

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE CELDA CONTINUA CON LECHO MÓVIL PARA COMBINAR DESESTABILIZACIÓN ELECTROSTÁTICA Y MEDIO COALESCEDOR.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Brs. Gutiérrez E. Kenneth A.,
Sorondo P. Edgardo
para optar al Título
de Ingeniero Químico

Caracas, 2015

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE CELDA CONTINUA CON LECHO MÓVIL PARA COMBINAR DESESTABILIZACIÓN ELECTROSTÁTICA Y MEDIO COALESCEDOR.

TUTOR ACADÉMICO: José Ángel Sorrentino

COTUTOR ACADEMICO: María Alejandra Rodríguez

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Brs. Gutiérrez E. Kenneth A.,
Sorondo P. Edgardo
para optar al Título
de Ingeniero Químico

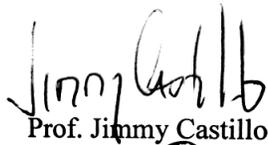
Caracas, 2015

Caracas, Junio de 2015

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Química, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los Bachilleres Kenneth A. Gutiérrez E. y Edgardo Sorondo P., titulado:

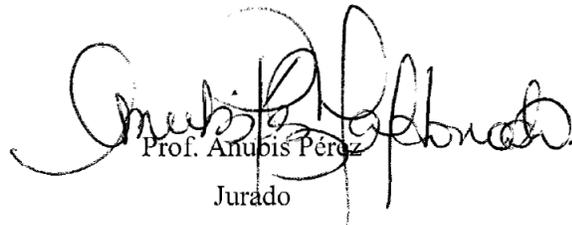
“Evaluación de un sistema de celda continua con lecho móvil para combinar desestabilización electrostática y medio coalescedor”

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 los autores, lo declaran APROBADO.



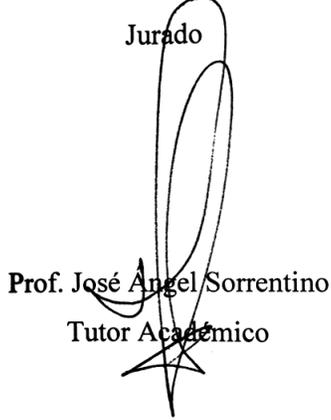
Prof. Jimmy Castillo

Jurado



Prof. Anubis Pérez

Jurado



Prof. José Ángel Sorrentino

Tutor Académico



Profa. María Rodríguez

Cotutor Académico

DEDICATORIA

A mis padres, Sabrina Escalante y Kenneth Gutierrez, por estar en todo momento, confiar en mí aun cuando yo no lo hacía, darme todo su apoyo incondicional.

A mi hermana, María Elena Gutierrez, por ser un modelo a seguir, impulsándome a seguir mis sueños y siendo inspiración para siempre dar lo mejor de mí.

A mis tíos, Igor y Xabier Escalante quienes han sido siempre inspiración académica.

A mi abuelo Ramón de Jesús Escalante, inspiración de humildad, ética y moral.

A quienes siempre estuvieron aquí, así parezca poco, desde lejos o en silencio, siempre brindando una razón para reír,

Jhon, Yvy, Martín, Adri, Vale, Vane, Char, Mavi, Ardilla, Caro, Axel, Ruben, Yvelc, Glau, Dale, Diana, Mariana, Mariela.

Kenneth A. Gutierrez E.

AGRADECIMIENTOS

A la ilustre Universidad Central de Venezuela, por haberme otorgado los conocimientos académicos y de vida que serán necesarios para las aventuras por venir.

A mi tutora, María Rodríguez quien, con un cuidado materno, nos fue guía para este gran paso que hoy damos. Con paciencia, dedicación y pasión por la investigación ha sido siempre un modelo a seguir. Estaré siempre agradecido y su disposición.

Al mi tutor, José Sorrentino, quien con sus ideas, análisis e hipótesis ha sido la inspiración para impulsar la investigación del LSM.

Al Señor Armando, quien demostrando su nivel profesional brindó las piezas clave para llevar a cabo esta investigación.

A mis amigas y amigos que estuvieron a mi lado, dándome su apoyo y confianza, necesaria para la realización de este trabajo.

Kenneth A. Gutierrez E.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primera instancia a la Universidad Central de Venezuela “la casa que vence la sombra” que fue, es y será mi segundo hogar, no solo porque fue el recinto que me hospedo durante tanto tiempo sino por ser el lugar en donde viví todas las experiencias enriquecedoras en mi vida. Agradezco enormemente también a mis tutores académicos, al profesor José Angel Sorrentino por ser esa sabiduría que nos supo llevar con sus ideas a impulsar y llevar a cabo este trabajo. A la profesora María Rodríguez muchas gracias por confiar en nosotros, por apoyarnos en todo momento, por brindarnos esa mano amiga y de madre que nos guio en todo el proceso de creación y locura para este trabajo especial de grado, sin usted todo esto no sería posible en realidad, por jalarme las orejas y decirme todo el tiempo “¿Edgardo y la tesis?”, por estar siempre preocupada y pendiente de que uno estuviera haciendo su trabajo, el cariño y mi respeto hacia usted. También agradezco de corazón al señor Armando, que sin su aporte, talento e ideas no pudiéramos haber terminado este trabajo. Sin olvidarme de mi compañero de tesis Kenneth, que con tu talento y conocimiento me ayudaste a completar esta creación que nos tuvo ocupados y llenándonos de canas durante este tiempo, gracias por tu apoyo y ayuda, fue un placer y privilegio haber trabajado al lado tuyo y te deseo los mejor para ti, mil gracias.

Gracias Dios por haberme dejado vivir esta experiencia universitaria y por dejarme cumplir mi sueño de salir egresado de la UCV, por dejarme hacer tantas locuras y experiencias que me hicieron madurar de forma rápida mi mente, alma y cuerpo. Gracias a mis padres que sin ellos no estuviera vivo, a mi papá (Armando Sorondo) que no importa lo que hiciera siempre me apoyabas en todo momento y deseabas lo mejor de mí, que aunque teníamos muchos desacuerdos por mi forma de pensar sé que estabas orgulloso de lo que hacía, donde quieras que estés en el cielo gracias. A mi mamá (María Milagro Pino) eternamente gracias, gracias por estar ahí, por amarme, por ayudarme en las buenas y en las malas, por aguantar todas mis locuras y hasta por apoyarlas algunas veces, gracias por darme ese apoyo incondicional, por tu cariño y tu amor, un hijo solo puede estar en deuda con una sola persona toda su vida y esa es su madre, así que gracias por darme la vida, por enseñarme todo lo que se ahora, gracias por darme las herramientas y por ser mi ingeniera de corazón, gracias mami. A mis hermanos Ricardo, Orlando y Gerardo, gracias por su apoyo, su preocupación, su amistad, por su amor y cariño, ustedes son parte fundamental de todas las cosas que he hecho hasta ahora, donde nunca me abandonaban en ningún momento, en especial a mi “otro yo” que aunque tienes una manera muy particular y diferente de quererme siempre has estado ahí, siendo mi cómplice en todo, no importa que, siendo la otra cara

de la moneda al ser mi hermano gemelo, gracias por todo. Gracias también a toda mi familia, que sin ellos no estuviera con la cara en alto mirando hacia nuevas metas.

A mis amigos que a través del tiempo he ido y seguiré conociendo, a Lía por ser mi amiga desde el colegio, Jennyfer y Dalemys por estar ahí desde el inicio de esta locura llamada universidad y por no abandonarme nunca, a Rosmery por ser esa amiga que me enseñó a ser político en la vida como también Eliana y Marianela, a mis amigos de la SEIQ-UCV Donnatella, Jorge (Varelon), Alba, Lessa, Betty, Mayerling, Saúl mil gracias por enseñarme a trabajar en equipo y por lo que uno ama, gracias a la segunda generación de la SEIQ que creyó en mí, gracias a Noris, Julio, y a todos que me apoyaron en varios momentos en mi vida, gracias también a Marcia ya que formas parte de ese grupo selecto, donde fuiste guía y ayuda en mis peores momento, así que estaré siempre ahí cuando me necesites y gracias a toda la comunidad de la escuela de Ing. Química, en especial a Iraida y Leudith, por ser las que me inspiraron y guiaron en todo el camino tanto académico como en lo personal. Doy gracias a los grupos en los que he pertenecido en la universidad como el Coro de Ingeniería, el Coro de Odontología y al Cuerpo de Guías del Aula Magna y Sala de Conciertos de la UCV, que formaron parte de mi crecimiento multidisciplinario para mi desarrollo como persona integral hacia un mundo lleno de infinitas posibilidades, gracias. Y por último doy gracias a ese pequeño grupo de personas donde el lenguaje es su día a día, a mis amigos de la escuela de Idiomas Modernos de La UCV, que me acompañaron en estos dos últimos años de sangre sudor y lágrimas, gracias a Marilyn, Yaneir, Andrea, Willimey, Victor, Fred y Wilfred por apoyarme en todo momento y por ser los amigos que me aguantaron en este último y difícil proceso llamado graduación, nunca olvidare todo lo que me enseñaron ya que eso me ayudo a seguir adelante, más sobre todo por todo el amor y el cariño que me han ofrecido. Sé que muchas personas quedaron por fuera porque mi mente no alcanzo en tan pocas líneas de agradecimientos, así que aunque no estén sus nombres en estas palabras les agradezco también, ya que son parte de mi vida y que me han hecho crecer hasta ahora, gracias a todos.

Edgardo Sorondo

**Gutiérrez E., Kenneth A.
Sorondo P., Edgardo**

**EVALUACION DE UN SISTEMA DE CELDA CONTINUA CON
LECHO MÓVIL PARA COMBINAR DESESTABILIZACIÓN
ELECTROSTÁTICA Y MEDIO COALESCEDOR**

Tutores Académicos: Prof. José Sorrentino, Profa. María Rodríguez. Tesis.

Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química.

Año 2015, 74 p.

Palabras Claves: Emulsión W/O, fosa de producción, lecho fluidizado, separación, sistema continuo.

Resumen. En el presente trabajo se evalúa el desempeño de un sistema en continuo que lleva a cabo la desestabilización de una emulsión W/O utilizando de muestra el material de fosa Acema-100 mezclado con aros de vidrio como medio coalescedor en forma de lecho fluidizado y aplicando campo eléctrico de corriente directa en una celda de electrodos planos. La desestabilización realizada no contempla la incorporación de un demulsificante ni cambios de temperatura en la alimentación. Al estudiar la fluidez de la suspensión formada por el material de fosa y el medio coalescedor se estableció una relación máxima del 2% v/v de medio coalescedor-material de fosa, la cual permite la fluidez de este material en el sistema continuo. Para asegurar la homogenización de la suspensión (medio coalescedor-fosa) se evaluaron fluidos que permitieran observar la interacción de estos bajo agitación. Considerando la posibilidad de mejorar la fluidez del sistema se trabajó con diferentes presiones, atmosférica y vacío, resultando más favorable la primera. Se establecieron condiciones de alimentación para mantener la relación fosa/medio coalescedor en el sistema de tratamiento. Con la finalidad de establecer las condiciones de diseño de las variables a estudiar que favorecieran la desestabilización (voltaje aplicado, tiempo de residencia, cantidad de medio coalescedor) se realizaron experiencias siguiendo un patrón de diseño factorial 2^k , estas pruebas fueron realizadas evaluando la repetibilidad y la reproducibilidad de los resultados. La cantidad de medio coalescedor y el número de celdas en el sistema presentaron una fuerte interacción debido a que ambas afectan el tiempo de residencia, se observó cómo al aumentar la cantidad de celdas se genera un efecto desfavorable contrario a un aumento en la cantidad de medio coalescedor lo cual ayuda a la desestabilización. Una vez realizadas las experiencias se aprecia un desplazamiento en la curva de la distribución acumulada del diámetro de gotas hacia tamaños mayores y al comparar con trabajos previos, logrando obtener un factor de desestabilización máximo de 8,4, operando el sistema a 3kV, 2%v/v de aros de vidrio como medio coalescedor en lecho fluidizado y una sola celda. Con el estudio se reafirma la posibilidad de desestabilizar la emulsión W/O sin el uso de demulsificante.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
ÍNDICE DE TABLAS.....	XIV
INTRODUCCIÓN	19
CAPÍTULO I.....	20
FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN	20
I.2. ANTECEDENTES.....	22
I.3. OBJETIVOS	28
CAPÍTULO II	30
MARCO TEÓRICO	30
II.1. FOSA DE PRODUCCIÓN:.....	30
II.2. EMULSIÓN:.....	30
II.3. ELECTROCOALESCENCIA	32
II.4. MEDIO COALESCEDOR.....	35
II.5. SUSPENSIÓN	36
II.6. FLUIDODINÁMICA	37
II.7. MICROSCOPIA ÓPTICA	40
II.8. FACTOR DE DESESTABILIZACIÓN (FD)	41
II.9. DISEÑO FACTORIAL 2 ^k	42
CAPÍTULO III.....	45
MARCO METODOLÓGICO	45
III.1. COMPARAR DIFERENTES PROPORCIONES DE MEDIO COALESCEDOR Y FOSA DE PRODUCCIÓN QUE ASEGUREN EL FLUJO EN EL SISTEMA DE TRATAMIENTO.....	45
III.2. ESTUDIAR LA FLUIDODINÁMICA DE LA SUSPENSIÓN FORMADA POR EL MEDIO COALESCEDOR Y EL MATERIAL DE FOSA.	47

III.3. ESTUDIAR SISTEMAS SIMPLES DE IMPULSIÓN PARA TRANSPORTAR LA MEZCLA DE MEDIO COALESCEDOR-MATERIAL DE FOSA A LA CELDA DE APLICACIÓN DE CAMPO ELÉCTRICO.	52
III.4. EVALUAR EL EFECTO SOBRE LA DESESTABILIZACIÓN DE LA EMULSIÓN W/O CON MEDIO COALESCEDOR FLUIDIZADO, LAS PRINCIPALES VARIABLES APLICANDO EL MÉTODO DE DISEÑO EXPERIMENTAL 2^k , DETERMINANDO EL FACTOR DE DESESTABILIZACIÓN POR MEDIO DE LA MICROSCOPIA ÓPTICA.	55
CAPÍTULO IV	59
RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	59
IV.1. COMPARAR DIFERENTES PROPORCIONES DE MEDIO COALESCEDOR Y FOSA DE PRODUCCIÓN QUE ASEGUREN EL FLUJO EN EL SISTEMA DE TRATAMIENTO.....	59
IV.2. ESTUDIAR LA FLUIDODINÁMICA DE LA SUSPENSIÓN FORMADA POR EL MEDIO COALESCEDOR Y EL MATERIAL DE FOSA	60
IV.3. ESTUDIAR SISTEMAS SIMPLES DE IMPULSIÓN PARA TRANSPORTAR LA MEZCLA DE MEDIO COALESCEDOR-MATERIAL DE FOSA A LA CELDA DE APLICACIÓN DE CAMPO ELÉCTRICO.	64
IV.4. EVALUAR EL EFECTO SOBRE LA DESESTABILIZACIÓN DE LA EMULSIÓN W/O CON MEDIO COALESCEDOR FLUIDIZADO, LAS PRINCIPALES VARIABLES APLICANDO EL MÉTODO DE DISEÑO EXPERIMENTAL 2^k , DETERMINANDO EL FACTOR DE DESESTABILIZACIÓN POR MEDIO DE LA MICROSCOPIA ÓPTICA.	66
CAPÍTULO V	74
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	74
CAPÍTULO VI	76
BIBLIOGRAFÍA	76

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1: Columna empacada con medio coalescedor “Red Rock”. (Renouf, Kurucz, & Soveran, 2007)	24
Figura N° 2: Efecto de la longitud de la columna en la cantidad de agua separada sin añadir demulsificante. (Renouf, Kurucz, & Soveran, 2007).....	24
Figura N° 3: Celda de aplicación de campo eléctrico con esferas de polietileno como medio coalescedor (Rodríguez, 2013).....	25
Figura N° 4: Porcentaje de separación de agua. Acema 100. Campo DC. Con y sin medio coalescedor. (Rodríguez, 2013).....	26
Figura N° 5: Secuencia de una coalescencia completa de una gota de $984\pm 2\mu\text{m}$ de diámetro bajo un campo eléctrico de 116 V/mm. (Mousavi, Shariaty-Niassar, Bahmanyar, & Moosavian, 2013).....	27
Figura N° 6: Secuencia de una coalescencia parcial de una gota de $1196\pm 4\mu\text{m}$ de diámetro bajo un campo eléctrico de 256 V/mm. (Mousavi, Shariaty-Niassar, Bahmanyar, & Moosavian, 2013).....	28
Figura N° 7: Diferente grado de deformación de gotas del mismo diámetro ($984\pm 2\mu\text{m}$) bajo el efecto de diferentes campos eléctricos.	28
Figura N° 8: Fosas de producción Acema-100. (IDEA, 2012).	30
Figura N° 9: Efecto del drenaje de la película sobre la concentración de surfactantes naturales. (Marfisi y Salager, 2004).....	34
Figura N° 10: Definición de ángulo de contacto en un sistema ideal sólido/líquido/líquido.	36
Figura N° 11: Distribución acumulada de tamaño de partículas (Rodríguez, 2013). .	41
Figura N° 12: Representación geométrica del cálculo de los efectos principales y de interacción en un diseño 2^k . (UNAD)	44
Figura N° 13: Esquema digital del sistema formado por el tanque de mezclado y rebose con celda de campo eléctrico. (Elaboración propia)	45
Figura N° 14: Válvula incorporada al sistema a la salida de la celda.	46

Figura N° 15: (a) Viscosímetro de Brookfield LVF (manual del Viscosímetro Brookfield, Ospino S. (2011)), (b) Agujas del viscosímetro	48
Figura N° 16: Montaje para la observación de la fluidodinámica del medio coalescedor.	49
Figura N° 17: Agitadores a utilizar en el montaje, izquierda acero, derecha vidrio. (Elaboración propia).....	50
Figura N° 18: Cámara que será utilizada en el montaje (Olympus 1030SW)	50
Figura N° 19: Esquema digital de las áreas que se presentan al aplicar la agitación de la muestra. (Elaboración propia).....	51
Figura N° 20: Esquema del montaje con puntos de obtención de muestras. (Elaboración propia)	53
Figura N° 21: Esquema digital del montaje con impulsión por vacío. (Elaboración propia).....	54
Figura N° 22: Esquema del tanque de mezclado y rebose. (Elaboración propia).....	55
Figura N° 23: (a) Celda plana de campo eléctrico acoplada al tanque de alimentación, (b) Celda plana de campo eléctrico a ser acoplada, para aumentar el tiempo de residencia.....	56
Figura N° 24: Esquema digital del montaje para evaluar diversos arreglos del sistema. (Elaboración propia).....	56
Figura N° 25: Esquema del montaje variando el tiempo de residencia aplicando campo magnético con dos celdas en serie. (Elaboración propia)	57
Figura N° 26: Medio coalescedor depositado en el fondo de los recipientes (de izquierda a derecha: glucosa, glicerina, aceite de motor, aceite de maíz).	62
Figura N° 27: Recipiente para el estudio de la fluidodinámica con la mezcla de glicerina:glucosa y medio coalescedor.....	63
Figura N° 28: Proceso de agitación con la propela de hélice marina a 700 rpm, para 4,5ml de medio coalescedor.....	64
Figura N° 29: Gráfica comparativa de los factores de desestabilización obtenidos en las distintas experiencias realizadas. AV: Alto voltaje; BV: Bajo voltaje; 1C: Celda	

única; 2C: Celdas en paralelo; MM: Mucho medio; PC: Poco medio; OP: Operador.	66
Figura N° 30: Distribución de la varianza en variables e interacciones. La línea discontinua representa el valor mínimo de efecto establecido por la distribución de Fisher = 4,15. A: Voltaje aplicado; B: Tiempo de residencia; C: Cantidad de medio coalescedor.....	67
Figura N° 31: Efecto de las variables principales obtenido en el análisis de varianza.	68
Figura N° 32: Comparación de los FD obtenidos en pruebas con una, dos y cuatro celdas (dos celdas con recicló) con mucho medio coalescedor.	70
Figura N° 33: Distribución del tamaño de gotas de agua en la emulsión de Acema-100 antes (Original) y después de su tratamiento.	71
Figura N° 34: Fotos tomadas con el microscopio óptico a 20X, para determinar el FD de la emulsión W/O. Superior Acema-100 sin tratamiento, inferior fosa tratada con alto voltaje, mucho medio y una celda.....	72
Figura N° 35: Foto de separación lograda bajo las condiciones más favorables de este trabajo (AV-1C-MM).....	73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1: Características de las muestras antes y después del tratamiento	23
Tabla N° 2: Significado del factor de desestabilización. <i>FD</i>	42
Tabla N° 3: Signos para el diseño 2^k ; $k \leq 6$ y notación de Yates. (UNAD).....	43
Tabla N° 4: Relación de medio coalescedor en el tanque de alimentación de 210ml.59	
Tabla N° 5: Medición de la masa del medio coalescedor de los volúmenes establecidos	60
Tabla N° 6: Propiedades calculadas de los fluidos en estudio (25°C).....	61
Tabla N° 7: Comparación de las propiedades de los fluidos Acema-100 y la mezcla Glicerina/Glucosa (2:1).....	63
Tabla N° 8: Velocidades que aseguran la homogenización de la suspensión (expresada en valores del dial del motor utilizado).....	64
Tabla N° 9: Volúmenes de medio coalescedor y tiempo de recolección para muestra de 5ml.	65
Tabla N° 10: Comparación de casos con tiempo de residencia similar y variación en las variables B (cantidad de celdas) y C (proporción de medio coalescedor en material de fosa).....	68

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene como finalidad el evaluar un sistema de tratamiento en continuo formado por una celda de aplicación de campo eléctrico DC, la cual permita la incorporación de un lecho móvil, con el fin de combinar la separación electrostática y el medio coalescedor para la desestabilización de gotas de agua presentes en la emulsión agua-crudo (W/O) de la fosa de producción Acema-100.

Con el fin de alcanzar este objetivo, se inició el estudio determinando la cantidad máxima de medio coalescedor para la relación medio coalescedor/fosa que asegurara la fluidez de la suspensión creada por estos dos materiales a través de todo el sistema, de tal manera de no crear algún tipo de obstrucción. Posteriormente se experimentó con diferentes fluidos traslucidos de modo de seleccionar el que permitiera ser utilizado como fluido alternativo en pruebas de fluidización, con el fin de poder observar el comportamiento de la suspensión creada; para ello se consideró como propiedad principal para la selección, la similitud con la viscosidad del material de fosa Acema-100. Se estudió además la utilización de dos sistemas de impulsión, por gravedad y al vacío, buscando optimizar el paso de la suspensión creada. Luego se realizaron las pruebas establecidas por el diseño experimental factorial 2^5 de forma aleatoria, analizando por microscopia la muestra antes y después de aplicar el campo eléctrico; y observación de separación de fases luego de aplicar centrifugación. Se aplicó el tratamiento estadístico a los resultados obtenidos y se determinaron las variables más influyentes del estudio.

Este trabajo consta de un primer capítulo donde se realiza el planteamiento del problema, una revisión de antecedentes y se establecen los objetivos. En el segundo capítulo se resumen los conceptos asociados al proceso de separación electrostática, medio coalescedor, fluidodinámica y suspensión. La metodología desarrollada se indica en el tercer capítulo, para posteriormente en el cuarto capítulo presentar los resultados obtenidos con su discusión. Para finalizar en el quinto capítulo se establecen las conclusiones que se derivan de los resultados obtenidos así como una serie de recomendaciones que mejorarían futuras experiencias en esta línea de investigación.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

I.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La industria petrolera a nivel global genera gran cantidad de recursos financieros; sin embargo, de igual forma genera cantidades inmensas de desechos, en particular a partir de las actividades de explotación y producción, lo cual provoca contaminación al medio ambiente y pérdidas de material que puede ser procesado. Entre los desechos así producidos están aquellos depositados en las conocidas fosas de producción, donde se encuentran mezclas de difícil separación, entre ellas las emulsiones de agua en aceite (W/O); la fase continua de esta mezcla tiene un valor agregado importante, pero no puede ser aprovechada sin tratamiento previo, ya que el contenido de agua origina distintos problemas operacionales (corrosión, alto gasto en bombeo).

Según el Informe Anual de PDVSA 2014, existen 7425 fosas que aún no se han saneado, por lo que es posible aprovechar la fase oleosa de este pasivo ambiental luego de realizar la deshidratación del mismo. A nivel industrial se aplican distintos métodos para tal fin como lo son la separación electrostática (donde la emulsión es desestabilizada aplicando un campo eléctrico) y la separación por coalescencia (donde la desestabilización de la emulsión se lleva a cabo mediante el uso de materiales que facilitan la unión de las partículas de la fase dispersa de la emulsión). Generalmente se emplea la combinación de la separación electrostática junto al uso de sustancias químicas (demulsificante) alterando previamente la emulsión con la aplicación de calor, lo cual implica altos costos.

Con el fin de recuperar la fase oleosa presente en la fosa de producción, se plantea la desestabilización de la emulsión W/O empleando la combinación de separación electrostática y medio coalescedor para así lograr una deshidratación que disminuya los costos de los métodos aplicados actualmente.

Estudios realizados en el Laboratorio de Separaciones Mecánicas de la UCV sobre esta problemática, indican que la sinergia entre estos métodos de desestabilización es positiva cuando se trabaja con un lecho fijo de medio coalescedor; sin embargo, se presenta un cambio en el rendimiento de la desestabilización a medida que transcurre el tiempo del tratamiento, el cual es cuantificado a partir del factor de desestabilización (FD). Es por ello que se plantea realizar estudios de la fluidización del medio coalescedor en este sistema de tratamiento. Para esto es de gran importancia estudiar la fluidodinámica de la suspensión formada por la emulsión y el medio coalescedor a fin de llevar a cabo la separación electrostática en un tiempo determinado, con un alto porcentaje de coalescencia, al garantizar la fluidez de la mezcla (emulsión W/O-medio coalescedor) de manera continua por el sistema.

Por lo tanto, este Trabajo Especial de Grado propone seguir con esta línea de investigación, al evaluar un sistema de tratamiento que lleve a cabo la desestabilización de la emulsión W/O con campo eléctrico DC en forma continua, estableciendo condiciones óptimas de: tiempo de residencia, voltaje DC y cantidad de medio coalescedor para obtener un mejor factor de desestabilización y, en consecuencia aumentar la separación de las fases, sin el uso de demulsificantes en el proceso.

I.2. ANTECEDENTES

En toda investigación es de gran importancia considerar los trabajos y hallazgos que se han realizado anteriormente en relación al tema, es por ello que se toma como punto de partida las bases establecidas por los trabajos incluidos en la investigación de Renouf, Kurucz, y Soveran (2007) quienes resaltan que el tiempo de residencia de la emulsión en la columna coalescedora juega un papel de gran importancia en la desestabilización ya que mejora la coalescencia al aumentar la longitud de la columna; esto está relacionado con el tiempo de residencia de la emulsión ante el tratamiento y con la cantidad de medio coalescedor empleado. Es importante tomar en cuenta los comentarios indicados por Rodríguez M. (2013) donde se fijaron métodos y procedimientos para el estudio y evaluación de la desestabilización de emulsiones. En este trabajo, se realizaron las primeras pruebas de aplicación de campo eléctrico para generar la electrocoalescencia de las gotas de agua, obteniendo resultados que ayudaron a seleccionar la geometría de celda, tipo de corriente, intervalo de voltaje y tiempo de residencia apropiados para este proceso. El estudio incluye en el proceso, el uso de medio coalescedor en lecho fijo, determinando el tipo de material (hidrofilico/hidrofóbico) para el lecho que favorece la desestabilización de la emulsión y, en conclusión, marcó un punto de inicio para el presente trabajo. El estudio realizado por S. H. Mousavi, M. Shariaty-Niassar, H. Bahmanyar, M. A. Moosavian. (2013) menciona que se pueden generar gotas de menor tamaño al aumentar el voltaje aplicado y, en consecuencia, estabilizar la emulsión. Reducir el voltaje no solo evitaría el efecto mencionado por Mousavi, también disminuiría los costos de operación.

La investigación del efecto del medio coalescedor como un lecho móvil que fluye a través de un campo eléctrico no ha sido documentada o estudiada a nivel experimental, por lo tanto el estudio de la hidrodinámica de la suspensión formada por la emulsión y el medio coalescedor plantearía una innovación en el área. A continuación se presentan en más detalle los trabajos mencionados.

I.2.1 G. Renouf, L. Kurucz, D. Soveran (2007). “Produced Fluids Separation Using a Coalescer Column”.

En su investigación aplicaron el uso de un medio coalescedor en lecho fijo a lo largo de una tubería que transporta la emulsión desde un tanque (el cual es precalentado entre 60 - 70°C, y donde se agregó un demulsificante en diferentes concentraciones), hasta otro tanque donde las muestras quedaban en reposo por 4 horas para luego ser analizadas aplicando microscopía óptica. En la Tabla N° 1 se presentan las composiciones y viscosidad de las fosas tratadas en este estudio.

Tabla N° 1: Características de las muestras antes y después del tratamiento

Muestra	BS&W(% Volumen)		Viscosidad (mPa*s)			
	Agua	Sólidos	20°C		40°C	
			Antes	después	antes	después
Sitio I	10.5	0,3	13400	11600	1900	368
Sitio II	19	0,3	10700	7440	1740	300

El medio coalescedor fue seleccionado luego de probar con diversos materiales como polipropileno, fibra de vidrio, carbón, arena, roca magmática y “Zorball”, un material absorbente de crudo. Siendo Red Rock el mejor, debido a que mantenía su mojabilidad en agua a lo largo del proceso. El medio empleado fue:

- Red rock, 2 - 4 mm”, con una porosidad de 0.556
- Red rock, 4 - 5.6 mm”, con una porosidad de 0.573

Emplearon una columna coalescedora, formada por tubería rellena con el medio coalescedor, tal como se puede observar en la Figura N° 1. Obtuvieron resultados exitosos en las 24 pruebas realizadas mejorando la extracción del agua en un promedio de 38%, esto les llevó a concluir que, al aplicar la columna coalescedora podían disminuir la temperatura y concentración del demulsificante desde 250ppm hasta 70ppm lo cual podría generar un ahorro de hasta 1.100.000\$ y 300.000\$ anuales para el Sitio I y II respectivamente. De igual forma concluyen que el uso de la columna coalescedora aceleró el proceso de separación entre un 21 y 80%.



Figura N° 1: Columna empacada con medio coalescedor “Red Rock”. (Renouf, Kurucz, & Soveran, 2007)

Otra de las variables estudiadas fue la longitud de la columna, realizaron cuatro pruebas instalando columnas en serie logrando una variación desde 12 hasta 48 pulgadas de longitud (0,30 m y 1,22 m respectivamente) para una relación L/D entre 6 a 24 manteniendo un flujo constante aumentando así el tiempo de residencia en el sistema coalescedor.

En la Figura N° 2 se puede observar como al aumentar la longitud de la columna mejora el proceso de extracción del agua en la emulsión, de 2 a 6 %, pero de igual manera resaltan que la caída de presión aumenta.

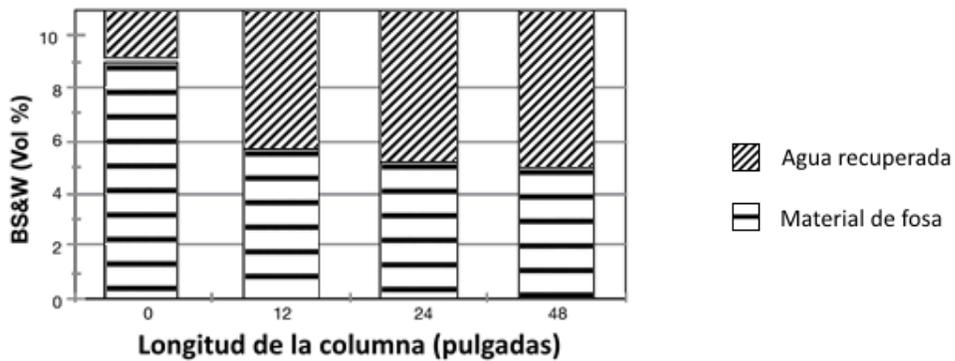


Figura N° 2: Efecto de la longitud de la columna en la cantidad de agua separada sin añadir demulsificante. (Renouf, Kurucz, & Soveran, 2007)

I.2.2 Rodríguez R. María A. (2013). “Desestabilización electrostática de emulsiones en fosas de producción”.

Realizó el diseño y montaje de un sistema con calentamiento y aplicación de campo eléctrico a la vez que evaluó el efecto desestabilizador de variables como: tipo de corriente, voltaje, tipo de celda, y tiempo de residencia, en diferentes materiales de fosa a igual condición de viscosidad. Luego de realizar la caracterización de las muestras (densidad, viscosidad, contenido de agua, análisis SARA, conductividad de la fase acuosa) efectuó pruebas siguiendo el modelo planteado por el diseño factorial 2^4 para así determinar los efectos más resaltantes al modificar las variables en estudio, mediante la cuantificación de la desestabilización de la emulsión al analizar el cambio en el tamaño de las gotas, a través del Factor de desestabilización (FD).

La mayor cantidad de agua separada para la fosa Acema-100 se alcanzó en la prueba realizada con una celda plana al aplicar un campo de corriente DC de alto voltaje en un tiempo de residencia bajo, alcanzando un 25.95% de agua recuperada luego de aplicar fuerza centrífuga a las muestras.

En esta investigación se incluyó la incorporación de un medio coalescedor en combinación con la aplicación de un campo eléctrico como sistema de tratamiento para separar la emulsión W/O, tal como se muestra en la Figura N° 3.

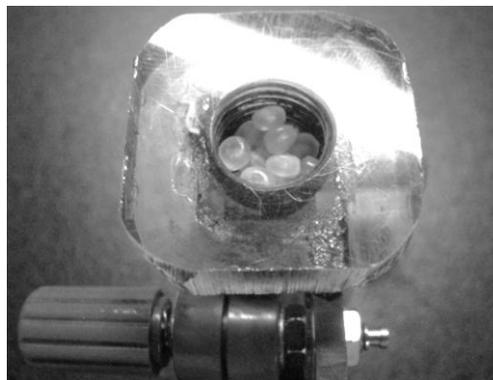


Figura N° 3: Celda de aplicación de campo eléctrico con esferas de polietileno como medio coalescedor (Rodríguez, 2013).

Se realizó la selección del medio coalescedor que favoreciera en mayor grado la desestabilización de la emulsión, considerando diferentes materiales hidrofóbicos

(polietileno, cáscaras de maní) e hidrofílicos (anillos de vidrio, esferas de vidrio) resultando con mayor eficiencia el segundo con anillos de vidrio, tal como se puede observar en la Figura N° 4. La celda empleada estaba formada por dos electrodos planos de cobre y un volumen interno de 4 cm³.

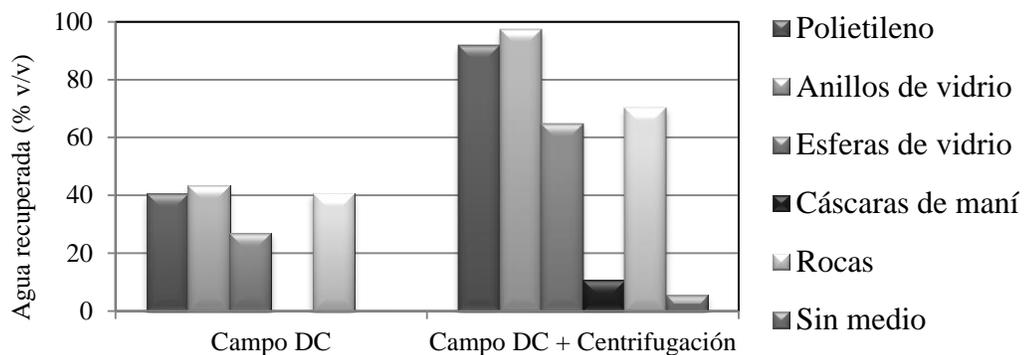


Figura N° 4: Porcentaje de separación de agua. Acema 100. Campo DC. Con y sin medio coalescedor. (Rodríguez, 2013)

Destaca que en el sistema se genera un corto circuito debido al fenómeno de percolación, el cual es un factor de gran importancia a considerar para este trabajo de investigación. Finalmente, Rodríguez resalta la importancia que tiene la viscosidad de la emulsión en la desestabilización y posterior coalescencia de las gotas.

1.2.3 S. H. Mousavi, M. Shariaty-Niassar, H. Bahmanyar, M. A. Moosavian. (2013). “Electro-Coalescence of an Aqueous Droplet at an Oil–Water Interface with an Investigation of Secondary Droplets Formation”.

En su investigación resaltan la importancia de los efectos relacionados con las diferentes fuerzas que intervienen en la coalescencia del medio disperso (agua destilada) en el medio continuo (aceite de girasol), enfocándose en la formación de gotas de menor tamaño al aplicar campos con mayor voltaje.

Las pruebas fueron realizadas aplicando un campo eléctrico de 1kV hasta 11kV con una placa de bronce pulido y por medio del uso de una celda de estudio elaborada con Polimetilmetacrilato (Perspex®), la cual permitió la fácil observación de las pruebas.

Estas fueron captadas mediante el uso de una cámara de alta velocidad (Photron FASTCAM SA5) a 20.000fps.

Resaltan la existencia de dos términos, coalescencia completa, como se observa en la Figura N° 5, y coalescencia parcial, Figura N° 6. Se puede observar como en la coalescencia completa, donde ocurre el contacto y unión entre una gota y la interface, no se forman gotas secundarias, por lo tanto este sería el efecto deseado para lograr una mayor desestabilización de la emulsión y separación del agua. Se puede apreciar cómo, al iniciar el campo eléctrico se forma un “cuello”, como lo denominan en esta investigación, a través del cual se inicia la coalescencia entre la interface y la gota. La fuerza del campo eléctrico es suficiente para hacer que la coalescencia sea completa, aumentando diámetro del “cuello” continuamente a medida que esta se lleva a cabo.

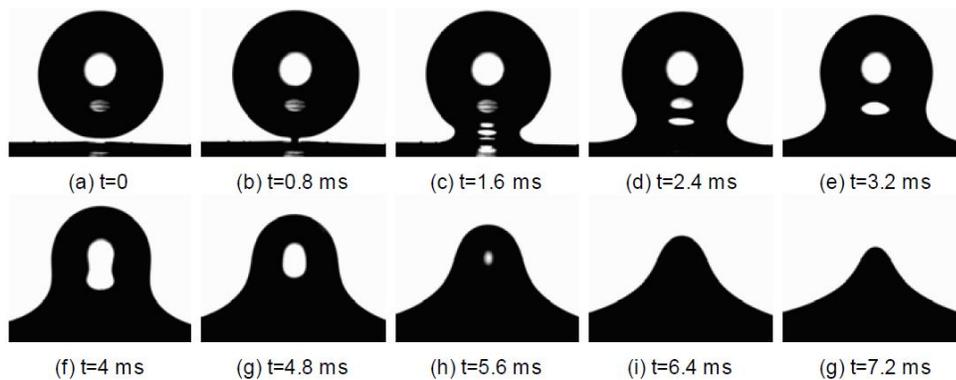


Figura N° 5: Secuencia de una coalescencia completa de una gota de $984\pm 2\mu\text{m}$ de diámetro bajo un campo eléctrico de 116 V/mm. (Mousavi, Shariaty-Niassar, Bahmanyar, & Moosavian, 2013)

A diferencia de la coalescencia completa, la coalescencia parcial tiene un efecto adverso al deseado en la desestabilización de emulsiones. Como se puede observar en la Figura N° 6, *S. H. Mousavi et al (2013)* lograron capturar el efecto que tuvo el aumentar el campo eléctrico desde 186 V/mm hasta 256 V/mm alterando el comportamiento del cuello en la coalescencia, el cual se forma más cerca de la gota que de la interface, absorbiendo parte de ella debido a la tensión superficial, pero en consecuencia al alto voltaje del campo eléctrico, la gota presenta una fuerza contraria a la coalescencia causado por las fuerzas de repulsión de la carga del campo y la carga inducida sobre la gota.

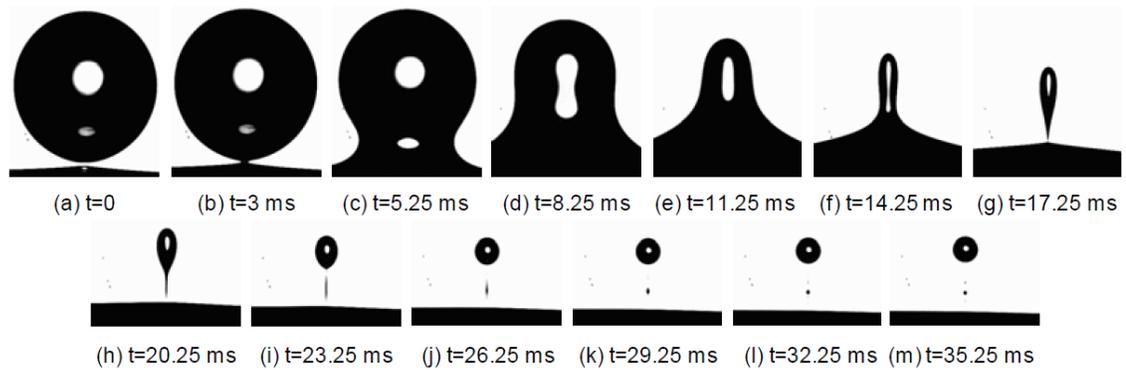


Figura N° 6: Secuencia de una coalescencia parcial de una gota de $1196 \pm 4 \mu\text{m}$ de diámetro bajo un campo eléctrico de 256 V/mm . (Mousavi, Shariaty-Niassar, Bahmanyar, & Moosavian, 2013)

En la Figura N° 7 se aprecia como al aumentar el campo eléctrico la deformación de la gota aumenta, generando el efecto cuello en (d) un 10% más que en (a). Es importante considerar al modificar el campo eléctrico, el rango de voltaje entre 116 y 373 V/mm que permita una eficiencia mayor en la desestabilización y no genere gotas de poco diámetro que son más difíciles de separar.

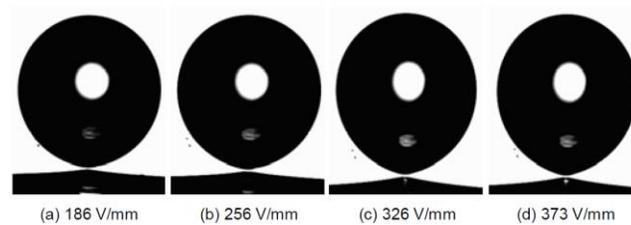


Figura N° 7: Diferente grado de deformación de gotas del mismo diámetro ($984 \pm 2 \mu\text{m}$) bajo el efecto de diferentes campos eléctricos.

(Mousavi, Shariaty-Niassar, Bahmanyar, & Moosavian, 2013)

I.3. OBJETIVOS

Luego de planteado el problema y de revisados los antecedentes relacionados con el tema a desarrollar, a continuación se presentan tanto el objetivo general como los objetivos específicos a cubrir con la realización del presente estudio.

I.3.1 Objetivo general

Evaluar las principales variables de un sistema continuo de desestabilización de emulsión W/O en lecho móvil para combinar separación electrostática y medio coalescedor en el tratamiento de la fosa de producción Acema-100.

I.3.2 Objetivos específicos

- (a) Comparar diferentes proporciones de medio coalescedor y fosa de producción que aseguren el flujo en el sistema de tratamiento.
- (b) Estudiar la fluidodinámica de la suspensión formada por el medio coalescedor y el material de fosa.
- (c) Estudiar sistemas simples de impulsión para transportar la mezcla de medio coalescedor-material de fosa a la celda de aplicación de campo eléctrico.
- (d) Evaluar el efecto que tienen, sobre la desestabilización de la emulsión con medio coalescedor fluidizado, el voltaje de corriente directa, tiempo de residencia y porcentaje de medio coalescedor aplicando el método de diseño experimental 2^k , determinando el factor de desestabilización por medio de la microscopia óptica.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

II.1. Fosa de producción:

Son aquellos depósitos que están situados en los alrededores de los taladros de perforación, donde se desvía y se almacena temporalmente el petróleo, agua y otros desechos propios del proceso de producción. En la Figura N° 8, se observa la fosa involucrada en el presente proyecto de investigación: Acema-100, la cual se encuentra ubicada en el distrito San Tomé, del estado Anzoátegui.



Figura N° 8: Fosas de producción Acema-100. (IDEA, 2012).

II.2. Emulsión:

Se define como un sistema heterogéneo en el cual están presentes dos fases líquidas inmiscibles; una de las fases está dispersa en forma de gotas y es, por lo general, un sistema termodinámicamente inestable.

Las emulsiones pueden ser estables debido a la presencia de agentes tensoactivos (surfactantes) absorbidos en la superficie de las gotas. Al considerar una fase aceite y una fase acuosa, las emulsiones con aceite como fase dispersa, se conocen como emulsiones de aceite en agua (O/W) y las emulsiones con agua como fase dispersa se conocen como emulsiones de agua en aceite (W/O).

II.2.1 Emulsiones agua-crudo (W/O)

En los campos petroleros las emulsiones de agua en crudo (W/O) son llamadas emulsiones directas (emulsiones normales). En estas emulsiones, la fase acuosa dispersa se refiere como agua y sedimento (A&S), estando constituida por agua salada, sólidos (arena, lodos, carbonatos, productos de corrosión y sólidos precipitados o disueltos) que, en ocasiones se le denomina Agua y Sedimento Básico (A&SB). (Marfisi y Salager, 2004).

II.2.2 Estabilidad de una emulsión W/O

Existe una serie de factores que ayudan a la estabilidad de la emulsión como, por ejemplo, la viscosidad del medio continuo afecta la velocidad de sedimentación de manera inversamente proporcional. La temperatura influye sobre la viscosidad y, al mismo tiempo, reduce la adsorción de surfactantes naturales en la interface agua-aceite, los cuales son componentes estabilizadores de la emulsión. Las fuerzas que afectan las gotas de agua suspendidas en el aceite, afectan con mayor intensidad al aumentar su diámetro, por lo tanto a menor tamaño mayor estabilidad. El pH y composición de la película interfacial afecta su comportamiento, la segunda puede facilitar que se lleven a cabo reacciones con los grupos hidrofílicos adsorbidos en ella y formar sales insolubles (Kimbley & Silberberg, 2001).

II.2.3 Fenómenos interfaciales que estabilizan una emulsión W/O

Fenómeno interfacial es aquel que se produce en una interfase, infiriéndole a la misma una carga eléctrica parcial que obstaculiza los procesos de desestabilización de emulsiones. Estos fenómenos dependen del movimiento de la emulsión y en función a esto se han clasificado como fenómenos interfaciales estáticos y dinámicos.

II.2.3.1 Fenómenos interfaciales estáticos

Son aquellos fenómenos presentes cuando la emulsión está sin movimiento. Entre ellos se encuentra la *repulsión entre partículas* la cual se genera por la carga superficial o

por el tamaño de las moléculas adsorbidas en la superficie. Esta repulsión puede ser debida a la repulsión electrostática o la repulsión estérica.

II.2.3.2 Fenómenos interfaciales dinámicos

Ocurren cuando se desplaza un fluido en la vecindad de una interfase, produciendo un arrastre de materia susceptible de modificar las condiciones físico-químicas cerca de la interfase o en la interfase misma, mediante los fenómenos de transporte. Como consecuencia se genera un gradiente de potencial (presión, tensión interfacial, potencial eléctrico), que en general tiende a oponerse al movimiento que lo origina (Ley de Lenz).

II.3. Electrocoalescencia

El proceso de electrocoalescencia es un proceso donde se aplica un campo eléctrico con el propósito principal de acelerar el acercamiento, contacto y fusión de las gotas de agua dispersas en una fase continua de baja permitividad incrementando su tamaño (coalescencia), lo cual acelera su velocidad de sedimentación. El proceso de electrocoalescencia depende básicamente de dos factores: (a) la fuerza atractiva entre dos gotas debida a su diferencia de potencial, y (b) la rotura dieléctrica de la película de fase continua entre dos gotas adyacentes.

II.3.1 Mecanismo de electrocoalescencia

El mecanismo para explicar la electrocoalescencia y la formación de cadenas (percolación: puente continuo de agua entre los electrodos) en dispersiones de agua-crudo, los cuales se ven influenciados por un cierto número de factores incluidos la viscosidad de la fase continua (crudo), el volumen de la fase dispersa (agua) y la fuerza del campo eléctrico aplicado (DC y AC), se puede definir básicamente en tres etapas.

Etapas 1: Acercamiento macroscópico de las gotas – Acción del campo eléctrico

La fuerza resultante entre dos gotas cargadas está dada por la Ley de Coulomb, según la Ecuación 1.

$$F = \frac{q_1 \cdot q_2}{4\pi\epsilon_0 x^2}$$

Ecuación 1

La dirección del movimiento depende de la polaridad de la carga y del campo eléctrico aplicado. Para una gota cargada por contacto directo con un electrodo, la fuerza resultante es inversamente proporcional a la constante dieléctrica del crudo; mientras que es proporcional al campo eléctrico aplicado y al radio de la gota al cuadrado. Para dos gotas polarizadas de igual tamaño la fuerza de atracción dipolar es proporcional al diámetro de la gota e inversamente proporcional a la distancia que las separa.

Otro fenómeno es la distorsión o deformación de las gotas, donde dependen del patrón de flujo de la emulsión alrededor de ellas y de las propiedades físicas de la fase continua como la densidad, la viscosidad, la tensión interfacial, la velocidad de flujo y el tamaño de gotas de la fase dispersa. Muchas veces esto puede llevar a una ruptura de las gotas, lo cual es desfavorable para la coalescencia (Eow y Ghadiri, 2001).

Etapa 2: Adelgazamiento/drenado de la película

Cuando la distancia entre las gotas es suficientemente pequeña, las fuerzas electrostáticas colocan a las gotas en contacto produciendo una deformación de su superficie y se genera una película inter-gota, lo que da inicio a la segunda etapa del proceso el cual crea un adelgazamiento o drenado de película, donde están involucrados fenómenos interfaciales relacionados con la presencia de surfactantes adsorbidos. Esta es la etapa controlante del proceso.

Cuando dos gotas de la 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, tal como se puede observar en la Figura N° 9.

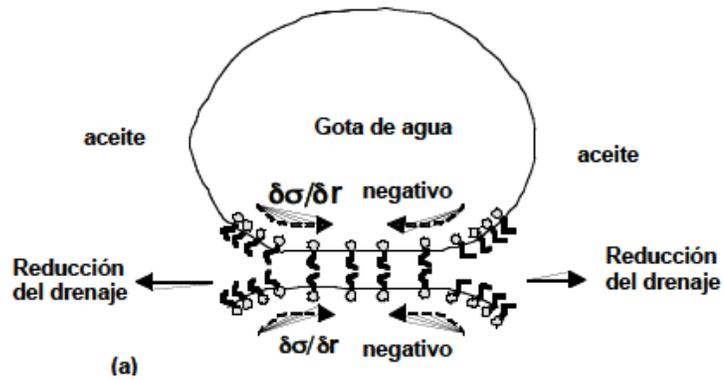


Figura N° 9: Efecto del drenaje de la película sobre la concentración de surfactantes naturales.
(Marfisi y Salager, 2004).

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.

Etapas 3: Formación de cadenas y coalescencia

Las cadenas de gotas se forman por el movimiento de las gotas individuales, debido a una diferencia de potencial entre las gotas como resultado de las cargas inducidas presentes en ellas. Las cadenas se alinean en la dirección de la máxima fuerza de campo y no siempre comienzan o terminan en los electrodos y pueden no estar en contacto con ellos.

II.3.2 Fuerzas eléctricas.

Son fuerzas de corto alcance que inducen la interacción dinámica entre las gotas de agua y el campo eléctrico aplicado, las cuales son:

La **electroforesis**, es una fuerza atractiva o repulsiva establecida en un campo eléctrico uniforme entre las gotas cargadas y los electrodos. Su principio físico se basa en la diferencia de carga entre la superficie de las gotas y el fluido circundante. Un campo eléctrico aplicado actúa en la densidad de carga, causando que la gota, el medio circundante o ambos se muevan.

La **dielectroforésis** es una fuerza de atracción que se genera en un campo eléctrico no uniforme entre gotas que tienen una permisividad diferente a la permisividad del medio líquido en donde están contenidas.

La fuerza por **atracción dipolar** causa una atracción mutua entre las gotas cercanas debido a la interacción de los dipolos inducidos por el campo eléctrico, surge como consecuencia de la alta conductividad del agua. Algunos investigadores consideran que la primera fuerza de electrocoalescencia, independiente del tipo de campo aplicado, es por efecto de una interacción dipolo-dipolo (Eow y Ghadiri, 2001).

La **polarización de las gotas**, consiste en la deformación de las gotas causadas por la carga opuesta en sus dos extremos y por otras tensiones eléctricas. Estos efectos podrían competir con la fuerza de tensión interfacial, que normalmente mantiene las gotas de agua como unas esferas, causando una deformación de las gotas en la dirección del campo eléctrico, tomando la forma de un elipsoide alargado de excentricidad. Bajo este efecto, las gotas se deformarán hasta un punto crítico en donde son inestables y se romperán.

II.4. Medio coalescedor

Es un medio o material que favorece la coalescencia entre gotas y el crecimiento de estas dentro de la fase continua. Este medio se caracteriza por tener una mojabilidad particular.

La **mojabilidad** se define como la preferencia que tiene el sólido hacia la fase acuosa u oleosa. Cuando el sólido es afín al agua es *hidrofilico*, mientras que cuando el sólido es afín a la fase oleosa es *hidrofóbico*; también existen casos en los que no hay una preferencia definida del sólido por alguno de los fluidos y se dice que es sólido es de mojabilidad *intermedia* (Anderson, 1986).

II.4.1 Mojabilidad de un sistema ideal sólido/líquido/líquido y ángulo de contacto

La mojabilidad se interpreta en términos del ángulo de contacto θ , el cual es un reflejo de la energía libre superficial de la fase sólida, pudiéndose distinguir superficies de baja energía y de alta energía (Serrano, 2002).

Cuando una gota de agua entra en contacto con una superficie sólida sumergida en aceite, la interfase W/O intercepta a la superficie sólida con un ángulo de contacto θ , medido a través de la fase acuosa entre la superficie sólida y la recta tangente a la interfase en la línea de contacto, tal como se puede apreciar en la Figura N° 10: .

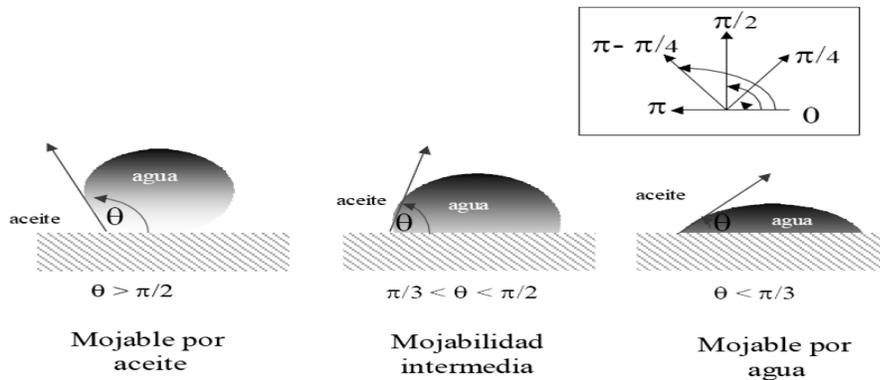


Figura N° 10: Definición de ángulo de contacto en un sistema ideal sólido/líquido/líquido. (Carey, 1992).

II.5. Suspensión

Esta se define como un sistema multifásico el cual está compuesto por una fase dispersa (sólida o líquida) contenida en una fase continua (gaseosa o líquida), inmisible con la fase dispersa, donde se puede clasificar la calidad de la suspensión según la ubicación de la fase dispersa: (1) en el fondo, ó (2) en suspensión completa u homogénea. Al estudiar la fluidodinámica de una suspensión se busca la velocidad de agitación que genere la suspensión completa, esta es un parámetro de diseño que tiene como condición que las partículas esten levantadas del fondo del recipiente y no deben entrar en contacto con el mismo por más de 2 segundos (Madhavi V. Sardeshpande and Vivek V. Ranade, 2012).

II.6. Fluidodinámica

Es una sub-disciplina de la mecánica de fluidos, donde la palabra *fluido* incluye al agua, al aire, a las suspensiones y también al petróleo y sus derivados. De igual forma, la palabra *dinámica* incluye el movimiento junto a las fuerzas causantes del mismo.

El estudio de la dinámica de los fluidos ofrece una estructura sistemática basándose en leyes empíricas y semi-empíricas. Estas leyes envuelven propiedades de los fluidos como lo son: temperatura, presión, densidad y velocidad.

El flujo volumétrico definido como el momento en el cual una cantidad de volumen de fluido circula de un punto a otro dentro de un equipo o tubería en cierta cantidad de tiempo, es el parámetro más utilizado en fluidodinámica; aun cuando existen otros dos tipos de flujos, el flujo en peso y flujo másico.

II.6.1 Lecho

Un lecho consiste en una columna formada por partículas sólidas, a través de las cuales pasa un fluido (líquido o gas) el cual puede ser librado de algunas impurezas y sufre una caída de presión. Si el fluido se mueve a velocidades bajas a través del lecho no produce movimiento de las partículas, pero al ir incrementando gradualmente la velocidad llega un punto donde las partículas no permanecen estáticas sino que se levantan y agitan, dicho proceso recibe el nombre de fluidización.

II.6.2 Navier-Stokes

Describe el flujo por medio de la función del campo de velocidades en el tiempo en coordenadas cartesianas (en tres dimensiones). La Ecuación 2 es establecida por C. Navier y G. Stokes son el resultado de considerar la segunda ley de Newton, la ley de conservación de masa y la incompresibilidad de los fluidos.

$$\begin{cases} \text{div}(u) = 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \times \nabla_x u = -\nabla_x p + \nu \times \Delta u \end{cases} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde

$\text{div}(u) = 0$: representa la incompresibilidad del fluido.

u : es la velocidad de las partículas en el espacio x en cada tiempo t .

p : es la presión en el fluido.

II.6.3 Fluidización

La fluidización es un proceso en el cual una corriente de fluido (gaseoso o líquido) se utiliza para suspender partículas sólidas. Desde un punto de vista macroscópico, la fase sólida se comporta como un fluido, donde a medida que se incrementa la velocidad del mismo, se aumenta su caudal (si el área se mantiene constante). En este caso se pueden distinguir diferentes etapas en el lecho: lecho fijo, lecho pre-fluidizado, fluidización discontinua y lecho fluidizado.

II.6.4 Lecho fluidizado

Un lecho empieza a ser fluidizado cuando la velocidad del fluido que pasa por un lecho de sólidos granulares aumenta en forma gradual; en el proceso se encontrarán condiciones en las que la fuerza de arrastre del fluido, es decir, la caída de presión por el área de sección transversal del recipiente, será justamente igual al peso de los sólidos originando que las partículas se pongan en movimiento.

II.6.4.1 Características de un lecho fluidizado

El lecho fluidizado por estar compuesto por un material sólido suspendido en un fluido, se ve afectado por distintos factores característicos de cada uno por separado y, de igual manera, existen otros resultantes de la interacción entre ellos, alguno de estos factores son:

II.6.4.1.1 Fuerza gravitacional y flotabilidad

Las partículas que se encuentran inmersas en un fluido se ven afectadas por diversas fuerzas que alteran su comportamiento a medida que el lecho fluye o está en reposo. La fuerza gravitacional y la flotabilidad se encuentran directamente relacionadas con la densidad de la partícula y su volumen.

II.6.4.1.2 Fuerza de arrastre y sustentación

Son fuerzas que afectan a partículas sumergidas en un fluido en movimiento. Existen como respuesta a la velocidad relativa entre la partícula y el fluido a su alrededor. El arrastre, similar a la fuerza de roce, genera una resistencia al movimiento por medio de una fuerza en dirección contraria a la velocidad relativa de la partícula y el fluido. La sustentación provoca un movimiento en la dirección de la normal de la velocidad relativa de la partícula con el fluido, es el resultado de la diferencia de presión hidrodinámica en el flujo que circula por encima de la partícula.

II.6.4.1.3 Caída de presión

La fuerza de arrastre ejercida en una partícula en suspensión por el líquido en el lecho fluidizado es contrarrestada por la fuerza de gravedad y la flotabilidad, en donde el volumen de la partícula, su densidad y la densidad del líquido crean un balance que equilibra la fuerza de arrastre. Esto influye en el rozamiento entre las partículas y por la fricción ocasionada por las paredes del conducto, crean una caída de presión dinámica.

II.6.4.1.4 Velocidad de fluidización mínima

Es la mínima velocidad del líquido requerido para fluidizar las partículas sólidas presentes en el lecho. Esta velocidad define el límite bajo de una operación de lecho fluidizado, y representa una transición entre el lecho fijo y el lecho móvil. La velocidad de fluidización mínima es determinada experimentalmente por la relación de la caída de presión y la velocidad del líquido.

II.6.4.2 Velocidad Superficial

Es la velocidad del fluido que se mueve a través de una tubería, definida como la tasa de flujo volumétrico de ese fluido dividido por el área de la sección transversal. En flujos de una sola fase, es igual a la velocidad media del fluido. En flujos multifásicos, no es una velocidad físicamente real, sino que es un parámetro conveniente para el análisis.

II.6.4.3 Porosidad o fracción vacía de un lecho

Es la relación que existe entre el volumen de huecos del lecho y el volumen total del mismo, está depende de la esfericidad de la partícula (irregularidad superficial) y de su tamaño, donde dicha fracción de huecos disminuye a medida que la esfericidad aumenta.

II.7. Microscopía óptica

La microscopía es una técnica que combina el poder de magnificación de un microscopio con la capacidad de adquisición de imágenes con una cámara. Esto relaciona íntimamente la microscopía con las técnicas de análisis de imágenes, realizadas frecuentemente con la ayuda de un computador (Rodríguez, 2013).

II.7.1 Análisis de tamaño de gotas

Teóricamente, es posible definir el tamaño en términos de una característica geométrica o en términos de una propiedad física que depende del tamaño, pero es común referir el tamaño de la partícula a una dimensión de longitud (Rodríguez, 2013).

Sin embargo, un sistema de gotas está constituido por unidades elementales que no poseen el mismo tamaño, por lo que se suele hablar de una distribución de tamaños de gotas, la cual es una propiedad intensiva de una dispersión. Ésta permite describir la geometría de una dispersión a través del análisis estadístico del conjunto de gotas (Rodríguez, 2013).

II.7.2 Distribución acumulada de tamaños de partículas

La 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° 11 (Sorrentino, 2002).

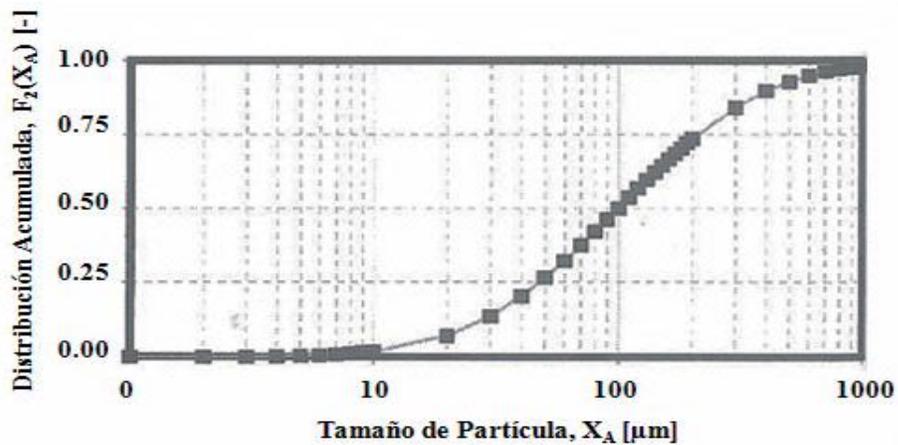


Figura N° 11: Distribución acumulada de tamaño de partículas (Rodríguez, 2013).

II.8. Factor de desestabilización (FD)

El análisis de tamaño de gotas para la fosa Acema-100 genera inquietudes sobre la importancia de evaluar el cambio en función del campo eléctrico, estableciendo la necesidad de calcular un parámetro que relacione el tamaño de gotas antes y después de aplicado el campo; por ello se define el *factor de desestabilización*, FD , el cual es calculado mediante la Ecuación 3 (Rodríguez, 2013).

$$FD = \frac{\Phi_w(X_A)}{\Phi_w^0(X_A)} = \frac{\phi_w * R_2(X_A \mu m)}{(\phi_w * R_2(X_A \mu m))^0} \quad \text{Ecuación 3}$$

Este se define como el cambio absoluto en el porcentaje de gotas con diámetro mayor a cierta cantidad de micrones con respecto a la muestra original, por lo que contabiliza

el cambio con respecto al porcentaje que representan dichas gotas en toda la muestra; sin embargo, esto tiene la desventaja de estar referido a la cantidad de agua que hay en la muestra, la cual tiene un error asociado al no considerar su espesor. Así que para dar una solución a esta variación, se considera la distribución acumulada de área como una distribución probabilística, lo cual implica que a pesar de que existe un porcentaje de agua variable en cada imagen, el porcentaje de gotas mayores a cierto diámetro en esa área, representa una tendencia que se debería repetir si se tomara nuevamente otra fotografía de la misma muestra.

Por lo tanto, se propone el factor de desestabilización FD calculado mediante la Ecuación 4.

$$FD = \frac{R_2(X_A \mu m)}{R_2^0(X_A \mu m)} \quad \text{Ecuación 4}$$

El factor de desestabilización indica según su valor, las condiciones presentadas en la Tabla N° 2

Tabla N° 2: Significado del factor de desestabilización. FD

< 1	1	>1
Disminuye la cantidad de agua en gotas grandes	No hay cambio	Aumenta la cantidad de agua en gotas grandes

II.9. Diseño factorial 2^k

Establece una alternativa para el análisis de la interacción de k factores en un proceso con el menor número requerido de experimentos. No requiere un software especializado para la construcción de una matriz de experimentos 2^k ni para realizar el estudio de los resultados. Cada factor se estudia en dos niveles y requiere una cantidad de 2^k experimentos para relacionar cada uno y, evaluar el efecto del nivel y la interacción entre los factores. Por ejemplo, un estudio del efecto de la temperatura y el uso de un catalizador (A o B) en una reacción química requiere 2^2 experimentos.

Los diseños 2^k cuentan con procedimientos especiales para simplificar los cálculos matemáticos y se pueden fraccionar para así evaluar la interacción de diferentes

variables por separado dada la naturaleza de sus combinaciones como se observa en la Tabla N° 3.

Tabla N° 3: Signos para el diseño 2^k ; $k \leq 6$ y notación de Yates. (UNAD)

Tratamiento	Yates	A	B	C	D	E	F
1	(1)	-	-	-	-	-	-
2	a	+	-	-	-	-	-
3	b	-	+	-	-	-	-
4	ab	+	+	-	-	-	-
5	c	-	-	+	-	-	-
6	ac	+	-	+	-	-	-
7	bc	-	+	+	-	-	-
8	abc	+	+	+	-	-	-
9	d	-	-	-	+	-	-
10	ad	+	-	-	+	-	-
11	bd	-	+	-	+	-	-
12	abd	+	+	-	+	-	-
13	cd	-	-	+	+	-	-
14	acd	+	-	+	+	-	-
15	bcd	-	+	+	+	-	-
16	abcd	+	+	+	+	-	-
17	e	-	-	-	-	+	-
18	ae	+	-	-	-	+	-
19	be	-	+	-	-	+	-
20	abe	+	+	-	-	+	-
21	ce	-	-	+	-	+	-
22	ace	+	-	+	-	+	-
23	bce	-	+	+	-	+	-
24	abce	+	+	+	-	+	-
25	de	-	-	-	+	+	-
26	ade	+	-	-	+	+	-
27	bde	-	+	-	+	+	-
28	abde	+	+	-	+	+	-
29	cde	-	-	+	+	+	-
30	acde	+	-	+	+	+	-
31	bcde	-	+	+	+	+	-
32	abcde	+	+	+	+	+	-

Tratamiento	Yates	A	B	C	D	E	F
33	f	-	-	-	-	-	+
34	af	+	-	-	-	-	+
35	bf	-	+	-	-	-	+
36	abf	+	+	-	-	-	+
37	cf	-	-	+	-	-	+
38	acf	+	-	+	-	-	+
39	bcf	-	+	+	-	-	+
40	abcf	+	+	+	-	-	+
41	df	-	-	-	+	-	+
42	adf	+	-	-	+	-	+
43	bdf	-	+	-	+	-	+
44	abdf	+	+	-	+	-	+
45	cdf	-	-	+	+	-	+
46	acdf	+	-	+	+	-	+
47	bcdf	-	+	+	+	-	+
48	abcdf	+	+	+	+	-	+
49	ef	-	-	-	-	+	+
50	aef	+	-	-	-	+	+
51	bef	-	+	-	-	+	+
52	abef	+	+	-	-	+	+
53	cef	-	-	+	-	+	+
54	acef	+	-	+	-	+	+
55	bcef	-	+	+	-	+	+
56	abcef	+	+	+	-	+	+
57	def	-	-	-	+	+	+
58	adef	+	-	-	+	+	+
59	bdef	-	+	-	+	+	+
60	abdef	+	+	-	+	+	+
61	cdef	-	-	+	+	+	+
62	acdef	+	-	+	+	+	+
63	bcdef	-	+	+	+	+	+
64	abcdef	+	+	+	+	+	+

Las Ecuaciones 5, 6 y 7 muestran cómo se determina el efecto individual de las variables A, B y C de un diseño factorial 2^3 .

$$A = \bar{y}_{A+} - \bar{y}_{A-} = \frac{1}{4n} [a + ab + ac + abc - (1) - b - c - bc] \quad \text{Ecuación 5}$$

$$B = \bar{y}_{B+} - \bar{y}_{B-} = \frac{1}{4n} [b + ab + bc + abc - (1) - a - c - ac] \quad \text{Ecuación 6}$$

$$C = \bar{y}_{C+} - \bar{y}_{C-} = \frac{1}{4n} [c + ac + bc + abc - (1) - a - b - ab] \quad \text{Ecuación 7}$$

Siguiendo los lineamientos del algoritmo de Yates, como se muestra en la Tabla N° 3, se obtiene el efecto de las variables entre sí para cada una de las variaciones del método como se muestra en la Figura N° 12.

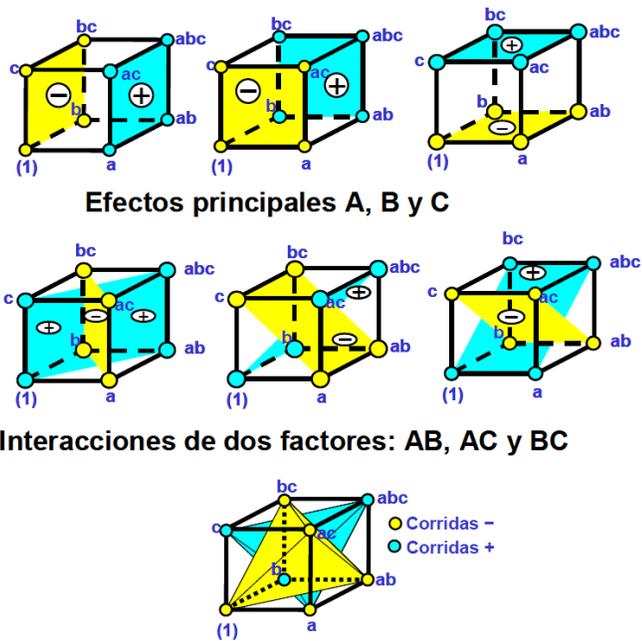


Figura N° 12: Representación geométrica del cálculo de los efectos principales y de interacción en un diseño 2^k. (UNAD)

Una vez realizados los experimentos requeridos se procede a evaluar el grado de interacción y la mejor combinación de los factores calculando la desviación estándar de los resultados obtenidos y aislando el efecto de los factores en sus dos niveles estudiados. (Ferré, 2015)

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

A continuación se presentan los pasos llevados a cabo para cumplir los objetivos planteados.

III.1. Comparar diferentes proporciones de medio coalescedor y fosa de producción que aseguren el flujo en el sistema de tratamiento.

La proporción de medio coalescedor y fosa debe garantizar su fluidez a lo largo del sistema, aspecto que se ve afectado por el paso del medio coalescedor por cada reducción de diámetro. El paso del tanque de mezclado a la celda de tratamiento donde el área transversal se reduce en un 7,3% puede ocasionar que el medio coalescedor se acumule y obstruya el paso del fluido impidiendo así la continuidad del sistema (ver Figura N° 13).



Figura N° 13: Esquema digital del sistema formado por el tanque de mezclado y rebose con celda de campo eléctrico. (Elaboración propia)

El proceso mediante el cual se estableció la proporción de medio coalescedor fue el siguiente:

1. Con la finalidad de evitar el vaciado del tanque de manera prematura se incorporó una válvula a la salida de la celda (ver Figura N° 14). Dicha válvula inicialmente se encuentra cerrada.

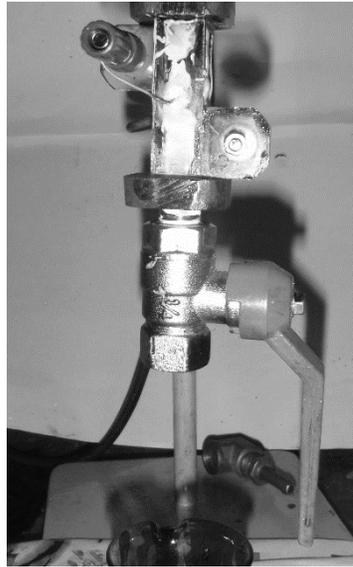


Figura N° 14: Válvula incorporada al sistema a la salida de la celda.

2. Fueron introducidos al tanque de mezclado diferentes cantidades de medio coalescedor iniciando con un mínimo de 5ml manteniendo el volumen del fluido de fosa en 200ml.
3. La mezcla fue agitada durante 1min con una velocidad que permitiera observar una porción del medio coalescedor en la superficie del fluido.
4. Trascurrido el tiempo se abrió la válvula para permitir el paso de la suspensión por el sistema y se midió el tiempo que tardó en vaciarse el tanque de mezclado. En los casos donde se observó que, aun sin estar vacío el tanque de alimentación, no fluye la mezcla por la salida de la válvula por más de 10 segundos se supuso que el sistema se había obstruido. Se realizó una repetición, manteniendo la proporción de medio coalescedor, aumentando la velocidad de agitación, para así comprobar que debía reducirse la cantidad de medio.
5. Una vez que el fluido ha circulado por el sistema se recupera el medio coalescedor por medio del uso de una malla con aberturas de 1mm. El medio

recuperado es lavado con desengrasante y kerosene para remover todo rastro del material de fosa y así almacenarlo o reutilizarlo en otras pruebas.

6. Una vez alcanzado el volumen máximo de medio coalescedor se cuantifico en % v/v y % m/m de medio coalescedor/fosa.

III.2. Estudiar la fluidodinámica de la suspensión formada por el medio coalescedor y el material de fosa.

Se realizó un montaje que permitiera observar la dinámica del medio coalescedor bajo agitación de un fluido con características similares al material de fosa Acema-100.

III.2.1 Selección del fluido

Los fluidos evaluados fueron considerados por presentar características que permiten observar el medio coalescedor al ser agitado.

III.2.1.1 Medida de la densidad

Utilizando un picnómetro PYREX de 25ml se determinó la densidad de la muestra de cada fluido estudiado usando la Ecuación 7. Inicialmente se determinó la masa del picnómetro vacío (mp_v) utilizando una balanza digital “OHAUS”, luego se introdujo la muestra al picnómetro y se midió su masa (mp_l). Este proceso se repitió tres veces para cada fluido estudiado a la temperatura del laboratorio (25 °C).

$$\rho_m = \frac{mp_l - mp_v}{v_p} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde

$\rho_m =$	Densidad de la mezcla. (g/ml)
$mp_l =$	Masa del picnómetro lleno. (g)
$mp_v =$	Masa del picnómetro vacío. (g)
$v_p =$	Volumen del picnómetro (25 ml)

III.2.1.2 Medida de la viscosidad

Para determinar la viscosidad, se utilizó el Viscosímetro de Brookfield LVF, el cual se muestra en la Figura N° 15 (a). Un factor a considerar para esta medida, es el número de aguja, esta mide el esfuerzo de rotación para vencer la resistencia viscosa por el movimiento producido. La viscosidad es proporcional a la velocidad de la aguja y se relaciona a la forma y tamaño, en la Figura N° 15 (b), se muestran los diferentes tipos de aguja.

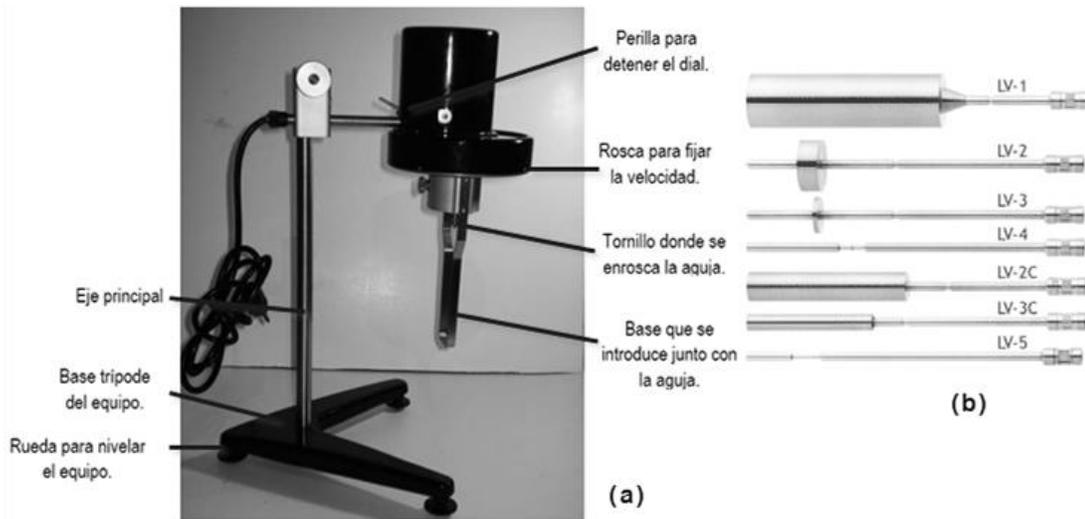


Figura N° 15: (a) Viscosímetro de Brookfield LVF (manual del Viscosímetro Brookfield, Ospino S. (2011)), (b) Agujas del viscosímetro

Utilizando los recursos facilitados en el Manual de uso del viscosímetro (Ospino, 2011), se especifica la Ecuación 9 para calcular la viscosidad aparente de la fosa.

$$Ld \times Ff = \mu \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde

Ld : Lectura del dial.

Ff : Factor de Finder.

μ : Viscosidad en centipoise (cP)

Una vez obtenidas las variables se procedió a comparar los resultados y a realizar la selección del fluido similar al material de fosa Acema-100.

III.2.2 Realización del montaje

El montaje establecido para observar la fluidodinámica de la suspensión es el siguiente:

III.2.2.1 Componentes del montaje

Como se puede observar en la Figura N° 16 se cuenta con un motor que permite mezclar el fluido y el medio coalescedor, a través del uso de un agitador (ver Figura N° 17), sostenido por un soporte universal. Para facilitar la visibilidad del medio coalescedor en el fluido se ilumina la muestra mediante el uso de una lámpara de luz LED blanca, la cual proporciona una luminiscencia que no emite calor por radiación.

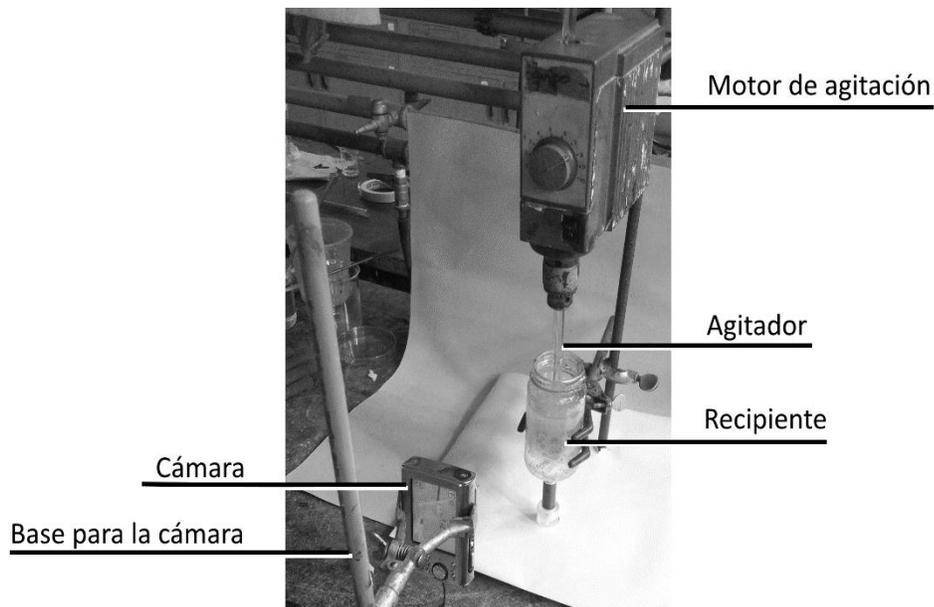
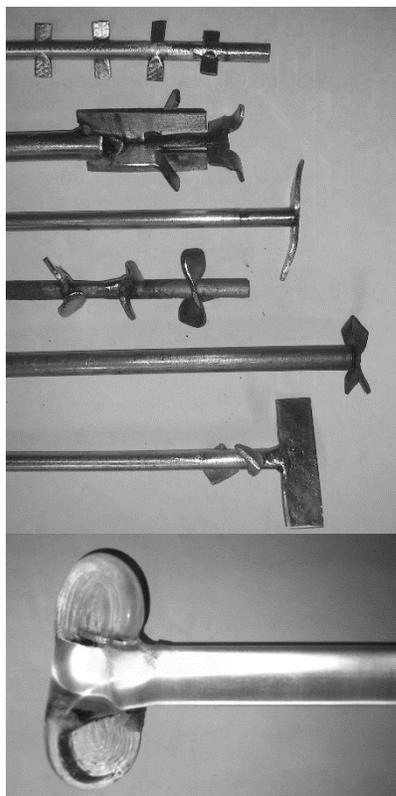


Figura N° 16: Montaje para la observación de la fluidodinámica del medio coalescedor.

Como se puede observar en la Figura N° 17 se contó con siete agitadores los cuales proporcionan un efecto particular a la agitación y por lo tanto fue necesario determinar el óptimo para el montaje realizado.



**Figura N° 17: Agitadores a utilizar en el montaje, izquierda acero, derecha vidrio.
(Elaboración propia)**

Con la finalidad de realizar una evaluación comparativa de las diferentes pruebas con el fluido seleccionado se documentaron las mismas mediante el uso de una Cámara Olympus 1030SW (ver Figura N° 18).



Figura N° 18: Cámara que será utilizada en el montaje (Olympus 1030SW)

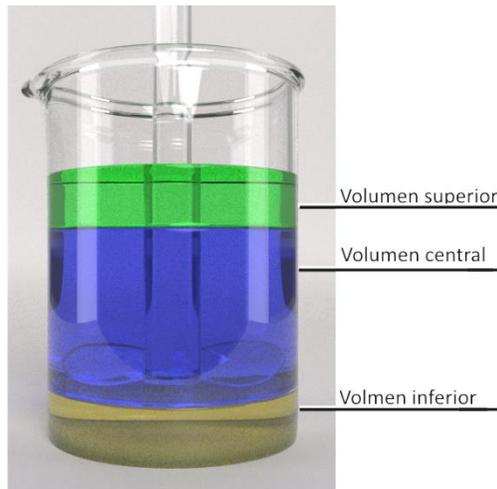
III.2.2.2 Aspectos a considerar

III.2.2.2.1 Agitador

Dado que el fin es alcanzar una homogeneidad de la suspensión formada por el medio coalescedor y el fluido seleccionado, la geometría del agitador jugó un papel de gran importancia ya que cada uno tiene ventajas y desventajas según el fluido que sea utilizado. Por esto, se realizaron pruebas variando el agitador y la velocidad de agitación para observar cuál lograba mantener el medio homogéneo en el sistema.

III.2.2.2.2 Homogeneidad del medio coalescedor en el fluido

Al variar la velocidad de agitación y el agitador, el medio coalescedor se encuentra en tres volúmenes diferentes: (a) al fondo del recipiente, (c) en un área cercana a la superficie y por encima del agitador y (b) en el centro de las anteriores como se muestra en la Figura N° 19.



**Figura N° 19: Esquema digital de las áreas que se presentan al aplicar la agitación de la muestra.
(Elaboración propia)**

Para garantizar la homogeneidad en el sistema se buscó que no existiera medio coalescedor depositado en el fondo por más de 1 segundo aproximadamente, por lo tanto se aumentó la velocidad de agitación hasta eliminar los depósitos en esta área. De igual manera si la velocidad con la cual el medio es impulsado hacia la superficie es

mucho mayor a la velocidad de asentamiento se forma una nube en el área superior, por lo tanto, la mezcla no sería homogénea (Bittorf y Kresta, 2003).

III.3. Estudiar sistemas simples de impulsión para transportar la mezcla de medio coalescedor-material de fosa a la celda de aplicación de campo eléctrico.

Para lograr mantener un flujo constante es necesario un perfil de presión estable. Por lo que se consideraron dos sistemas: (1) a presión atmosférica y (2) empleando una bomba de vacío a la salida de la celda, manteniendo el tanque de alimentación lleno en todo momento. Fue necesario establecer un método para alimentar el medio coalescedor y el material de fosa en la proporción necesaria para cada prueba a realizar (máximo y mínimo medio coalescedor); por lo tanto, se realizaron pruebas tomando 5ml de muestra a la salida del sistema, en 5 cinco zanahorias del laboratorio (ver Figura N° 20) manteniendo una alimentación constante en el tanque. Una vez extraídas las muestras se observó el volumen de medio coalescedor en de cada una de ellas y se determinó el volumen de medio coalescedor y fosa que debe ser alimentado por cada muestra extraída con la finalidad de mantener el tanque de alimentación lleno en todo momento. Dichas pruebas se realizaron con la proporción máxima y mínima de medio coalescedor.



Figura N° 20: Esquema del montaje con puntos de obtención de muestras. (Elaboración propia)

III.3.1 Sistema de impulsión por presión atmosférica

Realizando un montaje como se observa en la Figura N° 19 y manteniendo una alimentación de material de fosa y medio coalescedor constante, se llevaron a cabo pruebas aplicando campo eléctrico para la desestabilización de la emulsión.

III.3.2 Sistema de impulsión por vacío

Con la finalidad de facilitar la fluidez de la suspensión por el sistema, se planteó generar un vacío a la salida de la celda utilizando un kitasato el cual se conectó, por medio de una manguera de goma a una bomba de vacío como se observa en la Figura N° 21.

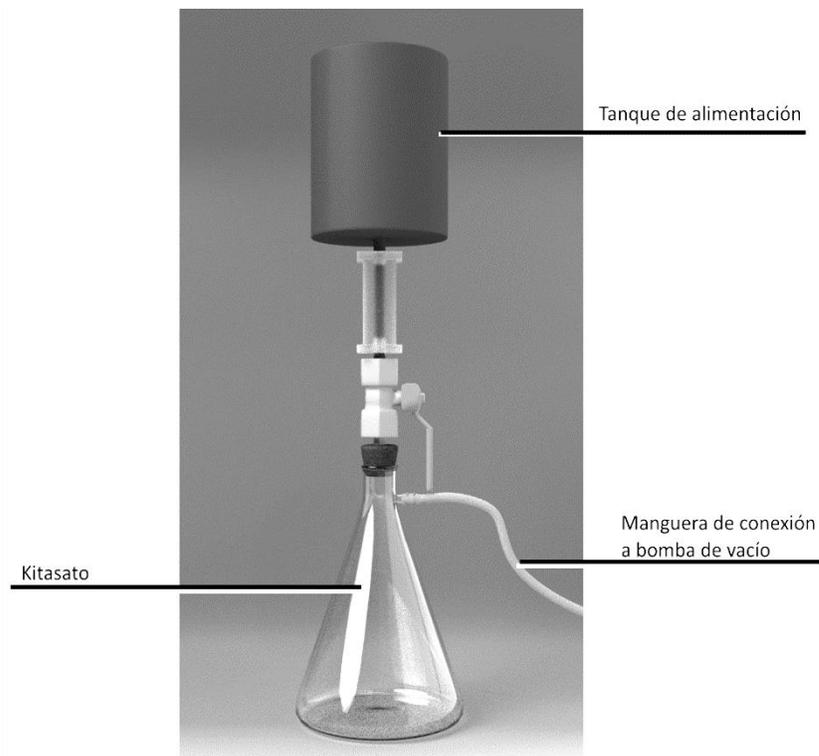


Figura N° 21: Esquema digital del montaje con impulsión por vacío. (Elaboración propia).

El proceso establecido fue el siguiente:

- i. Se cerró la válvula del sistema para evitar el vaciado del tanque.
- ii. Se introdujo al tanque de alimentación suficiente muestra (210 ml) de Acema-100 para llenar el cilindro interno y rebose al externo, se agregó medio coalescedor suficiente según la proporción requerida para la prueba realizada (mucho o poco).
- iii. Se agitó la mezcla siguiendo lo establecido en el objetivo 2.
- iv. Se encendió la bomba de vacío e inmediatamente se abrió la válvula.
- v. Continuamente se fue alimentando fosa y medio coalescedor en la proporción requerida.

III.4. Evaluar el efecto sobre la desestabilización de la emulsión W/O con medio coalescedor fluidizado, las principales variables aplicando el método de diseño experimental 2^k , determinando el factor de desestabilización por medio de la microscopía óptica.

III.4.1 Componentes del arreglo

III.4.1.1 Tanque de alimentación

Para realizar las pruebas se empleó un equipo formado por dos cilindros concéntricos de acero al carbono con 9,0 cm y 5,5 cm de diámetro externo e interno respectivamente, soldados sobre una placa circular del mismo material y con un orificio de 1cm de diámetro en el centro (ver Figura N° 22).



Figura N° 22: Esquema del tanque de mezclado y rebose. (Elaboración propia)

III.4.1.2 Celda 1 y Celda 2 para aplicación de campo eléctrico DC

El montaje contó con dos celdas planas de campo eléctrico. La primera forma parte del sistema base a emplear y proporcionó el tiempo de residencia mínimo del arreglo. La segunda presenta la posibilidad de acoplarse al extremo inferior de la primera celda y así duplicar el tiempo de aplicación del campo eléctrico (ver Figura N° 23).

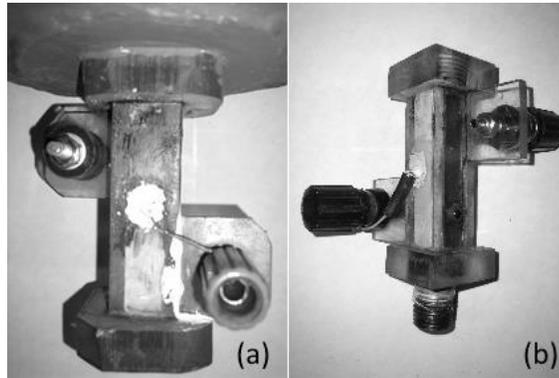


Figura N° 23: (a) Celda plana de campo eléctrico acoplada al tanque de alimentación, (b) Celda plana de campo eléctrico a ser acoplada, para aumentar el tiempo de residencia.

El montaje del sistema se puede observar en la Figura N° 24 donde se tiene el tanque de alimentación conectado a la celda de tiempo de residencia mínimo.



**Figura N° 24: Esquema digital del montaje para evaluar diversos arreglos del sistema.
(Elaboración propia)**

III.4.2 Variables a evaluar

III.4.2.1 Voltaje

Por medio del uso de una fuente de corriente directa se utilizaron, un valor mínimo de 1 kV y uno máximo de 3 kV.

III.4.2.2 Tiempo de residencia

Esta variable tuvo dos valores posibles:

- Tiempo de residencia bajo: aplicando el campo eléctrico por medio de sólo la Celda 1 (la cual se encuentra acoplada al tanque de alimentación).
- Tiempo de residencia alto: Este aplicando el campo eléctrico por medio de la Celda 1 y Celda 2 colocadas en serie como se observa en la Figura N° 25.



Figura N° 25: Esquema del montaje variando el tiempo de residencia aplicando campo magnético con dos celdas en serie. (Elaboración propia)

III.4.2.3 Proporción medio coalescedor y fosa de producción

Considerando los límites establecidos siguiendo la metodología planteada en *III.1*, donde se establecen las proporciones límite que permiten la fluidez de la mezcla a través del sistema, se consideró un valor mínimo y uno máximo para realizar la evaluación del arreglo. En ambos casos la cantidad de fosa de producción está alrededor de 210ml, la cual es la capacidad máxima del tanque de alimentación.

III.4.2.4 Diseño de las pruebas realizadas

Con el fin de estudiar la influencia que tienen las distintas variables a modificar en el arreglo se aplicará el “diseño factorial 2^k ” en el cual se toman muestras bajo todas las combinaciones posibles de las variables en estudio, minimizando los efectos de valores incontrolados y permitiendo realizar un análisis estadístico para separar y evaluar los diversos factores que intervienen en el sistema.

En el diseño se consideraron como variables: (a) voltaje aplicado, (b) tiempo de residencia (c) proporción de medio coalescedor. Adicional a las variables mencionadas se consideró la repetibilidad y reproducibilidad, las cuales se lograron realizando las experiencias dos veces y cambiando el operador respectivamente. La cantidad de pruebas siguió lo establecido en la Tabla N° 3 con un valor de $k = 5$.

La variable mediante la cual se realizó la selección de las mejores condiciones del sistema es el factor de desestabilización (FD) de la emulsión (Rodríguez, 2013) calculado al realizar el estudio de distribución acumulada del tamaño de gotas.

III.4.3 Distribución acumulada del tamaño de gotas

Para determinar la distribución del tamaño de gotas de agua en la muestra, se empleó la metodología propuesta por Fung (2011) la cual fue aplicada por medio del uso de una hoja de cálculo de su autoría modificada en este trabajo de investigación. Fueron agregadas 176 líneas de código en Visual Basic con la finalidad de corregir, optimizar y facilitar el análisis de los resultados, permitiendo realizar el estudio de distribución de tamaño de gota a una gran cantidad de muestras de manera continua.

Considerando mejorar la precisión de la microscopía óptica fueron tomadas entre diez y veinticinco fotos por muestra. Para facilitar el análisis de las mismas, se elaboró un macros que permite realizar el conteo del área de las gotas, en el software ImageProPlus, con mayor facilidad, disminuyendo así los tiempos y mejorando la metodología actual aplicada en el Laboratorio de Separaciones Mecánicas. Esta distribución permitió determinar el factor de desestabilización (FD) utilizado en el análisis 2^k .

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos, siguiendo la metodología planteada en la sección anterior con la finalidad de cumplir con los objetivos establecidos para el presente estudio.

IV.1. Comparar diferentes proporciones de medio coalescedor y fosa de producción que aseguren el flujo en el sistema de tratamiento

Se realizaron pruebas preliminares con el propósito de conocer la fracción vacía del lecho y determinar así el volumen que ocupa el medio coalescedor en un recipiente, utilizando agua como fluido y un cilindro graduado. Esta fracción vacía para los anillos de vidrio resultó ser de 90% para un volumen medido de 10 ml, por lo que el volumen de medio coalescedor corresponde a un 10%. Al tener un punto de partida con estas pruebas preliminares se iniciaron los ensayos antes mencionados en el marco metodológico, usando en este caso la fosa como fluido y el montaje indicado anteriormente, donde se obtuvo como resultado la relación máxima de medio coalescedor y fosa, el cual es presentado en la Tabla N° 4.

Tabla N° 4: Relación de medio coalescedor en el tanque de alimentación de 210ml

Cantidad de medio coalescedor	Volumen de medio coalescedor (ml)	% v/v medio coalescedor/fosa
máximo	5,0	2,4
mucho medio	4,5	2,0

El tanque de alimentación tiene una capacidad de 210 ml, por lo que este valor es el considerado para establecer la relación volumen de medio coalescedor/volumen de fosa. Vale la pena mencionar que el límite máximo de medio coalescedor es de 5,0 ml pero la probabilidad de obstrucción del sistema se incrementa al usar este valor, por lo que para los objetivos posteriores se trabajó con una cantidad límite de *mucho medio*

igual a 4,5 ml lo cual representa un porcentaje volumen de medio coalescedor/volumen de fosa del 2%.

Con la finalidad de determinar si la medición del medio coalescedor a utilizar en las experiencias puede ser realizada de manera volumétrica sin involucrar un error elevado al sistema de realizaron mediciones de la masa del medio coalescedor para los volúmenes establecidos, estos resultados se muestran en la Tabla N° 5.

Tabla N° 5: Medición de la masa del medio coalescedor de los volúmenes establecidos

Medio coalescedor	Medida de masa (g)				Promedio masa (g)	σ
	1	2	3	4		
poco	26,3	27,7	24,5	25,2	25,9	1,2 (4,6%)
mucho	15,2	15,1	14,7	13,9	14,7	0,5 (3,5%)

Como se puede observar en la tabla anterior la desviación estándar de la masa de los volúmenes medidos por medio del uso de un cilindro graduado, es baja, por lo tanto se considera que este método no genera errores considerables en los montajes realizados y se trabajará con el % v/v establecido.

IV.2. Estudiar la fluidodinámica de la suspensión formada por el medio coalescedor y el material de fosa

El estudio de la fluidodinámica de la suspensión estuvo basado en la búsqueda de un fluido que lograra simular el comportamiento de Acema-100 con la ventaja de que este permitiera observar al medio coalescedor a través de él.

IV.2.1 Medición de propiedades y selección del fluido

La selección del fluido presentó una serie de retos para definir cuál se acercaba más a Acema-100. Se consideró el uso de aceite de maíz (Maceite), aceite de motor (MULTIGRADO PDV), glucosa (común de repostería) y glicerina.

Sabiendo que las propiedades principales que definen la fluidodinámica son la viscosidad y la densidad, se determinaron estos valores para cada uno de los fluidos en estudio, los cuales se presentan en la siguiente tabla.

Tabla N° 6: Propiedades calculadas de los fluidos en estudio (25°C).

	Densidad (g/ml)	Viscosidad (cP)
Aceite de maíz	0,9182	52
Aceite de motor	0,8776	283
Glucosa	1,5328	7521
Glicerina	1,2877	1490
Acema-100	0,9344	6100

Como se puede observar en la Tabla N° 6, ninguno de los fluidos se encuentra cerca de las condiciones fluidodinámicas de Acema-100, por lo tanto se procedió a considerar que aspecto ejerce un mayor efecto en este estudio, para así enfocarse en acercar dicha propiedad al valor esperado. Cabe resaltar que, la dilución con agua de un fluido como la glucosa habría disminuido la viscosidad y la densidad pero esta no habría podido llegar a la de Acema-100 dado que esta es menor que la del agua.

La diferencia de densidad afecta una de las fuerzas que se ejercen sobre el medio coalescedor dentro del fluido y determina si este asciende o precipita al fondo del tanque sin agitación. De igual manera se tiene que la viscosidad puede dificultar el movimiento del medio, por lo tanto se tomaron muestras de igual volumen de cada fluido a los cuales se les agregó un volumen igual de medio coalescedor, estos fueron dejados en reposo y se observó su comportamiento. La densidad del medio coalescedor es siempre mayor a cualquiera de los fluidos estudiados debido a que el este se depositó en el fondo de las muestras como se observa en la Figura N° 26.

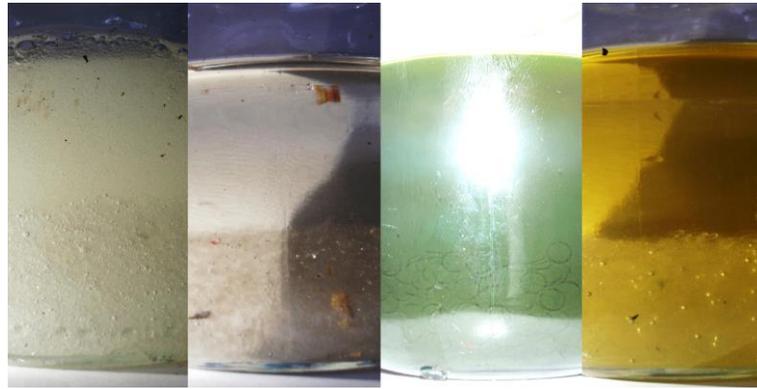


Figura N° 26: Medio coalescedor depositado en el fondo de los recipientes (de izquierda a derecha: glucosa, glicerina, aceite de motor, aceite de maíz).

La mayor diferencia observada en la velocidad con la cual el medio coalescedor descendía al fondo de los recipientes fue apreciable con el aceite de maíz; aun cuando el aceite de motor y de maíz tiene densidades cercanas, la diferencia de viscosidad ejerció una resistencia suficiente para lograr que el medio llegara al fondo más rápidamente en el caso del aceite de maíz. Por otra parte, en el caso de la glucosa, la cual tiene una densidad elevada en comparación con los otros fluidos, los aros de vidrio lograron depositarse luego de que este fuera dejado en reposo por un largo tiempo. Debido a esto se consideró que la viscosidad es la propiedad de mayor influencia en este estudio.

Se realizaron mediciones de viscosidad variando la temperatura de los fluidos. En el caso de los aceites y la glicerina se redujo la temperatura utilizando un baño de maría en frío hasta 5°C donde se alcanzó una viscosidad máxima de 3200cP para la glicerina. Por otro lado la glucosa fue calentada en un baño de maría a 75°C alcanzando una viscosidad de 5950cP debido a la diferencia de temperatura en la pared y en el centro del recipiente, siendo este último el punto donde se realiza la medición.

Estos problemas en la operatividad requerían una nueva alternativa para establecer el fluido con características similares a la fosa, por lo que se evaluó la posibilidad de mezclar los fluidos iniciales (glucosa, aceite, glicerina) hasta obtener las propiedades esperadas.

La glucosa y la glicerina proporcionaron una mezcla de fácil homogeneización, siendo la proporción 2:1 de glicerina:glucosa, la que presentó una viscosidad de 6120 cP a temperatura ambiente (25°C) similar a la fosa Acema-100; por lo tanto, se utilizó esta mezcla de fluidos para el estudio en la agitación con medio coalescedor.

Finalmente las propiedades del fluido similar a la fosa Acema-100 se presentan en la Tabla N° 7.

Tabla N° 7: Comparación de las propiedades de los fluidos Acema-100 y la mezcla Glicerina/Glucosa (2:1)

Fluido	Densidad (g/ml)	Viscosidad (cP)
Glicerina:glucosa (2:1)	1,2426	6120
Acema-100	0,9344	6100

IV.2.2 Selección del agitador y velocidad

Se consideraron los agitadores presentados en la Figura N° 17 tomando una muestra del fluido seleccionado en un recipiente de diámetro similar al del tanque de alimentación, para poder observar el comportamiento de la agitación como se observa en la Figura N° 27. Fue agregado un volumen de 210 ml y medio coalescedor suficiente para cada prueba (2,5 ml poco medio y 4,5 ml mucho medio), este fue previamente coloreado para facilitar su visibilidad.

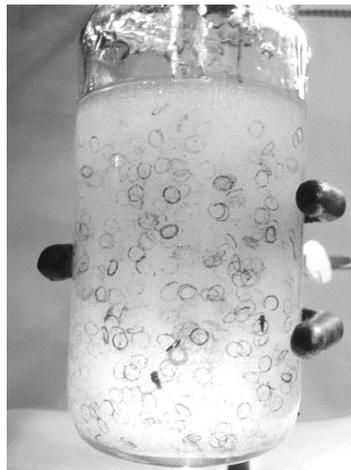


Figura N° 27: Recipiente para el estudio de la fluidodinámica con la mezcla de glicerina:glucosa y medio coalescedor.

Aplicando la metodología establecida en el CAPÍTULO III, se evaluó el efecto de cada agitador considerando: (1) el tiempo que tomaba en homogeneizar la suspensión, (2) si el medio había sido recién incorporado al sistema por el tope o (3) si este se encontraba depositado en el fondo. El agitador de vidrio tipo propela de hélice marina fue el que brindó una mayor estabilidad en la homogenización de la suspensión con velocidades que se muestran en la Tabla N° 7. El proceso de agitación para mucho medio (4,5 ml) se puede observar en la Figura N° 27.

Tabla N° 8: Velocidades que aseguran la homogenización de la suspensión (expresada en valores del dial del motor utilizado).

Medio coalescedor	Velocidad (rpm)
poco	500
mucho	700

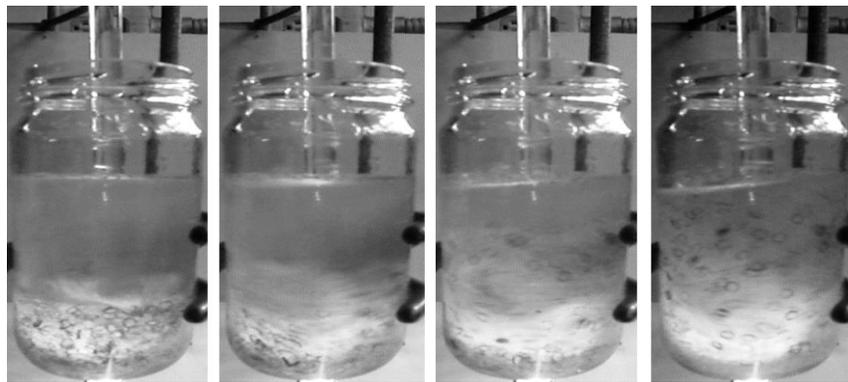


Figura N° 28: Proceso de agitación con la propela de hélice marina a 700 rpm, para 4,5ml de medio coalescedor.

IV.3. Estudiar sistemas simples de impulsión para transportar la mezcla de medio coalescedor-material de fosa a la celda de aplicación de campo eléctrico.

Para lograr obtener resultados que reflejaran el efecto de las variables estudiadas lo más estable posible, fue necesario establecer condiciones de alimentación que ayudaran a mantener el tanque de alimentación con la proporción de medio de cada experiencia y un perfil de presión constante.

IV.2.3 Presión atmosférica

Al realizar el vaciado del tanque de alimentación aplicando agitación se recolectaron volúmenes de muestra (5 ml) para determinar la cantidad de medio coalescedor que fluyen a través del sistema en el volumen recolectado. En la Tabla N° 9 se observa, que en el caso de poco medio coalescedor salen del sistema un promedio de 0,07 ml de medio coalescedor por 5 ml de muestra con una desviación estándar de 0,01 ml, en un tiempo de 30 segundos. Para el caso de mucho medio coalescedor se obtuvo un promedio de 0,03 ml en 50 segundos con una desviación estándar de 0,04 ml. Los caudales quedan establecidos como 0,16 ml/s y 0,10 ml/s para los casos de poco y mucho medio coalescedor respectivamente.

Tabla N° 9: Volúmenes de medio coalescedor y tiempo de recolección para muestra de 5ml.

Muestra	Medio coalescedor			
	Poco		Mucho	
	Volumen (ml)	Tiempo de recolección (s)	Volumen (ml)	Tiempo de recolección (s)
1	0,07	31	0,28	49
2	0,08	28	0,30	52
3	0,05	31	0,27	51
4	0,07	30	0,20	49
Promedio	0,07	30	0,26	50
σ	0,01	1,22	0,04	1,32

IV.3.1 Sistema de vacío

Se realizaron dos repeticiones del montaje con el sistema de vacío utilizando una celda de campo eléctrico y la cantidad máxima de medio coalescedor. Estas pruebas mostraron complicaciones operativas del montaje debido a que el vacío ocasiona una obstrucción instantánea en el fondo del tanque, reteniendo así todo el medio coalescedor en el mismo y separando el material de fosa, el cual fluyó libremente por la celda, resultando imposible la aplicación de campo eléctrico con medio coalescedor para este montaje bajo las variables establecidas; por lo tanto, se descartó.

IV.4. Evaluar el efecto sobre la desestabilización de la emulsión W/O con medio coalescedor fluidizado, las principales variables aplicando el método de diseño experimental 2^k , determinando el factor de desestabilización por medio de la microscopía óptica.

Luego de establecer el patrón de alimentación al tanque del sistema según se indicó en la Tabla N° 9 y realizando el montaje como se observa en la Figura N° 24 se realizaron las experiencias planteadas en la metodología (CAPÍTULO III) obteniéndose los factores de desestabilización que se presentan en la Figura N° 29.

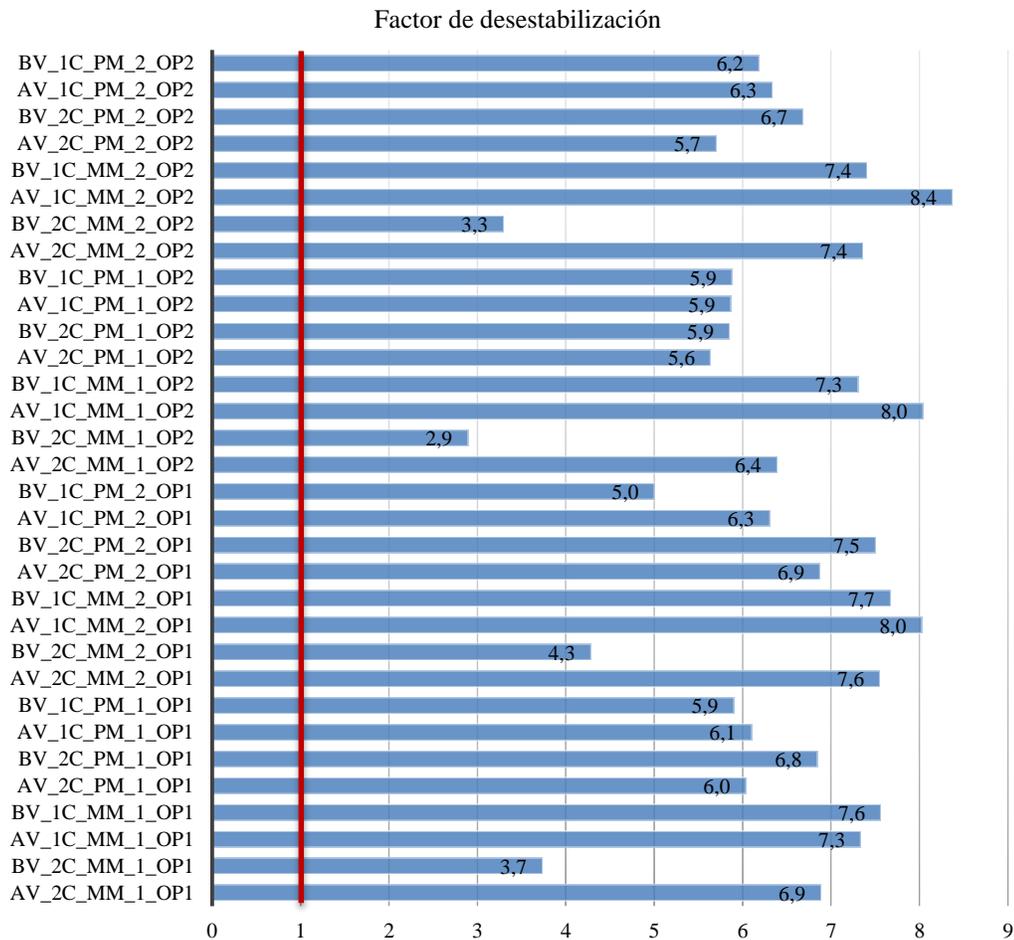


Figura N° 29: Gráfica comparativa de los factores de desestabilización obtenidos en las distintas experiencias realizadas. AV: Alto voltaje; BV: Bajo voltaje; 1C: Celda única; 2C: Celdas en paralelo; MM: Mucho medio; PC: Poco medio; OP: Operador.

Las distintas combinaciones realizadas permitieron analizar la posible interacción entre las variables estudiadas aplicando un análisis de varianza, obteniendo así los efectos favorables y el comportamiento de dichas variables, tanto individualmente como en conjunto.

Las variables e interacciones que resultaron relevantes en las pruebas realizadas son las que se muestran en la Figura N° 30. Según estos resultados, la repetibilidad (D) y reproducibilidad (E) con una distribución de la varianza igual a 1,4 y 0,7 respectivamente son menores a los 4,2 puntos mínimos establecidos por la distribución de Fisher para una confiabilidad del 95,05% en el método de análisis. Por lo tanto, no son influyentes en el estudio.

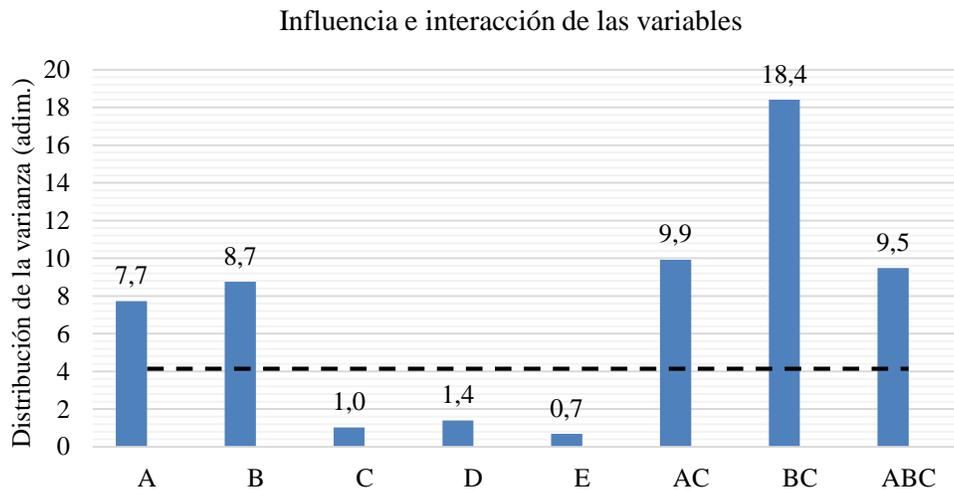


Figura N° 30: Distribución de la varianza en variables e interacciones. La línea discontinua representa el valor mínimo de efecto establecido por la distribución de Fisher = 4,15.

A: Voltaje aplicado; B: Tiempo de residencia; C: Cantidad de medio coalescedor.

En la Figura N° 31 se observan los resultados obtenidos luego de aplicar las fórmulas del diseño experimental 2^k las cuales separan los efectos de cada variable.

Los valores de esta figura representan la influencia de los límites de las variables del diseño en el sistema en estudio. Los valores positivos indican que el límite es favorable, los negativos indican que es desfavorable.

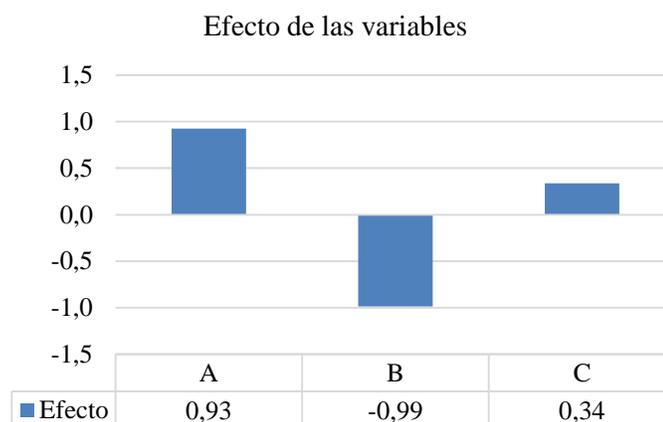


Figura N° 31: Efecto de las variables principales obtenido en el análisis de varianza.

A: Voltaje aplicado; B: Tiempo de residencia; C: Cantidad de medio coalescedor.

Basado en lo establecido se puede observar en la figura anterior, que a mayor voltaje el efecto de la desestabilización aumenta, de igual manera sucede con la cantidad de medio coalescedor. Mientras que aumentar la cantidad de celdas desfavorece al FD.

En la Figura N° 30 es apreciable que existe una fuerte interacción entre la cantidad de medio coalescedor y la cantidad de celdas (BC: 18,4) con lo cual se confirma que, al variar la viscosidad del fluido agregando el medio coalescedor se modifica el tiempo de residencia. En la siguiente tabla se puede observar una comparación de los FD obtenidos para los casos que presentaron un tiempo de residencia similar.

Tabla N° 10: Comparación de casos con tiempo de residencia similar y variación en las variables B (cantidad de celdas) y C (proporción de medio coalescedor en material de fosa)

	Tiempo de residencia	FD
AV 2C PM	60s	6,0
AV 1C MM	50s	7,3

Como se observa en la Tabla N° 10, al tener un tiempo de residencia similar, el efecto que ejerce la cantidad de celdas sobre la desestabilización es menor al relacionado con la proporción de medio coalescedor y por lo tanto, este último, es más favorable para el sistema.

Según los resultados de la Figura N° 29 se observa que en los casos con mayor cantidad de medio coalescedor en general se favorece la desestabilización, con excepción de los casos que cuentan con dos celdas en serie; esto puede estar asociado a que al aumentar la concentración del medio coalescedor en la mezcla, se incrementa la viscosidad de la suspensión lo cual incide directamente sobre el tiempo de aplicación del campo eléctrico ya que esta fluye lentamente en la celda. Lo anterior indica que el tiempo de residencia no puede ser controlado completamente, con la variación del número de celdas. Según los FD obtenidos, al trabajar con una celda y mucho medio coalescedor se obtiene la mejor desestabilización, en contraste con el caso de una celda y poco medio coalescedor, en donde la desestabilización disminuye (ver Figura N° 29).

Aumentar de forma significativa el tiempo de residencia del medio coalescedor en la celda puede ocasionar que este siga el comportamiento no lineal reportado por Rodríguez M. (2013), ya que se puede observar como al aumentar el tiempo de residencia (50 s) mediante el uso de mucho medio coalescedor se ayuda a la desestabilización, en contraste a cuando se aumenta el tiempo de residencia aplicando dos celdas en serie con poco medio coalescedor (60 s), ambos tratamientos a voltaje alto; esto podría estar relacionado con lo reportado por Mousavi et al (2013) al indicar que altos voltajes pueden generar un rompimiento de las gotas de gran tamaño generando gotas pequeñas más estables.

Para complementar el estudio y buscar comprender efecto del medio coalescedor y el tiempo de aplicación del campo eléctrico, se analizó la desestabilización al trabajar con un mayor número de celdas en la aplicación de campo eléctrico, operando el sistema como si contara con cuatro (4) celdas en serie. Se realizaron dos repeticiones del montaje con mucho medio coalescedor, dos celdas en serie y bajo voltaje donde el volumen procesado fue recirculado completamente al tanque de alimentación, de esta forma se obtuvo un tratamiento de la suspensión por 4 celdas a 1kV. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura N° 32.

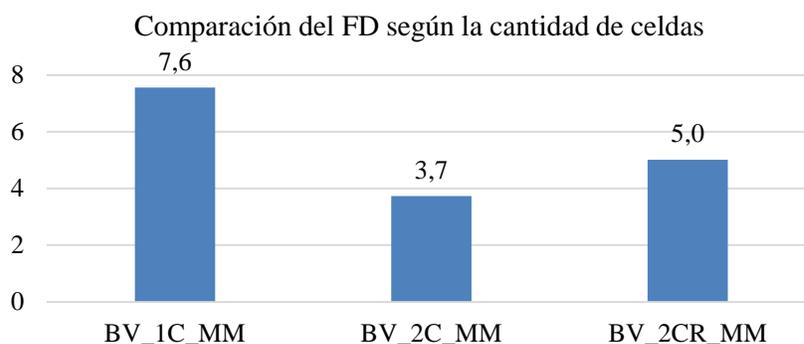


Figura N° 32: Comparación de los FD obtenidos en pruebas con una, dos y cuatro celdas (dos celdas con reciclo) con mucho medio coalescedor.

Se puede observar como el comportamiento de la desestabilización no es lineal cuando se varía el tiempo de residencia manteniendo la proporción de medio coalescedor y el voltaje aplicado. Aumentar la cantidad de celdas generó una baja desestabilización de la emulsión, lo cual no es deseable para este proceso, dando pie a plantear que adicional a un voltaje crítico de aplicación de campo eléctrico, puede existir un tiempo crítico de exposición al campo, donde el efecto se vuelve desfavorable al tener el medio en lecho fluidizado.

Por lo que analizado los factores que influyen en la desestabilización de la emulsión, es necesario resaltar el efecto logrado sobre la distribución acumulada del tamaño de gotas. En la Figura N° 33, se presentan la distribución acumulada del tamaño de gotas obtenida para dos casos en este trabajo (mejor y peor caso) y la muestra original, además de la distribución reportada por Rodríguez (2013) que representa la mejor desestabilización alcanzada trabajar con aplicación de campo eléctrico DC en una celda plana, alto voltaje (600 V), y bajo tiempo de residencia (20s); sin uso de medio coalescedor.

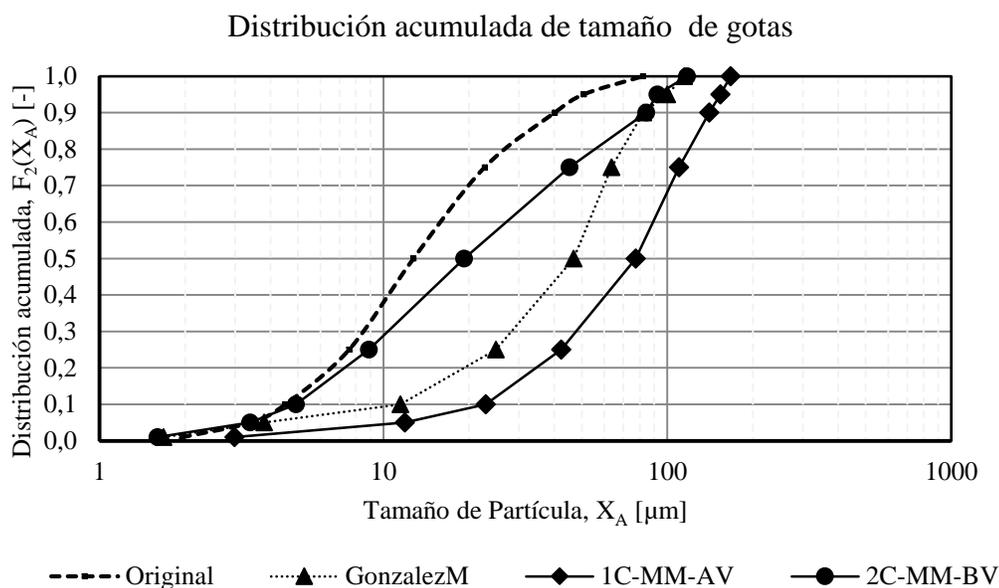


Figura N° 33: Distribución del tamaño de gotas de agua en la emulsión de Acema-100 antes (Original) y después de su tratamiento.

En esta figura se observa el mejor y el peor caso obtenido en el presente estudio, donde en ambos casos es apreciable un desplazamiento de la curva de distribución acumulada del tamaño de gotas, respecto a la muestra original, lo cual es el resultado deseado. Para el D_{50} se logró aumentar el tamaño de las gotas desde $12,77\mu\text{m}$ en la muestra original de Acema-100, hasta un valor máximo de $77,40\mu\text{m}$ para el mejor caso (AV-1C-MM). Al comparar los resultados obtenidos en este trabajo y con lo reportado por Rodríguez (2013) se puede observar que en el presente estudio se obtuvo un incremento en el diámetro de las gotas en comparación con las pruebas sin medio coalescedor. Lo indicado anteriormente se refuerza con las imágenes a nivel del microscopio, donde se puede observar (ver Figura N° 34), el aumento del diámetro de las gotas bajo el efecto de 1kV, mucho medio coalescedor y una celda de aplicación de campo eléctrico (mejor caso).

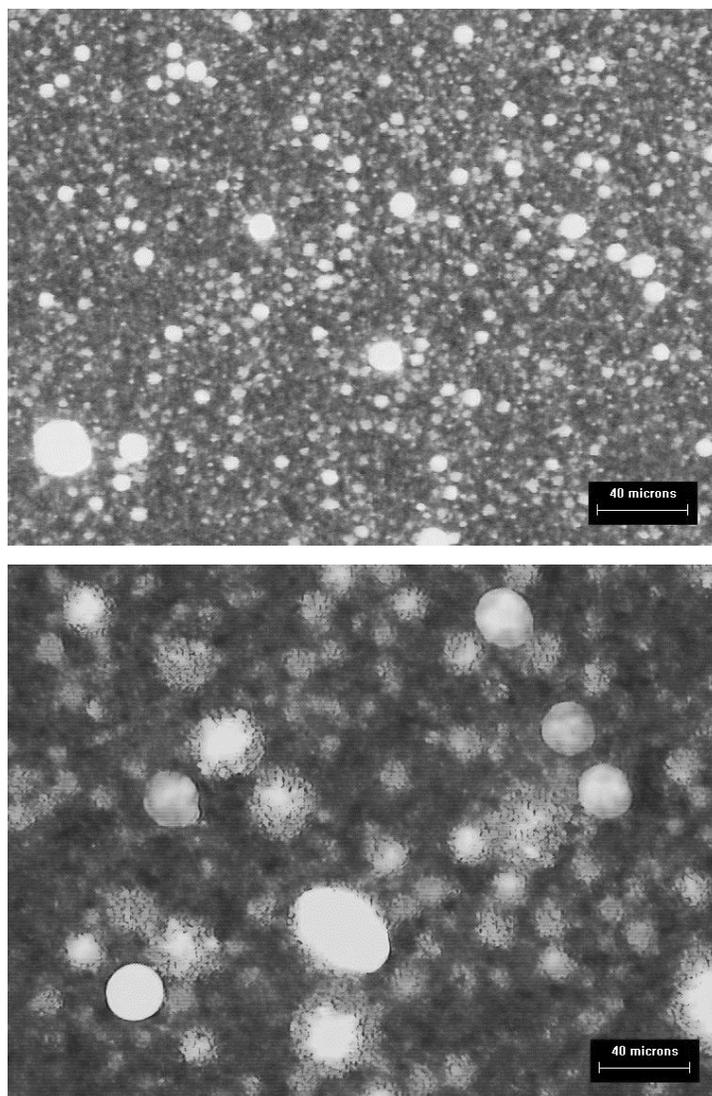


Figura N° 34: Fotos tomadas con el microscopio óptico a 20X, para determinar el FD de la emulsión W/O. Superior Acema-100 sin tratamiento, inferior fosa tratada con alto voltaje, mucho medio y una celda.

En esta figura se puede observar como la desestabilización incremento el diámetro de las gotas. Es necesario resaltar que, además de alcanzar un aumento del diámetro en las gotas, también se logró incrementar el porcentaje de agua visible en las fotos desde un 13% hasta un 18%, lo cual es un factor que influye en la exactitud de este método de análisis ya que, como menciona Fung (2011), existe la posibilidad de que el espesor de la muestra analizada en el microscopio no permita el paso de la luz en algunas áreas y esto impide observar las gotas de menor tamaño.

Luego de haber aplicado el análisis por microscopía óptica fueron centrifugadas las muestras con la finalidad de observar si se lograba una separación de fases: en la Figura N° 35 se puede observar el resultado obtenido al usar alto voltaje, mucho medio y una celda (mejor caso).

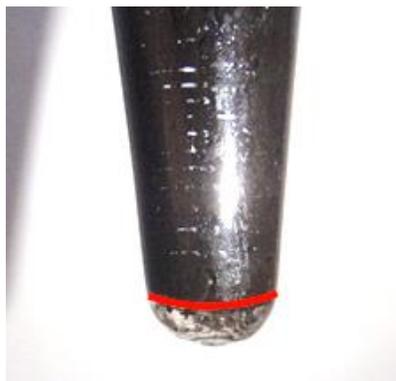


Figura N° 35: Foto de separación lograda bajo las condiciones más favorables de este trabajo (AV-1C-MM)

En la figura anterior se muestra como solo se logra separar un volumen aproximado de 0,1ml de agua, aun cuando el valor para el FD es elevado. Por lo tanto, es necesario considerar que el proceso de desestabilización se llevó a cabo a temperatura ambiente y sin añadir demulsificantes, por lo tanto las gotas pueden seguir presentando una resistencia a la separación de las fases, debido a los factores como la viscosidad de la fase continua a esta temperatura.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

V.1. CONCLUSIONES

Una vez obtenidos y analizados los resultados presentados en el CAPÍTULO IV se llega a las siguientes conclusiones:

- La cantidad máxima de medio coalescedor que permite que la suspensión medio coalescedor-fosa fluya de forma continua es de 4,5ml de aros de vidrio con una fracción vacía del 90%, lo cual representa un 2% v/v.
- Una mezcla glicerina:glucosa en una relación 2:1 genera un fluido con viscosidad a 25°C, similar a la de la fosa Acema-100.
- El agitador de vidrio de tipo propela de hélice marina proporciona un efecto de mezclado que favorece la homogenización de la suspensión, requiriendo 500rpm para 1% v/v de medio coalescedor y 700 rpm para 2% v/v de medio coalescedor.
- Aplicar vacío a la salida del sistema no es viable para este estudio.
- El sistema de impulsión a presión atmosférica y alimentación continua en tanque, permite la fluidez del sistema con un caudal de 0,16 ml/seg y 0,10 ml/seg para poco y mucho medio coalescedor respectivamente, lo cual permite una alimentación manual del sistema.
- El efecto de la corriente eléctrica aplicada es positivo a mayor voltaje.
- El efecto del tiempo de residencia, relacionado con la cantidad de celdas es negativo a mayor cantidad de celdas.
- El efecto de la cantidad de medio coalescedor es positivo, pero está estrechamente relacionado con el tiempo de residencia y la cantidad de celdas.
- El voltaje, cantidad de celdas y cantidad de medio coalescedor, así como la interacción entre estas variables presentan un efecto relevante en el sistema con una confiabilidad del 95%.

- La repetibilidad y reproducibilidad no presentan un efecto relevante para los FD obtenidos.
- Se alcanza un FD máximo de 8,4, al utilizar 2% v/v de medio coalescedor-fosa Acema-100 en lecho fluidizado, campo eléctrico de corriente directa de 3kV con una celda de placas planas.
- El uso de medio coalescedor en lecho fluidizado ayuda a incrementar la desestabilización del material de fosa Acema-100 en comparación con los estudios realizados anteriormente en el Laboratorio de Separaciones Mecánicas de la UCV.
- La desestabilización de la fosa Acema-100 es posible sin el uso de demulsificantes, mejorando la separación electrostática con la inclusión del medio coalescedor en forma fluidizada.

V.2. RECOMENDACIONES

Al realizar este trabajo se presentaron mejoras y detalles que son resaltantes para posibles investigaciones a futuro, estas se mencionan a continuación:

- Tomar un mayor número de fotos al momento de realizar el análisis con el microscopio, esto puede reducir el error relacionado con la preparación de la muestra a observar en el mismo.
- Aplicar una capa de esmalte (por ejemplo pintura de uñas) a los electrodos de la celda de campo eléctrico ayuda a evitar una caída del voltaje en el sistema.
- Determinar la posible utilización de una celda con mayor diámetro, para poder trabajar con mayor cantidad de medio coalescedor.
- Estudiar el uso de un medio coalescedor con un área superficial parecido al de los aros de vidrio.

CAPÍTULO VI

BIBLIOGRAFÍA

- Anderson W. (1986). Wettability literature survey – Part 1: Rock/oil/brine interactions and the effect of core handling on Wettability. *Journal of Petroleum Technology*. Pág. 1125-1144.
- 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. Elsevier. Pág.173-192.
- A., S. J. (2002). *Advances in correlating filter cake properties with particle collective characteristics*. Universidad de Karlsruhe, Shaker Verlag. Alemania: Tesis Doctoral.
- Bittorf K. J., K. S. (2003). *Prediction of cloud height for solid suspensions in stirred tanks*. University of Alberta, Edmonton, Canada: Institution of Chemical Engineers.
- Ferré, J. (2015, Enero). *Universidad Rovira i Virgili* (. Retrieved from EL DISEÑO FACTORIAL COMPLETO 2k: <http://www.quimica.urv.es/quimio/general/doecast.pdf>
- Fung, E. (2011). *Separación electrostática con corriente directa para la desestabilización de emulsiones agua-crudo de distintas fosas de producción mezcladas con solvente*. Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela. Caracas: Trabajo Especial de Grado.
- Kimble, O., & Silberberg, I. (2001). *Encyclopedic Handbook of Emulsion Technology*. Raleigh, North Carolina: North Carolina State University.
- Madhavi V. Sardeshpande, V. V. (2009). *Solid Suspension and Liquid Phase Mixing in Solid-Liquid Stirred Tanks*. India: American Chemical Society.
- Marfisi S., S. J. (2004). *Deshidratación de crudos. Fenomenología y aspectos prácticos*. (Vols. FIRP S853-PP). Universidad de Los Andes, Mérida: Laboratorio de Formulación, Interfases, Reología y Procesos.

- Mousavi, S. H., Shariaty-Niassar, M., Bahmanyar, H., & Moosavian, M. A. (2013). Electro-Coalescence of an Aqueous Droplet at an Oil–Water Interface with an Investigation of Secondary Droplets Formation. *Iranian Journal of Chemical Engineering*, 30-44.
- Ospino, S. (2011). *Manual del viscosímetro Brookfield*. Universidad Central de Venezuela.
- Padrón A., Z. P. (2005). *Aplicación de la técnica de microscopía óptica para la caracterización de sistemas dispersos formados por crudo, agua y sólidos*. Universidad Central de Venezuela. Caracas: Trabajo Especial de Grado.
- Porras, L. (2000). *Diseño Estadístico de Experimentos, Análisis de la Varianza y Temas Relacionados: Tratamiento Informático mediante SPSS*. Proyecto Sur de Ediciones.
- Renouf, G., Kurucz, L., & Soveran, D. (2007). Produced Fluids Separation Using a Coalescer Column. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 41-47.
- Rodríguez, M. A. (2013). Desestabilización Electroestática De Emulsiones En Fosas De Producción. *Trabajo especial de grado Para optar al Título de Magister Scientiarium en Ingeniería Química*. Caracas, Venezuela.
- Sardeshpande, V. M., & Ranade, V. V. (2012). Computational fluid dynamics modelling of solid suspension in stirred tanks. *Current Science Vol. 102 No. 11*, 1539 - 1551.
- Serrano, E. (2002). *Tensión interfacial y mojabilidad de sistemas sólido/salmuera/n-dodecano: Estudio experimental del efecto de la fuerza iónica y de la concentración de surfactante*. (T. d. maestría, Ed.) Universidad Autónoma Metropolitana, México D.F: División de Ciencias Básicas de Ingeniería.
- UNAD. (n.d.). *Universidad Nacional Abierta y a Distancia Índice de contenidos*. Retrieved enero 2015, from Capítulo 6, Diseños factoriales 2k: <http://datateca.unad.edu.co/contenidos/201020/>