

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DESESTABILIZACIÓN ELECTROSTÁTICA CONTINUA DEL MATERIAL DE LA FOSA DE PRODUCCIÓN GUARA-2

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
por la Br. Gómez C., Betty C.
para optar al Título
de Ingeniero Químico

Caracas, 2012

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DESESTABILIZACIÓN ELECTROSTÁTICA CONTINUA DEL MATERIAL DE LA FOSA DE PRODUCCIÓN GUARA-2

TUTORES ACADÉMICOS:

Prof. José Ángel Sorrentino.

Profa. María Alejandra Rodríguez.

Trabajo Especial de Grado
presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
por la Br. Gómez C., Betty C.
para optar al Título
de Ingeniero Químico

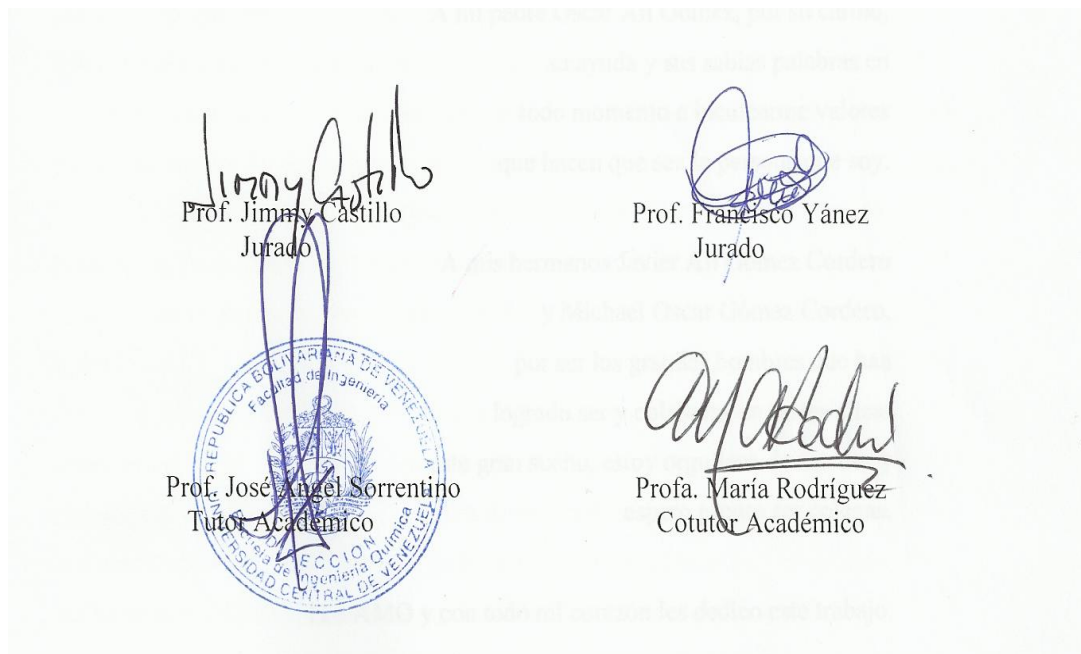
Caracas, 2012

Caracas, junio de 2012

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Química, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por la Bachiller Gómez C. Betty C., titulado:

**“DESESTABILIZACIÓN ELECTROSTÁTICA CONTINUA
DEL MATERIAL DE LA FOSA DE PRODUCCIÓN
GUARA-2”**

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.



The image shows the signatures and stamps of the jury members and the academic tutor. On the left, the signature of Prof. Jimmy Castillo is above the text "Prof. Jimmy Castillo" and "Jurado". Below this is the signature of Prof. José Ángel Sorrentino, with a circular stamp of the "REPUBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA" and "Facultad de Ingeniería" overlaid. On the right, the signature of Prof. Francisco Yánez is above the text "Prof. Francisco Yánez" and "Jurado". Below this is the signature of Profa. María Rodríguez, with the text "Profa. María Rodríguez" and "Cotutor Académico" below it.

Prof. Jimmy Castillo
Jurado

Prof. Francisco Yánez
Jurado

Prof. José Ángel Sorrentino
Tutor Académico

Profa. María Rodríguez
Cotutor Académico

DEDICATORIA

A Dios, por iluminarme y darme las fuerzas
necesarias para cumplir con esta meta.

A mi querida madre Betty Esperanza Cordero,
por ser mi mayor inspiración,
mi ejemplo a seguir y enseñarme a
luchar por alcanzar lo que me propongo;
quien no conforme con darme la vida, entrega
incondicionalmente todo su amor a
cada uno de sus hijos.

A mi padre Oscar Alí Gómez, por su cariño,
su ayuda y sus sabias palabras en
todo momento e inculcarme valores
que hacen que sea la persona que soy.

A mis hermanos Javier Alí Gómez Cordero
y Michael Oscar Gómez Cordero,
por ser los grandes hombres que han
logrado ser y colaborar en materializar
este gran sueño, estoy orgullosa de ustedes y
espero pronto ser colegas.

Los AMO y con todo mi corazón les dedico este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por escucharme en mis suplicas y bendecirme con salud, paciencia, perseverancia, fe y amor, logrando lo que me propongo.

A la ilustre Universidad Central de Venezuela, el lugar que me brindó la oportunidad de crecer como persona y formarme en sus aulas. Que orgullo es para mí ser UCEVISTA y pertenecer a esta casa de estudios, la casa que vence las sombras.

A mi apreciada profesora y tutora María Alejandra Rodríguez por convertirse en mi segunda madre, enseñarme que con paciencia, empeño, organización y ganas se logran las cosas, por su tiempo dedicado, sus consejos en todo momento y cada grato minuto compartido dentro y fuera del L.S.M. Un placer trabajar con usted. Éxitos en la culminación de su trabajo. La admiro.

A mi apreciado profesor y tutor José Ángel Sorrentino, por sus buenas ideas y su orientación acertada en la resolución de dificultades, por su colaboración para la exitosa culminación de este trabajo.

Al señor Armando Martínez, por todos los valiosos aportes que hicieron posible la realización de esta meta. Mil gracias!!

A los profesores y jurados, Prof. Francisco Yáñez y Prof. Jimmy Castillo, quienes con sus criterios corrigieron este trabajo, aportando grandes sugerencias para cumplir con los objetivos planteados en el mismo. Gracias por todo!!!

A la empresa Jeantex, S.A. por abrirme las puertas y brindarme la oportunidad de realizar las pasantías, además de todo el personal que en ella trabaja, por su colaboración; a cada una de las empresas que durante la carrera me permitieron compartir cada uno de los diferentes procesos, complementando mi formación y al IDEA y todo su equipo de trabajo por su valiosa ayuda.

A mis padres y hermanos por todo su apoyo, sus palabras de aliento y amor infinito, este logro también es de ustedes; a toda mi familia, tías, tíos, primas y primos, por su cariño y palabras alentadoras.

A mi cuñada Yuli Velarde, por formar parte de la familia y ganarse el corazón de todos, su carisma, sus ocurrencias y su apoyo. Te quiero cuñaaaa!! El baile del triunfo, eh eh eh!!

A mis abuelos Elda María Cordero y Marcos Rafael Gómez, por sus bendiciones y su cariño, mi abuela Berenice Cogollo, se que desde el cielo nos proteges e iluminas.

A mi segunda familia, Aleida, Agny, Eleazar y Angélica por brindarme calor de hogar, y a ti compadre Elías Camero, me hubiese gustado que vieras este sueño realizarse, pero desde el cielo se que lo estás haciendo. Que Dios te tenga en la gloria.

A mis amigos y compañeros de este proyecto, el grupo WOSS del Laboratorio de Separaciones Mecánicas, Fung, Violeta, Ingemare, Axel, Armando y Maye (ustedes son hermanas?), por escucharme, ayudarme y todo el cariño brindado, te quiero casi morocha!! Éxitos colegas. Por supuesto al grupo Emulmemb (los blanquitos del L.S.M), mi amiga Lessa por su gran corazón y Myck por su amistad, “es que me da pena apaaa”!!. Aahh y a Andreina por sus regaños. Mil gracias por su apoyo en todo momento y los momentos alegres y amargos que compartimos dentro y fuera del lab. Los quiero!!

A mis estimados profesores: Humberto Kum, Luis García, Leonardo Oropeza, Jhonny Vásquez, Trino Romero, Amelia Estévez, Omaira Camacaro, Johliny Casanova, Miguel Ríos, Andrés Rosales, Enna Rosales, Mariluz Alonso, Alí Lara, Anubis Pérez, José Hernández, quienes construyeron los pilares principales de mi formación como ingeniero, enseñarme dentro y fuera de las aulas las herramientas necesarias para lograr llegar hasta el final de la carrera, siendo buenos amigos y consejeros.

A las excelentes y luchadoras mujeres de la Escuela Iraida, Leudith, Beatriz y Yeny. Gracias por su mano amiga, colaboración y alegría.

A Dona, Jorgito, Daniel, Edgardo, Saúl, Marijoo y amigos de SEIQ por la ayuda, el cariño, los gratos momentos y el buen trabajo en equipo. Éxitos.

A Yelitza, Emilio y el personal del DPA por su valiosa ayuda y los gratos momentos compartidos.

A mis compañeras de la residencia: Keren, Nelly, Diane, Herchi, Aridya, Lili, Paty, Ebonita, Elgi, Diana, Glau, Dale, Yesy y Karina por su colaboración y hacerme sentir como en familia. Las quierooo!!

A mis amigas y amigos de la universidad: Andryus por ser mi casi hermana, cómplice y compinche, Eddinth, Yaquelin, Tamara, Diana Hidalgo, Daniela Alayón, Anmary, María Randelli, Daniela Blanco, Johana Blanco, mis negras Nora y Niria, Jean Carlos (pichu), Damastes, César (Wachu), Henry (llanero), Luis Barrios, Francisco, Jorge Palacios, Farfi, Luis Fuentes, Ramón Caballero, Yimmi Lu y todos aquellos que compartieron grandes momentos. Gracias por todo!!

A todos los miembros del Coro de la Facultad de Ingeniería y su excelente director por compartir esta gran aventura del canto. Hermosa experiencia.

A todos los vecinos, compañeros dentro y fuera de las aulas y a todos aquellos que a lo largo de mi carrera contribuyeron y aportaron su grano de arena entre risas y llanto para lograr alcanzar esta gran meta.

Y a ti Ofni Suárez, por ser mi compañero, mi amigo y alguien especial con quien comparto mi corazón. Gracias por compartir conmigo en los últimos años de carrera hermosos momentos, por darme apoyo en las debilidades y alegrías en los triunfos, por la ayuda incondicional, por el respeto, la comunicación y la confianza. Te quiero mucho!!!

Que Dios los bendiga a todos!!!

Gómez C., Betty C.

DESESTABILIZACIÓN ELECTROSTÁTICA CONTINUA DEL MATERIAL DE LA FOSA DE PRODUCCIÓN GUARA-2.

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

Palabras Claves: Fosas de producción, Desestabilización electrostática, Sistema de flujo continuo, Diseño factorial 2^n , Estabilidad de emulsiones.

Resumen: Se construyó el sistema en continuo conformado por calentamiento y campo eléctrico en continuo y centrifugación, el cual permitió desestabilizar el material de fosa Guara-2 y mantener la temperatura a fin de disminuir su viscosidad. Se estableció un punto de fluidez común a los materiales de fosas tratados en paralelo llevados a cabo por González, M. (fosa Acema-100) y García, A. (fosa Merey-31), el cual fue dado por la obtención del mismo tiempo de residencia en la celda a distintas temperaturas, esta última fue la temperatura de operación para cada fosa que permitió posteriormente realizar las distintas combinaciones de las variables: geometría de la celda, tiempo de residencia en la celda, tipo de corriente y voltaje para aplicar el método Diseño Factorial 2^4 , considerando como parámetro de comparación el factor de desestabilización (FD). Se aplicó en todo momento la técnica de microscopía óptica y análisis de partículas para observar la variación del tamaño de gotas de las distintas combinaciones realizadas.

Se obtuvo que tanto el tanque de alimentación del sistema en continuo como el arreglo del sistema en vertical debió ser aislado con fibra de vidrio para soportar altas temperaturas.

Por otro lado, en la caracterización de la fosa, se obtuvo una densidad análoga a un crudo pesado, además la viscosidad común a las tres fosas obtenida en el Instituto de Estudios Avanzados (IDEA) fue de 5800cP, con una temperatura de 72°C para Guara-2, 35°C para Acema-100 y 55°C para Merey-31; el material de fosa presenta una alta conductividad y un porcentaje de asfaltenos de 9,73% lo que contribuye a estabilizar la fosa en la interfase agua-crudo.

De igual manera, se obtuvo inicialmente en el Laboratorio de Separaciones Mecánicas la temperatura de fluidez para los tres materiales de fosa, siendo 77°C la temperatura de operación de la fosa Guara-2, coincidiendo aproximadamente a lo obtenido posteriormente en el IDEA.

Finalmente, el Diseño Factorial 2^4 no aplicó al mantener condiciones análogas de tratamiento, por lo que se establecieron los criterios de comparación entre el porcentaje de agua total y mediana de la distribución (D_{50}) con el contenido

original, observando que para las combinaciones de geometría de celda cilíndrica, tipo de corriente AC, voltaje bajo y tiempo de residencia alto, así como la combinación de geometría plana, tipo de corriente DC, voltaje alto y tiempo de residencia bajo se presentaron los mayores porcentajes de agua y diámetros para una fracción acumulada de 50% mayor que la muestra original; sin embargo, no se observó una separación de fases en la realización de todas las experiencias, debido a la alta viscosidad y el pequeño tamaño de las gotas.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIV
ÍNDICE DE TABLAS.....	XVIII
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN	3
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.2. OBJETIVOS.....	5
1.2.1. OBJETIVO GENERAL	5
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
1.3. ANTECEDENTES.....	6
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	15
2.1. FOSAS	15
2.2. EMULSIONES DE AGUA EN ACEITE (W/O) Y LAS PROPIEDADES QUE INTERVIENEN EN SU ESTABILIDAD.....	16
2.3. TRATAMIENTOS PARA LA RECUPERACIÓN DE LOS DESECHOS DE LAS FOSAS.....	21
2.4. MECANISMOS DE RUPTURA DE UNA EMULSIÓN W/O	24
2.4.1. Etapa 1. Acercamiento macroscópico de las gotas	24
2.4.2. Etapa 2. Drenaje de la película.....	25
2.4.3. Etapa 3. Coalescencia	27
2.5. SEPARACIÓN ELECTROSTÁTICA	28
2.5.1. Deshidratación electrostática.	28
2.6. INTERACCIÓN DE LA FASE DISPERSA ANTE UN CAMPO ELÉCTRICO.....	29
2.6.1. Fenómeno de percolación.	32
2.7. EFECTO DEL TIPO DE CAMPO ELÉCTRICO APLICADO.....	33

2.7.1. Corriente Alterna (AC).	33
2.7.2. Corriente Directa (DC).	34
2.7.3. Corriente directa pulsante (DC Pulsante).	35
2.7.4. Corriente directa AC y DC combinados.	36
2.8. DESHIDRATADORES ELECTROSTÁTICOS INDUSTRIALES	36
2.9. MICROSCOPIA ÓPTICA	37
2.10. ANÁLISIS DE PARTÍCULAS	38
2.10.1. Distribución acumulada de tamaños de partículas	40
2.11. ANÁLISIS SARA	41
2.12. DISEÑO FACTORIAL 2^4	43
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO	45
3.1. DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS	45
3.1.1. MICROSCOPIO ÓPTICO NIKON MED-600	45
3.1.2. CIRCUITO DE CORRIENTE ALTERNA Y DIRECTA DE ALTO VOLTAJE	47
3.2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	48
3.2.1. REALIZACIÓN DEL MONTAJE DEL SISTEMA EN CONTINUO QUE PERMITA EL MEJOR TRATAMIENTO DE LA FOSA DE PRODUCCIÓN GUARA-2.	48
DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD Y °API	50
DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD DEL AGUA LIBRE	52
ANÁLISIS SARA	53
3.2.2. ESTABLECER LA TEMPERATURA DE OPERACIÓN QUE GARANTICE LA FLUIDEZ DEL MATERIAL DE LA FOSA GUARA-2.	54
3.2.3. DETERMINACIÓN DE LAS VARIABLES ÓPTIMAS A PARTIR DE LAS CONDICIONES DEFINIDAS, PARA LOGRAR LA SEPARACIÓN MÁS EFICIENTE DE LA FOSA GUARA-2 APLICANDO EL MÉTODO “DISEÑO FACTORIAL 2^4 ”	56

3.2.4. CUANTIFICACIÓN DEL GRADO DE SEPARACIÓN EN EL SISTEMA EN CONTINUO, EMPLEANDO TÉCNICAS DE MICROSCOPIA ÓPTICA Y DE SEPARACIÓN DE FASES.....	59
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	61
4.1. REALIZACIÓN DEL MONTAJE DEL SISTEMA EN CONTINUO.....	61
DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD Y °API	64
DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD	65
CONDUCTIVIDAD DEL AGUA LIBRE	66
ANÁLISIS SARA	67
4.2. TEMPERATURA DE OPERACIÓN QUE GARANTICE LA FLUIDEZ DEL MATERIAL DE LA FOSA GUARA-2	69
4.3. VARIABLES ÓPTIMAS OBTENIDAS, PARA LOGRAR LA SEPARACIÓN MÁS EFICIENTE DE LA FOSA GUARA-2 APLICANDO EL MÉTODO “DISEÑO FACTORIAL 2 ⁴ ”	71
4.4. CUANTIFICACIÓN DEL GRADO DE SEPARACIÓN EN EL SISTEMA EN CONTINUO, EMPLEANDO TÉCNICAS DE MICROSCOPIA ÓPTICA Y DE SEPARACIÓN DE FASES.....	83
TÉCNICA DE MICROSCOPIA ÓPTICA.....	83
SEPARACIÓN DE FASES	86
CONCLUSIONES.....	89
RECOMENDACIONES.....	90
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
APÉNDICES.....	98
APÉNDICE I: CÁLCULOS DE LA DENSIDAD Y °API	98
APÉNDICE II: CÁLCULO DE NORMALIZACIÓN DEL ANÁLISIS SARA.....	99
APÉNDICE III: CÁLCULO DEL TIEMPO DE RESIDENCIA EN LA CELDA	100

APÉNDICE IV: CÁLCULO DE LOS FACTORES DE DESESTABILIZACIÓN PARA LAS DISTINTAS COMBINACIONES	101
APÉNDICE V: HOJAS DE RESULTADOS	101

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA N° 1. DESHIDRATADOR ELECTROSTÁTICO UTILIZADO PARA LAS EXPERIENCIAS. (RIVERO, 2007).....	7
FIGURA N° 2. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL MONTAJE UTILIZADO PARA LAS EXPERIENCIAS. (KWON ET AL, 2010).....	10
FIGURA N° 3. CELDA DE TRABAJO. (FUNG, 2011).....	12
FIGURA N° 4. FOSA DE PRODUCCIÓN UBICADA EN EL CENTRO OPERATIVO BARE (C.O.B)- PDVSA PETROPIAR. EL TIGRE, ESTADO ANZOÁTEGUI.	15
FIGURA N° 5. MACROFOSA UBICADA EN MORICHAL, ESTADO MONAGAS (MORFES, 2004).....	16
FIGURA N° 6. DIFERENTES TIPOS DE EMULSIONES. (SCHRAMM, 1992).....	18
FIGURA N° 7. EFECTO DEL DRENAJE DE LA PELÍCULA SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE SURFACTANTES NATURALES (MARFISI Y SALAGER, 2004).....	26
FIGURA N° 8. EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN SUPERFICIAL SOBRE LA VARIACIÓN EN LA TENSIÓN INTERFACIAL EN EL INTERIOR DE LA PELÍCULA DRENADA (MARFISI Y SALAGER, 2004)	26
FIGURA N° 9. FUERZAS QUE ACTÚAN SOBRE UNA GOTA EN UN CAMPO ELÉCTRICO. (MORALES, 2005)	32
FIGURA N° 10. TIPOS DE ONDA DE CORRIENTE ALTERNA AC.	34
FIGURA N° 11. MOVIMIENTO DE UNA GOTA DE AGUA ENTRE DOS ELECTRODOS DE POLARIDAD DUAL. (MARFISI Y SALAGER, 2004)	35
FIGURA N° 12. DESHIDRATADOR ELECTROSTÁTICO (MARFISI Y SALAGER, 2004).	37
FIGURA N° 13. DISTRIBUCIÓN ACUMULADA DE TAMAÑO DE PARTÍCULAS (SORRENTINO, 2002).....	40
FIGURA N° 14. MICROSCOPIO ÓPTICO NIKON MED-600.....	45
FIGURA N° 15. CÁMARA CAPTADORA DE IMÁGENES CCD.	46
FIGURA N° 16. SOFTWARE IMAGE PRO PLUS 6.0.....	47
FIGURA N° 17. COMPUTADOR PARA EL USO DEL SOFTWARE.	47

FIGURA N° 18. CIRCUITO DE CORRIENTE ELÉCTRICA DE ALTO VOLTAJE. (PÉREZ, 2012)	48
FIGURA N° 19. ESQUEMA GENERAL PRELIMINAR DEL MONTAJE EN CONTINUO (ELABORACIÓN PROPIA).....	49
FIGURA N° 20. CELDAS EMPLEADAS CON EL SISTEMA EN CONTINUO (A) PLANA Y (B) CILÍNDRICA.	49
FIGURA N° 21. (A) VISCOSÍMETRO DE BROOKFIELD ADAPTADO A UN CONTROLADOR DE TEMPERATURA; (B) TERMOSEL (IDEA, 2011)	52
FIGURA N° 22. VARILLAS DE ALÚMINA, MUESTRAS (SIN ASFALTENOS) Y LA JERINGA.....	53
FIGURA N° 23. CROMATÓGRAFO TLC.	54
FIGURA N° 24. GRÁFICA REPRESENTATIVA DE LAS ÁREAS.	54
FIGURA N° 25. (A) PIEZA DE ACRÍLICO CON LA APERTURA DE 3,45MM Y (B) PIEZA DE ACRÍLICO CON LA APERTURA DE 2,70MM.	57
FIGURA N° 26. ESQUEMA GENERAL DE LA APLICACIÓN DEL TRATAMIENTO CON CALENTAMIENTO, CORRIENTE ALTERNA (60HZ) Y DIRECTA A DIFERENTES VOLTAJES, CENTRIFUGACIÓN Y MICROSCOPIA ÓPTICA (ELABORACIÓN PROPIA)	59
FIGURA N° 27. ESQUEMA DEL PROCEDIMIENTO PARA CALCULAR LA DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE GOTAS (FUNG, 2011)	60
FIGURA N° 28. TANQUE DE ALIMENTACIÓN RECUBIERTO CON FIBRA DE VIDRIO.....	61
FIGURA N° 29. ARREGLOS CONSIDERADOS PARA LA CELDA EN EL SISTEMA.....	62
FIGURA N° 30. MODIFICACIÓN DEL ARREGLO DEL SISTEMA (A) HORIZONTAL, (B) VERTICAL.	63
FIGURA N° 31. SISTEMA FINAL CONSIDERADO. (A) ADAPTACIÓN DE LA TERMOCUPLA EN LA CELDA. (B) AISLAMIENTO.	64
FIGURA N° 32. VISCOSIDADES DE LOS MATERIALES DE FOSA MEREY-31, GUARA-2 Y ACEMA-100 A DISTINTAS TEMPERATURAS (IDEA).	66

FIGURA N° 33. PORCENTAJE DE SATURADOS, AROMÁTICOS, RESINAS Y ASFALTENOS PARA LA FOSA GUARA-2.	68
FIGURA N° 34. TEMPERATURAS EN LA CELDA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE RESIDENCIA EN LA CELDA PLANA PARA LOS MATERIALES DE FOSA MEREY-31, GUARA-2 Y ACEMA-100 (L.S.M).	70
FIGURA N° 35. CELDA CILÍNDRICA CON CORDÓN DE ASBESTO.	72
FIGURA N° 36. INFLUENCIA DEL TIPO DE CELDA Y DEL TIPO DE CORRIENTE EN EL FACTOR DE DESESTABILIZACIÓN A DIFERENTES VOLTAJES.	75
FIGURA N° 37. CORTOCIRCUITO PRODUCIDO AL INCREMENTAR EL VOLTAJE.	76
FIGURA N° 38. INFLUENCIA DEL TIPO DE CORRIENTE PARA LA CELDA.	77
FIGURA N° 39. MEDIANA DE LA DISTRIBUCIÓN A DIFERENTES VOLTAJES PARA CELDA CILÍNDRICA.	78
FIGURA N° 40. INFLUENCIA DEL TIEMPO DE RESIDENCIA PARA LA	79
FIGURA N° 41. MEDIANA DE LA DISTRIBUCIÓN A DIFERENTES TIEMPOS DE RESIDENCIA PARA CELDA CILÍNDRICA.	79
FIGURA N° 42. INFLUENCIA DEL TIPO DE CORRIENTE PARA LA CELDA PLANA EN LA MEDIANA DE DISTRIBUCIÓN A DIFERENTES VOLTAJES.	80
FIGURA N° 43. MEDIANA DE LA DISTRIBUCIÓN A DIFERENTES VOLTAJES PARA CELDA PLANA.	81
FIGURA N° 44. INFLUENCIA DEL TIEMPO DE RESIDENCIA PARA LA CELDA.	82
FIGURA N° 45. MEDIANA DE LA DISTRIBUCIÓN A DIFERENTES VOLTAJES PARA CELDA PLANA.	82
FIGURA N° 46. ZONAS DE CAPTURA DE IMÁGENES CON EL MICROSCOPIO.	83
FIGURA N° 47. DISTRIBUCIÓN ACUMULADA DEL TAMAÑO DE GOTAS PARA LA MUESTRA ORIGINAL Y LA MEJOR CONDICIÓN CON CELDA CILÍNDRICA.	84
FIGURA N° 48. DISTRIBUCIÓN ACUMULADA DEL TAMAÑO DE GOTAS PARA LA MUESTRA ORIGINAL Y LA MEJOR CONDICIÓN CON CELDA PLANA.	85
FIGURA N° 49. MUESTRAS (A) ANTES DE CENTRIFUGAR Y (B) LUEGO DE CENTRIFUGAR EMPLEANDO LA CELDA CILÍNDRICA.	86

FIGURA N° 50. MUESTRAS (A) ANTES DE CENTRIFUGAR Y (B) LUEGO DE CENTRIFUGAR EMPLEANDO LA CELDA PLANA.....	87
FIGURA N° 51. ESTABILIDAD DEL MATERIAL DE FOSA GUARA-2 DEBIDO AL TAMAÑO DE GOTA. (ELABORACIÓN PROPIA).....	88

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA N° 1. CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LOS DESHIDRATADORES DEL MEJORADOR PETROANZOATEGUI.....	37
TABLA N° 2. DESCRIPCIÓN DE PARÁMETROS UTILIZADOS (FUNG, 2011).....	41
TABLA N° 3. VARIABLES Y NIVELES ESTUDIADOS CON EL DISEÑO FACTORIAL 2^4	56
TABLA N° 4. COMBINACIÓN DE FACTORES PARA LOS EXPERIMENTOS CONSIDERADOS EN LAS PRUEBAS.	57
TABLA N° 5. DENSIDAD DE LA MEZCLA, DEL HIDROCARBURO Y °API DEL MATERIAL DE FOSA GUARA-2.	64
TABLA N° 6. VISCOSIDAD A DIFERENTES TEMPERATURAS PARA EL MATERIAL DE FOSA GUARA-2 (IDEA).....	65
TABLA N° 7. CONDUCTIVIDAD DEL AGUA LIBRE DEL MATERIAL DE FOSA GUARA-2 Y DEL AGUA ULTRA PURA.	66
TABLA N° 8. TIEMPOS DE RESIDENCIA EN LA CELDA PLANA.....	69
TABLA N° 9. FACTORES DE DESESTABILIZACIÓN PARA LAS DISTINTAS COMBINACIONES.	71
TABLA N° 10. FACTORES DE DESESTABILIZACIÓN PARA LAS DISTINTAS COMBINACIONES CON SUS PORCENTAJES DE AGUA TOTAL.....	73
TABLA N° 11. FACTORES DE DESESTABILIZACIÓN PARA LAS DISTINTAS COMBINACIONES CON LOS DIÁMETROS DE GOTA PARA UNA FRACCIÓN ACUMULADA DEL 50 %.	74
TABLA N° 12. VOLTAJES ALTO Y BAJO ALCANZADOS PARA DC Y AC CON CELDA PLANA Y CILÍNDRICA.	76

INTRODUCCIÓN

El siguiente Trabajo Especial de Grado tiene como objetivo evaluar el comportamiento de la desestabilización de la emulsión agua-hidrocarburo (W/O) en el material de fosa Guara-2, al aplicar calentamiento, campo eléctrico en continuo y centrifugación.

Se construirá el sistema en continuo basado en un diseño preliminar, al cual se le realizarán los cambios respectivos a fin de lograr alcanzar las mejores condiciones para el mantenimiento de la temperatura del material de fosa Guara-2. Luego se establecerá la temperatura de operación realizando un barrido de temperaturas para obtener las graficas de temperatura de la fosa en la celda en función del tiempo de residencia en la celda, dichas graficas también serán construidas por los trabajos realizados en paralelo a fin de tener el mismo tiempo de residencia a distintas temperaturas, siendo estos valores el punto de fluidez común a las tres fosas. En función a la temperatura de operación obtenida se aplicará inicialmente el método Diseño Factorial 2^4 , realizando para ello una serie de pruebas al azar con las combinaciones de las variables geometría de la celda, tiempo de residencia en la celda, tipo de corriente y voltaje aplicado, el cual proporcionará la combinación más efectiva para lograr una separación de fases del material de fosa en el sistema en continuo, en función de los resultados estadísticos se considerarán otros criterios, en todo momento se aplicará la técnica de microscopia óptica para observar la variación del tamaño de gotas de las distintas combinaciones realizadas, se caracterizará el material de fosa Guara-2, determinando la densidad y °API, la viscosidad, la conductividad del agua libre y el contenido de saturados, aromáticos, resinas y asfáltenos a través del análisis SARA.

La importancia de esta investigación radica en la necesidad de proponer tecnologías que permitan manipular de manera eficaz los desechos que son generados en las operaciones de producción de petróleo en Venezuela, con el

enfoque tanto de salvaguardar el medio ambiente como de recuperar los hidrocarburos, los cuales representan en la actualidad un producto de valor económico. Las técnicas empleadas actualmente para el saneamiento de las fosas involucran principalmente los tratamientos químicos, generando estos altos costos, por lo que se desea efectuar el proceso mediante separación electrostática a fin de desestabilizar las emulsiones agua en crudo, en el tratamiento del material proveniente de las fosas.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La industria petrolera y de hidrocarburos es la principal actividad económica en Venezuela, incluye tanto la perforación como la extracción del crudo, además de la refinación, el gas natural; los cuales se encuentran acoplados con la economía, la política y la sociedad venezolana.

En nuestro país, la actividad petrolera se ha desarrollado de manera creciente y continua desde hace décadas, generando de esta manera una cantidad considerable de desechos formados por líquidos (agua y crudo) y por sólidos finos, generados por las operaciones de producción de petróleo; estos desechos han sido depositados en excavaciones cercanas a los pozos, llamadas fosas de producción, constituyendo en algunos casos macrofosas, donde se encuentran almacenados grandes volúmenes de agua e hidrocarburos, los cuales originan una mezcla (emulsión-suspensión) de difícil separación, debido al envejecimiento y el gran número de estabilizantes presentes.

Estas fosas conforman un grave problema a nivel ambiental, ya que se estima que en Venezuela para el 2010 se encontraban aproximadamente 13.943 fosas de producción ubicadas principalmente en el oriente del país, de las cuales solo fueron saneadas 4.110 fosas para ese año (PDVSA, 2010). Existe una cantidad considerable de fosas que todavía no han sido saneadas, contaminando el aire (por compuestos volátiles que evaporan), contaminando el suelo (por acumulación de material hidrocarburo) y contaminando el agua (por la filtración de este material hasta los cuerpos de agua). Por lo tanto, resulta necesario llevar a cabo el desarrollo de tecnologías que promuevan el saneamiento de estas fosas con el enfoque tanto de salvaguardar el medio ambiente como de recuperar los hidrocarburos, los cuales representan en la actualidad un producto de valor económico, si se elimina la presencia del agua

emulsionada que posee el material de fosa lo cual ocasiona un aumento de su viscosidad, corrosión en tuberías y bombas e incrementa los costos de transporte.

En las mezclas de las fosas de producción, una parte del agua presente es fácilmente separable del hidrocarburo por acción de la gravedad (agua libre), pero por otra parte, existe una cantidad de agua dispersa que se encuentra íntimamente combinada con el hidrocarburo, formando una emulsión estable, agua en aceite (W/O), lo que dificulta la separación de las fases, debido a la relación en la interfase (agua-hidrocarburo) estabilizada por sólidos o emulsionantes naturales (asfaltenos y resinas) y/o químicos presentes.

Existen diversos tratamientos empleados para la separación de fases en las emulsiones W/O, entre los que destacan los mecánicos, químicos y térmicos; sin embargo, entre las tecnologías, una de las más eficientes y empleada a nivel industrial en procesos de deshidratación y desalación, se encuentra la separación electrostática, la cual es una técnica de separación de emulsiones, donde las principales variables son: el voltaje, la frecuencia, la geometría de los electrodos y el tipo de corriente. Esta técnica se basa en la aplicación de campo eléctrico a la mezcla, a fin de que las gotas de agua dispersas en el hidrocarburo reaccionen frente a este campo según los diversos fenómenos posibles (atracción dipolo-dipolo, electroforesis y dielectroforesis) y se promueva la coalescencia de las gotas, para su posterior separación. En las aplicaciones industriales, esta técnica se utiliza en general combinada con la adición de demulsificantes.

Por lo general, las aplicaciones industriales van orientadas hacia los crudos relativamente livianos, mientras que la muestra de la fosa a tratar tiene características de un crudo pesado, por lo que presenta una viscosidad elevada siendo fundamental disminuirla. Se propone tratar el material de fosa proveniente de Guara-2 mediante el montaje de un sistema en continuo, que incluye a) la aplicación de calentamiento empleando resistencia eléctrica combinado con agitación, b) campo eléctrico de alto voltaje, y c)

centrifugación. En paralelo se realizan pruebas orientadas a trabajar con las fosas de producción Merey-31, (García, en ejecución) y Acema-100, (González, en ejecución). Así mismo, se pretende con este trabajo contribuir con la prueba de varios diseños de celdas en continuo, que permitan identificar las mejores condiciones de operación para maximizar la recuperación del hidrocarburo presente en la fosa y el consecuente saneamiento de la misma. (Rodríguez, en ejecución).

El mecanismo a utilizar para calentar el crudo es significativo, debido a que se reduce la viscosidad de la fase continua, se incrementa la diferencia de densidad entre el agua y el hidrocarburo, y se disuelven las sustancias (como los asfaltenos), que pueden estabilizar las emulsiones.

En el presente Trabajo Especial de Grado, se experimentará con el montaje realizado, con el fin de determinar las mejores condiciones para la separación. Así mismo, la implementación del campo eléctrico de alto voltaje puede realizarse tanto mediante aplicación de corriente directa (DC) como con corriente alterna (AC) a 60 Hz; en este trabajo se incluirán las experiencias con ambas corrientes, con el fin de desestabilizar la muestra emulsionada y finalmente se emplearán técnicas de microscopía óptica para cuantificar la cantidad de agua presente, y posteriormente compararla con el grado de separación de fases obtenido luego de la centrifugación.

1.2. OBJETIVOS

Los objetivos planteados que permiten el estudio de la desestabilización electrostática de la fase acuosa en la fosa Guara-2, se presentan a continuación.

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el comportamiento de la desestabilización de la emulsión agua-hidrocarburo (W/O) en la fosa Guara-2, al aplicar calentamiento, campo eléctrico en continuo y centrifugación.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Realizar el montaje del sistema en continuo que permita el tratamiento de la fosa de producción Guara-2, con calentamiento y campo eléctrico.
- b) Establecer la temperatura de operación que garantice la fluidez del material de la fosa Guara-2.
- c) Determinar las variables óptimas a partir de las condiciones definidas para lograr la desestabilización más eficiente de la emulsión W/O en la fosa Guara-2, aplicando el método “Diseño Factorial 2⁴”.
- d) Cuantificar el grado de separación, en el sistema en continuo, empleando técnicas de microscopía óptica y de separación de fases.

1.3. ANTECEDENTES

Se detallan a continuación los trabajos más relevantes que se han llevado a cabo con la finalidad de entender la separación electrostática y las características más influyentes en este proceso, los cuales fueron tomados como base para la realización del presente Trabajo Especial de Grado, debido a la analogía de las experiencias y la importancia de sus resultados.

Padrón y Zúñiga (2005), aplicaron la técnica de microscopía óptica para la caracterización de sistemas dispersos formados por crudo, agua y sólidos provenientes de las fosas de producción Acema-100, Guara-2 y Merey-31, ubicadas en el Distrito San Tomé, Estado Anzoátegui, empleando para ello un conjunto de equipos conformado por un microscopio Nikon MED-600, un computador, una cámara captadora de imágenes CCD, una platina motorizada y el programa Image Pro Plus de Media Cybernetics.

Se tomaron fotos a las muestras de las distintas fosas dispuestas en un portaobjetos, para obtener las imágenes que fueron analizadas con el software mencionado, con la finalidad de determinar la distribución del tamaño de partículas, especialmente gotas y sólidos, basándose en la diferencia de colores

entre las partículas y la fase dispersa (agua), determinando además tanto la cantidad de agua como de sedimentos contenidos en cada uno de los residuos.

Este trabajo concluyó que la microscopía óptica es un método que a pesar de los diferentes ajustes precisos para los cálculos, es una herramienta útil en el estudio de diversos sistemas dispersos, permitiendo además conocer parámetros que no pueden ser determinados por otras técnicas. Así mismo, el material de la fosa Guara-2 presentó por microscopía óptica, un amplio rango de distribución de tamaño de gotas con diámetros menores a $1,5\ \mu\text{m}$ a mayores a $110\ \mu\text{m}$, siendo la cantidad de agua obtenida por destilación 40%.

Rivero (2007), desarrolló la desestabilización de las emulsiones Acema-100, Guara-2 y Merey-31, empleando diferentes temperaturas y relaciones de fases agua-aceite en combinación con campo eléctrico, mediante la variación de su contenido de fase acuosa y orgánica, el manejo de la temperatura como variable de formulación y la aplicación de campo eléctrico, utilizando un deshidratador electrostático para poder llevar a cabo las experiencias, como el que se muestra en la Figura N°1.

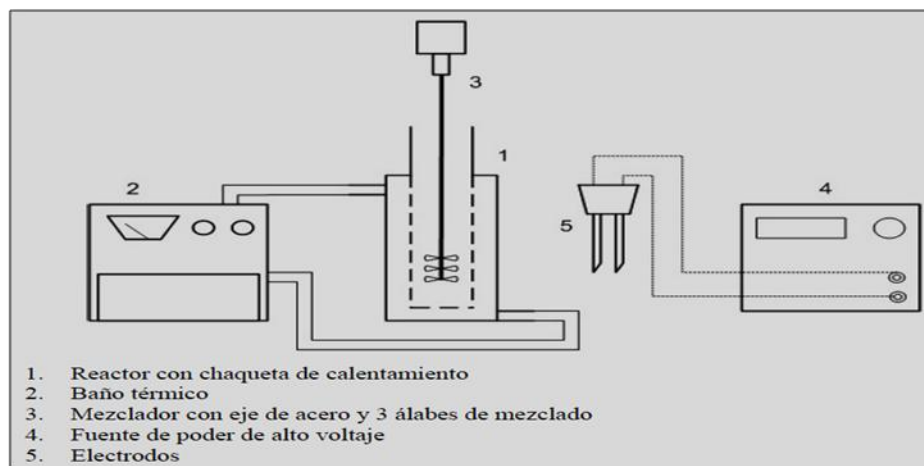


Figura N° 1. Deshidratador electrostático utilizado para las experiencias. (Rivero, 2007).

El montaje se realizó en el Laboratorio de Separaciones Mecánicas (LSM) y constó de un recipiente de vidrio de 100 ml con chaqueta de calentamiento, baño térmico analógico con rango de temperatura de 30 a

150°C, agitador con motor eléctrico, electrodos tipo placa de cobre y fuente de poder de 10KV de corriente DC.

Debido a la alta estabilidad de las emulsiones y al fenómeno de percolación presente durante el proceso de aplicación del campo eléctrico, no fue posible obtener los resultados esperados. Sin embargo, en el estudio del efecto de la relación de fases agua/aceite, debido a la alta viscosidad y presencia de agua libre en la fosa Guara-2, Rivero destaca que la fosa presenta la particularidad de poseer agua separada de la emulsión en el seno de la misma, formando bolsas de agua que son evidentes al trabajar con esta muestra.

La presencia de estas bolsas facilita la aparición de corto circuito durante la deshidratación electrostática, además de no ocurrir la sedimentación de las mismas por la alta viscosidad de la fase continua en estas emulsiones. Por su parte, para las pruebas realizadas a 60, 80 y 100°C, el voltaje promedio máximo que se pudo aplicar estuvo alrededor de los 1200V para 40% de agua a 100°C, siendo este valor de voltaje relativamente bajo para promover la coalescencia de las gotas en la fase dispersa de una forma efectiva, empleando una muestra de 100ml, con dos centímetros de separación entre los electrodos.

Como proceso de separación alternativo, se empleó la centrifugación a 2700rpm, por 30min, demostrando la presencia de agua coalescida luego de aplicado el campo. Obteniendo luego de centrifugar, que la fosa Guara-2 tiende a ser inestable a 80°C, por presentar mayor cantidad de agua sedimentada (7% del agua total) para esa temperatura. La aplicación repetida y alternada de la deshidratación electrostática y la centrifugación, demostró la posibilidad de obtener un mayor grado de separación de las fases, dando como resultado para la emulsión de la fosa Guara-2 un aumento del 5% al 15,8% del agua total separada, luego de aplicarse tres veces este proceso.

Así mismo, concluyó que cuando es alto el contenido de agua en la emulsión no es posible la aplicación de un valor de voltaje lo suficientemente alto y estable por la ocurrencia del fenómeno de percolación (que puede ser disminuido mediante la agitación de la muestra). Sugiriendo finalmente que los

electrodos deben ser fabricados en cobre para garantizar una buena conductividad eléctrica, e incluso pudiesen ser recubiertos de pintura anticorrosiva para disminuir la velocidad del proceso de deterioro de los mismos.

Kwon, Park, Han, Yoon, Kim, Bae y Rhee (2010), estudiaron el efecto de la separación de agua en emulsiones W/O bajo la influencia de un campo eléctrico aplicado, evaluando las variables de voltaje, tiempo de residencia, temperatura e intensidad de corriente. Se empleó en este estudio, un aceite de motor comercial como aceite modelo para investigar la eficiente separación de agua en emulsiones agua-bitumen.

La emulsión fue preparada mezclando 85% vol. de aceite y 15% vol. de agua a 28.000Hz y 1000rpm por 10h. Se utilizó un montaje que comprende una celda de cobre con base cónica cuyo diámetro y altura fueron de 11,5 y 20cm respectivamente, y el ángulo de la base de cobre fue de 80°. El tipo de corriente empleado fue DC, y el nivel de agua fue fija para todas las pruebas en 1cm. La emulsión se inyecta a la celda y la primera coalescencia de gotas de agua debido al campo eléctrico, ocurrió cuando la emulsión pasó entre la tira de cobre y el cono, luego la segunda coalescencia se llevó a cabo cuando la emulsión transcurrió entre el cono y el eje. Debido a la diferencia de gravedad el agua descendió y el aceite subió.

En la Figura N°2 se muestra el diagrama esquemático del montaje utilizado para las experiencias.

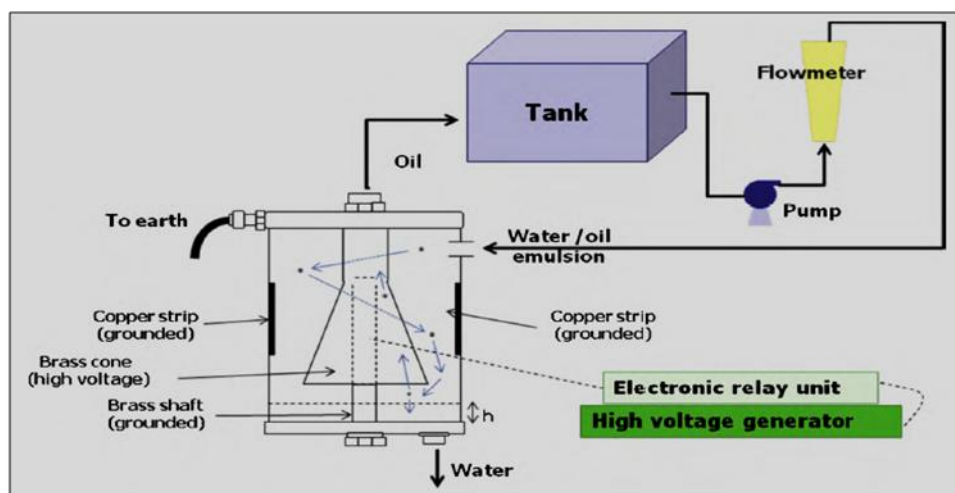


Figura N° 2. Diagrama esquemático del montaje utilizado para las experiencias. (Kwon et al, 2010).

Este trabajo contempló las siguientes experiencias, todas avocadas a determinar el efecto en la eficiencia de la separación de la emulsión W/O:

- Se llevó a cabo la prueba del efecto de la intensidad de corriente, manteniendo la temperatura en 75°C , el tiempo de residencia en 6,4s y el voltaje en 5KV, variando la intensidad de corriente de 1,0mA; 2,5mA y 4,9mA, donde se evidenció que la intensidad de corriente de 2,5mA presentó la mejor separación (77,2%).
- Seguidamente, se realizó la prueba del efecto del voltaje, manteniendo la temperatura en 40°C , el tiempo de residencia en 3,2s y la intensidad de corriente en 2,5mA, donde se observó que para voltajes de 2; 3,5 y 5 KV la separación fue de 44,4; 44,4 y 43,3%, respectivamente, y para un voltaje de 9,5KV fue de 36,7%, demostrando que para altos voltajes se producen cortocircuitos en el sistema.
- Posteriormente se realizó la prueba del efecto de la temperatura, manteniendo el tiempo de residencia en 3,2s, el voltaje en 5KV y la intensidad de corriente en 2,5mA, se evidenció que entre 40, 60 y 75°C éste último presentó la mejor separación (77,2%).
- Finalmente, se comparó el efecto del tiempo de residencia, manteniendo el voltaje en 5KV, la intensidad de corriente en 2,5mA y variando la

temperatura, se observó que para una temperatura de 40°C y evaluando tiempos de residencia de 3,2; 4,8 y 6,4s la separación se mantuvo aproximadamente similar para las tres (40%), por su parte, a una temperatura de 75°C, con el menor tiempo de residencia (3,2s) se obtuvo la mejor separación (77,2%).

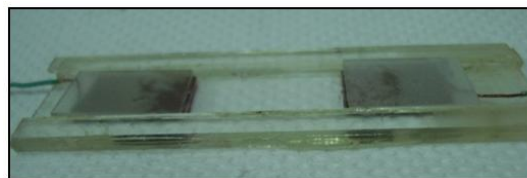
Por lo que, la temperatura y el tiempo de residencia tuvieron un efecto significativo en la separación eficiente de agua, empleando campo eléctrico.

Fung (2011), desarrolló en el LSM, la separación electrostática con DC para desestabilizar emulsiones W/O de distintas fosas de producción (Guara-2, Merey-31 y Acema-100) mezcladas con solventes hidrocarburos: aromático (xileno) y parafínico (hexano), en la cantidad suficiente para igualar las viscosidades. Para cumplir con lo anterior, utilizó una “celda de observación” acoplada sobre un portaobjetos de microscopio, lo cual permitió la observación en el microscopio del comportamiento de las fosas cuando se le aplicó el campo eléctrico. De igual manera, empleó una primera “celda de trabajo” que operaba de manera batch, la cual utilizó para evaluar la separación a un nivel mayor que en la “celda de observación” y así visualizar los fenómenos eléctricos que ocurren para el tratamiento de un mayor volumen y poder identificar elementos para posteriores diseños de una celda de trabajo en flujo continuo.

Las fosas mencionadas anteriormente se diluyeron con hexano y xileno, a fin de disminuir la viscosidad hasta un punto donde el tiempo de escurrimiento de las muestras fuera el mismo (principio del viscosímetro Saybolt). Para ello se estableció la viscosidad de la fosa Acema-100 como valor patrón, la cual fue adquirida por las fosas Merey-31 y Guara-2 mediante la dilución con hexano (parafínico) y xileno (aromático). Posterior a esto las muestras de fosas diluidas se sometieron a distintas intensidades de campo eléctrico directo (2, 4 y 6 KV/cm).

Se contó con un sistema de equipos conformado por una fuente de poder, un microscopio Nikon Eclipse ME-600, un computador, una cámara captadora de imágenes CCD y el programa Image Pro Plus. Las pruebas

realizadas utilizaron una fuente de poder que se conectó por medio de dos electrodos a la “celda de trabajo” (Figura N°3), con el fin de observar el comportamiento de la muestra ante la aplicación del campo eléctrico y adicionalmente medir la distribución del tamaño de las gotas; ésta celda permite manejar mayor volumen que la inicialmente empleada (“celda de observación”).



Dimensiones:
1,5 cm x 0,1 cm
Separación:
2 – 2,5 cm

Figura N° 3. Celda de Trabajo. (Fung, 2011).

Para calcular el porcentaje de agua, utilizó el software Image Pro Plus 6.0 en la celda de observación, considerando los pasos desarrollados en la Pasantía de Investigación: *Sistematizar las Técnicas de Caracterización de Emulsiones de Fosas: Estudio de Sistemas con Análisis de Imágenes*. Fung (2011). Así mismo, con el fin de observar los diferentes fenómenos asociados a la aplicación del campo eléctrico, se tomaron videos en las zonas definidas como adyacentes al electrodo positivo, adyacente al electrodo negativo y la zona intermedia entre ellos.

Luego de evaluar las fosas mediante la cuantificación de los resultados obtenidos en la celda de trabajo, se pudo destacar la gran cantidad de agua en gotas grandes en las zonas cercanas al electrodo negativo, definiendo arbitrariamente un tamaño de gota de $40\mu\text{m}$. De igual manera, la intensidad de campo elegida para Guara-2 fue de 2KV/cm empleando como solvente el xileno en una relación 13:1, obteniendo un porcentaje de agua en gotas grandes de 4% ($\Phi_{\text{W}}(40\mu\text{m})=4\%$), observándose fenómenos como coalescencia por dipolos, aglomeraciones de gotas, fuerzas electroforéticas, y en menor nivel la presencia de fuerzas dielectroforéticas; sin embargo, la fosa Guara-2 no presentó los resultados esperados, ya que se manifestó el fenómeno de

percolación que imposibilitó mantener el voltaje mientras se llevaron a cabo todas la experiencias.

Pérez (2012), realizó en el LSM, la desestabilización electrostática con corriente alterna de material de fosas de producción mezclado con solventes. Se utilizó una “celda de observación” acoplada sobre un portaobjetos de microscopio. De igual manera, se empleó una primera “celda de trabajo” que opera de forma batch, y posteriormente proponer elementos de diseños para una celda en flujo continuo que opere con mayor volumen, en función de la visualización de los fenómenos eléctricos ocurridos.

Con el fin de disminuir la viscosidad, las fosas se diluyeron con dos tipos de disolventes: aromático (xileno) y parafínico (hexano). Así mismo, se empleó un viscosímetro Saybolt para estimar el tiempo de escurrimiento de las diferentes muestras diluidas. Posteriormente se sometieron en la “celda de observación”, las muestras de las tres fosas a voltajes de corriente alterna empleando el montaje realizado por el Prof. Malpica (Departamento de Potencia. Escuela de Ingeniería Eléctrica) entre 2, 4 y 6 KV/cm a una frecuencia fija de 60 Hz, durante un tiempo de 90s. Todo lo anterior, con el fin de determinar el contenido de agua en diferentes zonas de la muestra antes y después de aplicado el campo, identificando las condiciones óptimas (voltaje, solvente y tiempo de aplicación del campo eléctrico), que favorezcan la coalescencia del agua presente en la emulsión. Para identificar diversos fenómenos, una vez instituidas las condiciones óptimas, se efectuaron videos y fotos de las muestras durante la aplicación del campo eléctrico alterno.

De igual manera, se cuantificó el agua coalescida a través del microscopio óptico, empleando una macro en Excel que utilizó los datos aportados de la imagen, por el programa Imagen Pro Plus (Fung, 2011).

Luego de estudiar las fosas empleando la cuantificación de los resultados obtenidos en la celda trabajo, se puede destacar la gran cantidad de agua en gotas grandes en la zona central, ya que en la corriente alterna la polaridad cambia constantemente con una frecuencia de 60 Hz, definiendo

arbitrariamente un tamaño de gota de $40\mu\text{m}$. De igual manera, la intensidad de campo elegida para Guara-2 fue de 6KV/cm empleando como solvente el xileno en una relación 13:1, obteniendo un porcentaje de agua en gotas grandes de 34,70% ($\Phi_w(40\mu\text{m})=34,70\%$).

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

Para el desarrollo del presente Trabajo Especial de Grado, es importante manejar los conceptos expuestos a continuación.

2.1. FOSAS

Las fosas son todas aquellas excavaciones que se realizan en el terreno para depositar los residuos generados de la actividad petrolera. Estos depósitos de desechos están situados en los alrededores de los taladros, donde desde hace más de seis décadas, se desvía y se almacena temporalmente el petróleo, agua y otros desechos identificados como "ripios" del proceso de producción. (Morfes, 2004)

Por su parte, las fosas de producción son excavaciones en el suelo construidas con muros de contención, donde se almacena crudo emulsionado, sedimentos y agua salada, procedente de los procesos de deshidratación del crudo (Morfes, 2004). Dichas fosas contienen una capa de crudo o crudo emulsionado que es recuperable (Padrón y Zúñiga, 2005). En la Figura N°4 se presenta una imagen de una fosa de producción.



Figura N° 4. Fosa de Producción ubicada en el Centro Operativo Bare (C.O.B)- PDVSA PETROPIAR. El Tigre, Estado Anzoátegui.

Se estima que el área de las fosas de producción es de aproximadamente entre 200 m² hasta 850 m², con una profundidad entre 1,5 m hasta 5 m (Culshaw, 2006).

Dentro de la clasificación de las fosas de producción, se encuentran las macrofosas, las cuales son fosas de producción de gran tamaño en las que se encuentra depositado un volumen considerable de crudo recuperable (Padrón y Zúñiga, 2005). Algunas de estas macrofosas llegan a tener 55.000 m² aproximadamente de superficie (Morfes, 2004). En la Figura N° 5, se presenta una imagen de una macrofosa.



Figura N° 5. Macrofosa ubicada en Morichal, Estado Monagas (Morfes, 2004).

El material de fosa Guara-2, es una muestra proveniente del Distrito San Tomé en el Estado Anzoátegui.

2.2. EMULSIONES DE AGUA EN ACEITE (W/O) Y LAS PROPIEDADES QUE INTERVIENEN EN SU ESTABILIDAD

Durante las operaciones de extracción del petróleo, la mezcla bifásica de petróleo crudo y agua de formación, se desplaza en el medio poroso a una velocidad del orden de un pie/día, lo que es insuficiente para que se forme una emulsión. Sin embargo, al pasar por todo el aparataje de producción durante el levantamiento y el transporte en superficie (bombas, válvulas, codos, restricciones, etc.) se produce la agitación suficiente para que el agua se

disperse en el petróleo en forma de emulsión W/O estabilizada por las especies de actividad interfacial presentes en el crudo.

Existen tres requisitos esenciales para formar una emulsión: (a) dos líquidos inmiscibles, como el agua y el aceite; (b) suficiente agitación para dispersar uno de los líquidos en pequeñas gotas en el otro y (c) un agente emulsionante para estabilizar las gotas dispersas en la fase continua (Marfisi y Salager, 2004).

En la mayoría de las emulsiones uno de los líquidos es una fase acuosa mientras que la otra es una fase orgánica, comúnmente hidrocarburo, al cual se le denomina aceite. Se pueden reconocer dos tipos principales de emulsiones, las cuales están referidas al tipo de fase continua presente, (a) emulsión de aceite en agua (O/W), donde el aceite está disperso en el agua; y (b) emulsión de agua en aceite (W/O), donde el agua se encuentra dispersa en el aceite (Schramm, 2005).

El tipo de emulsión formada depende fundamentalmente de la naturaleza del agente emulsificante, estando también influenciado por el método de preparación de la emulsión, así como por la proporción relativa de aceite y agua presente. Una regla empírica predice que surfactantes predominantemente solubles en aceite forman emulsiones W/O y surfactantes solubles en agua producen emulsiones O/W.

También pueden ocurrir emulsiones múltiples o complejas (O/W/O Ó W/O/W). Las emulsiones O/W/O se refieren a emulsiones consistentes en gotas de aceite dentro de gotas de agua que están dispersas en fase continua de aceite. Las emulsiones W/O/W tienen gotas de agua dispersas en gotas de aceite que a su vez están dispersas en fase continua de agua. (Schramm, 1992). En la Figura N° 6 se presentan los diferentes tipos de emulsiones.

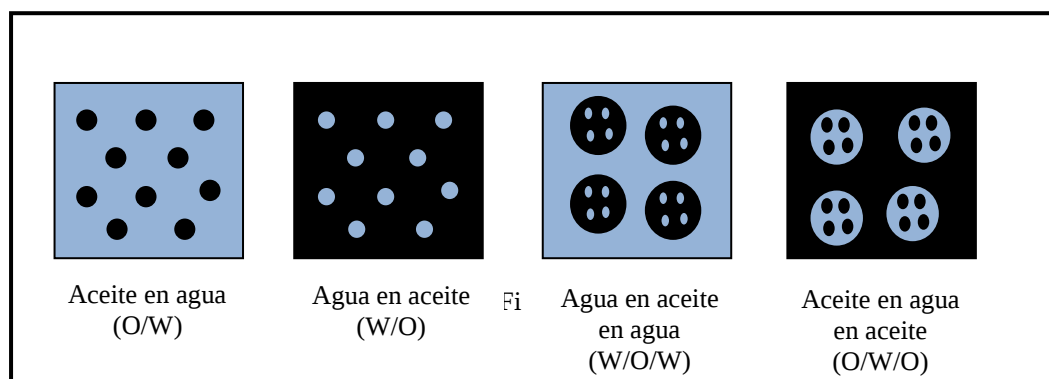


Figura N° 6. Diferentes tipos de emulsiones. (Schramm, 1992)

En el presente trabajo, el material de fosa de producción es un tipo de emulsión de agua en aceite (W/O).

La facilidad en la separación de las emulsiones depende de su estabilidad. Por lo tanto, las propiedades de las emulsiones que afectan su estabilidad son (Salager 1987b):

- a) **Tensión interfacial.** La tensión interfacial es la fuerza que se requiere para romper la superficie entre los líquidos no miscibles; es de interés en la emulsificación en virtud de que cuanto menor es la tensión interfacial entre las dos fases de una emulsión, más fácil es la emulsificación. (Rebolledo, 2007). Sin embargo, una reducción de la tensión interfacial no es suficiente para aumentar la estabilidad de la emulsión. Se ha encontrado recientemente que los sistemas de tensión ultra-baja producen emulsiones inestables.
- b) **Viscosidad.** La viscosidad es la propiedad que caracteriza la resistencia de un fluido a desplazarse (Salager, 1999). Una viscosidad alta en la fase externa disminuye el coeficiente de difusión y la frecuencia de colisión de las gotas, por lo que se incrementa la estabilidad de la emulsión. Una alta concentración de las gotas también incrementa la viscosidad aparente de la fase continua y estabiliza la emulsión. Este efecto puede ser minimizado calentando la emulsión.
- c) **Tamaño de la gota.** Gotas muy pequeñas menores de $10\mu\text{m}$ generalmente producen emulsiones más estables. Una amplia

distribución de tamaños de gotas resulta en general en una emulsión menos estable. Así mismo, cuanto menor es el tamaño de gota, mayor es la viscosidad de la emulsión. Cuanto más amplia la distribución de tamaño de gotas, menor es la viscosidad de la emulsión. (Rebolledo, 2007)

d) Relación de volumen de fases. Incrementando el volumen de la fase dispersa se incrementa el número de gotas y/o tamaño de las gotas, y el área interfacial. La distancia de separación se reduce y esto aumenta la probabilidad de colisión de las gotas. Todos estos factores reducen la estabilidad de la emulsión.

e) Temperatura. Usualmente, la temperatura tiene un efecto muy fuerte en la estabilidad de la emulsión. Incrementando la temperatura se reduce la adsorción de surfactantes naturales y disminuye la viscosidad de la fase externa, la rigidez de la película interfacial y la tensión superficial. Todos estos cambios reducen la estabilidad de la emulsión. En presencia de surfactantes aniónicos, un aumento de temperatura aumenta la afinidad de estos por la fase acuosa, mientras que lo inverso ocurre con surfactantes no-iónicos.

f) pH. La adición de ácidos o bases inorgánicos cambia radicalmente la formación de películas de asfaltenos y resinas que estabilizan las emulsiones agua-aceite. Ajustando el pH se puede minimizar la rigidez de la película que estabiliza la emulsión y aumenta la tensión superficial. La estabilización de la tensión interfacial depende del pH de la fase acuosa, por lo cual la adsorción en la interfase presenta una histéresis que indica que las diferentes moléculas emulsionantes (surfactantes naturales que contienen grupos ácidos y bases) poseen cinéticas de equilibrio muy diferentes.

g) Envejecimiento de la interfase. A medida que la interfase envejece la adsorción de los surfactantes se completa y debido a las interacciones laterales entre las moléculas, aumenta la rigidez de la película hasta un

valor estable, en un período de 3 a 4 horas. Esta película o piel alrededor de la gota llega a ser más gruesa, más fuerte y más dura con el transcurrir del tiempo. Además, la cantidad de agentes emulsionantes se incrementan por oxidación, fotólisis, evaporación o por la acción de bacterias.

h) Salinidad de la salmuera. La concentración de la salmuera es un factor importante en la formación de emulsiones estables. Agua fresca o salmuera con baja concentración de sal, favorecen la estabilidad de las emulsiones. Por el contrario, altas concentraciones de sal tienden a reducirla.

i) Tipo de aceite. Los crudos con aceite de base parafínica usualmente no forman emulsiones estables, mientras que los crudos nafténicos y de base mixta forman emulsiones estables. Ceras, resinas, asfaltenos y otros sólidos pueden influenciar la estabilidad de la emulsión. En otras palabras, el tipo de crudo determina la cantidad y tipo de emulsionantes naturales.

j) Diferencia de densidad. La fuerza neta de gravedad que actúa en una gota es directamente proporcional a la diferencia en densidades entre la gota y la fase continua. Aumentando la diferencia de densidad por incremento de la temperatura se logra aumentar la velocidad de sedimentación de las gotas y por ende, se acelera la coalescencia.

k) Presencia de cationes. Los cationes divalentes como calcio y magnesio tienden a producir una compactación de las películas adsorbidas, probablemente por efecto de pantalla electrostática de un lado, y por otro, la precipitación de sales insolubles en la interfase.

l) Propiedades reológicas interfaciales. Generalmente, cuando una interfase con moléculas de surfactantes adsorbidas se estira o dilata se genera un gradiente de tensión. Los gradientes de tensión se oponen al estiramiento e intentan restaurar la uniformidad de la tensión

interfacial. Como consecuencia, la interfase presenta una cierta elasticidad. Éste es el efecto llamado Gibbs-Marangoni.

m) Conductividad. La conductividad de la emulsión depende esencialmente de la naturaleza de la fase continua o externa, puesto que es esta fase la que va a transportar las cargas. En efecto, la fase discontinua no tiene continuidad entre los electrodos. Por lo tanto, en general una emulsión de fase continua agua (O/W) posee una alta conductividad, mientras que una emulsión de fase externa orgánica (W/O) posee una baja conductividad. (Salager, 1999)

2.3. TRATAMIENTOS PARA LA RECUPERACIÓN DE LOS DESECHOS DE LAS FOSAS

Dado el volumen de residuos que se encuentran en las fosas existentes en el país, tanto PDVSA (productora y propietaria de estos pasivos ambientales) como otros Institutos de Investigación y Universidades han venido desarrollando en conjunto una serie de estrategias para el saneamiento y posterior eliminación de las mismas.

Se pueden diferenciar tres líneas fundamentales para el tratamiento tecnológico que se le han dado a los desechos provenientes de las fosas, estos son:

Recuperación:

La tecnología de recuperación del crudo de fosas, se basa en la extracción de este mediante técnicas de disminución de viscosidad por medios térmicos y químicos, posterior a su extracción de la fosa, seguido de la separación de fases por equipos mecánicos (centrífugas, decantadores). En gran medida, el éxito de la recuperación está basado en la adecuada selección de sustancias químicas que favorecen la posterior separación de las fases (Morfes, 2004). Esto involucra las siguientes etapas:

- (a) Recolección y/o recuperación desde el lugar de origen hasta el sitio de tratamiento.
- (b) Reducción de viscosidad por tratamiento térmico con calentadores y/o con solventes.
- (c) Tratamiento químico: que se refiere a dos tipos de operaciones básicas:
 - Tratamiento por lavado de desecho, con el fin de recolectar en la fase acuosa.
 - Tratamiento con demulsificante, con el fin de desestabilizar las emulsiones presentes luego del lavado.
- (d) Separación de fases: por centrifugación o por gravedad en tanques.

Re-uso de desechos:

Estas tecnologías están orientadas a la transformación química del desecho para usarlo como componente de combustible.

Disposición de desechos:

En este caso existen tecnologías que permiten la disposición segura de los desechos. En lo que se refiere al tratamiento del agua y de los sedimentos se puede mencionar las siguientes tecnologías: inyección en yacimientos para el primer caso y biotratamiento, incineración solidificación-estabilización para el segundo.

Existe una metodología que actualmente se emplea para la separación del agua y de los sedimentos del crudo proveniente de la fosa, destacando que no se tiene así una metodología para el tratamiento del crudo proveniente de éstas (Morfes, 2004).

La biorremediación fue el tratamiento que se aplicó a los sedimentos contaminados con hidrocarburos en Puerto La Cruz, Barinas, San Tomé y Maturín, siguiendo el decreto 2289 de la Ley Penal de Ambiente, hasta el año

1996 fueron saneados 90.000m^3 . Esta tecnología “in situ” posee diversas ventajas, entre las que se pueden mencionar:

- a) No requiere extraer el desecho para tratamiento.
- b) Elimina riesgo de transporte del contaminante.
- c) Costos más bajos con respecto a otras tecnologías.
- d) Reconocida internacionalmente y de mayor efectividad en los trópicos vs regiones templadas.
- e) Exitosamente aplicada en el saneamiento de fosas de San Tomé, Barinas, Puerto La Cruz. Aproximadamente unos 132.000 m^3 de lodos de fondo fosas (95 fosas) (Cherokee, 2009)

Por otra parte, dependiendo del tipo de aceite y de la disponibilidad de recursos se combinan cualquiera de los siguientes métodos típicos de deshidratación de crudo: químico, térmico, mecánico y eléctrico. En general, se usa una combinación de los métodos térmicos y químicos con uno mecánico o eléctrico para lograr la deshidratación efectiva de la emulsión W/O.

El tratamiento químico consiste en aplicar un producto demulsificante sintético denominado en las áreas operacionales de la industria petrolera como “química deshidratante”, el cual debe ser inyectado tan temprano como sea posible a nivel de superficie o en el fondo del pozo. Esto permite más tiempo de contacto y puede prevenir la formación de emulsión aguas abajo del proceso. La inyección del demulsificante antes de una bomba, asegura un adecuado contacto con el crudo y minimiza la formación de emulsión por la acción de la bomba.

El tratamiento por calentamiento consiste en el calentamiento del crudo mediante equipos de intercambio de calor, tales como calentadores de crudo y hornos.

El tratamiento mecánico se caracteriza por utilizar equipos de separación dinámica que permiten la dispersión de las fases de la emulsión y aceleran el proceso de separación gravitacional. Entre ellos se encuentran los tanques de sedimentación llamados comúnmente tanques de lavado.

Para el tratamiento eléctrico se utilizan equipos denominados deshidratadores electrostáticos, y consiste en aplicar un campo eléctrico para acelerar el proceso de acercamiento de las gotas de fase dispersa.

La selección y preparación del tipo de demulsificante debe coincidir con el recipiente de tratamiento de la emulsión. Los tanques de lavado que tienen largo tiempo de retención (8-24 horas), requieren demulsificantes de acción lenta. Por otro lado, los tratadores-calentadores y las unidades electrostáticas con corto tiempo de retención (15-60 minutos) requieren demulsificantes de acción muy rápida. (Marfisi y Salager, 2004).

El tratamiento electrostático será el considerado para desarrollar el presente trabajo, por lo que dicho tratamiento se puede llevar a cabo tomando en cuenta factores como (a) geometría de los electrodos: planos, cilíndricos, espirales y malla; (b) voltaje aplicado y (c) tipo de corriente: el cual puede ser corriente continua (corriente que fluye en una misma dirección entre los electrodos, por lo que su polaridad es invariable) y corriente alterna (corriente que fluye de manera alterna en una dirección u otra entre los electrodos, dependiendo de la frecuencia, por lo que su polaridad es variable).

2.4. MECANISMOS DE RUPTURA DE UNA EMULSIÓN W/O

Diversos estudios se han hecho sobre los mecanismos de ruptura de una emulsión W/O. Según Jeffreys y Davies (1971) estas etapas se reducen a tres:

2.4.1. Etapa 1. Acercamiento macroscópico de las gotas

Cuando las gotas de fase dispersa son más o menos grandes se aproximan por sedimentación gravitacional, gobernadas por la **ley de Stokes** (basada en la suposición de gotas esféricas rígidas, ecuación 1), pero sí son menores de 5 µm está presente el movimiento Browniano.

$$V_S = \frac{2(\rho_1 - \rho_2)gr^2}{9\eta_e} = f_s r^2 \quad (\text{Ecuación 1})$$

donde:

V_S = velocidad de sedimentación de Stokes (cm/s).

ρ_1 = densidad del agua (g/cm^3).

ρ_2 = densidad del crudo (g/cm^3).

g = aceleración de gravedad (cm/s^2).

r = radio de las gotas de agua dispersas en el crudo (cm).

f_s = factor de Stokes ($1/\text{cm.s}$)

η_e = viscosidad de la fase externa (cp).

Una velocidad de sedimentación del orden de 1 mm por día es suficientemente baja para que el movimiento de convección térmica y el movimiento Browniano la compensen. Esto indica que el problema de sedimentación puede volverse muy severo para crudos pesados o extrapesados (Salager 1987a), para los cuales la diferencia de densidad es poca y la viscosidad es alta.

De los parámetros incluidos en la ecuación 1, la viscosidad es la que presenta mayor influencia, producto de la gran sensibilidad de este parámetro ante variaciones en la temperatura. La velocidad de asentamiento aumenta con la temperatura en términos del factor de Stokes ($f_s = V_s/r^2$) para crudos cuya gravedad API es alta. El efecto de la variación en la temperatura y la gravedad API en el factor de Stokes es drástico para crudos muy viscosos, lo que da lugar a diferencias de varios órdenes de magnitud en la velocidad de sedimentación cuando se considera una pequeña variación en la gravedad API o se incrementa la temperatura.

2.4.2. Etapa 2. Drenaje de la película

Al final de la etapa anterior, las gotas se deforman y se genera una película intergota, dando inicio así a la segunda etapa del proceso llamada “drenaje de la película”, donde están involucrados fenómenos interfaciales relacionados con la presencia de surfactantes adsorbidos.

Una vez que dos gotas se acercan, se produce una deformación de su superficie (adelgazamiento del orden de 0,1 micras o menos) y se crea una película de fluido entre las mismas, con un espesor alrededor de 500 Å.

La velocidad de drenaje de la película depende de las fuerzas que actúan en la interfase. Cuando dos gotas de fase interna de una emulsión se aproximan una a la otra debido a las fuerzas gravitacionales, convección térmica o agitación, se crea un flujo de líquido entre ambas interfases y el espesor de la película disminuye.

El flujo de líquido de la película trae consigo moléculas de surfactantes naturales adsorbidas debido al flujo convectivo creando un gradiente de concentración en la interfase. Este gradiente de concentración produce una variación en el valor local de la tensión interfacial (gradiente de tensión) que genera una fuerza opuesta al flujo de líquido fuera de la película, (ver Figura N°7 y Figura N°8).

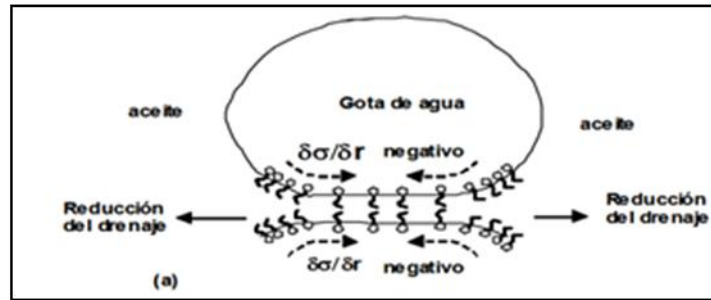


Figura N° 7. Efecto del drenaje de la película sobre la concentración de surfactantes naturales (Marfisi y Salager, 2004).

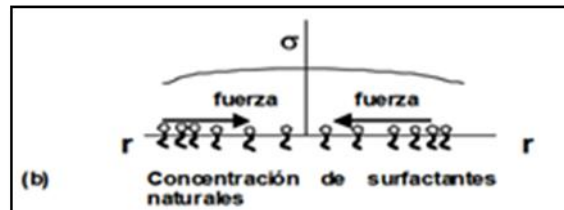


Figura N° 8. Efecto de la concentración superficial sobre la variación en la tensión interfacial en el interior de la película drenada (Marfisi y Salager, 2004)

El esfuerzo de corte asociado con el drenaje tiende a concentrar la mayor parte de las moléculas de surfactante natural fuera de la película y a disminuir su concentración en el interior de la película. Las moléculas de demulsificantes son adsorbidas en los espacios dejados por los surfactantes naturales en la película.

Por la variación de la tensión interfacial con el tiempo, la tasa de adsorción de los demulsificantes en la interfase crudo/agua es más rápida que la de los surfactantes naturales del crudo. Cuando la película llega a ser muy delgada y debido a la proximidad de la fase dispersa, las fuerzas de atracción de Van der Waals dominan y ocurre la coalescencia.

Toda vez que ocurre el acercamiento de las gotas se pueden presentar varios tipos de interacciones entre ellas que retrasen o aceleren el drenaje de la película. Por ejemplo, cuando las gotas poseen en la interfase una carga eléctrica, su acercamiento está inhibido por una repulsión de tipo eléctrico.

El acercamiento también pueden ser demorado por fenómenos electrocinéticos como el efecto electroviscoso denominado “potencial de flujo” (fuerza opuesta al drenaje de la película) y/o un aumento de la viscosidad interfacial (formación de una película interfacial rígida e inmovilización de la capa de aceite que solvata las colas lipofílicas). La mejor forma de eliminar estos efectos es anular las interacciones del surfactante natural, lo cual se logra mediante la formulación fisicoquímica (Salager 1987 b).

2.4.3. Etapa 3. Coalescencia

La coalescencia se define como un fenómeno irreversible en el cual las gotas pierden su identidad, el área interfacial se reduce y también la energía libre del sistema (condición de inestabilidad). Sin embargo, este fenómeno se produce sólo cuando se vencen las barreras energéticas asociadas con las capas de emulsionante adsorbido y la película de fase continua entre las dos gotas. Esta etapa puede considerarse como instantánea respecto a las dos primeras etapas.

Los procesos de deshidratación utilizan efectos físicos destinados a aumentar la velocidad de la primera etapa, tales como el calentamiento, que reduce la viscosidad de la fase externa y aumenta la diferencia de densidad entre los fluidos; ó un aumento de la cantidad de fase interna (reduce el recorrido promedio de cada gota).

También es posible usar fuerzas diferentes a la gravedad natural para aumentar la velocidad de contacto y/o el tamaño de la gota: gravedad artificial por centrifugación (Vold y Groot 1962), fuerzas capilares con filtros coalescedores (Spielman y Goren 1962) o fuerzas electrostáticas (Cottrell y Speed 1911).

2.5. SEPARACIÓN ELECTROSTÁTICA

La separación eléctrica consiste en aplicar un campo eléctrico de alta tensión a la emulsión, con el fin de generar la floculación (contacto de las gotas de agua) y coalescencia (unión de las gotas). Estos mecanismos proporcionan una separación eficiente de las fases.

2.5.1. Deshidratación electrostática.

La deshidratación del petróleo es el proceso mediante el cual se separa el agua asociada al crudo en forma de una emulsión agua en aceite (W/O) hasta reducir el contenido de agua a un porcentaje menor al 1 % volumen (Kilpatrick y Spiecker, 2001).

En general, el mecanismo de coalescencia eléctrica consiste en aplicar un campo eléctrico al sistema emulsionado. Este campo provoca que dos gotas, por ejemplo, con carga eléctrica y a una distancia considerable, sean influenciadas debido a la fuerza eléctrica. Es decir, las cargas positivas que rodean a la gota de agua se orientarán hacia el cátodo (carga -) y las negativas hacia el ánodo (carga +). Esta influencia provocará que las gotas se fusionen en una más grande logrando más rápidamente su precipitación debido a la fuerza de gravedad. Lo anterior se debe a que dentro de un campo eléctrico ocurre una separación de las cargas dentro de las gotas de agua emulsionada. Por lo tanto, la fuerza de atracción entre las gotas de agua se incrementa conforme se aumenta la intensidad del campo eléctrico.

Es importante mencionar que se adoptó el concepto de “cátodo” y “ánodo” únicamente para indicar los polos opuestos. Por el contrario, el significado estricto de cátodo y ánodo no es aplicable para este caso, ya que se

requiere de la presencia de reacciones de oxidación y reducción, como ocurre en las celdas electrolíticas o galvánicas (Lucas, 1968).

La fuerza resultante entre dos gotas cargadas está dada por la Ley de Coulomb:

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

donde:

q_i = Carga de la gota [Coulomb]

x = Distancia entre los centros de las gotas [m]

ϵ_0 = Permitividad de la fase continua.

La dirección del movimiento depende de la polaridad de la carga y del campo eléctrico. [Coulomb²/(Newton.m²)]

F = Fuerza resultante. [Newton] (Marfisi y Salager, 2004).

2.6. INTERACCIÓN DE LA FASE DISPERSA ANTE UN CAMPO ELÉCTRICO

Las fuerzas electrostáticas e hidrodinámicas son aquellas que están presentes cuando una gota se encuentra suspendida entre dos electrodos.

- a) **Fuerzas electrostáticas:** dentro de estas fuerzas se consideran la electroforesis, la dielectroforesis y la interacción dipolo-dipolo.

Electroforesis: El término “electroforesis” se refiere al movimiento de una partícula cargada a través de un líquido inmóvil, bajo la influencia de un campo eléctrico. El principio fundamental es la diferencia de la carga entre la superficie de la partícula y el líquido que la rodea. El campo eléctrico aplicado actúa sobre la densidad de carga resultante, causando el movimiento de la partícula, el líquido envolvente de la partícula, o bien, el movimiento de ambas fases, lo cual puede generar la coalescencia entre dos partículas de una misma fase que estén en movimiento. La fuerza electroforética es independiente del espaciamiento entre gotas, pero es dependiente de la viscosidad del crudo y su conductividad. La fuerza electroforética tiene una constante de tiempo igual a la

relación entre la conductividad y la constante dieléctrica del crudo. La fuerza electroforética decaerá rápidamente en un crudo altamente conductivo. Por lo tanto, la fuerza solo puede ser mantenida a partir de un abastecimiento frecuente de carga a la gota (Bauer, 2007).

Un 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 (Sloblom, 2002).

Dielectroforesis: Está referido al movimiento de partículas de una fase dispersa debido a la presencia de un campo eléctrico no uniforme, es decir, campos no homogéneos de corriente continua y alterna. El fenómeno de coalescencia se puede producir por las mismas razones que el mecanismo de electroforesis. Estas fuerzas halan la gota hacia el mayor gradiente de voltaje y son proporcionales al diámetro de la partícula y la conductividad del crudo. La fuerza dielectroforética es independiente del espaciamiento entre gota, pero es dependiente del cambio en la fuerza del campo que hala las gotas más grandes hacia el mayor gradiente de voltaje. Esta fuerza actúa para acumular agua en áreas del campo electrostático donde la divergencia es mayor (Bauer, 2007).

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. (Sloblom, 2002)

Interacción dipolo-dipolo: La separación debido al resultado de las fuerzas entre partículas polarizadas (sólidas o líquidas) por la acción de un campo eléctrico es denominada coalescencia por dipolos inducidos. (Waterman, 1965). Por lo tanto, para que ocurra la coalescencia de dipolos, las gotas tienen que acercarse por varias razones, tal como el movimiento browniano, la sedimentación, floculación y/o electroforesis, con flujo de mezcla laminar o turbulento (Eow et al., 2001).

La fuerza de la interacción dipolo-dipolo depende del tamaño de la gota de agua y del espacio entre las gotas, tendiendo a disminuir mientras mayor separación se encuentre entre ellas. Además, si se supone una uniformidad en el tamaño de gota y homogeneidad en su distribución en la fase continua, el espaciado intergota es inversamente proporcional al volumen de agua dispersada. Por lo tanto, a medida que las gotas de agua coalescen aumenta el espacio existente entre las gotas y la interacción dipolo-dipolo tiende a disminuir rápidamente (Eow et al., 2001).

b) **Fuerzas hidrodinámicas:** son aquellas que se consideran cuando existe 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 y el número de Reynolds de la gota (Sloblom, 2002).

En la Figura N° 9, se muestran las diferentes fuerzas explicadas anteriormente que actúan sobre una gota en un campo eléctrico.

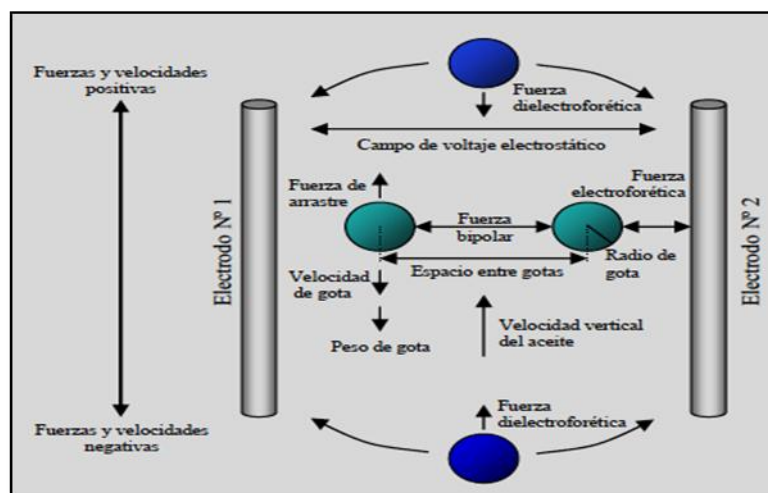


Figura N° 9. Fuerzas que actúan sobre una gota en un campo eléctrico. (Morales, 2005)

2.6.1. Fenómeno de percolación.

En ciertos sistemas W/O de alto contenido de fase interna se pueden formar cadenas de gotas de agua entre los electrodos, produciéndose un aumento considerable de conductividad a lo largo de estas cadenas. Este fenómeno llamado percolación que se produce en ausencia de agitación puede disminuir la eficiencia de aplicación del campo eléctrico a la emulsión en estudio en los deshidratadores electrostáticos (Salager, 1999(b)). Así mismo, este fenómeno propone la coalescencia en dos pasos, iniciada por la formación de cadenas de gotas y la posterior unión de las mismas.

Este fenómeno está influenciado por diversos factores, entre los cuales están la viscosidad de la fase crudo, el volumen total de la fase dispersa y la fuerza aplicada por el campo eléctrico. Este mecanismo se ha observado tanto en campos D.C., como en campos A.C. Las cadenas son formadas por el movimiento individual de las gotas, presentando una alineación en el sentido de la fuerza máxima del campo. Además, se ha observado que las cadenas no siempre empiezan o terminan en un electrodo y que pueden no estar en contacto con los mismos (Eow et al., 2001).

2.7. EFECTO DEL TIPO DE CAMPO ELÉCTRICO APLICADO

Actualmente, existen al menos cuatro principales campos eléctricos disponibles: Corriente Alterna (AC), Corriente Directa (DC), Corriente DC pulsante y AC/DC combinadas. Una característica a considerar en la elección del tipo de campo eléctrico adecuado es el contenido de la fase acuosa dispersa, la cual puede generar cortocircuitos en el sistema.

En un campo eléctrico la fuerza electrostática inducida entre dos gotas es inversamente proporcional a aproximadamente a la cuarta potencia de la distancia de separación entre las gotas. Por lo tanto, la fuerza de Van der Waals aumenta drásticamente cuando las gotas se acercan una a la otra. Sin embargo esta fuerza inducida también aumenta con el cuadrado del tamaño de la gota. El tipo de coalescencia mejora a medida que la intensidad del campo aplicado se incrementa. Si la intensidad es demasiado alta puede ocurrir la ruptura de algunos mecanismos, de los cuatro mecanismos identificados tres son de electrostática y uno hidrodinámico. La gota se deforma en forma de hilo delgado y estalla en gotas más pequeñas si el campo es demasiado alto (Morales, 2005).

2.7.1. Corriente Alterna (AC).

Se denomina corriente alterna (AC) a la corriente eléctrica donde los electrones en el circuito se mueven primero en una dirección, y después en dirección contraria, alternando de aquí para allá con respecto a posiciones relativamente fijas. Esto se hace alternando la polaridad del voltaje en el generador o en la fuente de poder (Hewitt, 2004). Dado que este tipo de corriente varía cíclicamente, es posible encontrar diferentes tipos de onda para corriente AC, según su aplicación, tal como se puede apreciar en la Figura N° 10.

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

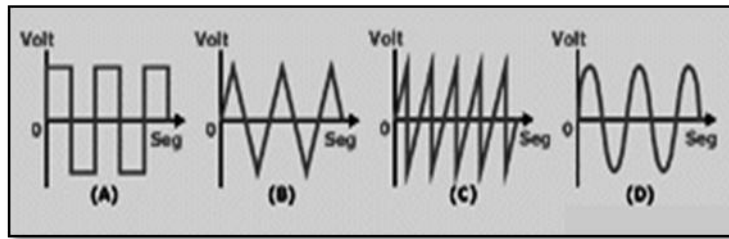


Figura N° 10. Tipos de onda de corriente alterna AC.

A) Pulsante, B) Triangular, C) Diente de sierra. D) Senoidal. (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 (Serway, 2004). En Venezuela, la tensión (doméstica) de la corriente es de 110 ó 120 volt, con una frecuencia de 60 Hz, pero en el L.S.M. será de 240V.

2.7.2. Corriente Directa (DC).

La corriente directa o corriente continua, es el flujo de cargas en una dirección. Un acumulador produce corriente directa en un circuito, porque las terminales tienen siempre el mismo signo. Los electrones fluyen de la terminal negativa, que los repele, hacia la terminal positiva, que los atrae, y siempre se mueven por el circuito en la misma dirección (Hewitt, 2004).

Por otra parte, en un campo DC (corriente directa), las gotas migrarán en un patrón continuo con una velocidad determinada por la viscosidad de la fase continua. Las gotas gradualmente perderán su carga, dependiendo del tiempo de relajación de la fase continua. El tiempo de relajación es el tiempo que le toma a la partícula tener una magnitud de velocidad igual a cero (Marfisi y Salager, 2004).

En investigaciones realizadas se ha podido estudiar el fenómeno que hace que los voltajes D.C. sean tan efectivos y permitan remover grandes cantidades de agua (Burris 1977). Este principio se esquematiza en la Figura N° 11. En esta

figura se representa un crudo fluyendo verticalmente con una sola gota de agua presente. A medida que la gota entra en el alto gradiente D.C. entre los electrodos, éste le induce una carga a la superficie de la gota, que es igual a la del electrodo más cercano, por lo que inmediatamente ambos se repelen y la gota es atraída hacia el electrodo de carga contraria.

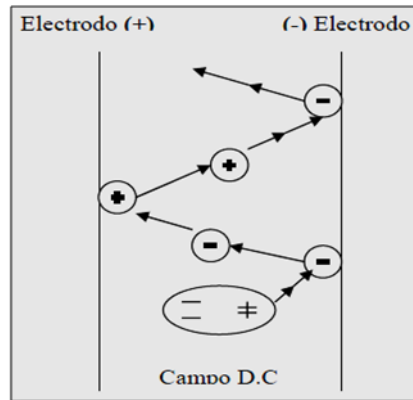


Figura N° 11. Movimiento de una gota de agua entre dos electrodos de polaridad dual. (Marfisi y Salager, 2004)

Cuando la gota se acerca al electrodo de carga contraria, la carga superficial de la gota se altera por el gran potencial del ahora electrodo más cercano, lo que hace que sea repelida de nuevo y atraída por el electrodo de carga contraria. Este movimiento de la gota es una migración ordenada entre los electrodos. Los altos potenciales D.C. retienen a las gotas de agua hasta sean suficientemente grandes como para sedimentar.

Considerando lo anteriormente expuesto para un sistema de una emulsión W/O con miles de gotas de agua. Las gotas polarizadas (cargadas mitad positivamente y mitad negativamente) tenderán a colisionar entre sí, por lo cual la coalescencia ocurrirá más rápido. Este fenómeno también hace que gotas en medios más viscosos colisionen, siempre y cuando se incremente la temperatura a fin de disminuir la viscosidad.

2.7.3. Corriente directa pulsante (DC Pulsante).

Bailes y Larkai (1984) usaron en su trabajo campo eléctrico con DC pulsante y concluyeron que se puede obtener una mejor eficiencia con este tipo

de corriente que con las corrientes DC constante y AC, proponiendo la existencia de una frecuencia óptima. El grado de separación electrostática no solo es una función de la amplitud del pulso sino que también depende de la forma y la frecuencia.

2.7.4. Corriente directa AC y DC combinados.

Se usa con el fin de combinar la resistencia a los cortocircuitos del campo AC con la alta eficiencia del campo DC.

2.8. DESHIDRATADORES ELECTROSTÁTICOS INDUSTRIALES

Los procesos de deshidratación electrostática consisten en someter la emulsión a un campo eléctrico intenso, generado por la aplicación de un alto voltaje entre dos electrodos. Este dispositivo, generalmente tiene características similares a los de 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.

Un deshidratador electrostático está dividido en 3 secciones, Figura N°12. 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 por 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 de electrodos de alto voltaje están localizadas en la parte superior del recipiente, arriba de la interfase agua-aceite (Marfisi y Salager, 2004).

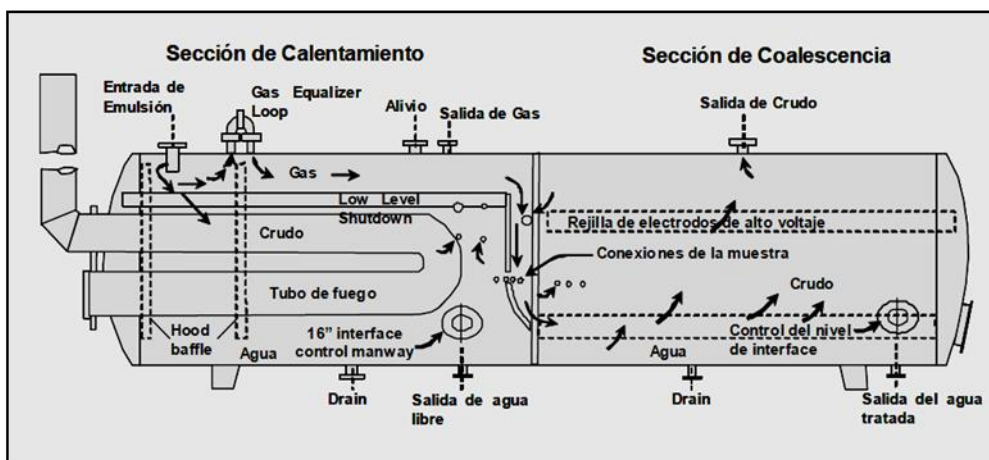


Figura N° 12. Deshidratador electrostático (Marfisi y Salager, 2004).

En la Tabla N° 1 se indican las condiciones de operación de los 4 deshidratadores electrostáticos que se encuentran en la unidad de destilación dentro de las instalaciones del Mejorador Petroanzoategui, dichos equipos se encuentran en paralelo y emplean la tecnología Petreco.

Tabla N° 1. Condiciones de operación de los deshidratadores del Mejorador Petroanzoategui.

Temperatura (°C)	132
Presión (barg)	11
Voltaje (V)	12500 (con corriente AC y 15A)
Separación entre rejillas horizontales (cm)	30 (material de acero al carbono)
Volumen de cada deshidratador (m³)	163

2.9. MICROSCOPIA ÓPTICA

La microscopía, la foto-micrografía y la vídeo-microscopía tienen una larga historia en la determinación del tamaño de gotas y partículas de sistemas dispersos.

Varios estudios se han realizado para comparar los métodos de microscopía con métodos alternativos, tales como: la dispersión de luz, el conteo Coulter, turbidimetría, resonancia magnética nuclear (*nuclear magnetic resonance*, NMR), y otros. Existen muchas aplicaciones de las técnicas de microscopía reportadas en la literatura, entre ellas se mencionan, el estudio de vesículas (tamaño y forma), las trayectorias de partículas, la determinación del potencial

cinético de las fases presentes en emulsiones (suspensiones), los estudios de la película de la interfase y la medición de la tensión interfacial, así como también el estudio de emulsiones bajo el efecto de campos eléctricos; lo cual refleja la versatilidad y flexibilidad de la aplicación de tales técnicas. (Slöblom y Narve, 2003).

Por otra parte, 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 (Sloblom, 2002).

2.10. ANÁLISIS DE PARTÍCULAS

No existe una sola dimensión física para describir adecuadamente el tamaño de una partícula de forma irregular, así como una sola dimensión no podría describir la forma de un cono o de un cilindro. La dimensión que sea usada en la práctica dependerá de:

- (a) La propiedad o dimensión de la partícula que se pueda medir.
- (b) El uso que se le dará a dicha dimensión.

Si se emplea un microscopio, acoplado a un analizador de imágenes para ver las partículas y medir su tamaño, lo que se ve en realidad es la proyección de la forma de las partículas.

Se debe recordar que la orientación de la partícula en el portaobjetos del microscopio afecta la imagen proyectada y por consiguiente la medición del diámetro esférico equivalente (Rhodes, 1998).

Sin embargo, un sistema de partículas está constituido por unidades elementales que no poseen el mismo tamaño, por lo que se suele hablar de una distribución de tamaños de partículas, la cual es una propiedad intensiva de una dispersión, o más precisamente de las gotas y sólidos que la componen. Ésta permite describir la geometría de una dispersión a través de análisis estadísticos del conjunto de partículas. Las propiedades de tales sistemas comúnmente caen dentro de la clase que pertenece a la partícula individual, en donde se encuentra el tamaño y forma de la partícula, su volumen y su área superficial. (Sorrentino, 2002)

De la medida del área proyectada A_p el diámetro equivalente se obtiene:

$$A_p = \frac{\pi}{4} \cdot X_A^2 \quad (\text{Ecuación 3})$$

$$\text{de donde se obtiene: } X_A = 2 \cdot \sqrt{\frac{A_p}{\pi}} \quad (\text{Ecuación 4})$$

$$\phi_w = \frac{A_w}{A_T} \quad (\text{Ecuación 5})$$

donde:

X_A = Diámetro de las gotas de agua. [μm]

ϕ_w = Porcentaje de agua en función del área total. [Adimensional]

A_w = Área total de agua. [μm^2]

A_T = Área total de la imagen. [μm^2]

2.10.1. Distribución acumulada de tamaños de partículas $Fr(x_i)$.

La curva de distribución acumulada es una representación de la fracción o porcentaje de las partículas que se encuentran por debajo o por encima de cierto tamaño. Una vez obtenidos los datos acumulados de la cantidad relativa de partículas que pertenecen a cada rango de tamaño, se puede decir que $Fr(x_i)$ representa la cantidad relativa de partículas más grandes (o más pequeñas) que x_i , como se muestra en la Figura N° 13. (Sorrentino, 2002)

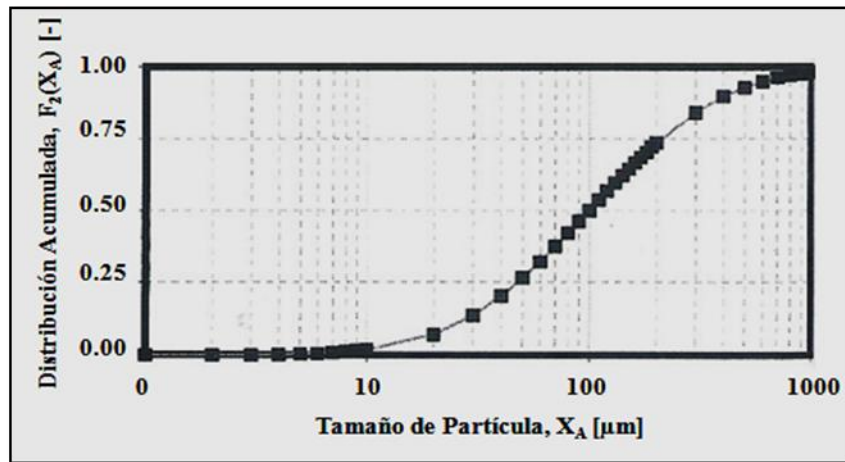


Figura N° 13. Distribución acumulada de tamaño de partículas (Sorrentino, 2002).

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

La fracción de gotas se obtiene de la ecuación 6.

$$F_2(X_A) = \frac{A_{X_A}}{A_W} \quad (\text{Ecuación 6})$$

donde:

A_{X_A} = Área de gotas con diámetro $\leq X_A$. [μm^2]

$F_2(X_A)$ = Fracción de gotas con diámetro $< X_A$ [Adimensional]

(Sorrentino, 2002)

Por otro lado, para analizar los fenómenos de separación electrostática, se debe hacer uso de la distribución de frecuencias, automatizando la

manipulación de resultados con una macro elaborada en Excel, por Fung en el 2011.

En la Tabla N°2 se describen los parámetros utilizados para definir los resultados obtenidos.

Tabla N° 2. Descripción de parámetros utilizados (Fung, 2011).

Parámetro	Descripción
X_A [μm]	Diámetro de las gotas de agua basado en la superficie proyectada
$F_2(X_A)$	Fracción de gotas con diámetro $\leq X_A^*$
$R_2(X_A) = 1 - F_2(X_A)$	Fracción de gotas con diámetro $> X_A \mu\text{m}$
$D_{F_2(X_A)}$ [μm]	Diámetro de gota para una fracción acumulada de $F_2(X_A)$ en porcentaje
ϕ_w [%]	Porcentaje de agua total
$\Phi_w(X_A)$ [%]	Porcentaje de agua en gotas con diámetro mayor a X_A después de aplicar campo eléctrico
$\Phi_w^0(X_A)$ [%]	Porcentaje de agua en gotas con diámetro mayor a X_A sin aplicar campo eléctrico

*El subíndice “2” indica que la distribución está basada en la fracción de superficie ocupada por cada tamaño.

El subíndice “A” indica que el tamaño de la gota se define como el diámetro de la esfera que proyecta la misma área como silueta.

2.11. Análisis SARA

El petróleo es una mezcla muy compleja que contiene cientos de compuestos; los cuales se pueden clasificar en cuatro grupos: saturados, aromáticos, resinas y asfaltenos (Gary, 1980).

Saturados: los componentes saturados del crudo están representados principalmente por las parafinas. Estas son cadenas lineales cuyos átomos de carbono se hallan unidos mediante enlaces sencillos y los otros enlaces están saturados con átomos de hidrógeno, y los naftenos que son cadenas cíclicas en los que todos los enlaces disponibles de los átomos de carbono están saturados con hidrógeno. Estos componentes no reaccionan fácilmente con otros compuestos (Gary, 1980).

Aromáticos: los compuestos aromáticos contienen al menos un anillo bencénico en su estructura, el cual no está saturado pero es muy estable comportándose como un compuesto saturado. Estos compuestos generalmente, presentan un olor aromático distintivo y presentan buenas propiedades como solventes (Gary, 1980).

Resinas: Las resinas están definidas como la fracción del crudo que es insoluble en propano pero soluble en n-heptano, además son lipofílicas y tienen un peso molecular menor al de los asfaltenos. Estos compuestos son relativamente saturados y también disponibles con un alto contenido de estructuras aromáticas (Vidal, 2001).

Asfaltenos: los asfaltenos son mezclas de hidrocarburos y hetero-compuestos de azufre, nitrógeno, oxígeno y metales, solubles en benceno (o tolueno) e insolubles en parafinas de bajo peso molecular (n-pentano, n-hexano) que precipitan del petróleo, crudo pesado y extrapesado. Los asfaltenos tienen un alto carácter aromático y no son fáciles de craquear, por lo que causan muchas dificultades en el procesamiento de los crudos pesados (Speight, 1999).

Los crudos pesados y extrapesados contienen una alta proporción de asfaltenos (10-30 % p/p), los cuales son responsables de muchos problemas asociados a la producción, transporte y procesamiento del petróleo, ya que su precipitación puede ocasionar daños a la formación y taponamiento de columnas de separación, formación de coque y desactivación de catalizadores (Speight, 1999).

Sin embargo, es importante mencionar que existen muchas variantes del análisis y no todos dan resultados equivalentes. El análisis SARA comprende un fraccionamiento, seguido o no, de una cuantificación de cada fracción obtenida. La primera etapa del fraccionamiento, en cualquier caso, consiste en la remoción de la fracción asfalteno mediante precipitación con diferentes solvente de hidrocarburos, usualmente n-parafinas.

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

- a) Cromatografía en columna abierta de adsorción en arcilla-gel.
- b) Cromatografía líquida de alta presión (HPLC) con detector de Índice de Refracción.
- c) Cromatografía de capa delgada (TLC), en este método la fase estacionaria es una capa de partículas de unos milímetros de espesor, fijadas sobre un soporte sólido (aluminio, plástico o vidrio). Después de aplicar el analito cerca de la parte inferior de la placa seca, el disolvente empieza a producir la separación. (G.P.A, 2006)

2.12. DISEÑO FACTORIAL 2^4

El término diseño experimental se utiliza habitualmente para describir las etapas de: (a) identificación de los factores que pueden influir en el resultado de un experimento; (b) diseño del experimento de modo que se minimicen los efectos de los factores incontrolados y (c) utilización del análisis estadístico para separar y evaluar los efectos de los diversos factores implicados.

Puesto que son muchos los factores que afectan a los resultados experimentales, pueden necesitarse diseños experimentales ciertamente complejos. La elección de los mejores niveles prácticos de estos factores, es decir, la optimización de las condiciones experimentales, requiere un estudio más detallado.

Un experimento donde la variable de respuesta se mide para todas las combinaciones posibles de los niveles elegidos de los factores recibe el nombre de diseño factorial completo. Hay dos razones de peso para utilizar un diseño factorial en experimentos que contrastan si la respuesta depende del nivel del factor: (a) el experimento factorial detecta y estima cualquier interacción que no puede hacer el experimento de un factor cada vez y (b) si los efectos de los factores son aditivos, entonces el diseño factorial necesita menos medidas que la aproximación clásica para proporcionar la misma precisión.

Los estudios que utilizan un experimento factorial, definen para cada factor dos niveles, conocidos habitualmente por «alto» y «bajo». En el caso de una variable cuantitativa los términos «alto» y «bajo» tienen el significado usual. La elección exacta de los niveles se determina principalmente por la experiencia y conocimiento del experimentador y las restricciones físicas del sistema.

Un problema al utilizar un diseño factorial para determinar qué factores tienen un efecto significativo sobre la respuesta es que, para factores que son variables continuas, el efecto depende de los niveles alto y bajo utilizados. Si los niveles alto y bajo están excesivamente cerca uno de otro, se puede obtener que el efecto del factor correspondiente no sea significativo, a pesar del hecho de que sobre el intervalo posible completo de los niveles del factor, el efecto de ese factor no sea despreciable. (Miller y Miller, 2002)

Así mismo, los experimentos factoriales son la única manera de descubrir las interacciones entre las variables y donde es necesario estudiar el efecto conjunto de éstos sobre la respuesta. Para experimentos mayores a 2 factores se deben hacer al menos 2 replicas ($n \geq 2$) mediante un orden aleatorio (Montgomery y Runger, 1996).

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

A continuación se presentan los pasos a seguir para alcanzar de manera satisfactoria, los diferentes objetivos propuestos en el presente Trabajo Especial de Grado, comenzando con la descripción de los principales equipos empleados.

3.1. DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS

3.1.1. MICROSCOPIO ÓPTICO NIKON MED-600

Es un instrumento óptico empleado para observar una imagen aumentada de objetos o detalles pequeños de los mismos, que no son simples a la vista y se logran con la combinación de sus lentes. En la Figura N° 14 se muestra el microscopio óptico NIKON Eclipse MED 600, empleado para la captura de imágenes.



Figura N° 14. Microscopio óptico NIKON MED-600.

El microscopio óptico está conformado por tres sistemas (Padrón y Zúñiga, 2005):

- (a) El sistema mecánico, constituido por piezas en las que van instaladas las lentes permiten el movimiento para el enfoque. La parte mecánica del microscopio comprende: el pie, el tubo, el revólver, el asa, la platina, el carro, el tornillo macrométrico y el tornillo micrométrico.
- (b) El sistema óptico, comprende un conjunto de lentes dispuestos de tal manera que produce el aumento de las imágenes que se observan a través de ellas. Está formado por los objetivos y los oculares.
- (c) El sistema de iluminación, formado por las partes del microscopio que reflejan, transmiten y regulan la cantidad de luz necesaria para efectuar la observación a través del microscopio. Comprende el espejo, el condensador y el diafragma.

Cámara captadora de imágenes CCD

Esta cámara (Figura N° 15) permite tomar fotos de las imágenes que son observadas en el microscopio para transmitir los datos obtenidos a un computador donde posteriormente son analizadas (Padrón y Zúñiga, 2005).

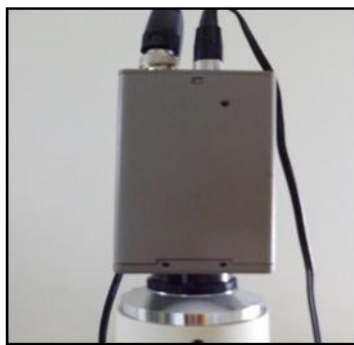


Figura N° 15. Cámara captadora de imágenes CCD.

Image Pro Plus (Media Cybernetics)

El programa de análisis de imágenes usado fue Image Pro Plus 6.0 (Media Cybernetics), 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 desde video, tomadas con cámaras CCD o scanner, 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 tanto de geometrías simples, como complejas, a través de relaciones de estructura; y (d) examina, compara y visualiza datos para alcanzar máximos resultados (Padrón y Zúñiga, 2005).

En las Figuras N°16 y N° 17, se pueden observar el software Image Pro Plus 6.0 y el computador empleado para el uso del software respectivamente.

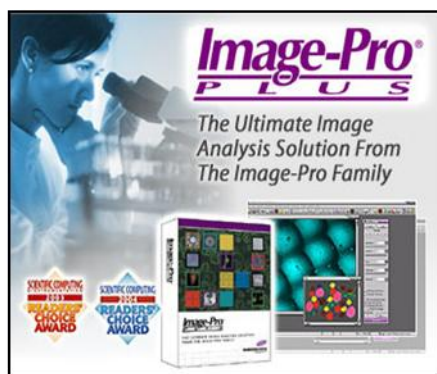


Figura N° 16. Software Image Pro Plus 6.0.

Figura N° 17. Computador para software.

3.1.2. CIRCUITO DE CORRIENTE ALTERNA Y DIRECTA DE ALTO VOLTAJE

El montaje del circuito eléctrico (Figura N° 18) donde fue posible emplear los dos tipos de corriente (AC y DC), se instaló en el Laboratorio de Separaciones Mecánicas de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Central de Venezuela, gracias a la colaboración de la Escuela de Ingeniería Eléctrica (Prof. W. Malpica). Dicho sistema puede proporcionar altos voltajes hasta un máximo de 7200 voltios de AC y 3200 de DC.



Figura N° 18. Circuito de corriente eléctrica de alto voltaje. (Pérez, 2012)

3.2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Para cumplir con los objetivos planteados, se realizaron una serie de experiencias las cuales incluyeron: (a) calentamiento de la muestra (fosa Guara-2) empleando una resistencia eléctrica y agitación de manera simultánea, (b) aplicación de campo eléctrico en la celda propuesta, (c) aplicación de centrifugación y (d) análisis de imágenes con el software Image Pro Plus.

3.2.1. REALIZACIÓN DEL MONTAJE DEL SISTEMA EN CONTINUO QUE PERMITA EL MEJOR TRATAMIENTO DE LA FOSA DE PRODUCCIÓN GUARA-2.

Se realizó el montaje del sistema en continuo en un soporte universal basado en el diseño preliminar, como se observa en la Figura N° 19, el cual constó de un tanque de almacenamiento de hierro colado cuyos diámetros fueron de 5cm (diámetro) x 9cm (altura), que dispuso de una resistencia eléctrica externa (recubierta con cerámica) con el fin de proporcionarle calor al tanque y a su vez a la muestra, además se contó con un agitador mecánico (modelo RW16-Basic) capaz de adaptar la hélice marina al interior del tanque.

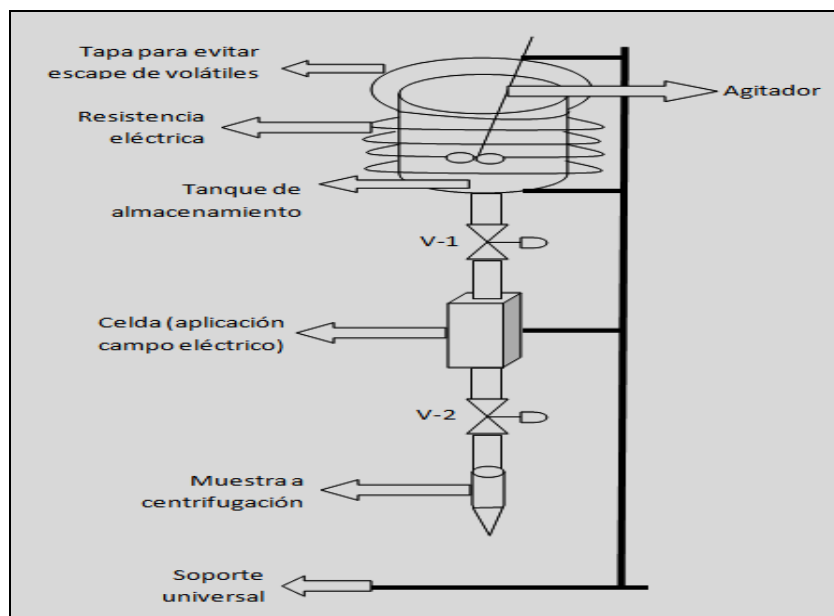


Figura N° 19. Esquema general preliminar del montaje en continuo (Elaboración propia)

A la salida del mismo (tubería de salida de 1/4") se conectó una válvula (V-1) con el fin de retener la muestra en el tanque hasta que alcanzara la temperatura de interés, seguidamente se conectó a la celda específica, la cual fue construida de placas planas en acrílico, de medidas externas 1,6cm x 1,6cm x 5cm, con un espesor de pared de 0,3cm y con una distancia de separación entre los electrodos de 0,8cm. Tal como se aprecia en la Figura N° 20(a)



(a)



(b)

Figura N° 20. Celdas empleadas con el sistema en continuo (a) plana y (b) cilíndrica.

Se conectó a la salida de la celda de placas planas una tubería con una válvula (V-2) para establecer el tiempo de residencia en la celda. Finalmente, a la salida de V-2 se conectó un niple que permitió recolectar las muestras en las zanahorias para su posterior centrifugación en la centrifuga modelo Martin Christ Osterode/Harz. Tipo UJ3.

Una vez realizado el montaje del sistema en continuo, se procedieron a efectuar los distintos cambios en cada una de las partes del sistema así como de la celda, a fin de garantizar las mejores condiciones para la realización del proceso, es por ello que las conexiones entre las partes mencionadas se realizaron con niples, facilitando de esta manera la realización de los cambios.

Con el fin de caracterizar a la fosa Guara-2, se realizaron pruebas para determinar la densidad de la mezcla, del hidrocarburo y °API, la viscosidad, la conductividad del agua libre y el contenido de saturados, aromáticos, resinas y asfáltenos a través del análisis SARA.

Determinación de la densidad y °API

Para determinar la densidad, se pesó el picnómetro (marca MARIENFELD) vacío (25ml) con la tapa en la balanza digital (marca OHAUS modelo AdVenturer). Luego se incorporó la fosa al picnómetro, hasta el cuello del mismo. Posteriormente, se pesó el picnómetro con la muestra y la tapa. Y por último se calculó la densidad empleando la ecuación 7. Este procedimiento se repitió tres veces, con el fin de promediar los valores de densidad.

$$\rho = \frac{mp_{ll} - mp_v}{v_p} \quad (\text{Ecuación 7})$$

donde:

ρ = densidad de la mezcla. (g/ml)

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

mp_v = masa del picnómetro vacío (g)

v_p = volumen del picnómetro (25 ml)

Con el promedio de las densidades obtenidas empleando la ecuación 7, se estimó la densidad del Hidrocarburo, utilizando la ecuación 8:

$$\rho_{HC} = \frac{\rho_{mezcla} - \Phi \cdot \rho_w}{(1 - \Phi)} \quad (\text{Ecuación 8})$$

donde:

ρ_{HC} = densidad del Hidrocarburo (g/ml)

ρ_{mezcla} = densidad promedio de la fosa (g/ml)

Φ = cantidad de agua recolectada por destilación (%) (Se consideró 38%, valor obtenido por Rodríguez, en ejecución)

ρ_w = densidad del agua (g/ml) (considerando densidad del agua = 1 gr/ml)

De igual manera, con el promedio de las densidades obtenidas empleando la ecuación 7, se calculó la gravedad °API empleando la ecuación 9:

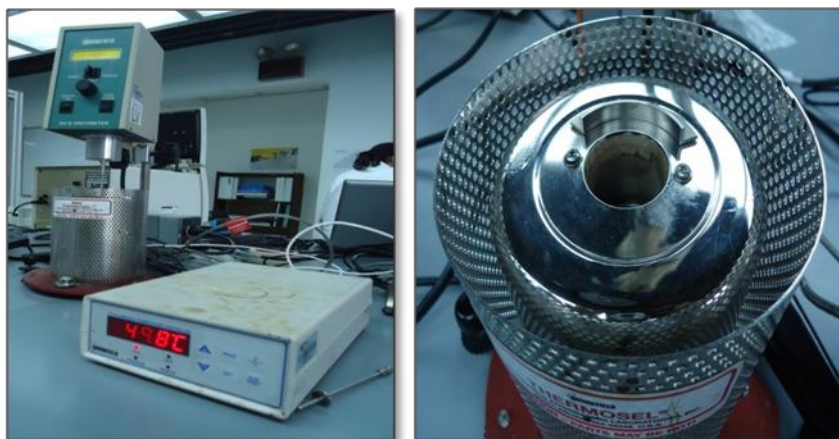
$$^{\circ}\text{API} = \frac{141.5}{\frac{\text{g.e } 60}{60^{\circ}\text{F}}} - 131.5 \quad (\text{Ecuación 9})$$

Considerando como base que la densidad del agua a 60 °F es 1 gr/c.c., por lo que la densidad de un crudo o un derivado de éste sería igual a su g.e., por lo tanto, la densidad del agua = 1 gr/ml.

Determinación de la viscosidad:

Para la determinación de la viscosidad de la fosa Guara-2 a distintas temperaturas, se emplearon los equipos provistos por el Instituto de Estudios Avanzados (IDEA), considerando el siguiente procedimiento.

Se utilizó el viscosímetro de Brookfield que se muestra en la Figura N° 21 (a), donde se colocó la muestra en la pieza del viscosímetro denominada Termosel, mostrada en la Figura N° 21 (b).



(a)

(b)

Figura N° 21. (a) Viscosímetro de Brookfield adaptado a un controlador de temperatura; (b) Termosel (IDEA, 2011)

Se ajustó un valor de temperatura en el controlador acoplado al viscosímetro y el Termosel calentó la muestra a dicha temperatura. Luego se fijó el número de spindle en 64 y la velocidad en 30 rpm en el panel de control del viscosímetro, para luego realizar la lectura del valor de viscosidad en la pantalla del panel. Este procedimiento se repitió hasta obtener los valores de viscosidad para las temperaturas ente 60 y 80°C. Se realizó a partir de esto un gráfico con la variación de la viscosidad en función de la temperatura (ver sección 4.1)

Determinación de la conductividad del agua libre:

Para medir la conductividad del agua libre, se recolectó en un beaker de 50ml agua libre de la fosa proveniente del bidón que contenía la muestra original de Guara-2. Luego se introdujo el electrodo adaptado al conductímetro ORION 3 Star en el beaker que contenía el agua y se realizó la lectura del valor de conductividad a la temperatura ambiente reportada. Este procedimiento se realizó tres veces para promediar el valor.

Análisis SARA:

Para separar las fracciones de Saturados, Aromáticos, Resinas y Asfáltenos presentes en la muestra de Guara-2, se utilizó el Cromatógrafo TLC, Modelo IATROSCAN MK6s, facilitado por el Instituto de Estudios Avanzados (IDEA), ya que el mecanismo por cromatografía de capa delgada (TLC) fue el empleado para dicho análisis. Inicialmente, se realizó el *desasfaltado* de la muestra: para ello se colocó 1g de muestra en un embudo al cual se le agregó n-heptano; para luego calentarlo ligeramente a 40°C y agitarlo por 2 horas. Posteriormente se dejó en reposo por 24 horas para luego ser filtrado y obtener de este proceso los asfaltenos, quedando los maltenos que permanecen solubles en el solvente precipitante (este procedimiento se realizó por triplicado).

Separada la fracción de asfaltenos, se realizó la *preparación de la muestra* con el fin de obtener el resto de las fracciones. Para ello, se pesó aproximadamente 25mg de la muestra anterior (maltenos), tomando en cuenta que representan 25ppm. Esta muestra se diluyó con el valor de volumen de cloroformo obtenido por la relación $\text{mg}_{\text{maltenos}}/25\text{ppm}$; esto se realizó para tres muestras.

Posteriormente, se colocó 1 microlitro (con una jeringa) de las muestras respectivas en las varillas de alúmina, la cual representó la fase estacionaria. En la Figura N° 22 se pueden apreciar las varillas de alúmina, las 3 muestras de Guara-2 sin asfaltenos y la jeringa empleada.

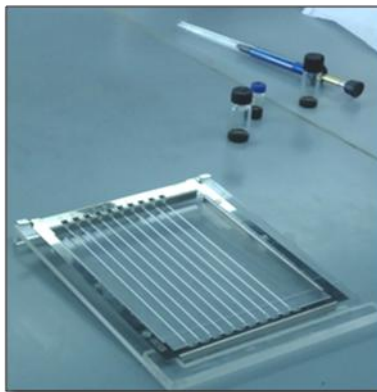


Figura N° 22. Varillas de alúmina, muestras (sin asfaltenos) y la jeringa.

Las varillas se sumergieron en dos cámaras de desarrollo, la primera con n-heptano (fase móvil) por un tiempo de 35min.; en esta cámara son arrastrados los saturados. Posteriormente, se sumergieron en la segunda cámara con tolueno (fase móvil) por un tiempo de 15min.; en esta cámara son arrastrados los aromáticos, quedando las resinas en la parte baja de las varillas.

Finalmente, las varillas fueron colocadas en el cromatógrafo TLC (Modelo IATROSCAN MK6s) que permitió detectar los componentes presentes para luego identificarlos y cuantificarlos, mediante una llama de hidrógeno, dando como resultados las áreas de los componentes Saturados, Aromáticos y Resinas. En las Figuras N° 23 y N° 24 se muestran respectivamente el cromatógrafo empleado y una gráfica representativa de las áreas.

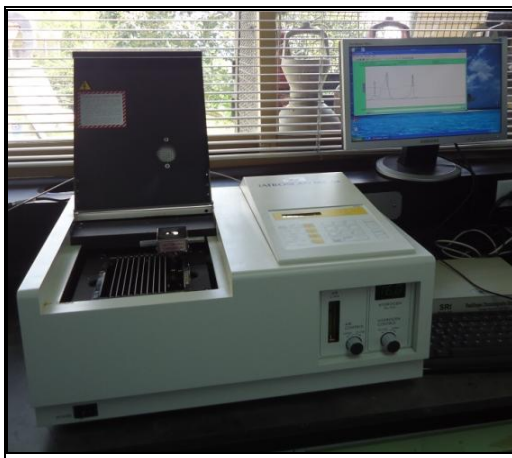


Figura N° 23. Cromatógrafo TLC.
(Modelo IATROSCAN MK6s)

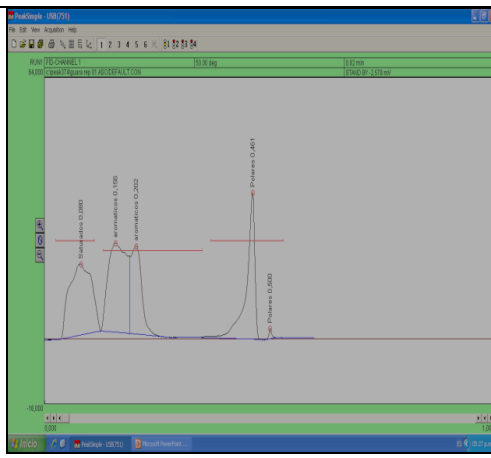


Figura N° 24. Gráfica representativa de las áreas.

3.2.2. ESTABLECER LA TEMPERATURA DE OPERACIÓN QUE GARANTICE LA FLUIDEZ DEL MATERIAL DE LA FOSA GUARA-2.

Luego de realizar el montaje del sistema en continuo como se describió anteriormente, y de efectuar los cambios respectivos, se estableció que la fluidez de la fosa fuese aquella en donde el tiempo de residencia en la celda a una temperatura determinada fuese aproximado al de la fosa Acema-100 y la fosa Merey-31 (trabajos realizados en paralelo González, M. y García, A.). Por

lo tanto, se realizó un barrido de temperatura desde 35°C hasta 85°C en la celda plana, empleando el sistema en continuo.

Para ello, se colocó en el tanque de almacenamiento 150ml del material de la fosa, hasta llegar al primer valor del rango (35°C), calentando a través de la resistencia eléctrica que se encontraba en el tanque, ajustando mediante el variac la potencia necesaria para suministrarle calor al mismo, agitando simultáneamente la muestra contenida en el tanque con un agitador mecánico.

Luego de alcanzar la temperatura deseada se abrió la válvula V-1 y V-2, el material de fosa se dejaba circular por todo el sistema y se realizaba un proceso de recirculación manual para mantener la temperatura en el sistema y el volumen en el tanque constante, al alcanzar la temperatura en la celda deseada se colocó un beaker de 50ml a la salida de V-2 y justo cuando el material de fosa llegaba al fondo del beaker se cronometró el tiempo de recolección de 10ml (3 repeticiones). Este procedimiento se realizó para cada temperatura hasta completar el barrido.

Seguidamente, con los valores obtenidos se construyó una gráfica de temperatura de la fosa en la celda (realizando las mediciones en la celda con un multímetro modelo UT55) en función del tiempo de residencia en la celda, empleando para el cálculo del tiempo de residencia las siguientes ecuaciones.

Para calcular el caudal se utilizó la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{V_{recolectado}}{t_{recolectado}} \quad (\text{Ecuación 10})$$

donde,

V recolectado = volumen recolectado (ml)= 10ml

t recolectado = tiempo para recolectar los 10ml (seg)

$$\tau_{celda} = \frac{V_{celda}}{Q} \quad (\text{Ecuación 11})$$

donde,

V celda = volumen de la celda (cm³) = 5 cm*1cm*0,8cm = 4cm³

Q = caudal (ml/seg)

Estas pruebas para determinar la temperatura de fluidez se realizaron inicialmente. Debido a que no se contaban con los equipos en el L.S.M para determinar la viscosidad se realizaron posteriormente las pruebas en el IDEA.

3.2.3. DETERMINACIÓN DE LAS VARIABLES ÓPTIMAS A PARTIR DE LAS CONDICIONES DEFINIDAS, PARA LOGRAR LA SEPARACIÓN MÁS EFICIENTE DE LA FOSA GUARA-2 APLICANDO EL MÉTODO “DISEÑO FACTORIAL 2⁴”

Una vez obtenida la temperatura de operación, el efecto de las variables de tiempo de residencia (τ_{celda}), voltaje (V), tipo de corriente (AC y DC) y tipo de celda (plana y cilíndrica) se estudiaron empleando el método Diseño Factorial 2⁴. Para ello, se consideraron las variables y los niveles que fueron estudiados, los cuales se presentan en la Tabla N° 3.

Tabla N° 3. Variables y niveles estudiados con el Diseño Factorial 2⁴

Variable	Nivel considerado		Valores	
	Alto	Bajo	Alto	Bajo
Tiempo de residencia (τ_{celda})	t _A	t _B	15seg	5seg
Voltaje (V)	V _A	V _B	1000V	500V
Tipo de corriente	AC	DC	-	-
Tipo de celda	Cilíndrica (C)	Plana (P)	-	-

Como se puede observar en la Tabla N°3 el método aplicado debe considerar para cada variable o factor, un nivel alto y un nivel bajo; así mismo, las pruebas se realizaron al azar empleando el sistema en continuo utilizando el circuito eléctrico.

La celda cilíndrica de tubos concéntricos empleada tiene como medidas: diámetro interno del tubo mayor (1,12cm), diámetro externo del tubo menor (0,32cm) y separación entre los tubos de 0,8cm. Esta celda fue suministrada por Rodríguez (en ejecución), y fue realizada en acrílico empleando cobre como material de elaboración de los electrodos (ver Figura N° 20 (b)).

Es importante mencionar que para la variable tiempo de residencia y con el fin de evitar errores asociados a la manipulación, fue necesario realizar

una sustitución de la válvula (V-2) por piezas deacrílico sustituibles con un orificio de salida de 3,45mm y 2,70mm; con dichas medidas se obtenían aproximadamente los tiempos de residencia análogos a los obtenidos mediante la válvula V-2. Se presentan las piezas mencionadas en las Figuras N° 25 (a) Pieza de 3,45mm y (b) Pieza de 2,70mm.

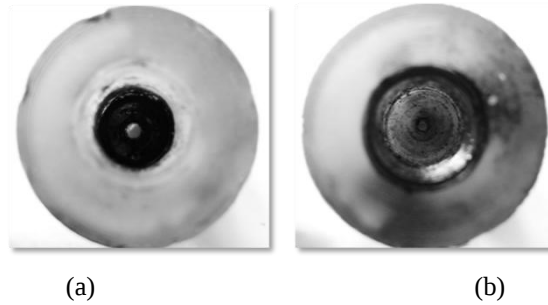


Figura N° 25. (a) Pieza deacrílico con la apertura de 3,45mm y (b) Pieza deacrílico con la apertura de 2,70mm.

A partir de la tabla anterior (Tabla N°3) se establecieron las posibles combinaciones de los diferentes factores en estudio, para la realización de las diferentes pruebas; estas combinaciones se presentan en la Tabla N° 4.

Tabla N° 4. Combinación de factores para los experimentos considerados en las pruebas.

Condición experimental	Tipo de celda	Voltaje	Tipo de corriente	Tiempo de residencia
1	plana	bajo	DC	bajo
a	cilíndrica	bajo	DC	bajo
b	plana	alto	DC	bajo
c	plana	bajo	AC	bajo
d	plana	bajo	DC	alto
ab	cilíndrica	alto	DC	bajo
ac	cilíndrica	bajo	AC	bajo
ad	cilíndrica	bajo	DC	alto
bc	plana	alto	AC	bajo
bd	plana	alto	DC	alto

Continuación Tabla N° 4

cd	plana	bajo	AC	alto
abc	cilíndrica	alto	AC	bajo
abd	cilíndrica	alto	DC	alto
acd	cilíndrica	bajo	AC	alto
bcd	plana	alto	AC	alto
abcd	cilíndrica	alto	AC	alto

Luego de realizar de manera aleatoria todas las combinaciones mencionadas, se determinó para cada prueba, el porcentaje de agua en gotas mayores a 10µm antes y después de aplicado el tratamiento (ver sección 3.2.4), con el fin de determinar el Factor de Desestabilización empleando la ecuación 12 y se empleó una Hoja de Cálculo (Excel) para el análisis estadístico, que permitió conocer la combinación óptima de las variables con las que es posible obtener una separación más eficiente de la fosa Guara-2.

$$FD = \frac{\Phi_W(X_A)}{\Phi_W^0(X_A)}$$

(Ecuación 12)

Recordando que $\Phi_W(X_A)$ representa el porcentaje del área de la imagen en gotas mayores que (X_A) , FD representa físicamente la razón entre la fracción ocupada por gotas mayores que X_A después del tratamiento y esa fracción antes del tratamiento, combinando la información de la distribución de tamaño de gotas con la del contenido de agua (Fung, 2011).

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

3.2.4. CUANTIFICACIÓN DEL GRADO DE SEPARACIÓN EN EL SISTEMA EN CONTINUO, EMPLEANDO TÉCNICAS DE MICROSCOPIA ÓPTICA Y DE SEPARACIÓN DE FASES

Luego de aplicado tanto el campo eléctrico (AC-DC) y realizado las mediciones respectivas en la sección 3.2.3, así como después de centrifugar, se le realizó en paralelo el estudio a las muestras empleando microscopía óptica.

Para emplear esta técnica, se dispuso la muestra en un portaobjetos, colocando un cubreobjetos sobre la misma y a su vez varios portaobjetos a fin de distribuir uniformemente la muestra, para llevarla luego al microscopio Nikon Eclipse ME-600 (fijando el zoom a 20X); se utilizó la cámara captadora de imágenes CCD y el computador con el fin de tomar las imágenes a ser analizadas por el programa Image Pro Plus. El cálculo del porcentaje de agua dado por el área de la gota entre el área total y la cuantificación del agua coalescida se realizó con la macro en Excel desarrollada por Fung (2011). Los pasos seguidos se muestran a continuación en la Figura N°26.

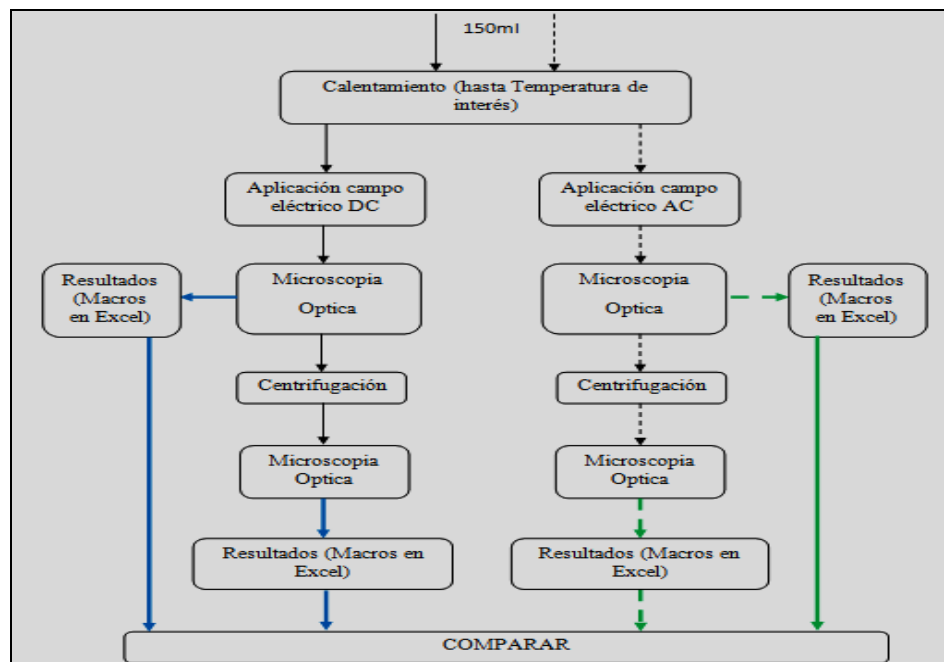


Figura N° 26. Esquema general de la aplicación del tratamiento con calentamiento, corriente alterna (60hz) y directa a diferentes voltajes, centrifugación y microscopía óptica (Elaboración propia)

Como se observa en la Figura N° 26, las muestras fueron centrifugadas con el fin de obtener el porcentaje de agua recuperada a través de una medición volumétrica; para ello se recolectaron 4 muestras de 5ml en zanahorias para cada prueba, las cuales fueron colocadas en la centrífuga por 10min a 2.700 rpm. Posterior a la centrifugación se aplicó la técnica de microscopía óptica empleando los equipos y procedimientos anteriores, con el fin de obtener la distribución y el tamaño de gotas.

La comparación se realizó con la muestra original, es decir, con la muestra de Guara-2 antes de ser sometida al proceso en continuo.

En la Figura N° 27 se detallan los pasos para calcular la distribución de tamaño de gotas, con el fin de elaborar las curvas de distribución acumulada en función del tamaño de partícula.

La captura de imágenes con la muestra en el portaobjetos se realizó en la línea central de la muestra, y a los lados derecho e izquierdo.

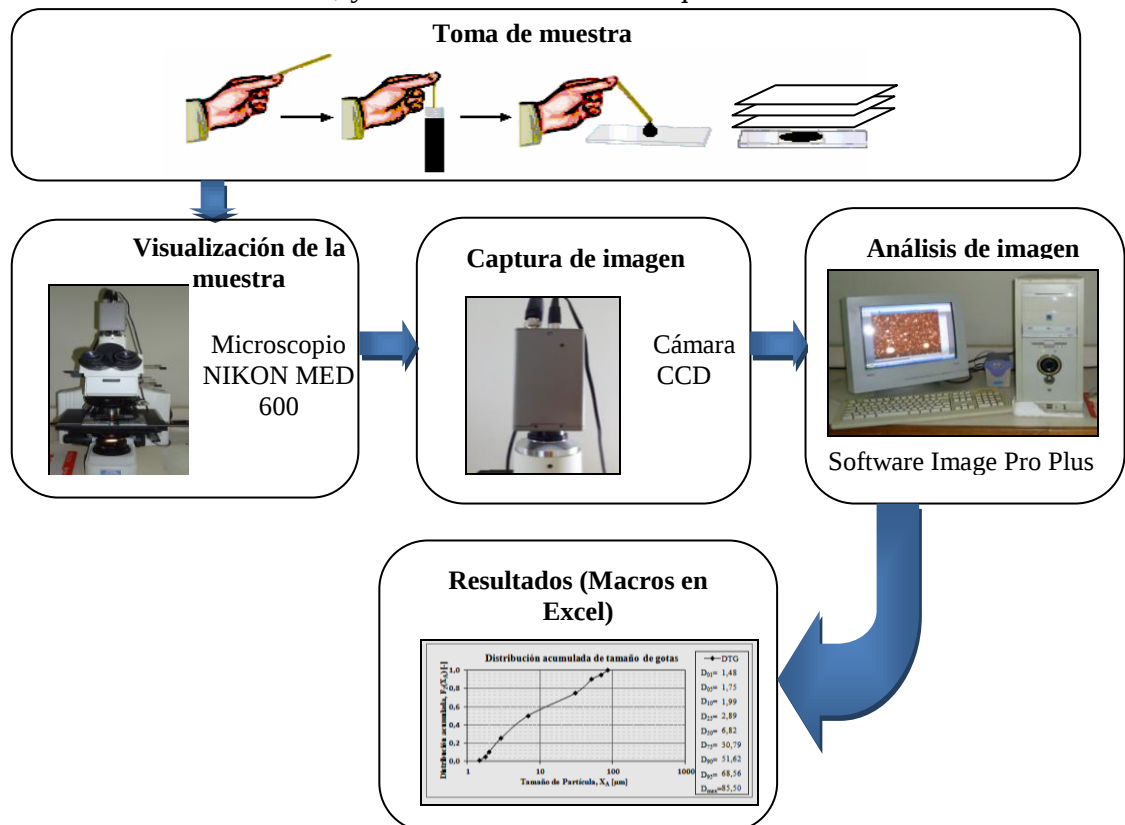


Figura N° 27. Esquema del procedimiento para calcular la distribución de tamaño de gotas (Fung, 2011)

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados y la discusión de los resultados obtenidos para las diferentes pruebas realizadas en el presente Trabajo Especial de Grado.

4.1. REALIZACIÓN DEL MONTAJE DEL SISTEMA EN CONTINUO

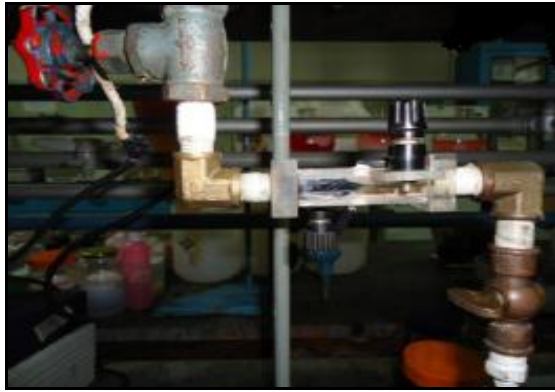
Una vez construido el sistema en continuo tal como se describió anteriormente en la sección 3.2.1, se realizaron los cambios respectivos, obteniéndose lo siguiente:

Tanque de alimentación: se emplearon diferentes materiales como aislantes (mecate, algodón y fibra de vidrio), sin embargo, la fibra de vidrio resultó ser el material más eficiente para lograr un buen aislamiento térmico, ya que al realizar las mediciones con la pistola láser de la temperatura del material de fosa en el tanque, dicho material permitió soportar altas temperaturas. En la figura N° 28 se presenta el aislamiento del tanque más efectivo y la manera en que fue sujeta la resistencia térmica que permitió mantener la temperatura en el tanque.

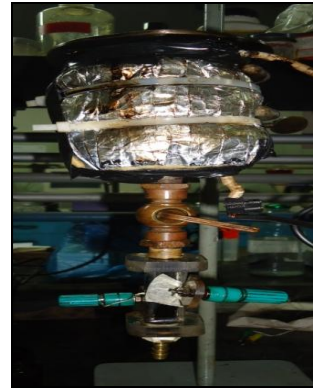


Figura N° 28. Tanque de alimentación recubierto con fibra de vidrio.

Arreglo del sistema: se colocó el sistema tanto de forma horizontal (Figura N° 29 (a)) como vertical (Figura N° 29 (b))



(a) Arreglo de la celda en horizontal.



(b) Arreglo de la celda en vertical.

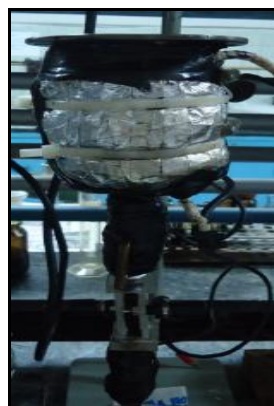
Figura N° 29. Arreglos considerados para la celda en el sistema.

Se puede apreciar en la Figura N° 29(a) que sólo el tanque estaba aislado y los distintos accesorios que se emplearon en las configuraciones, retardaban el recorrido que tenía que hacer el material de fosa para llegar a la salida, presentando de esta manera pérdidas de calor en el sistema. La temperatura del material de fosa en el tanque fue de 90 °C y luego de realizar el recorrido salió a 28°C, ambas temperaturas se midieron con una pistola láser. Por otra parte, en la Figura N° 29(b) aunque el sistema no tenía accesorios que retardaran el recorrido, dado que el sistema estaba expuesto al ambiente, la temperatura del material de fosa en el tanque fue de 90 °C y luego de realizar el recorrido salió a 40°C.

Por lo tanto, en la Figura N° 30(a) se presenta la modificación que se le realizó al arreglo mostrado en la Figura N° 29(a).



(a)



(b)

Figura N° 30. Modificación del arreglo del sistema (a) horizontal, (b) vertical.

Se puede observar en la Figura N° 30(a), que se recubrió el resto del sistema con el fin de mantener la temperatura, sin embargo, se presentaban de igual manera pérdidas de calor, ya que la temperatura del material de fosa en el tanque era de 90 °C y a la salida del sistema su temperatura era de 30°C (medida con pistola láser). Es por ello, que se consideró colocar el sistema de manera vertical manteniendo el aislamiento, tal como se observa en la Figura N° 30(b).

Finalmente, con el fin de obtener el valor de temperatura en la celda, se adaptó una termocupla en la misma, tal como se observa en la Figura N° 31(a); adicionalmente debido a la alta viscosidad que presentaba el material de fosa Guara-2, fue necesario añadir al recubrimiento con fibra de vidrio, una fuente de calor empleando una resistencia eléctrica colocada en parte del sistema (tubería, niples y válvulas), tal como se puede apreciar en la Figura N° 31(b).

Este último sistema logró disminuir el gradiente de temperatura, pues la temperatura del material de fosa en el tanque era de 85 °C y a la salida del sistema la muestra tenía una temperatura de 65°C (medida con pistola láser); dicho montaje fue el empleado para llevar a cabo las posteriores pruebas.



(a)



(b)

Figura N° 31. Sistema final considerado. (a) Adaptación de la termocupla en la celda. (b) Aislamiento.

Determinación de la Densidad y °API

En la Tabla N° 5 presentada a continuación se muestran los valores de densidad de la mezcla, del Hidrocarburo y °API obtenidos para el material de fosa Guara-2.

Tabla N° 5. Densidad de la mezcla, del Hidrocarburo y °API del material de fosa Guara-2.

Muestra	Densidad de la mezcla (g/ml)	Densidad del Hidrocarburo estimada (g/ml)
1	0,9839	0,9740
2	0,9819	0,9708
3	0,9814	0,9700
Promedio	0,9824	0,9716
°API	12,53 °API	14,13 °API

En la Tabla N° 5 se puede observar que a partir de la densidad de la mezcla se calcularon los °API obteniendo un valor de 12,53. Los grados API (American Petroleum Institute), representan una clasificación universal que da una idea de la viscosidad o fluidez de cada crudo (Proinquinica, 2008). Por otra parte, en función de su gravedad API los crudos pueden clasificarse en: (a) Condensados > 43 °API; (b) Livianos 30- 42.9 °API; (c) Medianos 23-29.9 °API; (d) Pesados 10-22.9 °API y (e) Extra-pesados/ bitúmenes < 10 °API. (Gary, 1980). Por lo tanto, el material de fosa Guara-2 tiene una densidad análoga

a un crudo pesado, teniendo como característica resaltante al pertenecer a dicha clasificación una elevada proporción de fracciones de hidrocarburos de alto peso molecular (fracciones residuales) (Gary, 1980).

Determinación de la Viscosidad

En la Tabla N° 6, se presentan los valores de viscosidad a diferentes temperaturas del material de fosa Guara-2 alcanzados luego de realizar las pruebas con el viscosímetro de Brookfield (IDEA), estas pruebas se realizaron posteriormente a las del L.S.M.

Tabla N° 6. Viscosidad a diferentes temperaturas para el material de fosa Guara-2 (IDEA)

Temperatura (°C)	Viscosidad (cP)	%Torque	N° Spindle	Velocidad (rpm)
60,0	11500	57,5	64	30
65,0	8520	42,6	64	30
70,0	6100	30,4	64	30
75,0	4100	20,5	64	30
80,0	2540	12,7	64	30

Se puede observar en esta tabla que la fosa Guara-2, es muy sensible a los cambios de temperatura, ya que con un gradiente de 5°C, cambia su viscosidad en un promedio de 2000 cP. Por otra parte, con el fin de obtener una viscosidad similar para los materiales de fosa Acema-100 y la fosa Merey-31 (trabajos realizados en paralelo González, M. y García, A. respectivamente), se obtuvieron los valores presentados a continuación en la Figura N° 32.

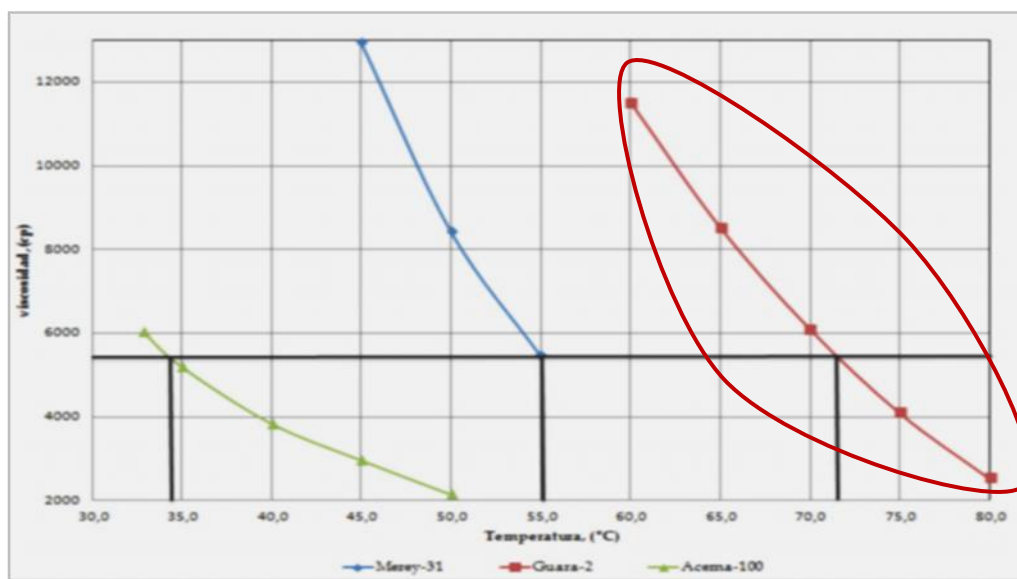


Figura N° 32. Viscosidades de los materiales de fosa Merey-31, Guara-2 y Acema-100 a distintas temperaturas (IDEA).

En la Figura N° 32 se pueden observar los valores de viscosidad obtenidos para las tres fosas, donde es común la viscosidad de 5800 cP, logrando alcanzar dicho valor con las temperaturas de 72°C para el material de fosa Guara-2, 35°C para la fosa Acema-100 y a 55°C para la fosa Merey-31. En la sección 4.2, se presentan los valores de fluidez (tiempos de escurrimiento) obtenidos inicialmente mediante las pruebas realizadas en el L.S.M.

Conductividad del agua libre

En la Tabla N° 7 se presentan los valores de conductividad para el agua libre recolectada del material de fosa Guara-2 y el valor de conductividad para el agua ultra pura.

Tabla N° 7. Conductividad del agua libre del material de fosa Guara-2 y del agua ultra pura.

Muestra	Conductividad agua libre (mS/m)	Conductividad agua ultra pura (mS/m)
1	1,029	5,5*10 ⁻³
2	1,075	
3	1,095	
Promedio	1,066	

Se puede observar en la Tabla N° 7 que la conductividad del agua libre recolectada del material de fosa Guara-2 fue de 1,066 mS/m, recordando que, al determinar la conductividad se evalúa la capacidad del agua para conducir la corriente eléctrica, es una medida indirecta de la cantidad de iones en solución (fundamentalmente cloruro, nitrato, sulfato, fosfato, sodio, magnesio y calcio) debido a la migración por la influencia de un gradiente de potencial. Los iones se mueven a una velocidad que depende de su carga y tamaño, la viscosidad del medio y la magnitud del gradiente de potencial, por lo que la conductividad aumenta cuando aumenta la concentración de iones (APHA, 1998). Por lo tanto, el agua libre que posee el material de fosa Guara-2 es altamente conductora y por ende buen conductor de la electricidad, comparada con la conductividad del agua ultra pura. Una alta conductividad de la fase acuosa puede sugerir también la presencia de películas interfaciales rígidas lo que incrementa la estabilidad de las gotas de agua dispersas en la fase continua, además, los iones disueltos pueden interactuar con las cabezas polares de los surfactantes alojados en la interfase lo cual puede incrementar la rigidez de la película, derivando esto en una mayor estabilidad (Rebolledo, 2007).

Análisis SARA

En la Figura N°33 se presentan los porcentajes de Saturados, Aromáticos, Resinas y Asfaltenos que posee la fosa Guara-2, como resultado del análisis SARA (análisis basado en las diferencias de solubilidad y polaridad) llevado a cabo luego de obtener los valores de cromatografía y de normalización de los datos (ver Apéndice).

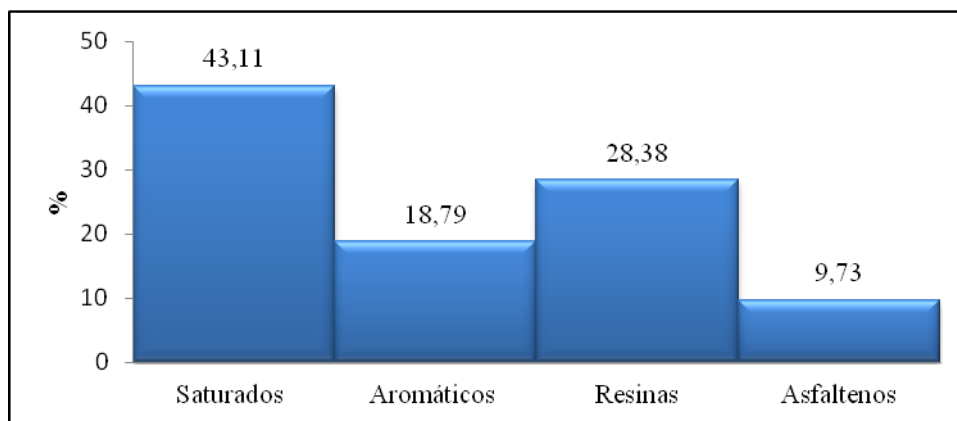


Figura N° 33. Porcentaje de Saturados, Aromáticos, Resinas y Asfaltenos para la Fosa Guara-2.

Se puede visualizar en la Figura N°33, que los saturados son los que se encuentran presentes en mayor proporción con un porcentaje de 43,11%, esto puede verse reflejado en una mayor estabilidad del material de fosa, ya que una alta fracción de saturados o compuestos parafínicos puede suponer, la presencia de n-parafinas de bajo peso molecular las cuales disminuyen la tensión interfacial entre la fase discreta y continua en la emulsión por ser los asfaltenos solubles en este tipo de compuestos (Salager, 1999(b)). Seguidamente, se encuentran las resinas con un porcentaje de 28,38%, dicho valor puede manifestarse de igual manera en la estabilidad de la fosa Guara-2, puesto que una alta concentración de resinas da origen a la formación de agregados micelares malténicos los cuales generan películas interfaciales rígidas (Rebolledo, 2007). Posteriormente, los aromáticos están presentes en la fosa con un porcentaje de 18,79%. Una alta proporción de anillos aromáticos sugiere un aumento en la sustitución de grupos alquilo producto de la condensación de los mismos, lo que deriva en la ramificación de las cadenas alifáticas en los anillos aromáticos contribuyendo igualmente a la formación de películas rígidas en la zona interfacial (Marfisi y Salager, 2004), por lo tanto el valor mencionado de aromáticos puede verse reflejado en la estabilidad de la fosa. Finalmente, los asfaltenos son los que se encuentran presentes en menor proporción, porque representan el 9,73%, sin embargo, el contenido es representativo para lograr favorecer la estabilidad de la emulsión, pues con la presencia de asfaltenos se

estabiliza la interfase agua-crudo (Marfisi y Salager, 2004). Además, si la concentración de los asfaltenos es superior al 4% estos forman un sistema coloidal que determina la viscosidad del producto (G.P.A, 2005). Por otra parte, en Venezuela para crudos pesados se encuentran Bachaquero con un °API de 11,8 y un porcentaje de asfaltenos de 7,1 y Boscan con un °API de 10,6 y un porcentaje de asfaltenos de 12,8, confirmando que el material de fosa Guara-2, posee un contenido de asfaltano medio alto.

4.2. TEMPERATURA DE OPERACIÓN QUE GARANTICE LA FLUIDEZ DEL MATERIAL DE LA FOSA GUARA-2

Las pruebas para lograr alcanzar el punto de fluidez se realizaron en un principio midiendo con una pistola láser las temperaturas en el tanque y a la salida del sistema, promediando estos valores se obtenía la temperatura en la celda; sin embargo, con el fin de obtener un valor más certero de temperatura en la celda se adaptó una termocupla en la misma, ya que era en la celda donde se quería observar el efecto de los distintos campos eléctricos. Por lo tanto, se realizó el barrido de temperaturas considerando los valores medidos directamente en la celda mediante un multímetro modelo UT55, para luego construir las gráficas de temperatura de la fosa en función del tiempo de residencia, ambos en la celda. En la Tabla N° 8 se presentan los valores obtenidos de los distintos tiempos de residencia en la celda plana.

Tabla N° 8. Tiempos de residencia en la celda plana.

Temperatura en el tanque (°C)	Temperatura celda (°C)	Temperatura salida (°C)	Volumen recolectado con la válvula 100% abierta (ml)	Tiempo de recolección (seg)	Caudal (ml/seg)	Tiempo residencia en la celda (seg)
54	50	61,2	10	134	0,0746	53,6
62	57	62,4	10	120	0,0833	48
68	60	57,2	10	111	0,0901	44,4
75	69	58,6	10	115	0,0870	46
82	74	60,2	10	103	0,0971	41,2
86	77	64,1	10	76	0,1316	30,4

Se puede observar en la Tabla N° 8 que se logra alcanzar un tiempo de residencia de 30seg en la celda, cuando la fosa Guara-2 debe tener una temperatura en la celda de 77°C; el valor de tiempo de residencia de 30seg, se fijó para las otras fosas en estudio, obteniéndose de forma análoga el valor de temperatura en la celda. Estos resultados coincidieron aproximadamente con los valores de viscosidad reportados del IDEA en la sección 4.1.

La temperatura determinada de esta forma, fue la temperatura de operación con la cual se realizaron las pruebas posteriores, es decir, para el material de fosa Guara-2 la temperatura de operación en la celda fue de 77°C.

En la Figura N° 34 se representan las temperaturas en función del tiempo de residencia en la celda plana para los materiales de fosas Merey-31, Guara-2 y Acema-100, obtenidas inicialmente en el L.S.M.

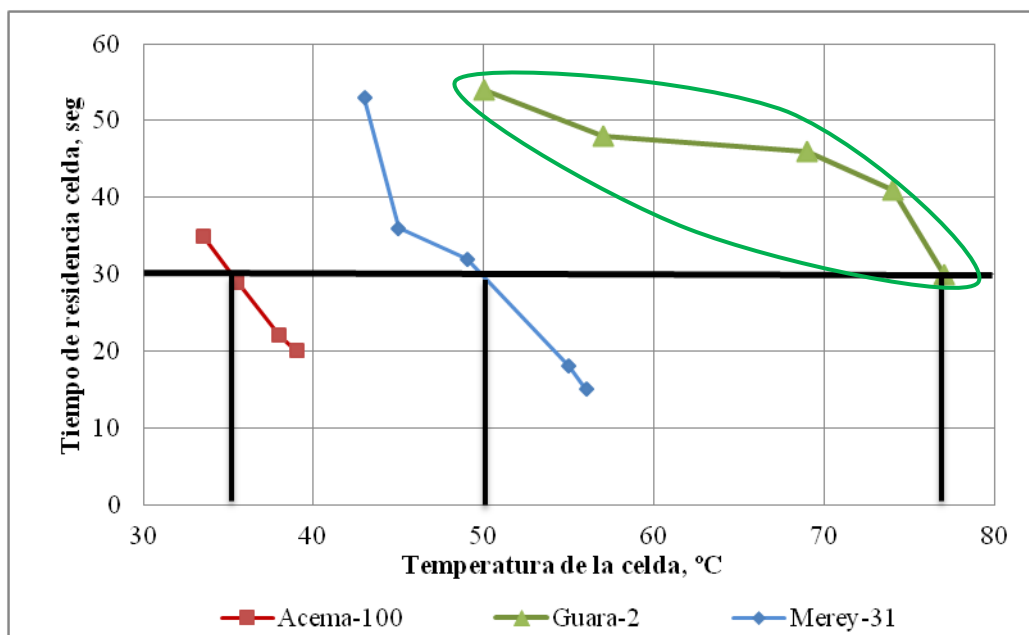


Figura N° 34. Temperaturas en la celda en función del tiempo de residencia en la celda plana para los materiales de fosa Merey-31, Guara-2 y Acema-100 (L.S.M).

Se destaca en la Figura N° 34, que para el material de fosa Guara-2 se debe trabajar a una temperatura de 77 °C para lograr un tiempo de residencia en la celda de 30seg. También, se puede visualizar que este tiempo de residencia se obtiene a 35°C para la fosa Acema-100 y a 55°C para la fosa Merey-31,

coincidiendo aproximadamente con lo obtenido en pruebas posteriores en el IDEA (Ver Figura N° 32).

4.3. VARIABLES ÓPTIMAS OBTENIDAS, PARA LOGRAR LA SEPARACIÓN MÁS EFICIENTE DE LA FOSA GUARA-2 APLICANDO EL MÉTODO “DISEÑO FACTORIAL 2⁴”

Luego de realizar las diferentes combinaciones, considerando la temperatura de operación obtenida anteriormente y las variables tiempo de residencia (*rcelda*), voltaje (V), tipo de corriente (AC y DC) y tipo de celda (plana y cilíndrica) se presenta a continuación la Tabla N° 9, la cual contiene los valores de los factores de desestabilización (FD) de las distintas combinaciones de pruebas realizadas del método Diseño Factorial 2⁴, tratando de mantener condiciones análogas a los trabajos en paralelo llevados a cabo por González, M. (fosa Acema-100) y García, A. (fosa Merey-31).

Por otro lado, con el fin de comparar el efecto del campo eléctrico a través del factor de desestabilización (FD), fue necesario definir un tamaño de gota que se estableció de manera arbitraria en 10 µm, debido a que todas las muestras usadas poseían al menos algunas gotas de ese tamaño. Empleando la ecuación 12 se calcularon los valores de los FD para las distintas combinaciones, los cuales se presentan en la Tabla N° 9.

Tabla N° 9. Factores de desestabilización para las distintas combinaciones.

Número de prueba	Tipo de celda	Voltaje	Tipo de corriente	Tiempo de residencia	FD Replica 1	FD Replica 2	FD Replica 3	Promedio
1	plana	bajo	DC	bajo	1,42	0,29	0,73	0,81
2	cilíndrica	bajo	DC	bajo	0,73	0,46	0,46	0,55
3	plana	alto	DC	bajo	1,14	0,63	1,37	1,05
4	plana	bajo	AC	bajo	1,47	0,64	0,64	0,92
5	plana	bajo	DC	alto	0,86	0,58	0,75	0,73
6	cilíndrica	alto	DC	bajo	0,61	0,34	0,73	0,56
7	cilíndrica	bajo	AC	bajo	0,51	0,51	0,34	0,45
8	cilíndrica	bajo	DC	alto	0,95	0,39	0,44	0,59
9	plana	alto	AC	bajo	0,54	0,88	0,51	0,64
10	plana	alto	DC	alto	0,22	0,39	0,36	0,32

Continuación Tabla N° 9

11	plana	bajo	AC	alto	0,32	0,42	0,32	0,35
12	cilíndrica	alto	AC	bajo	0,51	0,78	0,66	0,65
13	cilíndrica	alto	DC	alto	0,24	0,36	1,42	0,67
14	cilíndrica	bajo	AC	alto	1,19	0,81	0,64	0,88
15	plana	alto	AC	alto	0,51	0,31	1,02	0,61
16	cilíndrica	alto	AC	alto	0,49	0,54	0,1	0,38

Debido a las pérdidas de calor que se presentaron al utilizar la celda cilíndrica, se recurrió a colocarle un cordón de asbesto alrededor de los accesorios, tal como se puede apreciar en la Figura N° 35. Esto fue motivado a que al calentar el material de fosa en el tanque hasta 85°C la temperatura en la celda era de aproximadamente 36°C y al intentar alcanzar la temperatura de operación en la celda (77°C) la muestra empezaba a ebulir, perdiendo de esta manera el agua por evaporación, lo cual no era el fin del proceso.

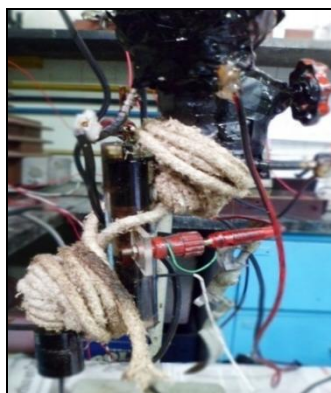


Figura N° 35. Celda cilíndrica con cordón de asbesto.

En la Figura N° 35 se aprecia la manera en que fue colocado el cordón de asbesto, sin embargo, la temperatura en la celda no pudo mantenerse a la establecida como temperatura de operación (77°C), por lo tanto, se consideró fijar la temperatura en el tanque (85°C) y realizar todas las pruebas con la temperatura que indicaba la celda (36°C), esto influyó de manera directa en las pruebas realizadas con la geometría de celda cilíndrica, debido a que no se alcanzó la temperatura de operación que se utilizó para la geometría de celda plana.

Por otro lado, para poder apreciar un incremento del tamaño de gota luego de aplicar los diferentes campos, los valores de FD deben ser mayores a

1, sin embargo, se puede apreciar en la Tabla N° 9 que los valores de FD son en su mayoría menores a 1, por lo tanto, no existe una influencia significativa en la aplicación del campo eléctrico en el material de fosa Guara-2, incluso reduce la cantidad de agua en gotas grandes (mayores a 10 μm).

Es importante resaltar que, para los tres materiales de fosa se establecieron iguales condiciones de tratamiento y de esta manera realizar las pruebas, es decir, aplicar calentamiento, campo eléctrico y centrifugación, por lo que dadas dichas condiciones y luego de observar los valores de FD, el cual representó el parámetro de comparación para las tres fosas, se puede apreciar que el tratamiento aplicado en general no favoreció en la desestabilización del material de fosa Guara-2, por lo tanto, se estableció otro criterio de comparación para así poder apreciar si existió un cambio en la cantidad de agua en función del contenido original, tal como se presenta en la Tabla N° 10.

Tabla N° 10. Factores de desestabilización para las distintas combinaciones con sus porcentajes de agua total.

Número de prueba	Tipo de celda	Voltaje	Tipo de corriente	Tiempo de residencia	Φ_w Replica 1 (%)	Φ_w Replica 2 (%)	Φ_w Replica 3 (%)	Promedio
	Muestra original				15,4			
1	plana	bajo	DC	bajo	12,6	6,6	8,4	9,2
2	cilíndrica	bajo	DC	bajo	11,3	5,5	7,5	8,1
3	plana	alto	DC	bajo	12,6	8,2	13,5	11,4
4	plana	bajo	AC	Bajo	21,2	20,9	14,0	18,7
5	plana	bajo	DC	alto	13,6	8,6	12,8	11,6
6	cilíndrica	alto	DC	bajo	6,9	5,6	7,3	6,6
7	cilíndrica	bajo	AC	bajo	7,6	6,8	6,1	6,8
8	cilíndrica	bajo	DC	alto	9,0	7,0	9,5	8,5
9	plana	alto	AC	bajo	23,7	14,5	19,1	19,1
10	plana	alto	DC	alto	9,2	8,3	10,4	9,3
11	plana	bajo	AC	alto	5,1	7,2	6,4	6,2
12	cilíndrica	alto	AC	bajo	6,4	7,4	9,0	7,6
13	cilíndrica	alto	DC	alto	12,5	8,2	12,5	11,0
14	cilíndrica	bajo	AC	alto	10,4	8,0	6,7	8,4
15	plana	alto	AC	alto	8,3	6,2	13,5	9,3
16	cilíndrica	alto	AC	alto	6,6	6,2	2,3	5,1

Se puede apreciar en la Tabla N° 10, que las combinaciones resaltadas cuyas características fueron: geometría de celda plana, voltaje bajo, tipo de corriente AC y tiempo de residencia bajo (18,67), así como geometría de celda plana, voltaje alto, tipo de corriente AC y tiempo de residencia bajo (19,08), fueron las combinaciones que aún cuando lograron desestabilizar más el material de fosa, favoreciendo en el incremento del tamaño de gotas, en comparación con la muestra original, no logran ser representativas.

De igual manera, se consideró otro criterio de comparación para así poder apreciar si existió un cambio en el diámetro de gota de agua en función del diámetro original, tal como se presenta en la Tabla N° 11, donde se pueden observar los factores de desestabilización con los diámetros de gota para una fracción acumulada del 50 %.

Tabla N° 11. Factores de desestabilización para las distintas combinaciones con los diámetros de gota para una fracción acumulada del 50 %.

Número de prueba	D ₅₀ Replica 1	D ₅₀ Replica 2	D ₅₀ Replica 3	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación
	Muestra original			5,9		
1	20,2	5,6	10,3	12,0	7,45	62
2	6,1	9,5	7,6	7,7	1,70	22
3	13,7	7,9	21,6	14,4	6,88	48
4	6,8	4,3	5,4	5,5	1,25	23
5	6,8	6,4	6,5	6,6	0,21	3
6	11,0	6,8	17,6	9,2	5,44	59
7	6,5	8,3	7,0	7,3	0,93	13
8	14,8	6,3	5,5	8,9	5,15	58
9	4,1	6,0	3,6	4,5	1,27	28
10	5,3	6,3	4,3	5,3	1,00	19
11	6,4	4,9	5,2	5,5	0,79	14
12	9,5	13,0	7,7	10,1	2,70	27
13	4,6	6,7	21,0	10,7	8,92	83
14	20,7	13,1	22,3	18,7	4,92	26
15	6,1	4,4	7,2	5,9	1,41	24
16	8,2	10,5	7,1	8,6	1,73	20

En la Tabla N° 11 se observa que en más de la mitad de las pruebas se presentan incrementos significativos de la mediana de la distribución, (D₅₀),

llegando a incrementar en algunos casos entre el doble y el triple en comparación con la muestra original, dichos incrementos se favorecen empleando la geometría de celda cilíndrica. Considerando que todas las pruebas con la geometría de celda cilíndrica se realizaron con una temperatura en la celda de aproximadamente 36°C, por lo explicado anteriormente, se hubiese podido observar un mayor incremento en el tamaño de las gotas si la temperatura de operación en la celda cilíndrica se habría alcanzado.

Además, a partir de la Tabla N° 9 se presenta en la Figura N° 36 una grafica que representa la influencia del tipo de celda y del tipo de corriente en el factor de desestabilización a diferentes voltajes.

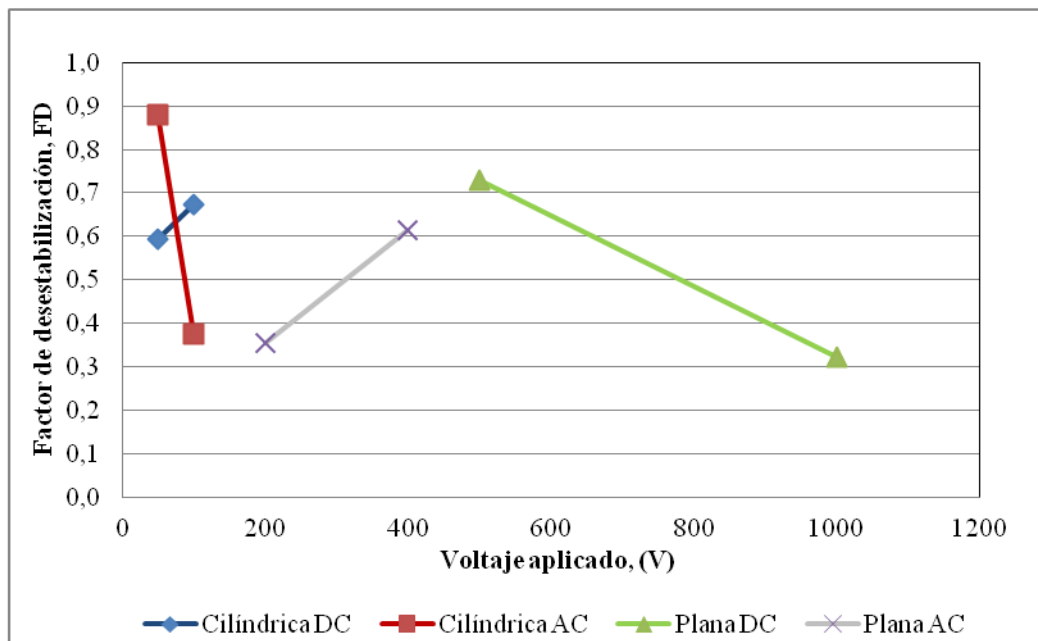


Figura N° 36. Influencia del tipo de celda y del tipo de corriente en el factor de desestabilización a diferentes voltajes.

Para poder aplicar el método Diseño Factorial 2^4 es necesario que todas las variables posean un rango en común, donde se puedan ver reflejadas las interacciones entre las mismas, sin embargo, se puede observar en la Figura N° 36 que los rangos de voltajes para las pruebas empleando una geometría de celda plana y con tipo de corriente DC y AC no poseen un rango en común y por ende no existe comparación. Por otro lado, empleando una geometría de

celda cilíndrica y con tipo de corriente DC y AC si se puede establecer comparación, pero en relación a las celdas planas no se presenta un rango en común; esto fue debido a que al intentar aplicar el mismo voltaje que se le aplicaba a las pruebas con las celdas planas, se producía cortocircuito a las pruebas con las celdas cilíndricas, lo cual disminuía la diferencia de potencial aplicada, tal como se aprecia en la Figura N° 37.



Figura N° 37. Cortocircuito producido al incrementar el voltaje.

De igual manera, en la Tabla N°12 se presentan los valores de voltaje que fueron alcanzados al aplicar los distintos tipos de corriente, para cada una de las geometrías de celda empleadas.

Tabla N° 12. Voltajes alto y bajo alcanzados para DC y AC con celda plana y cilíndrica.

Celda plana		
Tipo de corriente/ voltaje alcanzado	Alto	Bajo
DC	1000V	500V
AC	400V	200V
Celda Cilíndrica		
Tipo de corriente/ voltaje alcanzado	Alto	Bajo
DC	100V	50V
AC	100V	50V

Se puede observar en la Tabla N° 12 que, debido al cortocircuito que se producía en el momento de realizar las pruebas, los valores de voltaje no pudieron mantenerse, por lo tanto, se planteó realizar el análisis y discusión por

separado de las variables consideradas en la realización de las diferentes pruebas.

Celda cilíndrica:

Las pruebas se realizaron con las consideraciones mencionadas anteriormente, es decir, con el cordón de asbesto y fijando la temperatura en el tanque. En la Figura N° 38 se puede observar la influencia del tipo de corriente para la celda cilíndrica en la mediana de distribución a diferentes voltajes y en la Figura N° 39 se aprecia la relación de los diámetros de gota para una fracción acumulada del 50% y la muestra original en función de los tipos de corriente.

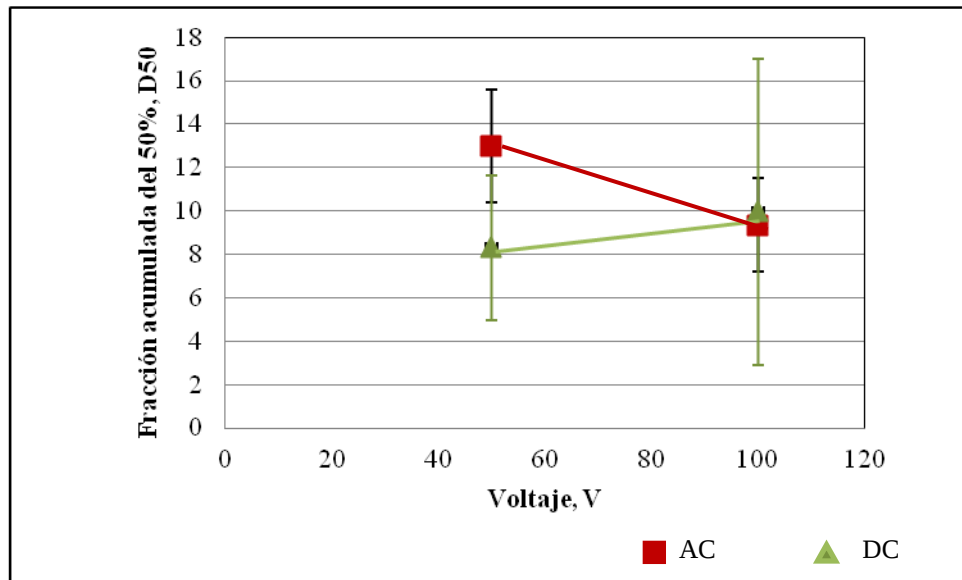


Figura N° 38. Influencia del tipo de corriente para la celda cilíndrica en la mediana de distribución a diferentes voltajes.

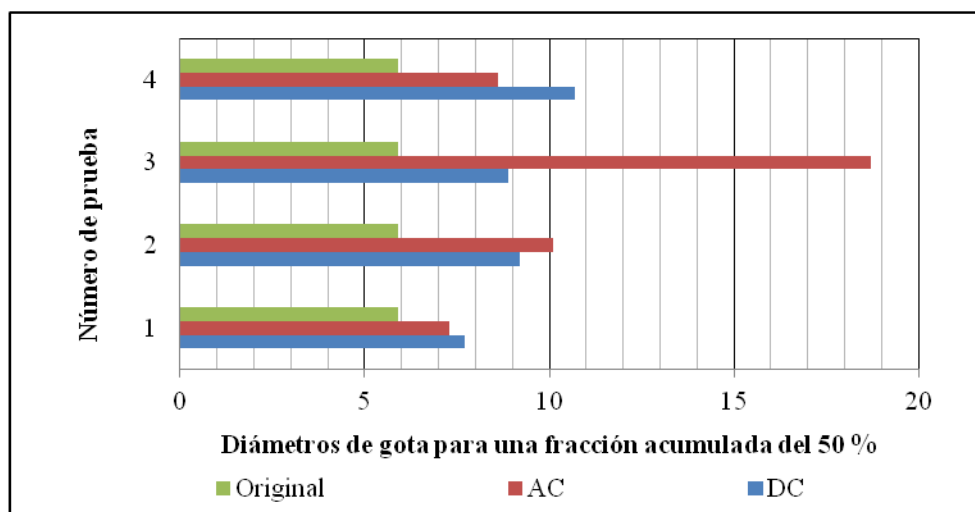


Figura N° 39. Mediana de la distribución a diferentes voltajes para celda cilíndrica.

Se puede apreciar en la Figura N° 38 que con un tipo de corriente AC la fracción acumulada del 50% aumenta al tener voltajes bajos, es decir, el material de fosa Guara-2 se ve favorecido por un campo eléctrico no uniforme y un tipo de corriente AC, esto puede ser debido a que en AC la polaridad va cambiando constantemente y las gotas de agua se mueven entre los dos electrodos, incrementando de esta manera su diámetro para una fracción acumulada del 50% en comparación con la muestra original, tal como se aprecia en la Figura N° 39, donde empleando un tipo de corriente AC se logran mayores diámetros de gota que con la corriente DC.

De igual manera, se presenta en la Figura N° 40 la influencia del tiempo de residencia para la celda cilíndrica en la mediana de distribución a diferentes voltajes y en la Figura N° 41 se aprecia la relación de los diámetros de gota para una fracción acumulada del 50% y la muestra original en función de los tiempos de residencia.

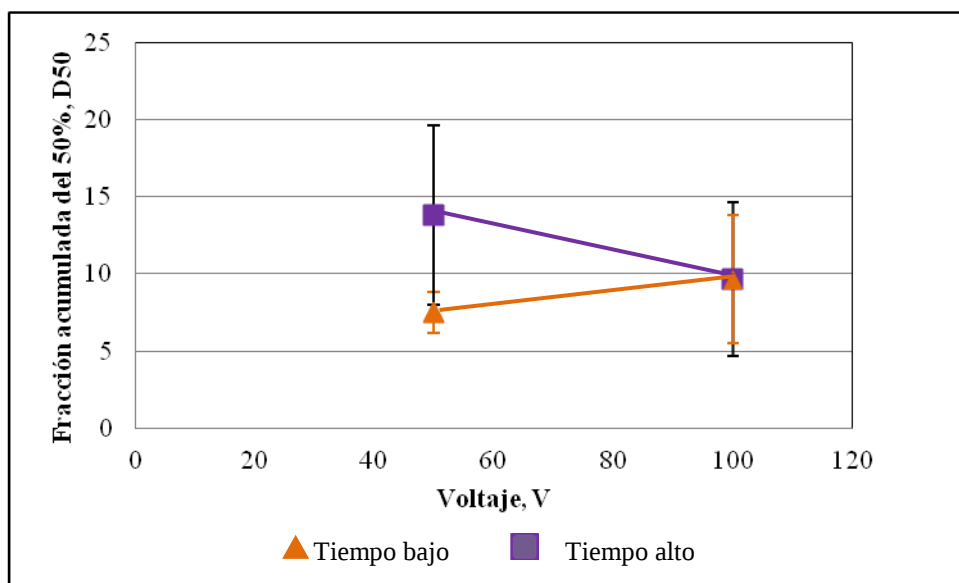


Figura N° 40. Influencia del tiempo de residencia para la celda cilíndrica en la mediana de distribución a diferentes voltajes.

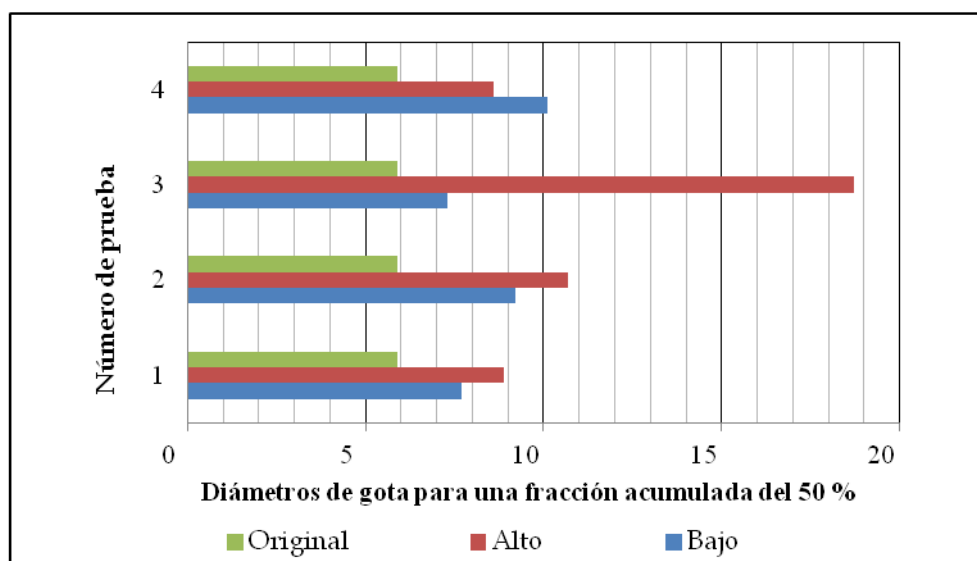


Figura N° 41. Mediana de la distribución a diferentes tiempos de residencia para celda cilíndrica.

En la Figura N° 40 se puede observar que la fracción acumulada del 50% se obtiene al tener un tiempo de residencia alto en la celda con voltajes bajos, ya que para voltajes altos se producían cortocircuitos, además al tener un tiempo de residencia alto, es decir, con la apertura de 2,70mm el material de fosa Guara-2 permanecía más tiempo bajo los efectos del campo eléctrico no

uniforme y las gotas de agua incrementaron su diámetro, tal como se aprecia en la Figura N° 41, donde los altos tiempos de residencia favorecen el aumento del diámetro de las gotas de agua para una fracción acumulada del 50%, en comparación con los tiempos de residencia bajos y con la muestra original.

Por lo tanto, empleando la geometría de celda cilíndrica, con un tipo de corriente AC, con tiempo de residencia en la celda alto y voltajes bajos se logra alcanzar el mayor factor de desestabilización (0,7) y por ende la emulsión del material de fosa se logra desestabilizar más con las condiciones mencionadas, pues al ser el material de fosa Guara-2 altamente conductor y considerando que hubo presencia de bolsas de agua en la realización de las pruebas, se pudo favorecer la desestabilización por campo eléctrico y por impedimento de adsorción de surfactantes en la interfase.

Celda plana:

En la Figura N° 42 que se presenta a continuación se observa la influencia del tipo de corriente para la celda plana en la mediana de distribución a diferentes voltajes y en la Figura N° 43 se aprecia la relación de los diámetros de gota para una fracción acumulada del 50% y la muestra original en función de los tipos de corrientes.

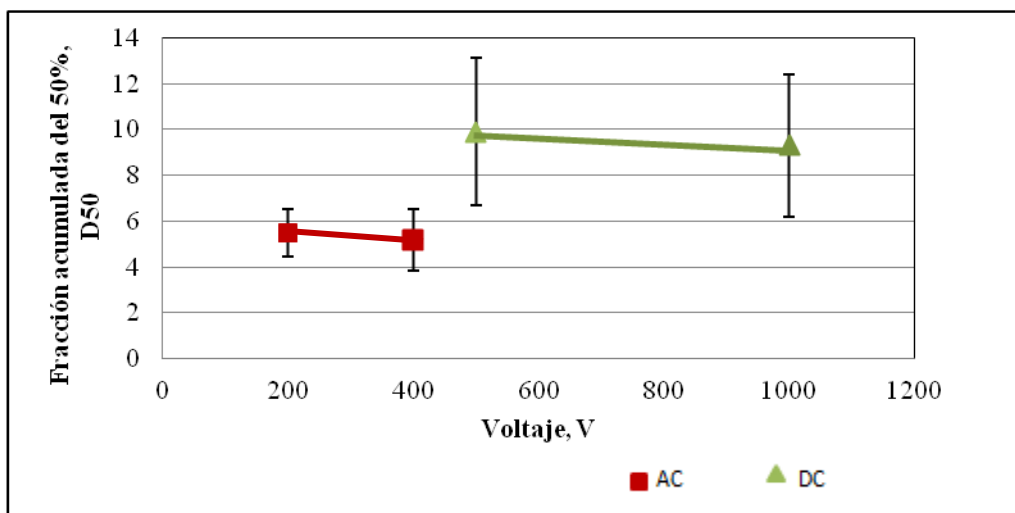


Figura N° 42. Influencia del tipo de corriente para la celda plana en la mediana de distribución a diferentes voltajes.

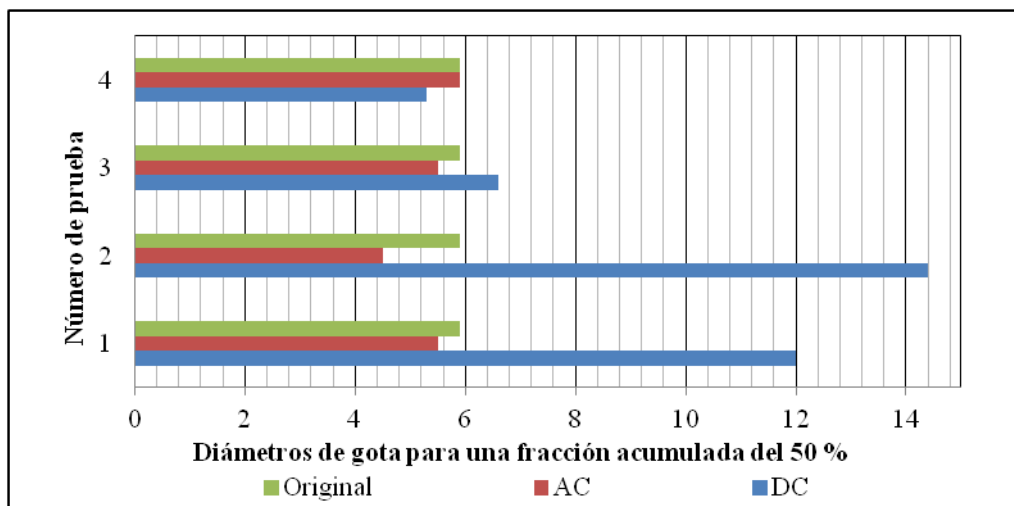


Figura N° 43. Mediana de la distribución a diferentes voltajes para celda plana.

Se puede apreciar en la Figura N° 42 que empleando un tipo de corriente DC y aplicando un voltaje bajo se logra alcanzar una fracción acumulada del 50% mayor, coincidiendo con Fung (2011), quien aún cuando diluyó con Xileno (13:1) el material de fosa Guara-2 pero al someterlo a un campo eléctrico DC variando en 2, 4 y 6 KV/cm, logró obtener gran cantidad de agua en gotas grandes cuando la intensidad de campo fue de 2 KV/cm, es decir, con voltajes bajos. Así mismo, Kwon et al, (2010), concluyeron que “para altos voltajes se producen cortocircuitos en el sistema”, pues el acercamiento de los electrodos con la configuración plana favorece a la desestabilización de las gotas de agua. Por otro lado, en la Figura N°43 se observa que con un tipo de corriente DC se logran mayores diámetros de gota en comparación con la muestra original.

Del mismo modo, en la Figura N° 44 se puede observar la influencia del tiempo de residencia para la celda plana en la mediana de distribución a diferentes voltajes y en la Figura N° 45 se aprecia la relación de los diámetros de gota para una fracción acumulada del 50% y la muestra original en función de los tiempos de residencia.

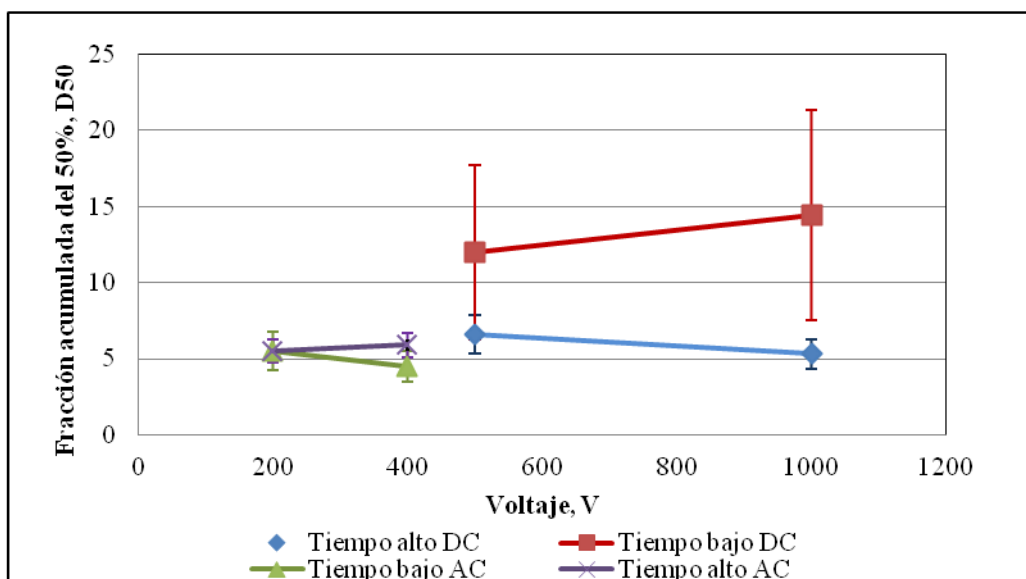


Figura N° 44. Influencia del tiempo de residencia para la celda plana en la mediana de distribución a diferentes voltajes.

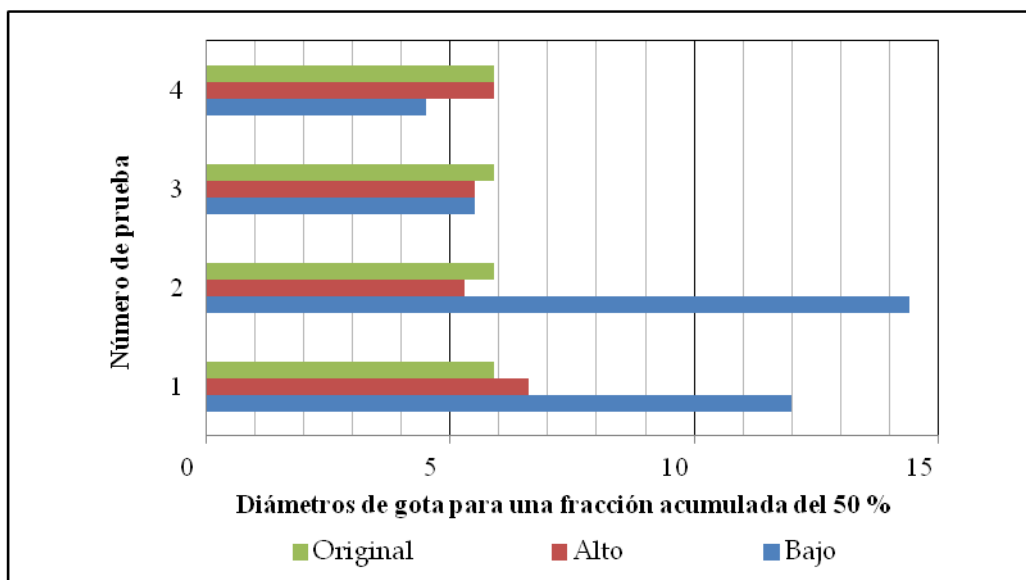


Figura N° 45. Mediana de la distribución a diferentes voltajes para celda plana.

En la Figura N° 44 se puede apreciar que para la geometría de celda plana, un tipo de corriente DC, un tiempo de residencia bajo a altos voltajes, se logra desestabilizar más la emulsión del material de fosa Guara-2, tal como lo obtuvieron Kwon et al, (2010), pues “con el menor tiempo de residencia (3,2s) se obtuvo la mejor separación (77,2%)”, observando de igual manera en la Figura

N° 45 que con el tiempo de residencia bajo se logra alcanzar un diámetro de gota mayor que la muestra original.

Por lo tanto, empleando las condiciones de geometría de celda plana, con un tipo de corriente DC, con tiempo de residencia en la celda bajo y con voltaje alto (considerando el tipo de corriente DC) se logra desestabilizar más la emulsión del material de fosa, ya que se alcanza el mayor factor de desestabilización.

4.4. CUANTIFICACIÓN DEL GRADO DE SEPARACIÓN EN EL SISTEMA EN CONTINUO, EMPLEANDO TÉCNICAS DE MICROSCOPIA ÓPTICA Y DE SEPARACIÓN DE FASES

Técnica de microscopia óptica:

La presentación de estos resultados se basa en un estudio de tamaño de gotas, mediante el análisis de imágenes de las muestras obtenidas para la combinación de pruebas realizadas. La captura de imágenes se realizó fijando el zoom a 20X, antes y después de aplicado el campo eléctrico (AC o DC) y luego de centrifugar; las imágenes se tomaron en las zonas de la muestra ubicada en el portaobjeto, tal como se muestran en la Figura N° 46.

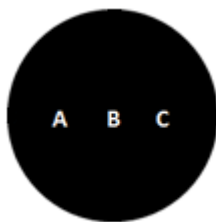


Figura N° 46. Zonas de captura de imágenes con el microscopio.

Posteriormente los resultados del análisis de imágenes se copiaron en una plantilla de Microsoft Excel elaborada con el objetivo de incluir las fórmulas para calcular la distribución de tamaño de gotas y la posterior ejecución de una macro creada con el fin de automatizar los cálculos (Fung, 2011).

En la Figura N° 47 se muestra el comportamiento de las distribuciones de tamaño de gota para la celda cilíndrica, con las condiciones que mostraron mejores resultados obtenidos en el análisis 4.3.

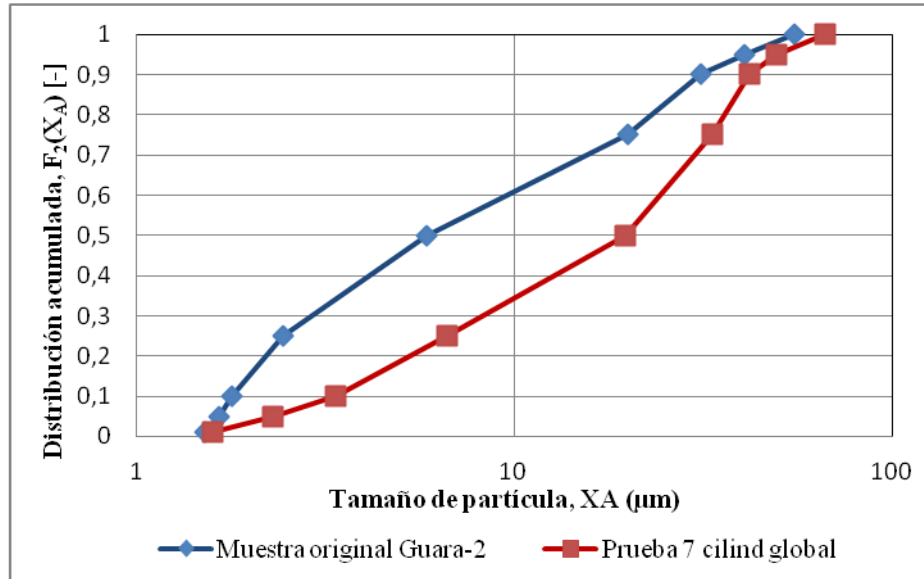


Figura N° 47. Distribución acumulada del tamaño de gotas para la muestra original y la mejor condición con celda cilíndrica.

En la Figura N° 47 se demuestra que el comportamiento de la curva de distribución de tamaño de gotas de la muestra cuyas condiciones fueron geometría de la celda cilíndrica, tipo de corriente AC, voltaje bajo y tiempo de residencia en la celda alto, es la más favorable en relación a la muestra original, ya que para la muestra original se obtuvo un D50 de $5,88 \mu\text{m}$ y para la combinación mencionada se obtuvo un D50 de $19,66 \mu\text{m}$, además de presentar un FD de 0,88 (ver Tabla N°9), sin embargo, dado el campo eléctrico no uniforme y el tipo de fuerza presente con la geometría cilíndrica (dielectroforetica) y al tamaño de las gotas de agua, no se logró alcanzar un mayor tamaño de las mismas, ya que “las fuerzas dielectroforéticas decaen con la distancia entre los electrodos. Cuando las gotas están lejos unas de las otras éstas fuerzas pueden ser despreciables” (Sloblom, 2002). Por otro lado, las fuerzas eléctricas son más intensas en el electrodo central y las gotas pequeñas que se encuentren en los alrededores de ese electrodo tenderán a atraerse.

En la Figura N° 48 se muestra el comportamiento de las distribuciones de tamaño de gota para la celda plana y con las condiciones que mostraron mejores resultados obtenidos en el análisis 4.3.

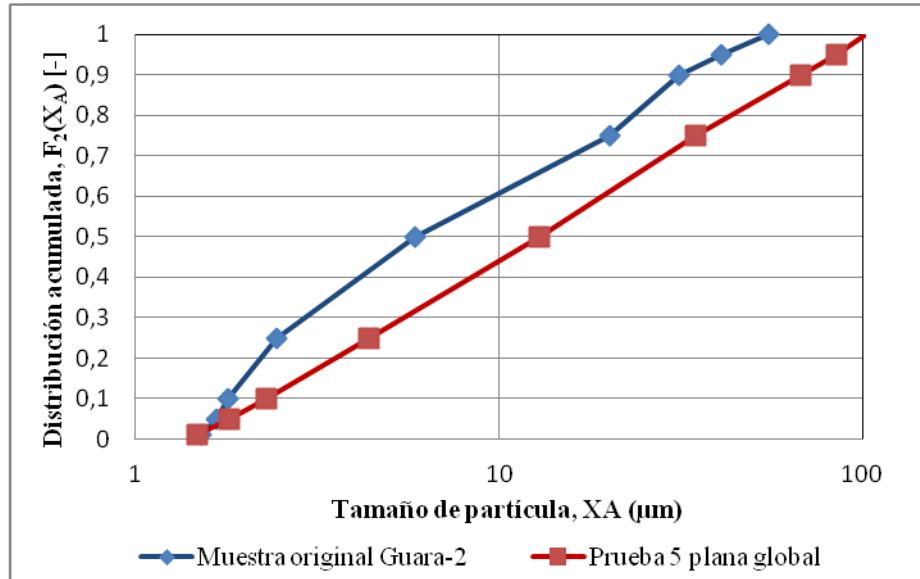


Figura N° 48. Distribución acumulada del tamaño de gotas para la muestra original y la mejor condición con celda plana.

En la Figura N° 48 se demuestra que el comportamiento de la curva de distribución de tamaño de gotas de la muestra cuyas condiciones fueron geometría de la celda plana, tipo de corriente DC, voltaje bajo y tiempo de residencia en la celda bajo, es la más favorable en relación a la muestra original, observando que bajo las condiciones mencionadas se logra obtener un mayor tamaño de gota, ya que para la muestra original se obtuvo un D50 de $5,88 \mu\text{m}$ y para la combinación mencionada se obtuvo un D50 de $12,93 \mu\text{m}$, esto puede ser debido al campo eléctrico uniforme y la fuerza presente con la geometría plana (electroforética) la cual “es independiente del espaciamiento entre gotas” (Bauer, 2007), además, empleando el tipo de corriente DC “las gotas polarizadas (cargadas mitad positivamente y mitad negativamente) tenderán a colisionar entre sí, por lo cual la coalescencia ocurrirá más rápido” (Marfisi y Salager, 2004).

Separación de fases:

Las muestras se colocaron en la centrifuga luego de aplicado el campo eléctrico, para todas las combinaciones mencionadas anteriormente.

Cilíndrica:

Las pruebas se realizaron considerando el aislamiento con asbesto y manteniendo la temperatura en el tanque, es importante destacar que con dichas consideraciones todas las muestras recolectadas en las distintas zanahorias se enfriaban rápidamente, por lo tanto no se observó separación de fases en ninguna de las pruebas realizadas con dicha geometría, tal como se puede observar en la Figura N° 49.

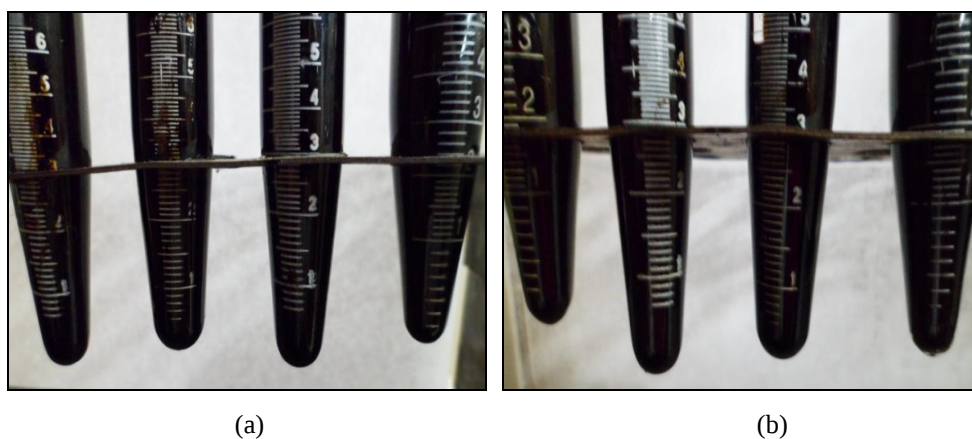


Figura N° 49. Muestras (a) antes de centrifugar y (b) luego de centrifugar empleando la celda cilíndrica.

En la Figura N° 49 se puede apreciar que no hubo separación de fases en las pruebas realizadas empleando la geometría cilíndrica, se puede decir que, al disminuir la temperatura la emulsión tiende a ser más estable, ya que “la temperatura tiene un efecto muy fuerte en la viscosidad de la emulsión, lo que aumenta su estabilidad. Incrementando la temperatura se reduce la adsorción de surfactantes naturales y disminuye la viscosidad de la fase externa, la rigidez de la película interfacial y la tensión superficial” (Salager 1987b), por lo tanto, al presentar temperaturas bajas no se produce separación de fases. Además, “gotas muy pequeñas menores de $10\mu\text{m}$ generalmente producen emulsiones más estables” (Salager 1987b) y tal como se puede apreciar en la Figura N° 47, para

una distribución acumulada del 50%, la muestra tratada presenta un tamaño de gotas de $19,66\ \mu\text{m}$, que aun cuando es mayor a $10\ \mu\text{m}$, la viscosidad de la muestra no facilitó su separación.

Plana:

En todas las pruebas realizadas se pudo observar que no se visualizó separación de fases, tal como se puede apreciar en la Figura N° 50.

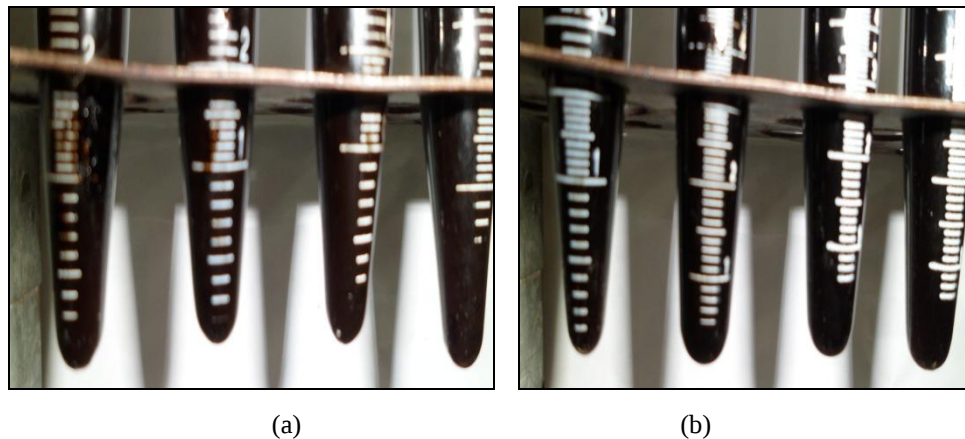


Figura N° 50. Muestras (a) antes de centrifugar y (b) luego de centrifugar empleando la celda plana.

En la Figura N° 50 se puede observar que no hubo separación de fases en las pruebas realizadas empleando la geometría plana, cabe acotar que aún cuando se trató de evitar agregar agua libre característica del material de fosa en el tanque para la realización de las pruebas, siempre hubo presencia de cierta cantidad de agua libre, esta agua está contenida en el crudo formando una especie de bolsa de agua en la fase continua y al aplicar el campo eléctrico (DC o AC) las bolsas de agua libre pudieron alinearse con las gotas y formar un puente entre los electrodos y así generar el corto circuito, sin embargo, dado el pequeño tamaño de las gotas de agua presente estas no pudieron decantar.

Por otro lado, las muestras que fueron recolectadas en las distintas zanahorias se enfriaban ya que transcurría un cierto tiempo mientras se le realizaba la prueba de microscopia óptica, esto pudo influir en la ausencia de separación de fases, pues se incrementaba su viscosidad al enfriarse las muestras y “un 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” (Sloblom, 2002). Así mismo, aún cuando se le aplicaba una diferencia de potencial al material de fosa se logró desestabilizar, pero al ser las gotas muy pequeñas y enfriarse estas se estabilizaban más, trayendo como consecuencia la no decantación de las gotas de agua, pues pudieron coalescer pero el tamaño de gotas no fue significativo como para que lograra visualizarse una separación de fases, además de la alta viscosidad característica de la fosa.

Adicionalmente, aún cuando el porcentaje de asfaltenos presentes en el material de fosa es pequeño, este en combinación con las resinas, puede contribuir en conjunto con la viscosidad y el tamaño de gotas a su estabilidad. En la Figura N° 51, se presenta un esquema donde se trata de explicar cómo al ser las gotas pequeñas, es posible que el campo eléctrico no logre afectarlas, debido principalmente a la viscosidad de la fosa, afectando a las gotas grandes.

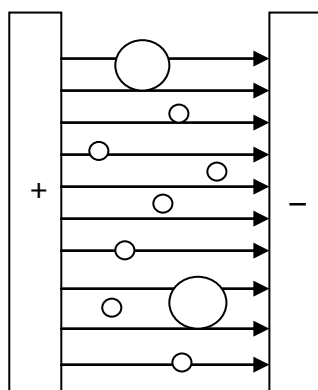


Figura N° 51. Estabilidad del material de fosa Guara-2 debido al tamaño de gota. (Elaboración propia)

CONCLUSIONES

Luego del desarrollo de los objetivos propuestos en el presente Trabajo Especial de Grado, se llega a las siguientes conclusiones en relación a la desestabilización electrostática de la fosa de producción Guara-2:

- La viscosidad de la emulsión se ve altamente influenciada por la temperatura.
- El material de fosa Guara-2 entra en la clasificación de crudos pesados.
- El agua libre presente en la fosa es altamente conductora.
- Los asfaltenos presentes en el material de fosa forman un sistema coloidal que determina la viscosidad del producto.
- Se logran alcanzar menores tiempos de residencia en la celda plana para altas temperaturas.
- Para el material de fosa Guara-2, es mejor el análisis por separado para todas las variables, considerando los criterios de porcentaje de agua y mediana de distribución.
- Con la geometría de celda cilíndrica, con tipo de corriente AC, tiempo de residencia alto y voltaje bajo se logra una distribución acumulada de agua favorable respecto a la muestra original.
- Con la geometría de celda plana, con tipo de corriente DC, tiempo de residencia bajo y voltaje alto se logra una distribución acumulada de agua favorable respecto a la muestra original.
- Se presentan incrementos significativos de la mediana de la distribución (D_{50}) en más de la mitad de las pruebas, empleando la geometría de celda cilíndrica en comparación con la muestra original.
- La separación de fases se vio altamente influenciada por la viscosidad de la emulsión.

RECOMENDACIONES

- Aislar completamente el sistema en continuo empleando fibra de vidrio, para mantener la temperatura del material de fosa Guara-2.
- Utilizar un tanque que permita almacenar un mayor volumen de muestra, además de un sistema de recirculación que permita conservar la temperatura.
- Mantener la temperatura en todas las muestras empleando un baño en caliente y un sistema de aislamiento para la centrifuga, o utilizar una centrifuga térmica.
- Recolectar mayor cantidad de muestras para alcanzar las condiciones estacionarias, luego de aplicado los distintos campos eléctricos.
- Disminuir la viscosidad del material de fosa con temperatura y solventes para evaluar el efecto de los mismos, empleando el sistema en continuo.
- Realizar el estudio de las variables manteniendo fijas unas y variando otras.
- Diseñar un sistema de aislamiento para el sistema en continuo, empleando la geometría de celda cilíndrica con el fin de alcanzar la temperatura de operación.
- Incorporar medios coalescedores en las celdas planas y cilíndricas considerando las mejores combinaciones, para observar si existe un incremento en el diámetro de gota.
- Efectuar el análisis SARA después de aplicado los diferentes campos eléctricos para compararlos con los obtenidos para la muestra original.
- Emplear una magnificación de 10X o 5X con el fin de observar el comportamiento de la muestra en secciones más grandes e integrar los resultados alcanzados con el aumento 20X utilizado en el presente trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APHA. (1998). Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association, Washington. 1265 pp.

Bailes P.J. y Larkai S.K.L. (1984). *Influence of phase ratio on electrostatic coalescence of water in oil dispersions*. Chem. Eng. Res. Des. Vol.62, January.

Bauer, Joel (2007). *Influencia del campo eléctrico D.C en la distribución de tamaño de partícula de sistemas dispersos crudo, agua y sólidos provenientes de lodos petrolizados*. Trabajo Especial de Grado. Facultad de Ingeniería, Escuela Ingeniería Química. Universidad Central de Venezuela. Caracas.

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

Cherokee,(2009).http://www.slidefinder.net/s/servicios_ambientales_integrales_ver_26052003/servicios_ambientales_integrales_cs_ver_02-26052003_400pm_1_/3470880/p2

Cottrell F.G. (1911 a).US Patent 987 114.

Cottrell F.G., Speed J.B. (1911 b). US Patent 987 115.

Culshaw, Fabiana (2006). *Fosas tóxicas en Venezuela: ¿Es factible una limpieza total?* VenEconomía, Vol 23 No. 4.

- Eow, S., Ghadiri, M., Sharif, A., Williams, T. (2001). *Electrostatic Enhancement of water droplets in oil: a review of the current understanding*. Chemical Engineering Journal 84(3):173-192.
- Fung, Edward (2011). *Sistematizar las técnicas de caracterización de emulsiones de fosas: estudio de sistemas con análisis de imágenes*. Pasantía de Investigación. Facultad de Ingeniería, Escuela Ingeniería Química. Universidad Central de Venezuela. Caracas.
- Fung, Edward (en ejecución). *Separación electrostática con corriente directa para desestabilizar emulsiones w/o de distintas fosas de producción mezcladas con solventes*. Trabajo Especial de Grado. Facultad de Ingeniería, Escuela Ingeniería Química. Universidad Central de Venezuela. Caracas.
- Gary, J. H. (1980). Refino de Petróleo. España. Editorial Reverté S. A. 782 p.
- G.P.A. Estudios y Servicios Petroleros S.R.L. (2005). Nota Técnica N°75. Viscosidad y estructura en crudos pesados de la C.G.S.J. <http://www.gpasrl.com.ar>
- G.P.A. Estudios y Servicios Petroleros S.R.L. (2006). Nota Técnica N°77. Significado Práctico del Ensayo S.A.R.A. <http://www.gpasrl.com.ar>
- Hewitt, Paul G. (2004). *Física conceptual*. Pearson Educación. 9na edición. México.
- Jefreys, G. y Davies J. T. (1971). *Coalescence of liquid droplets and liquid dispersion*. En Recent Advances in liquid-liquid Extraction, Hason C. (Ed.), Nueva York, Pergamon Press. p.495-584.

- Kilpatrick PK, Spiecker PM, (2001). *Asphaltene Emulsions*, En *Encyclopedic Handbook of Emulsion Technology*, J. Sjöblom, Ed. Marcel Dekker New York, pp.707-730.
- Lucas, R. (1968). *Electrical Dehydration of thermally produced emulsions*. SPE, No. 2173
- Marfisi, S y Salager, J. (2004). *Deshidratación de Crudo-Principios y Tecnología*. Cuaderno FIRP S853-PP. Laboratorio FIRP. Escuela de Ingeniería Química, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.
- Miller J y Miller J (2002), *Estadística y quimiometría para química analítica*. Prentice Hall. 4ta edición. Madrid.
- Montgomery, D y Runger, G. (1996). *Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería*. McGraw-Hill Interamericana Editores. 1era edición. México.
- Morales, C. (2005): *Electrostatic in coalescence of W/O emulsions: State of Art of the understanding and technology*. Seminary. Universidad Central de Venezuela. Caracas.
- Morfes, G. (2004). *PDVSA - INTEVEP Documento Técnico N° SIT-0345*. Los Teques.
- Padrón, Alida y Zúñiga, Percy (2005). *Aplicación de la técnica de microscopia óptica para la caracterización de sistemas dispersos formados por crudos, agua y sólidos*. Trabajo Especial de Grado. Facultad de Ingeniería, Escuela Ingeniería Química. Universidad Central de Venezuela. Caracas.

Pérez, Violeta (2012). *Desestabilización electrostática con corriente alterna de material de fosas de producción mezclado con solventes*. Trabajo Especial de Grado. Facultad de Ingeniería, Escuela Ingeniería Química. Universidad Central de Venezuela. Caracas.

Petróleos de Venezuela S.A. (PDVSA). Balance de la Gestión Social y Ambiental. Informe de Gestión Anual. (2010). Consultado el 02 de noviembre de 2011: http://www.pdvsa.com/index.php?tpl=interface.sp/design/biblioteca/readdoc.html&newsid_obj_id=9374&newsid_temas=111

Proinquinica, (2008). *Tipos de crudo Venezolano*. <http://proinquinica.over-blog.es/article-tipos-de-crudo-venezolano-53385551.html>

Rebolledo, Melania (2007). *Estudio del efecto de sólidos en la estabilidad de una emulsión de agua en aceite bajo un campo eléctrico DC*. Trabajo Especial de Grado. Facultad de Ingeniería, Escuela Ingeniería Química. Universidad Central de Venezuela. Caracas.

Rhodes, M. (1998). *Introduction to Particle Technology*. Wiley. Chichester.

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

Rodríguez, María (en ejecución). *Efecto de la mojabilidad en la separación de emulsiones*. Trabajo Especial de Maestría. Facultad de Ingeniería, Escuela Ingeniería Química. Universidad Central de Venezuela. Caracas.

Salager J.L. (1987a). Revista Técnica Intevep, 7(12):3-15.

Salager J.L. (1987b). *Deshidratación de crudo. Módulo de Enseñanza en Fenómenos Interfaciales*. Cuaderno FIRP S353, Laboratorio FIRP. Escuela de Ingeniería Química, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.

Salager, J. (1999). *Propiedades de las Emulsiones y su Medición*. Cuaderno FIRP S747-B, Laboratorio FIRP. Escuela de Ingeniería Química, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.

Salager, J.L. (1999b). *Formulación, Composición y Fabricación de emulsiones para Obtener las Propiedades deseadas. Estado del Arte. Parte B. Propiedades de las Emulsiones y su Medición*. Cuaderno FIRP S747-B, Laboratorio FIRP. Escuela de Ingeniería Química, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.

Schramm, L. (1992). *Petroleum emulsions. Basic principles: Fundamentals and Applications in the Petroleum Industry*. Schramm, L. L. (Ed.) Advances in Chemistry Series. Vol 231, American Chemical Society, Washington.

Schramm, L. (2005). *Emulsions, Foams and Suspensions: Fundamentals and Applications*. Wiley-VCH, Weinheim.

Serway, R. y Faugh, J. (2004). *Fundamentos de Física*. Tercera Edición. México. Cengage Learning Editores. 448 pág.

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

- Slöblom, J; Narve, A; Auflem, I.H. (2003). *Our current understanding of water-in-crude oil emulsions. Recent characterization techniques and high pressure performance*. Advances in Colloid and Interface Science. (100-102): 399-473.
- Sorrentino J. A. (2002). *Advances in correlating filter cake properties with particle collective characteristics*, Tesis Doctoral Universidad de Karlsruhe. Shaker Verlag, Alemania.
- Speight, J. G. (1999). The chemical and physical structure of petroleum: Effects on recovery operations. Journal of Petroleum Science and Engineering, 22, 3-15.
- Spielma, L.A., Goren, S.L. (1962). *Progress in induced coalescence and a new theoretical framework for coalescence by porous media*, Ind. Eng. Chem. 62(10):10-24.
- Vidal, C. (2001). *Caracterización termodinámica (PVT) de fluidos de fondo y superficie provenientes del norte del Estado Monagas*. Informe Final de Cursos en Cooperación. Inédito. Universidad Simón Bolívar, Caracas.
- Vold, R. D. y Groot, R.C. (1962). *An ultracentrifugal method for the quantitative determination of emulsion stability*, J.Phys.Chem. 66:1969-74.
- Waterman, L. (1965). Electrical coalescers, Chem. Eng. Prog. 61 (10) 51–57.
- Woo-Taeg Kwon, Kunyik Park, Sam Duck Han, Sung Min Yoon, Joo Yeon Kim, Wisup Bae y Young Woo Rhee (2010). *Investigation of water*

separation from water-in-oil emulsion using electric field. Journal of Industrial and Engineering Chemistry 16 (2010) 684–687.

APÉNDICES

APÉNDICE I: CÁLCULOS DE LA DENSIDAD DE LA MEZCLA, DEL HIDROCARBURO Y °API

Densidad de la mezcla:

$$\rho = \frac{(mp_{ll} - mp_v)}{v_p} = \frac{(48,05 - 23,51)gr}{24,941ml} = 0,9839gr/ml$$

donde:

ρ = densidad de la mezcla. (g/ml)

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

mp_v = masa del picnómetro vacío (g)

v_p = volumen del picnómetro (ml)

Densidad del Hidrocarburo:

$$\rho_{HC} = \frac{\rho_{mezcla} - \Phi * \rho_w}{(1 - \Phi)} = \frac{\frac{0,9824gr}{ml} - \frac{(0,38 * 1)gr}{ml}}{(1 - 0,38)} = \frac{0,9716gr}{ml}$$

donde:

ρ_{HC} = densidad del Hidrocarburo (g/ml)

ρ_{mezcla} = densidad promedio de la fosa (g/ml)

Φ = cantidad de agua recolectada por destilación (%) (Se consideró 38%, valor obtenido por Rodríguez, en ejecución)

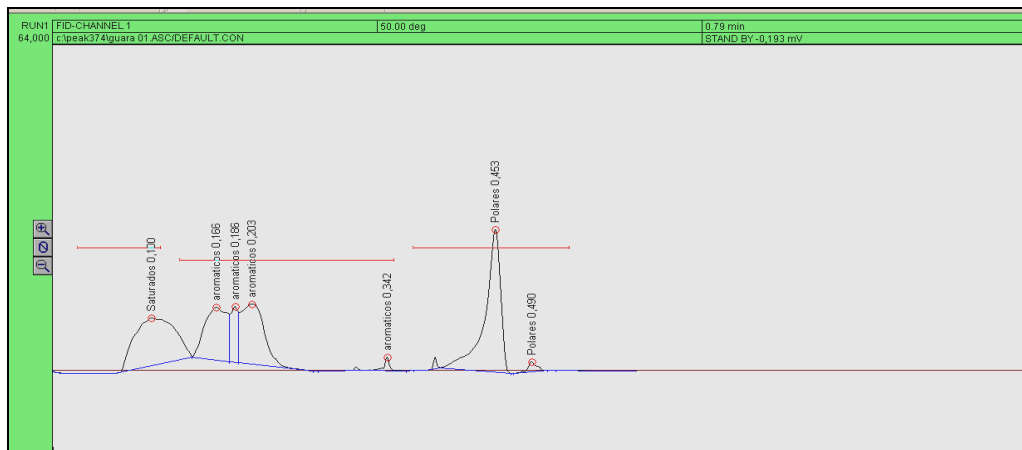
ρ_w =densidad del agua (g/ml) (considerando densidad del agua = 1 gr/ml)

Grados °API:

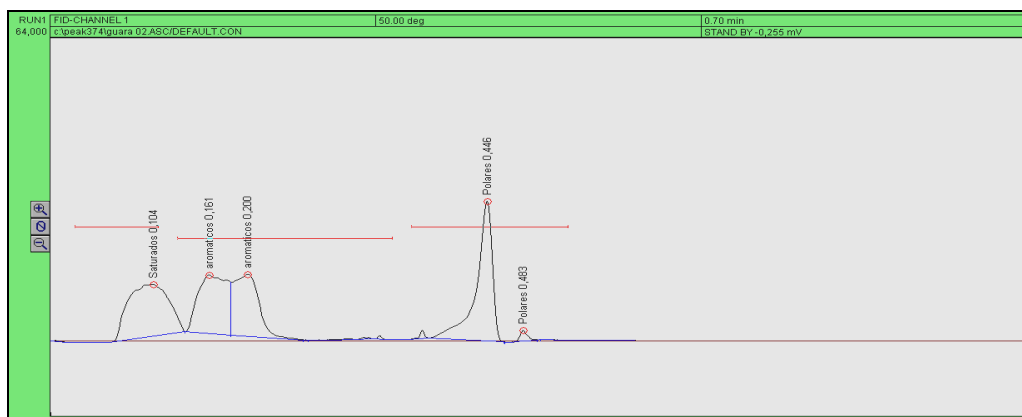
$$^{\circ}API = \frac{141,5}{\frac{g}{ml} \cdot \frac{60}{60^{\circ}F}} - 131,5 = \frac{141,5}{\frac{0,9824gr/ml}{1gr/ml}} - 131,5 = 12,5^{\circ}API$$

Considerando como base que la densidad del agua a 60 °F es 1 gr/c.c., por lo que la densidad de un crudo o un derivado de éste sería igual a su g.e., por lo tanto, la densidad del agua = 1 gr/ml.

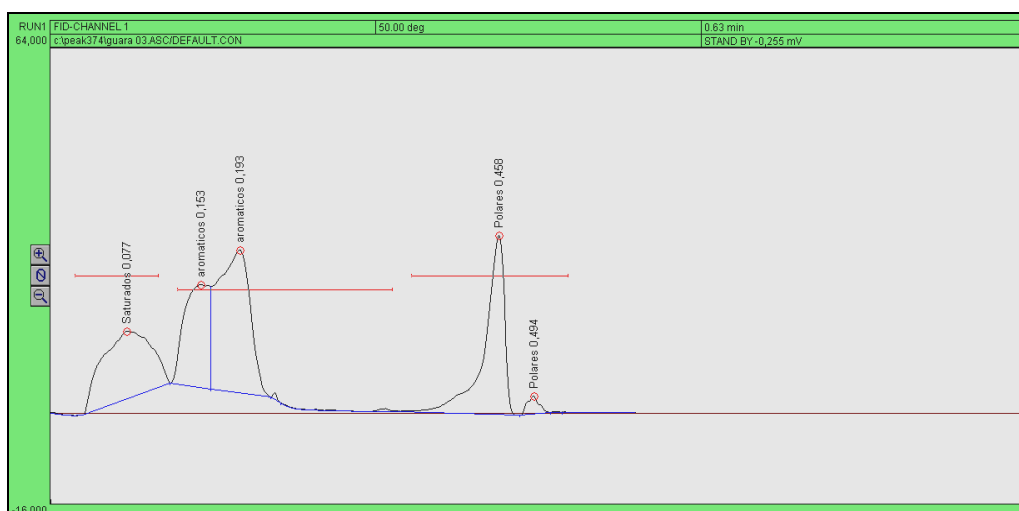
APÉNDICE II: CÁLCULO DE NORMALIZACIÓN DEL ANÁLISIS SARA



Component	Retention	Area	Height	External	Units
Saturados	0,100	26,9367	9,415	0,0000	%
aromaticos	0,166	16,7594	10,356	0,0000	
aromaticos	0,186	5,6121	10,950	0,0000	
aromaticos	0,203	19,5750	11,842	0,0000	
aromaticos	0,342	1,0298	2,699	0,0000	
Polares	0,453	30,6397	28,056	3,2122	ppm
Polares	0,490	1,1747	1,935	0,1231	ppm
		101,7271		3,3353	



Component	Retention	Area	Height	External	Units
Saturados	0,104	32,4375	11,043	0,0000	%
aromaticos	0,161	26,0625	12,362	0,0000	
aromaticos	0,200	22,7705	13,073	0,0000	
Polares	0,446	33,1268	29,520	3,4729	ppm
Polares	0,483	1,1265	2,280	0,1181	ppm
		115,5239		3,5910	



Component	Retention	Area	Height	External	Units
Saturados	0,077	41,7272	11,936	0,0000	%
aromaticos	0,153	32,4906	18,049	0,0000	
aromaticos	0,193	56,9209	25,111	0,0000	
Polares	0,458	44,0232	31,430	4,6153	ppm
Polares	0,494	2,6334	3,171	0,2761	ppm
		177,7954		4,8914	

APÉNDICE III: CÁLCULO DEL TIEMPO DE RESIDENCIA EN LA CELDA

Caudal:

$$Q = \frac{V_{recolectado}}{t_{recolectado}} = \frac{10ml}{134seg} = 0,0746ml/seg$$

donde,

V recolectado = volumen recolectado (ml)= 10ml

t recolectado = tiempo para recolectar los 10ml (seg)

Tiempo de residencia en la celda:

$$\tau_{celda} = \frac{V_{celda}}{Q} = \frac{4cm^3}{0,0746ml/seg} = 53,6seg$$

donde,

V celda = volumen de la celda (cm³) = 5 cm*1cm*0,8cm = 4cm³

Q = caudal (ml/seg)

APÉNDICE IV: CÁLCULO DE LOS FACTORES DE DESESTABILIZACIÓN PARA LAS DISTINTAS COMBINACIONES

$$FD = \frac{\Phi_w(X_A)}{\Phi_w^0(X_A)} = \frac{\Phi_w(10\mu m)}{\Phi_w^0(10\mu m)} = \frac{8,40}{5,90} = 1,42$$

Donde:

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

FD= representa físicamente la razón entre la fracción ocupada por gotas mayores que X_A después del tratamiento y esa fracción antes del tratamiento ($\Phi_w^0(X_A)$)

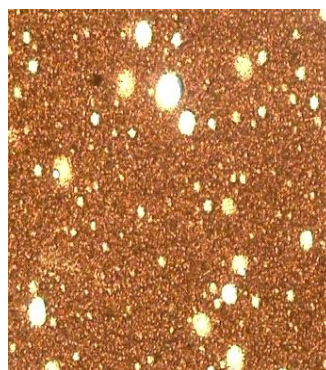
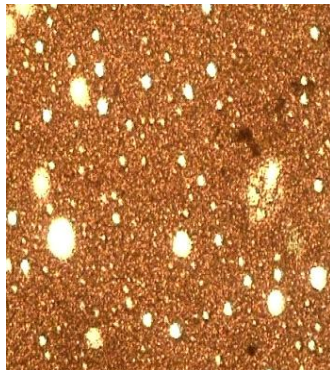
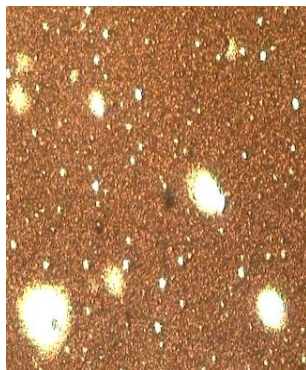
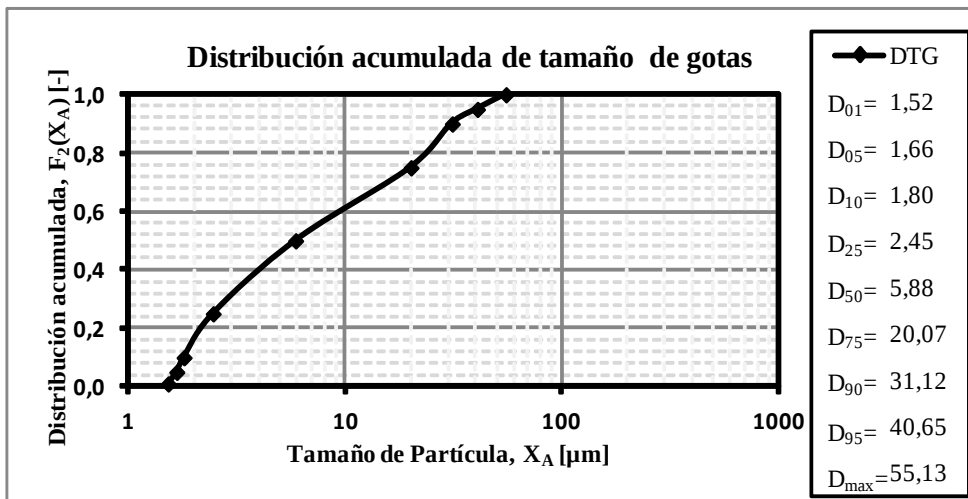
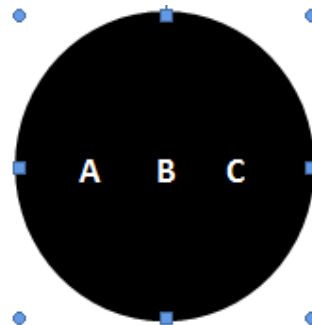
APÉNDICE V: HOJAS DE RESULTADOS

Este apéndice muestra las hojas de los resultados obtenidos para las distintas zonas de la fosa Guara-2. Todos los resultados de las experiencias realizadas en este trabajo están disponibles en el LSM de la EIUCV en el compendio Reporte de Resultados (Gómez, 2012).

GUARA-2: Muestra original

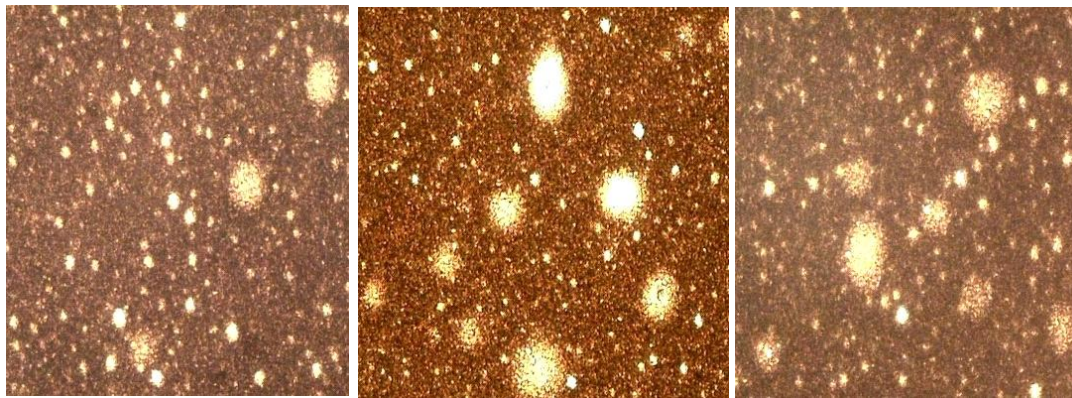
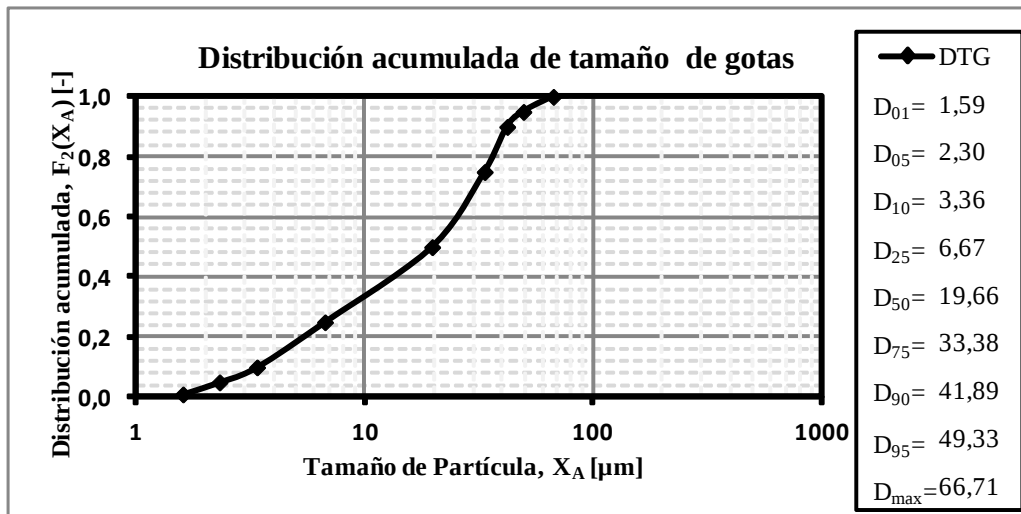
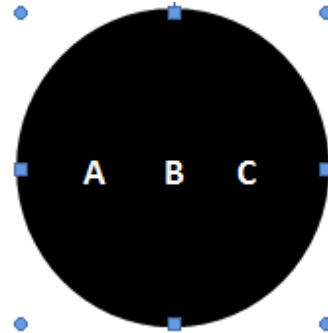
Global

$X_A = 10 \text{ } \mu\text{m}$	
$F_2(10 \text{ } \mu\text{m}) = 0,62$	
$R_2(10 \text{ } \mu\text{m}) = 0,38$	
$D_{50} =$	5,88 μm
$\phi_w = 15,42\%$	
$\Phi_w(10 \text{ } \mu\text{m}) = 5,9\%$	



GUARA-2 Geometría cilíndrica, AC, tiempo resid alto, voltaje bajo

$X_A = 10 \text{ } \mu\text{m}$	
$F_2(10 \text{ } \mu\text{m}) = 0,38$	
$R_2(10 \text{ } \mu\text{m}) = 0,62$	
$D_{50} =$	19,66 μm
$\phi_w =$	25,07%
$\Phi_w(10 \text{ } \mu\text{m}) =$	15,6%



GUARA-2 Geometría plana, DC, tiempo resid bajo, voltaje alto

$X_A = 10 \text{ } \mu\text{m}$	
$F_2(10 \text{ } \mu\text{m}) = 0,46$	
$R_2(10 \text{ } \mu\text{m}) = 0,54$	
$D_{50} =$	12,93 μm
$\phi_w =$	34,18%
$\Phi_w(10 \text{ } \mu\text{m}) =$	18,5%

