

**ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO, USO Y APLICACIÓN DE LOS
TRATADORES TÉRMICOS ELECTROSTÁTICOS.**

MARÍA ALEJANDRA RAMÍREZ POLANÍA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
ESPECIALIZACIÓN EN PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS
BUCARAMANGA
2014**

**ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO, USO Y APLICACIÓN DE LOS
TRATADORES TÉRMICOS ELECTROSTÁTICOS.**

MARÍA ALEJANDRA RAMÍREZ POLANÍA

**Trabajo de Grado para optar al título de
Especialista en Producción de Hidrocarburos**

Director

NICOLAS SANTOS SANTOS

Ingeniero de Petróleos

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
ESPECIALIZACIÓN EN PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS**

BUCARAMANGA

2014

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis familiares y amigos más cercanos quienes me apoyaron constantemente durante toda la especialización, al director de la monografía quien proporcionó valiosos aportes, a los docentes y a la institución Universidad Industrial de Santander los cuales pusieron a disposición su valioso conocimiento, experiencia y las condiciones para llevar a cabo el programa. Y por supuesto a Dios quien me brindó la oportunidad y los medios para cursar esta especialización, desarrollar mi trabajo de monografía y prepararme mejor para afrontar los diferentes retos profesionales que se presentan día a día.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	12
1. MARCO TEÓRICO.....	18
1.1 Selección Del Proceso Y Equipo.....	21
1.2 Equipos Utilizados En La Deshidratación De Crudos	22
2. FUNCIONAMIENTO DE LOS TRATADORES TÉRMICOS ELECTROSTÁTICOS	24
2.1 Generalidades.....	24
2.2 Fundamentos de la deshidratación por campo eléctrico	27
2.3 Condiciones De La Gota De Agua Que Afectan El Desempeño De La Electrocoalescencia	29
2.3.1 Agua dipolo.	29
2.3.2 Carga 30	
2.3.3 Conductividad.	30
2.3.4 Coalescencia / Separación.....	31
2.3.5 Movilidad.	32
2.3.6 Dispersión.	32
2.4 Mejora De La Deshidratación Y Desalado En Campos Maduros Usando Campos Eléctricos AC, DC y AC/DC	33
2.4.1 Efectos de la Conductividad.....	34

2.4.2 Sólidos y Finos	36
2.4.3 Probador de Susceptibilidad Electrostatica	37
2.4.4 Tratadores Electrostaticos.....	40
2.4.5 Fuerzas Electrostaticas	41
3. REVISIÓN DE LA TECNOLOGÍA DISPONIBLE	61
3.1 Tratamiento Eléctrico + Centrifugo.....	63
3.2 Tratamiento Eléctrico + Térmico	64
3.3 Tratamiento Eléctrico + Químico	67
3.4 Tratamiento Eléctrico + Filtración.....	68
3.5 Tratamiento Eléctrico + Presión	68
3.6 Tratamiento Eléctrico + Mezclado.....	69
3.7 Tratamiento Eléctrico por si solo	69
4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DE TRATADORES TÉRMICOS ELECTROSTÁTICOS	71
5. APLICACIONES DE LOS TRATADORES TÉRMICOS ELECTROSTÁTICOS	75
5.1 Actualización de un Tratador de Volumen Offshore (API 27°) a tecnología de Frecuencia Dual	77
5.2 Actualización de tratadores de crudo existentes usando electrodos compuestos API 25°	77
5.3 Incremento de la Producción deshidratando Crudo de API 20.6	79
5.4 Electrocoalescedores Comerciales, Fabricantes y Estudios experimentales ..	80

5.5 La Deshidratación De Crudo Con Tratadores Electrostáticos: Desarrollo De Directrices De Diseño Y De Funcionamiento - Tratadores electrostáticos utilizados en varios campos de Shell.....	94
5.5.1 Tratadores electrostáticas.....	96
5.6 Experiencia de campo.....	113
5.6.1 Campo Midway Sunset	114
5.6.2 Plataforma Bullwinkle, Golfo de México	116
5.7 Prácticas de Operación.....	117
5.8 Conclusiones del estudio	119
6. CONCLUSIONES	121
7. REFERENCIA DE LAS PATENTES	124
8. BIBLIOGRAFÍA	128
9. ANEXOS	130

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Conductividad del crudo como una función de la temperatura del crudo.....	36
Ilustración 2 Decaimiento del voltaje como una función del incremento de conductividad del crudo	36
Ilustración 3 Probador de Susceptibilidad Electrostática	39
Ilustración 4 Salida del EST	39
Ilustración 5 Tratador AC/DC	41
Ilustración 6 Fuerza dielectroforética	42
Ilustración 7 Fuerza Electroforética.....	43
Ilustración 8Atracción Dipolar	44
Ilustración 9 Configuración típica de polaridad dual.....	49
Ilustración 10 Tratador de Polaridad Dual.....	49
Ilustración 11 Incremento de la intensidad de campo promedio con frecuencia mayor.....	51
Ilustración 12 Tratador de frecuencia dual.....	51
Ilustración 13 Modulación de la frecuencia en un Sistema de frecuencia dual	52
Ilustración 14 Arreglo de electrodos compuestos	53
Ilustración 15 Comparación entre el tipo de caja abierta en la parte inferior y el separador HiFlo	54
Ilustración 16. Aclaración del patrón de flujo mejorado con el separador HiFlo.....	55
Ilustración 17 Diferentes combinaciones de Tecnología de Separación Eléctrica.	62
Ilustración 18 Equipo para separación Electrostática y Centrifuga de dispersiones líquidas.....	65
Ilustración 19 Flujo Paralelo configuración EPIC	66
Ilustración 20 Una elevación seccionada de un recipiente horizontalmente alargado que tiene un sistema de electrodos y un separador de superficie mecánico inclinado	67

Ilustración 21 Plano del circuito de flujo y la trayectoria del flujo a lo largo de los experimentos (línea roja)	85
Ilustración 22 Distribución del tamaño de las gotas acumulada en el experimento con emulsión de 10% de corte de agua y caída de presión de 2 bares al otro lado de la válvula de estrangulación.....	86
Ilustración 23 Eficiencia promedio de deshidratación y desalado	91
Ilustración 24 Relación entre el contenido de agua final y el contenido de sal de las muestras de 30ml obtenidas de los conos Imhoff	92
Ilustración 25 Tratador Electrostático – Unidad convencional AC	98
Ilustración 26 Esquemático del recipiente PSCET.....	99
Ilustración 27 Diferencia de densidad Crudo/Agua y Parámetro de Stokes.....	102
Ilustración 28 Parámetro de Stokes como una función de la temperatura.....	103
Ilustración 29 Parámetros de operación actual Vs Data de diseño piloto	104
Ilustración 30 Efecto del tamaño de la gota en las tasas de crudo – Crudo B (10 v%) a 100F.....	105
Ilustración 31 Perfil PSCET de varios crudos a tasa máxima de crudo	109
Ilustración 32 Efectos de los sólidos y alteraciones de gas en el desempeño	111
Ilustración 33 Diseño del separador del tratador electrostático (no a escala).....	112
Ilustración 34 Separador de entrada del tratador electrostático (NMWSS contrato no gubernamental, California).....	113

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Actualización de electrodos de acero a electrodos compuestos (API 20°)	76
Tabla 2 Actualización de tratadores de crudo existentes a Frecuencia Dual, API 14 — 25	78
Tabla 3 Incremento de la Producción deshidratando Crudo de API 20.6	79
Tabla 4 Principales características de electrocoalescedores comerciales	83
Tabla 5 Propiedades del crudo probado	86
Tabla 6 Cantidad de agua segregada en los conos Imhoff con unidad de coalescencia encendida y apagada.	87
Tabla 7 Contenidos de agua y sal, con eficiencias de remoción relativa, en las muestras de 30 ml tomadas de la parte superior de los conos Imhoff	89
Tabla 8 Deshidratación electrostática de varios crudos	100
Tabla 9 Efecto del rendimiento del crudo en la salida de BS&W (v% H ₂ O)	105

RESUMEN

TITULO: ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO, USO Y APLICACIÓN DE LOS TRATADORES TÉRMICOS ELECTROSTÁTICOS *

AUTOR: MARÍA ALEJANDRA RAMÍREZ POLANÍA **

PALABRAS CLAVES: COALESCENCIA, CAMPO ELÉCTRICO, ELECTRODO, FRECUENCIA, FUERZA ELECTROSTÁTICA, ELECTROFORESIS, DIELECTROFORESIS

DESCRIPCIÓN:

El objetivo principal del trabajo es elaborar un documento de consulta que reúna teoría conceptual de tratadores térmicos electrostáticos, recopilando información de artículos y publicaciones de tipo científico /tecnológico; se ha consolidado información de los principios de funcionamiento de tratadores electrostáticos, teorías, estudios de laboratorios, aplicaciones y experimentos que los sustentan.

En la primera parte se realiza una reseña de Emulsiones de agua en crudo y los diferentes mecanismos usados para su resolución. Posteriormente se encuentran Principios básicos de funcionamiento de tratadores térmico electrostáticos y algunos experimentos y teorías que los soportan, ventajas y desventajas de uso. Continúa con un breve recuento de tecnologías existentes y que combinan métodos convencionales en su implementación. Por último se referencian algunos casos de aplicación, en donde se evidencia la importancia del conocimiento del comportamiento del campo, de los fluidos producidos y la realización de estudios de laboratorio y pruebas previos a la implementación de tratadores electrostáticos, con el fin de lograr con éxito una aplicación optima, que se vea reflejada no solo en la deshidratación eficiente de las emulsiones y la calidad del crudo tratado, sino también en la optimización de las facilidades y beneficios en ahorro de costos.

En la parte final del documento se incluyen tres anexos, en los cuales se amplía de una forma más detallada algunos modelos matemáticos que se han usado para el análisis del comportamiento y uso de campos electrostáticos en la resolución de emulsiones. Se seleccionaron estos trabajos, ya que a partir de estos se da inicio a una serie de estudios en busca de la solución de interrogantes relacionados con los tratadores térmicos electrostáticos, búsqueda de parámetros óptimos de funcionamiento y variables que afectan el rendimiento de los mismos.¹

¹ * Monografía

** Facultad De Ingenierías Físicoquímicas. Escuela De Ingeniería De Petróleos. Director Nicolás Santos Santos

ABSTRACT

TITLE: ANALYSIS OF THE OPERATION, USE AND APPLICATION OF THERMAL ELECTROSTATIC TREATERS*

AUTHOR: MARÍA ALEJANDRA RAMÍREZ POLANÍA **

KEYWORDS: COALESCENCE, ELECTRIC FIELD, ELECTRODE, FREQUENCY, ELECTROSTATIC FORCE, ELECTROPHORESIS, DIELECTROPHORESIS

DESCRIPTION:

The primary objective of the monograph is to develop a consultation document which gathers the conceptual theory of thermal electrostatic treaters from technological and scientific articles and publications; this is developed through consolidating information about the principles of operation of electrostatic treatment vessels, theories, laboratory studies, applications and experiments that support them.

Firstly, a summary about water-in-oil emulsions and the different mechanisms used for its resolution is addressed. The basic operational principles of thermal electrostatic treaters and some experiments and theories that support its use, advantages and disadvantages of its use are then explored. Furthermore, a brief overview of existing technologies and conventional methods for implementation. Next, the monograph will demonstrate, through applied case studies, the successful optimal application of electrostatic treaters, reflected through the efficient dehydration of emulsions and quality of oil treated and in optimizing the facilities and cost reductions. This success is demonstrated by knowledge of field behavior of the produced fluids, laboratory studies and pre-deployment testing prior to implementation.

The paper concludes by presenting three annexes, which expand in more detail some mathematical models used to analyze the behavior and use of electrostatic fields in resolving emulsions. These works were selected as they initiated a series of studies investigating the solutions to questions related to the search for optimal operating parameters and variables that affect the performance of thermal electrostatic treatment vessels.²

² * Monograph

** Facultad De Ingenierías Físicoquímicas. Escuela De Ingeniería De Petróleos. Director Nicolás Santos Santos

INTRODUCCIÓN

La presencia de emulsiones en las operaciones de recuperación de petróleo es generalmente indeseable. La deshidratación del crudo se exige por diversas razones; entre las más destacadas están los altos costos asociados con el transporte, la corrosión y la demanda de calor, además de los problemas causados por la presencia de agua/sólidos en la refinación de crudos o en la mejora de los crudos pesados. El mercado del petróleo exige que el agua de los crudos sea retirada a un nivel menor del 0.5% de sedimentos y agua (BS&W).

Esta restricción será cada vez más crucial a medida que la cantidad de agua producida se incremente en los campos maduros. Además de esto, muchos nuevos campos serán difíciles de desarrollar, debido a que mostrarán densidades y viscosidades muy altas junto con presencia de sólidos dispersos; esto aumentará la capacidad del crudo a retener agua, incrementando el tiempo de retención necesario en los separadores. Con el fin de seguir siendo competitivos, las emulsiones deben ser resueltas de manera económicamente viable. Las opciones de tratamiento disponibles son de tipo mecánico, térmico, a través de electrocoalescencia, químicos, o una combinación de métodos físicos y químicos.

En la industria petrolera, el primer trabajo de electrocoalescencia se remota a principio del siglo XX, cuando *Cottrell* aplicó campos eléctricos externos a emulsiones de crudo. El objetivo principal de la aplicación de un campo eléctrico a

una emulsión es aumentar su característica de distribución del tamaño de gota de agua. De acuerdo con la *ley de Stokes*, la velocidad de sedimentación es proporcional al diámetro de la gota al cuadrado. Por lo tanto, las gotas más grandes se asentarán con mayor rapidez que las más pequeñas, lo que lleva a un proceso de separación más rápida y más eficiente.³

La tecnología para el mejoramiento electrostático de la coalescencia de las gotas de agua en emulsiones de petróleo crudo es revisada de forma crítica. Históricamente, la coalescencia electrostática fue inventada para las industrias relacionadas con el petróleo en California [Patente de EE.UU. 987 115 (1911)].

Hoy en día, esta tecnología se considera generalmente para la separación de una fase acuosa dispersa en una fase dieléctrica de crudo con una constante dieléctrica significativamente más baja que la de la fase dispersa. Varios diseños se han introducido, gran parte utilizando campos eléctricos con corriente alterna (AC) con frecuencia de red (50 ó 60 Hz). El campo eléctrico de corriente continua (DC) ha sido menos frecuente en el pasado, en comparación con el AC.

En 1981, se introdujo el concepto de campos eléctricos pulsados DC, junto con electrodos aislados [Trans. IChemE 59 (1981) 229-237; Patente del Reino Unido 217 1031A (1986)]. Desde entonces, este se ha vuelto más común en la tecnología electrocoalescente. Campos pulsados de DC y AC son especialmente útiles, cuando el contenido de fase acuosa de la emulsión es alto, para evitar cortocircuitos entre el par de electrodos.⁴

³ LESS Simone, et al. Dehydration Efficiency Of Water-In-Crude Oil Emulsions In Alternating Current Electrical Fields. Journal of Dispersion Science and Technology (J DISPER SCI TECHNOL). Publicado en línea en 2010.

⁴ EOW John S. Electrostatic Enhancement Of Coalescence Of Water Droplets In Oil: A Review Of The Technology. Chemical Engineering Journal 85. Elsevier. 2002.

El tratamiento del petróleo de los pozos viejos es un buen ejemplo, donde el contenido volumétrico de agua puede variar de forma significativa. El trabajo presentado por algunos investigadores indica la existencia de una frecuencia óptima, lo que depende del material de recubrimiento del electrodo, su espesor y la composición de emulsión líquido. Esto es sin embargo, un tema polémico que no ha sido resuelto por completo. Las características y la geometría del sistema de electrodos (placa generalmente cilíndrica o laminar) influyen en el rendimiento de la coalescencia electrostática, y están estrechamente relacionados con el tipo del campo eléctrico aplicado y la emulsión utilizada. Hay básicamente dos tipos de electrodos: electrodos sin aislar y electrodo aislado. La combinación de electrocoalescencia y separación mecánica (por ejemplo, fuerza centrífuga) también se ha introducido. El uso de calor y adición de productos químicos han demostrado mejorar aún más la electrocoalescencia de las gotas de agua. Otros métodos que se pueden combinar con el tratamiento eléctrico son la filtración, el empleo de métodos de alta presión y temperatura, y mezclado.⁵

Actualmente, hay varios métodos disponibles, tales como desemulsificación química, sedimentación por gravedad o centrífuga, ajuste del pH, filtración, tratamiento de calor, separación por membrana y desemulsificación electrostática. Cada uno de estos métodos tiene sus propias ventajas y desventajas. Por ejemplo, el uso de desemulsionantes químicos puede modificar las propiedades interfaciales de agua /crudo, permitiendo así que las gotas de agua se unan más fácilmente en gotas más grandes. Sin embargo, problemas adicionales se encuentran en la eliminación o remoción de los desemulsionantes de las fases acuosa y de crudo. El efecto del pH puede ser utilizado para separar emulsiones de crudo-en-agua, pero por lo general no es eficaz para romper emulsiones de agua-en-crudo. La centrifugación, un método eficaz para algunas emulsiones,

⁵ EOW John S. Electrostatic Enhancement Of Coalescence Of Water Droplets In Oil: A Review Of The Technology. Chemical Engineering Journal 85. Elsevier. 2002.

tiene un alto costo operativo. El tratamiento térmico puede reducir la viscosidad del crudo, permitiendo así que cualquier gota de agua caiga más rápidamente a través de la fase de crudo, y para ayudar en la separación de cualquier gas arrastrado en el petróleo crudo. Sin embargo, el tratamiento térmico y el tratamiento químico son bastante caros, y el térmico tiene una tendencia a resultar en un alto consumo de combustible.⁶

La lentitud con que los líquidos pueden separarse de forma natural en muchas dispersiones de tipo agua-en-crudo tiene consecuencias importantes en muchas operaciones comerciales, causando diferentes problemas en distintas etapas de la producción, también causan corrosión en tuberías, bombas y otros equipos de procesamiento, complicaciones debido al aumento de viscosidad de la emulsión resultante de las gotas de agua finamente dispersas en el crudo. Por otra parte, el costo de transporte de agua en la tubería y el equipo de procesamiento adicional que se requiere para producir crudo de calidad, se deben añadir a los costos de producción. Por lo tanto, hay una serie de razones comerciales para la eliminación de esta agua emulsionada a partir del crudo.

Campos eléctricos externos han sido aplicados ampliamente para romper las emulsiones de agua-en-crudo. Históricamente, el tratamiento eléctrico se ha establecido desde el trabajo pionero de *Cottrell* y *Speed*. Métodos eléctricos para la deshidratación de emulsiones de crudo han sido objeto de un gran número de patentes, relacionados tanto con la técnica, como con el equipo.

En general, un recipiente de coalescencia electrostática se compone de un tanque equipado con electrodos, al menos uno de ellos tiene polo a tierra y al menos otro electrodo está suspendido por un aislante, al cual un potencial eléctrico es aplicado. Sin embargo, algunos sistemas eléctricos específicamente diseñados

⁶ EOW John S. Electrostatic Enhancement Of Coalescence Of Water Droplets In Oil: A Review Of The Technology. Chemical Engineering Journal 85. Elsevier. 2002.

utilizando energía AC tienen todas las rejillas vivas como electrodos. Se han identificado varios posibles mecanismos para las electrocoalescencia, basado en la atracción de cargas opuestas, debido principalmente a los efectos de polarización, y si las cargas netas están presentes. Varios tipos de campos eléctricos han demostrado ser eficaces para electrocoalescencia, tales como campos AC, campos pulsados AC, campos DC y campos pulsados DC. El campo eléctrico AC se ha utilizado desde 1911 hasta la actualidad. La aplicación de campos eléctricos pulsados DC fueron introducidos por *Bailes y Larkai*.

A continuación se presenta un documento de consulta, en el cual se ha consolidado información de diferentes artículos técnicos, de tipo científico y de investigación acerca de los principios de funcionamiento de los tratadores electrostáticos, teorías, estudios de laboratorios, aplicaciones y experimentos que los sustentan.

En la primera parte se realiza una breve reseña sobre las emulsiones de agua en crudo y los diferentes mecanismos usados para su resolución. Posteriormente se encuentran los principios básicos de funcionamiento de los tratadores térmico electrostáticos y algunos experimentos y teorías que los soportan, ventajas y desventajas de uso. Continúa con un breve recuento de tecnologías existentes y que combinan métodos convencionales en su implementación.

Por último se referencian algunos casos de aplicación, en donde se evidencia la importancia del conocimiento del comportamiento del campo, de los fluidos producidos y la realización de estudios de laboratorio y pruebas previos a la implementación de tratadores electrostáticos, con el fin de lograr con éxito una aplicación óptima, que se vea reflejada no solo en la deshidratación eficiente de las emulsiones y la calidad del crudo tratado, sino también en la optimización de las facilidades y beneficios en ahorro de costos.

En la parte final del documento se incluyen tres anexos, en los cuales se amplia de una forma más detallada algunos modelos matemáticos que se han usado para el análisis del comportamiento y uso de campos electrostáticos en la resolución de emulsiones. Se han seleccionado estos trabajos, ya que a partir de estos se da inicio a una serie de estudios en busca de la solución de interrogantes relacionados con los tratadores térmicos electrostáticos, búsqueda de parámetros óptimos de funcionamiento y variables que afectan el rendimiento de los mismos.

1. MARCO TEÓRICO

Como se mencionaba anteriormente, uno de los grandes retos a los que se debe enfrentar la industria del petróleo diariamente es el efectivo tratamiento de crudos, debido a la formación de emulsiones inherente a la actividad de extracción y recuperación. Las emulsiones se vuelven estables por el efecto de la agitación y la acción de agentes emulsificantes que estabilizan la mezcla; cada gota de agua es cubierta por una película de agente emulsificante, quedando estas aisladas entre sí tanto física como eléctricamente.

De la naturaleza de esta película rígida o elástica, depende la estabilidad de la emulsión. Esta película es el resultado de la adsorción de los agentes químicos emulsificantes polares de alto peso molecular (generalmente asfáltenos). Rara vez se encuentra la emulsión inversa, donde la fase dispersa es el aceite y la fase continua o dispersante es el agua.

Básicamente el tratamiento de emulsiones de agua en aceite incluye el romper las películas que rodean a las gotas de agua y mediante la coalescencia formar gotas mayores, ayudando a la precipitación de las mismas. Todas las emulsiones se separan en aceite y agua si se les permite asentar durante un tiempo ilimitado. En efecto, mucha del agua producida con aceite se separa sin la ayuda del calor, productos químicos, u otros recursos.

Sin embargo, comúnmente esta película que rodea las gotas de agua es difícil de romper, y hasta que se rompe, las gotas de agua no coalescen (en tiempo razonable). Por lo tanto, el calor, los productos químicos, la electricidad, los

dispositivos mecánicos, y varias combinaciones de todos estos factores son generalmente necesarios para que se rompa la película que rodea a las gotas de agua y estas coalescan.

Los problemas de desemulsificación de crudos son cada vez más difíciles de resolver, ya que el aceite producido bajo los modernos métodos de recuperación adquiere un grado mayor de emulsificación. Los métodos de tratamiento de las emulsiones han evolucionado notablemente, desde el simple reposo en vasijas convencionales hasta la aplicación de voltajes eléctricos elevados, pasando por los diferentes métodos mecánicos, térmicos y químicos. Generalmente, el tratamiento de las emulsiones se efectúa combinando los efectos gravitacionales, mecánicos, térmicos, químicos y eléctricos. Aunque el conocimiento de la naturaleza de las emulsiones de agua y aceite ha influido en el establecimiento de la tecnología básica para su tratamiento, los enfoques empíricos para el desarrollo de procesos y productos, en estudios de laboratorio, plantas piloto e instalaciones de campo siguen siendo factores decisivos.⁷

Con el fin de separar el agua del crudo, se han desarrollado diferentes sistemas de tratamiento basados fundamentalmente en los siguientes principios básicos:

- Tiempo de reposo y drenaje del agua separada. La deshidratación de crudos es esencialmente un proceso de separación por gravedad. La gravedad proporciona la fuerza natural requerida para remover el agua salada del crudo.
- Uso de calor, La adición de calor permite un asentamiento más rápido de las partículas de agua, a través de los siguientes efectos:
 - Reduce la viscosidad del aceite.

⁷ RODRIGUEZ Oswaldo. Separación Trifásica De Hidrocarburos Y Tratamiento De Emulsiones. 2008

- Por expansión del agua, la película que rodea a las gotas se rompe o se reduce su resistencia.
 - Aumenta el movimiento de las moléculas.
 - Permite acentuar la diferencia de densidades entre las partículas de agua y el aceite.
- Uso de productos químicos. En el tratamiento de una emulsión, es la adición de compuestos y agentes químicos desémulsificantes
 - Uso de electricidad. La base para la unión o coalescencia electrostática de las gotas la proporciona la propia molécula de agua; formada por una parte de oxígeno y dos de hidrógeno que al unirse configuran un campo eléctrico. El centro del componente positivo, el hidrógeno, está en un extremo y el componente negativo, el oxígeno, está en el otro. Esto es un dipolo y responde a la aplicación de un campo eléctrico.⁸

Bajo la influencia de un campo eléctrico una gota de agua se deforma elipsoidalmente. Con el alargamiento de la gota, la película que la rodea puede romperse, facilitando la coalescencia de gotas adyacentes.

De mayor importancia es el desplazamiento de las gotas bajo el efecto eléctrico. Las gotas adyacentes se alinean con las líneas de fuerza del campo eléctrico y con el voltaje de la corriente alterna a frecuencia de red de 60Hz, las gotas se afectarán 120 veces/seg. Al mismo tiempo el electrodo positivo atrae a las cargas negativas y el electrodo negativo a las cargas positivas.

La fuerza de atracción para gotas del mismo tamaño puede expresarse matemáticamente por:

⁸ RODRIGUEZ Oswaldo. Separación Trifásica De Hidrocarburos Y Tratamiento De Emulsiones. 2008

$$F = \frac{6KE^2r^6}{L^4} \quad (1)$$

Donde K es la constante dieléctrica; E es el gradiente eléctrico; r es el radio de la gota y L es la distancia entre los centros de las gotas.

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

Un aumento en el gradiente eléctrico podría acelerar el proceso, pero el voltaje puede fluctuar hasta entre 12000 y 30000 volts y varía inversamente proporcional a la densidad del crudo y a la conductividad de la emulsión por tratar.

- Uso de dispositivos mecánicos, Tales como tanques de decantación, tanque de lavado, deshidratadores mecánicos, entre otros, al igual que la adición de diluyentes para reducir la viscosidad.

1.1 SELECCIÓN DEL PROCESO Y EQUIPO⁹

El tratamiento de las emulsiones se realiza en dos etapas básicas: *la deshidratación*, donde el contenido de agua se reduce a 1 o 2%; *el desalado*, donde se inyecta agua dulce o poco salada que disminuye la concentración de sal del agua remanente.

⁹http://www.ingenieria.unam.mx/~jagomez/materias/ARCHIVOS_CONDUCCION/CAPITULO%20V%20II.pdf

El objetivo primordial es reducir el contenido de agua y sal del crudo, antes de su refinación o venta tanto como sea posible, llevándolo a las especificaciones exigidas por los entes reguladores.

Al considerar el tratamiento de crudos de alta viscosidad, la ecuación de Stokes permite resolver varios problemas. Como la diferencia de densidades entre el agua y el aceite es mínima y la viscosidad es alta, debe buscarse la aplicación de mecanismos de coalescencia para aumentar el tamaño de las gotas. La aplicación de voltajes eléctricos proporciona uno de los métodos con mejores resultados. La temperatura de tratamiento puede determinarse en función de la densidad relativa del aceite.

Los diferentes tipos de unidades de deshidratación y desalado de crudos pueden compararse considerando los factores operacionales y económicos, además de su disponibilidad en el mercado.

1.2 EQUIPOS UTILIZADOS EN LA DESHIDRATACIÓN DE CRUDOS ¹⁰

Una vez que el crudo es producido a nivel de fondo de pozo, la producción proveniente de los diferentes pozos se lleva a un múltiple de producción, a través del cual circula la mezcla gas-crudo-agua que pasará posteriormente a los separadores gas-líquido donde se elimina el gas disuelto. Luego, la emulsión pasa a un separador gravitacional para eliminar el agua libre y el crudo no emulsionado.

¹⁰ MARFISI Shirley, et al. Deshidratación De Crudo Principios y Tecnología. CUADERNO FIRP S853-PP. 2004.

La emulsión restante se lleva al sistema de tratamiento seleccionado para la aplicación de calor y/o corriente eléctrica, y finalmente el crudo separado pasa a un tanque de almacenamiento. El punto de inyección de química es a la salida del múltiple de producción, antes de los separadores.

2. FUNCIONAMIENTO DE LOS TRATADORES TÉRMICOS ELECTROSTÁTICOS

2.1 GENERALIDADES

Los tratadores térmicos electrostáticos generalmente están compuestos por dos secciones principales bien diferenciadas.

En una primera sección, la mezcla crudo-agua se calienta a modo de reducir la viscosidad de los hidrocarburos, romper la emulsión y favorecer la separación entre las fases líquidas. Esta sección contiene uno o más tubos de fuego que transmiten el calor a la mezcla por medio de quemadores de gas. El cálculo del diámetro y largo del tubo de fuego, son parámetros importantes de diseño, de modo que no superen los flujos calóricos máximos permitidos por la normativa.

En la segunda sección, etapa electrostática, la mezcla se somete a una circulación eléctrica que produce un campo magnético y debido a la diferente polaridad entre las moléculas de hidrocarburo y de agua, se favorece la separación. Las tecnologías más antiguas realizan la circulación de electricidad mediante corriente continua, mientras que las más modernas y eficientes mediante polaridad dual o frecuencia dual.

Estas fuerzas de atracción electrostática pueden ser mucho más grandes que las fuerzas de gravedad presentes. La relación de fuerza electrostática con la fuerza de gravedad es de aproximadamente de 1.000 para gotas de agua de 4 micras de

diámetro en crudo de 20° API expuesto a un gradiente eléctrico típico de 5 kV/pulgada.

Las fuerzas eléctricas son esencialmente fuerzas de corto alcance. Cuando el espaciamiento entre las gotas es grande, se necesitan otras fuerzas para producir gotas en estrecha proximidad y permitir que las fuerzas electrostáticas contribuyan a la coalescencia de las gotas. Varios mecanismos pueden contribuir a esto, incluyendo el movimiento browniano, la sedimentación, la tensión laminar, la turbulencia cizallante o de corte o inercia turbulenta, Urdahl (2001)¹¹

Cuando la distancia entre las gotas es suficientemente pequeña, las fuerzas electrostáticas llevan las gotas al contacto y en la etapa de adelgazamiento de la película comienza el proceso de coalescencia. En sistemas no perturbados este proceso puede durar varios minutos, con las gotas simplemente rodando entre ellas sin que se fusionen.

Allan y Mason (1962) mostraron que este tiempo de retardo es una función fuertemente decreciente de la intensidad de campo debido a una tasa mucho más rápida de adelgazamiento de película o a una interrupción de la película que ocurre en espesores mayores. A partir de estas consideraciones se hace evidente lo importante que es aumentar la frecuencia de colisión mediante la aplicación del régimen de flujo o mediante la optimización de la forma de la unidad de coalescencia para favorecer la turbulencia y la mezcla. Sin embargo se requiere una cuidadosa optimización del diseño del equipo electrocoalescente, ya que demasiada turbulencia inducirá el rompimiento de las gotas, re-dispersión de las gotas muy pequeñas, y por lo tanto una disminución en la eficacia de la deshidratación.

¹¹ OM Midtgard. Electrostatic Field Theory And Circuit Analysis In The Design Of Coalescers With Pulsed DC Voltaje. Chemical Engineering Journal 151. 2009.

Para obtener emulsiones muy estables, donde las películas fuertes están presentes en la interfase agua/crudo, el proceso de adelgazamiento de película puede ser tan lento para permitir formaciones de cadenas largas estables de gotas de agua que, a medida que se amplifica el voltaje, llenen progresivamente la brecha entre los electrodos (*Taylor, 1988; Siöblom 2003*). A medida que ocurre esta condición, la conductividad de la emulsión aumentará fuertemente y el flujo de corriente determinará un colapso de diferencia de potencial. En este caso, un electrocoalescedor por sí solo no puede trabajar y otras técnicas de mitigación de emulsión, como el tratamiento térmico o inyección de desemulsificantes químicos, tendrán que ser usados.

Los primeros electrocoalescedores para la industria del petróleo eran grandes recipientes que contenían electrodos, divididos en un "espacio de tratamiento" para el crecimiento de las gotas y una "zona de decantación" para la fase de separación bajo condiciones de flujo laminar. A pesar de su gran tamaño, la eficacia fue baja y los tiempos de residencia largos, *Urdahl (2001)*. Como una respuesta a la necesidad de aumentar el rendimiento de la deshidratación, se desarrollaron nuevos conceptos y diversas tecnologías están ahora disponibles en el mercado.¹²

Los tratadores electrostáticos son usados generalmente cuando existen las siguientes circunstancias:

- Cuando el gas combustible para calentar la emulsión no está disponible o es muy costoso.
- Cuando la pérdida de gravedad API es económicamente importante.

¹² LESS Simone, et al. The electrocoalescers' technology: Advances, strengths and limitations for crude oil separation. Volume 81. 2012.

- Cuando grandes volúmenes de crudo deben ser tratados en una planta a través de un número mínimo de recipientes.
- Cuando la velocidad de asentamiento por gravedad es muy lenta, dada por la *Ley de Stokes*. Por ejemplo una gota de agua de 20 micras de diámetro en un crudo de 33 °API a 100 °F y una viscosidad de 6,5 cp se asienta a una velocidad de 0,07 ft/hr.

Los componentes principales de para la creación del campo eléctrico, en este tipo de tratador son:

- Fuente de poder o transformador, el cual convierte el voltaje de línea (corriente alterna de una fase, 220 a 480 volts de 50 o 60 ciclos) al voltaje de línea requerido que alimenta a los electrodos de carga.
- Electrodo inferiores o de carga.
- Electrodo a tierra que permanecen suspendidos sobre los electrodos de carga.

Se fabrican sistemas de electrodos de alta y baja velocidad, los primeros se utilizan en crudos ligeros de baja viscosidad y con emulsiones de alta conductividad eléctrica; los electrodos de baja velocidad son recomendables para crudos de alta viscosidad y emulsiones de baja conductividad eléctrica.

La emulsión se reparte en la sección eléctrica mediante un distribuidor, que la obliga a pasar varias veces a través del campo eléctrico.

La temperatura de tratamiento adecuado para este tipo de tratadores, se determina en función de la densidad del crudo.

2.2 FUNDAMENTOS DE LA DESHIDRATACIÓN POR CAMPO ELÉCTRICO

La separación de las fases mediante campo eléctrico utiliza varios mecanismos para promover la floculación (contacto de las gotas de agua). Estos mecanismos proporcionan una separación eficiente de las fases.

En general, el mecanismo de coalescencia eléctrica consiste en aplicar un campo eléctrico al sistema emulsionado. Este campo provoca que dos gotas, por ejemplo, con carga eléctrica y a una distancia considerable se unan debido a la fuerza eléctrica; es decir las cargas positivas que rodean a la gota de agua se orientarán hacia el cátodo y las negativas al ánodo.

Esta influencia provocará que las gotas se fusionen en una más grande, logrando más rápidamente su precipitación debido a la fuerza de gravedad.

Un campo eléctrico incrementa la coalescencia de las gotas dispersas en el crudo, por dos mecanismos que actúan simultáneamente:

- Sometidas a un campo electrostático, las gotas de agua adquieren una carga eléctrica neta.
- La distribución al azar de las gotas de agua en el crudo, al pasar por el campo electrostático se alinean con su carga positiva orientada al electrodo cargado (negativo).

Además, una carga electrostática del orden de miles de voltios, usada por tratadores de crudo puede también reducir la tensión. El desequilibrio de la carga eléctrica creado en la superficie de la gota del agua creará inestabilidad adicional de la misma, mientras que simultáneamente proporciona una carga neta de la gota (campo DC) o la polarización (campo AC) acelera su fusión.

En los componentes eléctricos principales de un tratador electrostático de corriente alterna (CA), se encuentra el transformador que convierte el voltaje de línea al voltaje requerido llegando a ser este de hasta 16,000 V o más.

Este alto voltaje es alimentado a través de un buje aislado al electrodo inferior, también llamado electrodo cargado. El electrodo a tierra está suspendido y aislado, arriba del electrodo cargado. Usualmente los dos electrodos horizontales están paralelos a una distancia de 6 a 8 pies.

2.3 CONDICIONES DE LA GOTA DE AGUA QUE AFECTAN EL DESEMPEÑO DE LA ELECTROCOALESCENCIA¹³

Cualquiera que sea el método electrostático seleccionado, una comprensión del comportamiento de la gota de agua dentro de un campo de voltaje ayudará al diseñador a optimizar la tasa de tratamiento, la temperatura, la dosificación química y el voltaje aplicado.

2.3.1 Agua dipolo.

En un campo electrostático tipo AC, la fuerza impulsora para la coalescencia de las gotas se basa en el dipolo de la molécula de agua. Aplicando voltaje a un electrodo AC, alinea las moléculas de agua creando una cadena de gotas de agua con polos positivos y negativos. Las gotas que están muy cercanas migrarán hacia la otra y se unirán. Sin embargo, un campo AC de 60 Hz altera la polaridad hasta 120 veces por segundo y la interfaz de gota no se carga. Tampoco el campo AC promueve la ruptura de la película que expone una superficie de agua limpia a las gotas adyacentes.

¹³ SAMS Gary, et al. The Practiced Art Of Emulsion Resolution In Electrostatic Processes. NATCO. 1999.

2.3.2 Carga.

En un campo electrostático DC, un movimiento continuo de electrones carga la interfaz de gota de agua. La capacidad de cargar la interfaz de las gotas depende principalmente de la magnitud del voltaje y la conductividad del crudo. Los estudios han demostrado que los niveles de voltaje DC mas altos son capaces de entregar una carga significativa a incluso las gotas de agua más pequeñas y promoviendo así la coalescencia. Además, el campo DC promueve el estiramiento de la gota que rompe la película exterior y mejora la tasa de coalescencia de las gotas.

2.3.3 Conductividad.

En general, para procesos de tratamiento electrostático, el petróleo es considerado una fase continua no conductora.

Los componentes orgánicos puros pueden ser tratados electrostáticamente, sin embargo, la baja conductividad generalmente reduce la carga de las gotas y dificulta el movimiento de las gotas, la coalescencia y la separación.

En los crudos altamente refinados donde la conductividad es extremadamente baja, campos electrostáticos AC y DC dependen del dipolo del agua dispersa para promover la coalescencia de las gotas. Sin embargo, en procesos de tratamiento DC, la conductividad del aceite es esencial en la entrega de carga a las gotas de agua dispersas. El campo DC transfiere una carga a la gota de agua dispersa proporcional al gradiente de voltaje y la conductividad del crudo.

Estudios de laboratorio a pequeña escala han demostrado que un aumento limitado de la conductividad del crudo puede mejorar la coalescencia de las gotas de agua en una cantidad significativa en algunos petróleos crudos. Desafortunadamente, una alta conductividad del crudo requiere un aumento en la

fuente de alimentación conectada y limita el gradiente de voltaje desarrollado entre los electrodos.

2.3.4 Coalescencia / Separación.

A medida que la gota de agua avanza a través del campo electrostático y se produce coalescencia y separación, las características de la fase dispersa cambian. Estos cambios tienden a hacer lenta la tasa de coalescencia y separación dejando un pequeño porcentaje de agua no tratada. Los siguientes cambios se producen a la fase dispersa.

La *coalescencia* de la fase dispersa hará lo siguiente:

- Aumentar los diámetros de las gotas
- Aumentar el espaciado entre gotas
- Reducir la cantidad de las gotas
- Aumentar las fuerzas de atracción entre las gotas
- Reducir el área interfacial total
- Reducir la movilidad de las gotas

La *separación* de la fase dispersa hará lo siguiente:

- Reducir el porcentaje de volumen de la gota
- Reducir el área interfacial superficial
- Aumentar el espaciado entre gotas
- Disminuir la fuerza de atracción entre las gotas
- Reducir la movilidad de las gotas

Separación sin coalescencia acumula una emulsión sin resolver en la interfaz del recipiente entre las fases de crudo y agua. Esta acumulación de emulsión forma una zona de decantación obstaculizada que, si no se resuelve, "corta" el campo

eléctrico, limita el gradiente de voltaje y hace más lenta la coalescencia de las gotas.

Las tasas de coalescencia mejoran cuando el voltaje aplicado es pulsado o modulado, esta técnica ayuda en la desestabilización de las gotas de agua y en la reducción de la emulsión sin resolver.

2.3.5 Movilidad.

Para flujo vertical, en deshidratadores de petróleo, la movilidad de la gota de agua debe ser controlada en ambas direcciones, horizontal y vertical. Movimiento horizontal insuficiente (velocidad) falla al promover la coalescencia de las gotas de agua dispersas. La imposibilidad de lograr suficiente coalescencia de gotas resulta en movimiento ascendente excesivo de las gotas de agua (es decir, agua de arrastre).

Dado que los campos de AC se basan únicamente en el dipolo del agua para promover la coalescencia, la movilidad de las gotas es limitada. Sin embargo, una vez que una carga neta de la gota se adquiere en un campo DC, la movilidad de la gota se incrementa significativamente. Voltajes electrostáticos más altos mejoran la movilidad horizontal de la gota. Sin embargo, si voltajes más altos reducen la tensión interfacial, el resultado puede ser una dispersión de las gotas de agua en lugar de coalescencia.

2.3.6 Dispersión.

El aumento de la dispersión de las gotas mejora la eficacia del contacto entre las gotas del agua producida, de la salmuera y la inyectada, agua de dilución. Las técnicas utilizadas para lograr altos niveles de dispersión son la caída de presión a través de mezcladores estáticos o válvulas y los gradientes de alto voltaje.

Cualquier técnica de dispersión produce gotas de agua más pequeñas y finamente dispersas. Estas gotas más pequeñas aumentan el área interfacial superficial para una mejor eficacia de contacto. Sin embargo, una dispersión fina sólo es efectiva al aumentar el rendimiento del desalador cuando la coalescencia se produce entre la salmuera y el agua de dilución.

2.4 MEJORA DE LA DESHIDRATACIÓN Y DESALADO EN CAMPOS MADUROS USANDO CAMPOS ELÉCTRICOS AC, DC Y AC/DC ¹⁴

Los campos maduros de petróleo a menudo contienen altos cortes de agua y un mayor contenido de finos. La combinación de una gran población de gotas de agua y finos forman emulsiones de petróleo crudo muy estables que son difíciles de romper.

Los cortes de agua más altos proporcionan una mayor viscosidad de la emulsión de crudo debido a la población más grande de pequeñas gotas de agua, que a menudo conduce a una necesidad de temperaturas de funcionamiento más altas, problemas de producción frecuentes y dosificación alta de desemulsionante.

Otro desafío es el arco de corriente entre los electrodos, como resultado de los cortes de agua más altos. Típicamente los tratadores de deshidratación y desalado de crudos en campos maduros utilizan la tecnología electrostática tipo AC, la cual es menos efectiva en el tratamiento de los crudos con cortes de agua más altos.

¹⁴ SELLMAN Erik, et al. Improved Dehydration and desalting of mature crude oil fields. Cameron Process Systems. Conference Paper. SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, 10-13 March, Manama, Bahrain. SPE-164289-MS. 2013.

El uso de la tecnología electrostática combinada de AC/DC proporciona un enfoque de dos puntas, donde se elimina el volumen mayor de agua en un campo de AC más débil y el resto de las gotas de agua más pequeñas se eliminan en un campo de corriente continua DC más fuerte. Mejoras adicionales a los tratadores de AC/DC incluyen el uso de placas de electrodos compuestos, campos electrostáticos modulados, así como una mejor distribución de fluidos en el interior de los tratadores.

Los tratadores AC/DC proporcionan una oportunidad atractiva para el reequipamiento de tratadores AC existentes en campos maduros y hacer los tratadores más adecuados para la deshidratación de las emulsiones de crudo de estos campos.

2.4.1 Efectos de la Conductividad.

La conductividad del crudo juega un papel importante en la función de los campos electrostáticos dentro de los tratadores. Si la conductividad del crudo es muy baja, la carga electrostática tiene dificultades para llegar a las gotas de agua dispersas y si es muy alto el gradiente de voltaje promedio aplicado se reduce debido al decaimiento del voltaje.

La conductividad del crudo, medida en NanoSiemens por metro (nS/m), se puede dividir en las siguientes categorías generales:

- Conductividad Baja: Por debajo de 500 nS/m
- Conductividad Media: 500 – 1000 nS/m
- Conductividad Alta: 1000 – 2500 nS/m
- Conductividad Ultra alta: > 2500 nS/m

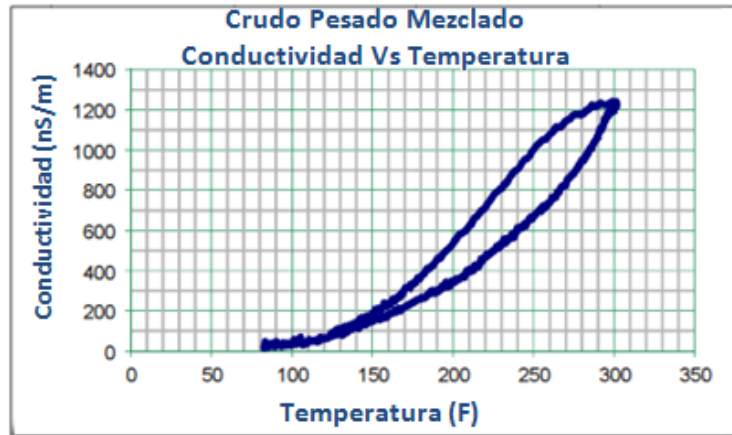
La conductividad del crudo se ve afectada por la temperatura del proceso y como se ilustra en la Ilustración 1, la conductividad del crudo puede aumentar varias

veces desde la temperatura ambiente a la temperatura de proceso en los tratadores de crudo. Por tanto, es importante medir la conductividad del aceite a la temperatura de funcionamiento y no sólo a temperatura ambiente. Cameron ha desarrollado un equipo para medir la conductividad del petróleo crudo a temperaturas elevadas.

También se ha observado que cuando diferentes petróleos crudos se mezclan, la conductividad de la mezcla de petróleo crudo a menudo tiene una conductividad mucho mayor. Esto se experimenta a menudo en las refinerías donde el tipo de crudo puede incluir diferentes petróleos crudos y donde la mezcla se puede cambiar con frecuencia dependiendo del crudo procedente de la organización de compras de la refinería.

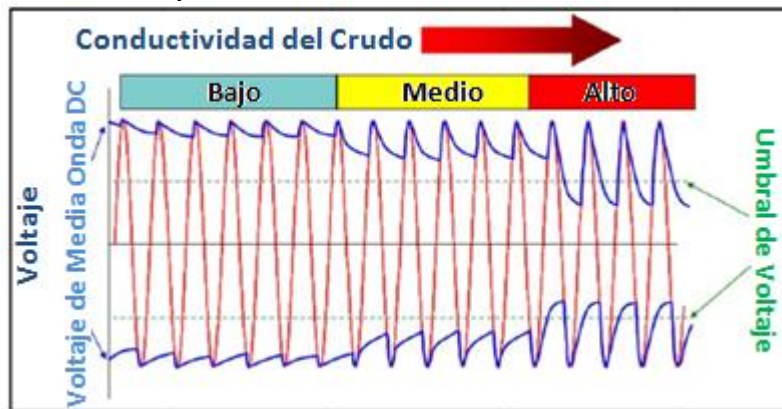
El efecto de la mayor conductividad del crudo es un campo electrostático AC más débil, lo que resulta en deshidratación menos eficaz, ya que las gotas de agua más pequeñas no pueden ser alcanzados de manera efectiva por el gradiente de voltaje más bajo. La alternativa es utilizar unidades de potencia mayores.

Ilustración 1 Conductividad del crudo como una función de la temperatura del crudo



Fuente: SELLMAN Erik, et al. Improved Dehydration and desalting of mature crude oil fields. Cameron Process Systems. Conference Paper. SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, 10-13 March, Manama, Bahrain. SPE-164289-MS. 2013. Pág. 4.

Ilustración 2 Decaimiento del voltaje como una función del incremento de conductividad del crudo



Fuente: SELLMAN Erik, et al. Improved Dehydration and desalting of mature crude oil fields. Cameron Process Systems. Conference Paper. SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, 10-13 March, Manama, Bahrain. SPE-164289-MS. 2013. Pág. 4.

2.4.2 Sólidos y Finos

Los finos más grandes (pequeños sólidos) se depositan en el fondo de los tratadores y a veces también en la estructura de soporte del sistema de rejilla electrostática. Los sólidos sedimentados en la parte inferior del tratador se pueden eliminar con un sistema de lavado de lodo convencional o el uso de un

sistema de eliminación de sólidos más eficaz, tal como el Fludizador Mozley o HydroTrans. Los sólidos en las varillas del soporte dentro del tratador añaden peso extra y en el caso extremo pueden almacenarse hasta un punto en que la carga adicional es superior a la carga de diseño para el sistema de rejilla, dando lugar a fallas en el sistema de rejilla y un mantenimiento y/o reparación extensivo. La acumulación de sólidos significativos puede causar:

- Reducción de volumen del tratador
- La formación de arco entre los electrodos y los sólidos
- La acumulación de corrientes parásitas que disminuyen la eficiencia del tratador

Los finos más pequeños pueden acumularse en la interfaz crudo/agua y ayudar a la creación de capas de emulsión muy apretadas. Esto puede ser contrarrestado mediante un sistema de extracción de interfaz, que ayudará a la operación, pero generará la necesidad de un sistema de tratamiento separado y diferente para el material de extracción de la interfaz. Para tratadores que utilizan unidades de potencia modulada, la experiencia demuestra que someter el colchón de emulsión a picos de voltaje intermitente puede reducir significativamente la capa y también contribuir a un menor BS&W en el crudo tratado.

2.4.3 Probador de Susceptibilidad Electrostática

La mayoría de los procesos de deshidratación de petróleo crudo utilizan productos químicos de producción para mejorar el rendimiento de la separación. El producto químico desemulsionante trabaja en la superficie de la gota de agua y mediante la reducción de la tensión interfacial se mejora la coalescencia de las gotas de agua.

La tensión interfacial desempeña un papel importante en un proceso de separación mecánica. Una alta tensión interfacial proporciona gotas de agua

estables, pero impide la coalescencia de las gotas. Una baja tensión interfacial ayuda a las gotas de agua a coalescer, pero puede fácilmente provocar la degradación de gotas, siempre y cuando las gotas sean cizalladas por el movimiento de fluido o caídas de presión repentinas.

El campo electrostático también reduce la tensión interfacial y es importante que la combinación del desemulsionante utilizado y el campo electrostático no produzca una tensión interfacial muy baja (Ej.: por debajo de 2 dinas/cm), ya que esto podría causar la ruptura de la gota de agua cuando el crudo está fluyendo. Por tanto, es vital que el producto químico desemulsionante sea probado junto con el campo electrostático, ya que muchas veces el desemulsionante óptimo obtenido en una prueba de botella no es el óptimo para uso en un tratador electrostático.

El Probador de Susceptibilidad Electroestática (EST) es una herramienta muy eficaz para la selección y la dosificación óptima del producto químico desemulsionante en un tratador electrostático y también una manera eficaz para la detección de tipo óptimo de la tecnología electrostática a usar. El EST utiliza 200 ml de muestra de una emulsión de crudo/agua y se puede aplicar varios campos electrostáticos de AC, DC y AC/DC.

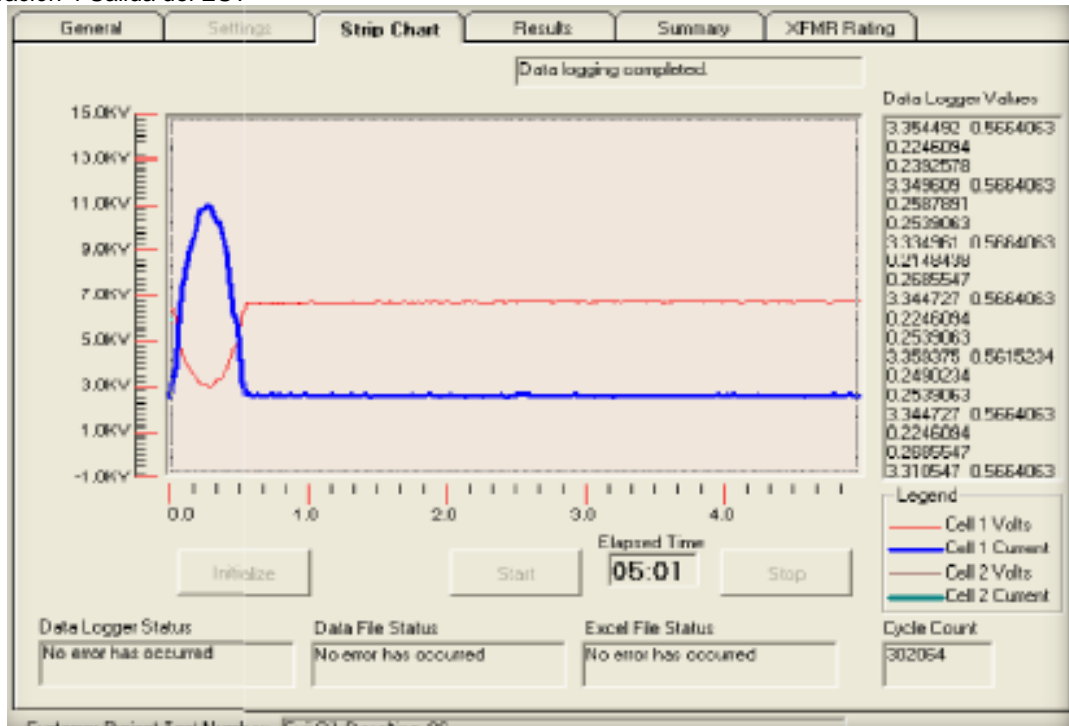
El EST proporciona información valiosa sobre el desemulsionante y selección de la tasa de dosis. El EST impone un gradiente de voltaje entre dos placas de electrodos insertados en la emulsión de crudo y grafica la resolución de la emulsión como una función del tiempo. También compara el tiempo necesario para la resolución de la emulsión de crudo y proporciona recomendaciones valiosas y fiables sobre la selección del desemulsificador y la tasa de dosis. Esto se podrá ver reflejado en el OPEX de la facilidad.

Ilustración 3 Probador de Susceptibilidad Electrostática



Fuente: SELLMAN Erik, et al. Improved Dehydration and desalting of mature crude oil feeds. Cameron Process Systems. Conference Paper. SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, 10-13 March, Manama, Bahrain. SPE-164289-MS. 2013. Pág. 6.

Ilustración 4 Salida del EST



Fuente: SELLMAN Erik, et al. Improved Dehydration and desalting of mature crude oil feeds. Cameron Process Systems. Conference Paper. SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, 10-13 March, Manama, Bahrain. SPE-164289-MS. 2013. Pág. 6.

2.4.4 Tratadores Electrostáticos

Los Tratadores electrostáticos suelen tener flujo de crudo vertical hacia arriba e incluyen una serie de elementos comunes para todos los tratadores electrostáticos:

- Sistema de distribución de entrada
- Rejillas de electrodos
- Unidades de potencia o alimentación
- Contención de recipientes a presión
- Ensamblaje de alto coltaje con buje de entrada
- Tubería del colector
- Control de nivel
- Sistema de sand jetting / lavado de lodo

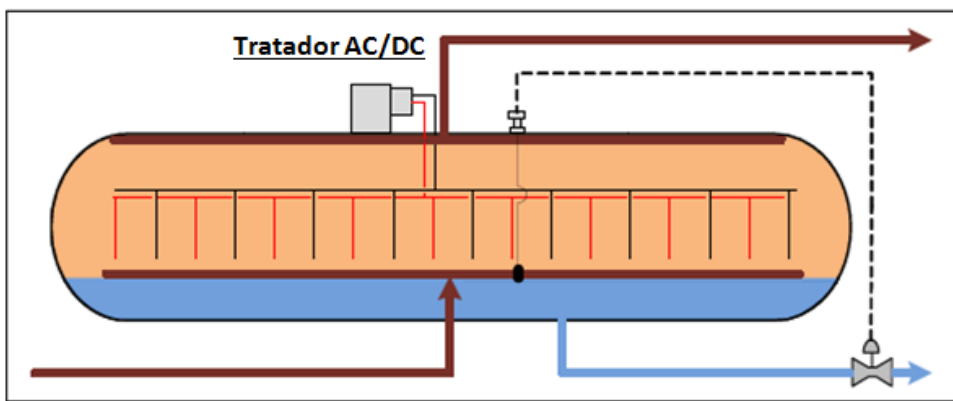
Los tratadores AC normalmente tienen sistemas de electrodos compuestos por una serie de varillas, como un sistema de rejilla. Las rejillas pueden ser energizadas o conectadas a tierra, con opciones para uno, dos o tres rejillas calientes. Si se usan tres rejillas calientes se ubican a 120 grados fuera de fase y cada rejilla energizada requiere su propia unidad de potencia. La unidad típica de alimentación AC tiene voltajes de salida secundarios de 14, 16, 18, 20 y 22 kVCA, con una tendencia a voltajes más bajos utilizados para los crudos más pesados.

Los tratadores AC/DC tienen dos juegos de soporte de barras o varillas para los electrodos de placa positivos y negativos, respectivamente. Los electrodos de placa están orientados transversalmente a la longitud del tratador y se instalan verticalmente. Las placas pueden ser de acero o de material compuesto. Este último material es beneficioso en el tratamiento de los crudos con cortes de agua más altas, donde la supresión de arco es importante.

Los tratadores de AC/DC tienen un campo más débil de AC entre los electrodos de placa y la fase de agua puesta a tierra, donde la remoción de agua toma lugar.

El campo DC más fuerte está contenido dentro del área del electrodo y proporciona un gradiente de voltaje mucho más fuerte que el campo de corriente alterna AC y es por lo tanto capaz de eliminar las pequeñas gotas de agua que pasan por el campo de AC. El voltaje típico es de 24 kVDC para un campo no modulado y hasta de 60 kVDC para campos modulados.

Ilustración 5 Tratador AC/DC



Fuente: SELLMAN Erik, et al. Improved Dehydration and desalting of mature crude oil fields. Cameron Process Systems. Conference Paper. SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, 10-13 March, Manama, Bahrain. SPE-164289-MS. 2013. Pág. 7.

2.4.5 Fuerzas Electroestáticas

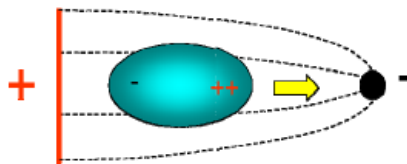
La introducción de campos electrostáticos al proceso del crudo marcó una mejora significativa en el tratamiento de dispersiones de agua en crudo. Los campos electrostáticos generan fuerzas que ayudan a la creación de condiciones para mejorar la coalescencia. Hay tres fuerzas electrostáticas primarias que son atracción dipolar, electroforesis y dielectroforesis. Estas fuerzas se explican y se ilustran a continuación.

2.4.5.1 Dielectroforesis

La dielectroforesis es una fuerza de atracción que se auto-establece en un campo eléctrico no uniforme entre las gotas que tienen permitividad que difiere de la permitividad del líquido que lleva, Atten (1993). Esta fuerza presenta las siguientes dependencias, Lundgaard (2006):

$$F_{DP} \propto (r^3, \epsilon_{oil}, \nabla E^2) \quad (2)$$

Ilustración 6 Fuerza dielectroforética



Fuente: SELLMAN Erik, et al. Improved Dehydration and desalting of mature crude oil fields. Cameron Process Systems. Conference Paper. SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, 10-13 March, Manama, Bahrain. SPE-164289-MS. 2013. Pág. 7.

La ecuación 2 señala que la fuerza dielectroforética es independiente de la distancia entre las gotas, pero que depende del gradiente del campo eléctrico. La dielectroforesis no requiere partículas cargadas y surge del hecho de que cualquier dipolo tiene una separación finita entre cantidades iguales de cargas eléctricas positivas y negativas.

Cuando un campo electrostático no uniforme se alinea con el dipolo, un extremo del dipolo estará en un campo más débil que el otro, resultando en una fuerza neta halando el dipolo hacia el lugar de mayor intensidad de campo. La dielectroforesis es un efecto predominante en coalescencia dipolo, donde se puede prever que un par de gotas de agua cercanas transportadas en crudo se atraen entre sí tratando de alcanzar el punto de máxima intensidad de campo entre ellas, Eow (2000). Se debe tener en cuenta que, en casos prácticos, la dielectroforesis existe incluso en campos electrostáticos uniformes debido a la presencia de varias gotas que

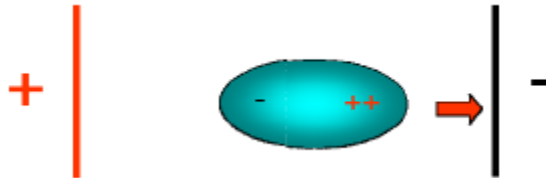
actúan siempre distorsionando las líneas de campo. Las fuerzas dielectroforéticas son proporcionales al radio de las gotas elevado a la potencia de tres, y por lo tanto pueden ser ineficaces removiendo las gotas más pequeñas, que constituyen la fracción residual de agua en emulsiones separadas por gravedad.

2.4.5.2 Electroforesis

La electroforesis es una fuerza de atracción o de repulsión establecida en un campo eléctrico uniforme entre las gotas cargadas y los electrodos. Su principio físico se basa en la separación de la carga entre la superficie de la partícula y el líquido que la rodea. Un campo eléctrico aplicado actúa sobre la densidad de carga resultante, haciendo que la partícula, el líquido que la rodea o ambos se muevan, Eow et al. (2000). La ecuación 2 muestra las variables que determinan la intensidad de la fuerza electroforética en el momento de la carga de las gotas. Esta intensidad, naturalmente disminuirá tras el tiempo de relajación $\tau = \left(\frac{\epsilon_{oil}}{\sigma_{oil}}\right)$.

$$F_{EP} \propto (r^2, \epsilon_{oil}, E^2) \quad (3)$$

Ilustración 7 Fuerza Electroforética.



Fuente: SELLMAN Erik, et al. Improved Dehydration and desalting of mature crude oil fields. Cameron Process Systems. Conference Paper. SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, 10-13 March, Manama, Bahrain. SPE-164289-MS. 2013. Pág. 7.

La ecuación 3 muestra que la fuerza electroforética es independiente de la separación entre las gotas y tiene el potencial de ser muy eficaz para el propósito de separación de crudo/agua. En campos eléctricos DC, debido a que no cambia

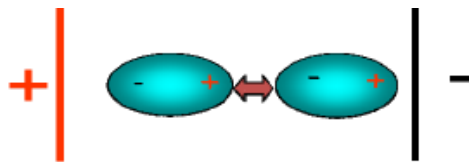
la polaridad, esta fuerza inducirá que las gotas cargadas se muevan hacia el electrodo de carga opuesta con una velocidad determinada por la viscosidad de la fase continua. Si lo hace, es probable que un número de gotas en el flujo vayan a colisionar y fusionarse, Urdahl (2001). En campos AC, no hay carga neta impartida a las gotas, entonces, la electroforesis sólo provocará que el agua oscile alrededor de una posición media a una frecuencia doble que la del campo eléctrico, Lundgaard (2006), y por lo tanto no contribuirá a la colisión y coalescencia de la gota. Se ha demostrado que la electroforesis es el mecanismo eléctrico más fuerte disponible para mover las gotas transportadas en un flujo de líquido continuo, Warren & Sams (2003). Desafortunadamente, los mecanismos de corrosión promovidos por las corrientes unidireccionales y la tendencia a corto circuito a bajos contenidos de agua han desalentado el uso de campos altos DC en tecnologías electrocoalescentes, Eow (2000).

2.4.5.3 Atracción Dipolar

La tercera fuerza es la atracción dipolar, lo que provoca una atracción mutua entre gotas vecinas debido a la interacción de los dipolos inducidos por el campo eléctrico, Atten (1993). Esta fuerza surge debido a la alta conductividad del agua producida y muestra las siguientes dependencias, Eow (2000):

$$F_{DIP} \propto (r^6, \epsilon_{oil}, E^2, s^{-4}) \quad (4)$$

Ilustración 8 Atracción Dipolar



Fuente: SELLMAN Erik, et al. Improved Dehydration and desalting of mature crude oil fields. Cameron Process Systems. Conference Paper. SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, 10-13 March, Manama, Bahrain. SPE-164289-MS. 2013. Pág. 7.

La ecuación 4 muestra que la fuerza de atracción dipolar depende en gran medida del tamaño de las gotas y la distancia entre ellas. Bajo el supuesto de una emulsión homogénea mono-dispersa, la distancia entre las gotas es inversamente proporcional a la fracción de volumen X de agua dispersa Devulapalli y Jones (1999):

$$S = r \left(\frac{4/3\pi}{X} \right)^{4/3} \quad (5)$$

Por lo tanto, para la mayoría de las emulsiones, se puede esperar que la atracción dipolar se vuelva menos eficaz a medida que el contenido de agua es reducido, debido a que la distancia entre las gotas, aumenta. Además, como las grandes gotas coalescidas sedimentan rápidamente, dejando gotas más pequeñas dispersas en la emulsión, la contribución del efecto de atracción dipolar disminuirá a lo largo del proceso de electrocoalescencia.

Debe considerarse una última fuerza inducida por el efecto de polarización de las gotas. Esta es la deformación de gota causada por la carga opuesta de los dos extremos de una gota de agua y por otras tensiones eléctricas.

Estos efectos compiten con la fuerza de la tensión interfacial, que normalmente mantiene las gotas de agua como esferas de radio, r , causando que la gota se deforme y se elongue en la dirección del campo eléctrico, tomando la forma de un elipsoide alargado de excentricidad e , como está dada en (Eow 2000; Lundgaard 2006):

$$e^2 = \left(\frac{9\epsilon_{oil}rE^2}{16\pi\lambda} \right) \quad (6)$$

Bajo tales efectos, las gotas se deforman hasta una relación de ejes crítico en el que se vuelven inestables y se rompen. Se encontró que el índice de deformación crítica se define como la relación entre la longitud crítica de una gota alargada y su

diámetro original es una constante en el orden de 1,9 en un trabajo desarrollado por Taylor (1964). El correspondiente umbral de campo, E_c , expresado por la ecuación 7, es el valor por encima del cual la interfaz se vuelve inestable y la gota se divide en gotas de un radio mucho más pequeño, Atten (1993).

$$E_c = 0.648 \sqrt{\frac{\lambda}{2\varepsilon_{oil}r}} \quad (7)$$

Resolviendo la ecuación 7 con valores de E_c , λ y ε_{oil} para mezclas de crudo agua/crudo, se muestra que sólo las grandes gotas con diámetros mayores de 650 micras aproximadamente se pueden romper. Incluso si difícilmente se encuentran tales gotas grandes en problemas prácticos de separación del petróleo crudo, la deformación de la interfaz debe tenerse en cuenta al considerar la interacción de las gotas muy cercanas. Los aumentos locales del campo electrostático pueden ser lo suficientemente altos para inducir una deformación significativa y desestabilizar las gotas que conducen a la coalescencia o al rompimiento, Atten (1993).

2.4.5.4 Campos electrostáticos

Hay varios tipos de campos electrostáticos que pueden ser utilizados para mejorar la coalescencia de las gotas de agua dentro del tratador. Estos incluyen:

- Campo de corriente alterna (AC)
- Campo de corriente continua (DC)
- Combinación de campos de AC/DC como en tecnologías Dual Polarity™, Elect°Dynamic Desalter™ y Dual Frequency™.

Las tecnologías de Polaridad Dual, Doble Frecuencia y Desalador Electrodinámico también pueden ser moduladas en varias formas en función de mejorar aún más la deshidratación y el rendimiento de desalación.

2.4.5.5 Tecnología de AC

La tecnología de corriente alterna (AC) es una tecnología de 99 años (2014) y fue durante mucho tiempo la principal tecnología utilizada para la deshidratación de crudo. Esta tecnología aplica un campo eléctrico alterno de 50 a 60 Hz a la emulsión de crudo, haciendo que las gotas de agua se elonguen debido a la fuerza de atracción dipolar y mejorando la coalescencia de las gotas de agua por la fuerza de atracción entre los extremos con cargas opuestas de las gotas de agua. Los tratadores que utilizan campos de AC son muy eficaces para la eliminación de agua a gran volumen debido a la naturaleza de la atracción dipolar, pero sufren una degradación del rendimiento cuando se encuentran cortes de agua más bajos ya que la atracción dipolar se debilita cuando las gotas de agua son más espaciadas. Los tratadores de AC suelen tener electrodos horizontales hechos de varillas de acero.

2.4.5.6 Tecnología DC

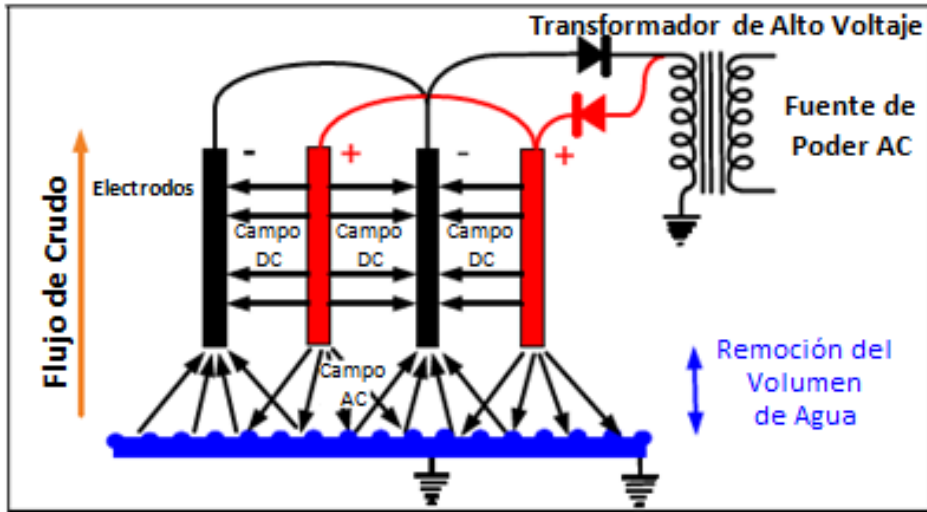
La aplicación de campos eléctricos pulsados DC fueron introducidos por *Bailes* y *Larkai*. Es reconocido desde el inicio que los campos DC proporcionan mayor coalescencia debido a su capacidad de utilizar el movimiento electroforético para mejorar la tasa de colisión de la gota de agua. Sin embargo, la aplicación de un campo de corriente continua a una emulsión rica en agua también resulta en electro-corrosión. Esto limitó la aplicación de tratadores DC a los procesos relacionados con los productos refinados solamente (con muy bajo contenido de agua y baja conductividad eléctrica). El tratador Metercell DC se utiliza para el pulido de los productos refinados, como gasolina, diesel y kerosene.

2.4.5.7 Tecnología de Polaridad Dual

La Tecnología de Polaridad Dual es una tecnología de 42 años (en 2014), que se desarrolló al rededor del año 1972. En este proceso la entrada húmeda de emulsión de crudo se somete primero a un campo de AC más débil para la eliminación de agua en gran volumen seguido de un campo de corriente continua DC más fuerte donde se retiran las gotas de agua remanentes. Dado que existe el campo de corriente continua DC entre los electrodos de placa solamente, el potencial de electro-corrosión se elimina. Este diseño utiliza electrodos de placa orientados verticalmente transversales a la longitud del tratador con placas alternas de carga positiva y negativa. El diseño de la fuente de poder es tal que las placas positivas y negativas se cargan en ciclos medios opuestos, que proporciona por lo tanto dos veces el gradiente de voltaje en las gotas de agua y elimina la posibilidad de una corriente continua DC sostenida.

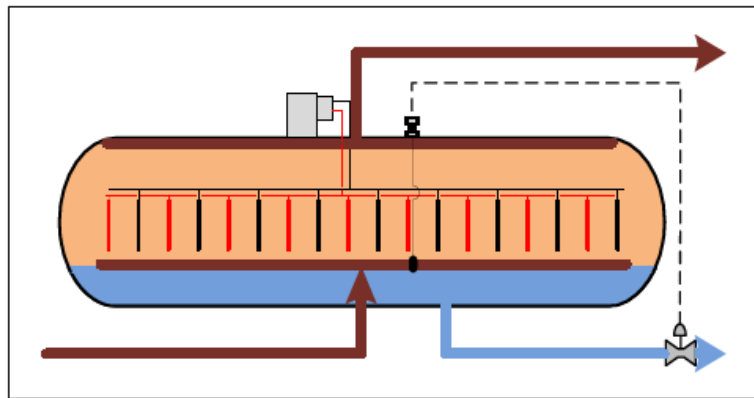
La tecnología de doble polaridad somete la emulsión de crudo a un campo alterno (AC) (50 a 60 Hz) y a un campo de mayor voltaje de corriente directa (DC) al mismo tiempo. En el campo de corriente continua DC las gotas de agua adquieren una carga y se aceleran hacia el electrodo de placa de polaridad opuesta. Al acercarse al electrodo de polaridad opuesta, la gota adquiere la carga de esa polaridad y luego se acelera al electrodo opuesto. A medida que la gota se mueve en el campo de corriente continua DC (debido principalmente a la fuerza electroforética), se deforma (debido a la fuerza de atracción dipolar) y colisiona, se hacen más grandes y, finalmente, se separan del campo de corriente continua DC y se establece en la fase de separado de salmuera en la parte inferior del tratador. (Ilustración 5).

Ilustración 9 Configuración típica de polaridad dual



Fuente: SELLMAN Erik, et al. Improved Dehydration and desalting of mature crude oil fields. Cameron Process Systems. Conference Paper. SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, 10-13 March, Manama, Bahrain. SPE-164289-MS. 2013. Pág. 8.

Ilustración 10 Tratador de Polaridad Dual



Fuente: SELLMAN Erik, et al. Improved Dehydration and desalting of mature crude oil fields. Cameron Process Systems. Conference Paper. SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, 10-13 March, Manama, Bahrain. SPE-164289-MS. 2013. Pág. 8.

El tamaño de una gota de agua en equilibrio con un campo electrostático es inversamente proporcional a la intensidad del campo. Por lo tanto es deseable que las gotas de agua coalescan con la intensidad de campo práctico más bajo. Sin embargo, los campos de baja intensidad no tienen la energía suficiente para

mover y coalescer gotas muy pequeñas. Esto a menudo requiere un compromiso en la intensidad de campo para tratar de optimizar el proceso de deshidratación. Para superar este compromiso y permitir el tratamiento de alta conductividad y crudos de baja tensión interfacial, se desarrolló un proceso para modular el campo de AC/DC.

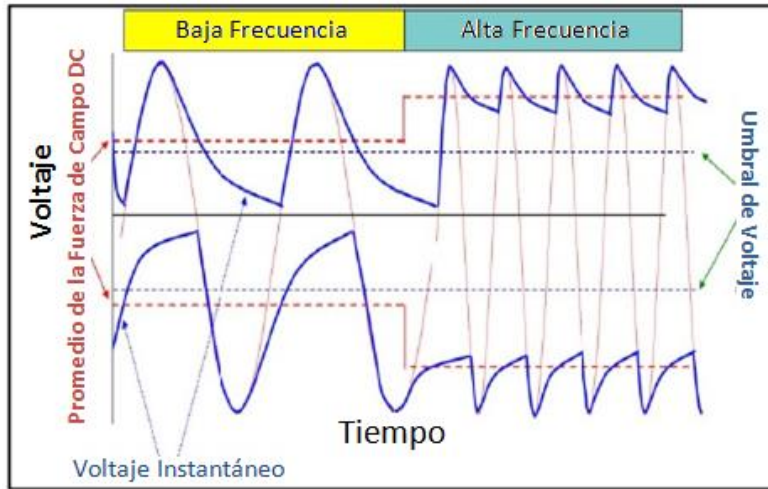
La tecnología de Polaridad Dual Modulada™ se ha utilizado durante más de 25 años en los crudos considerados difíciles de tratar con tecnología de deshidratación convencional, sobre todo en el tratamiento Canadiense DilBit.

2.4.5.8 Tecnología de doble frecuencia

El tratamiento de crudos con alta conductividad y baja tensión interfacial requiere un doble enfoque para controlar el deterioro del campo electrostático y la tensión interfacial.

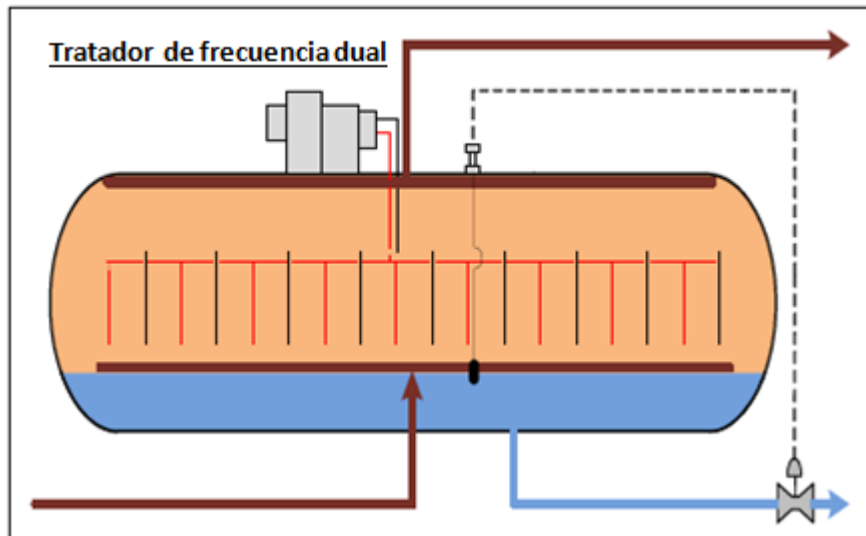
En un sistema de tratamiento de AC/DC, un juego de placas experimenta decaimiento de carga mientras que un set alterno de placas se está cargando. En el crudo de alta conductividad este decaimiento puede resultar en la pérdida del campo de corriente continua DC. Para contrarrestar esta situación el tiempo entre cargas debe ser reducido. Esto se logra mediante el aumento de la frecuencia de la fuente de alimentación, como se muestra en la Ilustración 8.

Ilustración 11 Incremento de la intensidad de campo promedio con frecuencia mayor



Fuente: SELLMAN Erik, et al. Improved Dehydration and desalting of mature crude oil feeds. Cameron Process Systems. Conference Paper. SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, 10-13 March, Manama, Bahrain. SPE-164289-MS. 2013. Pág. 9.

Ilustración 12 Tratador de frecuencia dual



Fuente: SELLMAN Erik, et al. Improved Dehydration and desalting of mature crude oil feeds. Cameron Process Systems. Conference Paper. SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, 10-13 March, Manama, Bahrain. SPE-164289-MS. 2013. Pág. 9.

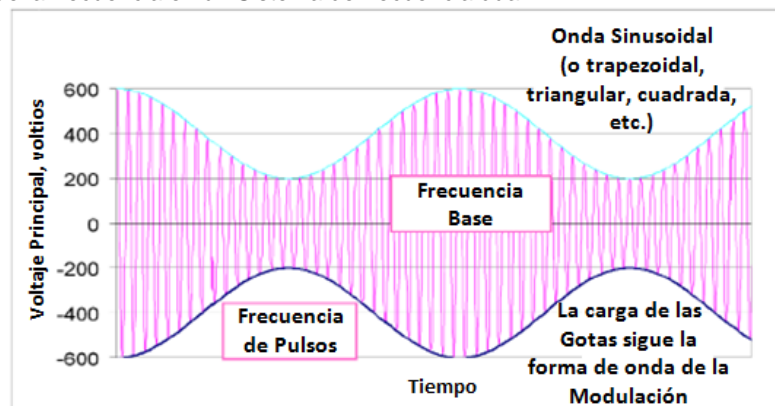
Para contrarrestar una baja tensión interfacial, la superficie de la gota debe ser energizada suficientemente para superarlo. Esto se puede hacer mediante la

modulación de la potencia a una frecuencia inferior a la frecuencia de resonancia de las gotas de agua de Stokes.

Este control de frecuencia bimodal se conoce como doble frecuencia. La frecuencia de la fuente de alimentación (frecuencia base) se configura a un valor lo suficientemente alto como para minimizar la descomposición del campo electrostático y luego se modula (frecuencia de pulsos) a una tasa para energizar las superficies de las gotas.

El resultado es una intensidad de campo alto sostenido y gotas altamente energizadas que luego se unen con facilidad. Esta frecuencia de base puede ser modulada en amplitud, como se muestra en la Ilustración 10.

Ilustración 13 Modulación de la frecuencia en un Sistema de frecuencia dual



Fuente: SELLMAN Erik, et al. Improved Dehydration and desalting of mature crude oil fields. Cameron Process Systems. Conference Paper. SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, 10-13 March, Manama, Bahrain. SPE-164289-MS. 2013. Pág. 9.

La tecnología de deshidratación de crudo de doble frecuencia es una tecnología de 10 años (en 2014). Se utiliza la misma configuración de electrodo como la de doble polaridad (Ilustración 7) y se puede variar la frecuencia base y modular el campo de corriente continua DC dependiendo de las características específicas de

crudo. Para la actualización de una unidad de doble polaridad a una unidad de doble frecuencia, los únicos cambios físicos son la unidad de potencia, el cableado de alimentación eléctrica y el sistema de control electrónico para ajustar la frecuencia base y la modulación del campo DC.

2.4.5.9 Electrodo Compuestos

El material estándar para los electrodos en un tratador de AC/DC es el acero. Los electrodos compuestos fueron desarrollados para ofrecer una mejor tolerancia a altos cortes de agua en el área del electrodo, especialmente para su uso en desaladores electrodinámicos (EDD). La experiencia también ha demostrado que los electrodos compuestos proporcionan una mejor deshidratación proporcionando un campo electrostático gradual y también sometiendo la emulsión de crudo a un tiempo de exposición más largo en el campo de voltaje intenso.

Ilustración 14 Arreglo de electrodos compuestos



Fuente: SELLMAN Erik, et al. Improved Dehydration and desalting of mature crude oil fields. Cameron Process Systems. Conference Paper. SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, 10-13 March, Manama, Bahrain. SPE-164289-MS. 2013. Pág. 10.

Usando electrodos compuestos, el tratador puede manejar casi el doble de alto corte de agua en comparación con los tratadores que usan electrodos de acero.

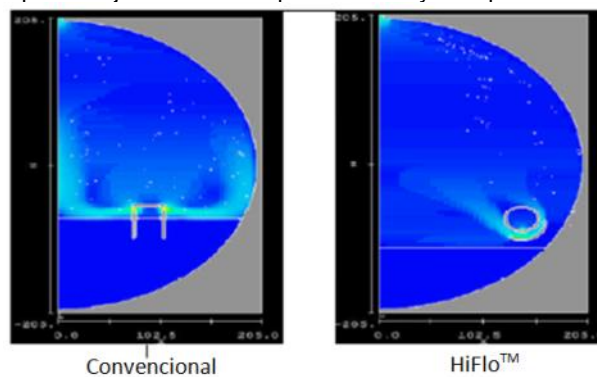
Los electrodos compuestos suprimen la formación de arcos de corriente del alto corte de agua, ya que los electrodos compuestos tienen menos carga en los bordes del electrodo.

2.4.5.10 Distribución de fluidos

Otra mejora reciente en el diseño del tratador es el uso del separador Hi-Flo, que puede proporcionar hasta un 35% de mejor utilización del volumen interno del recipiente o contenedor por la eliminación de recirculación del fluido en el recipiente y la prevención de que las placas de rejilla eléctricas sean bypassadas.

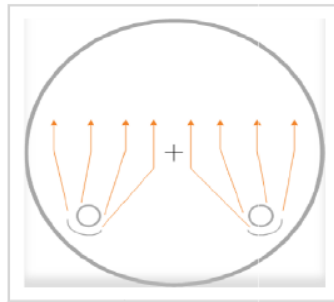
La siguiente captura de pantalla a partir del análisis CFD en la imagen de la izquierda muestra las zonas con recirculación de fluidos y también crudo que no pasa por las placas de electrodos más cercanos a la pared del contenedor. La captura de pantalla desde el análisis del CFD a la derecha, junto con la explicación de patrón de flujo en la Ilustración. 13, muestran un diseño de fluido hidráulico mejorado que resulta en una utilización mejorada del tratador y por lo tanto un mayor tiempo efectivo de residencia.

Ilustración 15 Comparación entre el tipo de caja abierta en la parte inferior y el separador HiFlo



Fuente: SELLMAN Erik, et al. Improved Dehydration and desalting of mature crude oil fields. Cameron Process Systems. Conference Paper. SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, 10-13 March, Manama, Bahrain. SPE-164289-MS. 2013. Pág. 10.

Ilustración 16. Aclaración del patrón de flujo mejorado con el separador HiFlo



Fuente: SELLMAN Erik, et al. Improved Dehydration and desalting of mature crude oil fields. Cameron Process Systems. Conference Paper. SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, 10-13 March, Manama, Bahrain. SPE-164289-MS. 2013. Pág. 10.

Históricamente, el tratamiento eléctrico se ha establecido desde el trabajo pionero de Cottrell y Speed. La información sobre patentes en este campo es en gran parte sobre los métodos para la deshidratación de crudos, frecuentemente en línea con el procedimiento de desalación.

Teniendo en cuenta La optimización del proceso de coalescencia sería capaz de reducir el tiempo de residencia de las gotas en un sistema físico dado, aumentando así el rendimiento volumétrico y permitiendo la utilización de unidades más pequeñas y por consiguiente más baratas. Con esto en mente, hacemos una revisión crítica de los métodos disponibles en la actualidad para ver si pueden ser manipulados de forma beneficiosa y mejorarlos con el fin de lograr una mayor eficiencia en la separación y una aplicación más amplia.

2.4.5.11 Efectos de la Frecuencia

Brown y Hanson observaron una frecuencia óptima en la cual coalescencia se produce más fácilmente, y además sugirieron que las vibraciones mecánicas y la cavitación dentro de la gota también influyen en la ruptura de la película y la coalescencia. Más recientemente, la existencia de una frecuencia óptima también

ha sido reportada por Bailes y Larkai. La selección de una frecuencia óptima por lo tanto puede ser importante, especialmente en bajos potenciales aplicados y dependiendo del material de revestimiento y su espesor, y la composición del líquido de dispersión.¹⁵

Sin embargo, no está claro si la existencia de una frecuencia óptima se debe a la limitación del circuito de suministro de energía o a la relajación electromecánica de la dispersión.

En ausencia de un recubrimiento aislante, la frecuencia óptima es más dependiente de las propiedades eléctricas de la fase líquida continua. En el caso del campo pulsado DC, además de la frecuencia de pulso óptima, la tasa de duración del período de campo alto, "encendido" a un periodo de no campo, "apagado" también es importante. La mejor condición encontrada para una coalescencia eficaz es que durante el periodo de "encendido" debe ser igual al de "apagado" según las patentes [3,34]. Sin embargo, Galvin sugiere que el aumento del voltaje y constantes de tiempo de caída del circuito de alimentación eran más importantes. La constante de tiempo de aumento es controlada por la resistencia eléctrica del circuito y la capacitancia del electrocoalescedor. El rendimiento de la coalescencia mejora a medida que se incrementa la intensidad de campo eléctrico a través de la dispersión, debido al aumento en las fuerzas que causan la coalescencia.

La magnitud de la frecuencia aplicada depende en gran medida del tipo de campo eléctrico, así como de la disposición de los electrodos. Para campos eléctricos AC, Roberts en la patente [59] utilizó una frecuencia entre 60 y 10.000 Hz, mientras Hsu en la patente [29] usó en campo AC una frecuencia de

¹⁵ EOW John S. Electrostatic Enhancement Of Coalescence Of Water Droplets In Oil: A Review Of The Technology. Chemical Engineering Journal 85. Elsevier. 2002.

aproximadamente 60 -1.000 Hz entre el electrodo aislado y la capa acuosa con polo a tierra en la parte inferior de la zona de coalescencia. Sin embargo, una frecuencia mucho más baja se utiliza generalmente en campos eléctricos pulsados DC; Bailes y Larkai, patente [4], aplicaron un campo eléctrico pulsado a una frecuencia inferior de 1 Hz; Bailes y Watson, patente [33], utilizaron una frecuencia de pulso de 25 Hz en un coalescente rotativo cilíndrico, mientras Bailes, en la patente [30], empleó una frecuencia óptima de 15 Hz en un sistema de electrodos de burbuja de gas aislada. Por lo tanto, no parece haber ningún valor común de la frecuencia aplicada para todos los sistemas:¹⁶

2.4.5.12 Efectos del electrodo

En general, dos diseños principales de coalescencia son comunes; las unidades pueden consistir en electrodos recubiertos o aislados o no recubiertos y unidades de sedimentación ya sean internas o externas, y unidades de tanque con electrodos sin recubrimiento en los que la coalescencia y asentamiento tienen lugar al mismo tiempo, como se usa comúnmente en la industria del petróleo. Sistemas celulares son más frecuentes en extracciones de membrana líquida y solventes. *

Las características y la geometría de un electrodo (generalmente cilíndrico o de placa) determinan el rendimiento de la coalescencia electrostática. El tipo de campo eléctrico y la emulsión influirán en la elección de las características anteriores.

¹⁶ EOW John S. Electrostatic Enhancement Of Coalescence Of Water Droplets In Oil: A Review Of The Technology. Chemical Engineering Journal 85. Elsevier. 2002.

* Ref. 15

La distancia máxima entre los electrodos está limitada por efectos de borde de los electrodos (es decir, campos de periferia o limítrofes) y el potencial que se debe aplicar para crear una intensidad de campo eléctrico suficientemente alta. En el primer caso, a medida que aumenta la distancia entre electrodos, la periferia del campo eléctrico se vuelve más significativa. En el segundo caso, el diseño del transformador y los circuitos eléctricos son influyentes. Los electrodos se disponen comúnmente ya sea como electrodos largos estrechamente espaciados o electrodos cortos ampliamente separados.

La elección de la geometría de los electrodos es otro aspecto que debe ser considerado. Las consideraciones de seguridad y práctica normalmente dictan el diseño de un dispositivo de coalescencia para ser un recipiente a presión cilíndrico cuando la emulsión está a alta presión y temperatura. Un electrodo cilíndrico montado de forma coaxial en un dispositivo de coalescencia vertical, resulta ser una disposición simple y sin embargo efectiva, como ocurre en la patente [57].

Algunos filtros coalescentes AC contienen electrodos de rejilla de metal en posición horizontal, permitiendo así que las gotas de agua pasen a través de los electrodos. El manejo de electrodos múltiples generalmente se utiliza en estos casos con variaciones de intensidad de campo eléctrico. Las etapas iniciales utilizan la más alta intensidad de campo eléctrico para provocar la coalescencia más rápida, mientras que las etapas posteriores tienen una menor intensidad de campo para reducir los cortocircuitos debido a la presencia de grandes gotas. En general, un electrodo no aislado puede ser utilizado de manera eficiente cuando el contenido de la fase dispersa es menor o igual a 15% de la emulsión; patente [31]. Por encima de este límite, puede ocurrir un cortocircuito. Sin embargo, en algunas operaciones, el uso de la fuerza centrífuga puede eliminar la necesidad de un electrodo aislado.

Para electrodos no aislados, el alto contenido de agua tiende a una sobre-tensión del equipo eléctrico debido al desarrollo de pasajes conductores directos entre los electrodos.

El cortocircuito y el colapso del campo eléctrico sin duda eliminan la fuerza de coalescencia. Por otro lado, un electrodo aislado reducirá el potencial eléctrico en la interfaz de emulsión del electrodo. Una posible solución a este problema es la combinación de un electrodo aislado y un campo eléctrico pulsado DC. Los ejemplos de materiales aislantes son plásticos ABS, TUFNOL y PTFE, y diversos materiales inorgánicos y orgánicos tales como vidrio, cuarzo, cerámica, diversos óxidos metálicos refractarios, y diversos cauchos y plásticos que tienen la constante dieléctrica requerida de aproximadamente 4.

El aislamiento también debe tener una rigidez dieléctrica suficiente para resistir los voltajes presentes.

La hidrofobicidad puede ser inherente en el material de aislamiento o puede ser logrado por recubrimiento o revestimiento del electrodo aislado con un material adecuado con una energía libre de superficie específica por debajo de 40 mJ/m². Diversas superficies pueden ser tratadas con silanos lo que se traducirá en superficies que tengan una energía específica libre de aproximadamente 35 mJ/m². La modificación de la superficie hidrofóbica del electrodo de aislamiento puede ser muy delgada en longitud molecular, como el vidrio recubierto de alcoxisilano. Un sistema de electrodos puede ser diseñado para tener una serie de elementos recubiertos que forman el aislamiento del electrodo para el tratamiento de la dispersión rica en agua y una serie de electrodos sin recubrir, para una dispersión pobre en agua.

Se encontró que este sistema de electrodos permite contenido de agua en la fase de crudo y contenido de crudo en la fase agua (arrastre) que se reducen a niveles mucho más bajos que los obtenidos con los sistemas de electrodos totalmente recubiertos.

Otro ejemplo de un sistema de aislamiento es el uso de burbujas de gas, que se inyectan en una emulsión mientras la emulsión se encuentra bajo la influencia de un campo electrostático aplicado. Los electrodos son verticales, en este caso, y la nube de burbujas de gas protege al electrodo de alto voltaje, reduciendo cortocircuitos. La coalescencia gota-gota en la fase continua de crudo se aumenta. Las burbujas de gas también parecen formar canales a través de la emulsión, que ayudan a proporcionar vías a través de las cuales las gotas unidas pueden moverse rápidamente hacia las interfaces. Las burbujas de gas por lo tanto, mejoran tanto la velocidad de coalescencia gota-gota y la tasa de sedimentación de la gota en la dispersión.

Sin embargo, la relación del gas inerte a las tasas de flujo de líquido es muy grande y el tiempo de residencia de la emulsión es largo.

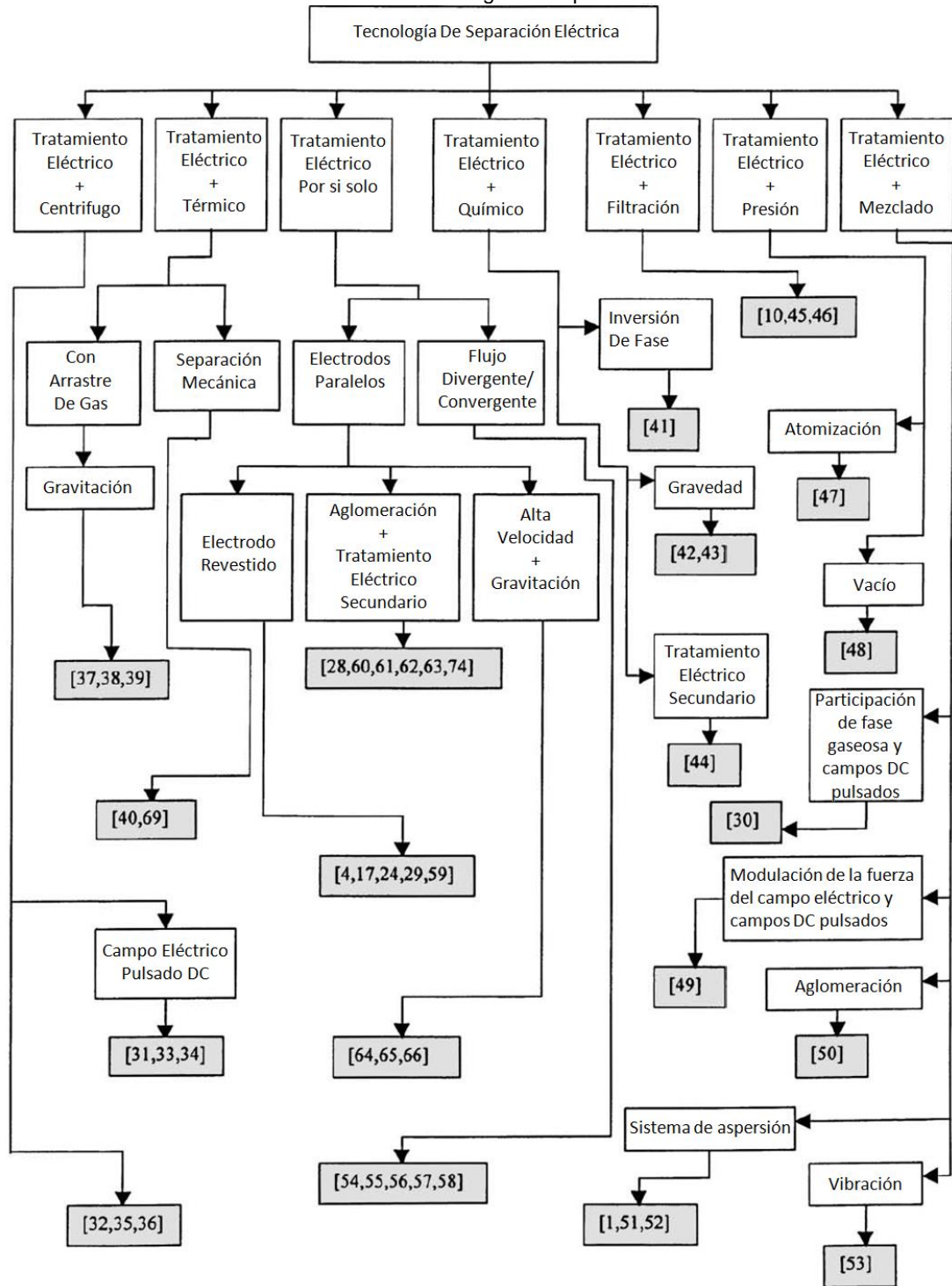
3. REVISIÓN DE LA TECNOLOGÍA DISPONIBLE

Métodos eléctricos para la deshidratación de emulsiones de crudo han sido objeto de un gran número de patentes, relacionados tanto con la técnica, como con el equipo. Estas patentes se resumen en la Ilustración 17.

Algunas de estas patentes combinan los efectos de la fuerza centrífuga y coalescencia electrostática de las gotas de agua para separar las gotas de agua dispersas en la fase continua de crudo sin necesidad de utilizar productos químicos y tratamiento de calor para disminuir la viscosidad del sistema de dispersión líquido-líquido.

Se evita la necesidad de la reducción de la viscosidad del crudo, mediante la aplicación de fuerza centrífuga y electrocoalescencia simultáneamente para mejorar la separación de agua del crudo viscoso.

Ilustración 17 Diferentes combinaciones de Tecnología de Separación Eléctrica.



Fuente: EOW John S. Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil: a review of the technology. Chemical Engineering Journal. 2002. Pág. 359

3.1 TRATAMIENTO ELÉCTRICO + CENTRIFUGO

En la Ilustración 18, una emulsión acuosa de crudo-electrolito es alimentado dentro de un cilindro giratorio a través de tubos de plástico y un distribuidor, retirando el electrolito desde la periferia del cilindro, y el componente orgánico de los tubos adyacentes. La emulsión se separa por la aplicación de un campo eléctrico radial y una fuerza centrífuga simultáneamente para producir una interfaz mayor, perpendicular a la dirección del campo eléctrico y de la fuerza centrífuga.

El campo eléctrico se aplica para causar la coalescencia y la ampliación de las gotas acuosas dispersadas a un tamaño suficiente para que la fuerza centrífuga separe las gotas sin producir la fuerza de corte suficiente para separarlas. Las fuerzas centrífugas también se pueden aplicar para separar el fluido más pesado a partir de fluidos menos densos en una mezcla. Básicamente, la dispersión se inyecta tangencialmente en un recipiente de paredes cilíndricas para permitir la dispersión del flujo circunferencialmente en el recipiente.

El campo eléctrico se aplica para causar la coalescencia y la ampliación de las gotitas acuosas dispersadas a un tamaño suficiente para que la fuerza centrífuga separe las gotitas sin producir la fuerza de cizallamiento suficiente para separarlos. Las fuerzas centrífugas también se pueden aplicar para separar el fluido más pesado a partir de fluidos menos densos en una mezcla. Básicamente, la dispersión se inyecta tangencialmente en un recipiente de paredes cilíndricas para permitir la dispersión a fluir circunferencialmente en el recipiente. De esta manera, las gotas de agua son obligadas a migrar hacia la pared del recipiente. El electrodo de alto voltaje es colocado axialmente en el centro del recipiente. Debido a la acción centrífuga, el aceite alrededor del electrodo tiene un contenido de agua mucho menor.

Esto permite el uso de material aislante más delgado, y reduce la caída de campo eléctrico a través del aislador. En algunas aplicaciones, se ha propuesto que las fuerzas centrífugas se pueden utilizar para eliminar la necesidad de aislamiento del electrodo.

En esta geometría, el campo eléctrico no es uniforme (radialmente divergente) y podría causar la migración y/o ruptura de la gota, este último debido a dielectroforesis. La acción centrífuga, sin embargo, separa rápidamente las gotas de agua en la región de campo eléctrico elevado, evitando así los efectos perjudiciales, mencionados anteriormente. Sin embargo, también hay una tendencia con alto movimiento centrífugo de estabilizar la emulsión por fuerzas de corte y turbulencia en la mezcla.

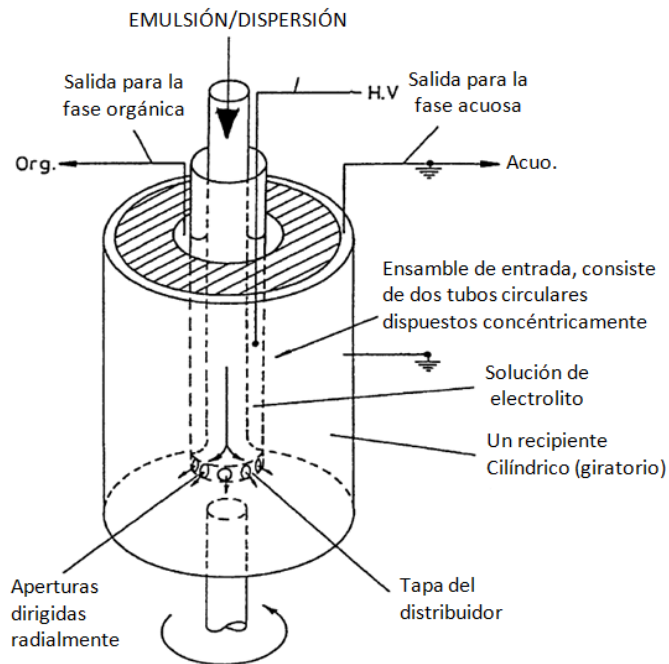
3.2 TRATAMIENTO ELÉCTRICO + TÉRMICO

La Ilustración 17 muestra la combinación de tratamiento eléctrico con calentamiento, que se puede subdividir en dos categorías: participación de gas arrastrado con gravitación y separación mecánica. Un dispositivo, patentado por Bull denominado como "purificador", separa electrostáticamente y/o mecánicamente una emulsión que fluye a través de un recipiente o vasija metálica horizontal. Un número significativo de las gotas acuosas se cargan por la carga de contacto, a la vez que la mezcla fluye a través del sistema multielectrodo. La transferencia de carga conductiva por el crudo también ha sido sugerida como un posible mecanismo. Las gotas cargadas fluyen a través de un dispositivo de coalescencia que consiste en tubos inclinados dispuestos en conjunto. Los tubos

proporcionan una resistencia al flujo de la emulsión de manera que el contacto entre las gotas acuosas y las paredes internas de los tubos es mayor. Pegado a las paredes del tubo, las gotas perderán sus cargas, acumulándose para formar fase en masa acuosa en la parte inferior de los tubos.

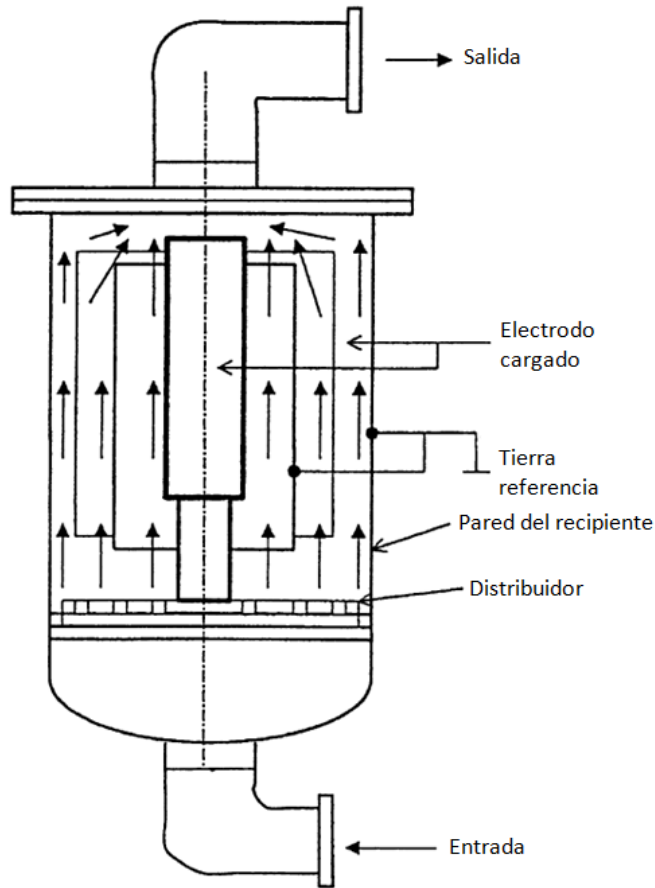
Para el calentamiento, por lo general un conductor eléctrico de resistencia relativamente alta, en la forma de una bobina, se sumerge directamente en la emulsión. La mezcla se calienta hasta aproximadamente 200°C, convirtiendo las gotas de agua en vapor. Una parte del crudo también se transforma en vapor durante este proceso, pero esto se condensa en una fase posterior. El calentamiento también reduce la viscosidad del crudo, facilitando así la salida y la fuga del vapor de agua.

Ilustración 18 Equipo para separación Electrostática y Centrifuga de dispersiones liquidas



Fuente: EOW John S. Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil: a review of the technology. Chemical Engineering Journal. 2002. Pág. 360

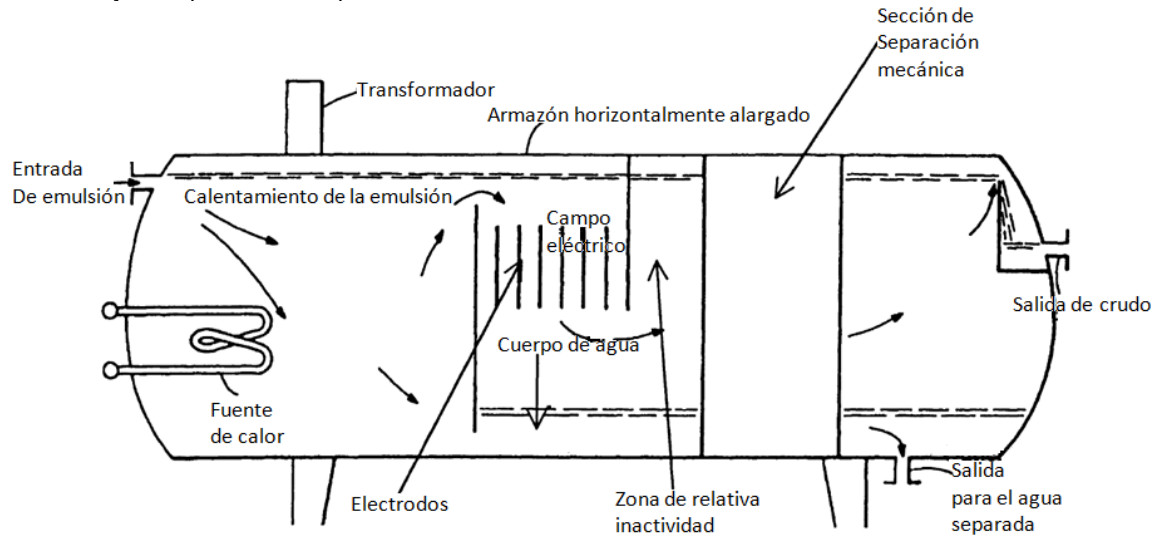
Ilustración 19 Flujo Paralelo configuración EPIC



Fuente: EOW John S. Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil: a review of the technology. Chemical Engineering Journal. 2002. Pág. 360.

Para la separación mecánica, Sublett utilizó un medio de coalescencia mecánica, por ejemplo, un separador de superficie inclinada, después un sistema de electrodos cargados, este último se muestra en la Ilustración 20. Las superficies de recolección están inclinadas para permitir que las gotas acumuladas se muevan a lo largo de la superficie y se encuentren con otras gotas. Entonces, la coalescencia de las gotas se produce, generando gotas más grandes que dejan la superficie.

Ilustración 20 Una elevación seccionada de un recipiente horizontalmente alargado que tiene un sistema de electrodos y un separador de superficie mecánico inclinado



Fuente: EOW John S. Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil: a review of the technology. Chemical Engineering Journal. 2002. Pág. 361

3.3 TRATAMIENTO ELÉCTRICO + QUÍMICO

La combinación de tratamiento químico y eléctrico puede ser dividida en tres tipos: Fase de inversión, sedimentación gravitacional, y tratamiento eléctrico secundario, como se muestra en la Ilustración 17. Si bien existen varias teorías que han avanzado en la revisión del efecto de productos químicos en la ruptura de emulsiones de petróleo, la teoría más general es que la coalescencia en la fase dispersa en la emulsión no resulta de una reacción química, pero algunos efectos físicos en los productos químicos, los cuales cambian las propiedades interfaciales de las dos fases, facilitan la coalescencia gota-gota. Compuestos químicos que se han encontrado más útiles son aquellos que tienen la propiedad de liberar radicales libres de cloro, tales como aceites clorados, chlorocosane, cloramina,

tolueno e hidroccloritos. Sin embargo, Herbsman no dio ninguna explicación para el uso de estos productos químicos.

3.4 TRATAMIENTO ELÉCTRICO + FILTRACIÓN

Algunos métodos también han utilizado la filtración en combinación con tratamiento eléctrico. Por ejemplo, Cottrell aplicó una humectación inicial a fondo de un filtro tipo septo con un líquido que es miscible con la fase líquida dispersa, estableciendo así un canal continuo para el drenaje de la fase líquida dispersa a través del septo humedecido, una dirección por lo general atraviesa el flujo general de la emulsión. Este septo está formado una parte por un sistema de electrodos conectado a un voltaje AC suficiente para causar la coalescencia de las gotas dispersadas, separando así los dos líquidos el uno del otro.

3.5 TRATAMIENTO ELÉCTRICO + PRESIÓN

Como se muestra en la Ilustración.17, también hay un método que utiliza presión combinada con el tratamiento eléctrico. El método de desemulsificación a una presión inferior a la atmosférica produce una separación mucho más rápida. Las gotas de emulsión contienen gas atrapado, que se expande rápidamente cuando se somete a presión baja. Cuando la emulsión se somete a la influencia del campo eléctrico, se obtiene una acción de coalescencia rápida a baja presión, aunque las razones no se entienden claramente. A veces, la aplicación de presión

baja acompañada con calentamiento ayuda a una mejora adicional de la coalescencia y la separación. Se afirma que bajo estas condiciones, el crudo se expande más que el agua, aumentando así la diferencia en la gravedad específica entre ellos, y esto acelerará en gran medida la acción de la separación.

3.6 TRATAMIENTO ELÉCTRICO + MEZCLADO

La combinación de mezclado y tratamiento eléctrico se puede subdividir en varias categorías: la participación de fase gaseosa, la modulación de la intensidad del campo eléctrico, coalescencia, el sistema de aspersion y vibración. En general, el mezclado se utiliza para prevenir la formación de cadenas de cortocircuito de gotas de agua, o ruptura de tales cadenas existentes. En el método de Cottrell y Speed, por ejemplo, la emulsión entra en un recipiente de separación eléctrica como corrientes que incide sobre la superficie superior del líquido en el recipiente, causando una agitación de la superficie y una homogeneización de la mezcla de la emulsión en la que fluye. Luego, la emulsión fluye hacia abajo entre los electrodos.

3.7 TRATAMIENTO ELÉCTRICO POR SI SOLO

Para el tratamiento eléctrico por sí solo, hay varias variaciones, como se indica en la Ilustración.17. En primer lugar, hay un flujo uniforme con electrodos paralelos, así como el flujo no uniforme debido a corrientes divergentes y/o convergentes. El

sistema de electrodos paralelos puede ser dividido en sistemas con electrodos recubiertos, sistemas con una combinación de coalescencia y tratamiento eléctrico secundario y sistemas con combinación de fuerzas gravitacionales y de alta inercia. El tratamiento eléctrico secundario se refiere aquí a un segundo conjunto de electrodos que se encuentran normalmente en la salida de un recipiente o vasija. Para el sistema con electrodos revestidos, los electrodos tienen un material aislante que tiene una constante dieléctrica de aproximadamente 3 y una superficie hidrofóbica en contacto con la emulsión.

Sin embargo, en condiciones de bajo campo eléctrico cuando la coalescencia no es eficiente, la fase de precipitación acuosa puede formar una capa de emulsión viscosa, similar a una esponja, que contiene un pequeño porcentaje de agente tensoactivo que contiene la fase de crudo, reduciendo así la calidad de la separación, la fase acuosa puede contener una pequeña cantidad de crudo.

4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DE TRATADORES TÉRMICOS ELECTROSTÁTICOS

Si se cumplen las condiciones más importantes para una alta eficiencia, la desestabilización electrostática tiene el potencial para convertirse en una herramienta fundamental en todas las instalaciones de producción de petróleo, lo que permite una fuerte reducción de costos mediante el ahorro de calor o reducción del consumo de desemulsificantes químicos.¹⁷

Por otra parte, los electroseparadores convencionales pueden ocupar mucho espacio, ya que se requieren largos tiempos de residencia para las regiones de electrocoalescencia y para las zonas de sedimentación para separar las gotas de agua que se han unido y aumentado su volumen. Por lo que esto podría ser un problema para plataformas en alta mar ya que como estructuras de plataforma suelen tener espacio limitado.¹⁸

Entre las desventajas que presentan los equipos de deshidratación electrostática están:

- Requerimiento de supervisión constante en su operación.
- Instalación de sistemas de control más sofisticados, lo que incide tanto en los costos de operación como de inversión.

¹⁷ LESS Simone, et al. Dehydration Efficiency Of Water-In-Crude Oil Emulsions In Alternating Current Electrical Fields. Journal of Dispersion Science and Technology (J DISPER SCI TECHNOL). Publicado en línea en 2010

¹⁸ EOW John S. Electrostatic Enhancement Of Coalescence Of Water Droplets In Oil: A Review Of The Technology. Chemical Engineering Journal 85. Elsevier. 2002

- Instalación de sistemas de carga para un mayor control de flujo al equipo, ya que necesitan para su operación condiciones de flujo estables y controladas.
- Los dispositivos del equipo podrían ser afectados por los cambios en las propiedades conductoras de los fluidos de alimentación, cuando se incrementa el agua, la salinidad y la presencia de sólidos.
- El nivel de agua libre es controlado por dos medidores de nivel en paralelo y con diferentes principios de operación. Esta es la variable más difícil de manejar, ya que un valor alto podría hacer que el agua tenga contacto con las rejillas energizadas y producir un corto circuito en el equipo y sus correspondientes daños al sistema eléctrico.

Las fallas más comunes en los tratadores electrostáticos ocurren cuando hay intermitencias en el suministro de corriente eléctrica; al disminuir el voltaje la luz piloto se atenúa o desaparece. La acumulación de materiales sólidos en la interface agua-aceite puede originar un corto circuito. En este caso hay que disminuir la altura de la interface para normalizar la operación de la unidad. También es recomendable aumentar la temperatura o cambiar de reactivo. Si el mal funcionamiento del tratador no se corrige, habrá que revisar todo el circuito eléctrico.

En referencia a las ventajas del tratamiento electrostáticos se pueden enunciar las siguientes:

- La emulsión puede ser rota a temperaturas muy por debajo de las que se requieren normalmente en los tratadores termicos. esto produce ahorros en combustible, crudos poco densos y por lo tanto de mayor valor económico por conservar las fracciones ligeras del petróleo y mayor volumen de crudo.
- Debido a que sus recipientes son mucho más pequeños que los tratadores calentadores o térmicos, son ideales para plataformas petroleras marinas.

- No se utilizan fibras coalescentes las cuales se reemplazan por corriente eléctrica; con esto se elimina la interrupción en la operación para reemplazar o lavar las fibras.
- Pueden remover mayor cantidad de agua que otros tratadores.
- Las bajas temperaturas de tratamiento provoca menores problemas de corrosión e incrustación.
- Costos menores de desmulsificantes, ya que en algunos casos se logra reducir bastante el consumo de desmulsificantes y, en ciertos casos, puede eliminarse.
- Costos de electricidad muy bajos.

Finalmente se tiene que aunque la electrostática no puede sustituir totalmente métodos probados y convencionales de la resolución de emulsiones tales como tiempo, temperatura y producto químico, cuando se aplican correctamente los métodos electrostáticos, pueden ser altamente eficientes y superar los resultados de la aplicación de otros métodos.

Una variedad de técnicas electrostáticas del tratamiento están disponibles para el diseñador y el operador incluyendo campos de Corriente Alterna, de Corriente Directa y de AC/DC modulada y pulsada.

El aprovechamiento y éxito del uso de estas tecnologías en los campos de nuestro país dependerá del conocimiento de las técnicas de aplicación, sus principios de funcionamiento, la revisión de la bibliografía, de las diferentes experiencias en diferentes campos, las investigaciones adelantadas en diversas partes del mundo, estudios de laboratorio y pruebas de campo.

El buen manejo y conocimiento de la tecnología se verá reflejado en la optimización de los diseños, la temperatura requerida, la dosificación química y el voltaje aplicado y por ende en la optimización de los costos del tratamiento.

5. APLICACIONES DE LOS TRATADORES TÉRMICOS ELECTROSTÁTICOS

Las compañías dedicadas a la explotación de hidrocarburos hoy en día emplean la tecnología de coalescencia electrostática, no sólo para mejorar la separación de las emulsiones del tipo agua-en-crudo sino también para operar de una manera más amigable con el medio ambiente. Diferentes compañías se dedican a la investigación y desarrollo de tecnologías de tratadores termo electrostáticos; ejemplo de ello son las empresas Axsia, que comprenden Axsia FSC, Axsia Serck Baker y Axsia Howmar, que diseñan y suministran sistemas de desalación y deshidratación electrostática para el crudo para operaciones de refinería y yacimientos petrolíferos junto con dos y tres separadores de fase. También tienen unidades de desalación/deshidratador a bordo de buques oceánicos, destinados al tratamiento mar adentro de petróleo.

Este sistema móvil es una gran ventaja, ya que puede tratar el petróleo en las plataformas de perforación en alta mar. Todos los coalescedores electrostáticos de Axsia funcionan en alta mar usando tecnología de campo eléctrico AC, con aplicaciones para unidades con capacidad de hasta 350.000 bpd de desaladoras Axsia, suministrados en todo el mundo, aunque las unidades típicas utilizadas en alta mar tienen sin embargo, menos de 100.000 bpd.¹⁹

Cameron International Corporation que adquirió Natco Group Inc, es otra de las compañías que fabrica equipos para facilidades de producción para la industria del

¹⁹ EOW John S. Electrostatic Enhancement Of Coalescence Of Water Droplets In Oil: A Review Of The Technology. Chemical Engineering Journal 85. Elsevier. 2002

Petróleo y ha trabajado en la actualización de tratadores existentes de deshidratación de crudo a tecnologías AC/DC. Con la actualización de Tratadores existentes en el Golfo de México (GOM) por tecnologías de electrodos compuestos y de frecuencia dual, se obtuvieron beneficios tanto en la producción como en ahorro en OPEX.

Beneficios de producción:

- Mayor tasa de flujo en un recipiente existente
- Menor BS&W y salinidad en el crudo tratado
- Mejora de la deshidratación de crudos de alto corte de agua
- Resolución mejorada de capas intermedias de emulsión

Ahorros OPEX:

- Reducción de la temperatura de operación y ahorro de BTU
- Reducción de dosis de desemulsificador

En los siguientes cinco casos prácticos de actualización de tratadores en el GOM a tecnologías de electrodos compuestos y de frecuencia dual, se evidencian las mejoras obtenidas.

Tabla 1 Actualización de electrodos de acero a electrodos compuestos (API 20°)²⁰

Flujo (BPD/ft ²)	BS&W de Entrada%	BS&W de Salida % Electrodo de Aluminio	BS&W de Salida % Electrodo Compuesto	Reducción del BS&W (%)
33	15%	1.2	0.40	0.82
53	15%	1.3	0.75	0.55

²⁰ SELLMAN Erik, et al. Improved Dehydration and desalting of mature crude oil fields. Cameron Process Systems. Conference Paper. SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, 10-13 March, Manama, Bahrain. SPE-164289-MS. 2013.

76	15%	1.2	0.60	0.60
107	15%	1.2	0.60	0.60

Continuación Tabla 1. Actualización de electrodos de acero a electrodos compuestos (API20°)

Fuente: SELLMAN Erik, et al. Improved Dehydration and desalting of mature crude oil fields. Cameron Process Systems. Conference Paper. SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, 10-13 March, Manama, Bahrain. SPE-164289-MS. 2013. Pág. 10

5.1 ACTUALIZACIÓN DE UN TRATADOR DE VOLUMEN OFFSHORE (API 27°) A TECNOLOGÍA DE FRECUENCIA DUAL ²¹

Esta actualización del tratador electrostático de 148,000 BOPD en una plataforma de tipo TLP de aguas profundas en el Golfo de México incluyó el separador de entrada, los electrodos compuestos de placa y la unidad de potencia de doble frecuencia. Como resultado de la actualización, la dosis de desemulsionante se pudo reducir en un 50% mientras se mantiene la tasa original de flujo y el BS&W, lo que resulta en un ahorro anual de aproximadamente 600,000 USD.

5.2 ACTUALIZACIÓN DE TRATADORES DE CRUDO EXISTENTES USANDO ELECTRODOS COMPUESTOS API 25°

El complejo de tratamiento de crudo original incluía cinco deshidratadores de crudo idénticos con electrodos de acero y separadores de tipo cajón inferior

²¹ SELLMAN Erik, et al. Improved Dehydration and desalting of mature crude oil fields. Cameron Process Systems. Conference Paper. SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, 10-13 March, Manama, Bahrain. SPE-164289-MS. 2013.

abierto, operando a 43,000 BOPD por tratador a temperatura de funcionamiento de 140 F. La entrada a cada tratador contenía 11% de BS&W con una especificación de salida menor al 1% de BS&W. Tres tratadores fueron adaptados con electrodos compuestos y alas en los esparcidores de cajón, lo que permitió un aumento de 17,000 BOPD en la tasa de proceso a 60.000 BOPD por tratador a constante calidad de crudo. La actualización a la tecnología de doble frecuencia proporciona un aumento adicional de la capacidad de 25,000 BOPD a 85,000 BOPD por tratador.

Tabla 2 Actualización de tratadores de crudo existentes a Frecuencia Dual, API 14 — 25

ID del Crudo	°API	Temperatura (°F)	BS&W (%) de Alimentación	Flujo (BOPD/Pie cuadrado)	BS&W (%) Polaridad Dual	BS&W (%) Frecuencia Dual
Venezuela	25	150	11	200	1.8	0.6
Venezuela	17	280	28	94	0.3	0.1
Wyoming	24	130	11	100	1.45	0.85
Oklahoma	23	135	11	75	1.35	0.5
Brasil	14	240	5	80	0.5	0.27

Fuente: SELLMAN Erik, et al. Improved Dehydration and desalting of mature crude oil fields. Cameron Process Systems. Conference Paper. SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, 10-13 March, Manama, Bahrain. SPE-164289-MS. 2013. Pág. 11.

5.3 INCREMENTO DE LA PRODUCCIÓN DESHIDRATANDO CRUDO DE API 20.6²²

Pruebas de procesos llevados a cabo en el Centro de Tecnología de Cameron en Houston, Texas, verificaron que la capacidad de deshidratación de petróleo crudo (flujo) se puede mejorar para un tratador de 12' x 80' deshidratando crudo de API 20.6 ° usando tecnologías de AC/DC en lugar de Tecnología convencional AC.

Tabla 3 Incremento de la Producción deshidratando Crudo de API 20.6

Tecnología	Capacidad de Tratamiento BOPD	Aumento de la Capacidad BOPD	Aumento de la Capacidad %
AC	81,600	-	-
DP	102,000	20,400	25%
DF	175,500	93,900	125%

Fuente: SELLMAN Erik, et al. Improved Dehydration and desalting of mature crude oil fields. Cameron Process Systems. Conference Paper. SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, 10-13 March, Manama, Bahrain. SPE-164289-MS. 2013. Pág. 11.

A continuación se presenta una breve revisión de algunas tecnologías comerciales que usan electrodos aislados que se han desarrollado en los últimos años por diferentes compañías y posteriormente la aplicación de tratadores electrostáticos que se han utilizado en algunos campos de Shell.

²² SELLMAN Erik, et al. Improved Dehydration and desalting of mature crude oil fields. Cameron Process Systems. Conference Paper. SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, 10-13 March, Manama, Bahrain. SPE-164289-MS. 2013.

5.4 ELECTROCOALESCEDORES COMERCIALES, FABRICANTES Y ESTUDIOS EXPERIMENTALES ²³

El principio de funcionamiento de los electrocoalescedores equipados con electrodos aislados se describe en Lundgaard (2006). En presencia de un campo eléctrico DC, las gotas de agua cargadas son desplazadas hacia la superficie de los electrodos causando una caída de tensión dramática a través del material aislante que cancela el efecto del campo dentro de la emulsión. Por el contrario, los campos eléctricos AC operados a una frecuencia suficientemente alta, no imparten movimiento unidireccional a las gotas de agua, de modo que no se experimenta una caída de tensión abrupta. *

Hamworthy promociona tres productos electrocoalescedores: El Vessel Internal Electrostatic Coalescer o contenedor con coalescencia electrostática interna (VIEC™), VIEC a alta temperatura (HT VIEC™) y el Coalescedor con contenido de Agua Bajo (VIEC LV™). La tecnología VIEC™ hace uso de un marco metálico que combina las funciones de un alineador de flujo mecánico y un coalescedor electrostático, Piasecki (2004). Cada módulo del VIEC™ está provisto con un conector de bajo voltaje, un transformador de alto voltaje y un conversor de frecuencia dedicado a cambiar la frecuencia de funcionamiento en el rango de KHz. Operando el electrocoalescedor en un rango de frecuencia de KHz impide una caída de alto voltaje a través de la capa de aislamiento de los electrodos que ocurre debido a la baja impedancia de la emulsión. Por lo tanto, un

²³ LESS Simone, et al. The electrocoalescers' technology: Advances, strengths and limitations for crude oil separation. Volume 81. 2012.

* Ref 23

canal en cortocircuito solo, no pone en peligro el rendimiento de todo el elemento VIEC™.

La combinación de alta frecuencia y el aislamiento eléctrico de los electrodos permite que el VIEC™ tolere el agua libre y pueda ser usado en la primera etapa dura de separación, Piasecki (2004), contribuyendo así a la separación temprana de agua en la planta de separación. Los beneficios generales para el proceso de separación son potencialmente importantes puesto que la separación temprana del agua en la planta reduce la carga en el intercambiador de calor entre etapas, como ha demostrado Less (2008) y contribuye a reducir el flujo de volumen total que entra en el separador de segunda etapa, al mismo tiempo. La tecnología VIEC™ es modular, haciendo uso de varios elementos VIEC™ ensamblados juntos como una rejilla dentro del contenedor de separación, de tal manera que la emulsión de agua/crudo fluirá a través de él. El tamaño y el peso de un elemento de VIEC™ (15 × 45 × 45 cm, 33 Kg) son tales que se pueden instalar en el contenedor del separador a través de una boca de inspección de servicio. El consumo de energía de un elemento VIEC™ es normalmente de 250 W, por lo tanto, un paquete electrocoalescente VIEC™ consiste en 36 módulos instalados en un contenedor del separador de diámetro de 4.3m, necesitando alrededor de 9 kW de potencia eléctrica. El VIEC™ funciona a 90°C. El HTVIEC™ tiene un diseño similar al VIEC™, con la ventaja de ser capaz de soportar condiciones de hasta 150°C y 150 bar, lo que lo hace apropiado para el tratamiento de crudos pesados.

La tecnología VIEC LV™ hace uso de las fuerzas dielectroforéticas y está diseñado para funcionar aguas abajo del VIEC™ o HTVIEC™ dentro de los separadores de alta y baja presión, para mejorar la calidad del crudo de exportación.

Statoil es el dueño de la patente de la tecnología de Coalescedor Electrostático Compacto (CEC™) y ha emitido una licencia comercial exclusiva a Aker Process Systems AS. Este producto es un sistema de flujo continuo compacto para la mejora de la eficiencia de separación de los equipos de separación por gravedad existentes. El CEC™ consiste en una serie de electrodos circulares concéntricos, alojados dentro de una sección de coalescencia. Normalmente una unidad de 130.000 barriles por día es un recipiente vertical de 5.5 m de altura con un diámetro exterior de 1,2 m. y un peso aproximado en seco de 7 Ton.

Una diferencia importante con la tecnología VIEC™ es que la CEC™ es un dispositivo en línea instalado fuera del separador, no un dispositivo interno. Esto tiene dos consecuencias interesantes. En primer lugar, la acción de coalescencia en la CEC™ se lleva a cabo a números altos de Reynolds en comparación con los conseguidos por las restricciones de flujo a través de los canales del VIEC™. En segundo lugar, la CEC™ no requiere apagar la planta durante el mantenimiento, ya que las líneas de derivación o bypass se pueden instalar fácilmente para mantener la producción a una velocidad de flujo reducida. La gama CEC™ incluye productos que pueden operar con flujos de 3.000 barriles de petróleo por día (Mbpd) a 220 Mbpd. La CEC™ es tolerante al oleaje, a corto circuito de la red y golpes debido al agua pero se limita a una fracción de volumen máximo de gas de 7%. Por lo tanto, la instalación típica para un CEC™ es después de la segunda etapa de separación y no es una opción el uso de CEC™ para aplicaciones tempranas de eliminación de agua.

Desde 1970, Natco ha desarrollado electrocoalescedores utilizando simultáneamente campos eléctricos AC y DC bajo el nombre comercial de Dual Polarity®. La tecnología combina alta tolerancia al agua proporcionada por el campo AC y la migración de la gota y la capacidad de carga de la gota al campo DC para mejorar la eficacia en la remoción del agua. Más reciente es la

introducción de la tecnología patentada de Natco en el mercado Dual frequency[®]. El coalescedor Dual Frequency[®] puede ser una actualización fácil en una facilidad existente de Dual Polarity[®], ya que no se requieren cambios internos en el sistema eléctrico. El coalescedor electrostático Dual Frequency[®] fue desarrollado para generar frecuencias altas y bajas simultáneamente para hacer frente a la fuerte descomposición del campo, que se presenta para los crudos altamente conductivos (más de 80 nS/m) y para debilitar la interfaz de las gotas NATCO 2008.

La tecnología Dual Frequency[®] utiliza una alta frecuencia de base (optimizada en el rango de kHz para limitar el tiempo de decaimiento de voltaje) la cual es modulada en amplitud con una frecuencia de impulsos (0,2 a 2 Hz) adaptada para maximizar la absorción de energía por las gotas de la fase dispersa. De acuerdo con Natco, la ganancia en la eficiencia de separación es debida al campo eléctrico promedio más alto que actúa sobre gotas desestabilizadas energizadas cerca de su frecuencia de resonancia.

Las principales características de las tecnologías presentadas anteriormente se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 4 Principales características de electrocoalescedores comerciales

Fabricante	Hamworthy	Hamworthy	Aker Solutions	NATCO	NATCO
Productos	VIEC [™]	VIEC [™] LV	CEC	Dual Polarity [®]	Dual Frequency [®]
Principales Características	Dispositivo modular de campo AC para ser instalado dentro de vasijas existentes	Dispositivo de pulido de campo AC para la operación aguas abajo del VIEC [™]	Recipiente vertical compacto en línea, de campo AC instalado aguas arriba de los separadores	Recipiente de separador equipado con paquete de electrodos	Igual que el de polaridad dual [®] , este también permite la modulación de frecuencia
Voltaje	5 kV	5 kV	5kV	30 kV	30 kV

secundario estimado Campo eléctrico estimado	2 kV/cm AC	2 kV/cm AC	2 kV/cm AC	2 kV/cm DC 0.4 kV/cm AC	2 kV/cm DC 0.4 kV/cm AC
Aislamiento	Electrodos aislados		recubrimiento de electrodos alimentados	Acero descubierto o electrodos compuestos aislados pueden ser seleccionados	
Tempo de exposición al campo eléctrico	1 a 5 s	30 a 150 s	4 a 20 s	110 a 160 s	70 a 120 s
Atracción Dipolar	Moderada	Baja	Alta	Moderada	Moderada
Electroforesis Di	Baja	Baja	Baja	Alta	Alta
Di electroforesis	Baja	Alta	Moderada	Baja	Baja
Máximo BS&W	100%	100%	40%	40%	40%
Máxima fracción de gas	100%	100%	7%	Menor al 7%	Menor al 7%
Acceso para mantenimiento	Parada de planta	Parada de planta	Es posible realizar Bypass	(requiere desgasificación previa) Parada de planta	(requiere desgasificación previa) Parada de planta
Tasas Máximas de flujo de líquido	La modularidad del dispositivo permite instalación en separadores existentes	Puede ser instalado en separadores existentes	Mayor a los 220,000 bpd. Varios dispositivos pueden ser instalados en paralelo.	Mayor a los 100,000 bpd. Varios dispositivos pueden ser instalados en paralelo.	Mayor a los 100,000 bpd. Varios dispositivos pueden ser instalados en paralelo.

(Continuación Tabla 4. Principales características de electrocoalescedores comerciales)

Fuente: LESS Simone, et al. The electrocoalescers' technology: Advances, strengths and limitations for crude oil separation. Volume 81. 2012. Pág. 60

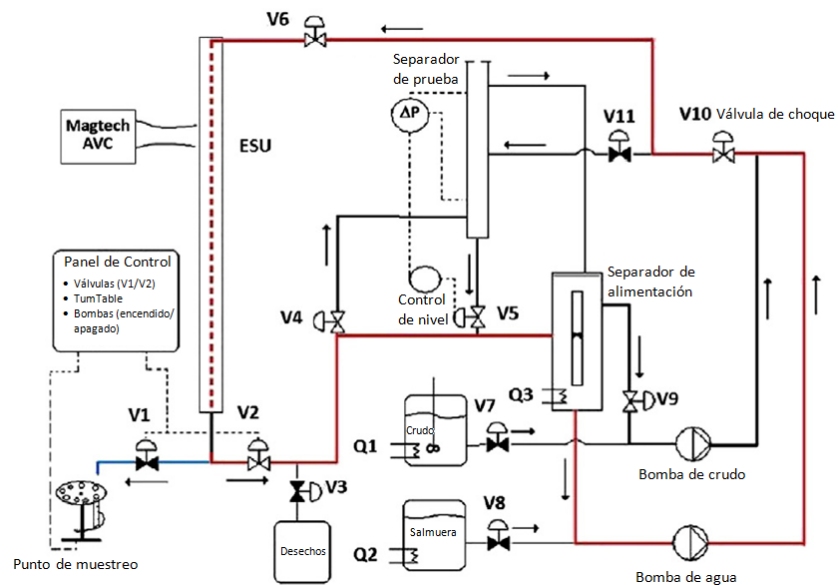
Disposición experimental

En el presente trabajo, se usó un bucle de flujo de laboratorio para evaluar el potencial de un conjunto de electrodos simple como un dispositivo de

deshidratación y desalado de emulsiones de aceite crudo. El bucle de flujo consiste en dos bombas de desplazamiento positivo, un separador de alimentación y un separador de prueba vertical, como se muestra en la Ilustración 18. Una limitación del aparato experimental es la imposibilidad para operar a altas velocidades de flujo. En nuestros experimentos, la velocidad de flujo se fijó a $0,05 \text{ m}^3/\text{h}$, lo que lleva a números de Reynolds menores de 30 en el interior de la unidad electroquirúrgica y alrededor de 80 en las tuberías.

Estos valores son muy bajos, teniendo en cuenta que los dispositivos comerciales equipados con un relleno de electrodos concéntricos (como la CEC™ de Aker Kvaerner) trabajan en la región de transición hacia la turbulencia, con números de Reynolds entre 2000 y 5000. Sin embargo, el ESU puede ser utilizado para simular un recipiente de coalescencia electrostática con electrodos aislados, y para evaluar el impacto de las fuerzas electrostáticas en la ausencia de un diseño apropiado, estableciendo condiciones de flujo óptimas.

Ilustración 21 Plano del circuito de flujo y la trayectoria del flujo a lo largo de los experimentos (línea roja)



Fuente: LESS Simone, et al. The electrocoalescers' technology: Advances, strengths and limitations for crude oil separation. Volume 81. 2012. Pág. 60

Procedimiento Experimental

El crudo utilizado en este estudio es un crudo en bruto de grado medio producido en la plataforma continental noruega. Sus propiedades de interés se enumeran en la Tabla 2.

Cada experimento se realizó con y sin la aplicación del campo eléctrico en la misma prueba, para obtener datos comparables.

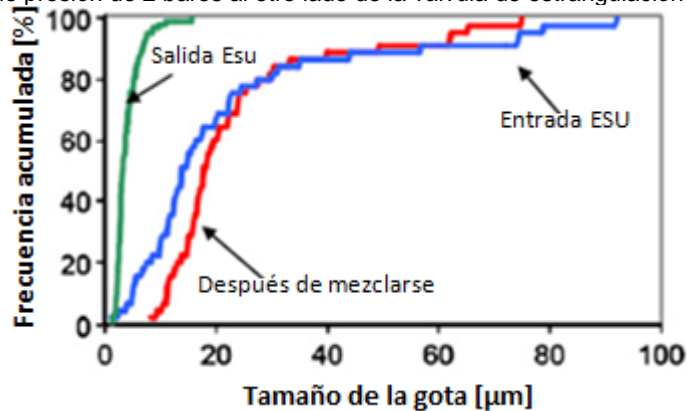
Tabla 5 Propiedades del crudo probado

Contenido de sal	0.214 g/cm ³
Agua emulsificada	1.25 % de agua
Densidad a 60 °C ^a	0.8521 g/cm ³
Gravedad API a 15.5 °C	27
^a Medido con el medidor de densidad PAAR DMA 48	

Fuente: LESS Simone, et al. The electrocoalescers' technology: Advances, strengths and limitations for crude oil separation. Volume 81. 2012. Pág. 61

Datos experimentales y discusión

Ilustración 22 Distribución del tamaño de las gotas acumulada en el experimento con emulsión de 10% de corte de agua y caída de presión de 2 bares al otro lado de la válvula de estrangulación



Fuente: LESS Simone, et al. The electrocoalescers' technology: Advances, strengths and limitations for crude oil separation. Volume 81. 2012. Pág. 61

La distribución del tamaño de la gota acumulado se representa gráficamente en la Ilustración 22. Las distribuciones de tamaño de las gotas se midieron con un microscopio de vídeo digital mediante el análisis de muestras de emulsiones inmediatamente después del muestreo. Poco después de la preparación, la emulsión mostró una amplia distribución centrada del tamaño de gota en un diámetro medio de aproximadamente 25 micras con la presencia de un poco de agua libre como se muestra en la curva roja, Ilustración 19. En la entrada de la coalescencia y después de 15 min de circulación a través de la válvula de estrangulación, no había agua libre presente y el tamaño medio de las gotas se redujo a aproximadamente 17 micras con una distribución más estrecha de diámetro como puede verse en la curva azul en la ilustración 22. Por último, después de aplicar el campo eléctrico a la emulsión, la distribución de tamaño de gota era muy estrecha, con sólo muy pequeñas gotas con un diámetro medio de alrededor de 4 micras, que permanecían en el aceite, y un alto contenido de agua libre como se ve en la curva en verde. Ilustración 22.

Tabla 6 Cantidad de agua segregada en los conos Imhoff con unidad de coalescencia encendida y apagada.

	ESU APAGADA		ESU ENCENDIDAD	
	Agua resuelta (ml)	(%) relativo al total	Agua resuelta (ml)	(%) relativo al total
5.9 vol.% WC, no ΔP				
Muestra 1	0.7	12	3.3	56
Muestra 2	0.8	14	3.3	56
Muestra 3	1.1	19	1.3	22
10.8 vol.% WC no ΔP				
Muestra 1	6	56	4.5	42
Muestra 2	7	65	5	46
Muestra 3	8	74	5	46
10.8 vol.% WC no ΔP				
Muestra 1	3.5	32	7	65

Muestra 2	6.5	60	9.5	88
Muestra 3	6.5	60	8.5	79

(Continuación Tabla 6. Cantidad de agua segregada en los conos Imhoff con unidad de coalescencia encendida y apagada.)

Fuente: LESS Simone, et al. *The electrocoalescers' technology: Advances, strengths and limitations for crude oil separation*. Volume 81. 2012. Pág. 61

Como era de esperarse, la aplicación del campo eléctrico en la emulsión llevó primero a la coalescencia de gotas grandes y el agua residual dispersada en el crudo se compone de gotas muy diminutas. En promedio, durante las tres muestras tomadas en este experimento, la aplicación del campo eléctrico aumenta la separación del 51% al 77% del total de agua emulsionada.

La Tabla 4 muestra el final de agua y el contenido de sal medidos en las muestras de 30 ml tomada desde la parte superior de cada cono Imhoff. La eficiencia en deshidratación y desalado también se reportan en la tabla.

Los datos de la Tabla 4 presentan evidencia de que las emulsiones que no fueron sometidos a una caída de presión a través de la válvula de estrangulación se benefician con fuerza de desestabilización electrostática. Estas emulsiones están sueltas y la electrocoalescencia funciona bien en estos casos.

Los datos promedio de la Tabla 4 se representan en la Ilustración 3. La Ilustración 3 muestra que la eficiencia en la desalación y deshidratación no siguen la misma tendencia, si el efecto electrocoalescente es aplicado o no. Esto se debe a una condición importante para un buen rendimiento de desalación es una mezcla eficaz de agua dulce con la salmuera producida junto con el petróleo. Una mezcla efectiva, sin embargo se correlaciona con una reducción del tamaño de las gotas de agua que puede ser perjudicial para el proceso de separación de agua/aceite.

Esto explica por qué, cuando la unidad ESU está apagada, las emulsiones que no fueron sometidos a una caída de presión a través de la válvula de estrangulación muestran un comportamiento distinto para el desalado y deshidratación.

Cuando no se aplica ninguna caída de presión en la válvula de estrangulación V10, las emulsiones están sueltas con un relativo gran tamaño de la gota promedio y la electrocoalescencia fue capaz de impulsar el proceso de deshidratación. Esto a su vez conduce a una buena retención de sal en el agua separada.

Tabla 7 Contenidos de agua y sal, con eficiencias de remoción relativa, en las muestras de 30 ml tomadas de la parte superior de los conos Imhoff

	Contenido de agua ^a (wt.%)	Contenido de sal ^b		Eficiencia de desalado (%)	Eficiencia de deshidratación (%)
		(PTB)	(ppm)		
<i>5.9 vol.% WC, no ΔP</i>					
Muestra 1/3, ESU Apagada	2.4	12.6	36	83.2%	67.1%
Muestra 2/3, ESU Apagada	2.2	13.4	38	82.1%	69.9%
Muestra 3/3, ESU Apagada	2.6	13.9	40	81.5%	64.4%
Muestra 1/3, ESU Encendida	0.9	6.6	19	91.2%	87.7%
Muestra 2/3, ESU Encendida	0.8	4.9	14	93.5%	89.0%
Muestra 3/3, ESU Encendida	0.7	5.3	15	92.9%	90.4%

<i>10.8 vol.% WC no ΔP</i>					
Muestra 1/3, ESU Apagada	2.8	23.1	66	69.2%	78.6%
Muestra 2/3, ESU Apagada	2.9	23.3	66	68.9%	77.9%
Muestra 3/3, ESU Apagada	2.4	21.3	61	71.6%	81.7%
Muestra 1/3, ESU Encendida	0.8	2.4	7	96.8%	93.9%
Muestra 2/3, ESU Encendida	0.7	6.1	17	91.9%	94.7%
Muestra 3/3, ESU Encendida	0.6	6.8	19	90.9%	95.4%
<i>10.8 vol.% WC no ΔP</i>					
Muestra 1/3, ESU Apagada	3.5	33.2	95	55.7%	73.3%
Muestra 2/3, ESU Apagada	4.2	56.6	161	24.5%	67.9%
Muestra 3/3, ESU Apagada	3.5	46.6	133	37.9%	73.3%
Muestra 1/3, ESU Encendida	1.2	14.7	42	80.4%	90.8%
Muestra 2/3, ESU Encendida	1.2	16	46	78.7%	90.8%
Muestra 3/3, ESU Encendida	1.3	16.3	47	78.3%	90.1%
^a Medido por Karl Fisher titration.					
^b Medido por las medidas de conductividad					

Continuación Tabla 7. Contenidos de agua y sal, con eficiencias de remoción relativa, en las muestras de 30 ml tomadas de la parte superior de los conos Imhoff

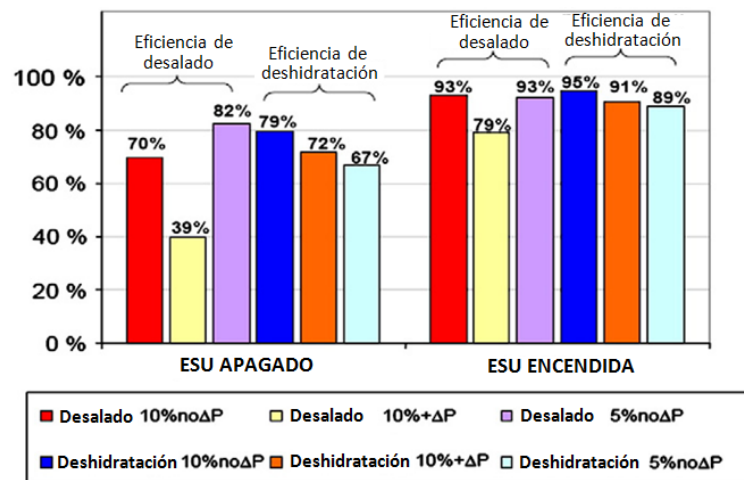
Fuente: LESS Simone, et al. *The electrocoalescers' technology: Advances, strengths and limitations for crude oil separation*. Volume 81. 2012. Pág. 62

La eficiencia de desalado para la emulsión 10,8% con ΔP del 29% al 79% cuando se utiliza electrocoalescencia, con lo que evidencia de que el beneficio de usar electrocoalescencia fue alta en este caso. Esto sugiere que la mejora relativa en el desempeño de deshidratación y desalado, obtenida por electrocoalescentes, es

mayor en los procesos de producción de petróleo que se caracterizan con alta fuerza de corte o cizallamiento en lugar de en escenarios en los que las emulsiones están sueltas.

La ilustración 20 muestra la relación entre el contenido final de agua en las muestras recogidas frente a su contenido final de sal. Los datos originales para el crudo antes de que el experimento también se presentan en este gráfico como referencia. El contenido final de sal se correlaciona con el contenido de agua-en-crudo restante. Los desempeños de deshidratación y desalado obtenidos con ESU encendida son buenas, pero una buena separación también se obtiene con el electrocoalescente apagado. Parece que el efecto del electrocoalescente era acelerar la separación en lugar de romper las emulsiones. Esto ofrece la perspectiva de disminuir el contenido de agua final en este crudo específico, bajo las especificaciones de exportación de 0,3 %, Con una mejora del aparato y de las condiciones del proceso. Posteriormente, para otros crudos y condiciones de producción, el punto de vista puede ser diferente.

Ilustración 23 Eficiencia promedio de deshidratación y desalado

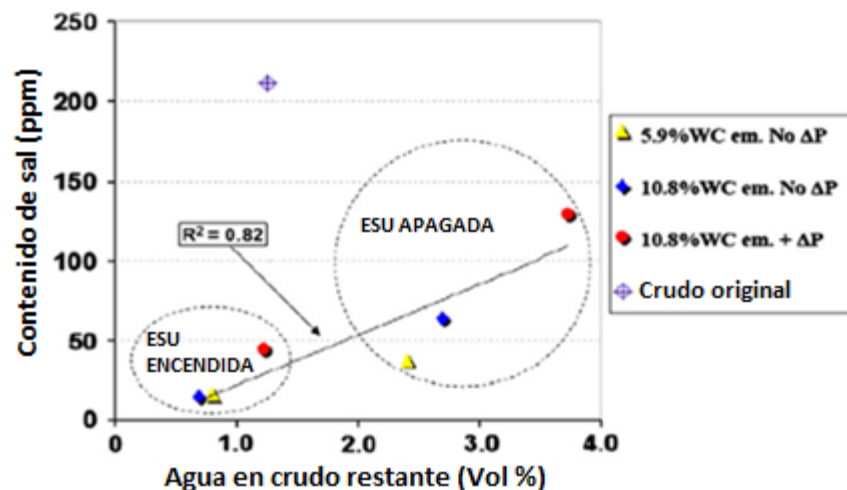


Fuente: LESS Simone, et al. The electrocoalescers' technology: Advances, strengths and limitations for crude oil separation. Volume 81. 2012. Pág. 62

Less (2010) demostró por estudios electro-reológicos que el efecto de la velocidad de corte o cizallamiento es de suma importancia en la electrocoalescencia.

Se encontró que la combinación de fuerzas de corte con un campo eléctrico por encima de un cierto valor de umbral puede aumentar significativamente los rendimientos de separación. El efecto de la temperatura se encontró dominante mientras que se encontró que un aumento en la intensidad de campo eléctrico es beneficioso hasta un valor límite en que la probabilidad de la ruptura de la gota aumentó.

Ilustración 24 Relación entre el contenido de agua final y el contenido de sal de las muestras de 30ml obtenidas de los conos Imhoff



Fuente: LESS Simone, et al. The electrocoalescers' technology: Advances, strengths and limitations for crude oil separation. Volume 81. 2012. Pág. 63.

Conclusiones del experimento

Un análisis de los fenómenos que tienen lugar cuando una emulsión es expuesta a un campo eléctrico muestra que la mejora de la coalescencia de las gotas es

esencialmente debido a las fuerzas de corto alcance. Para que estas fuerzas sean útiles en procesos de separación agua/crudo, es importante aumentar la frecuencia de colisión de las gotas en la emulsión. Esto se puede conseguir mediante la optimización de las características de flujo de la emulsión a través de la unidad de coalescencia para obtener condiciones de turbulencia moderada, usualmente con un número de Reynolds que oscila entre 2000 y 5000.

Para las emulsiones sueltas con alto contenido de agua, la electrocoalescencia ofrece un potencial de reducción de costos y de cuellos de botella en las instalaciones de producción de crudo.

Sin embargo, para aplicaciones con gotas muy pequeñas y fluido con alta viscosidad, el contacto poco frecuente de gota y el proceso lento de adelgazamiento de la película puede dificultar considerablemente la eficiencia de la electrocoalescencia.

En tales condiciones, una estrategia de separación de emulsiones, que combina electrocoalescencia con técnicas complementarias tales como inyección de productos químicos desémulsificantes, es muy recomendable.

Un estudio de la evolución reciente de la tecnología electrocoalescente se llevó a cabo en este trabajo. Se encontró que los fabricantes han adoptado un enfoque más cliente-segmentado en el diseño de sus electrocoalescentes dirigido a aplicaciones industriales específicas. Las tecnologías VIEC™ y VIEC™LV están diseñadas para contribuir a la deshidratación parcial temprana en la primera etapa de separación donde se encuentra un alto contenido de gas y agua libre. Las tecnologías CEC™ y Dual Polarity®/ Dual Frequency® están diseñadas para aplicaciones donde existen fracciones bajas de gas y condiciones de fluido de

bajo BS&W, y por lo tanto orientado a su uso en la segunda y tercera etapa del proceso de separación del crudo.

Los experimentos de laboratorio confirman el importante papel de las propiedades físico-químicas de la emulsión y la tasa de corte del flujo en la eficiencia del electrocoalescedor.

5.5LA DESHIDRATACIÓN DE CRUDO CON TRATADORES ELECTROSTÁTICOS: DESARROLLO DE DIRECTRICES DE DISEÑO Y DE FUNCIONAMIENTO ²⁴ - TRATADORES ELECTROSTÁTICOS UTILIZADOS EN VARIOS CAMPOS DE SHELL

Los tratadores electrostáticos se han utilizado en varios campos de Shell para deshidratar crudos livianos, medianos y pesados. El rendimiento y funcionamiento de la deshidratación electrostática se ha demostrado a través de pruebas piloto y demostraciones de campo. Un caudal de crudo de 200 a 300 BOPD/ft² del área de rejilla de crudos livianos (30-35° gravedad API) y 10-20 BOPD/ft² de crudos pesados (11-14° gravedad API) demostraron ser adecuados para la producción de crudo de calidad para oleoducto. La implementación de estos tipos de diseño podría dar lugar a ahorros de capital tangibles en la reducción del tamaño y el peso muerto (importante para plataformas) así como en la reducción de los costos de operación.

²⁴ (9) Z.I Khatib. Dehydration of Crude Using Electrostatic Treaters: Development of Design and Operating Guidelines. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 6-9 October, Denver, Colorad. Society of Petroleum Engineers. 1996.

La deshidratación electrostática de crudos ligeros, medios y pesados se ha utilizado en varios campos de Shell, sobre todo en el Golfo de México, el oeste de Texas y California. El éxito de las operaciones no se alcanzado plenamente, ya que en la mayoría de los casos, las redes eléctricas han sido, apagadas o han presentado cortocircuito. El uso de tratadores electrostáticos en *North Midway Sunset*, California, demostró que los tratadores electrostáticos funcionaban, pero necesitaba mucha atención para adición de crudo ligero, químicos de ruptura de emulsiones, fuga de gas, acumulación de sólidos en la interfaz, intensidad del campo aplicado, y conductividad del crudo.

En 1990, un piloto a escala de Chemn-Electric Treater (PSCET) fue construido para hacer frente a los problemas de funcionamiento encontrados en la deshidratación de crudos pesados, para investigar la deshidratación electrostática de crudos ligeros y medianos, y para proporcionar una amplia base de datos para diversos crudos. Los objetivos de las investigaciones del piloto a escala fue determinar los criterios de tamaño para tratadores electrostáticos, proporcionar directrices de funcionamiento, e identificar la tolerancia de estos tratadores a los sólidos y perturbaciones de gas.

Este trabajo presenta las observaciones hechas basadas en las pruebas piloto y analiza su importancia en el establecimiento del marco operativo y mejores prácticas para tratadores electrostáticos, describe el diseño de un nuevo separador de entrada, resume el desempeño de tratadores electrostáticos en dos campos, y ofrece varias prácticas de operación y correlaciones que se pueden usar para predecir el rendimiento.

5.5.1 Tratadores electrostáticas

5.5.1.1 Conceptos básicos.

La deshidratación electrostática se produce debido al estiramiento y oscilación de las gotas de agua inducida por el estado del dipolo en el campo eléctrico. El estiramiento de las gotas de agua tiende a distorsionar la película entre las gotas de agua, produciendo su ruptura, mejorando de este modo la coalescencia.

La fuerza de atracción de las gotas de igual tamaño se expresa matemáticamente por:

$$F = 6 \cdot K \cdot E^2 \cdot d^6 / D^4; \quad (8)$$

Donde **K** es la constante dieléctrica, **E** es el gradiente eléctrico, **d** es el radio de la gota, y **D** es la distancia entre los centros de las gotas.

Un aumento en el gradiente eléctrico podría causar una respuesta rápida, pero también tiende a suspender las gotas a lo largo de las líneas de campo. Si las fuerzas eléctricas son más altas que las fuerzas gravitatorias, la sedimentación de las gotas de agua se verá afectada. Además, la intensidad de campo excesivo (~7kVAC/in.) pudiera romper las gotas de agua grandes.

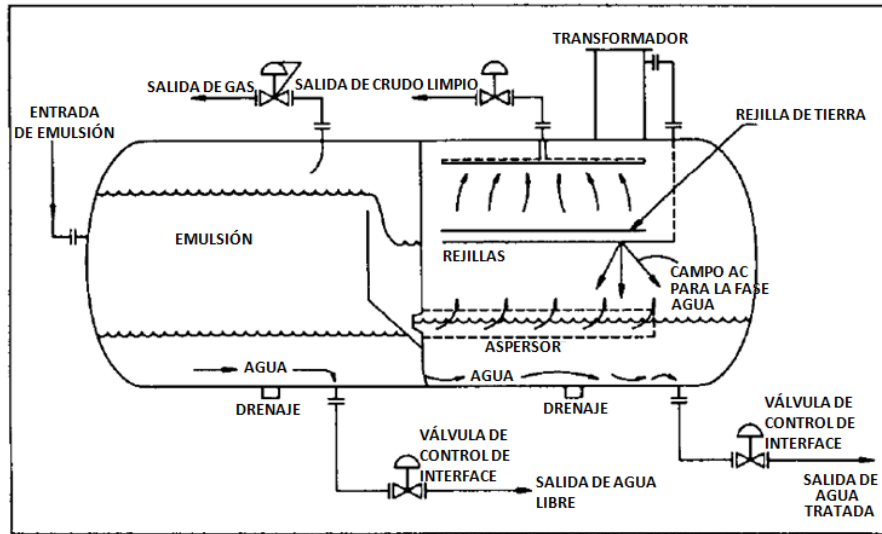
Generalmente, los límites de voltaje se encuentran entre 12 y 23 kV variando inversamente proporcional a la gravedad del crudo y a la conductividad de la emulsión tratada. La conductividad eléctrica del crudo aumenta con la temperatura y está dada por $\sim e^{ct}$. Donde **c** es una constante función del crudo. Tener en cuenta que un pequeño aumento de la temperatura generará un aumento sustancial de la conductividad seguida de alto consumo de energía, especialmente a altas temperaturas.

Para un tratador electrostático utilizando voltaje AC, hay tres componentes principales: (1) fuente de alimentación (transformador), (2) electrodo inferior cargado, y (3) electrodo de tierra superior. El transformador convierte el voltaje de línea al voltaje de salida requerido. Este voltaje se aplica al electrodo inferior a través de un buje de entrada aislado y sellado a presión a través de la carcasa del recipiente o contenedor.

Como resultado, existen dos campos eléctricos separados: uno de alto gradiente entre el electrodo de tierra superior y el electrodo cargado y uno de menor gradiente entre el electrodo cargado y la interface crudo/agua. Un tratador electrostático convencional se muestra en la Ilustración 25.

La mayoría de las gotas de agua se unen cerca del electrodo cargado. Para gotas muy pequeñas (<15 micras), se encontró que la aplicación de un potencial DC de doble polaridad en la región de alto gradiente entre los electrodos mejora la coalescencia de estas gotas, lo que resulta en un contenido de agua mucho menor en las salidas de crudo. En un campo DC y con cambio en la polaridad, la mitad de las gotas que están influenciados por el electrodo positivo y la otra mitad que están influenciados por el electrodo negativo migran en direcciones opuestas y chocan continuamente, mejorando de este modo su coalescencia.

Ilustración 25 Tratador Electrostático – Unidad convencional AC



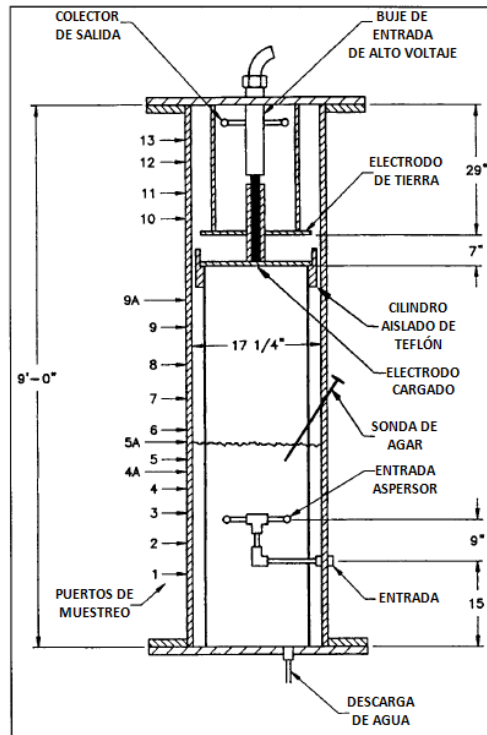
Fuente: Z.I Khatib. Dehydration of Crude Using Electrostatic Treaters: Development of Design and Operating Guidelines. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 6-9 October, Denver, Colorado. Society of Petroleum Engineers. 1996. Pág. 2.

Tratador electrostático – piloto a escala. El Pilot-Scale Chem-electric Treater (PSCET) incluye un tratador con rejillas eléctricas, tres tanques de alimentación (uno de 300 galones y dos de 500 galones de capacidad cada uno), un tanque de crudo tratado (700 galones), y las bombas y tuberías asociadas para la preparación de la emulsión e inyección de productos químicos. El tratador (70 galones) representa una salida vertical exterior de 18-in, de un tratador electroquímico con un diámetro horizontal de 9 pies. Un campo eléctrico AC ó DC se puede aplicar al interior de las rejillas de tipo varilla. Un diagrama esquemático del tratador se muestra en la Ilustración 23. Una sonda agar se utiliza para controlar la interface crudo/agua.

El crudo y el agua utilizada en la prueba piloto se obtuvieron de varios campos mediante un tanque remolque. Una capa de nitrógeno y un intercambiador de vapor se utilizan para prolongar las propiedades del crudo/agua. El crudo y el agua se mezclaron a un corte de agua especificado usando un mezclador estático

y/o una placa de orificio. Los tamaños de la gota de agua se controlan mediante la aplicación de una presión diferencial específica a través de una válvula de compuerta. El corte de agua de la emulsión se monitoreó a la entrada y a lo largo de toda la longitud del tratador y en la salida.

Ilustración 26 Esquemático del recipiente PSCET.



Fuente: Z.I Khatib. Dehydration of Crude Using Electrostatic Treaters: Development of Design and Operating Guidelines. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 6-9 October, Denver, Colorado. Society of Petroleum Engineers. 1996. Pág. 2.

5.5.1.2 Consideraciones de funcionamiento

La deshidratación electrostática (campo AC) de crudos ligeros, medios y pesados se investigó mediante el PSCET para determinar el rendimiento de una serie de parámetros de funcionamiento: temperatura de funcionamiento, el tamaño de la

gota de agua, caudal de crudo, etc. Para una emulsión desestabilizada químicamente, el rendimiento químico-eléctrico se demostró ser superior a la de un simple tratador termico como se muestra en la Tabla 1. Los resultados indicaron claramente que la salida de BS&W se redujo en al menos un factor de cuatro mediante el campo eléctrico. Las siguientes secciones resumen los resultados de las pruebas piloto para cada uno de los parámetros investigados y se discute su significado basado en verificaciones de crudo en campo y la literatura citada.

Tabla 8 Deshidratación electrostática de varios crudos

	API	Flujo (BOPD/ft ²)	Temperatura (°F)	S (s/cm ²)	Entrada BS&W V%	Sin Rejilla	Con Rejilla
Crudo A	35.8	47	100	5.600	20	1.0	0.3
Crudo B	27.6	303	120	3.460	12	8.0	0.7
Crudo C	21.6	26	152	0.480	15	4.2	0.9
Crudo D	19.5	40	143	0.350	29	3.4	0.4
Crudo E	18.5	40	190	0.520	18	4.0	0.9

Crudo F	13.0	48	220	0.096	22	27.0	1.7
---------	------	----	-----	-------	----	------	-----

(Continuación de Tabla 9Deshidratación electrostática de varios crudos)

Fuente: Z.I Khatib. Dehydration of Crude Using Electrostatic Treaters: Development of Design and Operating Guidelines. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 6-9 October, Denver, Colorad. Society of Petroleum Engineers. 1996. Pág. 3.

5.5.1.3 Temperatura de funcionamiento

La diferencia de densidad entre el crudo y el agua aumenta generalmente con un aumento de la temperatura, picos a alguna temperatura, dependiendo del crudo, y comienza a disminuir poco a poco posteriormente. Por otra parte, la viscosidad del crudo disminuye continuamente con un aumento de la temperatura.

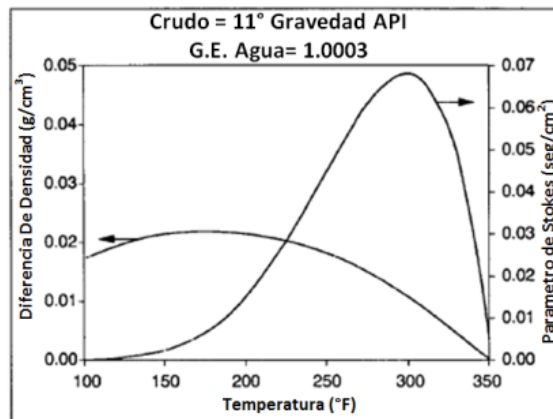
El parámetro de Stokes, que se define como la diferencia de densidad dividida por la viscosidad cinemática del crudo, se utiliza comúnmente como un indicador de la facilidad de separación. El efecto de la temperatura sobre la diferencia de densidad y los parámetros de Stokes se ilustra en la Ilustración 24. Como se muestra, los picos de diferencia de densidad a aproximadamente 170°F, y los picos de los parámetros de Stokes a unos 320°F para un crudo de 11° API. Una temperatura de funcionamiento óptima se espera que caiga entre 170°F y 320°F dependiendo del tipo de crudo. Dado que los tratadores electrostáticos son recipientes a presión, la deshidratación a temperaturas elevadas se puede lograr con una presión de funcionamiento que exceda la presión de vapor del crudo y del agua.

Las pruebas piloto que usaron crudo F, sin embargo, no mostraron ningún beneficio adicional aumentando la temperatura desde 220° a 260°F. La Ilustración 25 ilustra el efecto de la temperatura en el parámetro de Stokes para diversos crudos.

En general, cuanto mayor sea el parámetro de Stokes, más fácil es la separación. Tener en cuenta que a altas temperaturas, uno o más de los siguientes puede ser experimentado: (1) un aumento en la conductividad eléctrica puede resultar en un mayor consumo de energía; (2) la desgasificación los productos finales livianos de los crudos si la presión de funcionamiento no se cambia puede terminar en cortocircuitos; (3) una disminución de la diferencia de densidad, la inhibición de separación y expandido resultante en una interfaz crudo/agua; (4) aumento de la flotabilidad de la alimentación en relación con el contenido del tratador, lo que resulta en menos tiempo de residencia y en cortocircuitos; y (5) la precipitación de escamas, tales como carbonato de calcio, resultando en la acumulación de sólidos en la interfaz.

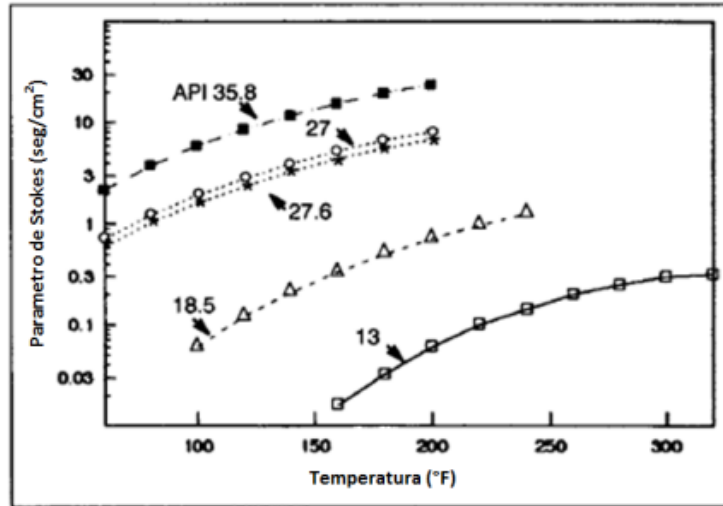
El uso excesivo de calor puede dar lugar a una falla de proceso y a costos de operación innecesariamente altos. Además, con las altas temperaturas de tratamiento, la pérdida de productos livianos en el sistema de recuperación de vapor puede dar cuenta de más de 3% del crudo tratado, en particular cuando la presión de funcionamiento del tratador es baja.

Ilustración 27 Diferencia de densidad Crudo/Agua y Parámetro de Stokes



Fuente: Z.I Khatib. Dehydration of Crude Using Electrostatic Treaters: Development of Design and Operating Guidelines. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 6-9 October, Denver, Colorad. Society of Petroleum Engineers. 1996. Pág.3.

Ilustración 28 Parámetro de Stokes como una función de la temperatura



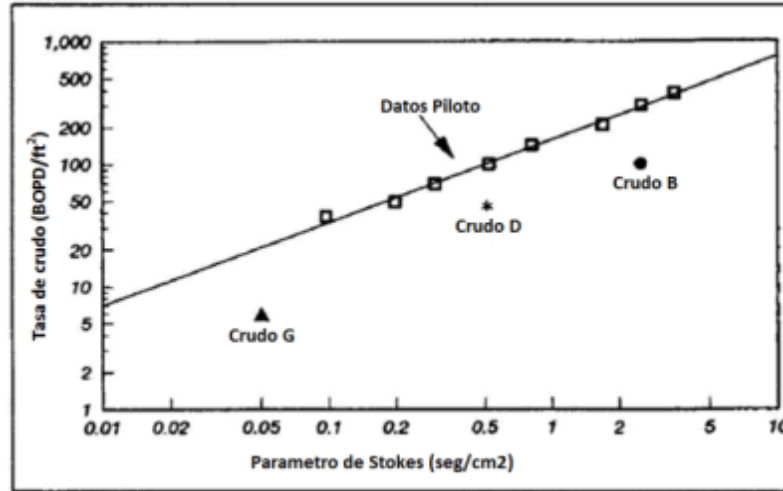
Fuente: Z.I Khatib. Dehydration of Crude Using Electrostatic Treaters: Development of Design and Operating Guidelines. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 6-9 October, Denver, Colorado. Society of Petroleum Engineers. 1996. Pág.3.

5.5.1.4 El caudal de crudo

El caudal de crudo se varió para cada uno de los crudos probados para identificar la tasa máxima a la que los tratadores electrostáticos podrían proporcionar crudo de calidad al oleoducto (BS&W < 3 % para los crudos pesados y < 1 % para crudos livianos). La tasa máxima presentada como BOPD/ft² de área de sección transversal del recipiente como una función del parámetro de Stokes se muestra en la Ilustración 26 y se compara con los criterios de diseño actuales en varios campos de Shell. Se encontró que los caudales de crudo estaban alrededor de cuatro veces más altos que las tasas de diseño recomendadas por el proveedor.

Esto no es de gran sorpresa. Los vendedores en sus diseños suponen que las rejillas pueden hacer cortocircuito y que el recipiente va a funcionar como un tratador mayor.

Ilustración 29 Parámetros de operación actual Vs Data de diseño piloto



Fuente: Z.I Khatib. Dehydration of Crude Using Electrostatic Treaters: Development of Design and Operating Guidelines. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 6-9 October, Denver, Colorad. Society of Petroleum Engineers. 1996. Pág.4.

5.5.1.5 Tamaños de gota de agua

El tamaño de la gota de agua en la emulsión tratada es un parámetro importante para la deshidratación electrostática. Entre más grande sea la gota, más fácil será la coalescencia. Teniendo en cuenta que los tratadores electrostáticos funcionan sólo cuando las gotas de agua están dispersas o químicamente desestabilizadas.

La técnica de análisis de imagen se utilizó para determinar tamaños de gota para diversas emulsiones. La Ilustración 27 muestra el efecto en los tamaños de las gotas en el caudal del crudo y en la Tabla 6 se listan las tasas de crudo, tamaños de gota, y salida de BS&W por deshidratación electrostática de crudo B a 140°.

Estos resultados demuestran que las tasas de crudo pueden ser tan altas como 382 BOPD/ft² manteniendo al mismo tiempo una salida de BS&W inferior a 1%. Si el tamaño medio de la gota es mayor a 31 micras, el BS&W podría reducirse al

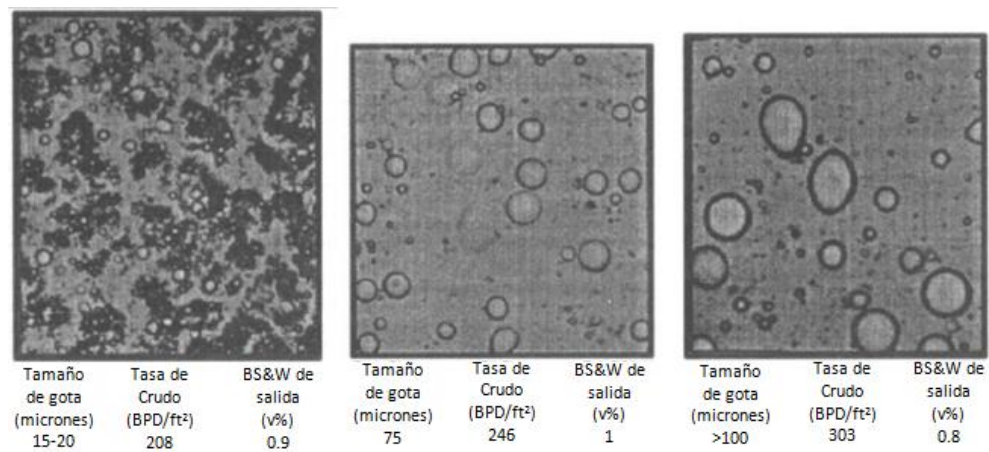
0,8%. En general, los tamaños de las gotas creados en estas pruebas eran mucho más pequeños que los determinadas en sitio (120 micras).

Tabla 9 Efecto del rendimiento del crudo en la salida de BS&W (v% H₂O)

Tasa de Crudo (BOPD/ft ²)	Mediana del tamaño de la gota (micrones)	BS&W de salida (v% H ₂ O)
243	33	0.5
283	31	0.5
321	21	0.7
336	26	0.8
360	29	0.8
378	31	0.8
382	21	1.0

Fuente: Z.I Khatib. Dehydration of Crude Using Electrostatic Treaters: Development of Design and Operating Guidelines. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 6-9 October, Denver, Colorad. Society of Petroleum Engineers. 1996. Pág. 4.

Ilustración 30 Efecto del tamaño de la gota en las tasas de crudo – Crudo B (10 v%) a 100F



5.5.1.6 Cortes de agua de Entrada

El BS&W del crudo limpio se mantuvo sin cambios durante el aumento de cortes de agua de entrada de 5 a 30%, siempre y cuando los tamaños de las gotas de agua fueran más grandes a 30 micras. A cortes de agua de entrada de 3-5%, el BS&W del crudo fue ligeramente superior, pero se mantuvo menor a 1%. Las gotas deben tener de 2 a 3 diámetros de gota para que se produzca la coalescencia. La capacidad del tratador electrostático para manejar altos cortes de agua implica que (1) una operación consistente puede ser mantenida con aumentos repentinos de corte de agua, (2) el tamaño de los recipientes aguas arriba se puede reducir y/o el nivel de interfaz agua/crudo puede ser elevado para reducir arrastre de crudo con el agua. Todos estos beneficios se pueden lograr si se minimiza el cortocircuito líquido. Este efecto es discutido más adelante bajo las consideraciones de diseño y funcionamiento.

5.5.1.7 Intensidad del campo aplicado

Se encontró que el rendimiento de la deshidratación mejora con el aumento de las intensidades de campo y que las intensidades de campo más altas eran necesarias con tasas más altas y/o cortes de agua mayores. Por ejemplo, para deshidratar el crudo F a la calidad del oleoducto, un mínimo de 1,14 kV/in. de separación de rejilla para cortes de agua de entrada entre 5-10% y un promedio de 2 kV/in. para cortes de agua de 20%. son requeridos. Para este crudo y crudo G, el consumo de energía fue entre 0,5-0,6 kVA/ft² en el área de la rejilla. Estos

crudos son más conductivos eléctricamente que de lo normal y por lo general requieren el doble del consumo de energía habitual.

El cortocircuito eléctrico o formación de arcos entre las rejillas (o placas) se observó que se producen cuando el corte de agua entre las rejillas supera 5-8% dependiendo de los tamaños de partícula y el tipo de crudo.

Con crudos más pesados, el contenido de agua que podría cortocircuitar las rejillas puede ser menor al 5%, particularmente cuando el crudo es muy conductivo.

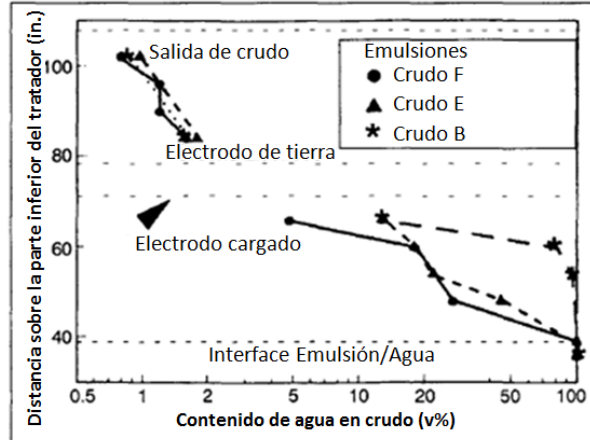
5.5.1.8 Perfiles BS&W de los Tratadores

Los perfiles para crudo F, Crudo E y Crudo B en las tasas máximas que se lograron con BS&W de 1 % o menos se muestran en la Ilustración 28. Como era de esperar, hay un cambio acelerado en el contenido de agua entre la interfaz agua/crudo y la rejilla cargada. En general, la más alta intensidad de campo está dentro de un pie debajo de la rejilla cargada donde se produce la mayoría de la deshidratación. Por esta razón muchos vendedores de tratadores electrostáticos ponen la interface agua/crudo 1-2 pies debajo de la rejilla cargada. Sin embargo, cuando la interface crudo/agua estaba 2-3 pies por debajo de la rejilla cargada, no se observó ningún cambio en el rendimiento de la deshidratación. Se encontró que el perfil de saturación de agua se expande en relación a la distancia entre la rejilla cargada y la interface crudo/agua.

Como resultado, las directrices proponen una distancia de 3 pies entre la interfaz y la rejilla cargada para proporcionar más tiempo de residencia al agua y para evitar cortocircuitos en las rejillas, si en la interfaz una capa de emulsión estable se está acumulando. Se produjo deshidratación adicional, entre y por encima de las rejillas. Tal como se representa por la pendiente de las curvas en la Ilustración 25,

esta mejora parece ser debido al tiempo de residencia en lugar del alto gradiente entre las rejillas.

Ilustración 31 Perfil PSCET de varios crudos a tasa máxima de crudo



Fuente: Z.I Khatib. Dehydration of Crude Using Electrostatic Treaters: Development of Design and Operating Guidelines. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 6-9 October, Denver, Colorado. Society of Petroleum Engineers. 1996. Pág.5.

5.5.1.9 Calidad del Agua

El contenido de crudo en el agua producida generalmente aumentó con un aumento de la temperatura de deshidratación y varió en promedio de 300 a 500 ppm.

5.5.1.10 Alteración de Sólidos

El rendimiento de la deshidratación del piloto no se ve afectado cuando los sólidos de entrada eran principalmente arenas mojadas del agua de formación y se mantuvo por debajo del 1%. Por otro lado, con sólidos húmedos de crudo tales como arcilla/FeS, el BS&W del crudo deshidratado aumento periódicamente a 2-3% en función de su porcentaje.

A tasas superiores, estos sólidos húmedos de crudo (~ 0,2-0,3 %) se arrastraron con el crudo tratado y contribuyó a la alta salida de BS&W. En Midway Sunset, los sólidos de crudo húmedos como sulfuros de hierro y asfaltenos estabilizaron la emulsión, creando una interface crudo/agua pobremente definida que creció con el

tiempo. La presencia de estos sólidos crea una capa viscosa y una capa neutra flotante, que se opone a la separación agua/crudo, aumentando la conductividad eléctrica del crudo, resultando en agua aceitosa, y hace que sea difícil sostener un campo eléctrico durante largos períodos.

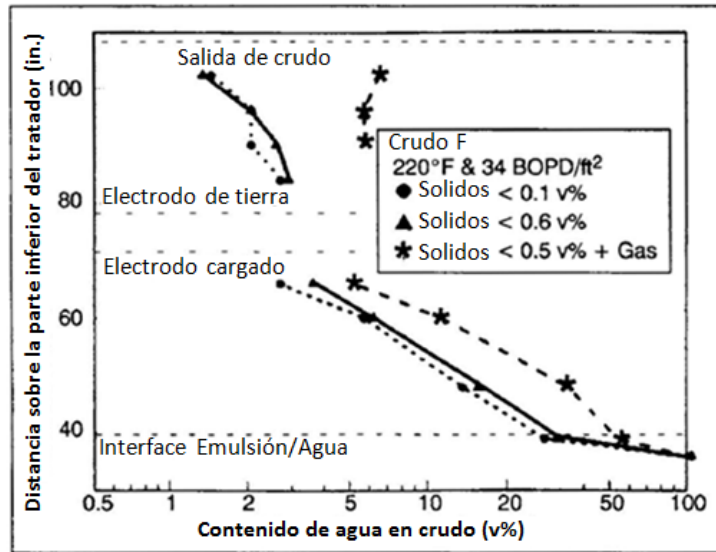
5.5.1.11 Alteración de gas libre

El gas libre en la alimentación existe debido a una o más de las siguientes razones: (1) separación insuficiente de gas en el separador de tres fases (FWKO), (2) excesivo calor en los generadores de calor, y (3) presión operativa por debajo de la presión de vapor de los fluidos en el tratador.

Teniendo en cuenta que con el crudo más viscoso, la tasa de desgasificación es lenta. Las pruebas piloto sugirieron que el gas libre hasta una relación en volumen gas/crudo de 0,05 se puede tolerar cuando el contenido de sólidos es menor a 0,05%.

En la presencia de sólidos más altos, este valor es disminuido a menos de 0.025. La Ilustración 8 muestra los perfiles del piloto para deshidratar el crudo F a 220°F y 34 BOPD/ft² en la presencia de sólidos y de gas. Como se muestra, la presencia de sólidos aumentó ligeramente el contenido de agua. Sin embargo, la presencia de gas en conjunción con sólidos aumentó el BS&W de 1% a 5%. Esta observación resalta la importancia de la separación completa de gas aguas arriba del tratador electrostático y de reducir al mínimo la liberación de gas en el tratador debido a la presión insuficiente de operación.

Ilustración 32 Efectos de los sólidos y alteraciones de gas en el desempeño



Fuente: Z.I Khatib. Dehydration of Crude Using Electrostatic Treaters: Development of Design and Operating Guidelines. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 6-9 October, Denver, Colorado. Society of Petroleum Engineers. 1996. Pág.6.

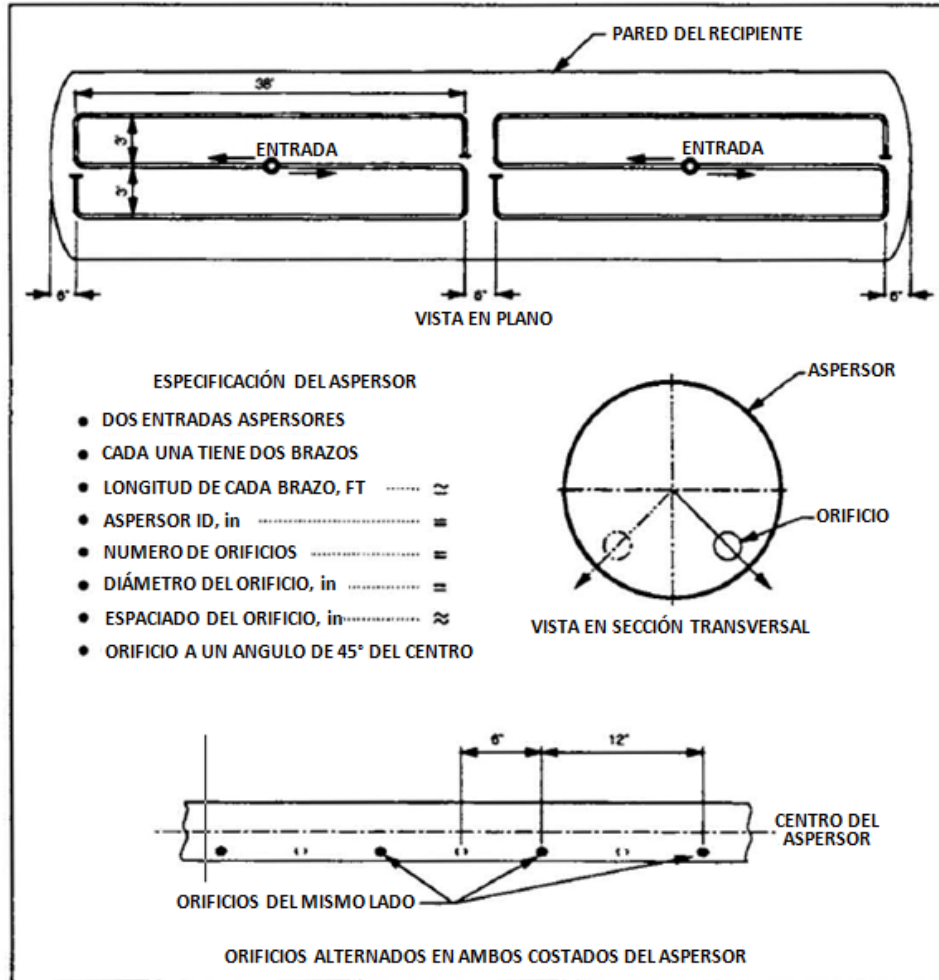
5.5.1.12 Novedoso Diseño de Separadores de Entrada

El cortocircuito líquido en tratadores reduce el tiempo efectivo de retención y coalescencia gota-gota y aumenta las velocidades de flujo ascendente que a su vez aumenta el arrastre del agua. Los cortocircuitos como se mencionó anteriormente se producen debido al aumento repentino del flujo, a la obstrucción de alimentación de las barras de separación, a la presencia de gas libre y / o sólidos, y al aumento de la temperatura en la alimentación. El corto circuito puede reducirse no sólo mediante la optimización de las condiciones de funcionamiento, sino también por el diseño de entrada eficiente y barras separadoras de salida.

Para lograr el máximo aprovechamiento del área de sección transversal del tratador, un diseño novedoso de separador de alimentación fue desarrollado e implementado en los tratadores actuales en el campo Midway Sunset y en los

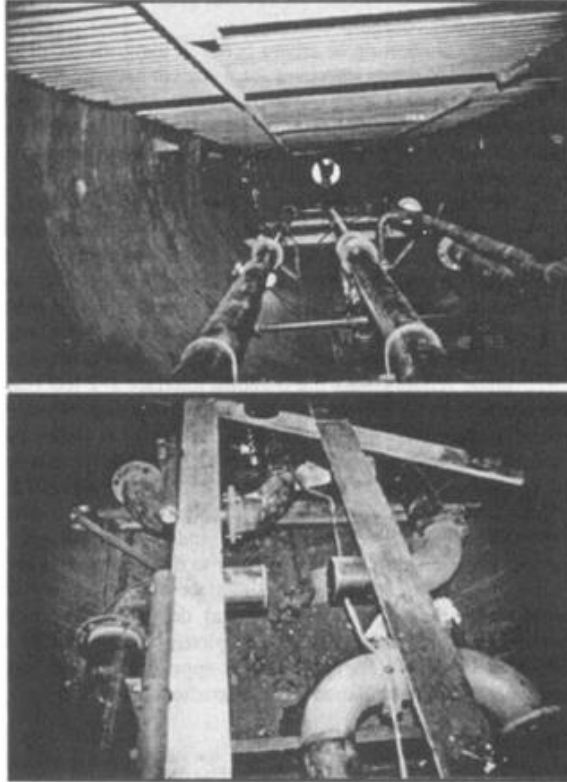
tratadores futuros de Mars y Ram Powell. La Ilustración 30 ilustra el diseño esparcidor y muestra los requisitos para las especificaciones del esparcidor. La Ilustración 31 muestra imágenes de la barra de separación o separador en uno de los tratadores electrostáticos en el campo Midway Sunset.

Ilustración 33 Diseño del separador del tratador electrostático (no a escala)



Fuente: Z.I Khatib. Dehydration of Crude Using Electrostatic Treaters: Development of Design and Operating Guidelines. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 6-9 October, Denver, Colorado. Society of Petroleum Engineers. 1996. Pág.6.

Ilustración 34 Separador de entrada del tratador electrostático (NMWSS contrato no gubernamental, California)



Fuente: Z.I Khatib. Dehydration of Crude Using Electrostatic Treaters: Development of Design and Operating Guidelines. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 6-9 October, Denver, Colorad. Society of Petroleum Engineers. 1996. Pág.6.

5.6 EXPERIENCIA DE CAMPO

Las siguientes secciones presentan el estado del uso de tratadores electrostáticos en dos campos, uno trata crudo pesado y el otro trata crudo ligero.

5.6.1 Campo Midway Sunset

La deshidratación de producción de 11°API en el campo North Midway Sunset (NMWSS) se ha consolidado con la finalización de una facilidad de deshidratación central de crudo. Las facilidades de deshidratación central (CDF) del NMWSS, usa alta temperatura, tratadores mecánicos de flujo horizontal (12x80) y tratadores electrostáticos de flujo vertical (12x80).

Los tratadores son envasadores de fluido y fueron fabricados originalmente en 1986. La capacidad nominal de las facilidades es de 6.000 BOPD y 23.500 BWPD por tren de tratamiento. Antes de 1992, el tratamiento de producción de NMWSS se logró con la adición de crudo liviano diluido y la separación por gravedad en tanques de sedimentación atmosféricos con calentamiento. Se estima que el costo de crudo liviano para aquel entonces costaba \$0.60/BO. Este alto costo para diluir condujo a la búsqueda de un proceso alternativo.

Basados en los resultados de la prueba PSCET, los tratadores electrostáticos se incluyeron en las nuevas facilidades de deshidratación. Posteriormente, el uso del crudo liviano diluido se suspendió en 1993 tras las manifestaciones de campo que confirman que su uso era innecesario.

El Parámetro de Stoke, como se muestra en la Ilustración 24, indica que la deshidratación óptima se produce a temperaturas cercanas a 300°F.

Sin embargo, a esta alta temperatura la diferencia de densidad entre el crudo y el agua se redujo a un estado crítico que incluso las perturbaciones menores en la región de separación pueden cambiar la posición del agua con el crudo. Los operadores informaron que el análisis de las muestras obtenidas de un lado del tratador indica que el agua estaba presente cerca de la parte superior del

recipiente. Tiempo de retención y estudios de perfil concluyeron que el tiempo de retención es de cuatro a diez veces menor que el tiempo calculado.

Emulsión efluentes (2-20% de S&W) desde el tratador mecánico de flujo horizontal es alimentado al tratador electrostático. El diseño original Howe-Baker presentó emulsión de entrada en un lugar 10 pulgadas por encima de un valor nominal de la interfaz crudo/agua de 39 pulgadas. Durante las pruebas de rendimiento, las observaciones visuales de una celda electrostática con modelo dinámico a escala de laboratorio confirmó el desarrollo de una capa viscosa de emulsión estable cerca de la interfaz nominal crudo/agua y de interferencia hacia la capa con agua de asentamiento cuando la emulsión se introdujo por encima de la interfaz nominal crudo/agua. Modificaciones internas fueron posteriormente realizadas bajando la entrada a 36 pulgadas, 12 pulgadas por debajo de la interfaz nominal crudo/agua, la cual se eleva a 48 pulgadas. Los cabezales de entrada también fueron rediseñados con el nuevo diseño desarrollado para mejorar la distribución en todo el contenedor. La Ilustración 31 muestra las partes internas del tratador electrostático incluyendo el cabezal de entrada.

Consideraciones de diseño y de funcionamiento críticos se encontraron usando tratadores electrostáticos de alta temperatura para la deshidratación de las emulsiones de 11°API. El potencial eléctrico completo ha sido difícil mantener en rejillas electrostáticas incluso con tres transformadores de 150 KVA capaces de proporcionar potenciales de 12KV /16kV /20kV en el interior del recipiente. Como originalmente fue diseñado por Howe-Baker, cada tratador incluye una rejilla inferior activa a 6 pies 4 pulgadas, una rejilla a tierra a 7 pies 0 pulgadas, y una rejilla activa superior a 9 pies 0 pulgadas. La rejilla activa más baja se encuentra a unas 27 pulgadas por encima de la entrada de la emulsión. Con el fin de evitar un cortocircuito, la rejilla activa más baja se elevó a 7 pies 8 pulgadas (ahora 56 pulgadas por encima de la entrada). La rejilla a tierra se elevó a 8 pies 4

pulgadas; el espaciado de la rejilla activa más baja a la rejilla de tierra sigue siendo de 8 pulgadas. La rejilla superior activa se eliminó. Incluso después de modificaciones, el potencial de la rejilla completa sigue siendo difícil de mantener por encima de 280°F y los tratadores a menudo funcionan como simples tratadores de volumen.

A alta temperatura de funcionamiento (300°F), la "interfaz" crudo/agua se distribuye sobre una amplia banda vertical. El control de esta interface crudo/agua no tradicional era extremadamente difícil. Los tratadores están equipados con sondas de RF suspendidas verticalmente.

Se encontró que esta instrumentación tradicional era marginalmente adecuada. Alternativamente, la muestra try-cocks se utiliza rutinariamente para evaluar la localización y propiedades de la interfaz y ajustar el sistema de control, calibraciones y configuraciones. Sin embargo, esto no impidió el arrastre de crudo ocasional en la descarga de agua. Actualmente, este crudo "decantado" varía de 1% a 10% del rendimiento neto de la facilidad de crudo. Recolectores de separadores de aceite flotantes o skimmers se caracterizan por una emulsión muy estable de 50% de S&W. El retorno de recolección de los "decantados" del proceso causó alteraciones en las facilidades; actualmente se almacenan en un tanque de retención y se procesa a través de una centrífuga de alta velocidad.

5.6.2 Plataforma Bullwinkle, Golfo de México

La producción de Green Canyon 65 es actualmente de 48 MBOPD y 10 MBWPD. Las facilidades de deshidratación incluyen separadores bifásicos HP e IP, un FWKO, y un tratador de volumen con una sección de desgasificación (12 pies x 15 pies) y la sección electrostática (12 pies x 40 pies). El caudal de diseño es de 100 BOPD/ft² del área de la rejilla. Las rejillas electrostáticas hicieron cortocircuito después de una alteración debido a la descarga de un ácido del pozo.

Como resultado, los tratadores electrostáticos funcionan como un tratador de volumen. El tiempo de residencia del crudo en el FWKO es de aproximadamente 12,6 minutos. La temperatura de operación fue de aproximadamente 114°F en el FWKO y aproximadamente 122°F en el tratador de volumen. Un cortador de emulsión fue agregado aguas arriba del FWKO.

La salida de BS&W fue de aproximadamente 0,6% de H₂O aguas abajo del FWKO y 0,5% de H₂O aguas abajo del tratador de volumen. Esto indicó que la deshidratación se produce principalmente en el FWKO y que la salida de BS&W en el tratador de volumen disminuyó ligeramente debido a un aumento adicional de 8° en la temperatura de funcionamiento y el tiempo de residencia adicional. El diámetro promedio volumétrico de las gotas era de 36 micras aguas arriba del FWKO, 148 micras aguas arriba del nivel de las válvulas de control, 40 micras aguas abajo del nivel de las válvulas de control, y 120 micras aguas abajo del intercambiador de calor. La instalación de los intercambiadores de calor aguas abajo de estas válvulas aumentó el potencial de coalescencia y aumentó de tamaño de las gotas aguas arriba del tratador de volumen. Estas observaciones demuestran que los tamaños de los recipientes o contenedores aguas arriba están sobredimensionados para la capacidad actual y que no hay necesidad de añadir calor aguas abajo de la FWKO.

5.7 PRÁCTICAS DE OPERACIÓN

La deshidratación electrostática de crudos pesados, medianos y ligeros demostró que la calidad de oleoducto se puede lograr. El rendimiento de la deshidratación

electrostática puede mejorarse abordando las siguientes consideraciones operativas y de diseño:

Maximizar la entrada de tamaños de gota de agua: Revisar el proceso de flujo de fluido desde la cabeza del pozo al tanque de crudo seco para determinar las condiciones de flujo y para minimizar el rompimiento innecesario de la gota de agua a través de las válvulas y curvaturas. Por ejemplo, si las válvulas de control están diseñadas para la producción pico y la producción actual es de sólo el 50%, la válvula debe ser restringida sin potencial de rompimiento de gota.

Caracterizar las propiedades de la emulsión: Determinar la viscosidad, densidad, conductividad eléctrica y la tensión interfacial de los fluidos para detectar cualquier cambio en la producción desde su inicio. Identificando los tipos de sólidos, si hay lugar.

Optimizar el uso de calor: Determinar el parámetro de Stokes y operar a temperatura suficientemente baja para obtener crudo de calidad de oleoducto.

Reducir los aumentos repentinos de flujo: Mantener el flujo constante y no operar por debajo del caudal de diseño para evitar cortocircuitos.

Reducir el contenido de sólidos: Identificar la fuente y el tipo de sólidos y retirar la capa (colchón) y manejar por separado para sostener una interfaz claramente definida en el sistema de tratamiento.

Reducir gas libre: Asegurarse de que la alimentación al tratador electrostático no contiene gas libre y mantiene suficiente presión de trabajo a la temperatura de funcionamiento.

Manejar por separado el crudo de desecho: No recircular el crudo decantado al frente de las instalaciones de tratamiento. Tratar el crudo decantado separado para reducir las condiciones alteradas.

Optimizar el tratamiento químico: Revisar si el cortador de emulsión es compatible con el crudo y dispersa la emulsión usando pruebas centrífugas de laboratorio.

Diseñar mejores barras separadoras de entrada y de salida: Basado en caudales de alimentación, diseñar esparcidores para proporcionar una distribución homogénea en toda el área de la sección transversal del tratador.

Modificar contenedores internos: Colocar las rejillas en la parte superior del contenedor y lo más cerca posible de la salida de crudo y colocarlas por lo menos a 8 pulgadas de la pared del contenedor. Colocar la salida del distribuidor de agua lo más cerca posible a la parte inferior del contenedor. Alimentar la emulsión a unas pulgadas por debajo de la interface crudo/agua. Proporcionar un medio para retirar la capa o colchón de nata sin perturbar la interface crudo/agua.

Optimizar las válvulas de descarga de agua: Proporcionar agua continua para evitar la extracción de petróleo en la descarga de agua por el control de nivel y no usar válvulas de presión on/off.

Optimizar el consumo de energía: Siempre comenzar la deshidratación electrostática con crudo seco entre las rejillas.

5.8 CONCLUSIONES DEL ESTUDIO

El rendimiento y funcionamiento de la deshidratación electrostática se ha demostrado a través de pruebas piloto y demostraciones de campo. Estructuras de funcionamiento se han desarrollado.

Rendimientos de 200-300 BOPD/ft² en el área de rejillas para crudos livianos (30-35° API) y 10-20 BOPD/ft² para crudos pesados (11-14° API) parecen ser alcanzables.

La justificación económica de utilizar tratadores electrostáticos es significativa para la deshidratación de crudo pesado en la costa oeste, y para la deshidratación de crudo en aguas profundas TLPs (tensión leg platforms).

Para los crudos pesados y, como resultado de las fugas, el reemplazo de los tanques de deshidratación por tratadores electrostáticos vs. Tratadores calentadores puede potencialmente ahorrar \$117/BOPD en costo de capital y \$0.15/BOPD en costos de operación. Además, usando electrostática, podría traducirse en ahorros tangibles debido a la eliminación de la adición de crudo liviano. Para aguas profundas TLPs, el uso de la electrostática puede traducirse en ahorros significativos de capital debido a la reducción en el tamaño tratador y a la reducción de peso muerto. Para el TLP Mars, el ahorro de costos de capital se estima en \$1,5 MM.

6. CONCLUSIONES

En resumen, hay un amplio margen para el desarrollo y la invención de nuevos dispositivos para separar soluciones acuosas dispersadas en crudo. Esto requiere una comprensión de los mecanismos fundamentales de la electrocoalescencia, y de los efectos del diseño del electrodo, la dirección del flujo de dispersión con respecto al campo eléctrico aplicado, los tipos de dispersión y la configuración del campo eléctrico. En su aplicación más amplia, estos nuevos desarrollos y retos significan que los impactos negativos en el medio ambiente podrían reducirse significativamente, y el ahorro en términos de energía, mano de obra y tiempo podría ser mucho mayor.

La historia de la producción de crudo es importante para las características de la emulsión típicamente experimentadas en separadores de campos petroleros, deshidratadores y desaladores. Es importante para el diseñador, considerar esta historia de producción para la selección de métodos electrostáticos apropiados. Aunque no existen reglas de aplicación definitiva, en general, las técnicas electrostáticas agresivas deben aplicarse para la resolución de las emulsiones apretadas. La aplicación de voltajes electrostáticos a emulsiones crudo/agua es el medio más versátil y eficaz de coalescencia y separación de estas mezclas.

Debido a la variación continua de las características de producción a lo largo de la vida de un yacimiento de petróleo, un programa continuo para revisar el comportamiento de la emulsión asegurará que el operador utilice la combinación más adecuada de técnicas tradicionales y electrostáticas. Los estudios indican que la aplicación de métodos electrostáticos en la deshidratación de petróleo reduce el consumo de demulsificante y logran la deshidratación eficaz a

temperaturas reducidas. Ambas ventajas reducen los costos de operación de los deshidratadores y desaladores.

Los investigadores y los fabricantes deben seguir investigando el papel de los campos electrostáticos y su influencia en diferentes emulsiones de crudo. A medida que la gravedad promedio de los crudos a nivel global disminuye, estos estudios son fundamentales para ampliar y mantener el papel de la electrostática en la recuperación de petróleo futuro.

Normalmente, un campo AC se utiliza para los electrodos sin aislamiento en una emulsión agua-en-crudo teniendo un contenido relativamente alto de fase dispersa. El campo AC presenta ventajas técnicas importantes. Por ejemplo, el peligro de corrosión electrolítica puede ser eliminado. Los valores aplicados en la intensidad de un campo eléctrico AC varían de acuerdo con el contenido de agua de la emulsión y de la disposición general del sistema

Los campos eléctricos DC han sido aplicados con destilados y condensados los cuales son relativamente no conductivos. Sin embargo, el campo eléctrico DC, generalmente se utiliza con menos frecuencia que campos de AC y campos pulsados DC.

Un campo eléctrico sólo se puede utilizar para aumentar la velocidad de coalescencia de una fase dispersa en una emulsión cuando la fase continua tiene una permitividad mucho más baja que la fase dispersa. Al mismo tiempo, la fase continua debería tener una baja conductividad y actuar como un aislante entre los dos electrodos.

Campos pulsados DC con electrodos aislados han sido desarrollados para emulsiones con un alto contenido de fase dispersa. Sin ningún tipo de aislamiento del electrodo, el alto contenido de fase acuosa dispersa puede provocar un cortocircuito de los electrodos. Los valores típicos aplicados de la fuerza del

campo eléctrico pulsado DC también varían en función del contenido de agua de la emulsión y de la disposición general del sistema

Con algunas geometrías de electrodos (como placas paralelas), el campo eléctrico es uniforme. Sin embargo, esto puede no ser el caso con otras geometrías de electrodos, las cuales pueden tener consecuencias como la ruptura de la gota en las regiones de alto campo y también migración de la gota (dielectroforesis) en el campo no uniforme.

Si la intensidad de campo eléctrico es demasiado alta, varios mecanismos de ruptura de gotas, es probable operen, dando como resultado una re-emulsificación. Se llega a la aparición de la inestabilidad cuando el efecto de la tensión interfacial es superada por la tensión interfacial eléctrica-inducida. Esta última depende de la forma en que las gotas están siendo cargadas.

Finalmente, se puede decir que conociendo las bondades y limitaciones del uso de tratadores térmico electrostáticos, las propiedades de los fluidos a tratar, condiciones y variables de diseño, realizando análisis de laboratorio y pruebas de campo; la deshidratación utilizando campos electrostáticos, puede optimizar en gran medida el proceso de separación y coalescencia del agua dispersa en el crudo, retribuyendo e impactando directa y positivamente en la economía de las compañías dedicadas a la explotación de hidrocarburos.

Aunque no hay una fórmula única para el uso de campos electrostáticos para llevar a cabo con éxito la deshidratación de emulsiones de agua en crudo; la gran cantidad de información disponible, permite obtener un panorama muy claro sobre las amplias posibilidades que la implementación de esta tecnología representa, en la optimización del proceso de resolución de emulsiones de acuerdo a las condiciones específicas de cada campo.

7. REFERENCIA DE LAS PATENTES

- Tratamiento Eléctrico + Centrifuga

[31] G.W. Sams, F.L. Prestridge, M.B. Inman, Apparatus for augmenting the coalescence of water in a water-in-oil emulsion, US Patent 5 565 078 (1996).

[32] J.M. Edmondson, Method and apparatus of oil/water de-emulsification, US Patent 5 714 048 (1998).

[33] P.J. Bailes, M. Watson, Electrostatic and centrifugal separation of liquid dispersions, UK Patent 2 249 741A (1992).

[34] P.J. Bailes, D. Freestone, G.W. Sams, Pulsed d.c. fields for electrostatic coalescence of water-in-oil emulsions, The Chem. Eng. 644 (1997) 34–39.

[35] G.B. Hanson, H.C. Eddy, Multiple electrode treater and method, US Patent 2 033 429 (1936).

[36] W. Meredith, Dehydrator, US Patent 1 452 207 (1923).

- Tratamiento Eléctrico + Térmico

[37] H.R. Bull, Electrostatic/mechanical emulsion treating method and apparatus, US Patent 4 919 777 (1990).

[38] W. Woelflin, Process and apparatus for treating emulsions, US Patent 2 083 802 (1937).

[39] C.W. McKibben, Method of and means for separating water from heavy-oil emulsions, US Patent 1 299 590 (1919).

[40] K.L. Sublette, Method and apparatus for separating oilfield emulsions, US Patent 4 581 120 (1986).

[69] S.F. Alden, H.C. Eddy, Process and apparatus for refining liquid mixtures, US Patent 1 394 462 (1921).

- Tratamiento Eléctrico solo

[4] P.J. Bailes, S.K.L. Larkai, Electrostatic separation of liquid dispersions, UK Patent 217 1031A (1986).

[17] J.D. Winslow Jr., Electrical treater with a.c.–d.c. electrical fields, US Patent 4 049 535 (1977).

[24] H. Wolfe, Method and apparatus for electrically treating fluids, US Patent 2 364 118 (1944).

[28] N. Inoue, Oil–water separation apparatus, US Patent 5 494 586 (1996).

[29] E.C. Hsu, N.N. Li, T. Hucal, Electrodes for electrical coalescence of liquid emulsions, US Patent 4 415 426 (1983).

[54] R.J.L. Chimenti, Separation of dispersed phase from phase mixture, US Patent 4 624 763 (1986).

[55] C.H.M. Roberts, Method and apparatus for electrically treating emulsions, US Patent 2 083 799 (1937).

[56] G.L. Adams, R.G. Barlow, Method and apparatus for electrical demulsification, US Patent 2 092 491 (1937).

[57] H.C. Eddy, Electric treater for emulsions, US Patent 2 033 418 (1936).

[58] J.M. Cage, Dehydration of oil and water emulsion, US Patent 1 754 009 (1930).

[59] C.H.M. Roberts, Electrical processes and apparatus for separating emulsions, US Patent 1 959 385 (1934).

[60] F.L. Prestridge, A.A. Schuetz, H.L. Wheeler, Voltage control system for electrostatic oil treater, US Patent 4 400 253 (1983).

[61] J.R. Robinson, Plural stage desalting/dehydrating apparatus, US Patent 4 374 724 (1983).

[62] H.C. Eddy, Electrical treater method, US Patent 2 315 051 (1943).

[63] F.W. Harris, Process and apparatus for dehydrating emulsions, US Patent 1 281 952 (1918).

[64] J. MacEdmondson, Electrostatic oil emulsion treating method and apparatus, US Patent 5 464 522 (1995).

[65] J.T. Worthington, System for electric dehydration, US Patent 2 033 567 (March 1936).

[66] C.W. McKibben, Method of separating associated liquids, US Patent 1 299 589 (1919).

[74] C.R. Ferrin, F.L. Prestridge, Circuit for maintaining the strength of an electrostatic field generated in a fluid mixture of varying dielectric strength, US Patent 4 417 971 (1983).

- Tratamiento Eléctrico + Químicos

[41] H.F. Fisher, Method of inverting the phase of emulsions, US Patent 1 838 379 (1931).

[42] A.M. Herbsman, Method of treating petroleum emulsions, US Patent 1 931 112 (1933).

[43] J.C. Morrell, Dehydration of emulsified oil, US Patent 1 827 714 (1931).

[44] H.C. Eddy, Method of salvaging oil from sludge, US Patent 1 826 276 (1931).

Tratamiento Eléctrico + Filtración

[10] F.G. Cottrell, Process for separating and collecting particles of one liquid suspended in another liquid, US Patent 987 114 (1911).

[45] M. Kawasaki, Cylindrical electrostatic oil cleaner, UK Patent 2 282 770 (1995).

[46] H.C. Eddy, Method and apparatus for breaking emulsions, US Patent 2 034 285 (1936).

- Tratamiento Eléctrico + Presión

[47] H.C. Eddy, Method and apparatus for dehydrating petroleum, US Patent 2 083 801 (1937).

[48] H.C. Eddy, Method of and apparatus for treating oil under vacuum, US Patent 1 847 602 (1932).

- Tratamiento Eléctrico + Mezclado

[1] F.G. Cottrell, J.B. Speed, Separating and collecting particles of one liquid suspended in another liquid, US Patent 987 115 (1911).

[30] P.J. Bailes, Resolution of emulsions, US Patent 5 580 464 (1996).

[49] F.L. Prestridge, B.C. Johnson, Electrostatic mixer/separator, US Patent 4 606 801 (1986).

[50] H.C. Eddy, Dehydrating apparatus having preliminary agglomerator, US Patent 1 796 750 (1931).

[51] R.L. Pettefer, Electric treater with diverging stream and method, US Patent 2 033 446 (1936).

[52] J.T. Worthington, Dehydrator having horizontal revolving electrodes, US Patent 1 783 595 (1930).

[53] L. Lawrason, Method and apparatus for agglomerating, US Patent 1 942 480 (1934).

8. BIBLIOGRAFÍA

- (1) LESS Simone, et al. Dehydration Efficiency Of Water-In-Crude Oil Emulsions In Alternating Current Electrical Fields. Journal of Dispersion Science and Technology (J DISPER SCI TECHNOL). Publicado en línea en 2010.
- (2) EOW John S. Electrostatic Enhancement Of Coalescence Of Water Droplets In Oil: A Review Of The Technology. Chemical Engineering Journal 85. Elsevier. 2002.
- (3) OM Midtgard. Electrostatic Field Theory And Circuit Analysis In The Design Of Coalescers With Pulsed DC Voltaje. Chemical Engineering Journal 151. 2009.
- (4) LESS Simone, et al. Dehydration Efficiency Of Water-In-Crude Oil Emulsions In Alternating Current Electrical Fields Vol-31. 2010
- (5) SAMS Gary, et al. The Practiced Art Of Emulsion Resolution In Electrostatic Processes. NATCO. 1999.
- (6) SELLMAN Erik, et al. Improved Dehydration and desalting of mature crude oil fieds.Cameron Process Systems. Conference Paper. SPE Middle East

Oil and Gas Show and Conference, 10-13 March, Manama, Bahrain. SPE-164289-MS. 2013.

- (7) LESS Simone, et al. The electrocoalescers' technology: Advances, strengths and limitations for crude oil separation. Volume 81. 2012.
- (8) ZHANG Yanzhen. Dehydration Efficiency Of High-Frequency Pulsed DC Electrical Fields On Water-In-Oil Emulsion. College of Mechanical and Electronic Engineering, China University of Petroleum, No. 271. 2010.
- (9) Z.I Khatib. Dehydration of Crude Using Electrostatic Treaters: Development of Design and Operating Guidelines. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 6-9 October, Denver, Colorado. Society of Petroleum Engineers. 1996.
- (10) RODRIGUEZ Oswaldo. Separación Trifásica De Hidrocarburos Y Tratamiento De Emulsiones. 2008
- (11) http://www.ingenieria.unam.mx/~jagomez/materias/ARCHIVOS_CONDUCCION/CAPITULO%20VII.pdf
- (12) MARFISI Shirley, et al. Deshidratación De Crudo Principios y Tecnología. CUADERNO FIRP S853-PP. 2004.

9. ANEXOS

LA TEORÍA DEL CAMPO ELECTROSTÁTICO Y ANÁLISIS DE CIRCUITOS EN EL DISEÑO DE COALESCENCIA CON TENSIÓN DE CORRIENTE CONTINUA PULSADA ²⁵

A continuación se expone una parte del estudio realizado en la Universidad de Agder, Norway, por Ole-Morten Midtgård, a fin de entender el funcionamiento de un colascedor en donde el campo eléctrico es analizado bajo un esquema donde el coalescedor se somete a una tensión continua pulsada. En tal situación, en los experimentos realizados se muestra que existe una dependencia de la frecuencia en el comportamiento del coalescedor. Esta información se toma del artículo *Electrostatic field theory and circuit analysis in the design of coalescers with pulsed dc voltage*.*

Para este estudio se modela el coalescedor como una pérdida dieléctrica de dos capas, donde se encontró que la frecuencia óptima correlaciona con el máximo cuadrado medio de la parte variable de la carga libre interfacial en el periodo de apagado.**

Bailes y Larkai llevaron a cabo experimentos de laboratorio en la optimización de coalescencia con un dispositivo que era rectangular en sección transversal. Su ancho y longitud eran significativamente mayores que su espesor, la geometría era esencialmente de dos dimensiones. Los resultados de los experimentos fueron publicados en los documentos que se remontan a 1981 [7,8]. Se encontró que el éxito de coalescencia dependía de la frecuencia del voltaje DC pulsante aplicado. La frecuencia óptima dependía de la conductividad, permisividad y las dimensiones del aislamiento y de la emulsión. ***

Bailes encontró que el cuadrado medio de la parte variable de Q_e-i en el período de apagado tenía un máximo distintivo a la misma frecuencia de conmutación que dio un rendimiento óptimo del coalescedor.

También mostró que el cuadrado medio tuvo una notable similitud con su parámetro de coalescencia determinado experimentalmente en todas las frecuencias que se probaron en una relación de trabajo de 0,5. Formó una

²⁵ OM Midtgard. Electrostatic Field Theory And Circuit Analysis In The Design Of Coalescers With Pulsed DC Voltage. Chemical Engineering Journal 151. 2009.

*, **, *** Ref. 24

hipótesis de por qué sucedió esto: la separación de la carga se lleva a cabo durante el periodo de encendido con carga negativa acumulándose en la superficie o interface emulsión- aislamiento y la carga positiva en el electrodo inferior (en este caso en el volumen de agua), y luego, durante el período de apagado, "dependiendo de si las gotas están cerca de la parte superior o inferior del aceite, recogen cargas negativas o positivas. Dado que las gotas son móviles, la atracción entre cargas opuestas, permite que ocurra la coalescencia gota-gota y se formen grandes gotas que gravitan rápidamente a la interfaz con mayor volumen".²⁶

El trabajo experimental que se ha realizado más recientemente, muestra que las gotas de agua que entran en contacto con los electrodos con un potencial distinto de cero, tienen tendencia a cargarse. Una superficie cargada equipotencialmente, tal como la interfaz emulsión-aislamiento, es -desde un punto de vista electromagnético macroscópico- equivalente a un electrodo cargado. Sin embargo, el sistema utilizado por Bailes no era un sistema simétrico en lo que respecta a las cargas; considerablemente más carga negativa se acumularía en la interfaz emulsión-aislamiento que en la interfaz de emulsión-agua libre.

El sistema experimental usado tenía un electrodo positivo que consistía en una placa de metal plana que cubre toda la superficie superior del coalescedor. A continuación, había una capa aislante (material dieléctrico) entre el electrodo y la emulsión. El agua libre en el crudo se separa fácilmente y forma una tercera capa en la parte inferior. El agua libre se encontraba por lo tanto en contacto directo con el electrodo de tierra, y por lo tanto se consideró como parte de la tierra. La Figura 1 representa esquemáticamente la sección transversal del sistema. Las propiedades de los materiales globales (permisividad ϵ y conductividad σ) que se indican en la Ilustración están bien definidos para el material de aislamiento. Para la emulsión, estos parámetros no son dados todos al tiempo, sino que ellos pueden cambiar tanto a corto como a largo plazo, ya que dependerán de las propiedades micro-escala de la emulsión (como diámetros de las pequeñas gotas, velocidad de las gotas, distribución de las gotas, potencial zeta y así sucesivamente). Sin embargo, es razonable suponer que la emulsión se puede considerar lo suficientemente homogénea para las propiedades del material global que se mantiene constante dentro del marco de tiempo para los análisis que se presentan a continuación.

²⁶ (3) OM Midtgard. Electrostatic Field Theory And Circuit Analysis In The Design Of Coalescers With Pulsed DC Voltaje. Chemical Engineering Journal 151. 2009.

La Figura 2 muestra el modelo de condensador de dos capas resultantes. Los parámetros pueden, debido a la geometría del coalescedor en particular discutido, encontrarse a partir de las fórmulas estándar para un condensador de placas paralelas.

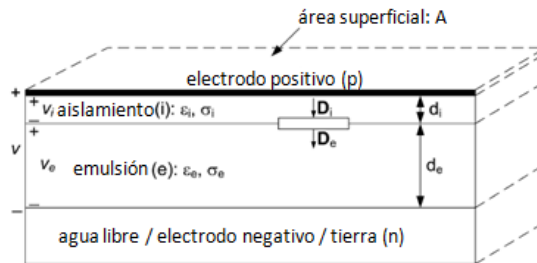


Figura 1. Representación esquemática de la sección transversal del sistema. Su naturaleza tridimensional se indica con líneas discontinuas. Las propiedades de los materiales globales y los parámetros geométricos son indicadas en las derivaciones matemáticas usadas. Como resultado, usando estos parámetros, la resistencia y la capacidad de cada capa se pueden calcular con el circuito modelo de la figura. 2. Una superficie Gaussiana en la interfaz entre el aislamiento y la emulsión también se muestra, indicando la manera en que se aplica la ley de Gauss.

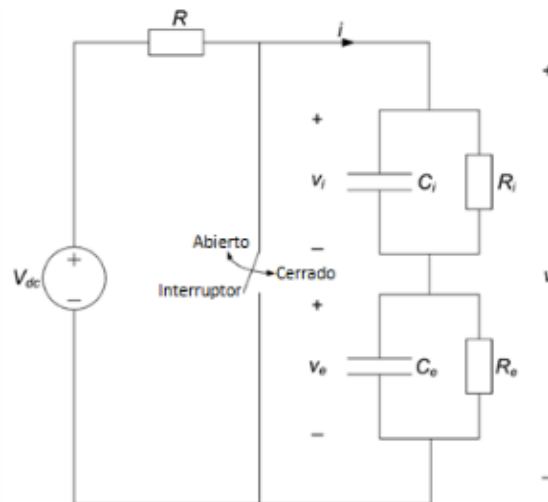


Figura 2. Modelo del condensador de dos capas del coalescedor electrostático, y su fuente de energía. El subíndice i denota aislamiento, mientras que e es la emulsión. El interruptor en el modelo de abastecimiento de energía da los cambios periódicos de suministro de potencia, de abierto que corresponde a encendido a cerrado que corresponde con el período de apagado.

Análisis usando la teoría electrostática

Aplicación de voltaje de paso

Con el fin de obtener una perspectiva física, el sistema se analiza desde una perspectiva estática en esta sección. Se supone que la resistencia R es cero, de tal manera que cuando el interruptor está abierto, el voltaje V_{dc} se aplica directamente en los terminales del coalescedor. Del mismo modo, cuando el interruptor se cierra, el corto circuito también es aplicado sin retraso de tiempo. Entre los cambios de estado, se asume un período de tiempo suficientemente largo tal que una situación estática llegara en los períodos on (encendido) y off (Apagado).

Cuando se aplica un voltaje de paso de esta manera a través de un condensador, los electrodos se cargan de forma instantánea. Esto implica que la corriente en el circuito externo es un pulso-Dirac, infinito en valor, pero infinitesimalmente corto en duración. Del mismo modo, cuando un condensador está en cortocircuito de esta manera, un pulso-Dirac de corriente, redistribuye la carga en los electrodos instantáneamente. Esta es una situación que se trata de evitar en un sistema físico, la tensión sobre los componentes en el circuito puede ser destructiva. Sin embargo, este tipo de análisis da una perspectiva física importante, y por lo tanto se va a suponer que el perfil del voltaje de V (tensión aplicada en los terminales del coalescedor) es como se representa en la figura. 3.



Figura 3. Perfil de Voltaje aplicado idealizado sobre los terminales (electrodos) del coalescedor.

En el análisis dinámico que se presenta más adelante, el valor de **R** se supondrá distinto a cero, y por lo tanto el resultado será un tiempo de retardo en la carga de los electrodos. Sin embargo, el corto circuito se aplica de una manera instantánea también en el análisis dinámico.

Ecuaciones básicas

La ley de Gauss, una de las cuatro ecuaciones de Maxwell, establece que:

$$\oiint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = Q \quad \text{Ecu. 1}$$

Q es la carga libre encerrada por la superficie **S**, mientras que **D** es el desplazamiento eléctrico, que está relacionado con el campo eléctrico **E** a través de la ecuación constitutiva:

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad \text{Ecu. 2}$$

$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ es la permitividad del material, dado como el producto de la permitividad del espacio libre ($\varepsilon_0 \approx 8,854 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$) y la permitividad relativa del material en cuestión (ε_r). En una situación estática, el campo eléctrico se refiere además al potencial electrostático **V** a través de:

$$\mathbf{E} = -\nabla V \quad \text{Ecu. 3}$$

En una situación como la modelada, el campo eléctrico puede considerarse homogéneo en las dos sustancias. Esto implica que el campo eléctrico es simplemente el voltaje a través de la sustancia dividida por su ancho. Utilizando la expresión para la capacidad de un condensador de placas paralelas, el desplazamiento eléctrico en las dos sustancias se expresa como:

$$D_i = \varepsilon_i E_i = \varepsilon_i \frac{v_i}{d_i} = \frac{C_i}{A} v_i \quad \text{Ecu. 4} \qquad D_e = \varepsilon_e E_e = \varepsilon_e \frac{v_e}{d_e} = \frac{C_e}{A} v_e \quad \text{Ecu. 5}$$

Usando la ley de Gauss. *Ecu.1* se encuentra la expresión para la carga libre Q_{e-i} en la interface emulsión–aislamiento:

$$Q_{e-i} = (D_e - D_i)A = C_e v_e - C_i v_i \quad \text{Ecu. 6}$$

La ley de la conservación de la carga se puede expresar así:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad \text{Ecu. 7}$$

Donde **J** es la densidad de corriente de conducción y ρ es la densidad de la carga libre. Por consiguiente, cuando existe una situación estática:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad \text{Ecu. 8}$$

De forma equivalente se puede expresar como:

$$\oiint_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad \text{Ecu. 9}$$

Además, la densidad de corriente de conducción está relacionada con el campo eléctrico a través de la siguiente expresión: $J = \sigma E$ Ecu. 10, en donde σ es la conductividad.

Siguiendo una línea similar de razonamiento al anterior, se encuentra que:

$$J_i = \sigma_i E_i = \sigma_i \frac{v_i}{d_i} = \frac{v_i}{R_i A} \quad \text{Ecu. 11} \quad J_e = \sigma_e E_e = \sigma_e \frac{v_e}{d_e} = \frac{v_e}{R_e A} \quad \text{Ecu. 12}$$

Y usando la ecuación 9, se encuentra que

$$\frac{v_e}{R_e} - \frac{v_i}{R_i} = 0 \quad \text{Ecu. 13}$$

Aplicación de voltaje de paso – Situación inicial

Si el coalescedor está inicialmente descargado, un voltaje de paso $v = V_{dc}$ se aplica a sus terminales (en el instante denotado "step" en la figura. 3), la distribución del voltaje sobre las sustancias (aislamiento y emulsión) va a ser inicialmente dado por sus capacitancias. Esto es porque se necesita tiempo para que la carga libre migre a través de las sustancias físicas y se acumule en la interface. En consecuencia, Q_{e-i} es en un principio cero, de tal manera que la ecuación 6 se traduce en:

$$C_e v_e = C_i v_i \quad \text{Ecu. 14}$$

Dado que, además,

$$v = v_i + v_e, \text{ se deduce que: } v_i = \frac{C_e}{C_i + C_e} V_{dc} \text{ y } v_e = \frac{C_i}{C_i + C_e} V_{dc} \quad \text{Ecu. 15}$$

Aplicación de un voltaje constante – Situación Final

Si las dos sustancias fueran dieléctricos ideales (conductividad cero), la Ecuación 15 continuaría describiendo la distribución del voltaje. Sin embargo, las conductividades distintas de cero influyen fuertemente en la situación en la que la carga libre comienza a fluir debido al campo aplicado. Si el voltaje aplicado esta encendido (y es constante) durante un tiempo suficientemente largo, una situación estática se consigue con el tiempo de tal manera que la ecuación 13 es válida. Esta corresponde a la instante denotado "static (1)" en la figura 3. Ya que continúa siendo cierto que $v = v_i + v_e$, se deduce lo siguiente:

$$v_i = \frac{R_i}{R_i + R_e} V_{dc} \text{ y } v_e = \frac{R_e}{R_i + R_e} V_{dc} \quad \text{Ecu. 16}$$

La carga libre final interfacial, puede ser calculada con la ecuación 6 tal que:

$$Q_{e-i} = \frac{C_e R_e - C_i R_i}{R_i + R_e} V_{dc} \quad \text{Ecu. 17}$$

Por lo tanto, dependiendo de las propiedades del material y de la geometría (y por lo tanto de los valores de resistencia y capacitancia), una carga interfacial significativa ha sido construido a partir de cero inicialmente.

Aplicación del corto circuito

Si el coalescedor electrostático está en cortocircuito ($v = 0$) de la situación estática descrita arriba (en el instante denotado "short circuit" en la figura 3.), La carga Q_{e-i} va -de nuevo- inicialmente a ir de un estado sin cambio hasta ser cambiada, la carga libre tiene que moverse a través de las sustancias, lo cual lleva tiempo.

Sigue siendo cierto que $v = v_i + v_e$, de modo que $v_i = -v_e$, dado que la carga interfacial se conoce a través de la ecuación 17, la ecuación 6, ahora se puede utilizar para encontrar los voltajes iniciales después de que el corto circuito se ha aplicado:

$$v_i = \frac{C_i R_i - C_e R_e}{(R_i + R_e)(C_i + C_e)} V_{dc} \text{ y } v_e = \frac{C_e R_e - C_i R_i}{(R_i + R_e)(C_i + C_e)} V_{dc} \quad \text{Ecu. 18}$$

Durante la duración del corto circuito, el dispositivo está gradualmente descargado, y después de un período de tiempo suficientemente largo, tanto v_i y v_e , así como la carga interfacial será cero.

	1: Paso	2: Estático (1)	3: Corto circuito	4: Estático (2)
Q_{i-p}	$\frac{C_i}{C_i + C_e} C_e V_{dc}$	$C_i V_{dc}$	$\frac{C_i}{C_i + C_e} C_i V_{dc}$	0
Q_{e-i}	0	$-C_i V_{dc}$	$-C_i V_{dc}$	0
Q_{n-e}	$\frac{-C_i}{C_i + C_e} C_e V_{dc}$	0	$\frac{C_i}{C_i + C_e} C_e V_{dc}$	0
v	V_{dc}	V_{dc}	0	0
v_i	$\frac{C_e}{C_i + C_e} V_{dc}$	V_{dc}	$\frac{C_i}{C_i + C_e} V_{dc}$	0
v_e	$\frac{C_i}{C_i + C_e} V_{dc}$	0	$\frac{-C_i}{C_i + C_e} V_{dc}$	0

Tabla 1. La tabla muestra los cargas y voltajes cuando el perfil de voltaje de la figura. 3 se aplica en los terminales del coalescedor.

El simplificador supuesto $R_i \rightarrow \infty$ se utiliza con el fin de llegar a expresiones que son fáciles de interpretar. (Las expresiones completas son, sin embargo, fácil de obtener siguiendo la metodología anterior.) Las anotaciones en la primera fila se refieren a los instantes en la figura. 3.

Resumen - vista estática

Un análisis similar al anterior se puede realizar para las otras dos interfaces del coalescedor: la interfaz entre el aislamiento y el electrodo positivo, y la interfaz entre la tierra y la emulsión.

En un diseño actual del coalescedor, es probable que la resistencia del aislamiento sea mucho mayor que la de la emulsión. Si se supone un dieléctrico ideal ($R_i \rightarrow \infty$), las expresiones para cargas y voltajes son más fáciles de interpretar sin tener que recurrir a un ejemplo numérico. Los resultados completos con este supuesto simplificador se presentan en la Tabla 1. Q_{i-p} es la carga interfacial aislamiento - electrodo positivo, mientras que Q_{n-e} es para emulsión-tierra. Una valiosa visión física se obtiene de este análisis: cuando se aplica primero el pulso de voltaje, el voltaje se distribuye a través de las dos capas, en función de sus capacidades. Es razonable suponer que el aislamiento tiene significativamente mayor capacitancia que la emulsión.

Si es así, la mayor parte del voltaje aplicado inicialmente se distribuirá a través de la emulsión. Esto implica que el campo eléctrico ahora será dirigido desde la interfaz emulsión-aislamiento hacia el electrodo negativo, de tal manera que la carga libre negativa se moverá en dirección de la interfaz, y la positiva en dirección del electrodo de tierra. Por lo tanto, la carga libre negativa se acumula en la interfaz de emulsión-aislamiento.

A medida que pasa el tiempo, la distribución del voltaje cambia y, finalmente, el voltaje a través de la emulsión es cero. En este punto, no hay más separación de carga.

A continuación, se aplica el corto circuito. La emulsión es inmediatamente sometida a un voltaje negativo que es casi tan fuerte como V_{dc} , suponiendo que la capacitancia del aislamiento domina.

El campo eléctrico en la emulsión tendrá ahora la dirección desde el electrodo de tierra hacia la interfaz de emulsión-aislamiento, de tal manera que la carga libre negativa fluirá en la dirección de la tierra, y la carga positiva en dirección opuesta.

Finalmente, por lo tanto, la interfaz se descarga, y una situación estacionaria se alcanza, en donde no hay más separación de carga, y el voltaje es cero en ambas capas.

Importancia de la frecuencia

A partir de este análisis se hace evidente que existe una dependencia de la frecuencia del comportamiento del coalescedor. Si la frecuencia es demasiado baja, no habrá períodos significativos donde nada interesante sucede en la emulsión ya que el campo eléctrico será cero tanto al final de los períodos de prendido como de apagado.

Por lo tanto, el cambio de estado del interruptor debe tener lugar mucho antes de que el campo eléctrico se convierta en cero. Sin embargo, la coalescencia migratoria implica el movimiento de la carga libre, y por lo tanto, el cambio del estado debe ser lo suficientemente lento para permitir la suficiente separación y movimiento de la carga, es decir, una frecuencia demasiado alta debe evitarse también.

Como se mencionó anteriormente, el trabajo previo ha concluido con la existencia de una frecuencia óptima. El análisis estático no puede dar una respuesta a lo que sería esa frecuencia. Por lo tanto, se requiere un análisis dinámico del sistema. Para este propósito, el análisis de circuitos del sistema es una herramienta poderosa.

Análisis de circuitos del sistema

Período encendido

La ley de Kirchhoff exige que la corriente total i que fluye en el circuito externo debe fluir a través de ambas capas del coalescedor (véase la fig. 2), de tal manera que:

$$i = C_i \frac{dv_i}{dt} + \frac{v_i}{R_i} = C_e \frac{dv_e}{dt} + \frac{v_e}{R_i} \quad \text{Ecu. 19}$$

Ley de Voltaje de Kirchhoff,

$$-V_{dc} + R_i + v_i + v_e = 0 \quad \text{Ecu. 20}$$

Combinando las dos ecuaciones, se obtiene una ecuación diferencial para el voltaje a través de la emulsión:

$$RC_i C_e \frac{d^2 v_e}{dt^2} + \left[\left(\frac{R}{R_e} + 1 \right) C_i + \left(\frac{R}{R_i} + 1 \right) C_e \right] \frac{dv_e}{dt} + \frac{R+R_i+R_e}{R_i R_e} v_e = \frac{V_{dc}}{R_i} \quad \text{Ecu. 21}$$

La solución a esta ecuación es:

$$v_e = \frac{R_e}{R+R_i+R_e} V_{dc} + k_1 e^{-t/\tau_1} + k_2 e^{-t/\tau_2} \quad \text{Ecu. 22}$$

Las constantes de tiempo τ_1 y τ_2 son dadas por el inverso negativo de las raíces de la ecuación característica que resulta de la Ecuación 21 y estos son:

$$\tau_{1,2} = \frac{-2RC_i C_e}{- \left[\left(\frac{R}{R_e} + 1 \right) C_i + \left(\frac{R}{R_i} + 1 \right) C_e \right] \pm \sqrt{\left[\left(\frac{R}{R_e} + 1 \right) C_i + \left(\frac{R}{R_i} + 1 \right) C_e \right]^2 - 4RC_i C_e \left(\frac{R+R_i+R_e}{R_i R_e} \right)}}$$

Ecu. 23.

La combinación de las ecuaciones 19, 20 y 22 permite la solución también para v_i :

$$v_i = \frac{R_i}{R+R_i+R_e} V_{dc} + \left(\frac{RC_e}{\tau_1} - \frac{R+R_e}{R_e} \right) k_1 e^{-t/\tau_1} + \left(\frac{RC_e}{\tau_2} - \frac{R+R_e}{R_e} \right) k_2 e^{-t/\tau_2} \quad \text{Ecu. 24}$$

Las constantes k_1 y k_2 aparecen tanto en v_e y v_i . Si el coalescedor está inicialmente sin carga (de tal manera que ambos voltajes son iguales a cero), las constantes encontradas serán:

$$k_1 = -V_{dc} \frac{\tau_2}{\tau_2 - \tau_1} \left[\frac{\tau_1}{RC_e} + \left(\frac{\tau_2 - \tau_1}{\tau_2} - 1 \right) \frac{R_e}{R+R_i+R_e} \right] \quad \text{Ecu. 25}$$

$$k_2 = V_{dc} \frac{\tau_2}{\tau_2 - \tau_1} \left(\frac{\tau_1}{RC_e} - \frac{R_e}{R+R_i+R_e} \right) \quad \text{Ecu. 26}$$

Usar estas constantes en la solución de estado-estable sería incorrecto, a menos que la frecuencia fuera tan baja que nos encontraríamos en la fase estática del período de apagado (ver fig. 3). Para una solución más general, se requiere encontrar las constantes de una situación en la que v_e y v_i no sean cero cuando el período-encendido comience. Con el fin de hacer esto, es necesario resolver el circuito para el período-apagado, primero.

Periodo-apagado

En el periodo-apagado, el coalescedor está en cortocircuito, de manera que:

$$v_i = -v_e \quad \text{Ecu. 27}$$

Sigue siendo cierto que la corriente que fluye en un terminal del coalescedor es igual a la corriente que fluye fuera del otro. Por lo tanto,

$$C_i \frac{dv_i}{dt} + \frac{v_i}{R_i} = C_e \frac{dv_e}{dt} + \frac{v_e}{R_e} \quad \text{Ecu. 28}$$

La ecuación diferencial para v_e se convierte en:

$$\frac{dv_e}{dt} = -v_e \frac{R_i+R_e}{(C_i+C_e)R_iR_e} = -\frac{v_e}{\tau_{OFF}} \quad \text{Ecu. 29}$$

τ_{OFF} es la constante de tiempo de relajación y puede también ser expresada en términos de las propiedades del material y espesores de las sustancias (utilizando las fórmulas para la resistencia y la capacitancia de un condensador de placas paralelas):

$$\tau_{OFF} = \frac{(C_i+C_e)R_iR_e}{R_i+R_e} = \frac{\epsilon_i d_i + \epsilon_e d_e}{\sigma_i d_e + \sigma_e d_i} \quad \text{Ecu. 30}$$

La solución de la ecuación 29 es:

$$v_e = v_{e0} e^{-t/\tau_{OFF}} \quad \text{Ecu. 31}$$

Donde v_{e0} es el valor inicial de v_e justo después de que se ha aplicado el corto circuito.

Para encontrar v_{e0} , se usa el hecho de que la carga interfacial **Qe-i** no cambia instantáneamente, en otras palabras, debe ser la misma justo antes y después del cortocircuito. Estos dos instantes se indican como **0-** y **0+**, respectivamente, y se usa la ecuación 6 para establecer la siguiente expresión, en donde también se han introducido los superíndices ON y OFF en los voltajes para distinguir entre las soluciones encontradas para los periodos de Encendido y Apagado:

$$C_e v_e^{OFF}(0^+) - C_i v_i^{OFF}(0^+) = C_e v_e^{ON}(0^-) - C_i v_i^{ON}(0^-) \quad Ecu. 32$$

La ecuación 27 es válida en todo el periodo de apagado, tal que:

$$v_i^{OFF}(0^+) = -v_e^{OFF}(0^+) \quad Ecu. 33$$

Y por lo tanto,

$$v_e^{OFF}(0^+) = v_{e0} = \frac{C_e v_e^{ON}(0^-) - C_i v_i^{ON}(0^-)}{C_e + C_i} \quad Ecu. 34$$

Ahora, encontrar v_{e0} se transforma en la tarea de encontrar los valores finales de v_e y v_i en el período-encendido, lo que nos lleva de nuevo a la búsqueda de k_1 y k_2 para la solución en el período-encendido, y esta visión ayuda a relacionar todo en la solución de estado estacionario, lo que significa que tenemos un estado en el que las cantidades físicas se repiten periódicamente.

Solución de estado estacionario

En este punto, se introduce la relación de trabajo D, que es la relación de tiempo para el pulso aplicado para periodo **T_s**. aclarado en la figura 4. Con esta definición, las siguientes expresiones son válidas:

$$t_{on} = DT_s = \frac{D}{f_s} \quad Ecu. 35$$

$$t_{off} = T_s - t_{on} = (1 - D)T_s = \frac{1-D}{f_s} \quad Ecu. 36$$

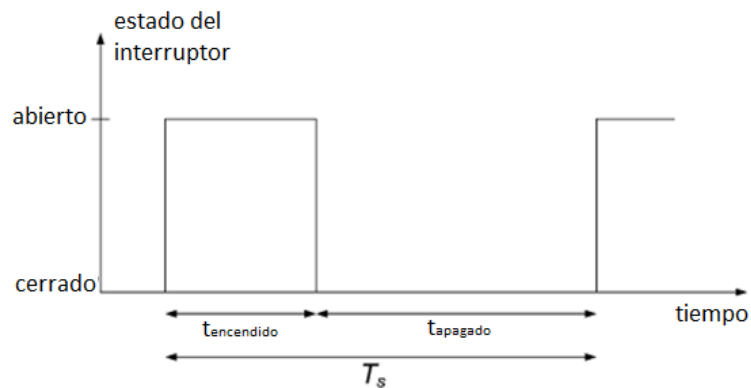


Figura 4. En el período-encendido, el interruptor está abierto, mientras que en el período-apagado, el interruptor se cierra, creando un corto circuito en el dispositivo. El análisis es general en los períodos encendido y apagado, los cuales no deben ser de la misma longitud. Para este fin, se introduce la relación de trabajo D .

f_s es la frecuencia de conmutación ($f_s = 1/T_s$). Anteriormente, se había enunciado que un D de 0,5 (relación Encendido/Apagado de 1) como óptimo en un esquema pulsado DC (encontrado experimentalmente) [10], pero en este análisis, se tiene como objetivo una solución más general del circuito. Con estas definiciones, se puede escribir el valor final del voltaje en el periodo-apagado de la siguiente manera:

$$v_e^{OFF}(t_{off}) = \frac{C_e v_e^{ON}(0^-) - C_i v_i^{ON}(0^-)}{C_e + C_i} e^{-(1-D)/f_s \tau_{OFF}} \quad \text{Ecu. 37}$$

Sólo cuando una pulso de voltaje de cortocircuito se aplica directamente en los terminales del coalescedor, los voltajes cambiarán a través de cualquiera de las capas en un paso. En el esquema que se utiliza en realidad, hay una resistencia entre la fuente de voltaje y el coalescedor, y por lo tanto los voltajes v_e y v_i no cambiarán instantáneamente cuando se pase del período de apagado al periodo de encendido. En otras palabras, los valores iniciales de estos dos voltajes en el periodo de encendido será igual a los valores finales en el período de apagado. Si se mueve el instante $t = 0$ al comienzo del periodo de encendido, entonces se obtiene:

$$v_e^{ON}(0) = \frac{C_e v_e^{ON}(DT_s) - C_i v_i^{ON}(DT_s)}{C_e + C_i} e^{-(1-D)/f_s \tau_{OFF}} = \frac{R_e}{R + R_i + R_e} V_{dc} + k_1 + k_2 \quad \text{Ecu. 38}$$

Siguiendo una línea similar de raciocinio para v_i , se tiene:

$$v_i^{ON}(0) = \frac{C_i v_i^{ON}(DT_s) - C_e v_e^{ON}(DT_s)}{C_e + C_i} e^{-(1-D)/f_s \tau_{OFF}} = \frac{R_i}{R + R_i + R_e} V_{dc} + \left(\frac{RC_e}{\tau_1} - \frac{R + R_e}{R_e} \right) k_1 + \left(\frac{RC_e}{\tau_2} - \frac{R + R_e}{R_e} \right) k_2 \quad \text{Ecu. 39}$$

En estas expresiones, v_e y v_i están dados por las ecuaciones 22 y 24, respectivamente.

Ahora se tienen dos ecuaciones de dos coeficientes desconocidos k_1 y k_2 , por lo que se pueden resolver de manera directa. Cabe señalar que las constantes son funciones de la frecuencia de conmutación f_s y la relación de trabajo D . Con k_1 y k_2 en lugar de las expresiones completas de los voltajes en el periodo-encendido, y esto a su vez permite obtener el valor inicial para v_e en el periodo-apagado, véase la ecuación 34. Por lo tanto, una solución completa para el estado de equilibrio se ha derivado, incluida la posibilidad de variar la relación de trabajo (o relación de espacio marca).

Una discusión de "hipótesis de la carga"

Hipótesis de la carga

Bailes encontró que el cuadrado medio de la parte variable de Q_e-i en el período de apagado tenía un máximo distintivo a la misma frecuencia de conmutación que dio un rendimiento óptimo del coalescedor. También mostró que el cuadrado medio tuvo una notable similitud con su parámetro de coalescencia determinado experimentalmente en todas las frecuencias que se probaron en una relación de trabajo de 0,5. Formó una hipótesis de por qué sucedió esto: la separación de la carga se lleva a cabo durante el periodo de encendido con carga negativa acumulándose en la superficie o interface emulsión- aislamiento y la carga positiva en el electrodo inferior (en este caso en el volumen de agua), y luego, durante el período de apagado, "dependiendo de si las gotas están cerca de la parte superior o inferior del aceite, recogen cargas negativas o positivas. Dado que las gotas son móviles, la atracción entre cargas opuestas, permite que ocurra la coalescencia gota-gota y se formen grandes gotas que gravitan rápidamente a la interfaz con mayor volumen".

El trabajo experimental que se ha realizado más recientemente, muestra que las gotas de agua que entran en contacto con los electrodos con un potencial distinto de cero, tienen tendencia a cargarse. Una superficie cargada equipotencialmente, tal como la interfaz emulsión-aislamiento, es -desde un punto de vista electromagnético macroscópico- equivalente a un electrodo cargado. Sin embargo, el sistema utilizado por Bailes no era un sistema simétrico en lo que respecta a las cargas; considerablemente más carga negativa se acumularía en la interfaz emulsión-aislamiento que en la interfaz de emulsión-agua libre. De esto se deduce que, si bien las gotas cerca de las interfaces pueden quedar cargadas, dentro de este fenómeno, uno esperaría gotas más negativas que positivas. Por lo tanto, gran parte de la carga negativa sería inactiva en el proceso de coalescencia siguiendo el argumento de Bailes.

Su teoría puede seguir siendo válida, pero si es así, sin embargo existe la posibilidad de hacer un coalescedor simétrico – uno que en realidad resulte en la misma cantidad de carga libre positiva y negativa. Esto podría hacerse mediante la colocación de los electrodos verticalmente en lugar de horizontalmente, y aislándolos por igual. Por lo que, una situación simétrica existiría y una cantidad igual de carga positiva y negativa estaría disponible. Esto probablemente requerirá que el agua libre se retire antes del proceso de coalescencia, ya que, de lo contrario, la emulsión haría corto circuito por el agua. Sin embargo, también existe la posibilidad de que la asimetría no importe mucho. Todavía se puede prever que las gotas cerca de la interfaz de emulsión-aislamiento adquieran carga

negativa. Debido al campo eléctrico, que en el período de apagado es dirigido desde el electrodo de tierra (abajo) hacia la interfaz de emulsión-aislamiento, las gotitas cargadas se moverán en dirección del electrodo negativo. Mientras se mueven, pueden chocar con gotas neutras (o positivas) en su camino, y la coalescencia podría ocurrir.

Otra cuestión que no fue mencionado en el documento de Bailes, es que en realidad hay otros dos parámetros físicos que se comportan exactamente igual que la carga en el período de apagado. Como se muestra a continuación, estos son, además de la carga, el voltaje a través de la emulsión y la corriente conductora a través de ésta. En consecuencia, todos ellos muestran la misma correlación con el rendimiento del coalescedor.

Comportamiento de la carga, el voltaje y la corriente en el periodo de apagado

Las ecuaciones 6 y 27 combinadas muestran que la carga libre en la interfaz emulsión-aislamiento puede ser expresada, en el periodo de apagado, como:

$$Q_{e-i} = (C_i - C_e)v_e \quad \text{Ecu. 40}$$

De esta y de la ecuación 29 es inmediatamente claro que:

$$\frac{dQ_{e-i}}{dt} = -\frac{Q_{e-i}}{\tau_{OFF}} \quad \text{Ecu. 41}$$

Por definición, la derivada en función del tiempo de la carga libre, es igual a la corriente conductora neta que fluye en la interfaz, de tal forma que:

$$\frac{dQ_{e-i}}{dt} = i_{R_i} - i_{R_e} \quad \text{Ecu. 42}$$

Donde i_{R_i} y i_{R_e} son las corriente a traves de las resistencias R_i y R_e , respectivamente. Dado que en el periodo de apagado se tiene:

$$i_{R_i} = \frac{v_i}{R_i} = -\frac{v_e}{R_i} = -\frac{R_e}{R_i} i_{R_e} \quad \text{Ecu. 43}$$

Se deduce que:

$$i_{R_e} = -\frac{R_i}{R_e + R_i} \frac{dQ_{e-i}}{dt} = \frac{R_i}{R_e + R_i} \frac{Q_{e-i}}{\tau_{OFF}} \quad \text{Ecu. 44}$$

Entonces se muestra aún más fácilmente que,

$$\frac{di_{R_e}}{dt} = -\frac{i_{R_e}}{\tau_{OFF}} \quad \text{Ecu. 45}$$

La ecuación diferencial para el voltaje de la emulsión ha sido derivada anteriormente, en la ecuación 29, y se puede concluir que el voltaje sobre la emulsión, la carga libre interfacial y la corriente conductora en la emulsión, todas decaen de la misma manera durante el periodo de apagado: exponencialmente con la constante de tiempo τ_{OFF} . También tienen valores iniciales que son proporcionales. El valor inicial para v_e ya ha sido encontrado y está dado por la ecuación 34. El numerador de esta ecuación no es más que el valor inicial de la carga libre interfacial en el periodo de apagado, mientras que el denominador es una constante, por lo que el voltaje y la carga son proporcionales. El valor inicial de i_{Re} también es proporcional al valor inicial de v_e ya que i_{Re} es siempre proporcional a v_e , mediante la ley de Ohm. El último hecho podría, por supuesto, haberse utilizado para llegar a la ecuación 45 de forma más directa, sin embargo, su derivación alternativa hace por sí misma dar una idea física y por tanto se utiliza anteriormente.

Sobre esta base, está claro que el cuadrado medio de (la parte variable) en el período de apagado de todas estas cantidades tienen un valor máximo a la misma frecuencia (y relación de trabajo). Esto podría abrir la posibilidad de hipótesis alternativas para explicar los datos experimentales de Bailes.

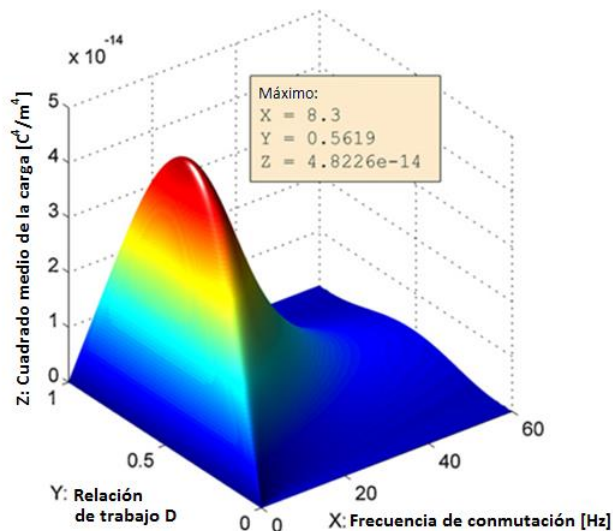


Figura 5. Media cuadrática de la parte variable de la densidad de carga interfacial como una función de la frecuencia de conmutación y la relación de trabajo con parámetros derivados de Bailes.

Cálculo de la media cuadrática

Cualquiera de las tres cantidades descritas anteriormente, pueden expresarse como $Ae^{-t/\tau_{OFF}}$ en el período de apagado, donde A es una constante (negativa). Al final del período de apagado, todavía habrá alguna carga residual interfacial, voltaje o corriente de conducción en la emulsión, que debe ser igual a $Ae^{-t_{off}/\tau_{OFF}}$. Cuando Bailes encontró su correlación entre la media cuadrática de la carga y el desempeño del coalescedor, sustrajo la parte residual antes de calcular la media cuadrática. Esto es lo que se quiere decir cuando se refiere a "la parte variable" en el texto anterior. (Bailes lo llamó "densidad de carga disponible").

La media cuadrática es una función de la frecuencia de conmutación y el ciclo o relación de trabajo.

Resultados numéricos

Parámetros derivados de Bailes usados.

$$V_{dc} = 200V, R = 100M\Omega, R_i = 600G\Omega, R_e = 79M\Omega, C_i = 163pF \text{ y } C_e = 37pF$$

Con estos parámetros en particular, la frecuencia óptima experimentalmente encontrada por Bailes fue de 8 Hz. También encontró que la mejor relación de trabajo fue de 0,5, pero esta fue probada con una frecuencia de conmutación de 50 Hz.

En la figura. 5 la media cuadrática dada por la ecuación 46 se representa como una función de la frecuencia de conmutación y la relación de trabajo. Para permitir una comparación directa con los números de Bailes, la media cuadrática de la densidad de carga es graficada. Para este fin se utilizó un área de electrodo de $0.0315m^2$, que también se puede derivar del artículo de Bailes. También se muestra en la figura, la coordenada del punto máximo de este gráfico. Como puede verse, la relación de trabajo óptima (usando el criterio de media cuadrática) es en realidad 0,56, pero la diferencia a partir de una relación de trabajo de 0,5 es pequeña.

A los 50 Hz, la frecuencia donde Bailes experimentó con diferentes relaciones de trabajo, lo óptimo esta de hecho muy cerca de 0.5.

La figura 6 muestra el voltaje periódico a través de la emulsión (v_e) para el punto máximo de la gráfica en la figura. 5, es decir, para una frecuencia de 8,3 Hz y una relación de trabajo de 0,56. También se muestra la carga libre interfacial. Las mismas cantidades se calculan para una frecuencia de conmutación de 50 Hz y relación de trabajo de 0,5, así como para una frecuencia de conmutación de 3 Hz y relación de trabajo 0.5.

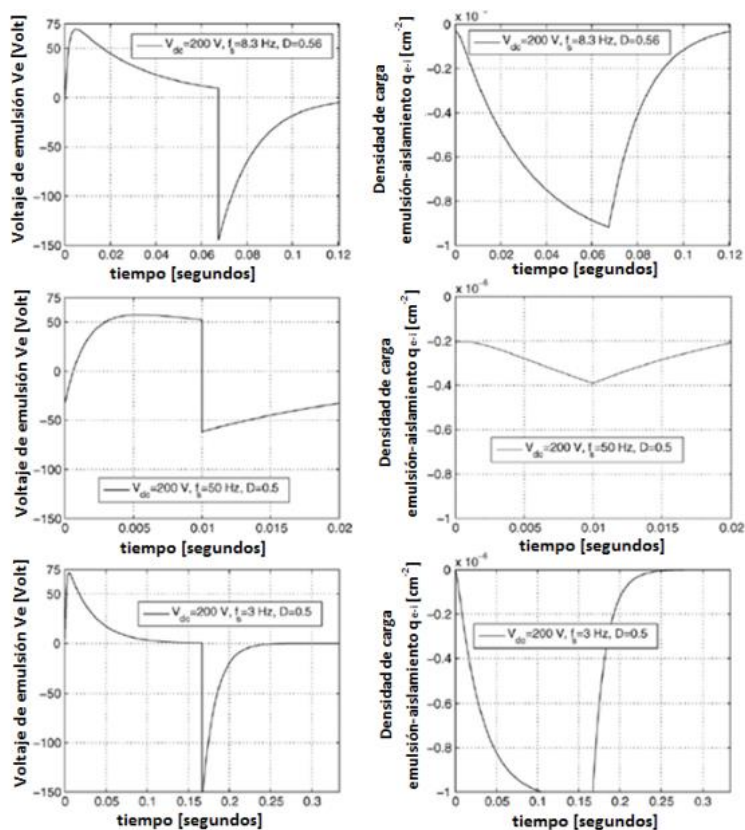


Figura 6. Voltaje de Emulsión y Densidad de carga libre interfacial en función del tiempo para tres combinaciones diferentes de frecuencias y de relación de trabajo.

Discusión

Estas imágenes ilustran claramente que a pesar de que el propio dispositivo de coalescencia está en cortocircuito, esto no significa que el campo eléctrico (voltaje) a través de la emulsión sea cero. Sin embargo, si la frecuencia de conmutación es demasiado baja, el voltaje debe ser (casi) cero en gran parte de ambos períodos (encendido y apagado) y el sistema sería ineficiente.

Por otro lado, si la frecuencia es demasiado alta, la intensidad de campo eléctrico puede ser relativamente constante en el valor, pero nunca comparable en magnitud al voltaje de la fuente, y la carga no se acumula con el valor que se logra cuando la frecuencia y la relación de trabajo son "exactas".

Para la última situación, la dinámica del sistema es tal que la magnitud del voltaje experimentado por la emulsión es comparable con el voltaje de la fuente, y al mismo tiempo existe una variación considerable en la intensidad a lo largo del período. Además, la carga aumenta hasta un valor significativo, y las descargas

de coalescencia en apenas la proporción adecuada, de manera que la carga comienza en casi cero (pero no completamente) cuando el ciclo se repite.

Cuando hay una gran variación en el tiempo de los parámetros eléctricos del crudo que se somete a la coalescencia, - sobre esta base - también se espera una gran variación del desempeño del sistema.

La imagen de la media cuadrática confirma los cálculos anteriores dados por Bailes, tanto en los valores y la forma de la gráfica como una función de la frecuencia. Sin embargo, el análisis ampliado que aquí se presenta también incluye la variación con la relación de trabajo, y muestra que una relación de trabajo de un poco más de 0,5 podría haber dado un rendimiento aún mejor al coalescedor en 8 Hz para su sistema.

La única medida de éxito para un dispositivo de coalescencia electrostática es que en realidad aumente la separación del agua en la emulsión.

Se debe hacer un énfasis que los resultados presentados aquí no se pueden usar para predecir el rendimiento real de coalescencia. En última instancia, sería un objetivo, calcular el aumento del flujo de masa de agua que resulta de someter una emulsión con propiedades conocidas a un perfil de campo eléctrico específico. Sin embargo, un paso necesario para llegar a un nivel tan profundo de comprensión, es ser capaz de predecir el campo eléctrico que la emulsión experimenta en realidad de un perfil de voltaje aplicado sobre el dispositivo. La contribución de este trabajo es el que aborda esa pregunta.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha vuelto a examinar y ampliar el análisis matemático del campo eléctrico en un dispositivo de coalescencia sometido a un voltaje de corriente continua pulsada. Se hizo hincapié en una comprensión física del campo eléctrico y la acumulación de carga en el sistema, utilizando tanto la teoría del campo electrostático, así como el análisis de circuitos. Una solución dinámica completa fue derivada; las fórmulas desarrolladas dan la solución al estado-estable periódico para cualquier frecuencia y ciclo de trabajo.

Los argumentos físicos indican que debe haber una frecuencia óptima (o rango de frecuencia) cuando se usa un esquema de corriente continua pulsada.

Esto se confirma mirando el campo eléctrico resultante de un análisis de circuitos. Por lo tanto, un sistema que está diseñado para un aceite en particular, puede no funcionar como se espera cuando se somete a otro aceite con material de diferentes propiedades. Por lo tanto, una sintonización de la frecuencia debe ser una posibilidad en tales sistemas.

La siguiente evolución de coalescedores comerciales en línea probablemente se ve obstaculizado por la falta de comprensión tanto de las interacciones de partículas micro-escala y la falta de comprensión del campo eléctrico que actualmente es experimentado por la emulsión y con ello las gotas de agua dispersas, que - como hemos visto - puede ser muy diferentes por el voltaje aplicado en los terminales del sistema.

Se espera que el análisis presentado en este trabajo contribuya a una mejor comprensión de la importancia de este aspecto en el diseño de coalescencia electrostática. El análisis presentado da una perspectiva física importante, pero está limitada en el diseño práctico, ya que la geometría asume que parámetros discretos podrían ser usados. Con estructuras geométricas más complicadas, las soluciones analíticas para el problema de campo no se pueden encontrar, pero los modelos aproximados que consisten en redes de dieléctricos se pueden derivar.

Estos modelos pueden ser analizados numéricamente en simuladores de circuitos si el enfoque analítico es demasiado engorroso. Además, para optimizar el diseño avanzado en términos del campo eléctrico, el software basado en el método de elementos finitos puede dar buenas respuestas incluso para geometrías complicadas.

EFICACIA DE LA DESHIDRATACIÓN DE AGUA-EN-CRUDO EN EMULSIONES DE ACEITE BAJO CAMPOS ELÉCTRICOS CON CORRIENTE ALTERNA ²⁷

A continuación se presenta una parte de los estudios realizados en la Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología (NTNU) sobre la eficiencia de la deshidratación de emulsiones agua-crudo en campos eléctricos de corriente alterna, en donde primero se realiza una descripción teórica de los procesos que surgen cuando una emulsión que fluye se expone a campos eléctricos de AC. La parte experimental se dirige, por un lado, a encontrar analogías con la teoría y por otro, a discernir las variables más importantes dentro de las que se cree rigen el proceso de desestabilización electrostática, incluyendo la temperatura, las condiciones de flujo, el contenido de agua en la emulsión, intensidad de campo eléctrico, y el tiempo de aplicación. Los resultados obtenidos se discuten y se relacionan con el diseño óptimo y la ubicación de una unidad de electrocoalescencia eficiente. Esta información es tomada del artículo *Dehydration Efficiency of Water-in-Crude Oil Emulsions in Alternating Current Electrical Fields*.⁽¹⁾

Papel de las fuerzas electrostáticas

Cuando un campo eléctrico es usado en una emulsión de agua-en-crudo, una gota puede ser sometida a diferentes fuerzas electrostáticas. Un mecanismo que conduce a la coalescencia de las pequeñas gotas es la electroforesis. Fuerzas electroforéticas son dos fuerzas de atracción y repulsión establecidas en un campo uniforme de voltaje entre gotas cargadas y los electrodos. Este mecanismo, que es eficaz sólo con los campos de corriente continua (DC), no se cumple cuando se imponen los campos de corriente alterna (AC). Otro mecanismo posible es la dielectroforesis. Fuerzas dielectroforéticas son fuerzas de atracción establecidas en un campo no uniforme de voltaje, entre gotas que tienen permitividad que difiere de la permitividad del líquido transportado. Estas fuerzas mandan la gota hacia el gradiente de voltaje más alto y es proporcional al diámetro de la gota y la conductividad del crudo. Para el estudio, los experimentos se realizaron en un reómetro de cilindros concéntricos equipado con una fuente de AC. La débil divergencia del campo en el ducto anular hace que esta última contribución tan baja pueda ser ignorada. El proceso básico restante es la fuerza dipolar que induce una atracción mutua entre gotas vecinas debido a la interacción

²⁷ (1) LESS Simone, et al. Dehydration Efficiency Of Water-In-Crude Oil Emulsions In Alternating Current Electrical Fields. *Journal of Dispersion Science and Technology (J DISPER SCI TECHNOL)*. Publicado en línea en 2010.

de los dipolos inducidos por el campo eléctrico. Esta fuerza surge debido a la alta conductividad del agua, que tiene alto contenido de sal y de acuerdo a Eow y otros autores se puede escribir como:

$$F_d = \frac{24\pi\epsilon E_0^2 r^6}{S^4} \text{ Ecu. 1}$$

donde ϵ es la permisividad del crudo, E_0 la intensidad de campo eléctrico, r el radio de las gotas y S la distancia entre los radios de dos gotas. La ecuación 1 muestra que la fuerza dipolar es fuertemente dependiente del tamaño de las gotas de agua y el espacio entre ellas. Suponiendo que las gotas de agua tienen un tamaño similar y se distribuyen homogéneamente (que se presenta en la siguiente hipótesis, y es una buena aproximación), la separación es inversamente proporcional a la fracción de volumen de agua dispersa X como se muestra en la Ecuación 2.

$$S = r \left(\frac{4/3\pi}{X} \right)^{4/3} \text{ Ecu. 2}$$

Por lo tanto, como el contenido de agua se reduce a lo largo del proceso de electrocoalescencia debido a la separación en curso, el espaciado entre los aumentos de las gotas y la atracción dipolar se vuelve menos y menos eficaz. Además, si se supone que los sedimentos de las gotas más grandes se fundieron rápidamente dejando gotas más pequeñas dispersas en la emulsión, el proceso sufre a una disminución adicional de la tasa.

El otro proceso que debe ser considerado es la deformación de las gotas. En ausencia de cualquier interferencia (debido, por ejemplo, a un campo eléctrico), la tensión interfacial mantendrá las gotas de agua esféricas con radio r . Cuando se usa un campo uniforme, cada gota se deformará debido a la tensión eléctrica en la superficie y la gota se alargará en la dirección del campo eléctrico y tomará la forma de un esferoide alargado. Este proceso continuará hasta que se alcance una relación de aspecto limitante, logrando que las gotas se vuelvan inestables. Taylor mostró que un esferoide prolato estacionario tiene una relación de aspecto máximo de 1,9 entre los 2 ejes. El campo de umbral correspondiente a E_c mostrado en la ecuación 3 es el valor por encima del cual la interfaz se vuelve inestable y una generación de gotas de radio mucho más pequeño se produce. [10] Este valor depende de la tensión interfacial σ , la permitividad del petróleo y el radio de las gotas.

$$E_c = 0.648 \sqrt{\frac{\sigma}{2\epsilon r}} \text{ Ecu. 3}$$

Considerando las propiedades del crudo usado para el estudio, una emulsión de corte de agua del 10% y un campo eléctrico de 2 kV/cm, tal dispersión tendría lugar sólo para las gotas de diámetro de aproximado de 12 mm. Aunque difícilmente se encontrarán gotas tan grandes, la deformación de la interfaz debe

tenerse en cuenta al considerar la interacción de las gotas cercanas. El aumento del campo puede ser muy alto para que la presión electrostática pueda inducir una deformación significativa y desencadenar coalescencia. En general, la evolución en el tiempo de una emulsión polidispersada se modela a partir de la siguiente ecuación:

$$dN/dt(w, t) = 1/2 \int_0^w K(w', w - w')N(w', t)N(w - w', t)dw' - \int_w^\infty K(w, w')N(w, t)N(w', t)dw'$$

Ecu. 4

Donde $N(w, t)$ representa el número de gotas de volumen w por unidad de volumen y $K(w_1, w_2)N(w_1, t)N(w_2, t)$ es la tasa de colisión entre gotas de volumen w_1 y w_2 . [17] la primera integral en la ecuación 4 es la tasa de producción de gotas de w volumen a través de la coalescencia de las gotas más pequeñas y la segunda integral es la velocidad a la que estas gotas desaparecen.

Atten obtuvo, mediante la introducción de la suposición de emulsión monodispersa, una solución para el tiempo característico t_c , del proceso de electrocoalescencia.

$$t_c = (1/(2k(r_1, r_2)N_0)) \quad \text{Ecu. 5}$$

Donde N_0 representa el número inicial de gotas, mientras que r_1 y r_2 el radio de dos gotas. Atten también calculó una expresión para la frecuencia de colisión $k(r_1, r_2)$ debido a las fuerzas de atracción inducidas por el campo eléctrico:

$$k_{EF}(r_1, r_2) \approx \left(\frac{16\pi}{3\sqrt{3}}\right) \left(\frac{\epsilon E_0^2}{\eta}\right) \frac{r_1^2 r_2^2}{(r_1 + r_2)} \quad \text{Ecu. 6}$$

Donde η es la viscosidad dinámica del líquido aislante. Mediante la sustitución de la ecuación 6 en la ecuación 5, el t_c resultante es igual a:

$$t_{c,EF} = \left(\frac{\sqrt{3}}{4\phi}\right) \left(\frac{\eta}{\epsilon E_0^2}\right) \quad \text{Ecu.76, donde } \phi \text{ es la fracción de volumen de agua.}$$

Papel del flujo Shear o flujo de corte

La fuerza de atracción dipolo se hace alta cuando la separación entre las gotas es mínima. Por lo tanto, los mecanismos que permiten que las gotas se acerquen son esenciales para altas eficiencias de la coalescencia. En los sistemas estacionarios, estos pueden ser el movimiento browniano, sedimentación ó floculación; sin embargo en sistemas que fluyen, tensiones laminares o turbulentas, juegan un papel más importante. Cuando una emulsión se somete a

una tensión de corte, se producen numerosas colisiones, tanto debido a la variación espacial en el movimiento de las gotas, como al efecto de inercia resultante de las diferencias de densidad.

Un simple cálculo de la tasa de colisión ha sido reportado para el flujo Couette, asumiendo trayectorias rectilíneas de las diversas gotas:

$$k_s(r_1, r_2) \approx 4/3\Gamma(r_1 + r_2) \quad \text{Ecu. 8}$$

Donde Γ representa la tasa de corte. Se debe tener en cuenta que sin campo eléctrico cada colisión no conduce a la coalescencia, debido al gran retraso entre el contacto y la coalescencia de las gotas.

Allan y Mason demostraron que este tiempo de retardo es una función fuertemente decreciente de la intensidad de campo debido a una mayor tasa de disminución del espesor de la película entre las gotas y una interrupción de la película que ocurre para espesores superiores. Ellos también verificaron que sin el campo eléctrico las gotas de agua (750 μm de diámetro) en crudo siliconado no podrían coalescer en menos de 15 segundos, y podrían permanecer estables hasta varios minutos. De todos modos, en el supuesto de que en presencia de un campo eléctrico suficientemente alto, todas las gotas de agua coalescen, una nueva característica de tiempo se encuentra mediante la sustitución de la ecuación 8 en la ecuación 5:

$$t_{c,s} = \frac{\pi}{(16\phi\Gamma)} \quad \text{Ecu. 9}$$

Aunque los tiempos característicos expresados por las ecuaciones 7 y 9 se basan en varias aproximaciones, pueden utilizarse para obtener una estimación de los procesos que denotan. De hecho, pueden ayudar a dar una idea de la influencia del flujo en la frecuencia de colisión y la eficiencia de coalescencia.

EXPERIMENTAL

Preparación de las Emulsiones

A continuación se mencionan algunos de los aspectos más importantes de los elementos, propiedades de los fluidos y equipos usados para la realización del estudio de la deshidratación de emulsiones agua-crudo en campos eléctricos de corriente alterna, al cual se está haciendo referencia.

Las emulsiones se prepararon mezclando crudo de la plataforma continental Noruega con agua de mar sintética (3,5 wt% NaCl) en diferentes proporciones. La Tabla 1 resume las propiedades fisicoquímicas del crudo.

Primero se calentaron crudo y agua por separado a 60°C; luego, el agua se agregó lentamente al crudo mientras se emulsificaba con un Ultra Turrax (IKA, T18 con estator y rotor de 18 y 12,7 mm de diámetro respectivamente) a 10500 rpm y 60°C durante 90 segundos. El volumen total de las emulsiones fue de 25 ml y los cortes de agua probados fueron 5wt%, 10wt%, y 30wt%. Después, las emulsiones se vierten inmediatamente en la copa del reómetro para su análisis posterior.

TABLA I

Propiedades fisicoquímicas del crudo	
Propiedad	Crudo
Fraccionamiento SARA	
Saturados (peso %)	47.5
Aromáticos (peso %)	40.1
Resinas (peso %)	11.5
Asfáltenos (peso %)	0.8
Agua ^a (peso %)	0.05
Densidad (60°C) ^b	0.8992 g/cm ³
Viscosidad (60°C)	25 cP
Acidez (TAN)	2.93 mg KOH/mg
MW ^c	319 g/mol

^a Karl-Fischer titration

^b Medidor de densidad AP PAAR DMA 48

^c Determinado de la depresión del punto de congelación del benceno

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas del crudo

Las mediciones reológicas

Las propiedades reológicas de las emulsiones se midieron en un reómetro rotacional en modo de control de tensión o modo de control shear Anton Paar (Austria) Physica MCR-301, usando el software RheoPlus. Este reómetro comercial, equipado con un dispositivo de temperatura electro reológico (ERD, PTD200 /E), se modificó para permitir la conexión con una fuente de AC. Los

radios de la balanze y la copa son 13.32mm y 14,46 mm, respectivamente. La copa está conectada a tierra. La balanza giratoria también es tambien el electrodo de alto potencial, ya que un resorte directamente conectado al generador se desliza en él. Por esta razón, a bajas tasas de corte, alguna interferencia afecta la calidad de las mediciones, incluso si los valores medios de las variables reológicas son claramente identificables. Este problema no se presenta a altas tasas de corte.

Con el fin de permitir una aplicación efectiva del campo eléctrico, la copa del reómetro fue aislada con una Super cinta de PVC 33+ de 3M (USA) con 0,178 mm de espesor y fabricada para aguantar hasta 105°C.

Las viscosidades de todas las emulsiones fueron monitoreadas primero a 60°C solo bajo la influencia de las tasas de corte, para la detección de cualquier tipo de inestabilidad. Posteriormente se aplicó un voltaje de 15-30 segundos, mientras se monitoreaba el respectivo comportamiento de la emulsión. Los experimentos se realizaron con diferentes valores de temperatura (60 y 80 °C), velocidad de la balanza giratoria (5 y 360 rmp), intensidad de campo eléctrico (0.3, 1, y 2 kV/cm) y el tiempo de aplicación del campo eléctrico (15 y 30 segundos). Se debe tener en cuenta que el estrecho espaciado de la región anular y las altas viscosidades de la emulsión, limitan el flujo a ser laminar, sin tener en cuenta la velocidad de la balanza. Sin embargo el efecto de diferentes velocidades relativas del líquido de las laminillas, todavía podría ser estudiado. Otros parámetros se dejaron constantes y con la posibilidad de plantear futuros estudios que pueden ayudar a dilucidar su impacto.

Estas son la forma de onda y frecuencia del campo eléctrico, las cuales se seleccionaron sinusoidal y de 50 Hz, respectivamente. Algunos de los resultados preliminares son mencionados sobre el impacto de la frecuencia del campo.

Determinación del tamaño de la gota

Un microscopio óptico de Nikon (Japón) se utilizó para determinar las distribuciones de tamaño de las gotas de algunas de las emulsiones en estudio. Una gota de la emulsión sin diluir se colocó en el vidrio del microscopio inmediatamente después de la preparación o después del experimento electro reológico. Varias imágenes fueron capturadas. Un software Image-Pro Plus 5.0 fue utilizado para medir de 500 a 600 diámetros de gota con el fin de conseguir curvas de distribución de tamaño confiables.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Proceso de desestabilización

El primer conjunto de experimentos se realizó en emulsiones de 30% de WC y fue dirigida a identificar las variables principales que afectan los rendimientos de separación. La segunda etapa tuvo como objetivo confirmar la validez de los resultados, cuando se mueve a emulsiones con menor contenido de agua.

Con el fin de descartar cualquier efecto excepto el causado por el campo eléctrico, se

realizaron pruebas de referencia en las emulsiones sin aplicar ningún voltaje. Las muestras fueron sometidas a la temperatura más alta y a la tasa de corte utilizadas en la matriz experimental y demostraron ser completamente estables sin ningún signo de separación durante un tiempo normal de experimentación (6 minutos bajo fuerza de corte más 10 minutos de descanso a 60°C).

La Figura 1 muestra la cantidad de agua que se resolvió como porcentaje sobre el total, debido a la aplicación del campo eléctrico de AC en emulsiones de 30% de WC. Los experimentos se repitieron varias veces mostrando una excelente reproducibilidad.

EFICIENCIA DE LA DESHIDRATACIÓN DE LAS EMULSIONES DE AGUA EN CRUDO

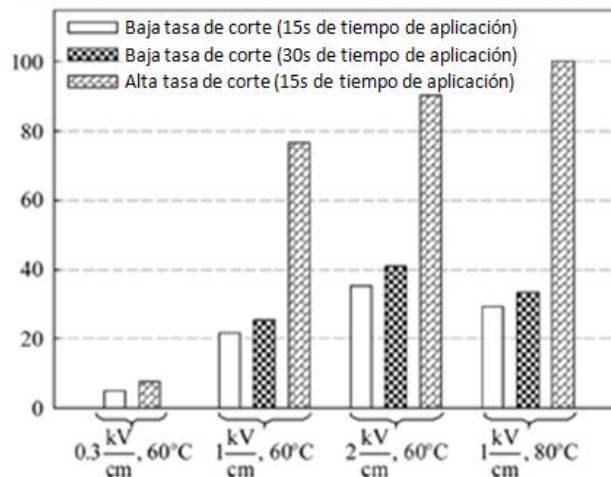


Figura 1. Agua resuelta después de tratamiento electrostático de emulsiones de 30% de corte de agua. El experimento incluye variaciones de temperatura, tasa de corte, intensidad de campo eléctrico y tiempo de aplicación como se reporta en la gráfica.

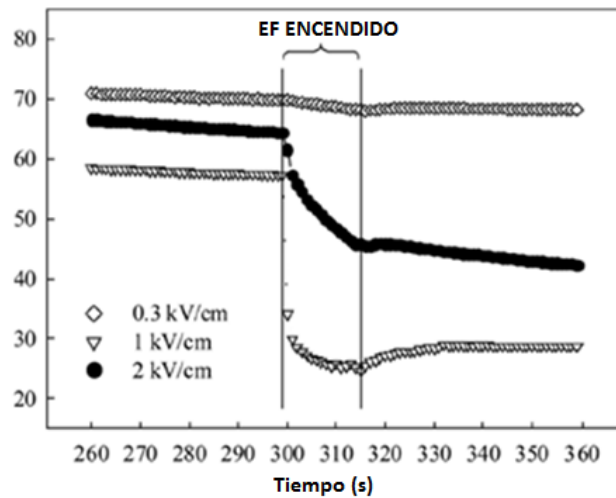


Figura 2. Viscosidad (cP) como una función de tiempo en experimentos de alta tasa de corte en emulsiones de 30% de corte de agua a 60°C. El intervalo de aplicación del campo eléctrico está enmarcado entre las líneas sólidas y su intensidad se reporta en la gráfica.

La mayor peculiaridad es el efecto dramático en la eficiencia de la desestabilización de la tasa de corte, que parece superar todas las otras variables. Por supuesto, un valor crítico del campo eléctrico necesita ser superado, en cualquier caso, por encima de 1 kV/cm, la velocidad de corte en la región anular predomina. Para obtener más información, el tiempo de aplicación del campo eléctrico se incrementa de 15 a 30 segundos en el caso de baja velocidad o tasa de corte (5 rpm). Al parecer en la duplicación del tiempo de aplicación de la tensión, pueden lograrse pequeñas mejoras (menos de 14% en la media) ya que la mayoría del proceso se lleva a cabo tan pronto como se establece el campo eléctrico, que es pequeño en comparación con el efecto de la alta tasa o velocidad de corte, lo que aumenta la separación en promedio en un 68%, en comparación con el caso de baja tasa de corte con el mismo tiempo de aplicación. La razón radica en el hecho de que una vez que se alcanza un valor significativo del campo eléctrico, la interfaz agua-en-crudo se desestabiliza y cualquier factor adicional puede desencadenar coalescencia.

El campo de AC no puede generar ninguna migración de gotas relevante, a diferencia de los campos de corriente continua DC. Por lo tanto, si las gotas no se ponen en estrecha proximidad por las fuerzas externas, ellas se mantienen dispersas en el medio. Parece, entonces, que una combinación de aumento de la frecuencia de colisión y las interfaces de las gotas desestabilizadas inducidas por las fuerzas eléctricas son muy importantes para la electrocoalescencia. Cuando

estas dos condiciones coexisten, entonces es probable que se produzca separación de la emulsión en gran extensión, a una velocidad que es determinada por la viscosidad de la emulsión, en la que la temperatura tiene una gran influencia.

La Figura 2 muestra las curvas de viscosidad obtenidas para emulsiones de 30% de WC a 60°C durante diferente intensidad de campo eléctrico. El intervalo de aplicación del voltaje se encuentra entre las dos líneas continuas y se inicia después de 5 minutos de corte con el fin de estar seguros de la estabilidad de la emulsión y no considerar efectos superpuestos. Las curvas, que no parten del mismo valor a causa de pequeñas diferencias en el procedimiento de mezcla, reflejan los grados o extensión de separación que se muestran en la Figura 1. De hecho, las curvas que se corresponden al incremento de las intensidades de campo eléctrico exhiben caídas de viscosidad más y más grandes y también un proceso mucho más rápido. Las curvas relacionadas con las pruebas de baja tasa de corte no son reportados, pero también mostraron analogías con los resultados de la separación. La baja turbulencia permite la captura del proceso de electrofloculación de la gota, verificado por un aumento de la viscosidad proporcional a la intensidad de campo eléctrico. Después de un tiempo característico necesario para completar el proceso de adelgazamiento de película (que era aproximadamente el mismo para todas las pruebas) se produjo coalescencia y la viscosidad empezó a disminuir a un ritmo mucho más lento que el observado en experimentos de alta tasa de corte.

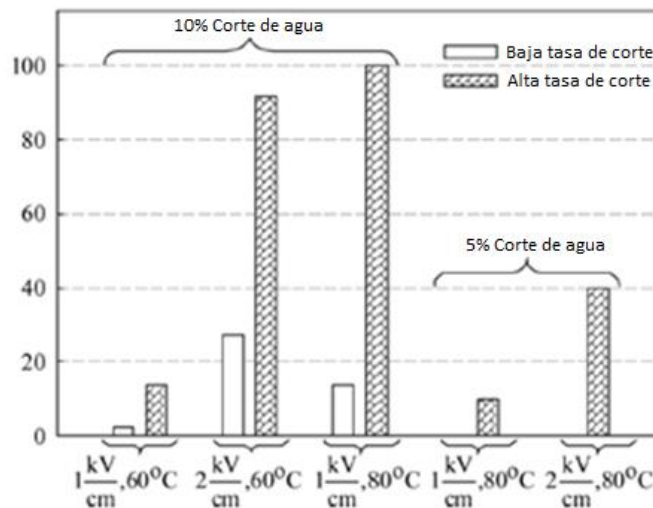


Figura 3. Agua resuelta después del tratamiento electrostático de emulsiones de 10% y 5% de corte de agua. Los experimentos incluyen variaciones de

temperatura, tasa de corte e intensidad de campo eléctrico como se reporta en la gráfica.

La Figura 3 proporciona la evidencia de que se requieren condiciones más severas para conseguir un buen rendimiento de separación en emulsiones de menor contenido de agua. Para emulsiones de 10% de WC, resulta que 1 kV/cm a 60°C es claramente insuficiente para la desestabilización. Lo mismo puede decirse de todas las pruebas realizadas a baja tasa de corte que se tradujo en bajos grados de separación.

Las mejoras logradas en emulsiones de 10% de WC debido a una tasa de corte superior son muy altas, con un aumento del 80% en la media del agua resuelta. La tendencia observada cuando se pasa de emulsiones de 30% a 10% de WC puede extenderse a emulsiones de 5% de WC. En este caso no se observan separaciones de la emulsión a baja tasa de corte para cada temperatura de proceso. Las emulsiones pudieron sólo ser desestabilizadas con una combinación de alta tasa de corte y alta temperatura, pero en una pequeña parte solamente, como se representa en la Figura 3.

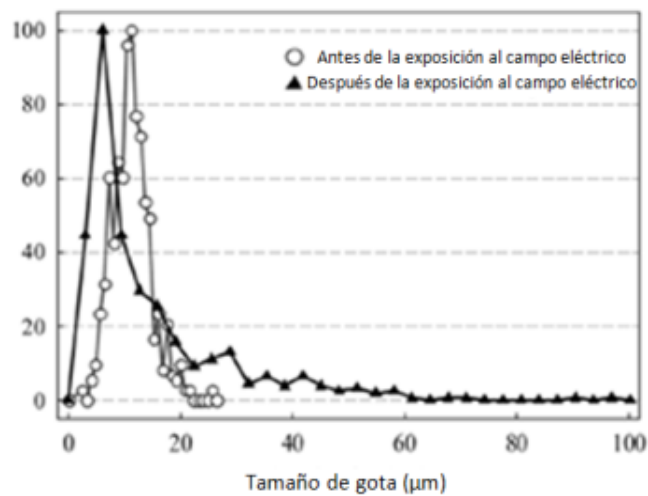


Figura 4. Distribución del tamaño de gota de una emulsión de 30% de WC antes (círculos vacíos) y después (Triángulos sólidos) de la aplicación del campo eléctrico. La emulsión se somete a 1kV/cm por 15 segundos a 60°C en condiciones de alto corte.

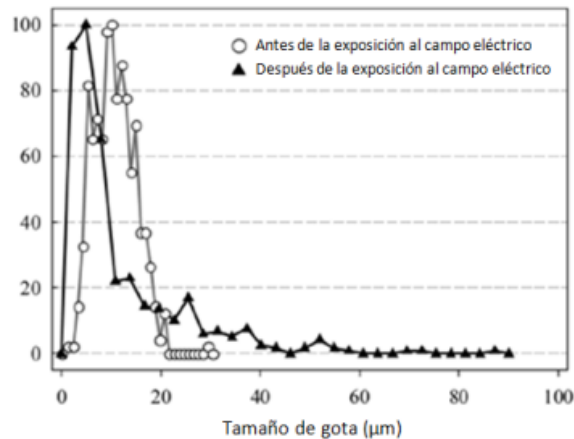


Figura 5. Distribución del tamaño de gota de una emulsión de 10% de corte de agua antes (círculos vacíos) y después (triángulos sólidos) de la aplicación de campo eléctrico. La emulsión se somete a 1kV/cm por 15 segundos a 60°C en condiciones de corte alto.

La revisión de todos los resultados confirma que el uso de fuerzas electrostáticas para aumentar la velocidad de separación es extremadamente eficiente cuando la distancia entre las gotas es pequeña (cortes de agua más altos) o para valores altos de la frecuencia de colisión de gota alcanzados por turbulencia alta de corte dentro de la muestra. Además, se confirma la fuerte dependencia de los radios de las gotas destacado en la Ecuación 1. Las figuras 4 y 5 muestran las distribuciones de tamaños de gota a través de experimentos llevados a cabo a alta tasa de corte, 60°C y 1 kV/cm en emulsiones de 30 y 10% de WC, respectivamente.

En el eje Y la población de gotas contadas se normaliza con respecto a la frecuencia máxima contada. El diámetro medio de gota inicial basado en la distribución volumétrica es el mismo para todas las emulsiones e igual a aproximadamente 12 µm. Después se aplica el voltaje, estos valores aumentan a alrededor de 26 y 22 µm, para emulsiones de 30 y 10% de WC respectivamente. Esto significa que, aparte del agua que se resuelve a la vez, otras gotas sedimentan a una tasa mayor. Los últimos restos de agua que quedan en las emulsiones representan la fracción más pequeña de la distribución del tamaño original y que se limitan a 10 µm. Este resultado apoya la teoría de que las gotas más pequeñas representan un limitante para lograr buenas separaciones. Además de tener estabilidad intrínseca más alta, también se someten a fuerzas electrostáticas más pequeñas. Por lo tanto la eficiencia global del proceso se basa en la capacidad de coalescer este grupo de gotas, ya que las más grandes son fácilmente inducidas a la fase de coalescencia y separación. Bajo un punto de vista de proceso real esto podría hacerse ya sea mediante la localización de la

unidad electrostática en un lugar de condiciones de flujo severo o mediante el uso de ayudas complementarias, tales como calor o químicos desemulsionantes.

Por supuesto, su uso se reduciría en gran medida mediante la aplicación de campos eléctricos, reduciendo así los costos. A la luz de los resultados parece particularmente beneficioso incorporar los electrocoalescedores en una etapa del proceso en el que las emulsiones presentan un razonable alto número de Reynolds.

Además, los experimentos preliminares dirigidos a evaluar la influencia de la frecuencia mostraron efectos que no podrían explicarse fácilmente. Estos fueron siempre menos significativos que de otros cambios de parámetros (menos de 10%) y podrían estar cubiertos por la dispersión experimental normal. Además, las discrepancias reportadas en la literatura cuando se busca una frecuencia de campo óptimo sugieren que existe una fuerte dependencia de las características de la configuración del objeto de investigación. Con la configuración experimental actual, no se obtienen grandes efectos de la frecuencia.

Comparación con consideraciones teóricas

Mediante la sustitución de los datos experimentales y las propiedades de la emulsión en las ecuaciones 7 y 9, se obtienen los datos reportados en la Tabla 2.

Efectos	Contenido de agua	Ecuación adoptada	t_c (ms)
Fuerzas electrostáticas, $E_0= 1$ kV/cm, 60°C	10% vol	7	3712
	30% vol	7	747
Fuerzas electrostáticas, $E_0= 1$ kV/cm, 80°C	10% vol	7	2536
	30% vol	7	572
Fuerzas electrostáticas, $E_0= 2$ kV/cm, 60°C	10% vol	7	1856
	30% vol	7	373
Fuerzas electrostáticas, $E_0= 1$ kV/cm + LSR	10% vol	9	304
	30% vol	9	101
Fuerzas electrostáticas, $E_0= 1$ kV/cm + HSR	10% vol	9	4.2
	30% vol	9	1.4

Tabla 2. *Tiempos característicos para diferentes condiciones de procesos, calculados según las ecuaciones 7 y 9.*

Algunas consideraciones se pueden hacer, por ejemplo, la relación de proporcionalidad entre t_c y la tasa de corte (ver los resultados de la Ecuación 9 en la Tabla 2) se confirma por la extensión de separación. Como era de esperar a partir de la teoría, las mejoras propuestas por el aumento de la turbulencia (las dos tasas de corte son en relación de 1:72) son siempre alrededor de 70% para todos los experimentos de separación. Cuando no se considera ninguna tasa de corte, la expresión de t_c evalúa los efectos de duplicación de la intensidad de campo eléctrico y el aumento de la temperatura a partir de 60°C a 80°C en forma similar. Sin embargo, se subestiman los efectos alcanzados mediante el aumento de la temperatura, probablemente debido a que la expresión no tiene en cuenta la desestabilización de la película de la gota y la tasa de separación más alta a mayores temperaturas. Una gran diferencia surge cuando se considera el efecto del corte de agua. Si la teoría indica resultados consistentes en ausencia de esfuerzo cortante, con mayor tasa de corte no tiene en cuenta la convergencia de los resultados, lo cual se debe a la disminución de importancia de la distancia entre las gotas.

Por lo tanto, incluso si las ecuaciones 7 y 9 pueden ser utilizados en una evaluación preliminar de los resultados, estas tienen varias limitaciones. La ecuación 7 no tiene en cuenta la tasa de corte, que ha sido identificada como una variable clave para el proceso de desestabilización. Por otra parte, la ecuación 9 supone que el campo eléctrico es suficientemente alto como para dar siempre coalescencia al contacto. Además, no se puede utilizar directamente para predecir la medida de separación, ya que excluye el efecto de las propiedades físico-químicas de la emulsión, que son extremadamente importantes.

CONCLUSIONES

Este artículo describe el proceso electrocoalescencia que tiene lugar en emulsiones de agua-en-crudo que fluyen en un reómetro de cilindros concéntricos bajo la influencia de un campo eléctrico de AC. En esta situación, la fuerza electrostática domina la atracción gota-gota resultante de la polarización de las gotas por el campo eléctrico aplicado. Se encuentra que el efecto de la tasa de corte es predominante. Incluso si no se puede lograr separación por las fuerzas de corte por sí mismas, su combinación con un campo eléctrico por encima de un cierto valor da un aumento dramático en el rendimiento o resultado de la separación.

El efecto de la temperatura es también importante, aunque se espera que un aumento de la intensidad de campo eléctrico de mejoras decrecientes hasta un

valor límite cuando las probabilidades del rompimiento de las gotas aumenta. A la luz de los resultados obtenidos, es evidente que la etapa de contacto de las gotas es más esencial en función de emulsiones con menores contenidos de agua, y que el diseño de nuevos electrocoalescedores deben centrarse en la exposición de emulsiones al campo eléctrico en regiones de turbulencia moderadamente alta, y concentrarse en la característica de una fase optimizada del campo eléctrico.

Si se cumplen las condiciones más importantes para una alta eficiencia, la desestabilización electrostática tiene el potencial para convertirse en una herramienta fundamental en todas las instalaciones de producción de petróleo, lo que permite una fuerte reducción de costos mediante el ahorro de calor o reducción del consumo de demulsificantes químicos.

ANEXO 3. EFICIENCIA DE LA DESHIDRATACIÓN DE CAMPOS ELÉCTRICOS DC PULSADOS DE ALTA FRECUENCIA EN LA EMULSIÓN AGUA-EN-CRUDO²⁸

Un estudio realizado en la Universidad de Petróleos en China, evaluó la influencia de varias variables operacionales en la separación electrostática de emulsiones de agua-en-crudo usando una celda de Perspex equipada con un generador de corriente continua pulsada de alta frecuencia utilizando la técnica de la conductividad.

La parte experimental se dirige a discernir las variables más importantes que se cree gobiernan el proceso de desestabilización electrostática, incluyendo la distancia entre electrodos, la frecuencia y duración del pulso. Los resultados obtenidos se discuten y se relacionan con el diseño óptimo y la ubicación de una unidad electrocoalescente eficiente.

Los resultados del experimento muestran que la eficiencia de la deshidratación aumenta con la disminución de la distancia entre electrodos, y a una distancia entre electrodos dada, la eficiencia de la deshidratación aumenta con la frecuencia decreciente. Por otra parte, en un intervalo de pulso dado, la eficiencia de la deshidratación aumenta con el aumento de la duración del pulso.

Esta información se toma del artículo *Dehydration Efficiency Of High-Frequency Pulsed DC Electrical Fields On Water-In-Oil Emulsion* ⁽⁸⁾.

Introducción

Varios diseños se han introducido, la mayoría usando campos eléctricos alternos (AC) con frecuencia de red (50 o 60 Hz), debido a su alta tolerancia al agua, consumo de energía eficaz, y baja tendencia a la corrosión electrolítica. El campo eléctrico de corriente directa (DC) ha sido menos usado en comparación con los campos eléctricos de AC. Junto con el campo eléctrico AC, el campo eléctrico pulsado DC se ha utilizado ampliamente desde 1986.

Los campos eléctricos pulsados DC han estado recibiendo mucha atención últimamente, en especial cuando se utiliza junto con electrodos revestidos. Al igual que los métodos de separación de AC, los sistemas pulsados DC involucran

²⁸ ZHANG Yanzhen. Dehydration Efficiency Of High-Frequency Pulsed DC Electrical Fields On Water-In-Oil Emulsion. College of Mechanical and Electronic Engineering, China University of Petroleum, No. 271. 2010.

dipolos inducidos en las gotas de agua, lo que conlleva a la atracción y a la coalescencia entre gotas adyacentes. Aunque la utilización de campos eléctricos pulsados DC han sido documentados ampliamente, la frecuencia utilizada es usualmente inferior a 200 Hz. Rara vez se ha reportado la utilización de campos eléctricos pulsados DC con frecuencia superior a 1 kHz.

Desarrollo del modelo

Definición de índice de estabilidad de la emulsión

En términos generales, incluso sin campos eléctricos la conductividad de la emulsión Agua/Crudo se incrementa con el tiempo, debido a la floculación, coalescencia y la maduración de Ostwald de las gotas. Cuanto más lenta sea la tasa de variación de la conductividad, más estable es la emulsión. La estabilidad de la emulsión se representa normalmente por la tasa de variación de su conductividad.

Azzam y Omari investigaron la estabilidad de emulsiones de crudo. En su trabajo, el patrón de la conductividad se ajusta a la función sigmoidea, como se muestra en la ecuación 1. Además, con los parámetros que aparecen en la ecuación 1, se propuso el índice de estabilidad de la emulsión en unidades de tiempo, como está dada por la ecuación 2.

$$C - C_B = \frac{C_T - C_B}{1 + \exp((\tau_{50} - t)/S)} \quad \text{Ecu. 1}$$

Donde C es la conductividad, C_T es la conductividad máxima después de que el homogeneizador es detenido, C_B es la conductividad justo después de que el homogeneizador es detenido, τ_{50} es el tiempo para que la conductividad alcance el valor de $[C_B + 0.5(C_T - C_B)]$, t es el tiempo, y S es el parámetro que describe la pendiente de la curva.

$$ES = EA \left(\frac{(C_T - C_B)\tau_{50}}{S_{\tau_{50}}} \right)^{1/2} \quad \text{Ecu. 2; en donde } S_{\tau_{50}} \text{ es la pendiente a } \tau_{50}$$

Definición del índice de eficiencia de deshidratación

Los trabajos anteriormente mencionados no incluyen el campo eléctrico que puede acelerar el proceso de descomposición de las emulsiones. En el análisis objeto de este trabajo experimental, la conductividad de la emulsión Agua/Crudo se estudia en un campo eléctrico pulsado DC de alta frecuencia. Cuando se aplica el campo eléctrico, se acelerará el proceso de coalescencia de las gotas, por lo que también incrementa la tasa de conductividad. A medida que el contenido de agua se

reduce a lo largo del proceso de electrocoalescencia debido a la separación en curso, la conductividad disminuye. La capacidad de deshidratación de los campos eléctricos se relaciona positivamente con la tasa de variación de la conductividad (incluyendo el crecimiento y disminución de la tasa). Por lo tanto, la eficacia de la deshidratación de los campos eléctricos puede ser representada por la tasa de variación de la conductividad.

Bajo el efecto del campo eléctrico, las curvas de conductividad vs. el tiempo se pueden dividir en dos períodos; periodo de ascenso y de descenso. En este trabajo experimental, se encuentra que la forma de las curvas del periodo ascendente de la conductividad es cercana a la de una función sigmoide, ecuación 3, mientras que las curvas en el período descendente se acercan a la de una función de potencia, ecuación 4.

$$C_a - C_0 = \frac{C_{max} - C_0}{1 + \exp((\tau_{a50} - t)/S_0)} \quad \text{Ecu. 3}$$

Donde C_a es la conductividad del período ascendente de las curvas, C_{max} es la conductividad máxima después de que se aplica el campo eléctrico, C_0 es la conductividad justo después que se aplica el campo eléctrico, τ_{a50} es el tiempo requerido para que la conductividad llegue al valor de $[C_B + 0.5(C_T - C_B)]$, t es el tiempo, y S_0 es el parámetro que describe la pendiente de la curva.

$$C_d = at^b \quad \text{Ecu. 4}$$

Donde C_d es la conductividad del período descendente de las curvas, a y b son los coeficientes, t es el tiempo. Se define τ_{d50} como el tiempo para que la conductividad alcance el valor de $[C_B + 0.5(C_T - C_B)]$.

Experimental

Preparación de la emulsión

La Tabla 1 resume las propiedades físicas del crudo y el agua des-ionizada usada en el experimento.

Propiedad	Crudo	Agua
Densidad (25°C)	0.86 g/cm ³	1
Viscosidad (25°C)	120 cP	1 cP

Permitividad relativa	2	86
Conductividad	Demasiado pequeño para ser medido	65 $\mu\text{s/cm}$

Tabla 1. Propiedades Físicas de los Materiales

Instrumentación experimental

La información de las formas de onda utilizadas en el experimento se muestra en la Tabla 2. Las formas de onda están numeradas de 1 a 8. Algunas formas de onda usadas en el experimento se muestran en la figura. 1.

El tamaño de las gotas de las emulsiones se determinó mediante el uso de un microscopio con un software de transmisión de vídeo que puede transmitir la imagen a un computador para su posterior análisis. A partir de la imagen se puede obtener la información de la distribución del tamaño de las gotas.

No.	Duración del pulso (μs)	Intervalo del pulso (μs)	Relación de trabajo (%)	Frecuencia (kHz)	V_{rms} (V)
1	74	32	69.8	9.43	222
2	112	48	70.0	6.25	217
3	333	141	70.3	2.11	214
4	693	282	71.1	1.03	209
5	76	48	62.3	8.20	205
6	150	48	75.8	5.05	224
7	308	48	86.5	2.81	238
8	640	48	93.0	1.45	248

Tabla 2. Información de las formas de onda cuadradas usadas

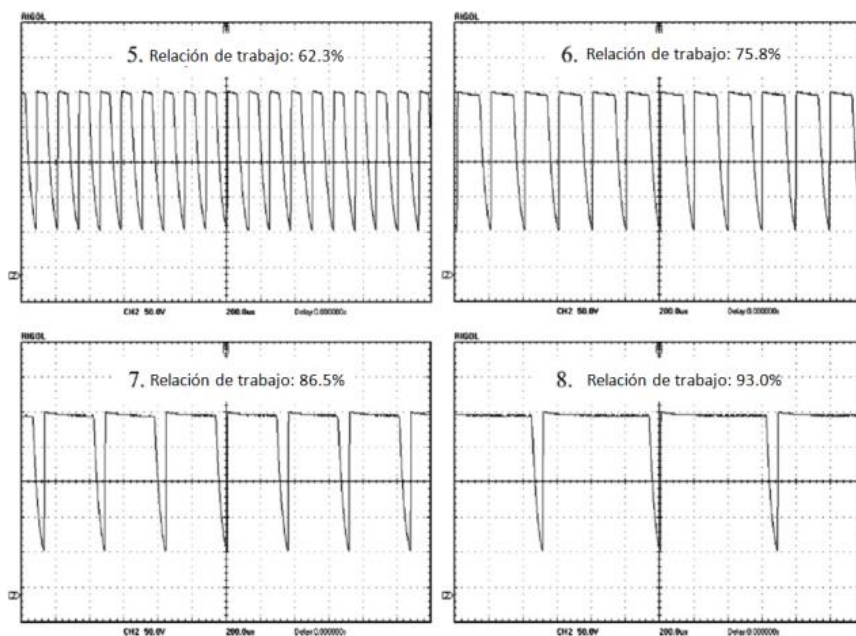


Figura 1. Algunas de las formas de onda usadas

Resultados y discusión

Relación entre la corriente medida y el comportamiento de las gotas

Con el fin de determinar la relación entre la corriente medida y el comportamiento de las gotas, la corriente dependiente del tiempo y la medida de distribución del tamaño de las gotas se realizaron en presencia de un campo eléctrico pulsado DC de alta frecuencia. La distancia entre los electrodos fue de 6 mm, y el número de la forma de onda usada fue 7. La variación de la corriente medida y el diámetro promedio de las gotas con el tiempo se muestra en la figura. 2; los microgramos de emulsiones con diferente tiempo de aplicación se muestran en la figura. 3. Muestra una relación entre los diámetros de las gotas y la corriente medida. Las dos curvas tienen casi la misma tendencia en los dos procesos, ascendente y descendente. A partir de las figuras. 2 y 3, se puede ver que en los primeros 14s después de que el campo eléctrico se aplica, la corriente medida era muy pequeña y no tenía ningún incremento significativo, mientras que el diámetro de las gotas tenía un gran incremento. A partir del segundo 16, la corriente medida aumenta rápidamente y alcanza su valor pico alrededor del segundo 32 después de que se aplica el voltaje, y luego sufre un decremento sostenido. Del mismo modo, el diámetro de la gota alcanzó su valor pico aproximadamente al segundo 32 después de lo cual tuvo una significativa disminución. Tomó cerca de 400 s antes de que la corriente medida desapareciera.

Aproximadamente al segundo 35, un poco de agua se observó en la parte inferior de la célula Perspex, y se incrementó con el tiempo. Esto se debe a la

sedimentación de las grandes gotas bajo la acción de la gravedad. Después de la aparición de agua en la parte inferior de la celda Perspex, la coalescencia se produjo no sólo entre las gotas, sino también entre las gotas y la interfaz.

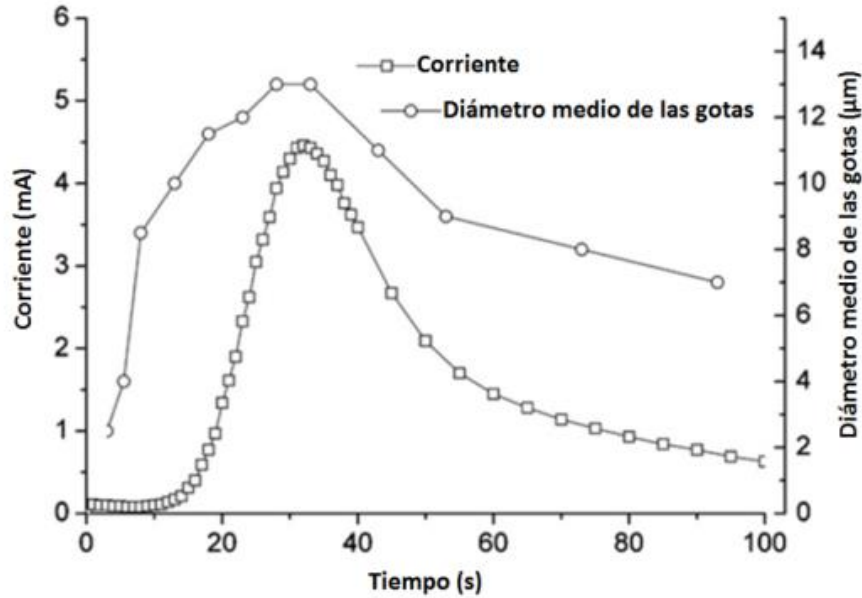


Figura 2. Variación de la corriente medida y el diámetro promedio de las gotas con respecto al tiempo

Como se muestra en la figura. 3, después de aproximadamente 30 segundos, la cantidad de las gotas se volvió mucho menor, y el diámetro de las gotas se hizo más pequeño, lo que indica una disminución del contenido de agua y la sedimentación de grandes gotas. A medida que pasaba el tiempo, las emulsiones se rompían. La parte superior era fase cruda y la inferior fase. A medida que el contenido de agua en la fase de crudo se hizo menor, la corriente medida se hizo también más pequeña. Desde el fenómeno, se hace evidente que el incremento de la corriente medida se debe a la configuración tipo-cadena y al rompimiento irreversible de la película y posterior coalescencia de las gotas bajo la acción de la fuerza electrostática. La configuración tipo-cadena y la coalescencia de las gotas conllevan a un puente de agua entre los electrodos generando un gran incremento de la conductividad. De la anterior representación, se puede atribuir el incremento de corriente medida a la configuración tipo-cadena y a la coalescencia de las gotas bajo la acción del campo eléctrico. A partir del valor de corriente medida, una gran cantidad de información útil de la emulsión puede ser evaluada, como por ejemplo el grado de coalescencia, distribución del tamaño de las gotas y el contenido de agua.

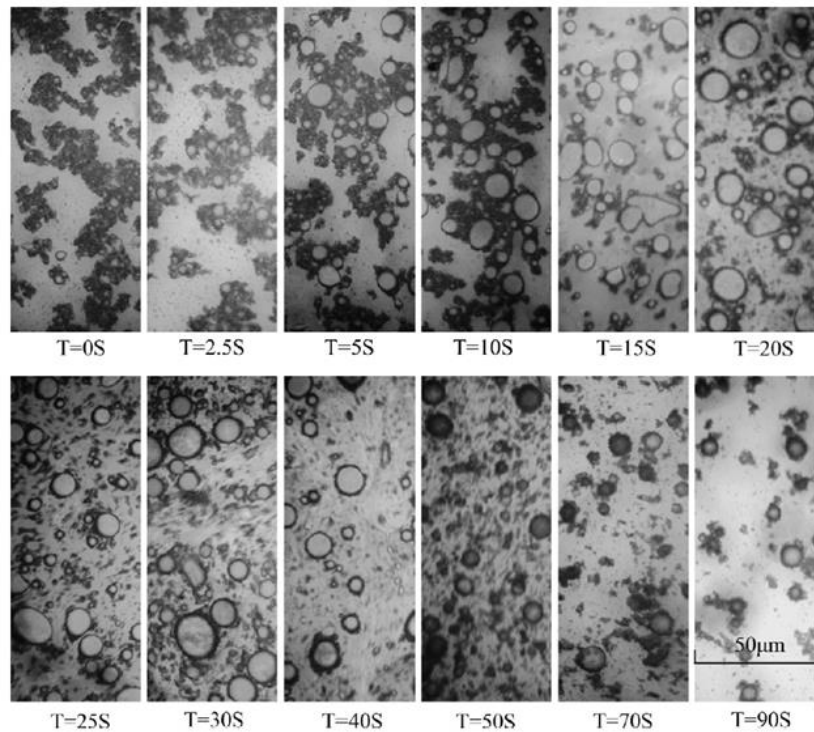


Figura 3. Microgramos de emulsiones

Influencia de la distancia entre electrodos

La influencia de la distancia entre electrodos en la desestabilización de las emulsiones se ha estudiado y los resultados se muestran en las figuras 4-6. El número de la forma de onda utilizada es la 7, y su información detallada se muestra en la Tabla 3. A partir de los resultados, es evidente que la distancia entre los electrodos es crucial en la eficacia del proceso de deshidratación. En efecto, para el sistema estudiado, la eficiencia de la deshidratación disminuye al aumentar la distancia entre electrodos. Por ejemplo, la pendiente en τ_{50} , ($S_{\tau_{50}}$), cuando la distancia entre electrodos es 2, 3 y 5 mm, es de 50.9, 4.5 y 0.7 $\mu\text{s}/(\text{cm s})$, respectivamente, correspondiente a una eficiencia de deshidratación de 9.5, 1.2 y 0.37 $\mu\text{s}/(\text{cm s})$. Todos los parámetros se resumen en la Tabla 3.

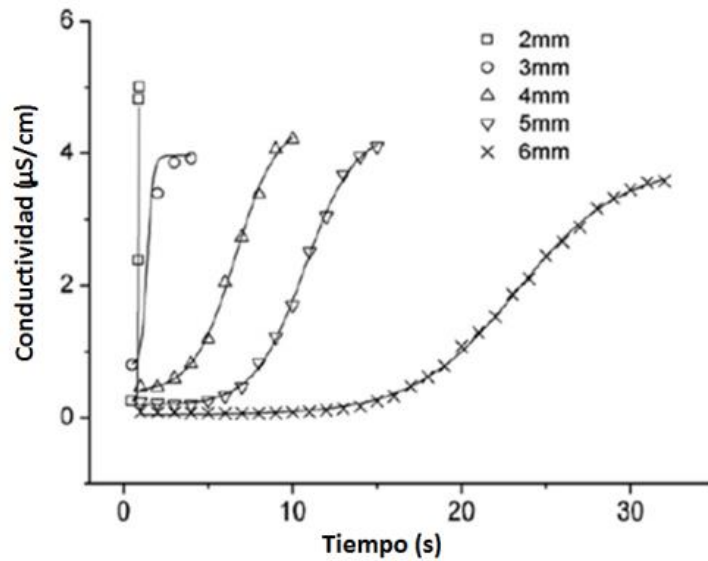


Figura 4. Región ascendente de las curvas tiempo-conductividad a diferentes distancias inter-electrodos

Muchos investigadores consideraron la fuerza electrostática, que es proporcional al cuadrado de la intensidad del campo, la causa principal de coalescencia en campos eléctricos AC y DC.

Cuando la distancia entre electrodos es de 2 mm, τ_{50} es 0,85s; de la relación entre el diámetro de las gotas y la corriente medida (conductividad), se puede inferir que el diámetro de las gotas puede alcanzar su valor máximo en un tiempo muy corto cuando la fuerza del campo eléctrico es suficientemente fuerte. La fuerza del campo eléctrico está determinada por muchos factores, tales como el potencial aplicado, la distancia entre electrodos, permitividad del material entre los electrodos y la geometría de los electrodos. Se hace entonces muy difícil calcular la intensidad de campo eléctrico y cuantificar sus efectos sobre la eficiencia de deshidratación, por lo que para este estudio solo se obtiene una conclusión cualitativa de que la eficiencia de la deshidratación se incrementa con el aumento de la intensidad de campo eléctrico.

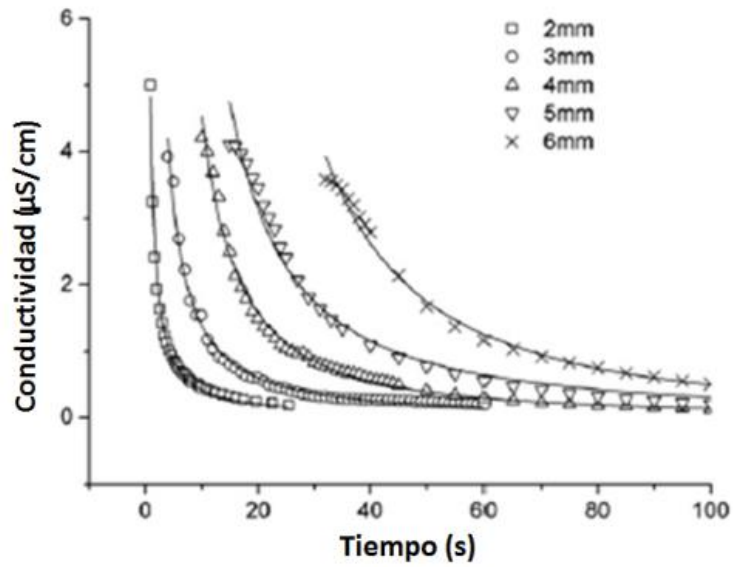


Figura 5. Región descendente de las curvas conductividad-tiempo a diferentes distancias inter-electrodo

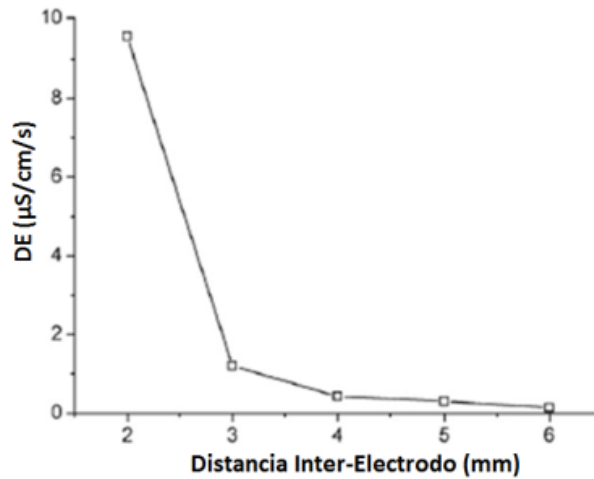


Figura 6. DE cómo una función de la distancia inter-electrodo

Cabe señalar que, cuando la distancia es de 2 mm, la corriente medida es diferente a los demás. Al segundo 25, la corriente medida se vuelve inestable, como se ilustra en la figura. 7. Este fenómeno se puede explicar por la descarga disruptiva de la interfaz que había sido investigada por Eow y Ghadiri y Higashiyama. Debido a la formación de un cono en la interfaz. Muchos

investigadores lo denominan el cono de Taylor porque Taylor fue el primero en investigar este fenómeno en la interfaz. El fuerte aumento de la corriente medida se debe a la intensificación del campo eléctrico local por encima de la punta del cono. Para formar el cono, la fuerza del campo eléctrico debe alcanzar un cierto grado de intensidad. Después de la capa de agua formada en la parte inferior de la célula, la coalescencia entre las gotas y la interfaz hace que disminuya el contenido de agua en la fase de crudo y por lo tanto su permitividad, mientras que una disminución de la permitividad conduce a un aumento de la intensidad de campo. Cuando la intensidad de campo alcanza un cierto grado, el cono formado y la corriente medida sufren un incremento sostenido. Por lo tanto, debe haber un límite de la intensidad de campo eléctrico para evitar el fuerte incremento de la corriente.

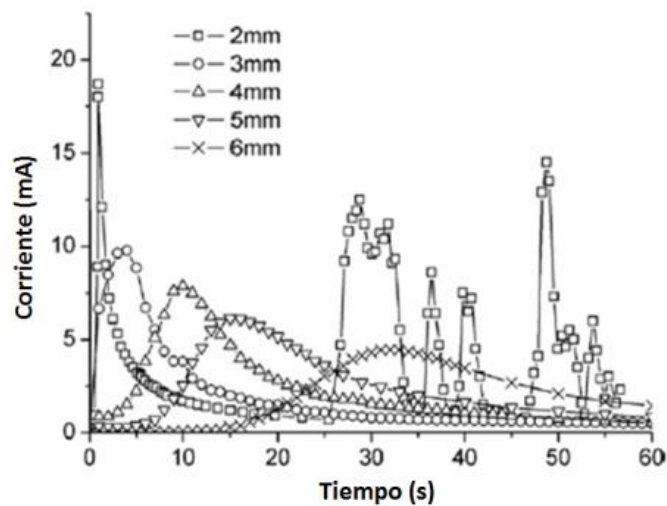


Figura 7. Curvas tiempo-corriente a diferentes distancias inter-electrodo

Influencia de la frecuencia

La influencia de la frecuencia se muestra en las figuras 8-10. Los números de las formas de onda utilizadas son 1, 2, 3 y 4. Todos con la misma relación de trabajo. La distancia entre los electrodos es de 6 mm.

Como se muestra en la figura. 10, la eficiencia de la deshidratación disminuye con el aumento de frecuencia. Una posible explicación puede ser que, las gotas vibran a frecuencias más bajas y tienen menor amplitud de vibración en un campo eléctrico de alta frecuencia que en uno con una frecuencia más baja. Cuando la frecuencia es de 9,43 kHz, la magnitud de la vibración es demasiado pequeña para provocar la coalescencia eficiente, por lo que el valor de τ_{50} es el mayor cuando la frecuencia es de 9,43 kHz. Las gotas en campo eléctrico de baja

frecuencia pueden tener una mayor frecuencia de vibración y mayor amplitud de la vibración, por lo tanto, una mayor eficiencia de coalescencia.

Todos los parámetros se resumen en la Tabla 4.

	Distancias Inter-electrodo				
	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm
$C_{mas} - C_o (\mu s/cm)$	4.75	3.17	4.12	4.17	3.77
$\tau_{a50} (\mu s/cm)$	0.87	1.40	6.62	10.72	23.30
$\tau_{d50} (\mu s/cm)$	1.86	8.96	16.79	26.55	47.93
$S\tau_{a50} (\mu s/(cm s))$	50.91	4.52	0.83	0.70	0.31
$S\tau_{d50} (\mu s/(cm s))$	1.32	0.21	0.19	0.11	0.07
$DE (\mu s/(cm s))$	9.53	1.20	0.42	0.30	0.14

Tabla 3. Parámetros de sigmoid y la función de potencia a diferentes distancias inter-electrodo

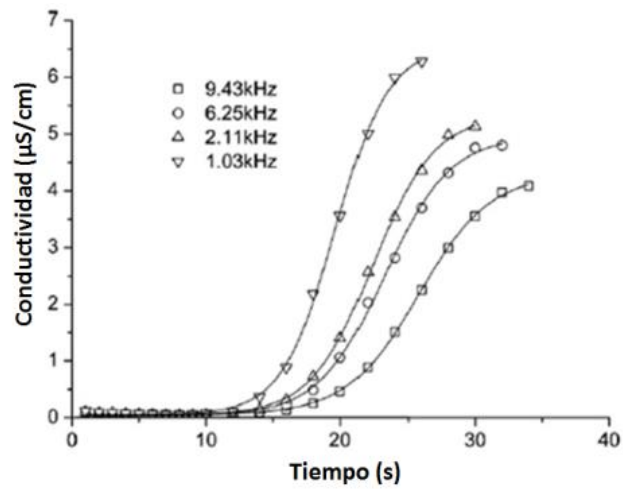


Figura 8. Región ascendente de las curvas tiempo-conductividad a diferentes frecuencias

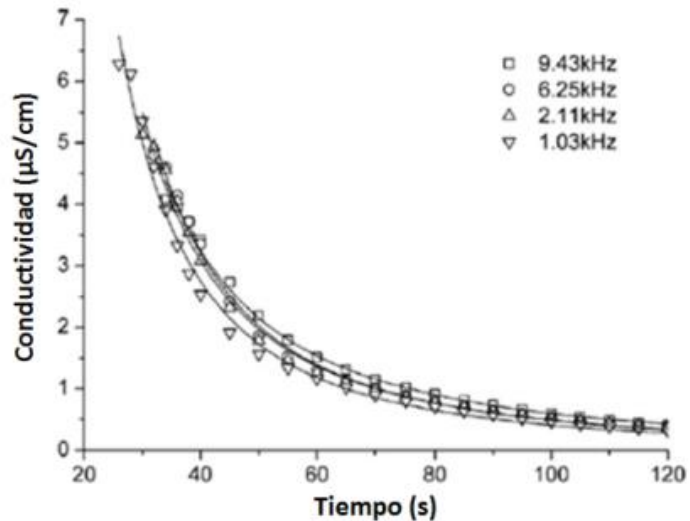


Figura 9. Región descendente de las curvas tiempo-conductividad a diferentes frecuencias

Una gran cantidad de trabajos han indicado que la frecuencia tuvo una influencia importante en tanto la magnitud, como en la frecuencia de vibración de las gotas, que afectó la coalescencia tanto de gota-gota como gotas-interfaz. A comienzos de 1970, el fenómeno de la distorsión de reposo y oscilaciones resonantes de una gota de líquido en un campo eléctrico habría sido estudiado por Sample, indicando

que la frecuencia característica de la gota era una función del diámetro, tensión superficial y densidad de la gota, llevando a la expresión teórica. Con la ayuda de una cámara de vídeo digital de alta velocidad, Eow y Ghadiri observaron que cuando una gota con un diámetro de 3mm se somete a un campo eléctrico pulsado, la gota vibra con una frecuencia que sigue a la frecuencia de pulsos aplicada hasta un límite por encima del cual la gota vibra a una frecuencia inferior a la frecuencia de pulsos aplicada. Además, por encima de este límite, la gota tuvo una magnitud de vibración mucho más pequeña en comparación con su magnitud inicial de vibración. Se presume que la vibración producida establece la onda de perturbación de la película de la fase continua entre dos gotas o entre una gota y una fase mayor, mejorando de este modo el drenaje de la película y la coalescencia gota-gota ó gota-interfaz. La coalescencia prematura en un campo eléctrico también se cree que está influenciada por la vibración mecánica natural y cavitacion dentro de las gotas. Por lo tanto, para alcanzar la intensidad óptima (o requerida) de la vibración de las gotas, debe ser aplicado un valor adecuado de frecuencia de pulso.

Esto puede influir en la frecuencia de pulso óptima para la máxima coalescencia gotas-gotas en un sistema físico particular.

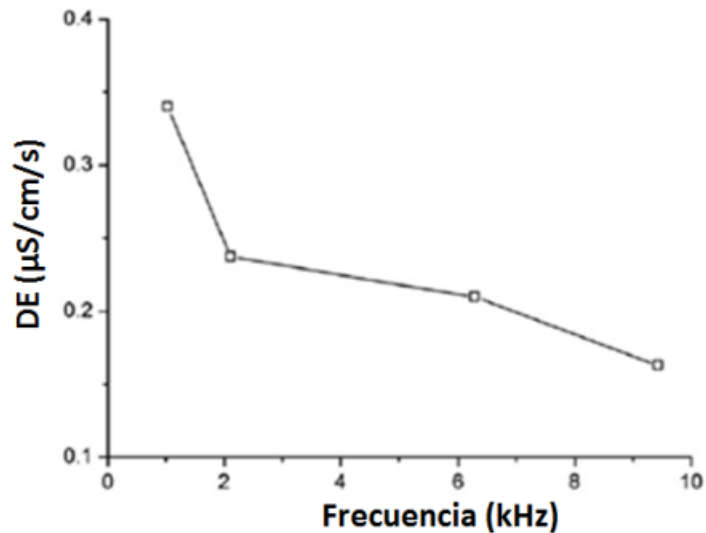


Figura 10. DE cómo una función de la frecuencia

	Frecuencia del campo eléctrico			
	9.43 kHz	6.25 kHz	2.11 kHz	1.03 kHz
$C_{mas} - C_o (\mu s/cm)$	4.24	4.93	5.28	6.49
$\tau_{a50} (\mu s/cm)$	25.79	23.25	22.38	19.61
$\tau_{d50} (\mu s/cm)$	50.38	45.44	43.24	36.90
$S\tau_{a50} (\mu s/(cm s))$	0.40	0.50	0.58	0.82
$S\tau_{d50} (\mu s/(cm s))$	0.08	0.11	0.12	0.18
$DE (\mu s/(cm s))$	0.16	0.21	0.24	0.34

Tabla 4. Parámetros de sigmoid y la función de potencia a diferentes frecuencias

Influencia de la duración del pulso

Con un intervalo de pulso constante (48 μs) y una distancia entre los electrodos (5 mm), se estudió la influencia de la duración del pulso sobre la eficiencia de deshidratación. El número de formas de onda utilizadas son 5, 6, 7 y 8, con una duración de pulso de 76, 150, 308 y 640 μs , respectivamente.

Todos los parámetros se resumen en la Tabla 5 y los resultados se muestran en las figuras. 11-13. Como se muestra en la figura. 13, la eficiencia de deshidratación aumenta con la duración del pulso. Cabe señalar que, la variación de ancho de pulso con un intervalo de pulso constante causará una variación de la frecuencia y la intensidad de campo. Como se muestra en la Tabla 2, el valor rms del voltaje para un pulso de larga duración es más alto y la frecuencia es inferior en comparación con un pulso de duración corta.

Tanto la intensidad de campo eléctrico y la frecuencia tienen un impacto significativo sobre la eficiencia de la deshidratación.

	Duración del pulso			
	76 μs	150 μs	308 μs	640 μs
$C_{mas} - C_o (\mu\text{s}/\text{cm})$	6.72	7.88	7.95	8.56
$\tau_{a50} (\mu\text{s}/\text{cm})$	18.15	12.92	11.12	10.30
$\tau_{d50} (\mu\text{s}/\text{cm})$	32.44	24.08	21.44	19.68
$S\tau_{a50} (\mu\text{s}/(\text{cm s}))$	1.06	1.35	1.53	1.68
$S\tau_{d50} (\mu\text{s}/(\text{cm s}))$	0.22	0.33	0.35	0.46
$DE (\mu\text{s}/(\text{cm s}))$	0.41	0.60	0.68	0.78

Tabla 5. Parámetros de sigmoid y la función de potencia a diferentes duraciones de pulso

Cuando la distancia entre electrodos y el intervalo de pulso es constante, un pulso de duración mayor generará un campo eléctrico más fuerte y una frecuencia inferior. Parece que la diferencia de eficiencia de deshidratación se debe a la diferencia de intensidad de campo y la frecuencia cuando se adoptan pulsos con diferente duración.

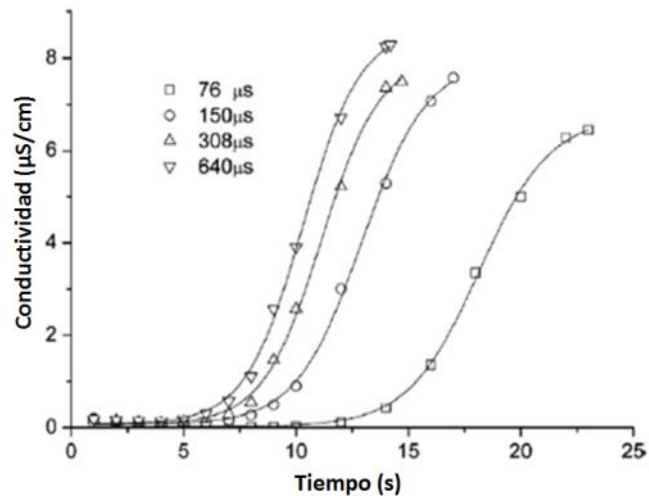


Figura 11. Región ascendente de las curvas tiempo-conductividad a diferentes duraciones de pulso

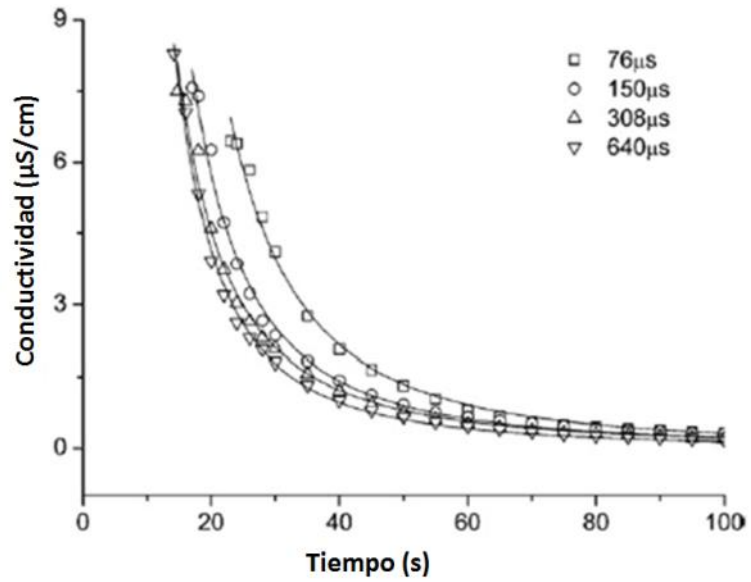


Figura 12. Región descendente de las curvas tiempo-conductividad a diferentes duraciones de pulso

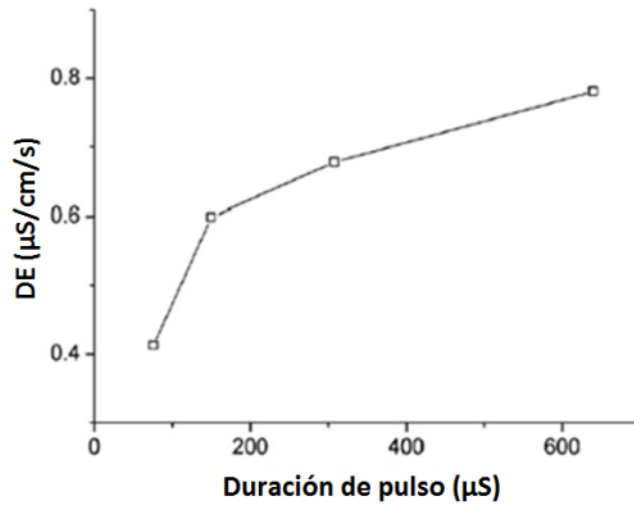


Figura 13. Cómo una función de la duración del pulso

CONCLUSIÓN

Los resultados del experimento muestran que la eficiencia de deshidratación aumenta con la disminución de la distancia entre electrodos, y a una distancia entre electrodos dada, aumenta con una frecuencia decreciente. Por otra parte, se encontró que la duración del pulso también afectó la capacidad de deshidratación. A una distancia entre electrodos dados y un intervalo de pulso, la eficiencia de deshidratación aumenta con la duración del impulso.