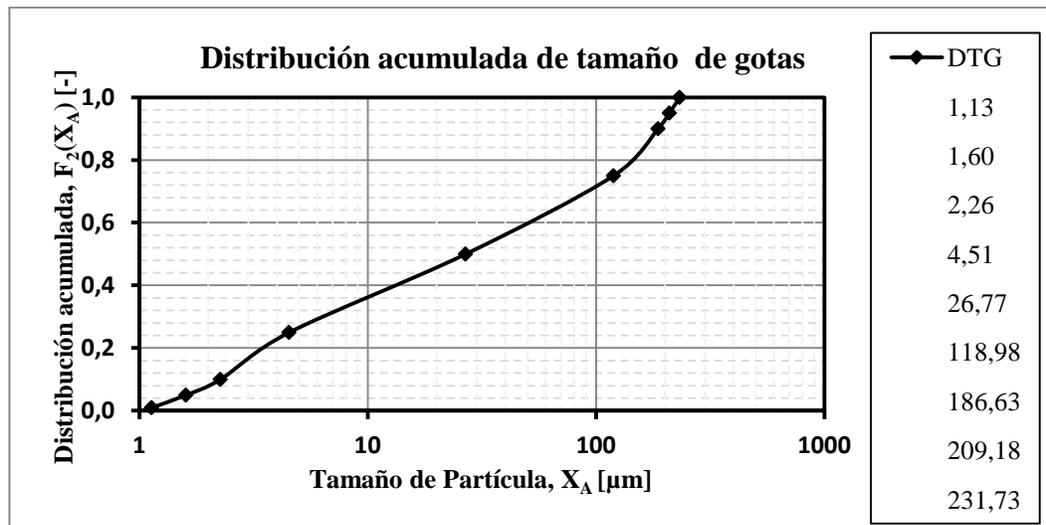
### ACEMA 6 KV/cm PLANTILLA GLOBAL CELDA DE TRABAJO.

$X_A = 40 \mu\text{m}$	
$F_2(40) = 0,31$	
$R_2(40) = 0,69$	
$D_{50} = 71,95 \mu\text{m}$	
$\phi_w = 47,00\%$	
$\Phi_w(40) = 32,5\%$	



**MEREY XILENO\_4 KV/cm\_GLOBAL.  
CELDA DE TRABAJO.**

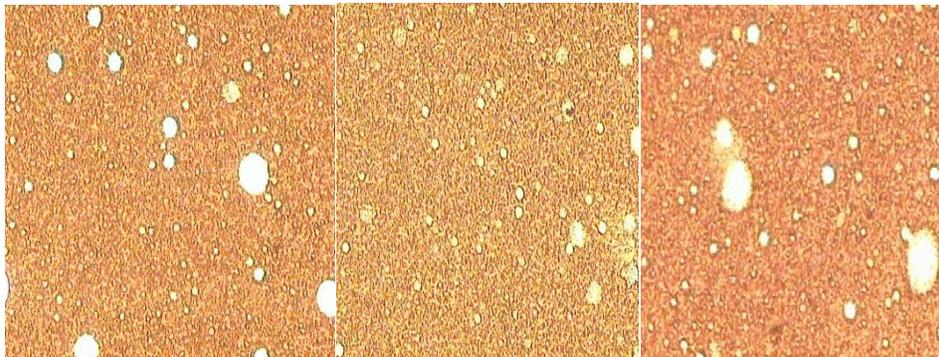
$X_A = 40 \mu\text{m}$	
$F_2(40) = 0,55$	
$R_2(40) = 0,45$	
$D_{50} = 26,77 \mu\text{m}$	
$\phi_w = 12,02\%$	
$\Phi_w(40) = 5,5\%$	



GLOBAL I

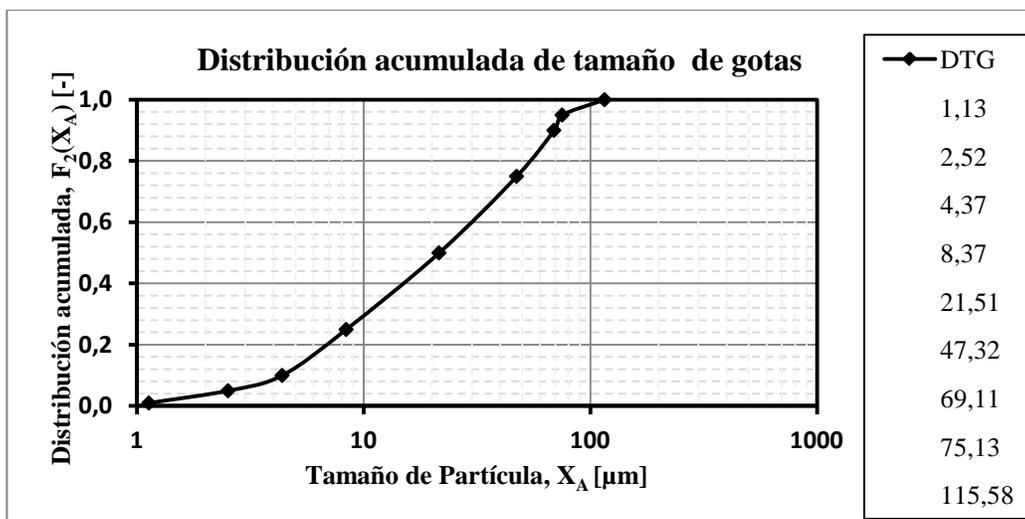
GLOBAL M

GLOBAL D



**GUARA XILENO\_ 6 KV/cm\_GLOBAL.  
CELDA DE TRABAJO.**

$X_A = 40 \mu\text{m}$	
$F_2(40) =$	0,69
$R_2(40) =$	0,31
$D_{50} =$	21,51 $\mu\text{m}$
$\phi_w =$	25,36%
$\Phi_w(40) =$	7,9%



GLOBAL I

GLOBAL M

GLOBAL D

