

**TECNOLOGÍA ELECTROSTÁTICA DUAL FREQUENCY PARA LA
DESHIDRATACIÓN Y DESALACIÓN DE CRUDOS PESADOS**

SERGIO EDGARDO BARBOSA VARGAS

MARCO DE DIOS MENDOZA JASPE

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2013

**TECNOLOGÍA ELECTROSTÁTICA DUAL FREQUENCY PARA LA
DESHIDRATACIÓN Y DESALACIÓN DE CRUDOS PESADOS**

SERGIO EDGARDO BARBOSA VARGAS

MARCO DE DIOS MENDOZA JASPE

**Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero de Petróleos**

Director

MANUEL E. CABARCAS SIMANCAS, M.Sc.

Ingeniero de Petróleos

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2013

DEDICATORIA

A mis Padres Rubiela Vargas y Amin Barbosa por enseñarme a ser mejor persona cada día, brindarme su cariño, paciencia y apoyo incondicional a lo largo de mi formación como profesional.

A mis hermanos: Alberto, Esteban y Sandra por soportar mis bromas, por su afecto y apoyarme en todo momento.

A mis Tios: Orlando, Edith, Elver, Beiba, Edison, Flower, Neida, Leo, Ofelia, Edgar, Eder y Nidia.

A mi abuela Cleo y mi Abuelo Fortunato Q.E.P.D.

A Marco de Dios Mendoza Jaspe por su invaluable amistad y enseñarme el significado de dedicación, convicción y perseverancia.

A los care mondas de mis primos xD.

A Lorena Albarracín (mi sol y estrellas), gracias por tu paciencia y llenarme de felicidad todos los días. Te quiamodoro mucho mucho:P.

A mis amigos con los que compartí alegrías y tristezas, y siempre estuvieron ahí para darme una mano, soy muy afortunado por encontrar personas como ustedes. Sr Anderson, Robinson (sute), William (Babe), Jepp, Chebonsky, Julian, Renzo, Jimmy, Venquito Pro, Mauro, Tavo Valle, N2X, Kaka, Juan Charlis, Juan Miranda, Chucho, Oskar (Mi sr Pizco), Leo, Rogue Dark, Noobaf, Marquito, Roberick, David García, Sanguinario, Alvi, Chan, Elvis y otros que en el momento se me escapan.

A las amigas más lindas de todas Vivi, Joyce, Jenniffer, Mel, Johana, Tania y Edith.

A mi segunda familia Doña Graciela, Don Alberto, Lina, Nathalie, Lucky y Rintintinsito.

Mil gracias a todos!

Sergio E. Barbosa Vargas

*A mí adorada hermana Priscilla
Por ser mi inspiración, la niña de mis ojos, mi luz de esperanza, mi fortaleza, mi todo, por siempre recordarme
que pase lo que pase siempre estarás a mi lado y que si estamos juntos nada nos puede detener... Te Amo.*

*A mi amada y por siempre recordada madre Sharith
Por darme la vida y guiarme en todo momento por el buen camino, porque sé que siempre me acompañas, a
quien le debo mucho de lo que soy hoy en día.*

*A mi extraordinario padre Marco Antonio
Por su infinito amor y apoyo, por enseñarme que cuando se quiere se puede, a siempre mirar hacia adelante y
nunca desfallecer, por ser tan dedicado como padre y tan comprensivo como amigo, por demostrarme que el
amor de un padre no tiene comparación alguna y que pase lo que pase siempre me estará apoyando.*

*A mi segunda madre Lou
Por convertirse en ese pilar familiar que me permitió seguir adelante, quien trajo nuevamente la sensación de
un hogar a mi vida, quien desde el primer momento me ha apoyado enormemente e incondicionalmente.*

*A mi tía y madrina del alma Mary, a mis tíos Toñito y Nando
Por siempre estar ahí cuando los necesité, por quererme como a un hijo, y por enseñarme tantas cosas de la
vida que en algún momento me sacaron de aprietos.
A todos mis familiares por estar siempre ahí acompañándome en este largo camino.*

*A Sergio Machero Killer por ser mi gran amigo incondicional, mi hermano, con quien se pasaron verdes y
maduras, con quien aprendí el verdadero valor de la amistad.*

*A Robinson (compañero ñero) y Gustavo (tavinho), por ser tan excelentes amigos, con quienes espero
encontrarme en un futuro próspero y compartir una larga y valiosa amistad.*

*Al clan Snakes, mis compañeros del Dota, Nesgro Juan, Pisko el Burgues y Leo Lannister Valbuena, quienes a
pesar de ser mancos me alegraron los días con los errores que cometían a diario, era increíble ver como cada
día salían con una nueva embarrada diferente... jajajajaja.*

*A mis amigos de Quilla, de la U y de Cyberbullying, por hacer este camino más llevadero con las bromas,
paseos, risas, fiestas, miércoles de cine y demás momentos inolvidables. A Belkys, por brindarme su apoyo
incondicional en los momentos más difíciles, por su amor y su compañía, gracias por estar cuando tanto lo
necesite. Lelo, Wendy, Ricardo, Juajo, Jepp Polo, Rogue D, Melissa, Farley, Elvis, David, Viviana,
Robertnarios, Claudia, Eddy, Tania, Marquitos, Jennifer, Johanna, Laura, Eusebio, Venequito Pro, KK,
Mauro, Sr. Anderson, Charlis, Chucho, Herman, Coche, Sangui, Teffa, Jose Raul, Casta, Jultia, Naty, Juli,
Marvin, Franklin, Luis Felipe, Julian, Harvey, Jose David, Luis Alberto y los que se me pase por nombrar,
siempre los tendré presentes.*

A todos ustedes muchísimas gracias!

Marco De Dios Mendoza Jaspe

AGRADECIMIENTOS

De manera muy sincera expresamos nuestros agradecimientos:

Al Ingeniero Manuel Enrique Cabarcas Simancas por ser nuestro guía y colaborador incondicional en el desarrollo de este proyecto.

Al Ingeniero Erik Giovanni Montes Páez por las ideas aportadas para el mejoramiento del proyecto.

Al Ingeniero Nicolás Santos Santos por facilitarnos material para el desarrollo de este proyecto.

A Leidy Laura Ortega Navarro por su invaluable apoyo en la edición de imágenes de este proyecto.

A nuestros amigos por compartir todos esos buenos momentos y hacer más agradable el paso por la universidad.

A la Universidad Industrial de Santander donde nos formamos profesionalmente.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	25
1. EMULSIONES	29
1.1 FLUIDOS Y SÓLIDOS ASOCIADOS A LA EXTRACCIÓN DE CRUDO	30
1.1.1 Agua de formación.	30
1.1.2 Petróleo.	36
1.1.2.1 Clasificación por composición química.....	37
1.1.2.1 Clasificación según la densidad.	39
1.1.2.2 Clasificación según la presencia de azufre.	40
1.1.3 Gas.....	41
1.1.4 Arena.....	42
1.1.5 Asfáltenos.....	43
1.1.6 Resinas.	44
1.1.7 Parafinas.	45
1.1.8 Otros sólidos.	46
1.2 GENERALIDADES DE LAS EMULSIONES	46
1.2.1 Componentes de una emulsión.....	48
1.2.2 Clasificación.	49
1.3 PROBLEMAS GENERADOS POR LAS EMULSIONES.....	56
1.3.1 Corrosión en líneas y equipos.	56
1.3.2 Tránsito lento.....	58
1.3.3 Taponamiento de líneas de producción.....	59
1.3.4 Aumento de presión en cabeza de pozo (WHP).	60
1.3.5 Trabajo irregular en los equipos de bombeo.	61
1.3.6 Apretamiento progresivo de la emulsión.	61
1.3.7 Aumento del costo de producción por barril de crudo.	62
2. PRINCIPIOS DE LA SEPARACIÓN DE EMULSIONES	63

2.1 FACTORES QUE AFECTAN LA ESTABILIDAD DE LA EMULSIÓN	63
2.1.1 Relación de fases.....	63
2.1.2 Temperatura.....	64
2.1.3 Agitación.....	65
2.1.4. Contenido de sólidos.....	65
2.1.5. Contenido iónico del agua.....	68
2.1.6. Productos químicos.....	68
2.1.7. Envejecimiento de la emulsión.....	69
2.1.8. pH.....	69
2.1.9 Estabilización eléctrica de la interfase.....	71
2.1.10 Fracción pesada del crudo.....	72
2.1.11 Tamaño de gota.....	73
2.2 MECANISMOS INVOLUCRADOS EN LA ESTABILIDAD DE EMULSIONES	73
2.2.1 Repulsión Electrostática.....	73
2.2.2 Estabilización Estérica.....	74
2.2.3 Efecto de Gibbs-Marangoni.....	75
2.2.4 Estabilización por multicapas.....	77
2.3 ETAPAS PRESENTES EN LA SEPARACIÓN DE EMULSIONES	77
2.3.1 Floculación.....	78
2.3.2 Sedimentación.....	79
2.3.3 Coalescencia.....	81
2.3.4 Flotación.....	83
2.3.5 Filtración.....	83
3. MÉTODOS PARA LA DESHIDRATACIÓN DE CRUDO PESADO.....	84
3.1 ASPECTOS TÉCNICOS DE LA DESEMULSIFICACIÓN Y DESHIDRATACIÓN DEL CRUDO	84
3.1.1 Remoción de agua libre.....	86
3.2 TRATAMIENTO MECÁNICO.....	87
3.2.1 Gunbarrel.....	87

3.2.2	Tratador centrífugo.....	89
3.3	TRATAMIENTO QUÍMICO	93
3.3.1	Selección de químicos.....	94
3.3.2	Dosis del químico.	96
3.3.3	Puntos de inyección.	97
3.4	TRATAMIENTO TÉRMICO	98
3.4.1	Calentadores.	101
3.4.1.1	Calentador directo.	101
3.4.1.2	Calentador indirecto.	102
3.4.2	Tratadores térmicos.....	104
3.4.2.1	Tratador térmico vertical.	105
3.4.2.2	Tratador térmico horizontal.....	108
3.5	TRATAMIENTO ELÉCTRICO	113
4.	PROCESO DE DESALACIÓN DEL CRUDO PESADO	115
4.1	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	115
4.2	EQUIPOS PARA EL DESALADO DEL CRUDO.....	116
4.2.1	Desaladores.	116
4.2.2.1	Válvulas tipo globo.	117
4.2.2.2	Boquillas de inyección.....	119
4.2.2.3	Mezcladores estáticos.	120
4.3	DISEÑO DEL PROCESO DE DESALADO.....	121
4.3.1	Desalado de una etapa.	121
4.3.2	Desalado de dos etapas.....	122
4.4	DETERMINACIÓN DEL REQUERIMIENTO DE AGUA DE DISOLUCIÓN	123
5.	FUNDAMENTOS DEL PROCESO DE ELECTROCOALESCENCIA EN EL TRATAMIENTO DE EMULSIONES.....	124
5.1	PRINCIPIOS ELECTROSTÁTICOS	125
5.1.1	Campos electrostáticos y fuerzas en el vacío.	125
5.1.2	Polarización.....	132
5.1.3	Conducción.	134

5.1.4	Constantes de tiempo.....	138
5.1.5	Interfase.	139
5.1.6	Sistema coalescedor.	141
5.1.7	Polarización y conductividad de las gotas de agua.	144
5.1.8	Procesos para cargar gotas.	145
5.1.9	Potenciales químicos superficiales en campos eléctricos externos.....	146
5.2	MECANISMOS, FUERZAS Y MODELOS EN PROCESOS DE ELECTROCOALESCENCIA.....	148
5.2.1	Fuerzas electrostáticas actuando en una única gota.	150
5.2.1.1	Electroforesis.....	150
5.2.1.2	Di-electroforesis.....	152
5.2.2	Fuerzas mecánicas.	155
5.2.2.1	Fuerza de arrastre.	156
5.2.3	Fuerzas y movimiento de pares de gotas.....	157
5.2.3.1	Interacción dipolo-dipolo.....	159
5.2.3.2	Modelo dipolo - dipolo inducido.	160
5.2.3.3	Solución analítica.	161
5.2.3.4	Fuerza de adelgazamiento de película interfacial.	166
5.2.4	Modelos electrostáticos para múltiples esferas.	166
5.2.5	Fuerzas y movimientos en emulsiones.....	168
5.3	INESTABILIDADES DE GOTA.....	173
5.3.1	Teoría clásica de inestabilidades de gota.....	173
5.3.2	Observaciones experimentales de la desintegración de gotas de agua en aceite.....	177
5.3.3	Estudio dinámico de la forma de la gota para campos eléctricos transitorios.....	183
5.4	LOS MECANISMOS DE LA ELECTROCOALESCENCIA.....	184
5.4.1	Fusión de pares de gota.....	185
5.4.2	Condiciones críticas.	190
5.4.3	Investigaciones experimentales de caídas de gotas.	196

5.4.4. Superficies no ideales.	202
5.4.5 Ensayos con gotas compatibles.	204
5.4 OTRAS VARIABLES DEL PROCESO ELÉCTRICO PARA EL USO DE ELECTROCOALESCEDORES	206
6.1 TECNOLOGÍAS DE CAMPO ELÉCTRICO	212
6.1.1 Clasificación del campo eléctrico según el tipo de corriente.	212
6.1.1.1 Campo de corriente alterna (AC).....	213
6.1.1.2 Campo de corriente continua (DC).	216
6.1.1.3 Campo de corriente continua elevada combinada con corriente alterna (Dual Polarity – Polaridad dual – HVDC/AC).....	218
6.1.1.4 Campo de corriente continua pulsada (PEF).....	222
6.1.2 Clasificación del campo eléctrico según la frecuencia de onda.....	223
6.2 TECNOLOGÍAS DE ELECTRODOS	227
6.2.1 Electrodos compuestos de carga distribuida.	227
6.2.2 Electrodos horizontales múltiples.	230
6.2.3 Electrodos para coalescencia eléctrica de emulsiones líquidas.	232
6.3 TECNOLOGÍAS DE OPTIMIZACIÓN HIDRÁULICA Y DEL PROCESO	233
6.3.1 Energía de precalentado requerida.	234
6.3.2 Correlación para determinar el diámetro mínimo de la gota de agua. ...	235
6.3.3 Efecto del corte de agua sobre el diámetro mínimo de la gota.....	237
6.3.4 Practicas Operacionales.....	237
6.3.5 Optimización de la hidráulica de fluidos en los tratadores electrostáticos.	239
6.3.5.1 Ecuaciones de balance de energía.	241
6.3.5.2 Balance de masa.....	242
6.3.5.3 Velocidad del orificio.....	243
6.3.5.4 Control de momentum.	245
6.4 OTRAS TECNOLOGÍAS EN ELECTROCOALESCENCIA.....	247
6.4.1 Sieléctrica.....	247
6.4.2 Bielétrica.....	249

6.4.2.1 Principio de operación y características principales.	251
6.4.3 Coalescedor electrostático interno (VIEC).....	254
6.4.5 Coalescedor eléctrico compacto (CEC).....	256
6.4.6 Controlador de poder suministrado (LRC).....	257
6.4.7 Desalación electro-dinámica (EDD).....	259
6.4.8 Electrocoalescedor en línea.	262
6.4.9 Combinación con otro tipo de tratamiento.	265
7. TECNOLOGÍA DUAL FREQUENCY	266
7.1 DESARROLLO DE LA TECNOLOGÍA	266
7.2 PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO	270
7.2.1 Parámetros fundamentales de la tecnología Dual Frequency.	273
7.2.1.1 Frecuencia base y frecuencia modulada.	273
7.3 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DUAL FREQUENCY	274
7.3.1 Equipo auxiliar de suministro y control de energía eléctrica.....	276
7.3.1.1 Controlador sensible a la carga (LRC).	279
7.3.1.2 Transformador de malla NWL de NATCO.	280
7.3.2 Equipo interno del electrocoalescedor Dual Frequency.	280
7.4 CONSIDERACIONES OPERATIVAS Y DE DISEÑO DEL EQUIPO	317
7.4.1 Modificaciones de la forma de onda modulada.	317
7.4.1.1 Onda modulada de amplitud constante y frecuencia variable.	318
7.4.1.2 Onda modulada de amplitud variable con patrón escalonado.....	319
7.4.1.3 Onda modulada de amplitud variable con patrón escalonado inverso.	320
7.4.1.4 Onda modulada de amplitud variable con patrón escalonado acelerado.....	321
7.4.1.5 Onda modulada de amplitud variable con patrón exponencial equilibrado.....	321
7.4.1.6 Onda modulada de amplitud variable con patrón exponencial de ascenso súbito y caída lenta.	322
7.4.1.7 Onda modulada de amplitud variable con patrón exponencial de ascenso lento y caída súbita.	323

7.4.1.8 Onda modulada de amplitud variable con patrón exponencial decreciente.....	324
7.5 COMPARACIÓN CON TECNOLOGÍAS DE ELECTROCOALESCENCIA .	325
CONCLUSIONES	326
RECOMENDACIONES.....	330
BIBLIOGRAFÍA.....	331

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Fuentes de agitación durante la producción de crudo.	29
Figura 2. Diagrama de Stiff del agua de mar.	32
Figura 3. Relación entre la viscosidad y la presión.	33
Figura 4. Variación de la viscosidad con la temperatura y el contenido de sólidos.	34
Figura 5. Clasificación del petróleo.	36
Figura 6. Clasificación del gas.	42
Figura 7. Representación esquemática de una molécula de asfálteno.	43
Figura 8. Representación esquemática de una molécula de resina.	44
Figura 9. Ubicación del agente emulsificante en la interfase.	48
Figura 10. Emulsión directa (W/O).	50
Figura 11. Emulsión inversa (O/W).	51
Figura 12. Emulsión múltiple (W/O/W).	51
Figura 13. Relación entre tipos de emulsiones según cinética y la distribución del tamaño de gota.	52
Figura 14. Viscosidades de emulsiones muy apretadas a 125° F.	53
Figura 15. Relación entre tipos de emulsiones según estabilidad cinética y su viscosidad relativa.	54
Figura 16. Corrosión galvánica con depósitos de plomo en línea de producción.	57
Figura 17. Taponamiento parcial de tubería por depositación de orgánicos.	59
Figura 18. Producción y presión en cabeza antes y después del tratamiento.	60
Figura 19. Variación de la viscosidad con la temperatura para varios crudos.	64
Figura 20. Influencia de los sólidos finos y gruesos en la estabilización de emulsiones.	67
Figura 21. Influencia del pH en la estabilidad de la emulsión.	70
Figura 22. Efecto de la salmuera y el pH en la estabilidad de la emulsión.	71
Figura 23. Representación de la doble capa eléctrica y sus efectos en la repulsión electrostática.	74

Figura 24. Repulsión y estabilización por efecto estérico.	75
Figura 25. Efecto de Gibbs-Marangoni en una gota de agua.	76
Figura 26. Sub-procesos de separación de una emulsión.	78
Figura 27. Adhesión entre dos gotas de una emulsión.	81
Figura 28. Esquema de un gunbarrel.	88
Figura 29. Vista exterior de un tratador centrífugo.	90
Figura 30. Esquema del funcionamiento de un tratador centrífugo.	91
Figura 31. Corte vertical del interior de un tratador centrífugo.	91
Figura 32. Esquema del procedimiento para la prueba de botella.	95
Figura 33. Esquema de un calentador directo.	102
Figura 34. Esquema de un calentador indirecto.	103
Figura 35. Esquema simplificado de un tratador térmico vertical.	105
Figura 36. Esquema detallado de un tratador térmico vertical.	106
Figura 37. Esquema simplificado de un tratador térmico horizontal.	109
Figura 38. Esquema detallado de un tratador térmico horizontal.	109
Figura 39. Tratador electrostático horizontal para el desalado del crudo.	117
Figura 40. Válvula tipo globo.	118
Figura 41. Esquema de un sistema de boquillas de inyección para premezclado de agua y crudo.	119
Figura 42. Mezclador estático.	120
Figura 43. Esquema de un sistema de desalado de una etapa.	122
Figura 44. Esquema de un sistema de desalado de dos etapas.	122
Figura 45. Campo eléctrico creado por una carga puntual experimentando una fuerza.	125
Figura 46. Fuerza de Coulomb entre cargas puntuales de igual polaridad.	126
Figura 47. Fuerza de Coulomb entre cargas puntuales de polaridad opuesta.	126
Figura 48. Campo eléctrico homogéneo.	127
Figura 49. Campo eléctrico divergente.	128
Figura 50. Dipolo eléctrico.	131

Figura 51. Esfera conductiva (izquierda) y aislante (derecha) sin campo eléctrico.	137
Figura 52. Polarización de esfera conductiva (izquierda) y aislante (derecha) bajo la acción de un campo eléctrico.	137
Figura 53. Polarización de esfera conductiva (izquierda) y aislante (derecha) bajo la acción de un campo eléctrico y en contacto con el electrodo positivo.	137
Figura 54. Condensador de placas paralelas.	141
Figura 55. Esquema de una emulsión entre electrodos eléctricamente aislados.	143
Figura 56. Resistividad del agua en función de la salinidad.	145
Figura 57. Mecanismos de la electrocoalescencia y factores influyentes en su eficiencia.	149
Figura 58. Fuerzas de coalescencia.	150
Figura 59. Fuerzas de electroforesis.	151
Figura 60. Fuerzas dielectroforéticas actuando en una gota de agua rodeada por aceite.	153
Figura 61. Secuencia experimental del movimiento de expulsión de una gota de agua de una emulsión debido a las fuerzas dielectroforéticas.	154
Figura 62. Dos gotas de diferente tamaño localizadas en un campo homogéneo con un ángulo de inclinación " θ ".	159
Figura 63. Incremento del campo eléctrico en el polo A como función de la reducción de la distancia entre gotas s/R_2 .	162
Figura 64. Coeficiente de fuerza F_1 como función de la reducción de la distancia s/R_2 para diferentes relaciones de tamaños de gota.	163
Figura 65. Gota emulsionada de gran tamaño absorbiendo pequeñas gotas de la emulsión en un campo eléctrico horizontal.	170
Figura 66. Formación de cadenas en un líquido inactivo a partir de un campo eléctrico horizontal.	172
Figura 67. Obstrucción de coalescencia debido a pequeñas gotas al interior de la cadena de gotas de mayor tamaño.	172
Figura 68. Alargamiento teórico de una gota de agua como función del campo eléctrico aplicado (a semi-eje largo, b semi-eje corto).	176
Figura 69. Magnitud del campo para separación de gota para varias frecuencias de voltaje senoidal puro.	178
Figura 70. Magnitud del campo para separación de gota para diferentes formas de voltaje aplicado a 250 Hz.	178
Figura 71. Adelgazamiento de gota y formación del cono de Taylor durante el	181

aumento del campo eléctrico.

Figura 72. Inestabilidad de gota tipo I: Expulsión de pequeñas gotas individuales.	182
Figura 73. Inestabilidad de gota tipo II: Expulsión de nubes de pequeñas gotas.	182
Figura 74. Inestabilidad de gota tipo III: Expulsión de nubes de gotas muy finas.	182
Figura 75. Dos conductores esféricos a una distancia s .	187
Figura 76. Deformación de 2 gotas cercanas.	192
Figura 77. Velocidad de la interfase inferior de una gota de 200 μm cuando la gota cae sobre la gota más grande, para diferentes frecuencias y campos eléctricos aplicados con onda cuadrada de voltaje AC.	198
Figura 78. Gota impactando un campo eléctrico nulo, rodando hacia afuera.	198
Figura 79. Gotas de 500 μm cayendo, coalesciendo, y formando una gota satélite.	199
Figura 80. Configuración experimental de pequeñas gotas cayendo sobre gotas grandes bajo el efecto de 3 a 4 kV/cm.	200
Figura 81. Tiempo de coalescencia para gotas de agua adheridas con 3.5 wt% de NaCl en aceite puro (sin aditivos) bajo la influencia de una onda cuadrada generada por un campo eléctrico con frecuencia de 10 Hz. Gota cayendo de 200 μm . Una ruptura en las curvas ocurre en 50 ms, correspondiente a la mitad del periodo del voltaje.	201
Figura 82. Tiempo de coalescencia para gotas de agua adheridas con 3.5 wt% de NaCl en aceite nafténico (100 ppm de asfáltenos disueltos en la fase aceite) bajo la influencia de una onda cuadrada generada por un campo eléctrico con frecuencia de 10 Hz. Gota cayendo de 200 μm , y gota saturada en la superficie.	202
Figura 83. Superficie cubierta: Arriba (a): Drenaje lento de asfáltenos envolviendo la coalescencia de la gota. Abajo (b): Partículas dificultando la coalescencia de gotas diminutas de 200 μm .	203
Figura 84. Configuración experimental con gotas colgando desde vasos capilares.	205
Figura 85. Configuración experimental con gotas descansando sobre una superficie de teflón.	205
Figura 86. Tecnologías en electrocoalescencia.	211
Figura 87. Inversión de polaridad en corriente alterna (AC) de forma periódica.	213
Figura 88. Esquema generalizado de un sistema de corriente alterna.	213
Figura 89. Deshidratador convencional de corriente alterna (AC).	215
Figura 90. Deshidratador convencional de corriente alterna (AC).	215
Figura 91. Fuerzas DC sobre las gotas de agua.	217

Figura 92. Movimiento de las gotas dentro de un campo eléctrico DC.	217
Figura 93. Fuerzas y movimiento de las gotas dentro de un campo eléctrico combinado AC/DC.	219
Figura 94. Configuración estándar de un electrocoalescedor Dual Polarity.	220
Figura 95. Configuración de electrodos y generación de campos eléctricos de la tecnología Dual Polarity.	220
Figura 96. Decaimiento del voltaje como efecto del incremento de la conductividad del crudo.	225
Figura 97. Electrodo compuesto	228
Figura 98. Conducto esparcidor	240
Figura 99. Balance de energía.	241
Figura 100. Balance de masa.	243
Figura 101. Comportamiento del flujo de fluido dentro de un tubo esparcidor.	246
Figura 102. Deflector y funcionamiento.	246
Figura 103. Esquema general de la tecnología SIELECTRIC (electrocoalescedor AC de baja velocidad).	248
Figura 104. Esquema general de la tecnología SIELECTRIC (electrocoalescedor AC de baja velocidad).	249
Figura 105. Comparación de diseño del tratador Bielectric contra el tratador convencional.	252
Figura 106. Esquema de electrocoalescedor VIEC.	256
Figura 107. Configuración de hardware (LRC).	258
Figura 108. Desalador electro dinámico (EDD).	259
Figura 109. Electrocoalescedor INLINE.	262
Figura 110. Acoplamiento Electrocoalescedor Inline.	264
Figura 111. Interacción de frecuencia base F1 y frecuencia moduladora F2 para generar una onda de frecuencia dual.	269
Figura 112. Componentes de la malla, del transformador y accesorios.	278
Figura 113. Equipo Dual Frequency simplificado.	281
Figura 114. Patrón de onda senoidal del potencial eléctrico aplicado a los electrodos.	285
Figura 115. Patrón de onda cuadrada del potencial eléctrico aplicado a los electrodos.	288

Figura 116. Desalador Dual Frequency conectado con diodo en serie.	291
Figura 117. Señal de media onda positiva obtenida en el primer electrodo.	294
Figura 118. Señal de media onda negativa obtenida en el segundo electrodo.	295
Figura 119. Deshidratador Dual Frequency con diverter de entrada para optimización hidráulica.	296
Figura 120. Desalador Dual Frequency de múltiples electrodos de placa verticales paralelos.	298
Figura 121. Aplicación de electrodos compuestos a tecnología Dual Frequency.	301
Figura 122. Efecto de flujo a través de regiones de conductividad y no conductividad impuestas por pares de electrodos compuestos.	302
Figura 123. Electrocoalescedor Dual Frequency multi-etapa con tratamiento térmico y mecánico.	306
Figura 124. Láminas corrugadas para separación mecánica de emulsiones.	311
Figura 125. Coalescedor centrífugo equipado con tecnología Dual Frequency.	312
Figura 126. Tratador centrífugo equipado con tecnología Dual Frequency de doble electrodo.	314
Figura 127. Onda modulada de amplitud constante y frecuencia variable.	319
Figura 128. Onda modulada de amplitud variable con patrón escalonado.	320
Figura 129. Onda modulada de amplitud variable con patrón escalonado inverso.	320
Figura 130. Onda modulada de amplitud variable con patrón escalonado acelerado.	321
Figura 131. Onda modulada de amplitud variable con patrón exponencial equilibrado.	322
Figura 132. Onda modulada de amplitud variable con patrón exponencial de ascenso súbito y caída lenta.	323
Figura 133. Onda modulada de amplitud variable con patrón exponencial de ascenso lento y caída súbita.	323
Figura 134. Onda modulada de amplitud variable con patrón exponencial equilibrado.	324

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Normatividad ambiental para el vertimiento de aguas.	35
Tabla 2. Clasificación de crudos por gravedad API.	40
Tabla 3. Variación de la gravedad específica con la temperatura para el agua y el crudo.	99
Tabla 4. Propiedades eléctricas de diversas sustancias.	144
Tabla 5. Tipos de materiales para el recubrimiento de electrodos.	232
Tabla 6. Equipo y accesorios del sistema de suministro eléctrico.	276
Tabla 7. Descripción de componentes enumerados en Figura 102.	282
Tabla 8. Descripción de componentes enumerados en Figura 103.	286
Tabla 9. Descripción de componentes enumerados en Figura 104.	289
Tabla 10. Descripción de componentes enumerados en Figura 105.	291
Tabla 11. Descripción de componentes enumerados en Figura 106.	296
Tabla 12. Descripción de componentes enumerados en Figura 107.	299
Tabla 13. Descripción de componentes enumerados en Figura 108.	301
Tabla 14. Descripción de componentes enumerados en Figura 109.	302
Tabla 15. Descripción de componentes enumerados en Figura 110.	307
Tabla 16. Descripción de componentes enumerados en Figura 112.	313
Tabla 17. Descripción de componentes enumerados en Figura 113.	315

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Listado bibliográfico: Diseño de equipos convencionales para el tratamiento de emulsiones	346
ANEXO B. Listado bibliográfico: Electrorreología	348
ANEXO C. Investigaciones y experimentos en temática de separación eléctrica de fases para emulsiones agua en aceite	350
ANEXO D. Cuadro comparativo entre tecnologías de electrocoalescencia	351
ANEXO E. Cuadro comparativo técnico entre tecnologías para el tratamiento de crudo	352

RESUMEN

TITULO*

TECNOLOGÍA ELECTROSTÁTICA DUAL FREQUENCY PARA LA DESHIDRATACIÓN Y DESALACIÓN DE CRUDOS PESADOS

AUTORES**

SERGIO EDGARDO BARBOSA VARGAS

MARCO DE DIOS MENDOZA JASPE

PALABRAS CLAVE

Electro-coalescencia, emulsión, tratamiento, deshidratación, desalación, frecuencia dual, frecuencia múltiple, facilidades de superficie.

DESCRIPCIÓN

La electro-coalescencia es usualmente la denotación de un proceso industrial de separación aplicado en el campo de la emulsiones agua en aceite, también denominadas emulsiones directas, donde los campos eléctricos son utilizados para forzar la unión de pequeñas gotas de agua formando unas de mayor tamaño que se asentarán gravitacionalmente de forma más rápida en un tanque de separación. Los coalescedores electrostáticos tienen el potencial de ser una alternativa al tratamiento térmico, el cual involucra un alto consumo de energía, y al uso de químicos des-emulsificantes, los cuales pueden no ser tan atractivos desde el punto de vista económico y del medio ambiente.

En el desarrollo del presente estudio investigativo se realizará una descripción por fases que conllevarán a una evaluación pormenorizada y comparativa de la tecnología Dual Frequency frente a las demás alternativas tecnológicas para la deshidratación y desalación de crudos pesados, incluyendo principios técnicos de funcionamiento, mejoras y modificaciones respecto a los otros métodos de la rama de tratamiento de electrostático, lo que en últimas pretende mostrar la tecnología Dual Frequency como un potencial en crecimiento para solucionar diferentes problemas operacionales asociados a emulsiones apretadas directas, y definir una línea base para la aplicación de esta tecnología en el marco petrolero colombiano.

Adicionalmente será desarrollado un estudio cualitativo técnico-comparativo entre las diversas tecnologías de deshidratación y desalación de crudo pesado, incluyendo tanto las tecnologías de electro-coalescencia como las convencionales.

* TRABAJO DE GRADO

** FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS. ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS, DIRECTOR: INGENIERO MANUEL E. CABARCAS SIMANCAS, M.Sc.

SUMMARY

TITLE*

ELECTROSTATIC DUAL FREQUENCY TECHNOLOGY FOR DEHYDRATION AND DESALTING PROCESSES OF HEAVY CRUDE OILS

AUTHORS**

SERGIO EDGARDO BARBOSA VARGAS

MARCO DE DIOS MENDOZA JASPE

KEY WORDS

Electro coalescence, emulsion, treatment, dehydration, desalting, dual frequency, multiple frequency, surface facilities.

ABSTRACT

The electro coalescence is usually the connotation of an industrial process of separation applied in water in oil emulsions field, also denominated direct emulsions, where electric fields are used to force the merge of water droplets in larger drops that will gravitationally settle quicker in a separation vessel. The electrostatic coalescers have the potential to be an alternative to the thermal treatment, which involves high energy consumption, and to the use of des-emulsifier chemicals, which can be non-attractive from economic and environmental view.

In the develop of present research study will be held a detailed description evaluating and contrasting the Dual Frequency technology with the others alternatives for dehydration and desalting of heavy crude oils, including operational and technical principles, improvements and changes compared with other methods from the electrostatics treatment field, which at the end aims to show the Dual Frequency technology as a growth potential to sort out various operational problems associated to direct tight emulsions, and define a baseline to the application of this technology in Colombian petroleum context.

In addition, will be developed a qualitative technical comparative study between the different dehydration and desalting technologies of heavy crude oil, including both electro coalescence and conventional technologies.

* DEGREE PROJECT

**PHYSICOCHEMICAL ENGINEERING'S FACULTY.PETROLEUM ENGINEERING SCHOOL. DIRECTOR: ENGINEER MANUEL E. CABARCAS SIMANCAS, M.Sc.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento exponencial de la demanda mundial de energía en las décadas recientes ha promovido el agotamiento de las reservas de crudo convencionales a nivel mundial, por lo cual las reservas de crudo pesado se han convertido en una enorme fuente potencial y obligada de hidrocarburos. Generalmente, este tipo de crudos se encuentra asociado a problemas tales como: precipitación de orgánicos, dificultad de extracción y formación de emulsiones, entre otros.

Este último es sin duda uno de los problemas más frecuentes y de mayor importancia, puesto que genera diversos problemas operacionales como la corrosión por circulación a través de sistemas de separación gas-aceite en las plantas de tratamiento, generar puntos de alta presión en las líneas de flujo, envenenamiento de catalizadores en los procesos *aguas abajo* en las facilidades, limitantes en la comercialización y/o refinación del crudo de acuerdo a los estándares y normativas a nivel nacional.

Debido a que la formación de emulsiones durante la producción de crudo es un problema muy costoso en cuanto a su tratamiento, cuando se emplean grandes cantidades de químico poco económicos y/o cuando se tienen pérdidas de energía y elevados costos en combustible para los métodos térmicos, se han realizado avances en las técnicas de tratamiento electrostático, generando una amplia gama de equipos electro-coalescedores tales como corriente alterna (AC), corriente continua (DC), corriente combinada (AC/DC), corriente de polaridad dual y el de

Frecuencia Dual (Dual Frequency), el cual es el más avanzado actualmente y presenta mayor eficiencia en este tipo de procesos.

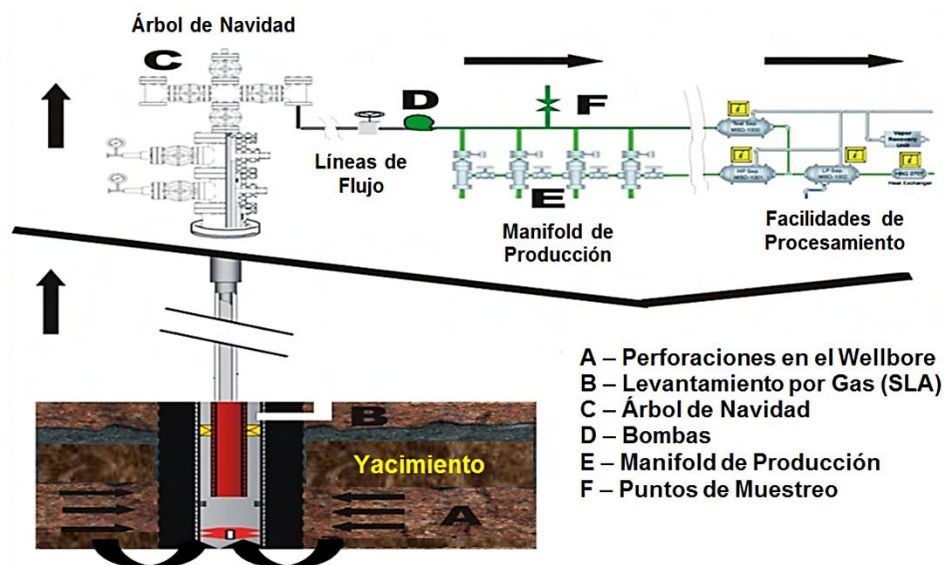
En Colombia, a pesar de que en la actualidad se estén instalando equipos de este tipo para el tratamiento de crudo pesado, no se cuenta con la suficiente información para aprovechar al máximo esta técnica. Por ende, En el desarrollo del presente proyecto se realizará una descripción por fases que conllevarán a una evaluación pormenorizada y comparativa de la tecnología Dual Frequency frente a las demás alternativas tecnológicas para la deshidratación y desalación de crudos pesados.

El presente estudio incluirá los principios técnicos de funcionamiento de esta tecnología, sus mejoras y modificaciones respecto a los otros métodos de la rama de tratamiento de crudo electrostático, sus aplicaciones y ventajas sobre los demás métodos implementados actualmente en la industria para la mitigación de del contenido de agua emulsionada y sales en el crudo, lo que en últimas pretende mostrar la tecnología Dual Frequency como un potencial en crecimiento para solucionar diferentes problemas operacionales asociados a emulsiones, y definir una línea base para la aplicación de esta tecnología en el marco petrolero colombiano.

1. EMULSIONES

El proceso de extracción de crudos pesados generalmente se encuentra asociado a producción conjunta de gran cantidad de agua proveniente de acuíferos, corrientes subterráneas y/o aquella que satura el volumen poroso de roca. El agua puede encontrarse junto al crudo en dos formas esencialmente: Una como fracción de *agua libre*, es decir, aquella que se asienta y se separa rápidamente del crudo sin necesidad de aplicar un método específico que permita la separación de las dos fases, y la otra en un estado denominado Emulsión. Es posible encontrar emulsiones en el yacimiento mismo, a lo largo de la línea de producción, en las facilidades de superficie, a través de los oleoductos y en los tanques u otros sistemas de almacenamiento del crudo (Ver Figura 1).

Figura 1. Fuentes de agitación durante la producción de crudo.



Fuente: OPAWALE, Adekunle.¹ Modificado.

1.1 FLUIDOS Y SÓLIDOS ASOCIADOS A LA EXTRACCIÓN DE CRUDO

Junto con el agua producida, ya sea como agua libre o como emulsión, en la obtención de petróleo también se generan ciertos sub-productos los cuales son indeseados, puesto que son los causantes de diversos problemas como lo son daños en equipos, en pozo y en yacimiento, además de que afectan económicamente el proyecto, en el sentido de que disminuyen la productividad del pozo. Los sub-productos resultantes (incluyendo el agua) se pueden dividir en dos grupos que son: *fluidos provenientes del yacimiento*, comprendiendo el agua de formación, petróleo y gas, y *finos* que han migrado desde el mismo, donde se encuentran la arena, asfáltenos, resinas y parafinas, entre otros.

1.1.1 Agua de formación. El agua es una sustancia que está conformada por 2 átomos de hidrogeno y un átomo de oxigeno (H₂O), que debido a su naturaleza siempre se encontrara con partículas disueltas en ella. Para el caso de la industria petrolera el agua está asociada con el crudo existente en los yacimientos (*agua connata*) y sale a la superficie como un subproducto de la extracción de hidrocarburos, lo que comúnmente se conoce como *agua de formación o agua asociada*.

Este fluido contiene componentes iónicos, los cuales incluyen cationes tales como sodio [Na⁺], manganeso [Mn²⁺], magnesio [Mg²⁺], calcio [Ca²⁺], potasio [K⁺], estroncio [Sr²⁺], bario [Ba²⁺] y hierro [Fe²⁺ y Fe³⁺]; aniones tales como cloruro [Cl⁻], sulfato [SO₄²⁺], bicarbonato [HCO³⁻], carbonato [CO³⁻], hidróxido [OH⁻], borato [BO₃⁻³], bromuro [Br⁻] y fosfato [PO₄⁻³]; y ácidos débiles no volátiles.

¹ OPAWALE, Adenkule. Oilfield emulsion control: a major issue during heavy crude oil production. Universidad Africana de Ciencia y Tecnología. Artículo SPE. Abuja (Nigeria), 2009.

El agua también puede contener gases disueltos, tales como dióxido de carbono CO_2 y ácido sulfhídrico H_2S , nitrógeno, ácidos orgánicos, bacterias sulfato-reductoras, sólidos disueltos y suspendidos, y trazas de compuestos hidrocarburos². A continuación se hará un análisis de cómo afectan los componentes disueltos las propiedades físicas del agua ya que estos son los causantes de corrosión, taponamiento en tubería, daño a la formación, entre otros.

Los científicos utilizaron un método gráfico denominado “Diagrama de Stiff” para comparar las composiciones de las diversas fuentes de agua. Cada gráfica muestra las concentraciones relativas de aniones y cationes correspondientes a una muestra de agua en particular, en escala de miliequivalentes por litro [meq]³. La construcción de la gráfica consiste en: ubicar un eje vertical en el centro, el cual representa el cero y es intersecado por varios ejes horizontales (normalmente cuatro) que permiten graficar la magnitud del contenido de los iones más comunes. A la izquierda se ubican los cationes (regularmente $[\text{Na}^+]$, $[\text{Mg}^{2+}]$, $[\text{Ca}^{2+}]$ y $[\text{Fe}]$) y a la derecha los aniones ($[\text{Cl}^-]$, $[\text{SO}_4^{2-}]$, $[\text{HCO}_3^-]$ y $[\text{CO}_3^{2-}]$). Cada uno de estos ejes horizontales pueden tener su propia escala (habitualmente, los ejes superiores tienen escalas más grandes debido a que son iones más comunes).

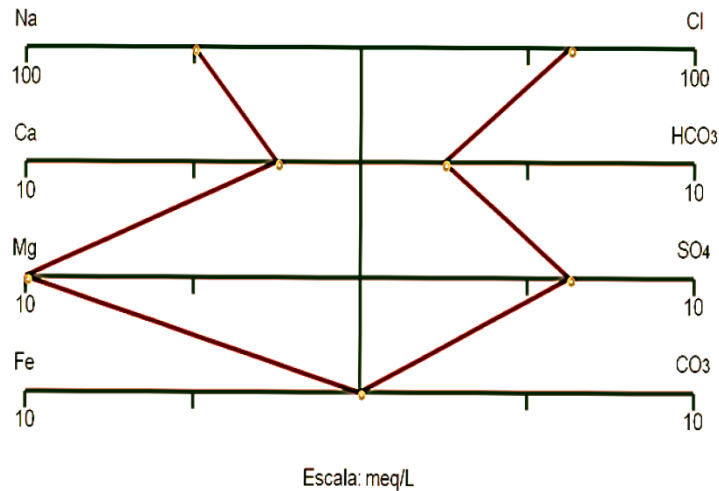
Posteriormente, se ubica un punto en cada uno de estos ejes horizontales representando la magnitud del contenido del ion en el agua. Al final, estos puntos

² ABDON, Medhat; CARNEGIE, Andrew; MATHEWS, S. George; MCCARTHY, Kevin. Valor del agua de formación Artículo Vol. 23, No 1. *Oilfield Review*.

³ Un equivalente se define como la cantidad de un material que reaccionará con una molécula de OH^- o de H^+ . Un miliequivalente es un equivalente/1000.

se unen con una línea continua quedando así construido el diagrama de Stiff⁴ (Ver Figura 2).

Figura 2. Diagrama de Stiff del agua de mar.



Fuente: McCAIN, William D.⁵ Modificado.

La densidad del agua es otra propiedad de gran importancia, y es afectada por la cantidad de minerales presentes en ella. Esta variación se puede apreciar comparando la densidad del *agua potable* 62.4lb/ft³ con la del *agua marina* 64.3 lb/ft³ y/o con el *agua de formación*⁶ que presenta valores mayores a 65lb/ft³.

Cuando se realizan los registros eléctricos al pozo uno de los factores a tener en cuenta es ubicar el agua del yacimiento. Es aquí donde se aprovecha una de las cualidades del agua ionizada y es la facilidad de conducir la corriente eléctrica,

⁴MONTES PÁEZ, Erick Giovany. Tecnologías de tratamiento de emulsiones en campos petroleros. Escuela de Petróleos, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2010.

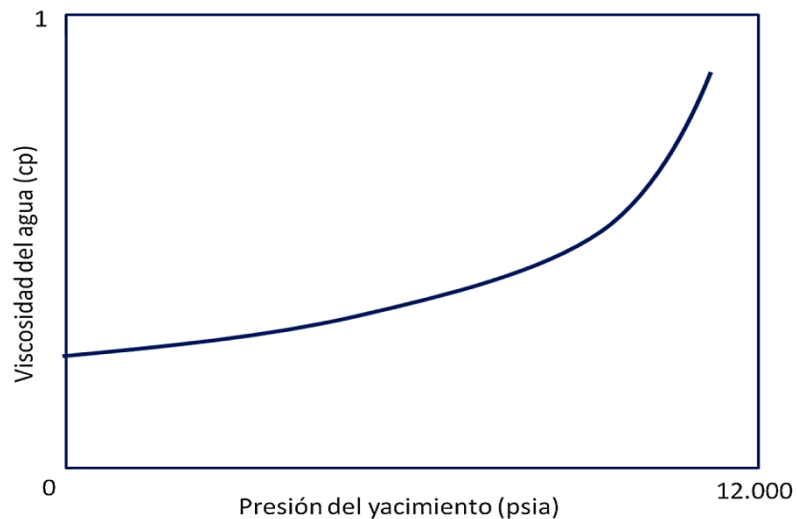
⁵ McCAIN, William D. The properties of petroleum fluids. Segunda Edición. Pennwell Publishing Company. Tulsa (Oklahoma), 1990.

⁶ El agua potable contiene minerales 0.01 ppm, mientras que el agua marina contiene alrededor de 35.000 ppm y el agua de formación llega a alcanzar valores 300.000 ppm de sólidos disueltos.

mientras que el agua pura como tal es muy resistiva o poco conductiva al paso de la corriente eléctrica.

También se debe tener en cuenta la viscosidad del agua. La viscosidad es entendida como la resistencia que tiene un fluido a su propio movimiento, debido a las fuerzas de atracción que existen entre las moléculas que la constituyen. Esta propiedad se representa con la letra griega (μ) y medida en poise y centipoise, y se ve afectada fundamentalmente por la presión (Ver Figura 3), el contenido iónico y la temperatura (Ver Figura 4).

Figura 3. Relación entre la viscosidad y la presión.



Fuente: McCAIN, William D.⁷ Modificado.

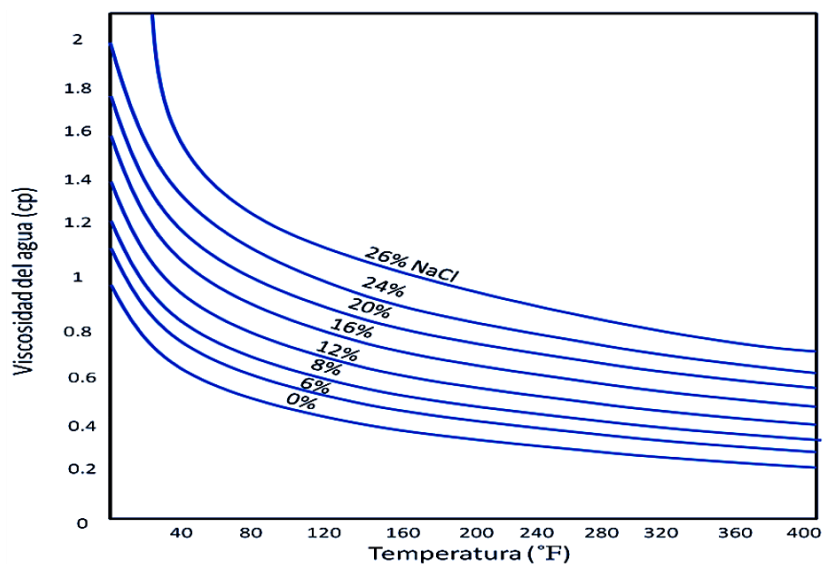
Como se observa en la Figura 3, la relación entre la viscosidad y la presión es directa. Esto ocurre simplemente por el hecho de que el agua al ser sometida a un

⁷ McCAIN, William D. The properties of petroleum fluids. Segunda Edición. Pennwell Publishing Company. Tulsa (Oklahoma), 1990.

aumento de presión implica una mayor fricción entre sus moléculas, generando restricción al flujo, conllevando a una mayor viscosidad.

Lo mismo ocurre con el contenido de sólidos que se encuentran disueltos en el agua, estos influyen en la polarización de las moléculas generando dificultad de movimiento del líquido.

Figura 4. Variación de la viscosidad con la temperatura y el contenido de sólidos.



Fuente: McCAIN, William D.⁸ Modificado.

Con la temperatura ocurre todo lo contrario, es decir, la viscosidad es inversamente proporcional a la temperatura, teniendo que a una mayor cantidad de energía entregada al fluido en forma de calor menor será su viscosidad. Esto se puede observar claramente en la figura 4, en la cual no solo se relaciona su viscosidad con la temperatura, sino también con su contenido iónico.

⁸ McCAIN, William D. The properties of petroleum fluids. Segunda Edición. Pennwell Publishing Company. Tulsa (Oklahoma), 1990.

El agua que se produce durante la operación de extracción de crudo generalmente tiene tres destinos:

- ✓ Es usada para procesos de recobro mejorado del petróleo.
- ✓ Es tratada y seguidamente se reinyecta y almacena devuelta al yacimiento.
- ✓ Se vierte en las fuentes hídricas posterior a un tratamiento.

Los requerimientos para el vertimiento del agua de producción en Colombia se encuentran establecidos en el decreto 1594 de 1984 (Uso del agua y sus residuos) tal cual como se encuentran plasmados en la Tabla 1. El incumplimiento de este puede generar desde altas sanciones económicas hasta el cierre del campo de producción.

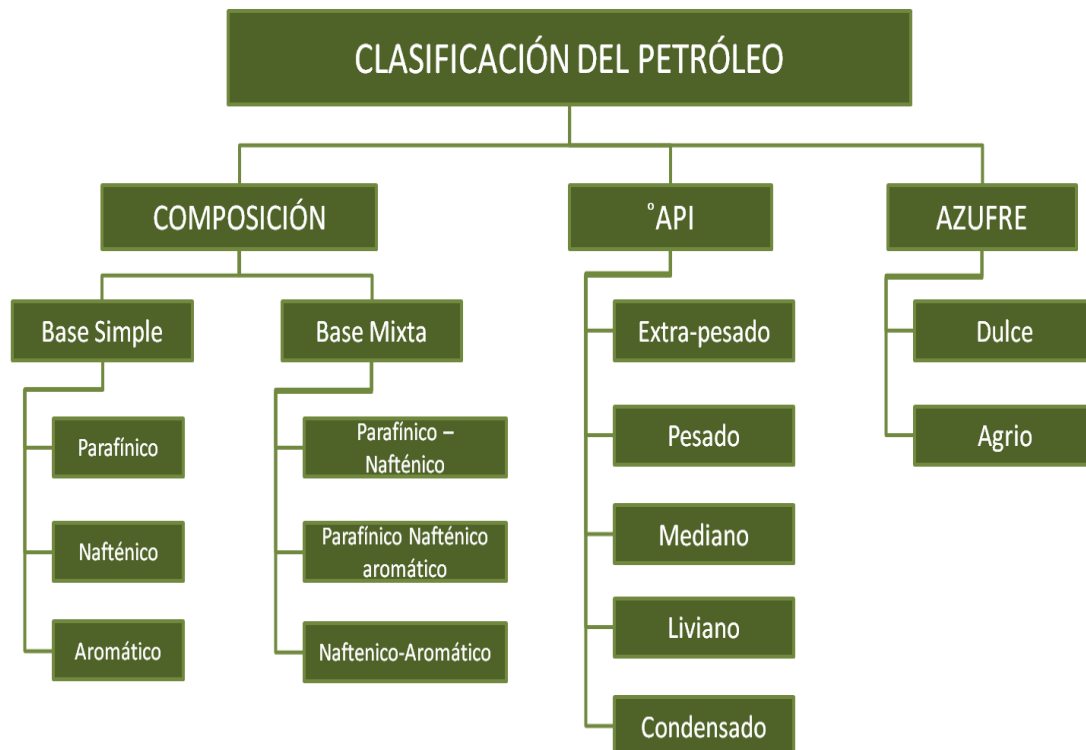
Tabla 1. Normatividad ambiental para el vertimiento de aguas.

PROPIEDAD	NIVEL DE APROBACIÓN
pH	Entre 5 y 9
Temperatura	< 40°C
Material Flotante	Ausente
Sólidos suspendidos	Remoción >80% en carga
Grasas y aceites	Remoción >80% en carga
Demanda bioquímica de oxígeno	Remoción >80% en carga
Fuente: Artículo 72, decreto 1594 de 1984.	

1.1.2 Petr6leo. Son compuestos extraídos directamente de formaciones geol6gicas en estado l6quido. Debido a que, como se mencion6 antes, el petr6leo producido se encuentra asociado a agua, sedimentos, 6cidos, sales, entre otros, se genera la necesidad de establecer unos est6ndares y/o condiciones acordadas por los interesados para su transporte, almacenamiento y/o comercializaci6n, ya que estos causan en algunos casos problemas de corrosi6n, daño en las bombas, problemas en el procesamiento de crudo, taponamiento y dem6s.


El petr6leo se puede clasificar con respecto a su composici6n qu6mica, gravedad API y por su contenido de azufre, tal y como se muestra en la Figura 5.

Figura 5. Clasificaci6n del petr6leo.



Fuente: Autor.

1.1.2.1 Clasificación por composición química. Este tipo de clasificación depende estrictamente de la presencia de ciertos componentes químicos en el petróleo, así como de la unión de éstos en elementos más complejos. Su importancia radica en las características particulares que cada uno de estos elementos le añade al petróleo.

 **Bases Simples.** La base está ligada al punto de ebullición de algunas fracciones y a otras por propiedades físicas que influyen en el rendimiento de la gasolina o de fracciones de bajo punto de ebullición (250-275 °C a presión atmosférica) –parafínicas- o las de alta ebullición –lubricantes- (390-415 °C a presión atmosférica) que se catalogan como nafténicas.

💧 **Crudo Parafínico.** Los crudos Parafínicos se componen principalmente de alcanos, también llamados parafinas; más del 75% de la composición de estos crudos corresponde a este tipo de compuestos. Se caracterizan por ser muy fluidos, inodoros, de baja densidad (85 g/ml) y de colores claros (verdes, anaranjados, rojizos, etc.). Generalmente están libres de contaminantes orgánicos e inorgánicos. Dan un alto rendimiento de productos livianos (gasolinas, disolventes y querosenes) y aceites lubricantes de buena calidad, proporcionan una mayor cantidad de nafta, kerosene y aceites lubricantes que los otros tipos de petróleo en el proceso de refinación.

💧 **Crudos Nafténico.** Los crudos Nafténicos se componen principalmente de ciclo-alcanos; más del 75% de la composición de estos crudos

corresponde a este tipo de compuestos. Se caracterizan por ser pesados, altamente viscosos, con olor desagradable y de color negro.

💧 **Crudo Aromático.** Los crudos aromáticos se componen principalmente de benceno y otros compuestos aromáticos; más del 50% de la composición de estos crudos corresponde a este tipo de compuestos. Se caracterizan por ser altamente viscosos, pesados, de color oscuro y olor un poco alquitranado; presentan fluorescencia muy marcada cuando se exponen a la luz ultravioleta. Por lo general están contaminados en cantidades apreciables por compuestos orgánicos e inorgánicos.

🚦 **Bases Mixtas.** Los crudos de base mixta tienen características y rendimientos comprendidos entre las otras variedades principales. Después de destilar sus porciones más volátiles generan residuos de nafta y asfalto.

💧 **Crudo Parafínico-Nafténico.** El contenido de alcanos y ciclo alcanos está en la proporción de 60% y 30% respectivamente.

💧 **Crudo Nafténico-Aromático.** El contenido de las dos series es aproximadamente de 45% de cada una.

💧 **Crudo Parafínico-Nafténico-Aromático.** El contenido de las tres series es de 33% de cada una de ellas aproximadamente.

1.1.2.1 Clasificación según la densidad. La referencia que sustenta esta clasificación es la gravedad API (del Instituto de Petróleo Americano), que es una “medida de densidad”, y por ende relacionada con la gravedad específica del crudo γ_o (Ver Ecuación 1).

$$^{\circ}API = \frac{141,5}{\gamma_o} - 131, \quad (1)$$

A su vez, la gravedad específica del crudo puede ser determinada a partir de la densidad del mismo (ρ_o) y la densidad del fluido referente, es decir, del agua (ρ_w), ambas medidas a condiciones estándar, tal cual como se muestra en la Ecuación 2.

$$\gamma_o = \frac{\rho_{oSC}}{\rho_{wSC}} \quad (2)$$

La Gravedad API se basa en la comparación de la densidad del petróleo con la densidad del agua, es decir, se busca determinar si el petróleo es más liviano o pesado que esta última. La clasificación propuesta por el Instituto de Petróleo americano indica que a una mayor gravedad API el petróleo será más liviano, como se puede ver en la Tabla 2.

Tabla 2. Clasificación de crudos por gravedad API.

Aceite crudo	Densidad (g/cm ³)	Gravedad API
Extra pesado	>1.0	10
Pesado	1.0-0.92	10.0-22.3
Mediano	0.92-0.87	22.3-31.1
Liviano	0.87-0.83	31.1-39.0
Condensado	<0.83	>39.0

Fuente: PRIMO Y, Eduardo⁹. Modificado.

Los líquidos son incomprensibles, es decir, su volumen no cambia con respecto a variaciones de presión, por lo tanto implica que su densidad permanece igual. Mientras que con la temperatura su volumen si cambia, un aumento de temperatura repercutirá en una expansión de volumen del líquido, consecuentemente disminuye su densidad. Por esta razón, cuando se determina la gravedad API del crudo se debe reportar la temperatura. En el procedimiento de transferencia de custodia se debe estandarizar¹⁰ la gravedad API hallada a través de unas tablas prediseñadas que están en función de la temperatura.

1.1.2.2 Clasificación según la presencia de azufre. Como se mencionó en un inicio, el azufre es uno de los componentes que están presentes en los hidrocarburos. Pero su presencia implica la necesidad de mayores procesos de refinamiento, y por ende un mayor costo final, razón por la cual la existencia de

⁹ PRIMO Y, Eduardo. Química orgánica básica y aplicada de la molécula a la industria. Universidad Pontificia de Valencia, Editorial Reverté. Barcelona (España), 2007.

¹⁰ En la industria petrolera una condición estándar es una temperatura 60°F y una presión 14.7 psig

azufre es también un determinante del valor comercial del petróleo. Así, se tiene que el petróleo puede clasificarse en dos categorías:

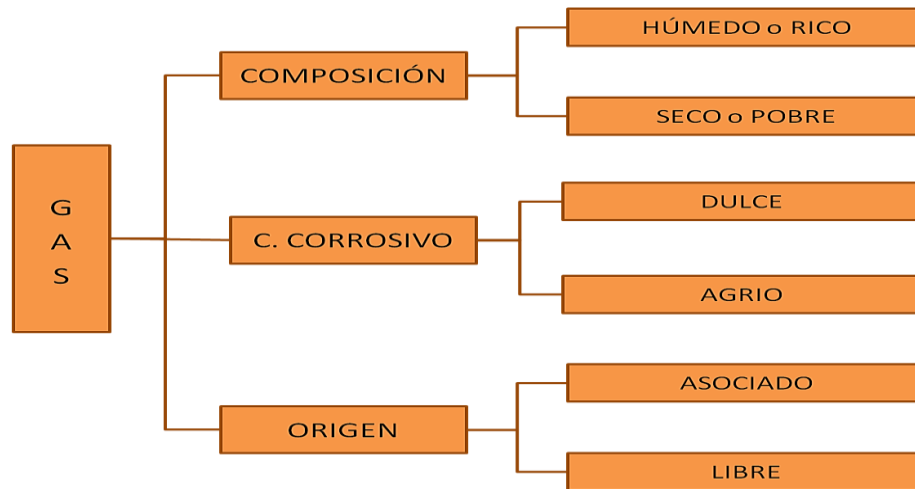
- ✚ **Petróleo Dulce.** Es aquel que en su composición la fracción de contenido sulfuroso es menor o igual al 0.5%. Es un petróleo de alta calidad y es ampliamente usado para ser procesado como gasolina.

- ✚ **Petróleo Agrio.** Es aquel que contiene al menos 1% de contenido sulfuroso en su composición. Debido a la mayor presencia de azufre su costo de refinamiento es mayor, razón por la cual es usado mayormente en productos destilados como el diesel, dado su menor costo de tratamiento.

1.1.3 Gas. El gas se encuentra frecuentemente asociado al petróleo y se cree que ambos combustibles tiene un origen común. Éste es una mezcla de hidrocarburos livianos miembros de la serie parafínica en estado gaseoso, que en su mayor parte está compuesta por metano y etano, y en menor proporción por propano, butanos, pentanos e hidrocarburos más pesados; también, puede hacer parte de la composición gases como dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, nitrógeno, helio, mercurio y vapor de agua.

Al igual que el petróleo, este también se puede clasificar y se hace teniendo en cuenta diferentes parámetros que determinan características especiales y condiciones diferentes en los distintos tipos de gases. A continuación se concretiza dicha clasificación y se comparte en la Figura 6. Posiblemente lo relevante de los gases es la facilidad de como se separan de una emulsión, causando un aumento en la viscosidad del crudo, esto ocurre en condiciones de superficie ya sea en el separador y/o en el tanque de almacenamiento.

Figura 6. Clasificación del gas.



Fuente: Autor.

1.1.4 Arena. La producción de arenas generalmente ocurre en yacimientos de formaciones someras de la era terciaria, donde son más frecuentes los yacimientos de arenas no consolidadas.

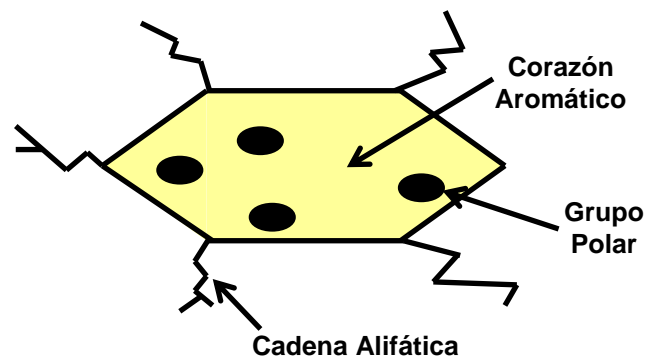
Dentro de la clasificación granulométrica¹¹ el tamaño de grano de la arena está en el orden de los 0.0625 a 2 milímetros. Las partículas de “gran tamaño” (mayores a 0.0625 milímetros) no afectarán la emulsión debido a que estas se precipitan, mientras que las de un tamaño minúsculo que son los limos o arcillas (menores a 0.0625) van a estar relacionadas directamente con las emulsiones, pues actúan como un tenso activo.

¹¹ Se denomina clasificación granulométrica o granulometría, a la medición y gradación que se lleva a cabo de los granos de una formación sedimentaria.

1.1.5 Asfáltenos. Son agregados de anillos aromáticos condensados que contienen cantidades significativas de nitrógeno, oxígeno, azufre y metales como níquel, vanadio, etcétera, que se encuentran asociados con el nitrógeno en arreglos irregulares.

La estructura de las moléculas de asfáltenos muestra que son hidrocarburos con partes relativamente apolares dadas por los anillos aromáticos y partes polares constituidas por los grupos funcionales, lo cual permite presentar una dualidad polar, dándole características de agente emulsificante (Ver Figura 7).

Figura 7. Representación esquemática de una molécula de asfálteno.



Fuente: ALAYON, Mario¹². Modificado.

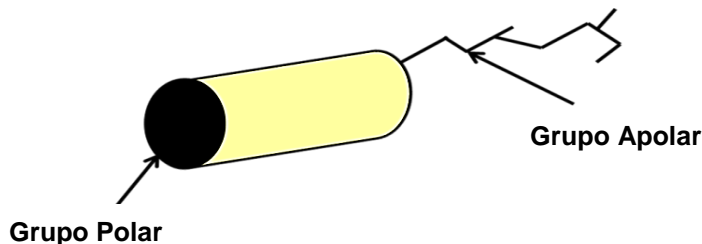
Los asfáltenos son considerados como la fracción pesada del crudo y se encuentran en suspensión coloidal del petróleo debido a que la superficie de las partículas asfálticas están dispersas en una fase continua como es el aceite, encontrándose totalmente rodeada de resinas en forma micelar.

¹² ALAYON, Mario. Asfáltenos: Ocurrencia y floculación. Escuela de Ingeniería Química, Universidad de los Andes. Mérida (Venezuela), 2004.

Esta fase puede cambiar debido a una variación de la temperatura, manifestándose en la precipitación de éstos. En la mayoría de los casos, la precipitación de los asfáltenos ocurre al generarse una caída de presión desde la corriente que fluye desde el yacimiento, generando acumulaciones de estos sólidos en las líneas de flujo, separadores, tanques, etcétera, lo cual se constituye en un gran problema para la operación, pues reduce la capacidad de flujo del sistema. Los cambios bruscos de temperatura, inyección de gases ricos, dilución con solventes presencia de ácidos, mezclas de diferentes tipos de crudo y la presencia de otros sólidos también van a favorecer la precipitación de éstos.

1.1.6 Resinas. Cuando se trata el tema de los asfáltenos se hace necesario referenciar a las resinas, ya que el comportamiento de los asfáltenos depende mucho de la presencia de éstas. Las resinas comprenden aquella fracción que se solubiliza cuando el petróleo o bitumen se disuelve en un compuesto n-alcano, pero se adsorbe en un material activo superficialmente. Las resinas son oscuras, semisólidas, muy adhesivas, de peso molecular alto, y su composición depende del precipitante empleado. En la Figura 8 se puede observar una representación de una molécula de resina.

Figura 8. Representación esquemática de una molécula de resina.



Fuente: ALAYON, Mario¹³. Modificado.

¹³ ALAYON, Mario. Asfáltenos: Ocurrencia y floculación. Escuela de Ingeniería Química, Universidad de los Andes. Mérida (Venezuela), 2004.

1.1.7 Parafinas. Las parafinas son cadenas alifáticas lineales o ramificadas formada por carbonos saturados con fórmula C_nH_{2n+2} . Estas sustancias son no polares y se cristalizan bajo ciertas condiciones termodinámicas; esto puede ocurrir en el yacimiento, en el subsuelo o en superficie, conllevando a problemas de daño en el sistema de levantamiento artificial, taponamiento en tubería, entrapamiento en las perforaciones, daño en equipos, entre otros.

La precipitación y solubilidad de estas se ve afectada por tres parámetros:

- ✓ Temperatura: Es el factor de mayor influencia en la precipitación.
- ✓ Presión: Los cambios de presión tienen poca influencia en la precipitación.
- ✓ Composición: La volatilización de los componentes livianos disminuyen la solubilidad de la parafina en el petróleo.

Para realizar un posible tratamiento con el fin de evitar o remediar la precipitación de las parafinas, primero se debe tener en cuenta las propiedades que involucran la deposición de éstas, las cuales son; punto de nube¹⁴, punto de fluidez¹⁵ y comportamiento reológico¹⁶.

¹⁴ Punto de nube es la primera temperatura registrada a la cual se forman los primeros cristales sólidos de parafina en un proceso de enfriamiento progresivo.

¹⁵ Punto de fluidez es la temperatura más baja (en °C o °F) en la que un fluido sigue siendo un líquido vertible, es decir, todavía se sigue comportando como un fluido y tiene movimiento.

¹⁶ Comportamiento reológico es la parte de la física que estudia la relación entre el esfuerzo y la deformación en los materiales que son capaces de fluir.

1.1.8 Otros sólidos. En la vida productiva del pozo se puede presentar en superficie diferentes sólidos que se encuentran dispersos debido a los trabajos realizados, como lo son; perforación, cementación, completamiento y estimulación. También la corrosión y la erosión de los componentes metálicos del sistema generan óxidos y fragmentos, siendo este otro aporte de sólidos que se pueden encontrar en superficie.

Estos eventos ocurren con una menor frecuencia que la precipitación de sólidos suspendidos o el arenamiento. Sin embargo, esto no significa que no sean relevantes, ya que estos son los causantes de diversos problemas, dentro de los que se destacan la generación de incrustaciones y la contaminación del agua de vertimiento o reinyección.

1.2 GENERALIDADES DE LAS EMULSIONES

Una emulsión es una mezcla termodinámicamente estable entre dos o más fases líquidas inicialmente inmiscibles, en la cual uno de los líquidos logra una dispersión coloidal en el otro gracias a la acción de un agente emulsificante y de un proceso de agitación que entregue la energía suficiente para que se genere la mezcla. Toda emulsión satisface los siguientes criterios:

- ✓ Las emulsiones muestran todas las propiedades características de una solución coloidal tales como el movimiento tipo Browniano, el efecto Tyndall, la electroforesis, etcétera.
- ✓ Se coagulan mediante la adición de electrolitos que contengan iones metálicos polivalentes, presentándose la carga negativa en los glóbulos.

- ✓ El tamaño de las partículas dispersas en la emulsión es mayor que aquellas presentes en las soluciones. Su rango varía de 1000 a 10000 Å. Sin embargo, su tamaño sigue siendo menor que el de las partículas en suspensión.
- ✓ Las emulsiones pueden ser transformadas en dos líquidos separados aplicando calor, centrifugado, congelamiento, etcétera. Este proceso también es conocido como desemulsificación.

No es suficiente solo el conocimiento de la tensión superficial para entender las propiedades de la emulsión, puesto que la reología juega un papel muy importante en la variedad de procesos dinámicos. Cuando una sustancia de superficie activa se adiciona al agua o al aceite, espontáneamente es absorbida en la superficie, y con ello se reduce la tensión superficial (γ).

$$\Delta G = \gamma \Delta A - T \Delta S \quad (3)$$

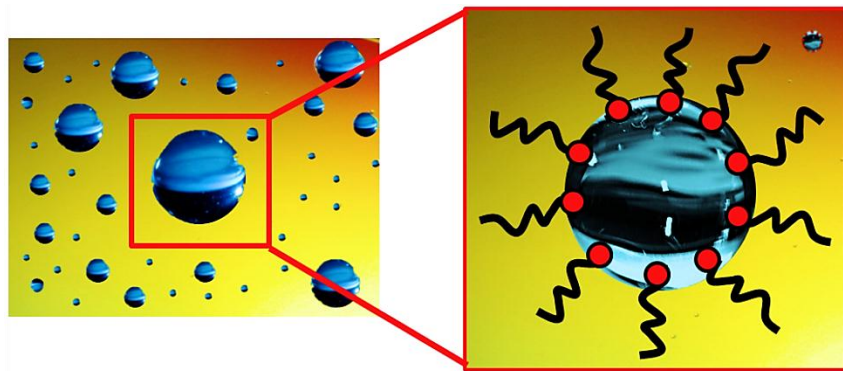
En la Ecuación 3 se describe la energía libre de formación de las gotas a partir del líquido, conocida como energía libre de Gibbs (ΔG), donde ΔA representa el aumento del área interfacial, γ la tensión interfacial entre los dos líquidos y $T \Delta S$ la contribución a la entropía del sistema, resultante del aumento del número de gotas. En general $\gamma \Delta A \gg T \Delta S$, por lo que consecuentemente la emulsificación es un proceso no-espontáneo¹⁷.

¹⁷ SANTO, A.; FORTUNY, M; MELO, R. Relatório bibliográfico estabilidade de emulsões. Instituto de Tecnologia de Pesquisa, Universidad de Tiradentes. Brasil, 2006.

1.2.1 Componentes de una emulsión. Debido a que las fases inmiscibles no se encuentran necesariamente en una proporción 1:1, en una emulsión se identifican básicamente tres componentes:

- ✚ **Fase Continua.** Hace referencia al fluido que se encuentra en mayor proporción dentro de la mezcla y que alberga las gotas del fluido disperso.
- ✚ **Fase Dispersa.** Se refiere al fluido que se encuentra en menor proporción y distribuido en forma de gotas disipadas en la fase continua.
- ✚ **Agente Emulsificante.** Es aquella sustancia tenso-activa que gracias a sus propiedades químicas posee una cabeza hidrofílica y una cola hidrofóbica que le permite ser parcialmente soluble a ambas fases, formando una película interfacial rígida alrededor de las gotas de la fase dispersa que sirve de puente de enlace entre las dos fases y estabiliza la mezcla (Ver Figura 9). Este agente a su vez evita que se junten las gotas y se genere un proceso de coalescencia.

Figura 9. Ubicación del agente emulsificante en la interfase.



Fuente: Autores.

Son muchas las sustancias que pueden actuar como agentes emulsificantes en la mezcla, y se pueden agrupar en tres clases:

- ✚ **Compuestos Naturales.** Dentro de este grupo se encuentran las sustancias pesadas del crudo con altos puntos de ebullición, como los asfáltenos, resinas y las parafinas, presentes desde el yacimiento y que fluyen a la superficie estabilizando las emulsiones a lo largo de la línea de producción.

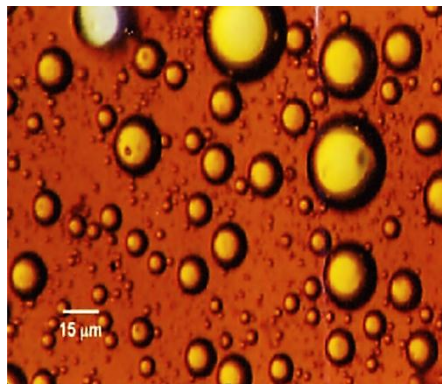
- ✚ **Sólidos Finos.** En este grupo se encuentran la arena, arcilla, finos de formación, minerales propios del yacimiento y productos de la corrosión del sistema de producción, los cuales actúan como estabilizadores mecánicos.

- ✚ **Químicos Añadidos.** Aquí se tienen aquellas sustancias que por incompatibilidad con los fluidos de formación ayudan al proceso de emulsión como algunos inhibidores de corrosión, inhibidores de incrustación, limpiadores, laminadores de flujo, agentes biocidas, entre otros.

1.2.2 Clasificación. Para las emulsiones que ocurren entre el agua y el aceite, se tiene la siguiente clasificación en tres grandes grupos de acuerdo con que fluido se encuentra disperso en el otro:

- ✚ **Emulsiones Agua en Aceite o Emulsión Directa (W/O).** Hace referencia a las emulsiones en las cuales la fase continua es el crudo y el agua se encuentra en forma de gotas dispersas. Es la más común en el proceso de producción desde el yacimiento hasta los sistemas de deshidratación del crudo (Ver Figura 10).

Figura 10. Emulsión directa (W/O).

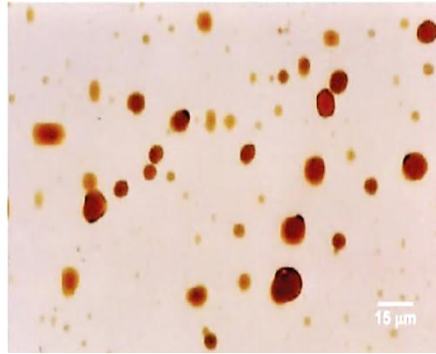


Fuente: KOKAL, Sunil¹⁸. Modificada.

- ✚ **Emulsiones Aceite en Agua o Emulsión Inversa (O/W).** Hace referencia a las emulsiones en las cuales la fase continua es el agua y el aceite se encuentra en forma de pequeñas gotas dispersas. Este tipo de emulsiones puede ser encontrado en el sistema de tratamiento del agua de producción (Ver Figura 11).

¹⁸ KOKAL, Sunil. AL-JURAIID, Jamal. Quantification of various factors affecting emulsion stability: watercut, temperatura, shear, asphaltene content, demulsifier dosage and mixing crudes. Saudi Aramco – Society of Petroleum Engineers. Houston (Texas), 1999.

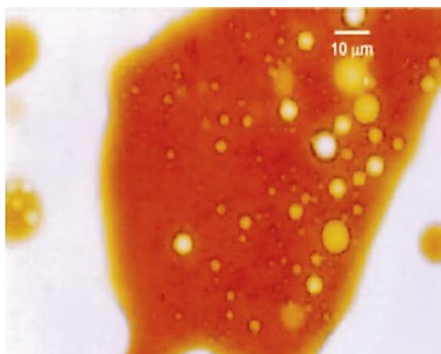
Figura 11. Emulsión inversa (O/W).



Fuente: KOKAL, Sunil¹⁸. Modificada.

- ✚ **Emulsiones Múltiple o Compleja (W/O/W).** Estas emulsiones son poco comunes y se caracterizan por presentar pequeñas gotas de agua dispersas en grandes gotas de crudo, las cuales a su vez se encuentran dispersas en una fase continua acuosa (Ver Figura 12).

Figura 12. Emulsión múltiple (W/O/W).



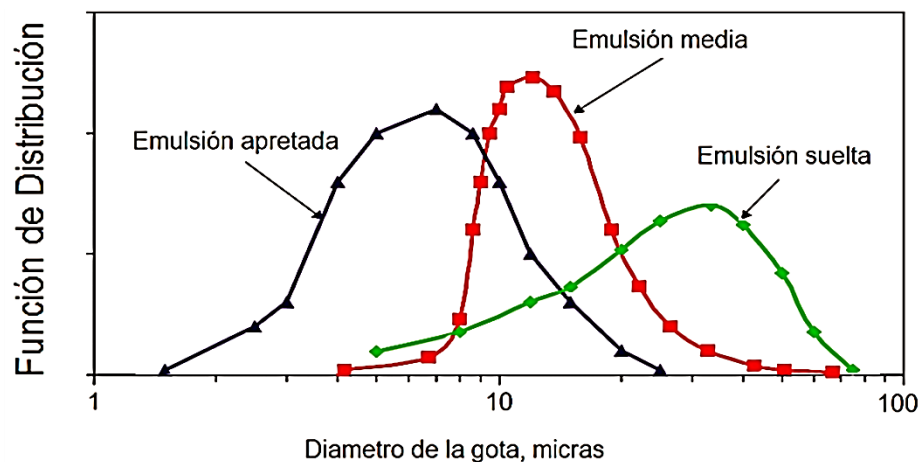
Fuente: KOKAL, Sunil¹⁹. Modificada.

¹⁹ KOKAL, Sunil. AL-JURAIID, Jamal. Quantification of various factors affecting emulsion stability: watercut, temperatura, shear, asphaltene content, demulsifier dosage and mixing crudes. Saudi Aramco, Society of Petroleum Engineer. Houston (Texas), 1999.

También se pueden clasificar las emulsiones de acuerdo con el grado de estabilidad cinética como se muestra a continuación:

- ✚ **Emulsión Suelta.** Es aquella que se puede separar mediante métodos sencillos en pocos minutos debido a que la mezcla no es muy estable. Algunas veces se asocia con el agua libre.
- ✚ **Emulsión Media.** Es aquella que requiere un poco más de tiempo para su separación, de alrededor de 10 minutos, pero los métodos empleados siguen siendo sencillos.
- ✚ **Emulsión Apretada.** Hace referencia a emulsiones que requieren de procesos más complejos y un mayor tiempo para su separación, que puede ir desde horas hasta días.

Figura 13. Relación entre tipos de emulsiones según cinética y la distribución del tamaño de gota.



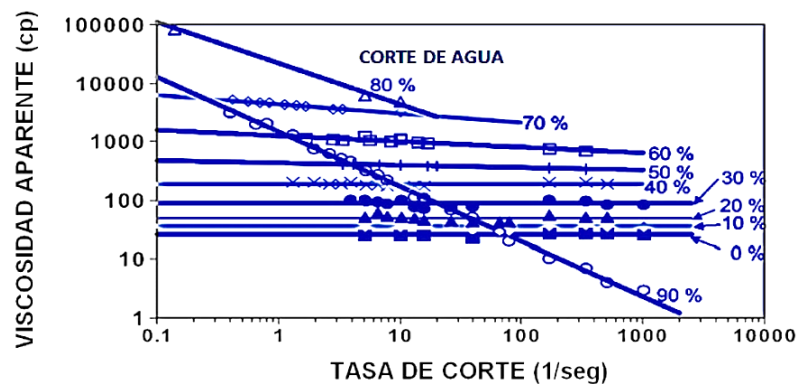
Fuente: KOKAL, Sunil²⁰. Modificada.

²⁰ KOKAL, Sunil. Crude oil emulsion: A state-of-the-art review. Saudi Aramco, Society of Petroleum Engineers. Houston (Texas), 2005.

En la Figura 13 se relacionan los tipos de emulsiones encontradas según su estabilidad con la distribución y el tamaño de las gotas, lo cual depende de varios factores como tensión interfacial, tasa de corte²¹ (aspecto reológico), naturaleza del agente emulsificante, presencia de sólidos y propiedades en general del agua y el aceite. Por regla del dedo gordo se tiene que a menores tamaños de gotas dispersas en promedio, mayor será el tiempo de requerido para separar la emulsión, lo que implica una mayor estabilidad de la emulsión.

La viscosidad de las emulsiones puede ser sustancialmente más alta que las viscosidades tanto del agua como del aceite, y depende de varios factores como viscosidades del agua y el aceite, corte de agua, distribución del tamaño de gota dispersa, temperatura, tasa de corte, cantidad de sólidos presentes, entre otros. Su elevado valor se debe a que las emulsiones tienen un comportamiento no-newtoniano.

Figura 14. Viscosidades de emulsiones muy apretadas a 125° F.



Fuente: KOKAL, Sunil²². Modificada.

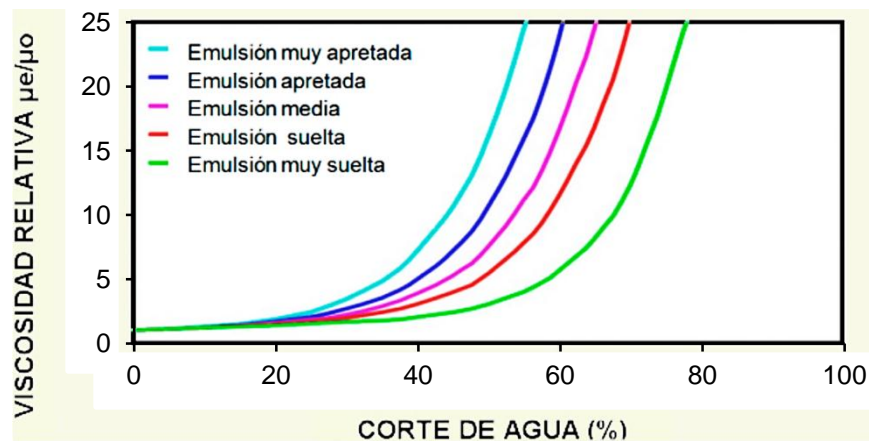
²¹ La tasa de corte o "shear rate" es una propiedad reológica de los fluidos que indica la tasa a la que las capas adyacentes del fluido se mueven unas con respecto a las otras, expresado en segundos recíprocos.

²² KOKAL, Sunil. Crude oil emulsion: A state-of-the-art review. Saudi Aramco, Society of Petroleum Engineers. Houston (Texas), 2005.

La Figura 14 muestra las viscosidades de una emulsión muy apretada a diferentes cortes de agua, con respecto a su tasa de corte. En ella se puede observar que las emulsiones exhiben un comportamiento Newtoniano para cortes de agua menores al 30%, ya que se tienen valores constantes de viscosidad para todas las tasas de corte, o visto de otra manera, están representadas por una línea con pendiente cero.

Para cortes de agua mayores al 30%, las pendientes de las curvas se desvían de cero aumentando a medida que incrementa el corte de agua, indicando que la emulsión tiene un comportamiento no-newtoniano. A aproximadamente un corte de agua del 80% ocurre un fenómeno interesante, ya que la emulsión que inicialmente era directa (agua-aceite) se invierte y queda del tipo aceite-agua, transformando la fase dispersa en la fase continua.

Figura 15. Relación entre tipos de emulsiones según estabilidad cinética y su viscosidad relativa.



Fuente: KOKAL, Sunil²³. Modificada.

²³ KOKAL, Sunil. Crude oil emulsions: Everything you wanted to know but were afraid to ask. Presentación para Saudi Aramco, Society of Petroleum Engineers Foundation. 2008.

En la Figura 15 se presentan las viscosidades relativas de la emulsión al aceite (μ_e/μ_o) que se obtienen para diferentes cortes de agua teniendo en cuenta el tipo de emulsión según su estabilidad cinética.

Otro criterio de clasificación es aquel que toma en cuenta el tamaño de las gotas dispersas. De acuerdo con esto las emulsiones se clasifican en macro-emulsiones, mini-emulsiones y micro-emulsiones. Las características de cada una se detallan a continuación:

✚ **Macro-emulsión.** Es aquella en la cual las gotas de la fase dispersa tiene un diámetro mayor a 0.1 micras. Éstas dispersan la luz efectivamente y por ende tienen aspecto lechoso, puesto que las gotas son de mayor tamaño que la longitud de onda de la luz. Este tipo de emulsión termodinámicamente inestable, pero puede ser estabilizada por un período de tiempo con aplicaciones de energía cinética.

A pesar de que desde el momento que son creadas éstas siempre están revirtiéndose a sus estados originales inmiscibles y separados, la razón por la cual pueden existir es debido a que son cinéticamente estables desde una perspectiva macroscópica.

✚ **Mini-emulsión.** También conocida como nanoemulsión, es aquella en la cual las gotas de la fase dispersa tienen un diámetro entre 50 y 500 nanómetros. En este tipo de emulsiones la coalescencia y la maduración de Ostwald son suprimidas gracias a la acción de un surfactante y un co-surfactante como el hexadecano o el alcohol cetílico.

- ✚ **Micro-emulsión.** Hace referencia a aquellas emulsiones que tienen un diámetro de gota dispersa entre 10 y 100 nanómetros. Son transparentes, con alto grado de estabilidad termodinámica, isotrópicas, y no requieren altos esfuerzos y energía generalmente necesaria para la formación de las emulsiones. También es conocida como emulsión transparente, solución micelar, aceite solubilizado y micelas hinchadas.

1.3 PROBLEMAS GENERADOS POR LAS EMULSIONES

Toda emulsión, al encontrarse conformada por dos sustancias inmiscibles, tiene características físicas y químicas particulares, por lo cual debe estudiarse entendiéndose como una entidad única, tal y como se ha afirmado hasta el momento. Estas cualidades específicas de las emulsiones crean dificultad tanto en la parte de tratamiento como en los procesos operacionales de producción de hidrocarburos. En el desarrollo de este trabajo investigativo se han logrado identificar algunas de las complicaciones que generan las emulsiones tales como corrosión en las líneas, tránsito lento, taponamientos, disminución en la productividad, trabajo forzado de las bombas, aumento excesivo del costo de producción de un barril de crudo por efecto del tratamiento de la emulsión, apretamiento progresivo de la emulsión misma, entre otros.

1.3.1 Corrosión en líneas y equipos. La corrosión es uno de los problemas más grandes en la industria del petróleo ya que su tratamiento, prevención, mitigación y/o eliminación implica altos costos, lo cual hace necesario tratar las emulsiones, con el fin de reducir el impacto que este puede generar sobre los componentes metálicos del sistema de producción, recolección y transporte de hidrocarburos.

Se entiende por corrosión la interacción de un metal con el medio que lo rodea, generando como consecuencia el deterioro en sus propiedades tanto físicas como químicas. La característica fundamental de este fenómeno, es que solo ocurre en presencia de un electrolito, ocasionando regiones plenamente identificadas, llamadas anódicas y catódicas: una reacción de oxidación es una reacción anódica, en la cual los electrones son liberados dirigiéndose a otras regiones catódicas. En la región anódica se producirá la disolución del metal (corrosión) y, consecuentemente la región catódica la inmunidad del metal.

La composición química de la emulsión agua-crudo (contenido de sales y/o ácidos) crean el ambiente propicio para que sucedan reacciones de óxido-reducción siendo el causante de averías en las líneas de flujo, válvulas, partes de las bombas y separadores, sistemas de levantamiento, árbol de navidad, entre otros, tal y como se puede observar en la Figura 16.

Figura 16. Corrosión galvánica con depósitos de plomo en línea de producción.



Fuente: www.corrosionclinic.com.

Cabe aclarar que, a pesar de que efectivamente la emulsión actúa como un agente corrosivo gracias a la composición del agua que la conforma, en ciertas ocasiones se prefiere que se mantenga el agua emulsionada puesto que es preferible desde fondo hasta superficie que las gotas se encuentren dispersas y rodeadas por la fase continua oleosa, disminuyendo el contacto con el metal constituyente de la tubería y por ende reduciendo la posibilidad de corrosión, en comparación con producir la misma cantidad de agua en forma libre y separada del crudo.

1.3.2 Tránsito lento. Gracias al efecto que tiene la formación de la emulsión en las propiedades físico-químicas de la nueva entidad compuesta por crudo y agua, ésta aumenta considerablemente su viscosidad con respecto a la viscosidad de ambas fases constituyentes, a saber el agua y el crudo, tal y como se explicó con anterioridad. Este aumento de la viscosidad tiende a generar una reducción en la movilidad de la mezcla a lo que se le denomina “tránsito lento”, lo cual se agrava con la disminución de la temperatura y un aumento de la presión en las líneas de flujo.

Este movimiento poco fluido puede generar una disminución en la productividad del campo, por lo que requiere de esfuerzos adicionales para obtener la fluidez deseada, lo que indica la necesidad de equipos extras o un trabajo forzado por parte de los equipos disponibles en el momento, así como también un aumento considerable en el coste del proceso productivo.

1.3.3 Taponamiento de líneas de producción. Sumado a la corrosión y al tránsito lento se encuentran el problema de taponamiento en el sistema de producción debido a los fluidos emulsionados provenientes del yacimiento, ya que la emulsión requiere de agentes que formen y le den rigidez a la película tenso-activa, agentes los cuales se componen, entre otras sustancias, de asfáltenos, parafinas y carbonatos, favoreciendo la formación de hidratos de gas y precipitación de algunos componentes inorgánicos y orgánicos inmersos en el crudo al ser sometidos a cambios de presión y temperatura, conllevando así a la depositación y posterior obstrucción parcial o total de la tubería de producción (Ver Figura 17).

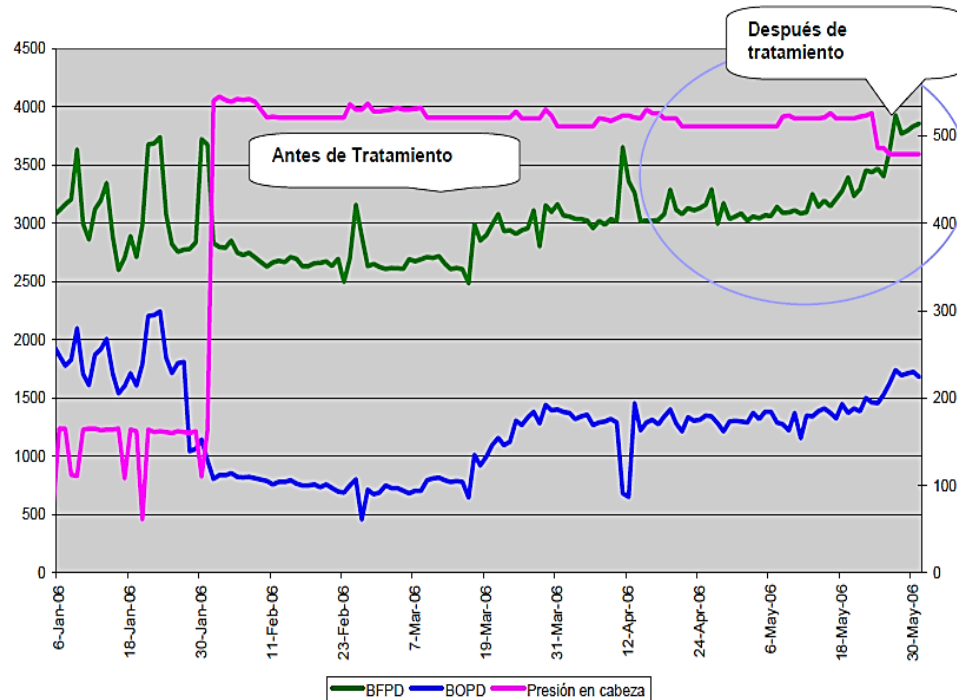
Figura 17. Taponamiento parcial de tubería por depositación de orgánicos.



Fuente: www.bakerhughes.com.

1.3.4 Aumento de presión en cabeza de pozo (WHP). De acuerdo con investigaciones realizadas²⁴, se llegó a la conclusión de que las emulsiones pueden generar un aumento notable en la presión de cabeza, contribuyendo a pérdidas considerables en producción y por ende de tipo económico, lo cual se puede solucionar con agentes desemulsificantes, tal y como se puede observar en la Figura 18, donde se observa la evolución del pozo de un campo bajo estudio frente a un proceso de inyección de un agente desemulsificante para mitigar el ascenso anormal de presión en cabeza de pozo.

Figura 18. Producción y presión en cabeza antes y después del tratamiento.



Fuente: PÉREZ M. Carlos A²⁴.

²⁴ PÉREZ MORENO, Carlos Alberto. Los problemas de emulsión y como afectan la productividad en un campo productor. Campo Jiba – Occidental de Colombia. Escuela de Petróleos, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2006.

1.3.5 Trabajo irregular en los equipos de bombeo. Debido a problemas mencionados anteriormente, como el taponamiento de líneas, el tránsito lento y el aumento de presión en cabeza, a lo largo del sistema de producción se generarán puntos de presión irregularmente alta, lo que afectaría directamente el funcionamiento normal de las bombas, ya que estas disponen de un caballaje definido que entrega un caudal a una presión y eficiencia determinada, de lo cual se deduce que cualquier aumento anormal e inesperado de presión en la línea de producción generaría ya sea una reducción del caudal entregado trabajando al mismo ritmo la bomba, o el mismo caudal deseado con la bomba trabajando forzadamente, lo que podría conllevar a daños en ésta.

1.3.6 Apretamiento progresivo de la emulsión. La generación de puntos de obstrucción y de alta presión en las líneas de producción debido al efecto de las emulsiones causa que la emulsión misma al circular por estos puntos sea sometida a agitación adicional y por ende se le entregue mayor energía, lo que aprieta la emulsión aún más, agravando los problemas iniciales y de esta manera entrando en un bucle en el cual se agravan todos los problemas relacionados con las emulsiones con el apretamiento progresivo de éstas.

Además, existen otras formas de imprimirle energía extra a la emulsión, como es el caso de los campos en los cuales se aplican métodos de recobro mejorado que involucren inyección de fluidos y/o sustancias ajenas al yacimiento (inyección de agua, vapor, surfactantes, polímeros, entre otros), contribuyendo a una alteración de la relación de fluidos en el yacimiento, de la energía propia del mismo y de las propiedades químicas del agua y el aceite, y por último complicando el problema de las emulsiones.

1.3.7 Aumento del costo de producción por barril de crudo. Todos los problemas mencionados anteriormente contribuyen negativamente de alguna forma u otra a la economía del proyecto de explotación, ya sea por disminución de la producción o por requerimiento de equipos adicionales y químicos costosos para lidiar con el problema de las emulsiones, lo que se ve reflejado en el costo final por cada barril de crudo producido en condiciones para entrega a refinería de acuerdo con los estándares establecidos.

2. PRINCIPIOS DE LA SEPARACIÓN DE EMULSIONES

2.1 FACTORES QUE AFECTAN LA ESTABILIDAD DE LA EMULSIÓN

Para realizar la separación de emulsiones se debe tener en cuenta los factores que alteran su estabilidad, los cuales se encuentran asociados a los fluidos y a otros aspectos externos dependientes del medio. A continuación se detalla cada uno de éstos y en qué forma alteran la estabilidad de la emulsión.

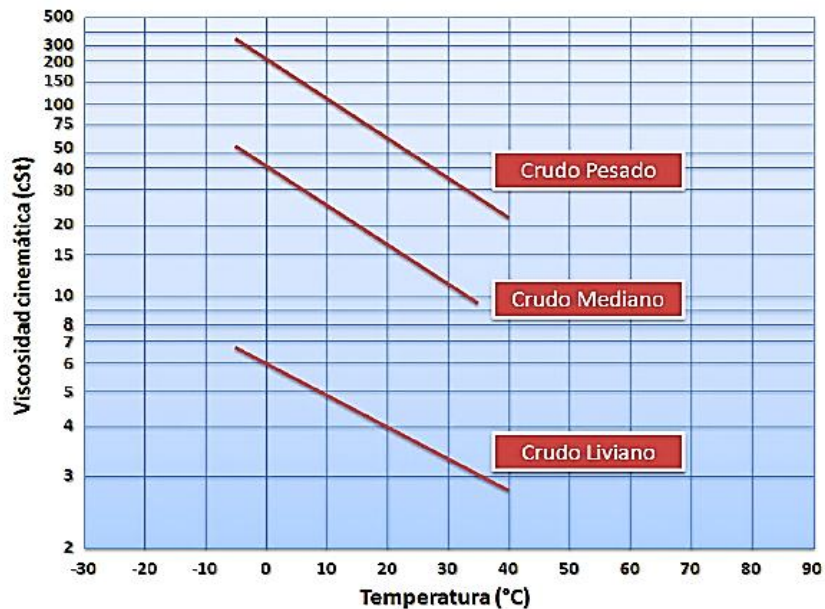
2.1.1 Relación de fases. La relación de fases se entiende como la proporción existente entre el volumen de la fase dispersa y el volumen de la fase continua. Es correcto afirmar que cuanto más alto sea el volumen de la fase dispersa, menos estable es la emulsión. Para comprender esta situación es necesario aclarar que el rompimiento de la emulsión se basa (entre otros factores) en la colisión de las gotas dispersas, pues a medida que estas chocan se unen, aumentando su volumen y favoreciendo su precipitación. El hecho de que exista un gran volumen de la fase dispersa tiene implícito varios factores que desestabilizan la emulsión: aumento del número de gotas dispersas aumento del tamaño de las gotas, reducción de la distancia que separa a las gotas y aumento de área interfacial.

Por otra parte, la relación de fases también afecta la viscosidad de la emulsión, de acuerdo con la Ecuación 4, en la cual se encuentra en función de la fracción de fluido disperso (f) y la viscosidad de la fase continua (viscosidad del aceite seco μ_0 en el caso de emulsiones directas). Y esto se relaciona indirectamente con la estabilidad teniendo en cuenta que crudos altamente viscosos son capaces de mantener grandes gotas de agua en suspensión y las gotas más pequeñas tendrán mayor resistencia a coalescer.

$$\mu_e = \mu_o \times [1 + 2.5f + 14.1f^2] \quad (4)$$

2.1.2 Temperatura. Generalmente, la estabilidad de las emulsiones se ve afectada por un incremento de temperatura, debido a que se reduce la viscosidad de la fase continua y se beneficia el movimiento de las gotas dispersas y por ende su coalescencia. Luego de analizar esto, es necesario realizar dos consideraciones importantes. En primer lugar, la variación de la viscosidad del crudo con la temperatura es muy grande para el caso de los crudos pesados, y pequeña para los livianos (Ver Figura 19). Por ende, no resulta viable el uso de procesos de calentamiento durante el tratamiento de emulsiones de crudo liviano

Figura 19. Variación de la viscosidad con la temperatura para varios crudos.



Fuente: MONTES, Erik G²⁵.

²⁵ MONTES PÁEZ, Erik Giovanni. Tecnologías de tratamiento de emulsiones en campos petroleros. Escuela de Petróleos, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2010.

La segunda consideración es tener en cuenta que las emulsiones se encuentran estabilizadas por sólidos (excepto parafinas), es decir, cuando el agente emulsificante es un asfálteno, alguna arcilla, etc., la emulsión se hace más estable al incrementar la temperatura, debido a que la solubilidad del sólido en el fluido se incrementa. En estos casos no es recomendable el uso de tratamiento térmico para romper las emulsiones, pues el efecto de la temperatura es nocivo para el proceso.

2.1.3 Agitación. Para que exista la emulsión se requiere de la agitación de los fluidos, con el fin de que se mezclen entre sí y ocurra la emulsión. La relación, pues entre la estabilidad de la emulsión y la agitación de la misma es directa. Para efectos de rompimiento de las emulsiones es necesario tener en cuenta que el diseño de los sistemas de levantamiento, recolección y tratamiento tenga la menor cantidad posible de puntos en los cuales se presenten esfuerzos cortantes fuertes, tales como bombas, accesorios y estranguladores.

2.1.4. Contenido de sólidos. Ya se ha dicho que algunos sólidos provenientes del yacimiento (o introducidos por otros medios al pozo) tienden a estabilizar las emulsiones al actuar como tenso-activos, pues muchos de éstos son mojados tanto por el agua como por el crudo. Por lo tanto, al haber un mayor contenido de sólidos suspendidos en el fluido de producción, habrá también una mayor estabilidad de la emulsión formada. Estos sólidos estabilizan las emulsiones por efecto de difusión de la interface agua-aceite cuando éstos forman estructuras rígidas o las mencionadas películas que pueden inhibir estéricamente la coalescencia de las gotas de la fase dispersa de la emulsión.

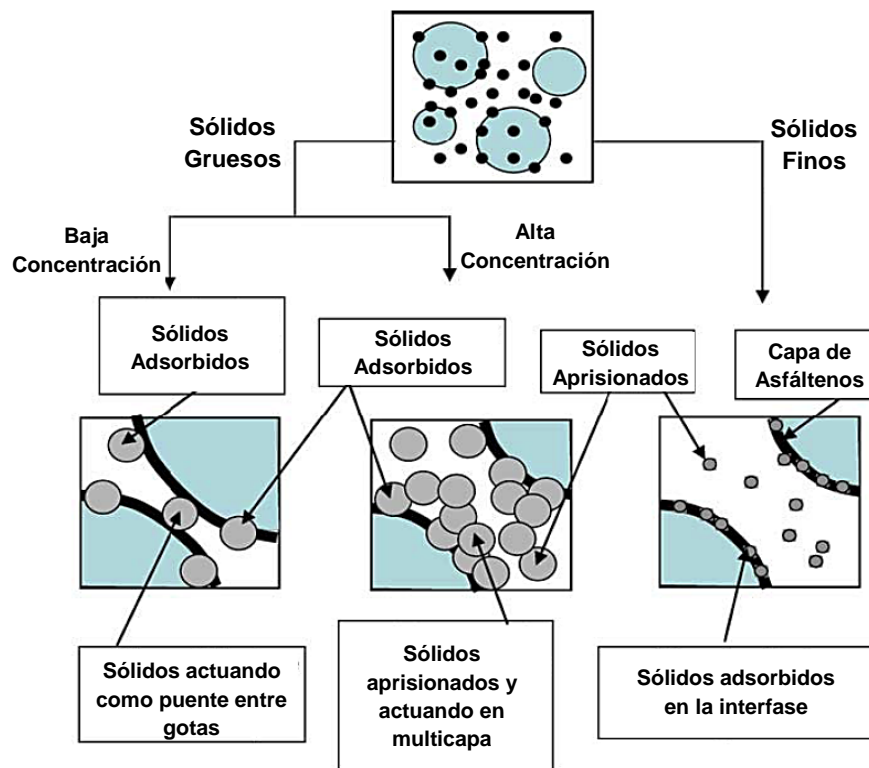
La efectividad de estos sólidos como estabilizantes depende de varios factores como tamaño de partícula (deben ser mucho más pequeñas que las gotas dispersas para actuar efectivamente), interacciones entre partículas, mojabilidad, carga eléctrica.

La mojabilidad de los sólidos juega un papel importante en el proceso de estabilización de la emulsión. Si el sólido permanece enteramente en la fase de aceite o en la fase acuosa, no actuará como un estabilizador de la emulsión. Por ello debe estar presente en la interfase y ser mojado por ambas fases (agua y aceite) para que cumpla la función de estabilizador. Cuando los sólidos son preferencialmente mojados por aceite, la emulsión resultante será de tipo directa (agua en aceite). Esto debido a que las partículas generarán una división preferencial en la fase de aceite envolviendo la fase acuosa dispersa y evitando su coalescencia mediante un bloqueo estérico.

Similarmente, los sólidos mojados por agua estabilizarán una emulsión de tipo inversa (aceite en agua). Un ejemplo de este tipo de sólidos son las sales inorgánicas como carbonato de calcio y sulfato de calcio, las arcillas y los finos de arena provenientes de un proceso de migración. Cuando los sólidos poseen mojabilidad mixta se aglomeran en la interface retardando la coalescencia gota-gota. Estas partículas deben ser relocalizadas en cualquiera de las fases, agua o aceite, para que la coalescencia se lleve a cabo. Este proceso requiere energía adicional, proveyendo una barrera adicional para la coalescencia.

En el 2004, Sztukowki y Yarranton²⁶ efectuaron un estudio experimental muy bien fundamentado, mostrando la influencia de los sólidos en la estabilización de las emulsiones, y de cómo su tamaño afecta la forma en que ocurre dicha estabilización. Los investigadores identificaron dos clases de sólidos nativos (tipo arcilla) típicamente encontrados en emulsiones de campo y capaces de contribuir a la estabilización.

Figura 20. Influencia de los sólidos finos y gruesos en la estabilización de emulsiones.



Fuente: SZTUKOWKI, D. y YARRANTON.²⁶ Modificado.

²⁶ SZTUKOWKI, D. & YARRANTON, H. Oilfield solids and wáter-in-oil emulsion stability. Artículo de la revista Colloid Interface Science. 2004.

Primero sólidos finos con diámetro de partícula menor a 500 nanómetros, y los otros, sólidos gruesos con diámetro de partícula entre 1 y 10 micras. El estudio identificó la presencia de un efecto sinérgico de los sólidos como los asfáltenos (finos) llevando a un máximo de estabilidad cuando la proporción entre ellos era 2:1. Por otro lado, concluyeron que los sólidos gruesos a bajas concentraciones desestabilizan las emulsiones, teniendo en cuenta que estos sólidos expulsan los asfáltenos de la interfase impidiendo la estabilización de las gotas pequeñas. Sin embargo, los sólidos gruesos en altas concentraciones son poderosos estabilizadores de emulsiones, debido a que impiden el contacto entre gotas y forman multicapas en la interfase (Ver Figura 20).

2.1.5. Contenido iónico del agua. No existe, en términos generales, una regla que relacione el contenido iónico del agua con la estabilidad de la emulsión. Por ejemplo, la presencia de algunos iones monovalentes como el sodio (Na^+) y el potasio (K^+) ayudan a desestabilizar la emulsión, teniendo que para emulsiones con agua fresca o de salinidad muy baja son mucho más estables que las emulsiones con salmueras muy concentradas. Por otra parte, la presencia de cationes divalentes como el calcio (Ca^+) y el magnesio (Mg^{++}) tienden a estabilizar la emulsión.

2.1.6. Productos químicos. A lo largo de los sistemas de levantamiento, recolección y tratamiento existen diversos problemas con los cuales se debe convivir. La corrosión, la depositación de escamas orgánicas e inorgánicas, la formación de espumas, la presencia de bacterias, la migración de finos, son ejemplos de estos problemas. Para resolverlos es muy común que se opte por el uso de químicos (inhibidores de corrosión, inhibidores de incrustaciones, antiespumantes, biocidas, ácidos para estimulaciones, respectivamente) que efectivamente ataquen y mitiguen estos problemas.

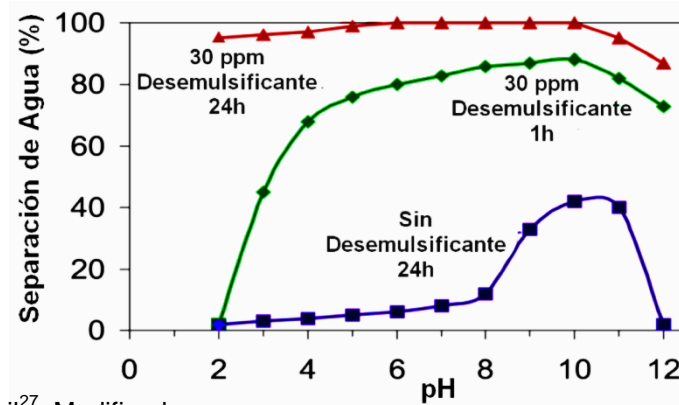
Pero es importante reconocer que muchos de los productos químicos utilizados no son compatibles con uno o más fluidos del yacimiento, presentando en su composición sustancias que actúan como tenso-activos. Entonces, mientras éstos son usados para controlar ciertos problemas, se están generando nuevos problemas al agregar más agentes emulsificantes al sistema, endureciendo la emulsión. Ante esto, normalmente lo que se practica es incrementar la dosis de los productos usados para el rompimiento de la emulsión, incrementando dramáticamente los costos de levantamiento.

2.1.7. Envejecimiento de la emulsión. A medida que la interfase envejece, la adsorción de los surfactantes se completa y debido a las interacciones laterales entre las moléculas aumenta la rigidez de la película interfacial. Esta película o piel alrededor de la gota llega a ser más gruesa, más fuerte y más dura. Además, la cantidad de agentes emulsionantes se incrementa por oxidación, fotólisis, evaporación o por la acción de bacterias.

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

El pH también influencia el tipo de emulsión formada. Para fluidos con bajo pH (ácidos) generalmente se genera una emulsión directa (agua en aceite), mientras que para aquellos con alto pH (básicos) se generan emulsiones inversas (aceite en agua).

Figura 21. Influencia del pH en la estabilidad de la emulsión.



Fuente: KOKAL, Sunil²⁷. Modificada.

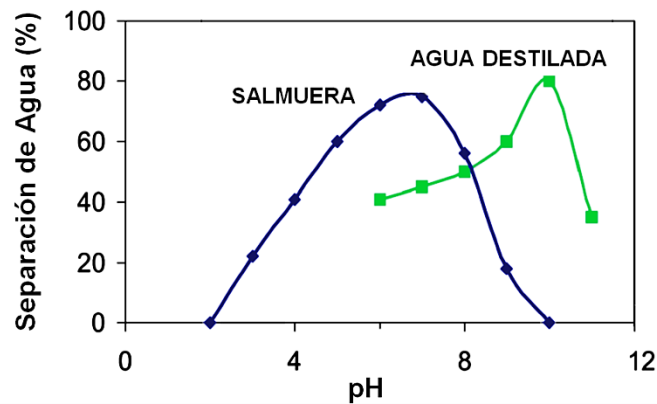
En la Figura 21 se muestra la influencia que la acidez o basicidad del agua emulsionada en la efectividad de un desemulsificante en cuanto a porcentaje de agua separada, siendo más eficaz para rangos neutros (entre 6 y 8) cuando se aplica desemulsificante, y para agua con un pH de 10 (básica) cuando no se ha aplicado desemulsificante alguno en un período de 24 horas.

También existe un efecto del pH, en conjunto con la composición de la salmuera, en la estabilidad de la emulsión. La Figura 22 muestra el efecto de una salmuera con alto contenido de bicarbonato y del agua destilada en la estabilidad de la emulsión como una función del pH.

²⁷ KOKAL, Sunil. Crude oil emulsions: Everything you wanted to know but were afraid to ask. Presentación para Saudi Aramco – Society of Petroleum Engineers Foundation, 2008.

El pH óptimo para separación del agua cambia de aproximadamente 10 para el agua destilada a 6 y 7 para la salmuera. Esto debido al efecto de ionización (por ejemplo de asociación/interacción de los iones presentes en la salmuera con los asfáltenos).

Figura 22. Efecto de la salmuera y el pH en la estabilidad de la emulsión.



Fuente: KOKAL, Sunil²⁸. Modificada.

Se ha debatido al respecto y se ha llegado a la conclusión de que para la mayoría de los sistemas crudo-salmuera, existe un rango de pH óptimo para el cual la película interfacial exhibe una mínima estabilización de la emulsión o maximiza sus propiedades de quiebre de la emulsión.

2.1.9 Estabilización eléctrica de la interfase. La capa de doble repulsión eléctrica o carga de estabilización proporcionada por los polímeros y los surfactantes con cadenas moleculares protuberantes pueden prevenir que las gotas entren en contacto con alguna otra.

²⁸ KOKAL, Sunil. Crude oil emulsion: A state-of-the-art review. Saudi Aramco – Society of Petroleum Engineers. Houston (Texas), 2005.

Una película bien compacta formada por las moléculas del surfactante o el polímero tiene una considerable resistencia, y para la mayoría de las emulsiones estables se presenta cuando el ángulo de contacto se acerca a 90° , por lo que las partículas serán almacenadas en la interfase.

2.1.10 Fracción pesada del crudo. Como ya se mencionó anteriormente, la emulsificantes de ocurrencia natural están concentrados en la fracción polar con altos puntos de ebullición del crudo. Ésta incluye asfáltenos, resinas, ácidos orgánicos solubles en aceite (por ejemplo, ácidos nafténicos y carboxílicos) y bases. Estos compuestos son los principales constituyentes de la película interfacial que rodea las gotas de agua y que le da estabilidad a la emulsión.

El estado de los asfáltenos en el crudo también afecta las propiedades estabilizantes de la emulsión, puesto que se ha evidenciado que cuando se ha precipitado sus propiedades estabilizantes aumentan considerablemente con respecto a cuando se encuentra en estado coloidal.

De igual manera ocurre con las parafinas, siendo un ente más estabilizador cuando están presentes como finos sólidos producto de su precipitación. Por ende, los crudos que tengan un bajo punto de nube generalmente tendrán mayor tendencia a formar emulsiones apretadas y estables que los crudos con altos puntos de nube. Similarmente, a bajas temperaturas, en general, se incrementa la tendencia del crudo a formar emulsiones.

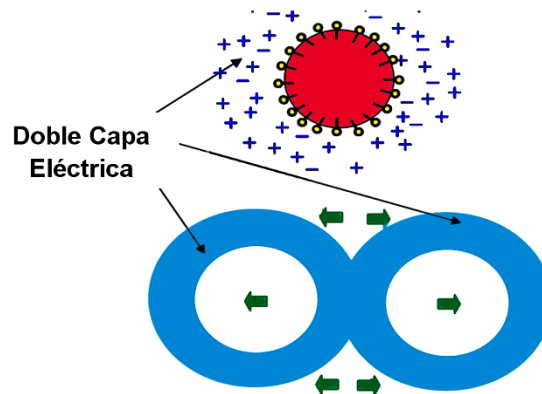
2.1.11 Tamaño de gota. Como se mencionó anteriormente, los tamaños de gotas dispersas en una emulsión van desde menos de 1 micra a más de 50 micras. Generalmente, aquellas emulsiones que tienen tamaños de gota más pequeños serán más estables. Esto debido a que para la separación del agua, las gotas tienen que coalescer, y entre más pequeñas sean las gotas más tiempo demorará el proceso de coalescencia que permita tener una gota de mayor tamaño y pueda separarse por efecto gravitacional.

2.2 MECANISMOS INVOLUCRADOS EN LA ESTABILIDAD DE EMULSIONES

Las emulsiones se encuentran estables cuando las gotas de la fase dispersa no coalescen para formar una fase más continua ni se separan por un dado período de tiempo bajo la aplicación de algún campo de interés práctico, como campo gravitacional, campo centrífugo o campo eléctrico. Considerando estas posibilidades de ruptura de emulsiones, deben tenerse en cuenta algunos mecanismos que actúan en la estabilización de las emulsiones.

2.2.1 Repulsión Electrostática. Una primera etapa de separación de las emulsiones es la aproximación de las gotas, las cuales pueden sufrir repulsión electrostática a medida que se van acercando. Esto se debe a que los agentes emulsificantes iónicos presentes en la interfase inducen cargas eléctricas en la región. Como es de esperar, en la región próxima a la interfase se acumulan preferencialmente cargas opuestas a dicha interfase. Este conjunto de cargas distribuidas en la interfase es conocido como doble capa eléctrica y es el responsable de la repulsión electrostática (Ver Figura 23).

Figura 23. Representación de la doble capa eléctrica y sus efectos en la repulsión electrostática.



Fuente: FRANCO, Z.²⁹. Modificada.

Este es un mecanismo fuertemente evidenciado para la emulsiones inversas en al cual la fase continua es el agua, gracias a su conductividad eléctrica. De hecho, para las emulsiones directas (agua en aceite), como la constante dieléctrica³⁰ de la fase continua es muy baja, esta repulsión no debe ser un proceso dominante.

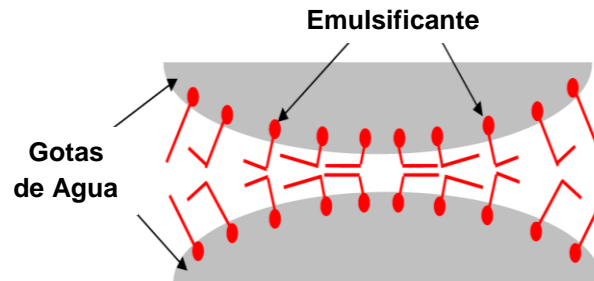
2.2.2 Estabilización Estérica. Este es un fenómeno determinante en emulsiones estabilizadas por la adsorción de asfáltenos, agregados de resinas-asfáltenos y partículas sólidas (orgánicas e inorgánicas) en la interfase de las gotas dispersas. Una repulsión ocurre cuando es energéticamente más favorable la interacción de especies adsorbidas (en una de las gotas de agua dispersa) con la fase continua (fuerzas de Van der Waals con una mezcla de hidrocarburos saturados y aromáticos) que con las especies adsorbidas en otras gotas.

²⁹ FRANCO, Z.; TAVARES, A.; GONZALE, G. Emulsões e borras (Parte 1): Teoria de formação e quebra das emulsões. Boletín Técnico Petrobras. Brasil, 1988.

³⁰ La constante dieléctrica o permitividad relativa estática (ϵ_r) de un medio continuo es una propiedad macroscópica de un medio dieléctrico definida el cuadrado de la relación entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la onda electromagnética en el medio continuo analizado.

De esta forma, cuando las gotas se aproximan, hay una barrera energética para que la capa de solvatación sea desprendida y sustituida por la interacción entre especies de diferentes gotas (Ver Figura 24).

Figura 24. Repulsión y estabilización por efecto estérico.



Fuente: KOKAL, Sunil³¹. Modificada.

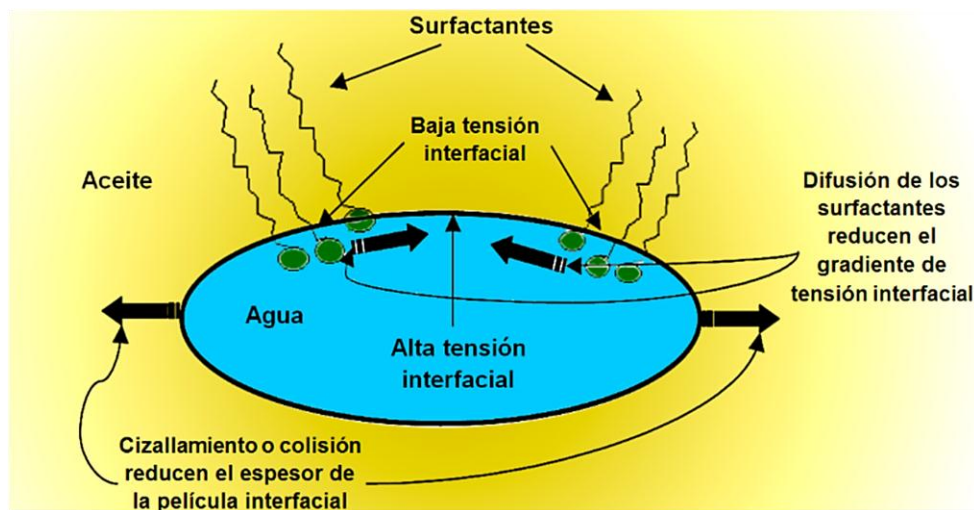
2.2.3 Efecto de Gibbs-Marangoni. La coalescencia involucra una reducción de la película entre las gotas hasta un espesor crítico a través del drenaje de la fase continua entre ellas, seguido de la remoción de los surfactantes o tenso-activos que actúan como emulsificantes. De este modo, son generados gradientes de tensión interfacial a medida que las especies son removidas de la interfase.

El conocido efecto de Gibbs-Marangoni puede ser interpretado como un mecanismo adicional de estabilización. La tendencia de los gradientes de tensión, que fueron creados por el estrés en la interfase, por colisión de las gotas, por cizallamiento o elongamiento por la aplicación de un campo eléctrico, pueden oponerse a este efecto e intentar restaurar el estado inicial uniforme de la interfase.

³¹ KOKAL, Sunil. Crude oil emulsion: A state-of-the-art review. Saudi Aramco, Society of Petroleum Engineers. Houston (Texas), 2005.

El efecto de Gibbs-Marangoni describe la difusión de los compuestos presentes en la película o capa interfacial en sentido opuesto al drenaje de la película para reducir los valores de tensión interfacial (γ) a sus niveles originales (Ver Figura 25).

Figura 25. Efecto de Gibbs-Marangoni en una gota de agua.



Fuente: KOKAL, Sunil³². Modificada.

Marangoni considera un aumento instantáneo de la tensión interfacial, antes de la migración de los emulsificantes, mientras que Gibbs determina el promedio de este valor de no equilibrio. Ambos efectos consideran que el crecimiento del área de la película provoca el aumento de la tensión interfacial y el endurecimiento de la película debido a la variación infinitesimal de su espesura³³.

³² COUTINHO, Raquel. Estudo da estabilidade de emulsões de água em petróleos. Tesis de Maestría en Ciencias de Ingeniería Química. Universidad Federal de Río de Janeiro. Río de Janeiro, Brasil. Diciembre de 2005.

³³ NIEVES, J. Effect of Demulsifiers on the separation of water-in-oil emulsions. Tesis de Doctorado, Instituto Federal de Tecnología de Suiza. Zurich (Suiza), 1987.

Sin embargo, muchos investigadores rechazan la importancia de este mecanismo en emulsiones directas. La presencia de este mecanismo es cuestionada porque se presume que haya transferencia de masa significativa en este sistema, y la estructura de la película (visco-elástica rica en asfáltenos) dificulta el movimiento de los compuestos.

2.2.4 Estabilización por multicapas. Petróleos ricos en ácidos nafténicos tienden a formar emulsiones estables, principalmente cuando la fase acuosa presenta alcalinidad considerable. Moléculas menores de estos ácidos son solubles en pH alrededor de 5, mientras que las moléculas mayores ganan solubilidad en la fase acuosa para pH alrededor de 10 a 11.

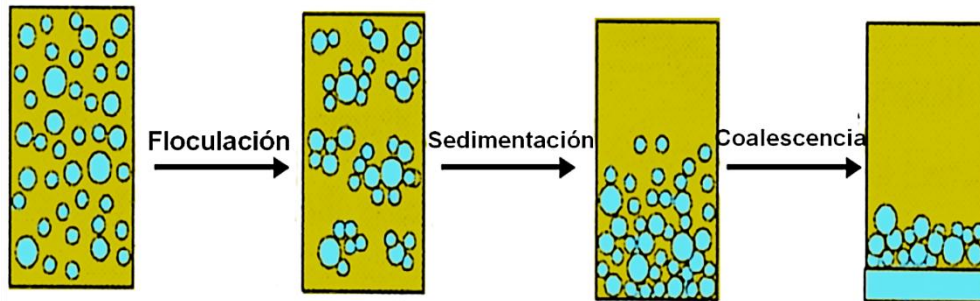
Sistemas formados por ácidos nafténicos, naftenatos y agua pueden formar la llamada fase-D, compuesta por agregados coloidales con empaquetamiento alto. Estos agregados, conocidos como líquidos cristalinos liotrópicos, aumentan la estabilidad de las emulsiones de forma desproporcionada en relación con el aumento del contenido de surfactantes. En esta fase-D, los agregados forman una microestructura de multicapas con surfactantes y agua intercalados. Así, la interfase tiende a tornarse más estable³⁴.

2.3 ETAPAS PRESENTES EN LA SEPARACIÓN DE EMULSIONES

En general existen tres sub-procesos que influenciarán la tasa de rompimiento en la emulsión. Éstos son agregación o floculación, sedimentación y coalescencia (Ver Figura 26).

³⁴ HAVRE & SJÖBLOM. Emulsion stabilization by means of combined surfactant multilayer (D-phase) and asphaltene particles. *Coloides y Superficies: Aspectos Ingenieriles*. 2003.

Figura 26. Sub-procesos de separación de una emulsión.



Fuente: Autores.

2.3.1 Floculación. Es el proceso en el cual se forman agregados de las gotas, sin la ruptura de la capa estabilizadora en la interfase. La floculación de emulsiones puede ocurrir bajo condiciones en las cuales la energía de atracción de Van der Waals exceda la energía repulsiva, y sea fuerte o débil dependiendo de la magnitud de las fuerzas entre gotas.

Los procesos que conllevan a la floculación pueden ser:

- ✓ Fuerzas corporales como gravedad y centrifugación, causando nificación o sedimentación, dependiendo de si la densidad másica de las gotas es más pequeña o más grande que la de la fase continua.
- ✓ Fuerzas Brownianas.
- ✓ Migración termo-capilar puede dominar la fuerza gravitacional corporal para gotas muy pequeñas menores a una micra.

La tasa de floculación depende de los siguientes factores³⁵:

- ✓ Corte de agua de la emulsión.
- ✓ Temperatura.
- ✓ Viscosidad del aceite.
- ✓ Diferencia de densidades entre los fluidos que componen la emulsión.
- ✓ Presencia y magnitud de campo electrostático.

2.3.2 Sedimentación. La sedimentación o asentamiento gravitacional, puede ocurrir antes de la floculación, después de la coalescencia o entre estos dos procesos. Ésta se encuentra gobernada por fuerzas regidas por la ley de Stokes, permitiendo expresar la velocidad terminal de sedimentación de Stokes (w_s) en pies por segundos, de acuerdo con la Ecuación 5 (expresada como velocidad terminal o diámetro de Stokes – d_{Stoke} – necesario para la sedimentación), donde d es el diámetro de gota en micras, $\rho_d - \rho_c$ es la diferencia de masas específicas de las fases, μ_c la viscosidad dinámica de la fase continua, y V_v la velocidad vertical del aceite.

$$w_s = 1.787 \times 10^{-6} \frac{d^2(\rho_d - \rho_c)}{18\mu_c}, \quad d_{Stoke} = \left(\frac{18\mu_o V_v}{g(\rho_w - \rho_o)} \right)^{0.5} \quad (5)$$

Se puede observar que la tasa de sedimentación es bastante dependiente del radio de las gotas, de la diferencia de densidades entre fases y de la viscosidad de la fase continua.

³⁵ KOKAL, Sunil. Crude oil emulsions: Everything you wanted to know but were afraid to ask. Presentación para Saudi Aramco, Society of Petroleum Engineers Foundation. 2008

Estos últimos dos factores pueden ser manipulados a través de controles de temperatura, mezclas con livianos y adición de diluyentes, mientras que el diámetro de gotas puede ser alterado con la aplicación de campo eléctrico para que se obtenga la eficiencia de remoción de agua requerida.

No obstante, la ecuación anterior que representa la Ley de Stokes fue desarrollada para explicar el movimiento vertical de una partícula sólida y esférica dentro de un fluido, caso el cual no es el presente, puesto que se busca explicar el asentamiento de partículas líquidas las cuales no son necesariamente esféricas, y se encuentran dentro de otro fluido. Esta ley no considera fuerzas de atracción existentes entre dos fluidos ni los efectos de la interfase, y además está diseñada para considerar el movimiento de una partícula singular asentándose de la fase continua y no la existencia de miles de partículas en constante y simultáneo movimiento.

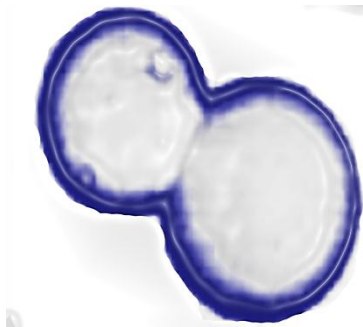
De acuerdo con esto, se presenta la siguiente ecuación publicada por *Hadamard*, en la cual se incluye un factor de corrección a la Ley de Stokes para tomar en consideración los efectos producidos por las fuerzas viscosas de los fluidos presentes en las emulsiones (Ver Ecuación 6), en donde w_h es la velocidades terminal de sedimentación de Hadamard en función de la velocidad de Stokes (w_s).

$$w_h = w_s \times \frac{\left(1 + \frac{\mu_c}{\mu_d}\right)}{\left(1 + \frac{2\mu_c}{3\mu_d}\right)} \quad (6)$$

2.3.3 Coalescencia. Es un proceso irreversible en el cual dos o más gotas de la emulsión se fusionan para formar una gota de mayor tamaño donde la interfase es destruida. Como ya se ha mencionado, para gotas grandes acercándose unas a otras (sin campo eléctrico en segundo plano), las interfases interactúan y comienzan a deformarse.

Este proceso tiene como limitante el drenaje de la película interfacial, y la presión capilar, la difusión de tenso-activos en la película (Efecto Gibbs-Marangoni) y la interacción de estos tenso-activos influyen la duración de la película y por ende de la coalescencia. Las fuerzas de Van der Waals aceleran el proceso, mientras que las fuerzas de repulsión inducidas por la formación de la *doble capa eléctrica* retardan la coalescencia (Ver Figura 27).

Figura 27. Adhesión entre dos gotas de una emulsión.



Fuente: ABDEL-RAOUF, Manar E.³⁶. Modificado.

³⁶ ABDEL-RAOUF, Manar E. Factors affecting the stability of crude oil emulsions. Departamento de Aplicación Petrolera, Instituto de Investigación Petrolera de Egipto. Egipto, 2003.

El proceso de coalescencia puede ser mejorado o potenciado mediante:

- ✓ Altas tasas de floculación.
- ✓ Ausencia de películas interfaciales mecánicamente fuertes.
- ✓ Presencia de altas tensiones interfaciales.
- ✓ Altos cortes de agua.
- ✓ Reducción de la viscosidad del aceite.
- ✓ Reducción de la viscosidad interfacial.
- ✓ Adición de químicos desemulsificantes.
- ✓ Aplicación de calor para generar altas temperaturas.

Varios procesos pueden ocurrir durante la coalescencia como la formación de cadenas de gotas por floculación, la atracción dipolo-dipolo, la electroforesis (movimiento de una partícula cargada en un fluido estacionario por la acción del campo eléctrico), la di-electroforesis y la colisión aleatoria entre gotas. Los procesos eléctricos anteriormente mencionados se detallaran profundamente en capítulos posteriores.

Además de la floculación, el asentamiento gravitacional y la coalescencia, existen otros dos procesos que no son estrictamente necesarios como los anteriores para que ocurra el rompimiento de la emulsión, pero si que surgen como un aditivo a los mismos mejorando dicho proceso reduciendo el límite de diámetro mínimo de gota que se puede remover de la emulsión. La combinación de los procesos anteriormente descritos generalmente puede remover partículas de hasta 50 micras de diámetro, por lo que si se requiere de mayor eficiencia de remoción se puede recurrir a la *flotación* y/o a la *filtración*.

2.3.4 Flotación. Desde el punto de vista físico este fenómeno consiste en un incremento de la fuerza de boyanza a la que está sometida la partícula dispersa, con lo cual se facilita un arrastre hacia la parte superior. Este incremento en la fuerza de boyanza logra conseguirse gracias a procesos de inyección de gases compatibles con las partículas dispersas, consiguiendo que las burbujas se les adhieran y las arrastren hacia la interfase. Al final esto mejorará el proceso de separación de las fases dispersa y continua, permitiendo remover partículas de hasta 10 micras de diámetro aproximadamente.

Un parámetro fundamental para conseguir una alta eficiencia en estos procesos es el tamaño de las burbujas, puesto que a medida que las burbujas empleadas sean de menor se incrementará el contacto y por ende el efecto que aumente al eficiencia de remoción. Es importante resaltar que al aplicar este tipo de procesos se requerirá de equipos de desgasificación para eliminar el exceso de gas en las corrientes de salida.

2.3.5 Filtración. Es un proceso de separación de fases que consiste en pasar el fluido a tratar a través de un medio poroso para que se retengan las partículas de mayor tamaño que los poros, permitiendo la circulación de las partículas de menor tamaño. Este fenómeno requiere de un diferencial de presión entre las caras del filtro para su correcto funcionamiento. Con este proceso se puede alcanzar una eficiencia de remoción alta, separando partículas de diámetros menores a 10 micras, las cuales varían de acuerdo con el tipo de filtración empleada, empezando con la *microfiltración* con capacidad para remover partículas con diámetros de 1 a 0.001 micras y con requerimiento de diferencial de presión menor a 30 psi, pasando por la *ultrafiltración* y la *nanofiltración*, hasta la ósmosis inversa, la cual es capaz de remover partículas con diámetro menor a 0.0001 micras y requiere de un diferencial de presión mayor a 800 psi para cumplir su objetivo.

3. MÉTODOS PARA LA DESHIDRATACIÓN DE CRUDO PESADO

3.1 ASPECTOS TÉCNICOS DE LA DESEMULSIFICACIÓN Y DESHIDRATACIÓN DEL CRUDO

La desemulsificación es la ruptura de una emulsión agua-aceite en dos fases una de crudo y otra acuosa. Desde el punto de vista de los procesos, al productor de crudo le interesan dos aspectos de la desemulsificación: la tasa o velocidad a la cual está ocurriendo la separación y la cantidad de agua que permanece en el crudo luego del proceso de separación. Una tasa rápida de separación y un bajo valor de agua residual en el crudo es obviamente lo que se busca en últimas.

Los factores que mejoran y aceleran la ruptura de las emulsiones son:

- ✓ Incremento de temperatura.
- ✓ Reducción de la agitación o el esfuerzo cortante.
- ✓ Incremento del tiempo de residencia o retención.
- ✓ Remoción de sólidos.
- ✓ Control de agentes emulsificantes.

El proceso de desemulsificación o ruptura de la emulsión necesariamente involucra la desestabilización de la película emulsificante alrededor de las gotas dispersas. Este proceso es llevado a cabo por uno o una combinación de los siguientes métodos:

- ✓ Reducción de la velocidad de flujo que permita la separación gravitacional del agua y el aceite. Esto es generalmente logrado en separadores y desaladores de gran volumen.

- ✓ Adición de químicos desemulsificantes.
- ✓ Incremento de la temperatura de la emulsión.
- ✓ Aplicación de campos eléctricos para promover la coalescencia.
- ✓ Cambio de las características físicas de la emulsión.
- ✓ Instalación de un medio coalescente en la sección de asentamiento.
- ✓ Aplicación de fuerza centrífuga a la emulsión para promover la separación de las fases (debe tenerse en cuenta que al final de este proceso la agitación entregada puede generar un mayor problema de emulsiones).

Debido a la amplia variedad de crudos y salmueras (y por ende de emulsiones), equipos de separación, químicos desemulsificantes, y especificaciones de productos, los métodos para la desemulsificación son de aplicación muy específica. De hecho, las emulsiones y condiciones cambian con el tiempo y agregan complejidad al proceso de tratamiento de las mismas.

Los métodos más comunes para el tratamiento de emulsiones han sido la aplicación de calor y químicos desemulsificantes apropiados para promover la desestabilización, seguido por un tiempo de asentamiento para permitir que ocurra la separación gravitacional. En este capítulo se revisarán los diversos métodos convencionales de los cuales se disponen para tratar las emulsiones, estudiando los procesos involucrados, sus características principales y su funcionamiento en general, sin adentrarse en aspectos netamente de diseño de equipos que requieren de un estudio más profundo de ecuaciones y variables, el cual se aleja del propósito u objeto del presente proyecto investigativo. Para mayor información el lector podrá remitirse a la lista anexada que recopila, a consideración de los autores, literatura de contenido excelente en el tema en cuestión (Ver Anexo 1).

3.1.1 Remoción de agua libre. El objetivo de este tratamiento previo al proceso de desemulsificación y deshidratación es remover el agua libre existente en el petróleo de acuerdo con las siguientes razones que evidencian el por qué se hace necesario:

- ✓ Reducción del tamaño de las tuberías de flujo y de los equipos de tratamiento.
- ✓ Reducción de la inversión de calor cuando se calienta la emulsión (Un calentador requiere de 350 BTU para calentar un barril de agua en 1°F, pero solamente requiere 150 BTU para calentar 1 barril de crudo en 1°F).
- ✓ Minimización de la corrosión y del costo adicional de químicos necesarios para prevenirla puesto que el agua libre entra en contacto directo con las superficies metálicas, a diferencia del agua emulsionada la cual no lo hace.

El agua libre por otro lado tiene sus beneficios distintivos. El agua libre encontrada en los fluidos de yacimiento transportara dos veces más calor que el crudo y llevando más energía térmica desde yacimiento a superficie a través de la tubería de producción, lo que eventualmente ayudara a romper las emulsiones del crudo. Se ha observado que un pozo produciendo agua salada (agua libre) será mucho más cálido que un pozo que produzca crudo solamente. Además el agua libre contribuye al proceso de “lavado de agua” que es la acción del agua salada para romper emulsiones de crudo.

La remoción del agua libre se lleva a cabo en grande recipientes denominados FWKO (*Free Water Knock-Out*) o EAL (*Eliminadores de Agua Libre*). Los FWKO son utilizados solamente para remover grandes cantidades de agua que no está emulsionada y que se asienta fácilmente en menos de 5-20 minutos. El crudo de salida de un EAL todavía contiene desde 1 hasta 30 % de agua emulsionada.

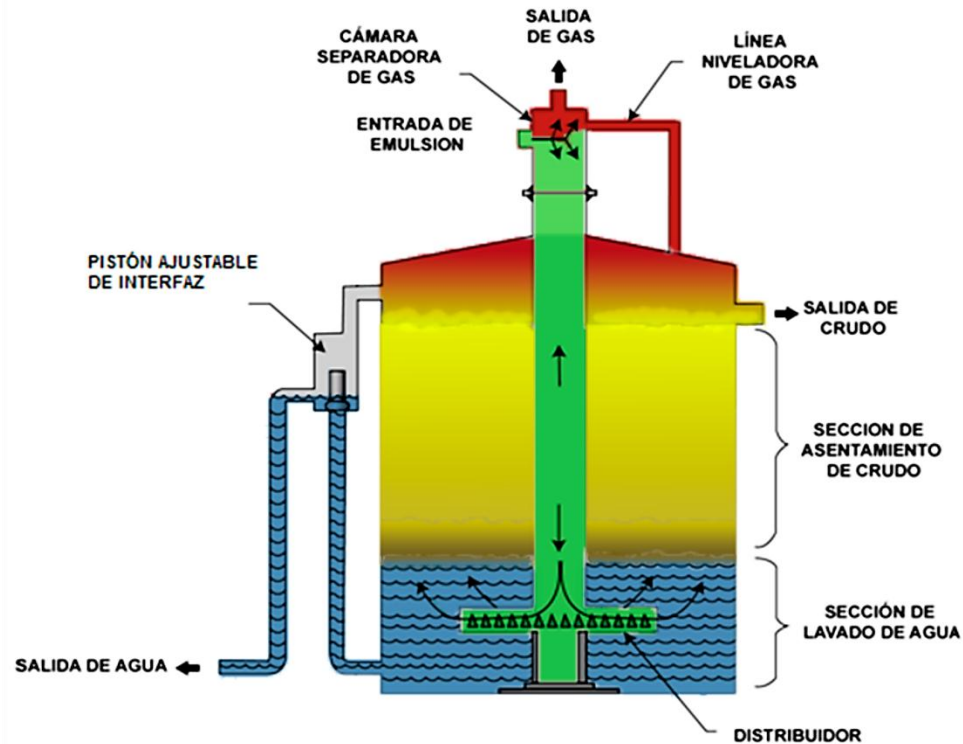
3.2 TRATAMIENTO MECÁNICO

Dentro de los tratamientos mecánicos disponibles para el rompimiento de emulsiones se destacan dos principalmente: *Gunbarrels* y *Tratadores Centrifugos*. Ambos solo disponen de su configuración y estructura para aplicar fuerzas que permitan la separación de las fases (aunque se pueden diseñar en combinación con otros tipos de tratamientos para acceder a sus beneficios únicos).

3.2.1 Gunbarrel. En el tratamiento de emulsiones directas es muy común el empleo de *Gunbarrels* o Tanques de Lavado, los cuales son recipientes verticales de bastante diámetro que operan generalmente a presión atmosférica. En su configuración cuentan con una pequeña sección de separación de gas denominada Bota de Gas, una sección de lavado de agua, y una sección de asentamiento de crudo (Ver Figura 28). En algunos casos se puede variar el diseño general ubicando la bota de gas en la parte externa del tanque de tal forma que en la línea de flujo primero llegue a la bota de gas y luego entre al tanque.

Su funcionamiento inicia con la emulsión entrando al área de desgasificación, donde se produce la liberación del gas remanente a través del sistema de venteo. Seguidamente, la fase líquida desciende por el tubo desgasificador y entra a la zona del agua de lavado a través de un distribuidor, el cual se encarga de esparcir la emulsión lo más finamente posible a fin de aumentar el área de contacto entre el agua de lavado y la emulsión, favoreciendo así la coalescencia de las partículas de agua. Este distribuidor se encuentra ubicado por debajo de la interfase agua-aceite para lograr que el flujo de la emulsión ocurra a través de la zona con alto corte de agua.

Figura 28. Esquema de un gunbarrel.



Fuente: ARNOLD, Ken³⁷. Modificado.

La emulsión fluye a través del agua en el interior del tanque de lavado siguiendo la trayectoria forzada por baffles internos que permiten incrementar el tiempo de residencia. El petróleo por ser más liviano que la emulsión asciende pasando a formar parte de la zona correspondiente al petróleo deshidratado. El crudo es retirado a través de una tubería que permite controlar el nivel total de fluido en el tanque, mientras que el agua fluye a través de una *water leg* o pierna de agua que permite controlar hidráulicamente la posición de la interfase al interior del tanque. El tiempo de retención normalmente se encuentra entre 3 y 36 horas para estos equipos.

³⁷ ARNOLD, Ken; STEWART, Maurice. Surface production operations: Design of oil-handling systems and facilities. Volumen 1, Tercera edición. Editorial Elsevier. Estados Unidos, 2008.

Las ventajas del gunbarrel incluyen sencillez de operación, ausencia de partes móviles evitando desgastes excesivos y cambio frecuente de piezas, y su costo relativamente económico comparado con otros equipos empleados para la misma función. Entre sus desventajas se tiene que este proceso de deshidratación se ve afectado por altas velocidades de flujo, exceso de gas, descensos en la temperatura del fluido y recuperación de emulsiones envejecidas. Por ende, la eficiencia del mismo depende del control total de estas variables.

Además, su gran tamaño impide que sean utilizados en plataformas marinas, su altura representa riesgos en zonas de vientos fuertes, y tienen poca versatilidad debido a que para realizar modificaciones debe desmontarse en su totalidad, operación la cual implica semanas e incluso meses de tiempo muerto.

Estos tanques son utilizados generalmente en campos pequeños donde los requerimientos de calentamiento sean mínimos o inexistentes para la separación de la emulsión. Cuando se requiere calentamiento la forma más común es la de precalentar la corriente de crudo y emulsión antes de que entre al tanque de lavado, lo cual se puede lograr utilizando el mismo crudo caliente deshidratado y un intercambiador de calor en la entrada. Entre los equipos más utilizados por la industria petrolera se tienen los tanques de lavado de tipo helicoidal, los de tipo rasurado, concéntrico o araña.

3.2.2 Tratador centrífugo. Los tratadores centrífugos se basan en la adición de un componente rotacional al proceso de asentamiento gravitacional de las partículas dispersas, que permita reducir el espacio y el tiempo de residencia requeridos para llevar a cabo el rompimiento de la emulsión y la separación de las fases (Ver Figura 29).

Figura 29. Vista exterior de un tratador centrífugo.

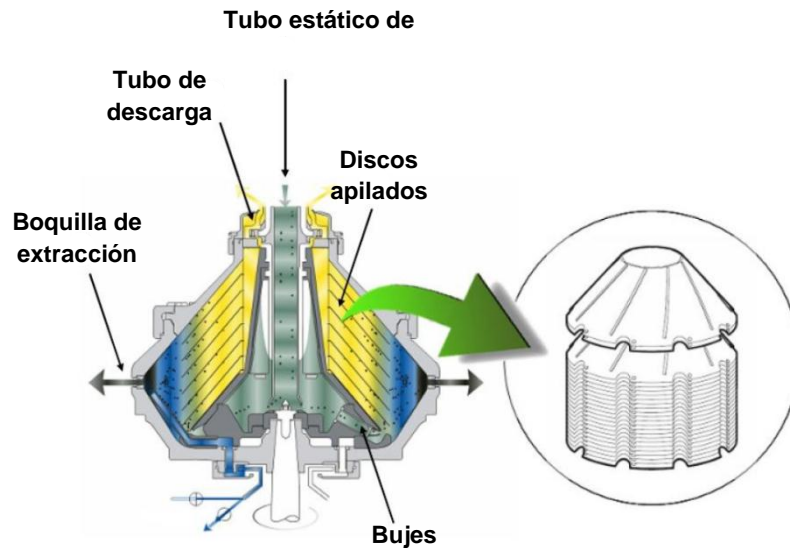


Fuente: MONTES, Erik G³⁸.

Se inicia el proceso entrando la emulsión a la centrífuga a través de un tubo estático de alimentación, luego llegando al fondo del equipo por medio de los bujes, y más adelante ascendiendo a la zona de discos apilados, los cuales se encuentran rotando con un frecuencia de 3000 revoluciones por minuto (rpm) aproximadamente. Esto imprime una fuerza de arrastre rotacional que permite que los componentes pesados (agua y sólidos) se desplacen radialmente hacia la zona externa o boquillas de extracción, permitiendo retirarlos de forma continua. Por último, el crudo deshidratado asciende por la centrífuga hacia la tubería de descarga ubicada en la parte superior del equipo (Ver Figura 30 y 31).

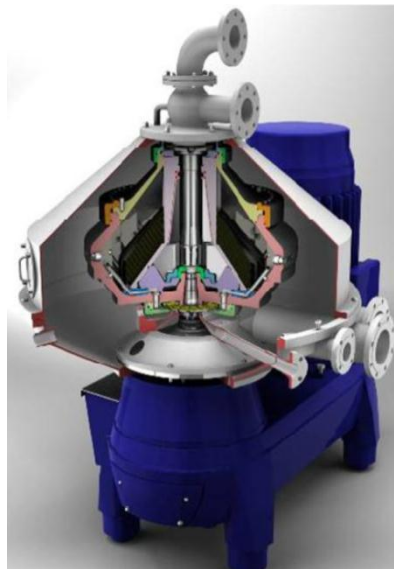
³⁸ MONTES PÁEZ, Erik Giovanni. Tecnologías de tratamiento de emulsiones en campos petroleros. Escuela de Petróleos, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2010.

Figura 30. Esquema del funcionamiento de un tratador centrífugo.



Fuente: MONTES, Erik G³⁹. Modificado.

Figura 31. Corte vertical del interior de un tratador centrífugo.



Fuente: MONTES, Erik G³⁹.

³⁹ MONTES PÁEZ, Erik Giovanni. Tecnologías de tratamiento de emulsiones en campos petroleros. Escuela de Petróleos, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2010.

Debido a que en los tratadores centrífugos se introduce una nueva fuerza al proceso de asentamiento gravitacional, se requiere modificar la Ley de Stokes para reemplazar la fuerza gravitacional por la fuerza centrífuga, tal y como se puede observar en la Ecuación 7, en donde la velocidad de separación (V) esta en función del diámetro de partícula en micras (d), la diferencia de densidad de las fases dispersa y continua ($\rho_d - \rho_c$), la viscosidad de la fase continua (μ_c), la velocidad angular (ω) y la distancia desde el centro de rotación (r).

$$V = \frac{d^2 \times (\rho_d - \rho_c)}{18\mu_c} \times \omega^2 r \quad (7)$$

De acuerdo con esta ecuación, al tener altas velocidades de rotación se generarán también altas velocidades terminales de sedimentación y por ende una mayor eficiencia en el proceso de separación, lo cual permite que pequeñas gotas de agua, e incluso sólidos finos que no se asientan empleando otros métodos como los gunbarrels, logren precipitarse y separarse del crudo.

Cada tratador centrífugo tiene capacidad para manejar hasta 80000 barriles fiscales por día, constituyéndose en una opción muy atractiva para el manejo total de la producción de un campo promedio. Cuando el volumen total excede esta cantidad, se suele instalar varios equipos e tratamiento centrífugo en paralelo.

Dentro de las ventajas representativas de estos equipos se tiene la alta capacidad por cada unidad de centrifugación, mayor eficiencia para retirar pequeñas partículas emulsionadas y sólidos de grano fino, amplio rango de operación en términos de corte de agua, menor requerimiento de calor y solventes, entre otras.

A su vez, estos tratadores presentan desventajas como el manejo muy limitado de gas libre (no mayor al 5%), alto consumo de energía (aumento de costo operacional), y manejo precario de fluidos con altos cortes de sólidos por problemas de erosión en las partes móviles.

3.3 TRATAMIENTO QUÍMICO

El método más comúnmente utilizados para el tratamiento de emulsiones es la adición de químicos que permitan la ruptura de la misma, llamados desemulsificantes. Estos químicos están diseñados para neutralizar los efectos de los agentes emulsificantes que estabilizan la emulsión. Los desemulsificantes son compuestos con superficie reactiva, que cuando son adicionados a la emulsión, tienden a migrar a la interfase agua-aceite, rompiendo o debilitando la película rígida, mejorando en últimas la coalescencia de las gotas dispersas y el proceso de separación de la emulsión.

Los desemulsificantes contienen solventes (como por ejemplo benceno, tolueno, xileno, alcoholes de cadena corta, y nafta aromática pesada), surfactantes, floculantes, agentes mojanter. Éstos actúan por un desplazamiento parcial o total de los componentes nativos estabilizantes (materiales polares) de la película interfacial que rodea las gotas dispersas en la emulsión.

Este desplazamiento también genera un cambio en propiedades como la viscosidad interfacial o elasticidad de la película protectora, produciendo una desestabilización adicional a la emulsión. En algunos casos, los químicos actúan como un agente mojanter y alterar la mojabilidad de las partículas estabilizantes, lo que permite que se genere la ruptura de la película.

Una separación óptima de emulsiones utilizando desemulsificantes requiere:

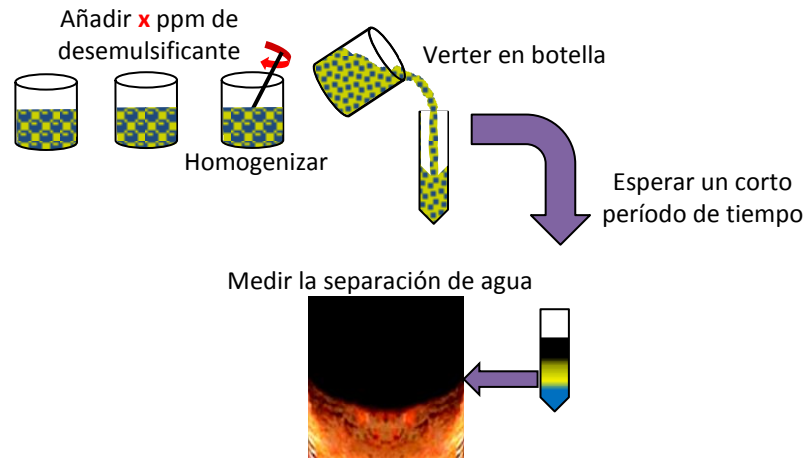
- ✓ Selección apropiada del químico para una determinada emulsión.
- ✓ Cantidad adecuada a emplear del químico.
- ✓ Asegurar una mezcla correcta de los químicos en la emulsión.
- ✓ Permitir un tiempo suficiente de retención en los tratadores de emulsiones para que las gotas se depositen.
- ✓ Adicionar calor, electricidad, coalescedores, u otros métodos para facilitar o completar la remoción del agua del crudo según las especificaciones requeridas.

3.3.1 Selección de químicos. La selección del químico correcto es crucial en el proceso de separación. El método de selección para el químico es más visto como un arte que como una ciencia. Sin embargo, se dispone de ciertos procedimientos de prueba para seleccionar apropiadamente el químico bajo ciertos estándares. Estas pruebas incluyen pruebas de botella, simuladores dinámicos, y prueba piloto en la planta de separación.

Las pruebas de botella ayudan a determinar cual químico puede ser más efectivo para romper la emulsión de campo. Para el éxito de esta prueba se requiere seleccionar una muestra representativa de la corriente de producción de la emulsión, la cual debe reunir las siguientes características:

- ✓ Contener cantidades representativas de los químicos presentes en el sistema, tales como inhibidores de corrosión y parafinas.
- ✓ Debe ser fresca para evitar la estabilización por envejecimiento de la emulsión.
- ✓ Simular las mismas condiciones de agitación y calentamiento tanto como sea posible.

Figura 32. Esquema del procedimiento para la prueba de botella.



Fuente: MARFISI, Shirley⁴⁰. Modificado.

En la Figura 32 se esquematiza el procedimiento para la aplicación de la prueba de botella, el cual consiste básicamente en preparar una serie de botellas graduadas y añadir 100 ml de la emulsión de agua en crudo fresca o preparada en laboratorio, se dosifican diferentes productos deshidratante a cada botella dejando una botella sin deshidratante (botella patrón), se homogeniza la mezcla y se colocan las botellas en un baño termostático a la temperatura deseada. Cada 30 min se lee el volumen de agua coalescida y se observa la calidad de la interfase, del agua separada y de las paredes del tubo. Con esta data se construye la gráfica de porcentaje de agua separada en función del tiempo, así como la gráfica de estabilidad, que permite conocer el tiempo necesario para separar 1/2 ó 2/3 del volumen de fase acuosa. Tales gráficas permiten determinar la eficiencia del deshidratante.

⁴⁰ MARFISI, Shirley; SALAGER, Jean Louis. Deshidratación de crudo: Principios y Tecnología. Cuaderno FIRP N° 853PP. Venezuela, 2004.

Existen cientos de productos desemulsificantes comerciales disponibles en el mercado que pueden ser probados, a lo que se le adiciona el cambio de condiciones en las facilidades de separación, resultando en un proceso tedioso y muy lento de selección, especialmente en facilidades más grandes. Al final del proceso de selección, para asegurar un buen desempeño del emulsificante sobre todo el proceso de separación, éste debe:

- ✓ Disolverse en la fase continua oleosa.
- ✓ Difuminar la interfase agua-aceite teniendo en cuenta que la concentración de desemulsificante es lo suficientemente alta para cumplir con ello.
- ✓ Tener un coeficiente de división en lo posible cercano a la unidad.
- ✓ Poseer una alta tasa de adsorción en la interfase.
- ✓ Suprimir el gradiente de tensión interfacial, acelerando la tasa de drenaje de la película y promoviendo la coalescencia teniendo en cuenta que la actividad interfacial de éste sea lo suficientemente alta.

3.3.2 Dosis del químico. La cantidad del químico a adicionar también es importante, debido a que muy poco desemulsificante no remediará el problema de emulsiones, y por otro lado, una alta dosis de desemulsificante generará un detrimento económico y de eficiencia en el proceso de separación. Además, los desemulsificantes cuando son empleados en exceso pueden actuar como agentes tenso-activos, similares a los emulsificantes, generando una emulsión más apretada de la que se tenía inicialmente, y por ende haciendo el proceso contrario y estabilizando más aún la emulsión.

Debido a la variedad de desemulsificantes, tipos de crudo, equipos de superficie y demás variables en el sistema de tratamiento de emulsiones, determinar una tasa de dosificación típica o estándar para el tratamiento de emulsiones es muy complicado. Además, algunos de los químicos se consiguen en diferentes concentraciones, dificultando aún más la tarea.

La cantidad o dosis de desemulsificante requerido depende de ciertos factores y varía, según la literatura revisada, entre menos de 10 a más de 100 partes por millón (ppm) tomando como base las tasas de producción, para campos con producción primaria o secundaria. Para campos con recobro terciario (especialmente durante desplazamiento micelar o de surfactante), las tasas de desemulsificante pueden estar generalmente en el rango de miles de partes por millón (ppm), o mayores en casos extremos.

3.3.3 Puntos de inyección. Los puntos de inyección de los desemulsificantes dependerán principalmente del tipo usado. Para el caso de desemulsificantes solubles en agua, la inyección se lleva a cabo después de que el agua libre haya sido removida, puesto que de lo contrario la mayoría del químico se perdería en el drenaje. Se recomiendan tres puntos de inyección principalmente:

- ✓ Por encima del Choke, donde se presenta una violenta agitación por la disminución de la presión de cabeza de pozo a la correspondiente al separador de gas-crudo. Se considera el punto ideal de inyección.
- ✓ Por encima de la válvula de control de nivel en el separador, donde se presenta agitación en la válvula por la disminución de la presión.
- ✓ Para el caso en que el sistema de tratamiento no incluya un separador gas-aceite, el punto de inyección es colocado a 200-250 pies (ft) del tratador de emulsión

Los químicos son aplicados e inyectados usando una pequeña bomba de desplazamiento de embolo. La bomba debe ser capaz de entregar pequeñas cantidades del desémulsificante a la línea del crudo. A condiciones normales de tratamiento 1 litro del químico es usado para cada 15-20 m³ de crudo (1 Litro por 400 barriles de crudo). Es necesaria la dilución del químico con los solventes apropiados.

3.4 TRATAMIENTO TÉRMICO

El calentamiento es la segunda forma más común del tratamiento de emulsiones agua-aceite. Para entender como el tratamiento térmico ayuda en la resolución de las emulsiones agua-aceite y la separación de las gotas de agua del volumen de aceite se debe retomar la ecuación de velocidad de asentamiento o sedimentación de la gota tratada en el capítulo anterior (Ver Ecuación 5).

El calentamiento entonces actúa como reductor de la viscosidad del crudo incrementando las tasas de asentamiento del agua. Incrementos de temperatura también resulta en la desestabilización de la película rígida gracias a la reducción de la viscosidad interfacial. Además, la frecuencia de coalescencia entre las gotas de agua incrementa debido a la alta energía térmica que éstas adquieren con la adición de calor. Dicho de otra forma, el calor acelera el proceso de ruptura de la emulsión.

Con referencia a la Ecuación 5, un incremento en la diferencia entre las gravedades específicas, y por ende entre las densidades, aumenta la velocidad de asentamiento y por lo tanto promueve la separación de las gotas de agua del cuerpo del aceite.

Entonces, como el agua y el crudo son calentados, su densidad (gravedad específica) se verá reducida; sin embargo, el efecto de la temperatura en la densidad el crudo es más pronunciado que en la densidad el agua, dando como resultado que la diferencia de densidades (o gravedades específicas) se incrementa mientras la emulsión es calentada. Por ejemplo si el agua y el crudo son calentados de 60° F a 150°, se presentara un cambio en sus gravedades específicas (Ver Tabla 3).

Tabla 3. Variación de la gravedad específica con la temperatura para el agua y el crudo.

	Gravedad Específica a 60 °F	Gravedad Específica a 150 °F
Crudo	0.83	0.79
Agua	1.05	1.03
Diferencia de gravedades agua-crudo	0.22	0.24
Fuente: ABDEL-AAL, H.K ⁴¹ . Modificado.		

Sin embargo, el cambio en la diferencia de las gravedades específicas es pequeño y no tiene un efecto tan significativo como el de la viscosidad. De hecho se podría ignorar el efecto de la gravedad específica en el proceso hasta temperaturas de 200 °F. Para algunos crudos específicos, el incremento de la temperatura puede causar un efecto inverso en la diferencia de gravedades específicas.

⁴¹ ABDEL-AAL, H. K; AGGOUR, Mohamed; FAHIM, M. A. Petroleum and gas field processing. Editorial Marcel Dekker. Nueva York (Estados Unidos), 2003.

Para algunos crudos pesados, la gravedad específica del aceite y el agua será iguales a una determinada temperatura, esta situación debe ser evitada porque detendría el proceso de separación completamente. Por lo tanto se debe tener cuidado cuando se esté determinando la temperatura de tratamiento para un crudo específico.

No obstante, muy raramente estos métodos por si solos resuelven el problema de la emulsión. A su vez, el incremento de temperatura tiene algunos efectos negativos. Primero, el costo monetario para calentar el caudal de emulsión es muy elevado. Segundo, la aplicación de calor puede resultar en la pérdida de livianos en el crudo, reduciendo su gravedad API, su calidad para refinamiento y el volumen de crudo tratado. Por último, el incremento de temperatura conlleva a una tendencia incremental en la precipitación y posterior depositación de escamas, e incrementa el potencial de corrosión en las vasijas tratadoras.

La aplicación de calor a la emulsión para su ruptura debe estar basada en un completo análisis económico del complejo de facilidades en superficie para el tratamiento. La rentabilidad de adicionar calor debería ser balanceada contra mayores tiempos de tratamiento, pérdidas de livianos y la resultante reducción de los derivados del crudo tratado por ello, costos de químicos, y los costos de instalación de redes eléctricas, o adaptación.

En cuanto a los equipos para el tratamiento térmico, cabe resaltar que existen dos formas principales para suministrar calor a la emulsión: los calentadores y los tratadores térmicos.

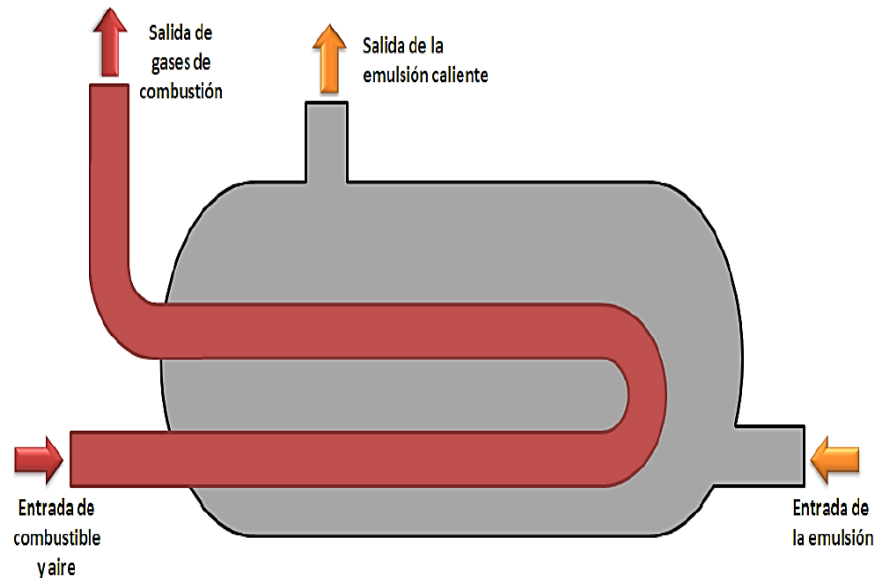
La diferencia entre estos dos equipos radica en que los tratadores térmicos tienen en su interior una sección en la cual se produce la separación de las fases, es decir, tienen salidas independientes para el crudo deshidratado y para el agua recuperada; mientras que los calentadores no permiten la separación de los flujos, por lo cual es necesario llevar esta corriente pre-calentada a otro recipiente que permita dicha separación, como por ejemplo un tanque de lavado.

3.4.1 Calentadores. Los calentadores son recipientes en los cuales se añade calor a la emulsión ya sea directa o indirectamente empleando un fluido para la transferencia del mismo.

3.4.1.1 Calentador directo. En los calentadores de tipo directo el calor es transferido por contacto directo de la corriente de alimento con la superficie interna del calentador por donde circula el combustible quemándose, la cual se denomina tubo de fuego (Ver Figura 33).

Aunque este tipo presenta problemas de sedimentos y de corrosión pueden manejar mayores volúmenes de fluidos con menor gasto de combustible que los calentadores indirectos, y además ofrecen un costo inicial menor que otros sistemas de calentamiento. Operan eficientemente (entre 75 y 90% de eficiencia) en procesos de baja presión y donde los fluidos manejados no son muy corrosivos. Para su operación es normal que se utilice gas o incluso crudo del mismo campo como combustible.

Figura 33. Esquema de un calentador directo.



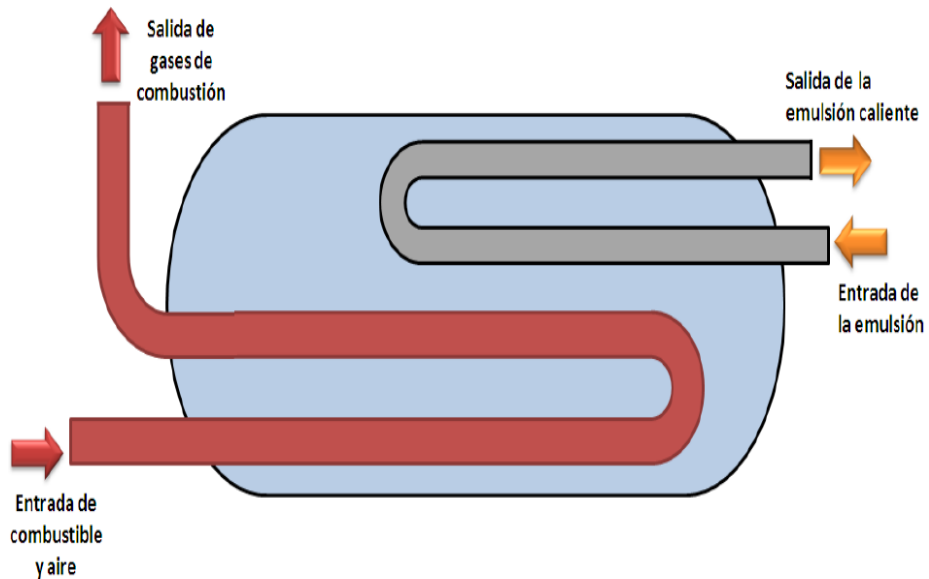
Fuente: MONTES, Erik G⁴².

Debido a que, como se mencionó antes, son susceptibles a la corrosión y a la precipitación de escamas, es importante controlar la integridad del tubo de fuego, la presencia de incrustaciones en la parte externa del tubo, presencia de sólidos residuales de la combustión en el interior del tubo, nivel de fluido del recipiente, entre otros factores determinantes en el correcto funcionamiento del equipo.

3.4.1.2 Calentador indirecto. En estos tratadores el calor se transfiere de los tubos de gases calientes a la emulsión utilizando agua como medio de transferencia. La emulsión pasa a través de tubos sumergidos en un baño de agua caliente (Ver Figura 34).

⁴² MONTES PÁEZ, Erik Giovanni. Tecnologías de tratamiento de emulsiones en campos petroleros. Escuela de Petróleos, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2010.

Figura 34. Esquema de un calentador indirecto.



Fuente: MONTES, Erik G⁴³.

Este tipo de calentador es más seguro puesto que no existe contacto directo entre la fuente de calor y la emulsión, pero a su vez, esto disminuye la eficiencia térmica puesto que se generan mayores pérdidas de calor en el proceso. También es importante resaltar que este tipo de calentador requiere de un seguimiento continuo a los depósitos de carbonatos y otras sales que pueden generarse como producto del calentamiento del agua y la precipitación de los iones que se encuentran disueltos en ella.

Existe otra alternativa para el calentar indirectamente, la cual utiliza vapor proveniente de alguna caldera como fluido de calentamiento fluyendo alrededor de la tubería que contiene la emulsión, eliminando de esta manera el tubo de fuego.

⁴³ MONTES PÁEZ, Erik Giovanni. Tecnologías de tratamiento de emulsiones en campos petroleros. Escuela de Petróleos, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2010.

En general la cantidad de agua libre en la emulsión de crudo será un factor determinante en la escogencia del tipo de calentador a utilizar. Si el agua libre encontrada es del 1-2% se usara un calentador indirecto. Si el contenido de agua libre es suficiente para mantener un nivel alrededor del tubo de fuego, entonces se utilizara un calentador directo. Los más utilizados actualmente son los calentadores de fuego directo con cajas de fuego de tipo vertical.

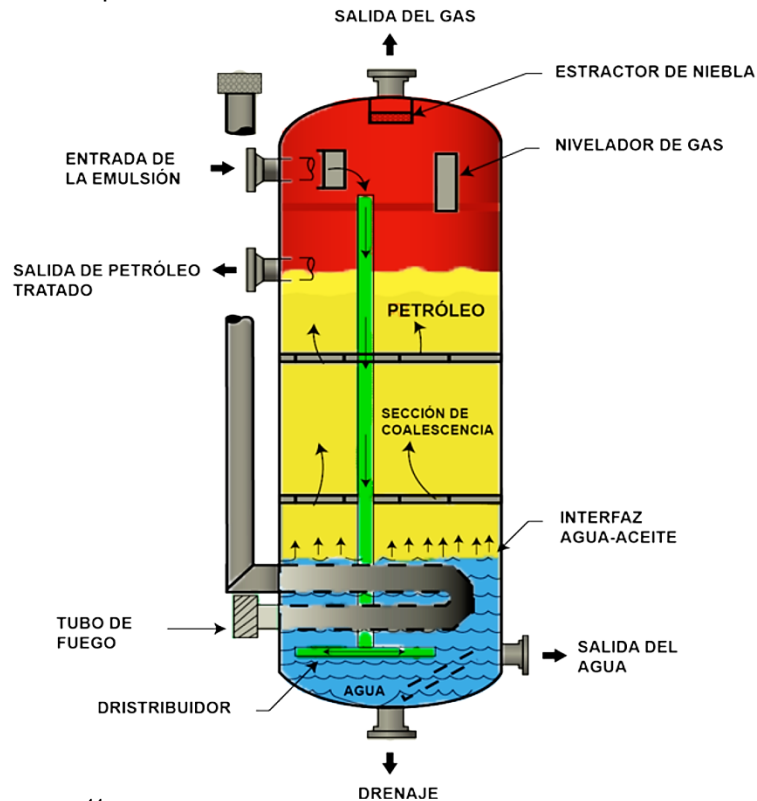
3.4.2 Tratadores térmicos. Cuando se comparan con los *Gunbarrels*, los tratadores térmicos son inicialmente menos costosos, ofrecen bajos costos de instalación, proveen gran eficiencia con el calor, proveen mayor flexibilidad y experimentan una mayor eficiencia general. Por otro lado, son más complicados de manejar, proveen menos espacio para almacenar sedimentos básicos y son más sensibles a los químicos. Debido a que los tratadores térmicos son más pequeños que otros recipientes tratadores, sus tiempos de retención son mínimos (10-30 minutos) cuando se comparan con los *Gunbarrels*.

Un problema muy común en los tratadores térmicos a tener en cuenta es la corrosión interna del conducto descendente. También, el aumento de sedimentos en las paredes o el fondo del tratador pueden causar que el nivel de la interfase aumente y que el líquido transporte aceite a la salida del tratador con agua salada. Se deben realizar inspecciones semestrales que incluya inspección por corrosión, aumento de sedimentos e incrustaciones.

Ahora bien, en cuanto a tipos de tratadores térmicos, se ofrecen muchos diseños para manejar varias condiciones tales como viscosidad, gravedades del crudo, tasas de flujo bajas y altas, corrosión y clima frío. Estos equipos pueden clasificarse de acuerdo con su configuración en verticales y horizontales.

3.4.2.1 Tratador térmico vertical. Los tratadores más comunes para un solo pozo son los tratadores verticales. El tratador térmico vertical consta de cuatro secciones principales: separación de gas, FWKO, calentamiento y lavado de agua, sección de coalescencia-asentamiento (Ver Figura 35 y 36).

Figura 35. Esquema simplificado de un tratador térmico vertical.

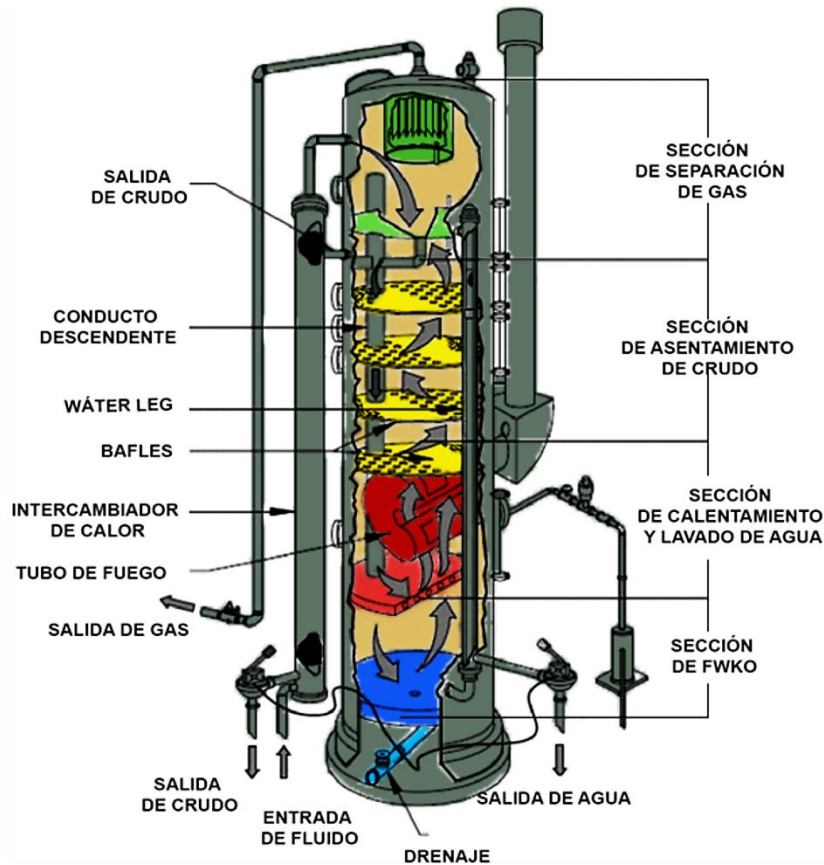


Fuente: ARNOLD, Ken⁴⁴. Modificado.

Los fluidos que llegan entran a la parte superior del tratador a la sección de separación de gas, donde este se separa del líquido y sale a través de la línea de gas. Se debe tener cuidado al dimensionar esta sección para que tenga las dimensiones adecuadas para separar el gas de la corriente de flujo entrante.

⁴⁴ ARNOLD, Ken; STEWART, Maurice. Surface production operations: Design of oil-handling systems and facilities. Volumen 1, Tercera edición. Editorial Elsevier. Estados Unidos, 2008.

Figura 36. Esquema detallado de un tratador térmico vertical.



Fuente: ARNOLD, Ken⁴⁵. Modificado.

Si el tratador está ubicado después de un separador, la sección de separación de gas puede ser muy pequeña. Esta sección debe tener un desviador de entrada y un extractor de niebla. El líquido fluye a través de un conducto descendente a la base del tratador que sirve como una sección de FWKO. Si el tratador está localizado después de un FWKO o de un separador de tres fases, la sección de fondo puede ser muy pequeña. Si se va a tratar la corriente total del pozo, esta sección debe ser dimensionada para un tiempo de retención de entre 3 y 5 minutos que permita que el agua libre se asiente.

⁴⁵ ARNOLD, Ken; STEWART, Maurice. Surface production operations: Design of oil-handling systems and facilities. Volumen 1, Tercera edición. Editorial Elsevier. Estados Unidos, 2008.

Esto minimizara la cantidad de combustible requerido para calentar la corriente de líquido que se eleva a través de la sección de calentamiento. El tubo descendente debe terminar ligeramente por debajo de la interfaz agua-aceite para que el aceite que está siendo tratado pueda ser lavado por agua, ayudando en la coalescencia de las gotas de agua en el crudo.

La emulsión sin agua libre presente sube a través de la sección de calentamiento y lavado de agua, donde el fluido es calentado, generalmente empleando un tubo de fuego para calentar la emulsión. Después que la emulsión es calentada, entra a la sección de coalescencia, donde se provee suficiente tiempo de retención para permitir a las pequeñas gotas de agua en la fase continua del aceite que coalescan y se asienten hacia el fondo. Algunas veces se instalan baffles en la sección de coalescencia para tratar emulsiones difíciles, los cuales causan que la emulsión siga un camino de ida y vuelta a través del tratador. El calentamiento causa que más gas se separe del aceite que el capturado en la cabeza de condensación.

El aceite tratado fluye hacia la salida de crudo en el tope de la sección de coalescencia y a través del intercambiador de calor de la *oil leg* o pata de aceite, donde una válvula controla el flujo. El aceite limpio calentado precalienta la emulsión entrante más fría en el intercambiador de calor de la *oil leg*. El agua separada fluye hacia fuera a través de la *water leg* o pata de agua, donde una válvula de control maneja el flujo hacia el sistema de tratamiento de agua.

Cualquier gas flasheado del aceite debido al calentamiento es capturado en la cabeza de condensación. Cualquier gas que no se condense fluye a través de una línea de eualización a la sección de separación de gas.

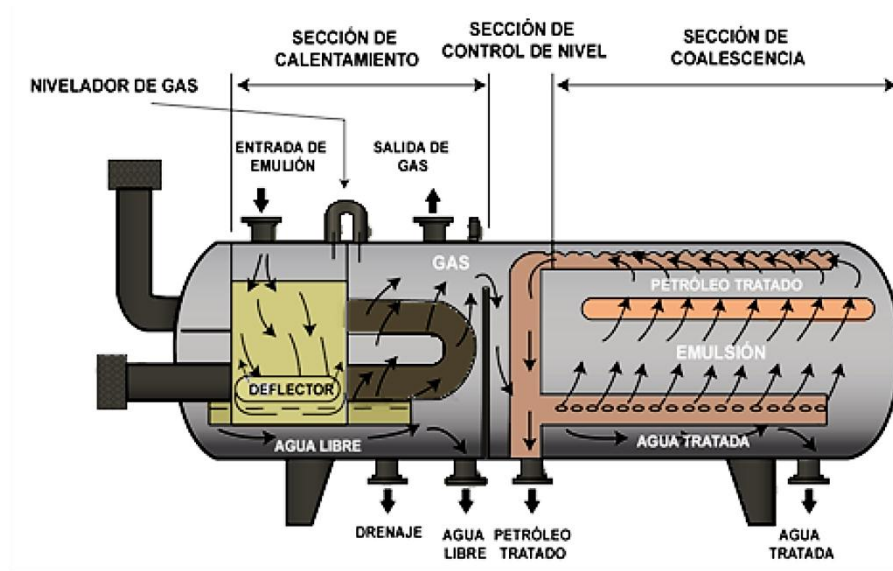
Un extractor de niebla tipo veleta remueve la niebla liquida antes de que el gas abandone el tratador. El gas liberado cuando el aceite es calentado puede crear un problema en el tratador si no es diseñado adecuadamente.

En los tratadores térmicos verticales el gas sube a través de la sección de coalescencia. Si una gran cantidad de gas es liberada, puede crear suficiente turbulencia y perturbación para inhibir la coalescencia. Igualmente importante es el hecho que pequeñas burbujas de gas tienen una atracción por los materiales con superficies activas y por lo tanto, las gotas de agua. Además, ellas tienden a mantener las gotas de agua e impedir su asentamiento e incluso pueden llevarlas a la salida del aceite.

El nivel de aceite es mantenido por unas válvulas neumáticas y la interfaz agua-aceite es regulada por un controlador de nivel de interfase o por un *water leg* externo ajustable. Los tratadores térmicos verticales están disponibles en 20 y 27 pies de altura. Estas alturas proveen suficiente presión estática para prevenir la vaporización del aceite. El diseño detallado del tratador, incluyendo los diseños internos, debe ser responsabilidad del proveedor de los equipos.

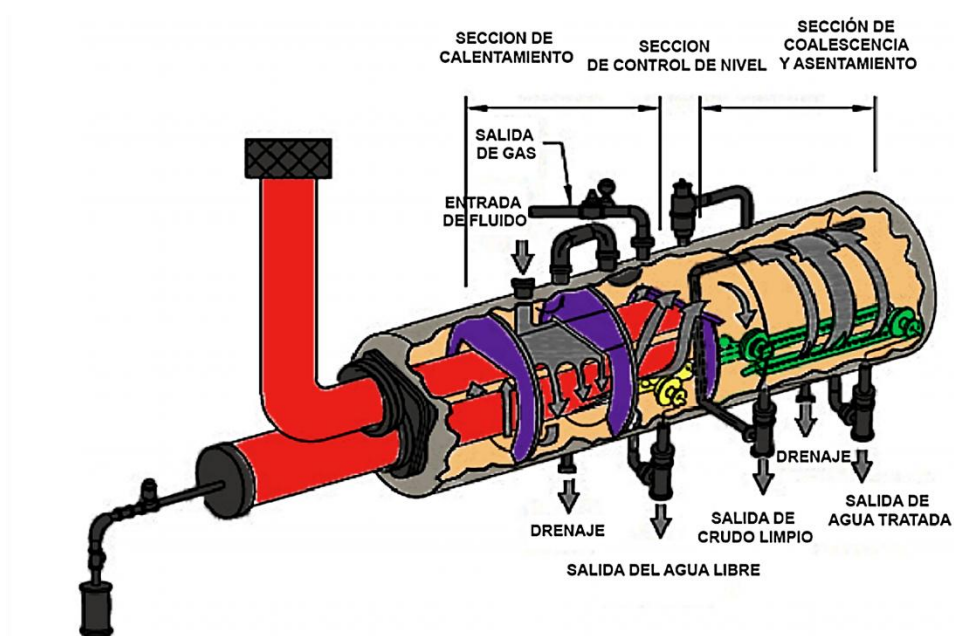
3.4.2.2 Tratador térmico horizontal. Para la mayoría de las corrientes provenientes de múltiples pozos, se requieren normalmente tratadores térmicos horizontales. Los detalles de diseño pueden variar de un fabricante a otro, pero los principios son los mismos. Este tipo de tratador térmico consta de tres secciones principales: la frontal (zona de calentamiento y lavado de agua), la central (zona de control de nivel), y la sección de coalescencia (Ver Figura 37 y 38).

Figura 37. Esquema simplificado de un tratador térmico horizontal.



Fuente: ARNOLD, Ken⁴⁶. Modificado.

Figura 38. Esquema detallado de un tratador térmico horizontal.



Fuente: ARNOLD, Ken⁴⁷. Modificado.

⁴⁶ ARNOLD, Ken; STEWART, Maurice. Surface production operations: Design of oil-handling systems and facilities. Volumen 1, Tercera edición. Editorial Elsevier. Estados Unidos, 2008.

Los fluidos que llegan entran a la sección frontal (calentamiento y lavado de agua) a través de la entrada de fluidos y bajan sobre la capa deflectora donde el gas es flasheado y removido. Los materiales más pesados (agua y sólidos) fluyen al fondo mientras que los materiales más livianos (gas y aceite) fluyen hacia el tope.

El gas libre escapa y pasa a través del aro ecualizador de gas hacia la salida de gas. El aceite, la emulsión y el agua libre pasan alrededor de la capa deflectora hacia el rociador localizado ligeramente debajo de la interfaz agua-aceite, donde el líquido es lavado con agua, y la poca agua libre remanente es separada. Para crudos con bajo contenido de gas, se puede requerir un gas de cubierta para mantener la presión del gas.

El aceite y la emulsión son calentados mientras suben pasando los tubos de fuego y son llevados a la cámara de control de nivel. Como el agua libre se separa de los fluidos entrantes en la sección frontal, el nivel de agua se eleva. Si el agua no es removida, continuara subiendo hasta que desplace toda la emulsión y comience a derramarse sobre la presa hacia la cámara de control de nivel. Por otro lado, si el nivel de agua fuera muy bajo, la sección frontal no sería capaz de lavar con agua el aceite y la emulsión entrantes, lo que reduciría la eficiencia del tratador.

Por lo tanto, es importante controlar eficazmente la interfaz agua-aceite en la sección frontal. Esta interfaz es controlada ya sea por un controlador de nivel de interfaz, que opera una válvula de salida para el agua libre, o una sonda de resistencia. Si la válvula de salida del agua se mantiene abierta, todo el crudo y el agua saldrán, dejando expuestos el tubo de fuego o la fuente de calor.

⁴⁷ ARNOLD, Ken; STEWART, Maurice. Surface production operations: Design of oil-handling systems and facilities. Volumen 1, Tercera edición. Editorial Elsevier. Estados Unidos, 2008.

Se requiere un sensor de seguridad de cierre de bajo nivel en la parte superior de la sección frontal. Este sensor asegura que el líquido siempre este por encima del tubo de fuego.

Si la válvula de salida de agua presenta un mal funcionamiento o falla al abrirse, el líquido que rodea al tubo de fuego caerá, y el calor generado por el tubo de fuego no será absorbido, provocando un posible daño por sobrecalentamiento. Además, si el nivel por encima del tubo de fuego cae, el sensor de seguridad de cierre de bajo nivel enviará una señal que cierra la válvula de combustible que alimenta al tubo de fuego. También es importante controlar la temperatura del fluido en la sección frontal. Por lo tanto se requiere un controlador de temperatura que maneje el combustible que irá al quemador o a la fuente de calentamiento en la parte superior de la sección de calentamiento-lavado de agua.

Un controlador de nivel en la sección de control de nivel maneja la válvula de salida del aceite limpio para su línea de salida. Esta válvula regula el flujo de aceite fuera del recipiente, lo que mantiene el líquido en una condición comprimida. Cuando la válvula de salida del aceite limpio se abre, la presión del gas en la sección de control de nivel fuerza a la emulsión a fluir a través del rociador y empuja la salida del aceite limpio a través de un colector. Cuando la válvula de salida del aceite se cierra, el flujo de la emulsión hacia la sección de coalescencia-asentamiento se detiene y se previene la entrada de gas a esta sección.

El aceite y la emulsión fluyen a través de un rociador a la parte posterior de la sección de coalescencia del recipiente, la cual está llena de fluidos. El rociador distribuye el flujo homogéneamente a través de la longitud de esta sección.

Al ser más liviano que la emulsión y el agua, el aceite tratado sube hacia el colector de aceite limpio, donde es recogido y pasa el tratador a través de la salida de aceite limpio. El colector es dimensionado para mantener un flujo vertical uniforme del aceite, y las gotas coalescentes de agua caen a contracorriente de la fase continua de aceite que sube.

La sección frontal (calentamiento y lavado de agua) debe ser dimensionada para manejar el asentamiento del agua libre y el calentamiento del aceite. La sección de coalescencia debe ser dimensionada para proveer un tiempo de retención adecuado para que ocurra la coalescencia de las gotas de agua y su asentamiento hacia abajo a contracorriente del flujo ascendente del aceite.

La mayoría de los tratadores térmicos construidos hoy en día no utilizan tubos de fuego. El calor es añadido a la emulsión en un intercambiador de calor antes de que la emulsión entre al tratador. En estos casos la sección de entrada del tratador puede ser mucho más pequeña porque su propósito principal será desgasificar la emulsión antes que fluya hacia la sección coalescente.

Algunos tratadores térmicos son diseñados únicamente con la sección de coalescencia. En estos casos la corriente de entrada es bombeada a través de un intercambiador de calor a un tratador que opera a una presión lo suficientemente alta para mantener el aceite por encima de su punto de burbuja. Además, el gas no aparecerá en la sección coalescente del tratador.

3.5 TRATAMIENTO ELÉCTRICO

La electricidad de alto voltaje (redes eléctricas) es a menudo una manera efectiva de romper emulsiones. Se tiene la teoría generalizada de que las gotas de agua están asociadas a cargas eléctricas y, cuando se les aplica un campo eléctrico, las gotas se mueven más rápido y se genera atracción, colisionando unas con otras, y al final facilitándose el proceso de coalescencia.

Este campo eléctrico intenso generado por la aplicación de un alto voltaje entre dos electrodos también distorsiona la película interfacial mediante el reordenamiento de las moléculas polares, por lo cual debilita dicha capa y promueve la coalescencia. Como efecto final se obtiene un aumento del tamaño de las gotas, lo que permite la sedimentación por gravedad.

El sistema eléctrico consiste en un transformador y unos electrodos que proveen corriente alterna o continua de alto voltaje (entre 10000 y 34000 voltios aproximadamente), y el dispositivo en general tiene características similares a las de los equipos de separación mecánica presurizados. Estos electrodos generalmente se encuentran ubicados de tal forma que entreguen un campo eléctrico perpendicular a la dirección del flujo. La distancia entre electrodos es ajustable para que el voltaje pueda ser variado y cumplir con los requerimientos de la emulsión que está siendo tratada.

La deshidratación electrostática es raramente utilizada sola como un método de ruptura de emulsiones. Es generalmente utilizada en conjunto con aplicaciones químicas y térmicas, mayormente como un potenciador de la separación en tanto favorece la coalescencia y por ende el asentamiento.

Es importante resaltar que el correcto funcionamiento de este tratamiento está ligado a condiciones propias de los fluidos de la emulsión como la necesidad de un crudo de viscosidad menor a 50 cp y conductividad no mayor a 10^{-6} m Ω , una diferencia de gravedad específica entre el crudo y el agua en lo posible mayor a 0.001, y una agua con salinidad mínima de 10000 partes por millón.

Invariablemente, el empleo de la deshidratación electrostática resultará en una reducción de la adición de calor. Menores temperaturas resultan en economía en términos de combustible empleado en el tratamiento térmico, reduciendo también problemas de escamas y corrosión, y reduciendo las pérdidas de livianos y por ende recuperando calidad en el crudo saliente con respecto a la aplicación solamente de métodos térmicos. La aplicación de electricidad también puede conllevar a una reducción en el uso de químicos desemulsificantes.

La temática de tratamiento eléctrico y sus fundamentos, sus diferentes variantes y sus características distintivas serán tratados con mayor detalle en capítulos posteriores.

4. PROCESO DE DESALACIÓN DEL CRUDO PESADO

4.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

Las sales minerales están presentes en el crudo en diversas formas: como cristales solubilizados en el agua emulsionada, productos de corrosión o incrustación insolubles en agua y compuestos organometálicos como las porfirinas. Después de la deshidratación o del rompimiento de la emulsión, el petróleo crudo todavía contiene un pequeño porcentaje de agua remanente. Los tratamientos típicos anteriormente mencionados (adición de desemulsificante, calentamiento, sedimentación y tratamiento electrostático) pueden reducir el porcentaje de agua del crudo a rangos de 0,2-1 % volumen.

El proceso de desalación consiste en la remoción de las pequeñas cantidades de sales inorgánicas, que generalmente quedan disueltas en el agua remanente luego del proceso de rompimiento de la emulsión y deshidratación del crudo, mediante la adición y mezclado de una corriente de agua de dilución (con bajo contenido de sales) a la corriente de crudo deshidratado con salmuera remanente. Posteriormente, se efectúa la separación de las fases agua y crudo, hasta alcanzar las especificaciones requeridas de contenido de agua y sales en el crudo (%BSW).

Con estos dos pasos se produce una menor salinidad en el agua residual en el aceite producido. El agua de dilución en la desalación no tiene que ser necesariamente agua fresca, puesto que cualquier cantidad de agua con un contenido de sal inferior a la del agua producida se puede utilizar.

Cuando el crudo es procesado en las refinerías, la sal puede causar numerosos problemas operativos, tales como disminución de flujo, taponamiento, reducción de la transferencia de calor en los intercambiadores, taponamiento de los platos de las fraccionadoras. La salmuera es también muy corrosiva y representa una fuente de compuestos metálicos que puede envenenar los costosos catalizadores. Por lo tanto, la eliminación del exceso de sal en el crudo de alimento para las refinerías es un paso obligatorio, usualmente desalando el crudo de entrada entre 15 y 20 PTB para el caso de refinerías sencillas, y en aquellas de conversión profunda las especificaciones pueden ser más exigentes, alcanzando valores de 1 PTB (Libras de sal expresadas como cloruro de sodio equivalente por cada mil barriles de crudo).

El desalado en campo reduce la corrosión corriente aguas abajo (bombeo, ductos, tanques de almacenamiento). Adicionalmente la salmuera producida puede ser adecuadamente tratada para que no cause los daños mencionados en los equipos y sea inyectada al yacimiento, resolviendo un problema ambiental, y posiblemente ayudando a procesos de recuperación mejorada. En ausencia de cristales de sal sólidos, el contenido de sal en el crudo deshidratado está directamente relacionado con el porcentaje de agua y con la concentración de salinidad de la fase acuosa (en ppm de NaCl).

4.2 EQUIPOS PARA EL DESALADO DEL CRUDO

4.2.1 Desaladores. Dado que el contenido de sal está directamente relacionado con la cantidad de agua residual, los mejores equipos de desalado eliminan la mayor cantidad de agua posible. Cualquier dispositivo que elimine agua del crudo puede ser usado como un desalador. Sin embargo, la mayoría de los desaladores empleados son tratadores electrostáticos horizontales.

Este tipo de tratadores producirán los niveles más bajos de agua residual de todos los tratadores. La Figura 39 ilustra un tratador electrostático horizontal del tipo que normalmente se utiliza en las operaciones de desalado. Debido a que contenidos de agua muy bajos son requeridos, el crudo suele ser bombeado a través del desalador a presiones por encima de su punto de burbuja. Además, la temperatura del crudo que es desalado es determinada por intercambiadores de calor aguas arriba. Por lo tanto, existe la necesidad de una entrada de desgasificación y una sección de calentamiento como se muestra en el típico tratador electrostático horizontal discutido anteriormente.

Figura 39. Tratador electrostático horizontal para el desalado del crudo.



Fuente: http://www.engtechinc.com/electrostatic_treater.php.

4.2.2 Equipos de mezclado.

4.2.2.1 Válvulas tipo globo. Una válvula tipo globo (Ver Figura 40) de estrangulamiento manual es uno de los métodos más simples para promover la mezcla del agua de dilución y el agua salada.

La caída de presión resultante de forzar el aceite y el agua a través de una válvula de estrangulación se puede utilizar para cortar el agua y la mezcla de las gotas en el aceite.

Figura 40. Válvula tipo globo.



Fuente: www.sealmechvalves.com/globe_valves.htm

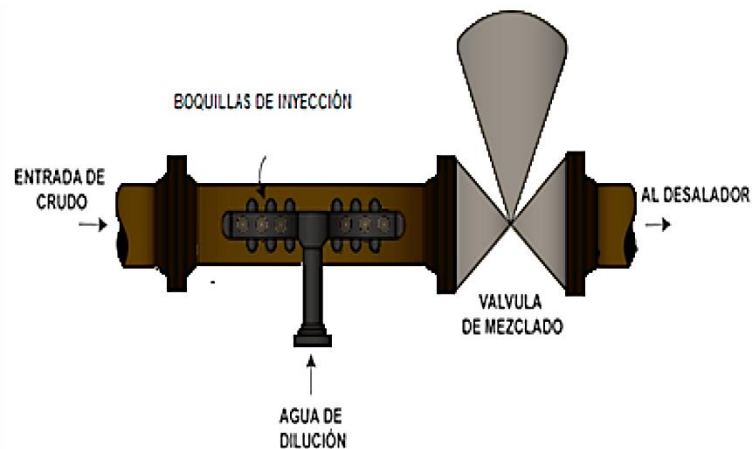
La principal desventaja de cualquier válvula manual es su incapacidad para ajustarse automáticamente para los cambios en la tasa de flujo del aceite. A medida que el caudal varía, la caída de presión y por lo tanto la eficiencia de la mezcla varía. Por lo tanto, si el flujo de petróleo aumenta de manera significativa, la caída de presión puede aumentar hasta el punto que la emulsión mezclada resultante es casi imposible de tratar.

Es posible automatizar la válvula de globo para evitar “sobre mezclado”. Un regulador de presión diferencial se puede implementar para controlar la caída de presión a través de la válvula globo. Este sistema se ajusta automáticamente para el cambio de las tasas de flujo y mantiene una caída de presión controlada.

Las válvulas globo convencionales de simple asiento o el equilibrado de doble asiento son de uso común y dan buenos resultados. Si una válvula de simple asiento es usada, se debe proveer de alguna forma de premezclado antes de la válvula para asegurar una distribución uniforme de las gotas de agua y su tamaño. Las válvulas globo de doble asiento ofrecen menores caídas de presión que las de simple asiento y pueden eliminar la necesidad del proceso de premezclado.

4.2.2.2 Boquillas de inyección. El premezclado corriente arriba se realiza con frecuencia ya sea con boquillas de inyección o mezcladores estáticos. Como se muestra en la Figura 41, un método común de premezclado del agua y del aceite consiste en utilizar un sistema de boquillas de inyección. El agua es bombeada a través de las boquillas y luego se distribuye a lo largo de la corriente de aceite. Estos sistemas son eficaces y son generalmente menos costosos que los mezcladores estáticos.

Figura 41. Esquema de un sistema de boquillas de inyección para premezclado de agua y crudo.

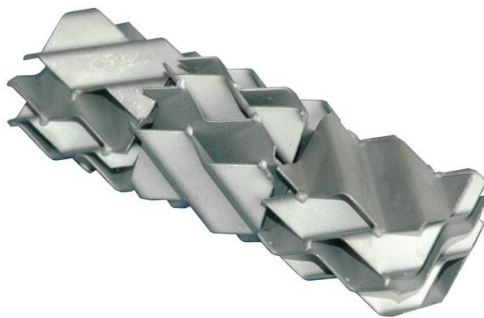


Fuente: ARNOLD, Ken⁴⁸. Modificado.

⁴⁸ ARNOLD, Ken; STEWART, Maurice. Surface production operations: Design of oil-handling systems and facilities. Volumen 1, Tercera edición. Editorial Elsevier. Estados Unidos, 2008.

4.2.2.3 Mezcladores estáticos. Los mezcladores estáticos usan piezas de lámina corrugada, y generalmente se dividen en muchos caminos paralelos que se subdividen y se recombinan mientras el flujo pasa a través del mezclador. Las capas alternas de ondulaciones son perpendiculares entre sí para que el fluido atraviese una serie de aberturas relativamente pequeñas (Ver Figura 42).

Figura 42. Mezclador estático.



Fuente: www.stamixco-usa.com/products/corrugated-plate-static-mixer/default.html.

Los mezcladores estáticos producen una estrecha gama de tamaños de gota como resultado de dos fenómenos opuestos: Las gotas grandes se cizallan por la acción de la mezcla en las pequeñas aperturas, mientras que al mismo tiempo estos mezcladores proporcionan grandes superficies donde las gotas pequeñas se pueden recoger y coalescer. En teoría, la capacidad de coalescencia mejora el rendimiento de los equipos de deshidratación debido a la reducción en el número de gotas muy pequeñas lo que hace más fácil la deshidratación y disminuye la posibilidad de crear una emulsión estable intratable, durante el proceso de mezcla.

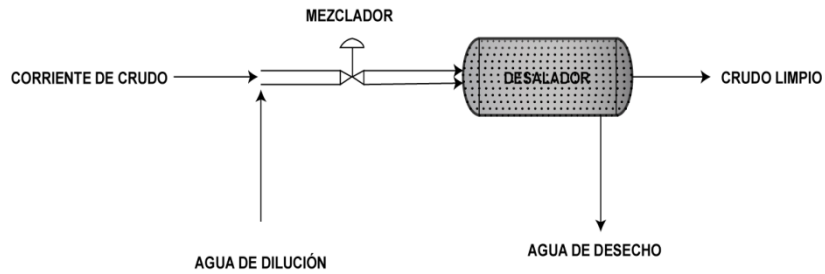
Los mezcladores estáticos están dimensionados para proporcionar un tamaño de gota promedio mediante ecuaciones empíricas basadas en datos de prueba. El tamaño promedio de la gota para el desalado debe ser aproximadamente entre 250 y 500 μm , este tamaño es una función del caudal del aceite. La principal desventaja de este tipo de mezcladores es que no se puede ajustar a las variaciones de flujo, por lo tanto, si el flujo de aceite puede variar en una proporción de 3:1, o más, los mezcladores estáticos no se deben utilizar como el único dispositivo de mezcla.

4.3 DISEÑO DEL PROCESO DE DESALADO

Para el proceso de desalado y su respectivo diseño deben considerarse el número de etapas de desalación de acuerdo con el requerimiento de extracción de sales del crudo, constando de los siguientes posibles diseños: de una etapa y de dos etapas o más etapas, siendo este último instalado para situaciones en las que se disponga de un crudo con contenido de sales muy elevado.

4.3.1 Desalado de una etapa. La Figura 43 es un esquema de un sistema de desalado de una etapa, sistema en el cual el agua de lavado, también llamada agua de dilución, es inyectada en el flujo de petróleo procedente de la etapa de deshidratación y luego se mezclan. El resultado de la mezcla es la formación de emulsiones agua-aceite, por lo que luego el aceite debe entrar al desalador donde se extrae el agua, que una vez separada se transfiere al sistema tratamiento del agua de la producción del campo para su posterior vertimiento y/o reinyección.

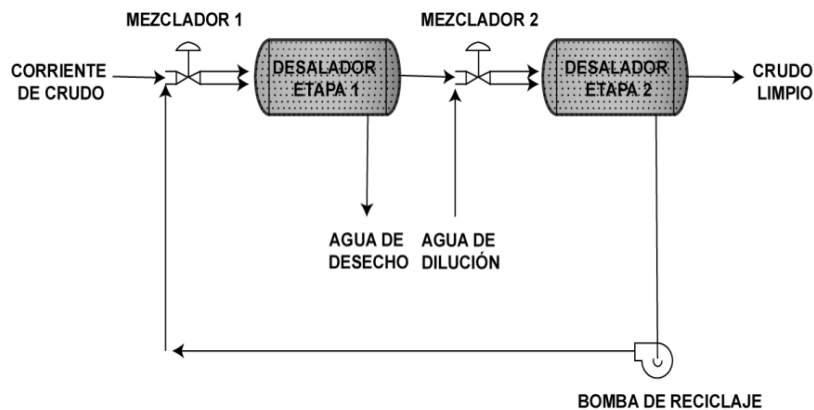
Figura 43. Esquema de un sistema de desalado de una etapa.



Fuente: ARNOLD, Ken⁴⁹.

4.3.2 Desalado de dos etapas. En la Figura 44 se puede evidenciar un esquema de un sistema de desalado de dos etapas, con capacidad de reciclaje de agua de dilución, en el cual el agua de dilución es agregada en la segunda etapa y toda, o parte, del agua de desecho en la segunda etapa es reciclada y usada como agua de dilución para la primera etapa de desalado. Los sistemas de desalado de dos etapas son normalmente usados para minimizar los requerimientos de agua de lavado, si se necesita más desalado, es posible añadir más etapas de una manera similar.

Figura 44. Esquema de un sistema de desalado de dos etapas.



Fuente: ARNOLD, Ken⁵⁰.

⁴⁹ ARNOLD, Ken; STEWART, Maurice. Surface production operations: Design of oil-handling systems and facilities. Volumen 1, Tercera edición. Editorial Elsevier. Estados Unidos, 2008.

4.4 DETERMINACIÓN DEL REQUERIMIENTO DE AGUA DE DISOLUCIÓN

Desde el punto de vista operativo, se ha llegado al consenso de que el agua de dilución W_D añadida en los procesos de desalado de petróleo esta en el rango de 5-10% de volumen, basado en la cantidad de agua remanente y su salinidad. La siguiente correlación (Ver Ecuación 8) se ha desarrollado para determinar W_D como una función de la cantidad de agua remanente como porcentaje en volumen (W_R), la salinidad del agua remanente en partes por millón (S_R), la salinidad del agua de dilución en partes por millón (S_D), y el porcentaje de eficiencia de mezcla entre las dos fases (E).

$$W_D = \frac{2.5 \times 10^3 (W_R)^{0.01533}}{(S_D)^{0.2606} \times (S_R)^{0.0758} \times (E)^{0.6305}} \quad (8)$$

Después de la mezcla entre el agua remanente y el agua de dilución, la corriente de salida presentará una nueva concentración de sales promedio expresada en partes por millón (S_B), la cual se puede determinar aplicando un balance de materia sencillo y luego obteniendo la función deseada (Ver Ecuaciones 9 y 10).

$$(E \times W_D \times S_D) + (W_R \times S_R) = S_B(E \times W_D) \quad (9)$$

$$S_B = \frac{(E \times W_D \times S_D) + (W_R \times S_R)}{(E \times W_D) + W_R} \quad (10)$$

⁵⁰ ARNOLD, Ken; STEWART, Maurice. Surface production operations: Design of oil-handling systems and facilities. Volumen 1, Tercera edición. Editorial Elsevier. Estados Unidos, 2008.

5. FUNDAMENTOS DEL PROCESO DE ELECTROCOALESCENCIA EN EL TRATAMIENTO DE EMULSIONES

La electrocoalescencia es usualmente la denotación de un proceso industrial de separación aplicado en el campo de la emulsiones agua en aceite, donde los campos eléctricos son utilizados para forzar la unión de pequeñas gotas de agua formando unas de mayor tamaño que se asentarán más rápidamente en un tanque de separación. Los coalescedores electrostáticos tienen el potencial de ser una alternativa al tratamiento térmico, el cual involucra un alto consumo de energía, y al uso de químicos desémulsificantes, los cuales pueden no ser tan atractivos desde el punto de vista económico y del medio ambiente.

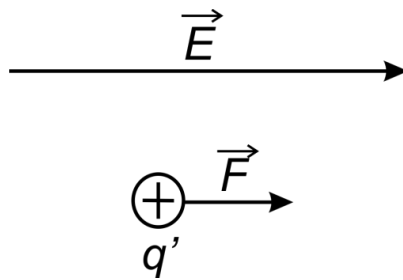
Los efectos electrostáticos surgen de la gran diferencia de propiedades entre el agua y el crudo, teniendo el agua un valor de permisividad dieléctrica y conductividad mucho mayor que para el crudo (en la práctica el agua es a menudo considerada perfectamente conductiva como los metales).

Tener comprensión mínima del mecanismo de unión de las gotas y la coalescencia final, y los principios físicos involucrados, implica que la eficiencia de un electrocoalescedor puede decrecer e incluso no existir dependiendo de la fuente de aceite y las condiciones de operación de equipo. Por ello se entiende que, al ser cada pozo, cada campo y cada crudo algo particular, único y diferente en cierta medida de los demás, es necesario de la misma manera un diseño y unos parámetros operativos del equipo únicos para alcanzar la máxima eficiencia posible en el tratamiento electrostático de emulsiones, lo cual solo se logra teniendo un conocimiento a fondo del proceso, desde los principios eléctricos involucrados a nivel molecular hasta la hidráulica de los fluidos en el tratador.

5.1 PRINCIPIOS ELECTROSTÁTICOS

5.1.1 Campos electrostáticos y fuerzas en el vacío. La teoría electrostática explica como las cargas eléctricas crean una fuerza sobre otras cargas y como el campo y el potencial eléctrico son definidos en el espacio. Se dice que existe un campo eléctrico (E) en un punto donde una carga estacionaria (q) experimenta una fuerza (F), tal y como se muestra en la Figura 45, y este campo eléctrico se define a partir de esta fuerza y de la carga (en esta expresión positiva) de acuerdo con la Ecuación 11.

Figura 45. Campo eléctrico creado por una carga puntual experimentando una fuerza.



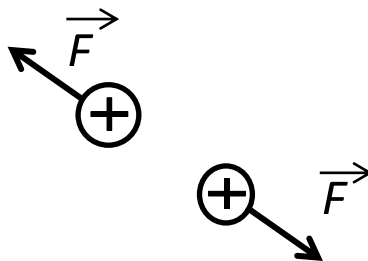
Fuente: Autores.

$$\vec{E} = \lim_{q' \rightarrow 0} \frac{\vec{F}}{q'} \quad (11)$$

El límite $q' \rightarrow 0$ es necesario para que la carga de prueba o referencia no incida en la carga fuente del campo eléctrico. Para efectos de este trabajo investigativo solo se profundizará en el campo de tipo electrostático, el cual es el tipo de campo eléctrico más simple, y es aquel que se induce con cargas estacionarias.

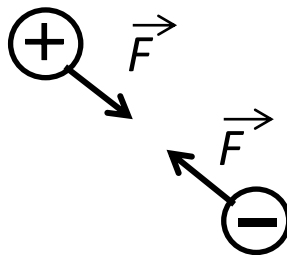
Dos cargas eléctricas puntuales se repelen mutuamente cuando tienen la misma polaridad, y se atraen cuando son de polaridad opuesta (Ver Figuras 46 y 47). La fuerza de interacción entre éstas fue determinada experimentalmente por Coulomb, la cual se define en el vacío para dos cargas puntuales (q y q') separadas una de otra una distancia (r) de acuerdo con la Ecuación 12.

Figura 46. Fuerza de Coulomb entre cargas puntuales de igual polaridad.



Fuente: Autores.

Figura 47. Fuerza de Coulomb entre cargas puntuales de polaridad opuesta.



Fuente: Autores.

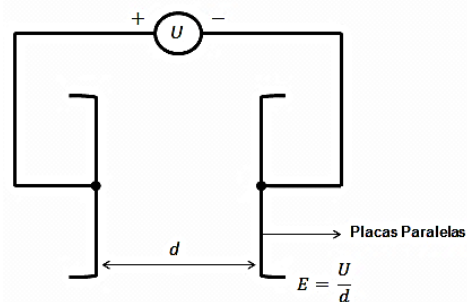
$$\vec{F} = \frac{q \times q'}{4\pi\epsilon_0 r^2} \times \hat{e}_r \tag{12}$$

En la Ecuación 12, ε_0 hace referencia a la permisividad en el vacío y \hat{e}_r es un vector unitario en la dirección r . A partir de la Ecuaciones 11 y 12, se puede deducir el campo electrostático creado en un punto a partir de una carga puntual (q) a una distancia (r), como se observa en la Ecuación 13.

$$\vec{E} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \times \hat{e}_r \quad (13)$$

El concepto de campo eléctrico puede ser explicado con mayor facilidad a partir de un condensador de aire plano con dos electrodos metálicos de área (A) separados por una distancia (d). Aplicando un voltaje (U) entre las dos placas se obtiene un campo eléctrico constante u homogéneo (E) entre éstas definido como la razón entre el voltaje y la distancia (U/d), como se observa en la Figura 48.

Figura 48. Campo eléctrico homogéneo.

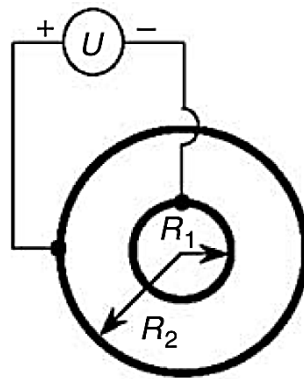


Fuente: Autores.

Este campo moverá cargas libres hacia los electrodos. Si se considera una carga puntual, esta carga inducirá un campo eléctrico alrededor de sí misma el cual será direccionado desde la carga como hacia la carga misma.

También se pueden generar campos eléctricos no homogéneos o divergentes a partir de condensadores de placas cilíndricas coaxiales o de esferas concéntricas, en los cuales el campo decrece a medida que la distancia a la carga aumenta (Ver Figura 49) de acuerdo con lo establecido en las Ecuaciones 14 y 15 para cilindros coaxiales y esferas concéntricas, respectivamente.

Figura 49. Campo eléctrico divergente.



Fuente: Autores.

$$E(r) = \frac{U}{\ln(R_2/R_1)} \times \frac{1}{r} \quad (14)$$

$$E(r) = \frac{U}{(R_2 - R_1)/(R_1 \times R_2)} \times \frac{1}{r^2} \quad (15)$$

El potencial eléctrico (V) es definido a partir del trabajo realizado al mover una carga unitaria entre dos puntos dentro de un campo eléctrico. La diferencia de potencial entre dos puntos se obtiene integrando el campo a lo largo de cualquier trayectoria entre estos dos puntos.

El potencial entonces puede ser definido en puntos o superficies, teniendo en cuenta que las superficies metálicas o de otros materiales conductivos son equipotenciales. Si existen muchas cargas distribuidas dentro de un volumen o sobre una superficie, entonces el campo resultante será la sumatoria de las contribuciones de cada una de estas cargas. En la Ecuación 16 se expresa el campo eléctrico (E) como el gradiente de potencial escalar (V):

$$\vec{E} = -\nabla V \quad (16)$$

El potencial eléctrico (V) a una distancia r de una carga puntual puede determinarse a partir de las Ecuaciones 15 y 16, resultando en la siguiente ecuación (Ver Ecuación 17):

$$V = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (17)$$

Si existen demasiadas cargas, el potencial resultante en un punto será la sumatoria escalar de los potenciales individuales. La capacitancia eléctrica de un conductor se define como la relación entre la carga del conductor y el voltaje aplicado (Ver Ecuación 18). Es de tener en cuenta que la capacitancia involucra parámetros geométricos.

$$C = \frac{Q}{V} \quad (18)$$

Se ha demostrado que, en cualquier punto dentro de un campo electrostático, la siguiente relación se mantiene (Ver Ecuación 19):

$$\nabla \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (19)$$

Donde ρ es la densidad volumétrica de la carga. Combinando las Ecuaciones 16 y 19 resulta la ecuación de Poisson (Ver Ecuación 20):

$$\nabla^2 \nabla = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (20)$$

En la región de carga libre ($\rho = 0$) la expresión anterior (Ecuación 20) se convierte en la ecuación de Laplace. Cuando los electrodos y las superficies equipotenciales coinciden con las superficies de un sistema coordinado ortogonal, la ecuación de Laplace será separable y podrá ser resuelta analíticamente, tal y como se tiene en la Figura 47 y en las Ecuaciones 14 y 15, para coordenadas rectangulares (cartesianas), cilíndricas y esféricas, respectivamente.

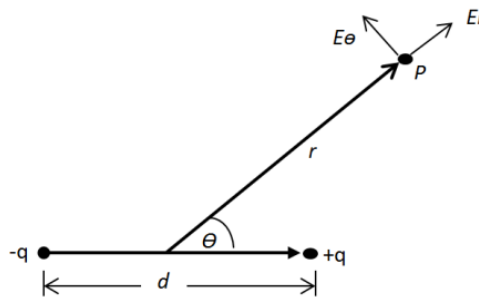
Históricamente, para tener en cuenta la gran distancia natural de las fuerzas electromagnéticas, Faraday, y posteriormente Maxwell, consideraron la región del espacio ocupado por un campo electromagnético en estado de estrés, en donde las fuerzas eléctricas y magnéticas son transmitidas a tensión o compresión a través de líneas elásticas de fuerzas. Matemáticamente, esto se generalizó empleando el estrés tensor de Maxwell.

Para un medio isotópico es sencillo determinar la densidad de energía electrostática con la siguiente ecuación (Ver Ecuación 21):

$$W_{el} = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 \quad (21)$$

Un dipolo eléctrico es un arreglo de dos cargas (+ q) y (- q) de polaridad opuesta separadas por una distancia fija (d) como se muestra en la Figura 50. El potencial resultante de ambas cargas en cualquier punto está dado por la Ecuación 17. Asumiendo r mucho mayor que d ($r \gg d$), el potencial en un punto P será el valor V expresado en la Ecuación 22, en la cual el momentum del dipolo (p) se encuentra definido como el producto de la magnitud de la carga por la distancia ($p = q \times d$).

Figura 50. Dipolo eléctrico.



Fuente: Autores.

$$V = \frac{p \cos \theta}{4\pi \epsilon_0 r^2} \quad (22)$$

El componente radial (E_r) y el componente tangencial (E_θ) del campo eléctrico del dipolo se pueden obtener aplicando la Ecuación 16, resultando las siguientes expresiones (Ver Ecuaciones 23 y 24):

$$E_r = \frac{2p \cos \theta}{4\pi\epsilon_0 r^3} \quad (23)$$

$$E_\theta = \frac{p \sin \theta}{4\pi\epsilon_0 r^3} \quad (24)$$

5.1.2 Polarización. La mayoría de los materiales dieléctricos⁵¹, en particular los líquidos, son compuestos moleculares. Un campo eléctrico polariza el medio, es decir, crea en cada partición del volumen (Δv) un momento dipolar vectorial de magnitud p proporcional al tamaño de la partición volumétrica (Δv). La polarización P es generalmente proporcional al campo eléctrico y a la susceptibilidad eléctrica χ (Ver Ecuaciones 25 y 26).

$$\vec{p} = \vec{P}\Delta v \quad (25)$$

⁵¹ Se denomina dieléctrico al material mal conductor de electricidad, por lo que puede ser utilizado como aislante eléctrico, y además si es sometido a un campo eléctrico externo, puede establecerse en él un campo eléctrico interno, a diferencia de los materiales aislantes con los que suelen confundirse. Todos los materiales dieléctricos son aislantes pero no todos los materiales aislantes son dieléctricos. Algunos ejemplos de este tipo de materiales son el vidrio, la cerámica, la goma, la mica, la cera, el papel, la madera seca, la porcelana, algunas grasas para uso industrial y electrónico y la baquelita. En cuanto a los gases se utilizan como dieléctricos sobre todo el aire, el nitrógeno y el hexafluoruro de azufre.

$$\vec{P} = \chi \vec{E} \quad (26)$$

En los líquidos existen dos mecanismos generadores de P . El primero, la polarización electrónica, es universal y surge a partir del reordenamiento inducido por el campo de las nubes electrónicas en las moléculas. El segundo mecanismo, la polarización de orientación, es específico de los llamados materiales polares de tal manera que sus moléculas tienen un momento dipolar permanente (como es el caso del agua), entonces el campo tiende a alinear los dipolos a lo largo de su dirección de incidencia.

La polarización necesita de la definición de un segundo factor, la inducción eléctrica D , para poder describir el estado eléctrico de cualquier sistema con material dieléctrico, empleando la Ecuación 27. Comúnmente, la susceptibilidad eléctrica es un escalar constante de tal manera que la Ecuación 27 podría resumirse como se expresa en la Ecuación 28, siendo la permisividad del material ε igual a la suma de la permisividad en el vacío (ε_0) y la susceptibilidad eléctrica (χ).

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E}_0 + \vec{P} \quad (27)$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E}_0, \quad \varepsilon = \varepsilon_0 + \chi \quad (28)$$

Dentro de un material dieléctrico, la polarización induce un campo eléctrico que parcialmente contrarresta el campo del cual la polarización se origina (E_0). La constante dieléctrica (ϵ_r) indica una medida de la habilidad de compensación del material, la cual es equivalente a la razón entre la permisividad del material (ϵ) y la permisividad eléctrica en el vacío (ϵ_0).

Dos cargas q y q' localizadas en un material dieléctrico con permisividad ϵ experimentarán una fuerza de acuerdo con la Ley de Coulomb (Ver Ecuación 29). Si una pieza del material dieléctrico es ubicada en un campo eléctrico en el vacío, o en un material con menor permisividad eléctrica, el campo eléctrico interno E_i es reducido en comparación con el campo de fondo E_0 . Para una esfera dieléctrica, esta reducción está dada por la Ecuación 30, en la cual ϵ_1 es la permisividad de la esfera y ϵ_2 es la permisividad del material envolvente.

$$\vec{F} = \frac{q \times q'}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r r^2} \quad (29)$$

$$\frac{E_i}{E_0} = \frac{3\epsilon_2}{2\epsilon_2 + \epsilon_1} \quad (30)$$

5.1.3 Conducción. La polarización inherentemente asume que el material es un aislante perfecto. En la práctica tales materiales no existen. Siempre existirán portadores de carga que tengan libre movimiento una vez un campo eléctrico sea aplicado. Las propiedades conductivas también deben ser tomadas en cuenta.

En un metal, la conducción resulta del movimiento libre de electrones, mientras que en materiales dieléctricos es movimiento de iones, salto de nivel de electrones (excitación), etcétera. En un líquido, la conducción toma lugar principalmente a través del movimiento iónico. Cuando un campo eléctrico (E) ejerce una fuerza sobre un ion este tenderá a moverse y ganar una velocidad promedio (v) proporcional al campo eléctrico dado por su movilidad (K). La densidad de corriente resultante j se puede conocer teniendo en cuenta el número de portadores de carga n , asumiendo portadores de carga univalentes (Ver Ecuación 31).

$$j = ne \times (K^+ + K^-) \times E \quad (31)$$

La habilidad del material para conducir la corriente es expresada a través de su conductividad (γ), la cual se puede deducir reordenando la Ecuación 31 (Ver Ecuación 32). La resistividad (ρ), definida como la razón entre el campo eléctrico y la densidad de corriente resultante (E/j), sería entonces el inverso de la conductividad.

$$\gamma = ne \times (K^+ + K^-) \quad (32)$$

La conducción Óhmica es definida por la conductividad (γ) siendo independiente del campo eléctrico (E). La resistividad es un parámetro referente al material que, combinado con dimensiones geométricas del material, resultan en la resistencia otorgada por el material (R).

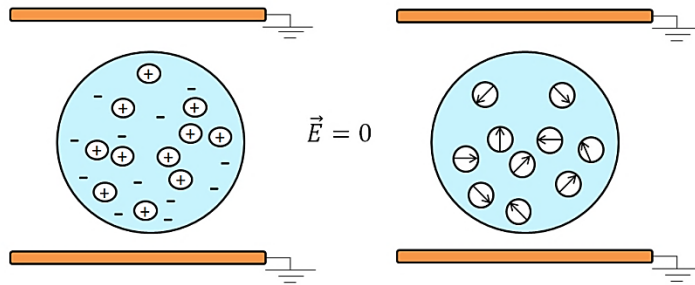
La conductividad de un volumen definido de líquido dieléctrico es principalmente gobernada por la concentración de iones existentes en él. Normalmente, la conductividad se mide empleando campos eléctricos bastante bajos. Los iones aparecen en el líquido por disociación de trazas de electrolitos disueltos en el líquido. La constante de disociación de un electrolito débil es una función del campo eléctrico aplicado de acuerdo con la teoría de Onsager⁵².

Los metales son diferentes de los materiales dieléctricos en que los electrones se encuentran libres para moverse a lo largo de la banda conductiva. Si un metal es ubicado en un campo eléctrico, los electrones se moverán hacia la superficie del metal y se ordenarán así mismo de tal manera que el campo interno del metal sea igual a cero. De todas formas se puede considerar un metal como un dieléctrico con una permisividad infinitamente alta, o modelar un dieléctrico altamente permisivo como un cuerpo conductor.

Sin embargo, ignorando la conducción en los materiales dieléctricos, incluso si los dos casos lucen similares desde una perspectiva exterior, existe una importante diferencia: Las cargas en los metales son libres para moverse hacia otro objeto si éstas entran en contacto con dicho objeto (Ver Figuras 51, 52 y 53, sección izquierda), mientras que existen cargas no libres en el dieléctrico por lo cual éste tendrá siempre una carga neta igual a cero (Ver Figuras 51, 52 y 53, sección derecha).

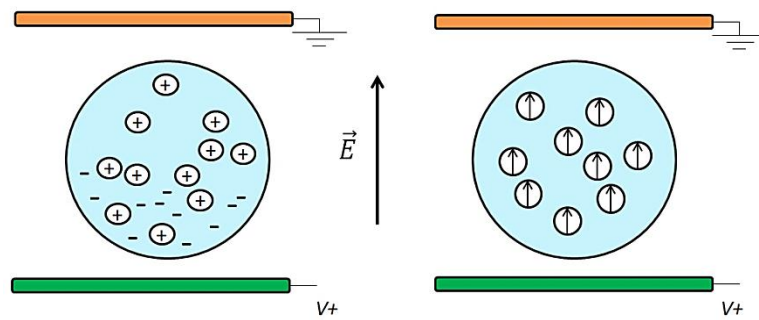
⁵² ONSAGER, L. Deviation from Ohm's law in weak electrolytes. The collected works of Lars Onsager (with commentary). World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. Singapur, 1996.

Figura 51. Esfera conductiva (izquierda) y aislante (derecha) sin campo eléctrico.



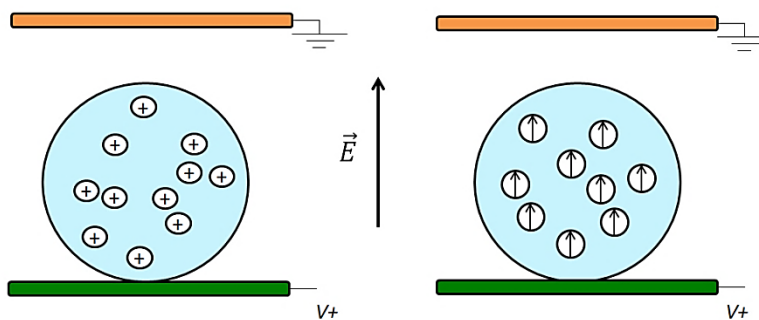
Fuente: Autores.

Figura 52. Polarización de esfera conductiva (izquierda) y aislante (derecha) bajo la acción de un campo eléctrico.



Fuente: Autores.

Figura 53. Polarización de esfera conductiva (izquierda) y aislante (derecha) bajo la acción de un campo eléctrico y en contacto con el electrodo positivo.



Fuente: Autores.

En la Figura 51 se puede observar que no hay reordenamiento de electrones ni orientación definida debido a la ausencia de campo eléctrico, por lo cual sólo se encuentran las cargas libremente distribuidas en la esfera conductiva y los dipolos orientados aleatoriamente en la esfera aislante. Por otro lado, al aplicar un campo eléctrico uniforme en una dirección establecida entre ambos electrodos, como se puede apreciar en la Figura 52, la esfera conductiva se polariza gracias al desplazamiento de las cargas negativas libres, mientras que en la esfera aislante los dipolos intentan alinearse con la dirección del campo eléctrico.

En la Figura 53 se encuentran ambas esferas sometidas al campo eléctrico y en contacto con el electrodo positivo, situación en la cual las cargas negativas libres de la esfera conductiva se transfirieron al electrodo positivo, dejando la esfera conductiva con carga neta positiva, mientras que la esfera dieléctrica al no tener cargas libres continua con carga neta igual a cero y con los dipolos orientados con el accionar del campo eléctrico.

5.1.4 Constantes de tiempo. Desde un punto de vista macroscópico no es simple ver a primera vista la diferencia entre el movimiento de las cargas (conductancia) y el reordenamiento de las cargas (polarización) dentro de un material. En cualquier caso un cuerpo de carga neutral dentro de un campo eléctrico se comportará como un dipolo. La diferencia principal es la velocidad de cada proceso, puesto que la polarización de un metal será instantánea, para casos prácticos, mientras que para cuerpos dieléctricos tomará algo más de tiempo. En general, la polarización será un proceso rápido, comparado con la redistribución de las cargas por conducción, la cual toma aún más tiempo.

La constante de tiempo de una redistribución de carga, denominada *relajación* (τ), es una constante dependiente del material, y por ende de sus propiedades eléctricas, como se puede observar en la Ecuación 33.

$$\tau = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{\gamma} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \rho \quad (33)$$

La constante de relajación es equivalente a la constante de tiempo para un capacitor o condensador (Ver Ecuación 34), en donde C es la capacitancia y R es la resistencia interna. Esta constante de tiempo es un parámetro importante para describir si el material se comporta como un conductor o como un aislante.

$$\tau = RC \quad (34)$$

Para campos cambiantes en el tiempo que varían mucho más rápido que la constante de tiempo del material se puede deducir que el material se comportará como un aislante, y viceversa. Otro aspecto importante es que cargas ubicadas en un dieléctrico se fugarán a una tasa influenciada directamente por esta constante de tiempo.

5.1.5 Interfase. En la interfase entre dos materiales diferentes debe establecerse una relación de continuidad para comprender el efecto del campo eléctrico sobre un material que se encuentra dentro de otro y como actúan las cargas de ambos.

Para dos materiales perfectamente dieléctricos existe una continuidad del potencial eléctrico y del componente normal de inducción eléctrica, expresada mediante la siguiente ecuación (Ver Ecuación 35):

$$\varepsilon_2(E_2)_n = \varepsilon_1(E_1)_n \quad (35)$$

Ahora bien, teniendo en cuenta la conducción de los materiales, se llega a la siguiente expresión (Ver Ecuación 36):

$$\varepsilon_2(E_2)_n - \varepsilon_1(E_1)_n = \sigma_s \quad (36)$$

Donde σ_s es la densidad de carga superficial de los portadores de carga libres, y depende de las propiedades conductivas. Cuando uno de los materiales (en este caso el No.1) es conductivo, el campo eléctrico que genera es nulo ($E_1=0$), y la densidad de carga superficial se relaciona con el campo eléctrico del segundo material (E_2) como se expresa a continuación (Ver Ecuación 37):

$$\sigma_s = \varepsilon_2 E_2 \quad (37)$$

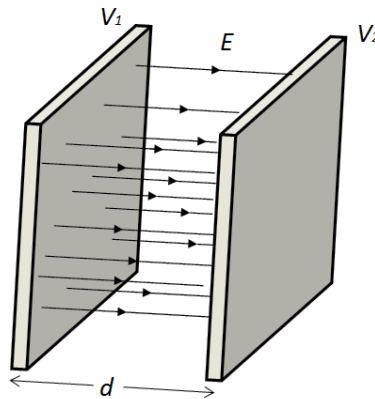
La acción del campo en la densidad de carga superficial resulta en la denominada presión electrostática, la cual puede ser entendida a partir de la Ecuación 38.

$$p_{es} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E_{saliente}^2 \quad (38)$$

5.1.6 Sistema coalescedor. La diferencia entre las propiedades dieléctricas de las emulsiones y de los materiales en los electrocoalescedores tiene varias implicaciones de importancia práctica: Ambos voltajes, AC y DC, son empleados, así como variantes o combinación de éstas, y se deben considerar los efectos de las constantes de tiempo tanto en las gotas dentro de la emulsión como en la emulsión entre los electrodos.

Para entender el efecto de la forma del voltaje aplicado, es importante familiarizarse con los términos de distribución de voltaje *capacitivo* y *resistivo*. Como se mencionó anteriormente, la capacitancia de un conductor está definida como la razón entre su carga y su potencial ($C=Q/V$). Un condensador típico está formado por dos placas paralelas conductoras como se puede apreciar en la Figura 54.

Figura 54. Condensador de placas paralelas.



Fuente: Autores.

Los electrodos se encuentran separados por una distancia d y el espacio entre ellos es llenado con un dieléctrico. Cuando se tiene una densidad de carga superficial σ en las placas, el campo eléctrico entre las placas se obtiene utilizando la Ecuación 39. Además, si se conoce el área de las placas A , se puede determinar la capacitancia de las placas paralelas a partir de la Ecuación 40.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{V_1 - V_2}{d} \quad (39)$$

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{\sigma A}{\Delta V} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d} \quad (40)$$

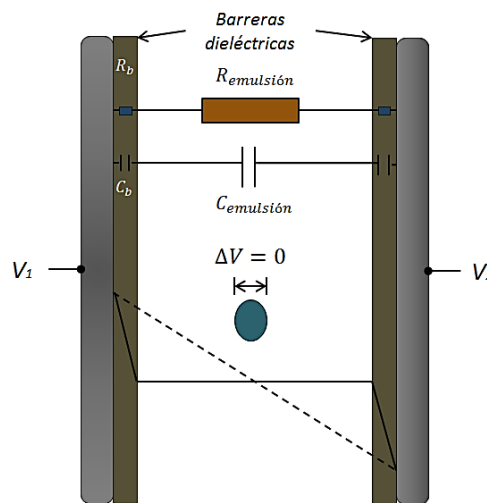
Similarmente, la resistencia R entre las placas está dada por la conductividad del dieléctrico (γ), siendo R proporcional a la distancia " d " e inversamente proporcional al producto del área por la conductividad ($A\gamma$), y resultando en un tiempo de relajación de la carga expresado como se tiene en la Ecuación 33.

Bajo condiciones de corriente DC, la corriente total entre los electrodos será la suma de la corriente de conducción DC y una corriente de desplazamiento transitoria. La densidad de corriente puede ser expresada de la siguiente manera (Ver Ecuación 41):

$$j = j_{cond} + j_{desp} = \gamma E + \frac{d}{dt}(\varepsilon E) \quad (41)$$

Entonces, para un campo eléctrico constante, e incluso para uno que varíe lentamente, la densidad de corriente y el campo eléctrico local estará determinado por la conductividad del material dieléctrico.

Figura 55. Esquema de una emulsión entre electrodos eléctricamente aislados.



Fuente: Autores.

La Figura 55 muestra un esquema simplificado de un electrocoalescedor con electrodos recubiertos con un material aislante sólido. Como se puede observar en la Tabla 4, la conductividad es mucho menor para un material sólido aislante que para una emulsión de crudo, y por lo tanto las constantes de tiempo también serán muy diferentes. Si un campo DC es aplicado, todos los iones y los portadores de carga se moverán rápidamente hacia la barrera aislante. La distribución del campo está gobernada por la conductividad de los materiales y la carga superficial en el recubrimiento sólido. El efecto de esto es que la caída de voltaje entre los electrodos metálicos ocurre principalmente a lo largo del aislante sólido, por lo tanto se concluye que no existe campo dentro de la emulsión que pueda activar el proceso de electrocoalescencia.

Tabla 4. Propiedades eléctricas de diversas sustancias.

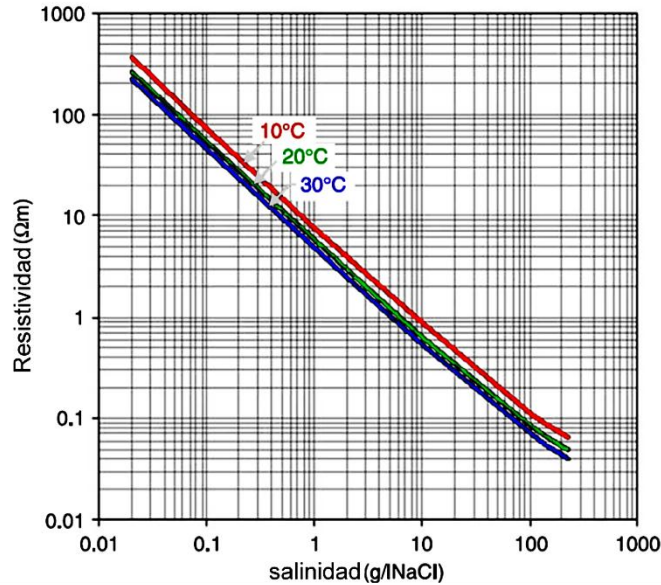
Material	Conductividad (S/m)	Constante Dieléctrica	Constante de Relajación (s)
Aislamiento sólido	$1 \cdot 10^{-16} - 1 \cdot 10^{-14}$	4 – 6	$5.3 \cdot 10^3 - 3.5 \cdot 10^5$
Aceite Puro	$1 \cdot 10^{-13} - 1 \cdot 10^{-12}$	2 – 3	27 – 177
Crudo	$1 \cdot 10^{-9} - 1 \cdot 10^{-7}$	2 – 3	$2.7 \cdot 10^{-4} - 1.8 \cdot 10^{-2}$
Agua Purificada	$> 4 \cdot 10^{-6}$	@20°C = 80 @90°C = 58	$1.8 \cdot 10^{-4}$ $1.3 \cdot 10^{-4}$
Agua con 5% en peso de NaCl	~ 1	@20°C = 80 @90°C = 58	$7.1 \cdot 10^{-10}$ $5.1 \cdot 10^{-10}$
Fuente: LUNDGAARD, Lars E ⁵³ . Modificado.			

Si se aplica un campo AC al sistema, el esquema es un tanto diferente. Entregada la frecuencia del voltaje aplicado, se tiene un período significativamente más corto que la constante de tiempo de la emulsión, luego entonces los iones y las partículas cargadas no tendrán tiempo para moverse hacia las barreras aislantes y crear una superficie cargada. De acuerdo con esto, ahora serían las permisividades las que gobiernasen la distribución del campo eléctrico, por lo que se puede decir que se tiene una distribución de campo capacitivo.

5.1.7 Polarización y conductividad de las gotas de agua. Incluso para agua altamente purificada, la conductividad del electrolito será mayor a $4 \times 10^{-6} (\Omega\text{m})^{-1}$. Cuando se adiciona sal al agua la conductividad incrementa con la concentración de sal, tal y como se muestra en la Figura 56.

⁵³ LUNDGAARD, Lars E; BERG, Gunnar; INGEBRIGTSEN, Stian; ATTEN, Pierre. Emulsion and emulsion stability. Capítulo 15: Electrocoalescence for oil-water separation. Editorial Taylor & Francis Group. Nueva York (Estados Unidos), 2006.

Figura 56. Resistividad del agua en función de la salinidad.



Fuente: LUNDGAARD, Lars E⁵⁴. Modificado.

Generalmente, el agua de mar tiene una salinidad promedio de 35 psu (3.5 % en peso de sal). La constante de relajación será entonces menor que 1 ns (nanosegundo), indicando que se puede hacer una equivalencia entre una gota de agua y un cuerpo conductivo.

5.1.8 Procesos para cargar gotas. Cuando un cuerpo conductivo como una gota de agua choca contra un plano metálico con un campo eléctrico, la partícula recibirá una carga neta Q . Para una esfera de radio r en un líquido de permisividad ϵ , esta carga es igual a (Ver Ecuación 42):

⁵⁴ LUNDGAARD, Lars E; BERG, Gunnar; INGEBRIGTSEN, Stian; ATTEN, Pierre. Emulsion and emulsion stability. Capítulo 15: Electrocoalescence for oil-water separation. Editorial Taylor & Francis Group. Nueva York (Estados Unidos), 2006.

$$Q = \frac{\pi^2}{6} 4\pi\epsilon r^2 E_0 \quad (42)$$

De acuerdo con Felici⁵⁵, entre más alargada sea la partícula en la dirección del campo, mayor será la carga adquirida por ésta. Las gotas de agua también pueden ser cargadas a partir de otros procesos como transferencia de carga desde otros cuerpos, flujo de electrificación, adsorción de iones polares en la superficie de la gota (adsorción preferencial), y por ruptura de gota.

El último caso, la ruptura de gota, se debe a la polarización de la gota de agua. A medida que la gota sea más conductiva, los iones positivos y negativos se separaran en las superficies de la gota y preverán una carga neta en cada polo de la gota. Consecuentemente, si la gota se separa, ya sea por colisión, turbulencia, o una alta inestabilidad inducida por un campo eléctrico, las gotas resultantes serán portadoras de carga neta.

5.1.9 Potenciales químicos superficiales en campos eléctricos externos.

Hasta ahora se ha considerado la interfase entre las fases (agua-aceite o aceite-electrodo) como cuasi ideal, solo descrita por su tensión interfacial y los lugares donde se pueden acumular las cargas. En la realidad, la interfase tiene su propio ambiente electrostático microscópico. Entre una superficie metálica y un líquido existe una diferencia de potencial electroquímico; los iones del líquido se acumulan en la interfase y se enlazan a ésta a través de sus imágenes eléctricas en el metal.

⁵⁵ FELICI, N. J. Forces et charges de petits objets en contact avec une électrode affectée d'un champ électrique. Revista General de Electricidad. Vol. 75, 1966.

En equilibrio termodinámico ($E=0$) esta doble capa eléctrica (EDL por sus siglas en inglés, *Electric Double Layer*) tiene una parte difusa en el líquido. Entre mayor sea el número de portadores de carga disponibles, más rápido el campo eléctrico disminuirá con la distancia medida desde la superficie. La distancia característica, denominada *longitud Debye* (λ_D), está relacionada a la conductividad del fluido (γ), a la permisividad (ϵ), y al coeficiente de difusión molecular (D) de acuerdo con la siguiente ecuación (Ver Ecuación 43):

$$\lambda_D = \sqrt{D\epsilon/\gamma} \quad (43)$$

En tanto exista mayor cantidad de iones en el agua que en el aceite, la longitud Debye será mucho más pequeña en el agua que en el aceite. En electrolitos acuosos el espesor del EDL tiene un valor típico de solo 1 nanómetro. A las condiciones de temperatura del sitio, a partir de la caída de tensión térmica a lo largo de esta capa se obtiene un campo eléctrico interno alto de aproximadamente 300 kV/cm.

Según Zahn⁵⁶, para aceites de baja conductividad la correspondiente longitud Debye alta y bajo campo eléctrico interno son del orden de 5 micras y 50 V/cm, respectivamente. Con campos eléctricos externos de 1 kV/cm, el cual se encuentra dentro del rango de diseño de un coalescedor, la capa difusa en el aceite será barrida.

⁵⁶ ZAHN, M. Space charge effects in dielectric liquids. El Estado Líquido y sus Propiedades Eléctricas, Prensa Plenaria. Nueva York (Estados Unidos), 1988.

5.2 MECANISMOS, FUERZAS Y MODELOS EN PROCESOS DE ELECTROCOALESCENCIA

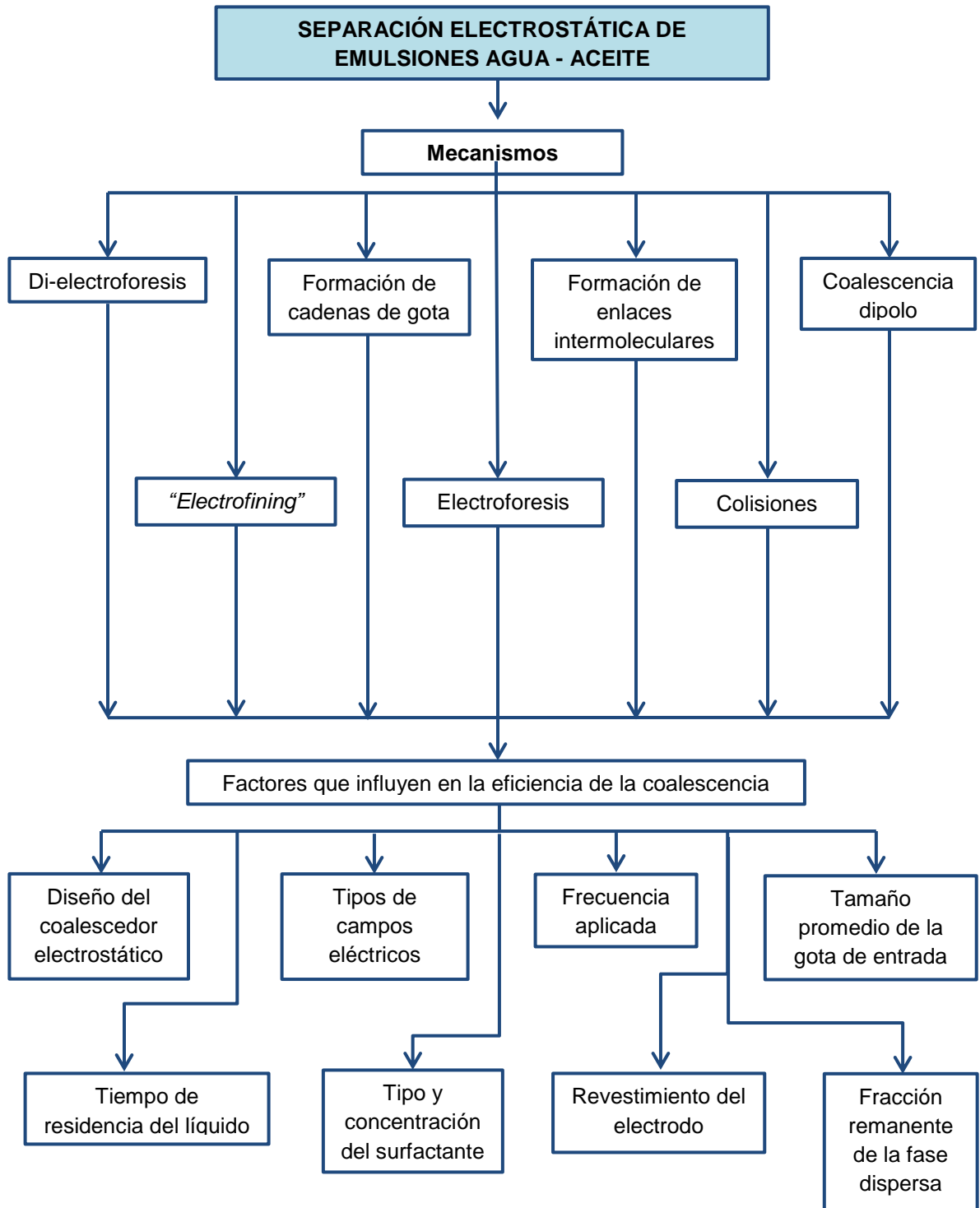
Cottrell y Speed⁵⁷ presentaron la primera patente en electrocoalescencia, observando el mecanismo de coalescencia cuando se aplicaba un potencial alto a un par de electrodos en forma de cable dentro de una emulsión agua en aceite. En este experimento se presenció la extensión de cadenas de gotas de agua de un electrodo a otro. La coalescencia de gotas adyacentes en cada cadena ocurrió luego tornándose las gotas cercanas a los electrodos en nuevas gotas de mayor tamaño.

Los mecanismos para este fenómeno, no obstante, no han sido comprendidos enteramente aún, no más hasta el punto de que fuerzas eléctricas facilitan la coalescencia entre gotas pequeñas para obtener rápidamente tamaños de gota que permitan la separación gravitacional de acuerdo con la mencionada anteriormente velocidad terminal de sedimentación de Stokes (Ver Ecuación 5). Sin embargo, se han propuesto unos posibles mecanismos que describan la separación de una emulsión sometida a un campo eléctrico, resumidos en la Figura 57. A su vez, las fuerzas coalescentes sobre gotas de agua emulsionadas sometidas a un campo eléctrico se encuentran descritas en la Figura 58.

Los mecanismos dominantes deberían depender de factores tales como la fracción volumétrica remanente de la fase dispersa, geometría del electrodo y tipo de campo eléctrico, a pesar de que éstos no hayan sido estudiados sistemáticamente.

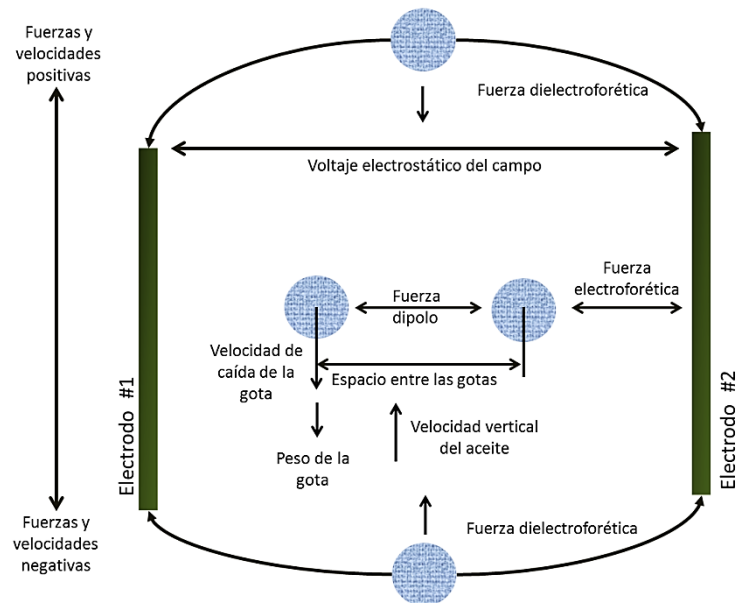
⁵⁷ COTTRELL, F. G; SPEED, J. B. Separating and collecting particles of one liquid suspended in another liquid. US Patent 98,711,421. 1911.

Figura 57. Mecanismos de la electrocoalescencia y factores influyentes en su eficiencia.



Fuente: Autores.

Figura 58. Fuerzas de coalescencia.



Fuente: Autores.

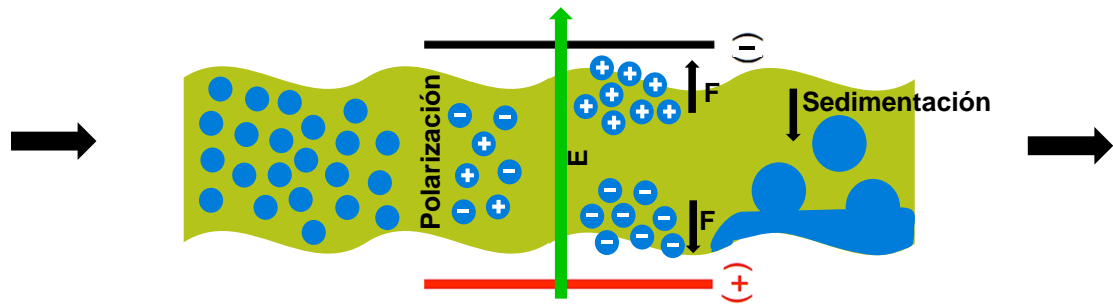
5.2.1 Fuerzas electrostáticas actuando en una única gota. Dependiendo de la carga y polarización de un cuerpo (en adelante denotado como gota de agua) y la distribución del campo eléctrico externo, pueden actuar diferentes fuerzas. Inicialmente se debe hacer una distinción entre fuerzas electroforéticas y fuerzas dielectroforéticas. Para efectos prácticos, se asume una forma esférica fija para las gotas, por lo cual se ignoran efectos de las fuerzas resultantes en un cambio de forma de la misma.

5.2.1.1 Electroforesis. El movimiento resultante de una partícula cargada a través de un fluido estacionario bajo la influencia de un campo eléctrico se denomina *electroforesis*. Como se explicó anteriormente, la fuerza equivale al producto de una carga y un campo eléctrico, donde la dirección de la fuerza resultante depende de la polaridad de la carga y de la dirección de acción del campo eléctrico (Ver Ecuación 44).

$$F_{\text{electroforesis}} = q \cdot E = \frac{2}{3} \pi^3 r^2 \epsilon_c E^2 \quad (44)$$

En dado caso que una partícula sea sometida a un campo eléctrico homogéneo emitido por corriente alterna, ésta experimentará una separación de carga entre su superficie y el fluido inmediatamente circundante, y luego oscilará, pero con el pasar del tiempo no se observará desplazamiento alguno. Sin embargo, para campos eléctricos de corriente DC, primero se alinearán las cargas y se distribuirán, para luego generarse un movimiento neto hacia alguno de los electrodos (Ver Figura 59).

Figura 59. Fuerzas de electroforesis.



Fuente: Autores.

La máxima carga que una gota puede llevar es equivalente a que tanto pueda adquirir al momento del contacto con un electrodo, de acuerdo con lo expuesto en la Ecuación 42. No obstante, esta carga puede fugarse hacia el aceite circundante. La constante de tiempo (τ) para ésta depende de la constante de relajación del líquido alrededor (τ_L), la cual es la razón entre la permisividad del líquido (ϵ_L) y su conductividad (γ_L).

Cabe notar que estas fuerzas no dependen de las propiedades del material, y que la movilidad electroforética está definida como la velocidad de la partícula dividida por la intensidad del campo eléctrico.

5.2.1.2 Di-electroforesis. Según Pohl⁵⁸, la *di-electroforesis* se define como el movimiento de materia causado por efectos de polarización en un campo eléctrico no uniforme. Por lo tanto, las fuerzas dielectroforéticas a diferencia de las electroforéticas, no requieren carga neta, puesto que dependen de las propiedades del material. Esta fuerza sólo surge a partir de campos eléctricos no homogéneos AC o DC.

Para un medio aislante, la dirección de la fuerzas depende de las constantes dieléctricas de la partícula y del medio en el cual se encuentra ubicada. Si la constante dieléctrica de la partícula es mayor que la del medio circundante (como es el caso de gotas de agua rodeadas de crudo), la fuerza halará de la partícula hacia campos eléctricos más grandes, lo cual corresponde a un proceso de *di-electroforesis positiva*. Si la constante dieléctrica de la partícula es menor que la del medio en el cual se encuentra suspendida, entonces el campo eléctrico dentro de la gota será nulo, es decir, igual a cero, por lo cual la situación equivaldría a un medio de permisividad infinita.

Cualquier dipolo tendrá una separación infinita de cantidades iguales de cargas positivas y negativas en él, y el campo eléctrico buscará alinearse con dicho dipolo.

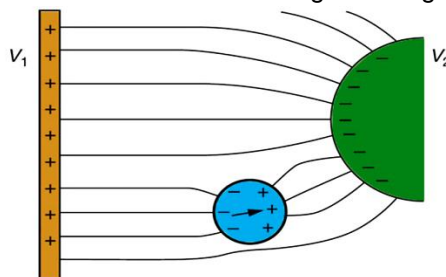
⁵⁸ POHL, H. A. Some effects of nonuniform fields on dielectrics. Revista Aplicaciones Físicas. Vol. 29. 1958.

Dado que el campo no es uniforme, una terminal del dipolo se encontrará en un campo eléctrico más débil, resultando en una fuerza neta, halando el dipolo hacia el lugar donde se tenga la mayor intensidad del campo. La dirección del campo puede ser revertida generado que el dipolo viaje hacia la dirección original con una fuerza dependiente del cuadrado de la magnitud del campo eléctrico.

En situaciones más prácticas, la contribución de la di-electroforesis puede ser pequeña en comparación con al electroforesis, dado que la velocidad de la gota es relativamente baja en un campo eléctrico altamente divergente debido a la fuerza dielectroforética. La di-electroforesis puede incluso ocurrir aplicando campos eléctricos parcialmente uniformes, como un resultado de las perturbaciones del campo debido a la presencia de las gotas. En situaciones donde es improbable que las gotas estén significativamente cargadas, como el caso de excitación con campo AC o utilización de electrodos aislados, la di-electroforesis es de vital importancia con respecto a la coalescencia.

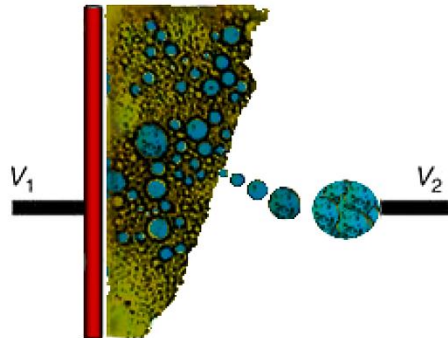
La Figuras 60 y 61 muestran, de forma simplificada, la di-electroforesis positiva, esquemas en los cuales la gota se polariza, aparecen cargas de igual magnitud pero opuestas en las caras de la gota, y luego las fuerzas en las cargas ubicadas debido a un campo eléctrico mayor dominarán el movimiento de dicha gota.

Figura 60. Fuerzas dielectroforéticas actuando en una gota de agua rodeada por aceite.



Fuente: Autores.

Figura 62. Secuencia experimental del movimiento de expulsión de una gota de agua de una emulsión debido a las fuerzas dielectroforéticas.



Fuente: LUNDGAARD, Lars E⁵⁹. Modificado.

El momento dipolar p para una partícula esférica se puede expresar mediante la Ecuación 45, como se muestra a continuación:

$$p = 4\pi\epsilon R_0^3 \beta E_0, \quad \beta = \left(\frac{\epsilon_p - \epsilon}{\epsilon_p + 2\epsilon} \right) \quad (45)$$

Donde R_0 es el radio de la partícula, ϵ_p su permisividad, y ϵ la permisividad del medio circundante. La fuerza dielectroforética puede ser formulada a partir del momento dipolar de la partícula y el gradiente del campo eléctrico (∇E), resultando en la siguiente ecuación (Ver Ecuación 46):

⁵⁹ LUNDGAARD, Lars E; BERG, Gunnar; INGEBRIGTSEN, Stian; ATTEN, Pierre. Emulsion and emulsion stability. Capítulo 15: Electrocoalescence for oil-water separation. Editorial Taylor & Francis Group. Nueva York (Estados Unidos), 2006.

$$\vec{F} = 4\pi\epsilon R_0^3 \beta \vec{E} \nabla \vec{E} \quad (46)$$

Para una gota de agua conductiva ($\epsilon_p \rightarrow \infty$), la Ecuación 45 puede simplificarse y obtenerse la siguiente ecuación (Ver Ecuación 47):

$$\vec{F} = 4\pi\epsilon R_0^3 \vec{E} \nabla \vec{E} \quad (47)$$

De la anterior ecuación puede deducirse que para un campo eléctrico homogéneo ($\nabla E = 0$) actuante sobre una gota de agua, consecuentemente la fuerza resultante será igual a cero ($F = 0$)

5.2.2 Fuerzas mecánicas. Adicionalmente a las fuerzas eléctricas, existirán fuerzas debido a la gravedad, inercia, y de efectos viscosos. La fuerza de boyanza se puede expresar mediante la siguiente ecuación (Ver Ecuación 48):

$$F_b = (\rho_d - \rho_c)gV_d \quad (48)$$

Donde ρ_d y ρ_c son las densidades de la gota de agua y de la fase oleosa continua, respectivamente, V_d el volumen de la diminuta gota, y g la aceleración gravitacional. En emulsiones con gotas muy pequeñas o finas (diámetro menor a 10 micras), se observa que la sedimentación es obstaculizada por la absorción de pequeñas partículas en la superficie de la gota.

Para una gota en movimiento las fuerzas son transferidas del fluido a las gotas a través de la fricción y del diferencial de presión. Estas fuerzas se formulan a partir de la siguiente integral de superficie (Ver Ecuación 49):

$$\frac{1}{V_d} \vec{F}_{fluido} = \frac{1}{V_d} \int_{A_d} (-P_s \vec{n}_d + \tau_d \vec{n}_d) dA \quad (49)$$

Donde V_d es el volumen de la gota, A es la superficie, P_s es la presión en la superficie de la gota, n_d representa la unidad hacia afuera del vector normal, y τ_d es el esfuerzo tensor cortante en la superficie de la gota. De la integral propuesta anteriormente se denota que la presión y la fricción en la interfase son variables desconocidas, y que dicha ecuación debe ser modelada. En el sistema Lagrangiano los modelos para la integral de superficie intentan proveer significados físicos particulares.

5.2.2.1 Fuerza de arrastre. La fuerza de arrastre en estado estable actúa en una pequeña gota en un campo de presión uniforme cuando no hay aceleración de la gota respecto al fluido de transmisión. Esta fuerza está dada por la Ecuación 50, en donde $(\vec{u} - \vec{v})$ es la velocidad relativa de la partícula y el medio circundante, y C_d hace referencia al coeficiente de arrastre.

$$\vec{F}_d = \frac{1}{2} \rho_c C_d A |\vec{u} - \vec{v}| (\vec{u} - \vec{v}) \quad (50)$$

Para un número de Reynolds de la gota menor a 1, el coeficiente de arrastre para una esfera rígida será (Ver Ecuación 51):

$$C_d = \frac{24}{Re_d} \quad (51)$$

En esferas fluidas, una circulación interna es inducida reduciendo la parte viscosa del arrastre. Para burbujas y pequeñas gotas limpias y esféricas, la circulación interna inducida es tenida en cuenta en la ecuación de Hadamard-Rybczynski (Ver Ecuación 52):

$$C_d = \frac{24}{Re_d} \times \frac{\lambda + (2/3)}{\lambda + 1}, \quad \lambda = \frac{\mu_d}{\mu_c} \quad (52)$$

5.2.3 Fuerzas y movimiento de pares de gotas. Luego de analizar los efectos eléctricos y las correspondientes fuerzas inherentes a cada gota por separado, es necesario estudiar su comportamiento al encontrarse afectada por las gotas circundantes. De nuevo es necesario distinguir entre fuerzas electroforéticas y dielectroforéticas. En ambos casos las fuerzas entre gotas rápidamente disminuirán con la distancia entre éstas.

Cuando las gotas están distantes unas de otras, las fuerzas pueden ser despreciables, a distancias intermedias se puede aplicar formulas simples basadas en cargas puntuales y en momentos dipolares, mientras que para un rango mucho menor entre gotas se debe tener en cuenta la distribución de las cargas y la geometría de las gotas.

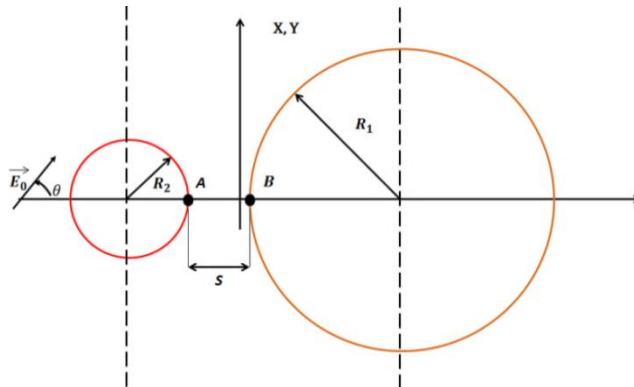
La fuerza electroforética entre dos gotas cargadas es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, disminuyendo a medida que ésta crece, tal y como se pudo observar en la Ecuación 12. La carga máxima que una gota de agua puede adquirir de un electrodo en un campo homogéneo, sin tener en cuenta la ruptura debido a fuerzas eléctricas, puede obtenerse empleando la Ecuación 42, mencionada anteriormente.

Dependiendo de las polaridades, la fuerza puede ser atractiva o repulsiva. Estas fuerzas sólo jugarán un papel en el proceso de electrocoalescencia cuando las gotas sean adyacentes unas a otras y posean cargas de polaridad opuesta. Además, las gotas cargadas perderán su carga debido a la conducción a través del líquido contenedor de las mismas.

Las fuerzas dielectroforéticas entre gotas de agua se deben al momento dipolar de las gotas inducido por un campo eléctrico externo. Ambos tipos de campo, AC o DC, son igualmente relevantes en el proceso. Como se mencionó anteriormente, se asume como una primera aproximación que las gotas de agua son esferas conductoras en una fase continua oleosa, sin tomar en cuenta la conductividad del aceite mismo.

Cuando las gotas son sometidas a campos externos se inducirán cargas en ellas, de tal forma que el campo interno de las gotas tienda a ser cero. Las cargas en cada hemisferio tendrán entonces la misma magnitud pero con polaridad opuesta. El campo en cada polo será mayor que el campo predecesor por un factor de 3 cuando las gotas estén a más de un diámetro de distancia, tal y como se podrá observar posteriormente (Ver Figura 63).

Figura 62. Dos gotas de diferente tamaño localizadas en un campo homogéneo con un ángulo de inclinación “ θ ”.



Fuente: Autores.

En dado caso que dos gotas polarizadas se acerquen una a la otra, cada una de ellas experimentará el campo no homogéneo generado por la otra, y éstas podrán repelerse o atraerse mutuamente, dependiendo de su posición relativa en el campo externo. Para explicar esto, inicialmente deben considerarse dos gotas de radio R_1 y R_2 , separadas por una distancia s , en cuyos centros se encuentre un eje con un ángulo de inclinación θ respecto al campo externo aplicado (Ver Figura 62). Posteriormente debe analizarse el fenómeno dipolo-dipolo.

5.2.3.1 Interacción dipolo-dipolo. Para grandes distancias entre gotas respecto a su diámetro ($s/R \gg 1$), se puede aproximar la interacción electrostática entre dos gotas conductoras (esferas de superficies equipotenciales) a la fuerza entre dos dipolos localizados en los centros de esferas. Esto es frecuentemente denominado como *aproximación del punto-dipolo*. Las fuerzas en dirección radial F_r y dirección tangencial F_θ se definen a partir de las Ecuaciones 53 y 54, donde d es la distancia entre los centros de las gotas, y los coeficientes K_1 y K_2 equivalen a 1 al emplear la aproximación punto-dipolo para las gotas.

$$F_r = 12\pi\epsilon E_0^2 R_2^3 R_1^3 d^{-4} (3K_1 \cos^2\theta - 1) \quad (53)$$

$$F_\theta = -12\pi\epsilon E_0^2 R_2^3 R_1^3 d^{-4} K_2 \sin 2\theta \quad (54)$$

5.2.3.2 Modelo dipolo - dipolo inducido. La aproximación del punto-dipolo no es válida cuando las gotas de agua se están acercando unas a otras, y los momentos dipolares son modificados debido a la inducción mutua entre las esferas. En la literatura existen diferentes intentos para encontrar las fuerzas esfera-esfera, más allá de una simple aproximación punto-dipolo, para múltiples partículas de tamaño y posición aleatoria.

Un primer acercamiento a la respuesta fue considerado por Yu⁶⁰, con el método de la imagen múltiple. Los dos primeros términos en el método de la imagen múltiple entregan el modelo del dipolo-dipolo inducido (DID, por sus siglas en inglés *dipole-induced dipole*), el cual es simple y numéricamente eficiente. Posteriormente, Siu⁶¹ mostró que el modelo DID tiene concordancia con los valores experimentales obtenidos por Klingenberg⁶² para $s/R > 0.1$ con partículas conductivas de igual tamaño. El modelo DID puede expresarse mediante las ecuaciones anteriores (Ver Ecuaciones 53 y 54), pero con los coeficientes K_1 y K_2 obtenidos empelando las Ecuaciones 55 y 56.

⁶⁰ YU, K. W.; WAN JONES, T. K. Interparticle force in polydisperse electrorheological fluids. *Revista Computer Physics Communications*. 2000.

⁶¹ SIU, Y. L.; WAN, T. K.; YU, K. W. Interparticle force in polydisperse electrorheological fluids: Beyond the dipole approximation. *Revista Computer Physics Communications*. 2001.

⁶² KLINGENBERG, D. J.; VAN SWOL, F.; ZUKOSKI, C. F. The small shear rate response of electrorheological suspensions. II. Extensions beyond the point-dipole limit. *Revista Química-Física*. Vol. 94. 1991.

$$K_1 = 1 + \frac{R_1^3 d^5}{(d^2 - R_2^2)^4} + \frac{R_2^3 d^5}{(d^2 - R_1^2)^4} + \frac{3R_1^3 R_2^3 (3d^2 - R_1^2 - R_2^2)}{(d^2 - R_1^2 - R_2^2)^4} \quad (55)$$

$$K_2 = 1 + \frac{R_1^3 d^3}{2(d^2 - R_2^2)^3} + \frac{R_2^3 d^3}{2(d^2 - R_1^2)^3} + \frac{3R_1^3 R_2^3}{(d^2 - R_1^2 - R_2^2)^3} \quad (56)$$

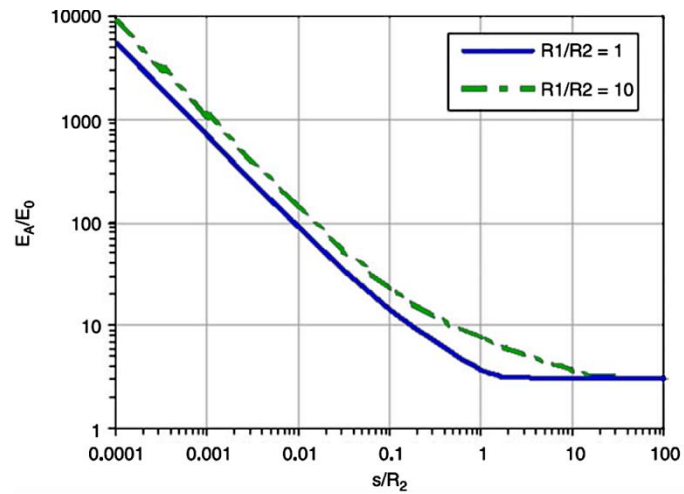
Cuando se aplica el límite $d \rightarrow \infty$, los coeficientes K_1 y K_2 se aproximan a la unidad y nuevamente se retoma la expresión dada para el modelo punto-dipolo.

5.2.3.3 Solución analítica. Con la geometría definida desde la Figura 62, es posible derivar analíticamente soluciones para el potencial, el campo eléctrico, y la fuerza entre dos esferas. El problema es analizado utilizando coordenadas biglobulares, de lo cual se puede obtener el campo eléctrico máximo, apareciendo en el polo A de la gota (Ver Figura 62), de acuerdo con la siguiente expresión (Ver Ecuación 57):

$$E_A = E_0 \cos \theta \cdot E_3 \quad (57)$$

Donde E_0 es el campo inicial y el coeficiente de campo E_3 es una serie infinita dependiente de la geometría del par de gotas. Como se muestra en la Figura 63, el campo eléctrico entre dos gotas incrementa enormemente a medida que disminuye la distancia entre ellas.

Figura 63. Incremento del campo eléctrico en el polo A como función de la reducción de la distancia entre gotas s/R_2 .



Fuente: LUNDGAARD, Lars E⁶³. Modificado.

Las fuerzas se determinan integrando la presión electrostática alrededor de la superficie de la gota, de lo cual se obtienen los siguientes componentes, radial (Ver Ecuación 58) y tangencial (Ver Ecuación 59), para una segunda esfera, asumiendo que ambas esferas no están inicialmente cargadas:

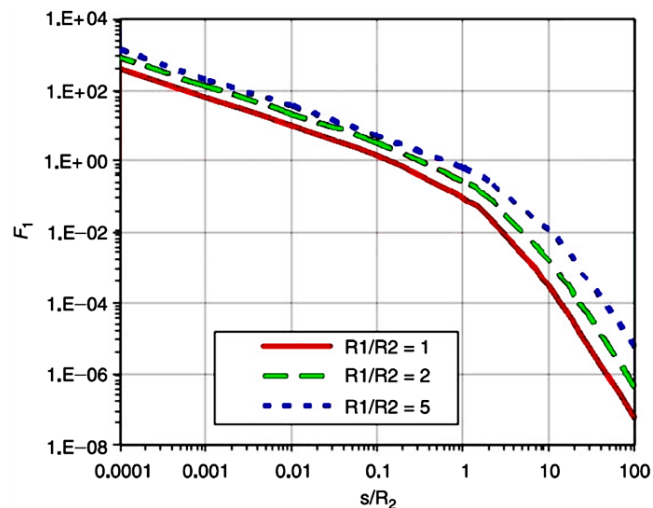
$$(F_r)_2 = 4\pi\epsilon R_2^2 E_0^2 (F_1 \cos^2 \theta + F_2 \sin^2 \theta) \quad (58)$$

$$(F_\theta)_2 = 4\pi\epsilon R_2^2 E_0^2 F_3 \cdot \sin 2\theta \quad (59)$$

⁶³ LUNDGAARD, Lars E; BERG, Gunnar; INGEBRIGTSEN, Stian; ATTEN, Pierre. Emulsion and emulsion stability. Capítulo 15: Electrocoalescence for oil-water separation. Editorial Taylor & Francis Group. Nueva York (Estados Unidos), 2006.

Donde el componente radial F_r puede ser tanto repulsivo como atractivo, dependiendo del ángulo θ , mientras que el componente tangencial F_θ induce un torque con tendencia a alinear el par de gotas con la dirección de aplicación del campo eléctrico. Los coeficientes de fuerza F_1 , F_2 y F_3 son series complejas dependientes de la relación de tamaños entre dichas gotas (R_2/R_1) y de la distancia que las separa s/R_2 . Retomando la Figura 63, y observando ahora la Figura 64, se puede apreciar como efectivamente tanto el coeficiente de fuerza como el campo generado con base al inicial aumentan considerablemente con cualquier disminución por pequeña que sea en la distancia entre gotas expresada como s/R_2 .

Figura 64. Coeficiente de fuerza F_1 como función de la reducción de la distancia s/R_2 para diferentes relaciones de tamaños de gota.



Fuente: LUNDGAARD, Lars E⁶⁴. Modificado.

⁶⁴ LUNDGAARD, Lars E; BERG, Gunnar; INGEBRIGTSEN, Stian; ATTEN, Pierre. Emulsion and emulsion stability. Capítulo 15: Electrocoalescence for oil-water separation. Editorial Taylor & Francis Group. Nueva York (Estados Unidos), 2006.

En el caso particular de esferas de igual radio R_0 alineadas con la dirección de acción del campo eléctrico ($\theta = 0$), se puede derivar relaciones asintóticas para la diferencia de potencial entre dos esferas (Ver Ecuación 60) y para el campo eléctrico en las caras de los polos (Ver Ecuación 61):

$$\Delta V = \frac{2\pi^2}{3} \cdot \frac{E_0 R_0}{\log\left(\frac{R_0}{s}\right)} \quad (60)$$

$$E_{polo} \cong \frac{2\pi^2}{3} \cdot E_0 \cdot \frac{R_0/s}{\log(R_0/s)} \quad (61)$$

Teniendo en cuenta las ecuaciones anteriores, la fuerza de atracción resultante entonces quedaría expresada de la siguiente manera (Ver Ecuación 62):

$$F_r = \frac{2\pi^5}{9} \cdot \varepsilon E_0^2 R_0^2 \cdot \frac{R_0/s}{[\log(R_0/s)]^2} \quad (62)$$

Para gotas con una separación de una gota de radio, es decir, distanciada una de la otra a una longitud equivalente al tamaño de una de ellas, o a una distancia mayor, se puede observar claramente de las Ecuaciones 53 y 54 que la fuerza resultante es repulsiva dado que $F_r < 0$ cuando la función $3\cos^2\theta < 1$, lo cual ocurre siempre y cuando el ángulo θ entre el par de gotas y el campo eléctrico exceda los 54.7° .

Sin embargo, esta aseveración no aplica para gotas con una pequeña separación. En este caso el ángulo se acercaría a 90° , para lo cual, aplicando las Ecuaciones 58 y 59, se obtendría una fuerza de tipo atractiva entre las gotas cercanas. Este análisis se hace para un caso estático, sin tomar en cuenta la influencia de las fuerzas hidrodinámicas.

Experimentos llevados a cabo por Pedersen⁶⁵ con pares de gotas moviéndose, en un líquido inactivo, debido a la boyanza y la di-electroforesis dentro de un campo de 50 Hz confirma que existe una transición de fuerzas de tipo repulsivas a fuerzas atractivas a 55° . No obstante, las gotas que se esperan se repelan unas a otras rápidamente cambian de posición y luego se alinean con el campo eléctrico.

Cabe recordar que las expresiones anteriores solo son válidas para esferas. Para campos eléctricos de gran magnitud la presión electrostática en la superficie de la gota tiende a estirla hasta alcanzar la forma de un elipsoide. Cuando dos gotas están cercanas la desviación de lo que sería la forma esférica será mucho más significativa en la superficie de la gota más grande.

Sin embargo, según Adamiak⁶⁶⁻⁶⁷, para campos eléctricos y tamaños de gota dados en la práctica, la deformación sólo será de importancia siempre y cuando $s/R_2 \ll 1$.

⁶⁵ PEDERSEN, A; ILSTAD, E; NYSVEEN, A. Forces and movement of water droplets in oil caused by applied electric field. Presentación Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE): Conferencia de Aislamiento Eléctrico y Fenómeno Dieléctrico. Colorado (USA), 2004.

⁶⁶ ADAMIAK, K. Force of attraction between two conducting droplets in electric field. Presentación Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE): Procedimientos de Aplicaciones Industriales. Phoenix, Arizona (USA), 1999.

⁶⁷ ADAMIAK, K. Interaction of two dielectric or conducting droplets aligned in the uniform electric field. Revista de Electrostatica. Vol. 51 – 52. Editorial Elsevier. Phoenix, Arizona (USA), 2001.

5.2.3.4 Fuerza de adelgazamiento de película interfacial. La fuerza de adelgazamiento de la película es causada por el drenaje de la película de líquido entre dos pequeñas gotas acercándose. La derivación de las fórmulas que permiten describir este proceso requiere de dos aspectos importantes: primero que el espacio entre las partículas sea pequeño ($s \ll a$), y segundo que el flujo se encuentre dentro del régimen de Stokes ($R_{ed} \cdot s \ll a$), siendo “a” el radio reducido, el cual se puede expresar mediante la Ecuación 63.

$$a = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad (63)$$

$$\vec{F}_f = \frac{-6\pi\mu_c a^2 (\vec{v}_r \cdot \vec{e}_r)}{s} f^* \cdot \vec{e}_r \quad (64)$$

Luego, la fuerza de adelgazamiento de película puede ser obtenida mediante la ecuación anterior (Ver Ecuación 64), en donde \vec{e}_r indica la dirección del movimiento relativo y \vec{v}_r es la velocidad relativa de la segunda gota. En el caso de una esfera rígida la función f^* sería igual a 1.

5.2.4 Modelos electrostáticos para múltiples esferas. Cuando más de dos esferas son consideradas, la ecuación de Laplace sólo podría ser resuelta numéricamente. Esto es posible con un código computacional ágil, pero con el incremento de esferas el tiempo de cálculo se vuelve bastante considerable.

Sin embargo, al utilizar el método de las imágenes explicado con anterioridad, o la *expansión multipolo* propuesta por Sten y Nikoskinen⁶⁸, se pueden llegar a resultados de una manera mucho más rápida, haciendo el cálculo eficiente. Estos métodos son aplicables tanto a partículas dieléctricas como conductivas.

Como se mencionó anteriormente, el campo eléctrico de una esfera conductiva puede ser representado exactamente por un dipolo o una carga puntual en el centro de la esfera. Dos esferas podrían ser modeladas a una aproximación de primer grado mediante dos cargas puntuales o dos dipolos a una distancia descrita arriba como s , y ambas cargas localizadas en los centros respectivos de las esferas.

No obstante, debido a la inducción mutua entre las cargas o los dipolos, las esferas correspondientes no continuarán siendo superficies equipotenciales. Esto puede ser corregido recursivamente mediante la adición de más cargas denominadas Q' , o dipolos extras denominados p' , a medida que se incrementa la distancia respecto al centro de las esferas.

La ventaja más importante con estos métodos es que la fuerza ejercida sobre una esfera por otra es determinada simplemente sumando las fuerzas entre todas las imágenes eléctricas, de acuerdo con la Ley de Coulomb. Además, las interacciones polares en un sistema multi-partícula son aditivas por pares.

⁶⁸ STEN, J. C; NIKOSKINEN, K. I. Image polarization and dipole momento of a cluster of two similar conducting spheres. Revista de Electrostatica. Vol. 35 – 52. Editorial Elsevier. Phoenix, Arizona (USA), 1995.

5.2.5 Fuerzas y movimientos en emulsiones. Para emulsiones agua en aceite o directas, la descripción del fenómeno eléctrico se complica aún más debido a que ya no se dispone de expresiones analíticas que permitan describir el comportamiento de la misma forma en que se realizó para sistemas de una o dos esferas rígidas, permitiendo así conocer el campo eléctrico local y la magnitud de las fuerzas entre cuerpos múltiples.

Si la distribución de la emulsión no es homogénea el campo eléctrico original y generador de los demás puede ser influenciado de tal manera que se incremente en las regiones donde el corte de agua sea menor. Esto puede ser explicado por el hecho de que cuando dos materiales dieléctricos son colocados en serie en un campo eléctrico, los esfuerzos incrementan en el dieléctrico con menor permisividad debido a efectos de polarización. Por lo tanto, una emulsión con un alto corte de agua tendrá una permisividad mayor que una con un corte bajo de agua debido a los efectos de la alta permisividad y conductividad del agua

Si el corte de agua de la emulsión es menor a 5% se podrán utilizar las ecuaciones a presentar posteriormente para el cálculo de los campos eléctricos y las correspondientes fuerzas, puesto que solo raramente hay más de dos gotas al tiempo separada una de otra a la distancia de acción del campo más cercano, por ejemplo a la distancia del radio de una gota. Esta asunción permite realizar simulaciones basadas en el método de elementos discretos propuesto por Melheim⁶⁹.

⁶⁹ MELHEIM, J. A. Cluster integration method for Lagrangian particle dynamics. Revista Computer Physics Communications. 2005.

Para interacciones de múltiples partículas (mayor a dos) en un líquido dieléctrico debe referirse al campo de acción de la *Electroreología*, el cual no es objeto del presente proyecto investigativo. Para mayor información el lector podrá remitirse a la lista anexada que recopila, a consideración de los autores, literatura de contenido excelente en el tema en cuestión (Ver Anexo 2).

En la literatura se datan diversos experimentos llevados a cabo en emulsiones estancadas para obtener una impresión preliminar del comportamiento de este complicado sistema. En ellos fueron variadas la amplitud, frecuencia, y forma de la onda del voltaje aplicado a una gota de agua de una fina emulsión directa (con diámetros menores a 10 micras), inyectada en una fase de aceite puro, y expuesta a un campo eléctrico homogéneo entre dos electrodos.

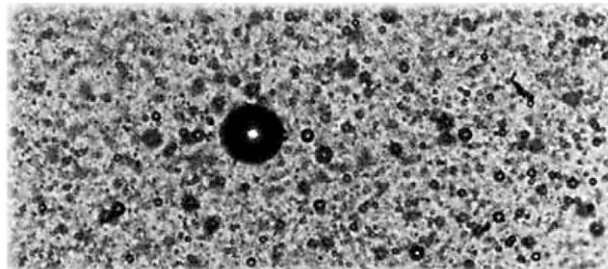
En los experimentos fue imposible evitar gotas cargadas debido a los efectos triboeléctricos⁷⁰ durante el proceso de formación de la emulsión. El fluido base tenía muy baja conductividad dando un tiempo de relajación de carga de varios minutos. El efecto de las gotas cargadas parecía influir la electrocoalescencia para todas las emulsiones, Generalmente, para frecuencias menores a 100 Hz el movimiento de la mayoría de las gotas fue dominado por fuerzas electrostáticas alternadas en las gotas que estaban siendo cargadas. Estas gotas se cargaban ya sea por contacto residente desde el momento de formación de la emulsión o por intercambio de cargas con otras gotas previamente cargadas de la forma anterior al estar en constate contacto.

⁷⁰ El Efecto Triboeléctrico es un tipo de electrificación causado por el contacto con otro material (por ejemplo el frotamiento directo). Cuando se frota dos materiales compuestos por elementos diferentes, la diferencia en afinidad electrónica provoca que uno de los materiales adquiera electrones del otro, y por tanto que uno quede cargado positiva y otro negativamente. Para que se produzca esta transferencia de cargas no es necesario el frotamiento; mediante contacto también se produce esta transferencia, pero al frotar se renuevan continuamente los puntos de contacto por donde se transfieren las cargas, y por ende tiene el mismo efecto que si se aumentara la superficie real de contacto.

Las cargas son dispersadas fácilmente a lo largo de la emulsión debido a las interacciones gota-gota. El movimiento oscilatorio resultante del volumen de aceite tiende a disminuir la eficiencia de la electrocoalescencia. Para frecuencias mayores, de aproximadamente 300 Hz, los movimientos electrostáticos de las gotas cargadas se confinan y son menos influenciados por la emulsión circundante.

En general, la eficiencia de la coalescencia decrece con la disminución del tamaño promedio de la gota en la emulsión y el corte de agua, mientras que no se observa un efecto claro de la forma del voltaje sobre la eficiencia del proceso coalescente. La presencia de una gota más grande aumenta la tasa de coalescencia fuertemente mediante la succión de pequeñas gotas emulsionadas que se encuentren cerca, tal y como se puede observar en la Figura 65.

Figura 65. Gota emulsionada de gran tamaño absorbiendo pequeñas gotas de la emulsión en un campo eléctrico horizontal.



Fuente: LUNDGAARD, Lars E⁷¹.

⁷¹ LUNDGAARD, Lars E; BERG, Gunnar; INGEBRIGTSEN, Stian; ATTEN, Pierre. Emulsion and emulsion stability. Capítulo 15: Electrocoalescence for oil-water separation. Editorial Taylor & Francis Group. Nueva York (Estados Unidos), 2006.

Al tener emulsiones directas sin adición alguna de químicos estabilizadores, con propiedades tales como corte de agua del 20% y tamaño inicial de gota promedio entre 10 a 20 micras, mostraron en dichos experimentos no experimentar coalescencia inducida por campo eléctrico.

Por otro lado, emulsiones químicamente estabilizadas con gotas mucho más pequeñas (diámetros de 1 a 10 micras en promedio), exhibieron un comportamiento distinto, ya que al ser mucho más densas, manifestaron una gran actividad electrocoalescente. Además, para el caso de las emulsiones estabilizadas químicamente más densas, se observó en dichas investigaciones una inesperada expansión repentina y continua del volumen de la emulsión durante cierto tiempo, asemejando períodos del voltaje, iniciando con la aplicación del campo eléctrico.

Este fenómeno fue promovido por campos eléctricos de gran magnitud, suprimido por un incremento en la frecuencia del voltaje, e intensificado empleando voltajes bipolares cuadrados. La expansión continuó hasta que el volumen de la emulsión había alcanzado una nueva densidad de menor valor a la inicial. De ello se determinó que ciertas frecuencias altas óptimas preservan la densidad de la emulsión y por ende la eficiencia de la coalescencia.

Para frecuencias incrementales de más de 10 kHz, la cadena formación se tornaba menos pronunciada, incrementado así la eficiencia de la coalescencia. Muy a menudo pequeñas gotas formaban una cadena alineada con la dirección de acción del campo eléctrico, tal y como se presenta en la Figura 66.

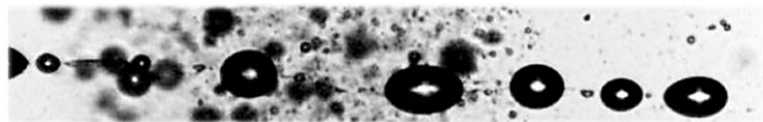
Figura 66. Formación de cadenas en un líquido inactivo a partir de un campo eléctrico horizontal.



Fuente: LUNDGAARD, Lars E⁷².

Con la formación de las cadenas, seguidamente estas gotas van creciendo cada vez más con el tiempo a medida que la cadena coalesce internamente, permitiendo adicionar más gotas al final de las cadenas. Frecuentemente, la tasa de coalescencia para cadenas de gotas grandes (mayores a 100 micras) es menor que la esperada teóricamente, aparentemente debido a la intervención de partículas muy pequeñas que estabilizan las gotas de agua, la cuales tienden a obstruir la coalescencia (Ver Figura 67).

Figura 67. Obstrucción de coalescencia debido a pequeñas gotas al interior de la cadena de gotas de mayor tamaño.



Fuente: LUNDGAARD, Lars E⁷².

⁷² LUNDGAARD, Lars E; BERG, Gunnar; INGEBRIGTSEN, Stian; ATTEN, Pierre. Emulsion and emulsion stability. Capítulo 15: Electrocoalescence for oil-water separation. Editorial Taylor & Francis Group. Nueva York (Estados Unidos), 2006.

5.3 INESTABILIDADES DE GOTA

A pesar de que hasta el momento se continúa tratando las gotas de agua como esferas rígidas, como se había mencionado anteriormente, cuando se aplica un campo eléctrico en un cuerpo suave conductor, como una gota de agua, éste cambiará su forma debido a la presión electrostática generada sobre su superficie, tornándose alargada, hasta el punto en el cual pueda quebrarse debido a las fuerzas generadas por el campo eléctrico. Esto puede ser explicado mediante la teoría clásica de Taylor⁷³, desarrollada para gotas sometidas a campos eléctricos DC.

Sin embargo, la teoría clásica sólo considera una interfase ideal entre el agua y el aceite, sólo caracterizada por su tensión interfacial. En la realidad, la interfase posee un espesor determinado, y es de esperarse que para emulsiones reales la reología de la superficie juegue un papel importante introduciendo nuevas constantes de tiempo y gradientes en las características de la superficie, como el explicado con anterioridad efecto Marangoni, entre otros.

5.3.1 Teoría clásica de inestabilidades de gota. En la ausencia de un campo eléctrico la tensión interfacial T mantendrá la esfericidad de la gota de agua con radio r cuando los efectos gravitacionales son despreciables, es decir, cuando se cumpla que el número *Bond* sea mucho menor a 1 (Ver Ecuación 65).

$$B_o = \frac{\Delta\rho g r^2}{T} \ll 1 \quad (65)$$

⁷³ TAYLOR, G. I. Disintegration of water droplets in an electric field. Revista Procedimientos de la Real Sociedad, Versión A Vol. 146. Londres (Inglaterra), 1964.

El diferencial de presión a lo largo de la interfase de una gota de radio r debido a la tensión superficial se puede determinar empleando la Ecuación 66, de la cual se puede deducir que la estabilidad de la forma de la gota será entonces mayor para gotas más pequeñas.

$$\Delta P = \frac{2T}{r} \quad (66)$$

Cuando se aplica un campo uniforme la gota se deformará debido a los esfuerzos eléctricos en la superficie, y la gota se alargará en la dirección del campo eléctrico. Existen dos diferentes aproximaciones clásicas para modelar la deformación y alargamiento de la gota. Ambos modelos asumen que la gota toma la forma de un *esferoide prolato*⁷⁴. La primera aproximación, la de Sherwood⁷⁵, utiliza un argumento de energía, donde la gota toma una forma que minimiza la energía total, la cual es la suma de la energía electrostática y la energía superficial. En este modelo es posible variar la permisividad y conductividad de la gota de líquido y del fluido de suspensión.

La segunda aproximación es la de Taylor⁷⁶, la cual busca una solución estática tal que el diferencial de presión, debido a la tensión interfacial y la presión electrostática, a lo largo de la interfase de la gota sea el mismo en cualquier punto de la interfase.

⁷⁴ Un esferoide es un elipsoide de revolución, es decir, la superficie que se obtiene al girar una elipse alrededor de uno de sus ejes principales. Por convenio, el eje de simetría se denomina c y se sitúa en el eje de coordenadas cartesianas z ; el eje perpendicular al de simetría se denomina a . Un esferoide prolato es un esferoide en el cual su eje polar es mayor que su diámetro ecuatorial, es decir, si $a < c$.

⁷⁵ SHERWOOD, J. D. Breakup of fluid droplets in electric and magnetic fields. Revista Mecánica de Fluidos. Vol. 188. 1964.

⁷⁶ TAYLOR, G. I. Disintegration of water droplets in an electric field. Revista Procedimientos de la Real Sociedad, Versión A Vol. 146. Londres (Inglaterra), 1964.

Postular que la forma de la gota deformada sea un elipsoide entrega la posibilidad de estimar el diferencial de presión ΔP en dos puntos: el polo de la gota y el eje horizontal central de la misma (denominado *ecuador*). Balanceando e igualando los dos diferenciales de presión, se puede obtener la siguiente ecuación y las expresiones que determinan las variables involucradas (Ver Ecuaciones 67, 68 y 69):

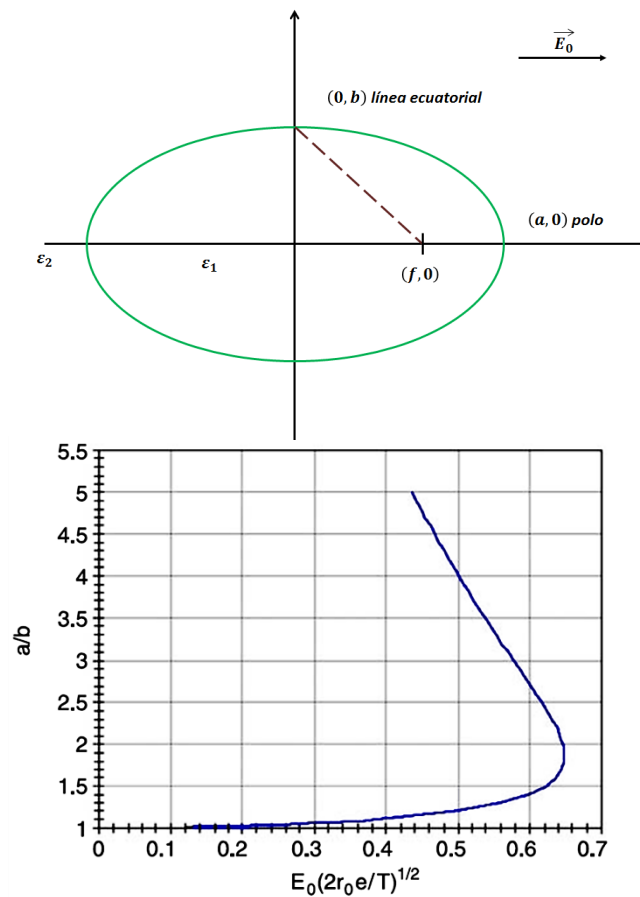
$$E_0 \sqrt{\frac{2r_0 \varepsilon}{T}} = 2 \cdot \left(\frac{b}{a}\right)^{\frac{4}{3}} \cdot \left(2 - \frac{b}{a} - \left(\frac{b}{a}\right)^3\right)^{\frac{1}{2}} \cdot I_2 \quad (67)$$

$$I_2 = \left[\frac{1}{2} e^{-3} \cdot \ln\left(\frac{1+e}{1-e}\right) \right] - e^{-2} \quad (68)$$

$$e = \sqrt{\frac{1-b^2}{a^2}} \quad (69)$$

Donde a y b son los semi ejes del esferoide prolato, y “ e ” es la excentricidad. El alargamiento de la gota incrementa a medida que el campo eléctrico también lo hace hasta una relación de aspecto límite por encima de la cual la gota se vuelve inestable. El campo eléctrico con el cual se alcanza el límite en la relación de aspecto es denominado *campo crítico*, y detallado como E_c . En el siguiente esquema (Ver Figura 68) se puede apreciar el alargamiento teórico como función del campo eléctrico:

Figura 68. Alargamiento teórico de una gota de agua como función del campo eléctrico aplicado (a semi-eje largo, b semi-eje corto).



Fuente: LUNDGAARD, Lars E⁷⁷. Modificado.

Considerando un caso especial de una gota completamente conductiva, Taylor mostró que un esferoide prolato estacionario tiene una máxima relación de aspecto posible $a/b \cong 1.9$, como se pudo observar en la Figura 68, en donde claramente en este valor de relación de aspecto la función cambia drásticamente de dirección, indicando que en este momento se está aplicando el campo eléctrico crítico para dicha gota, el cual puede determinarse mediante la siguiente ecuación (Ver Ecuación 70):

⁷⁷ LUNDGAARD, Lars E; BERG, Gunnar; INGEBRIGTSEN, Stian; ATTEN, Pierre. Emulsion and emulsion stability. Capítulo 15: Electrocoalescence for oil-water separation. Editorial Taylor & Francis Group. Nueva York (Estados Unidos), 2006.

$$E_c = 0.648 \sqrt{\frac{T}{2\epsilon r_0}} \quad (70)$$

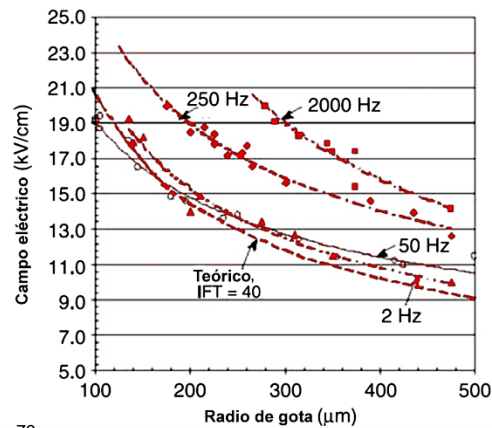
Cuando la gota se continúa sometiendo a campos eléctricos aún mayores al crítico, ésta se vuelve inestable en los polos y tenderá a separarse.

5.3.2 Observaciones experimentales de la desintegración de gotas de agua en aceite. Un estudio de las inestabilidades de gotas sub-milimétricas inmersas en aceite nafténico refinado fue realizado por Berg⁷⁸, variando la frecuencia y la forma de la onda del voltaje AC aplicado. Las gotas eventualmente se asentaron lentamente por gravedad en un campo eléctrico horizontal mientras el voltaje era gradualmente incrementado. En dicha experiencia, se utilizó una cámara para observar los cambios en la forma y poder determinar en qué condiciones ocurría la inestabilidad. Para voltajes DC, se le dificultó mantener la gota en el campo de visión a medida que la gota adquiría carga fácilmente y era atraída al electrodo.

La frecuencia de voltaje AC aplicada se varió entre 2 Hz y 2000 Hz. Se determinó que a medida que se incrementaba la amplitud del voltaje, las gotas se deformaban como esferoides prolatos pulsando al doble de la frecuencia de voltaje esperada. Para bajas frecuencias, en el rango de 2 a 50 Hz, la medición del campo crítico para la desintegración de la gota correspondía con los valores teóricos obtenidos de la Ecuación 70, independientemente de la forma de la onda del voltaje aplicado. Sin embargo, a frecuencias mayores el campo crítico aumenta con el aumento de la frecuencia aplicada (Ver Figura 69).

⁷⁸ BERG, G; LUNDGAARD, L; BECIDAN, M; SIGMOND, R. S. Instability of electrically stressed water drops in oil. Presentación Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE): Conferencia Internacional de Líquidos Dieléctricos (ICDL). Colorado (USA), 2004.

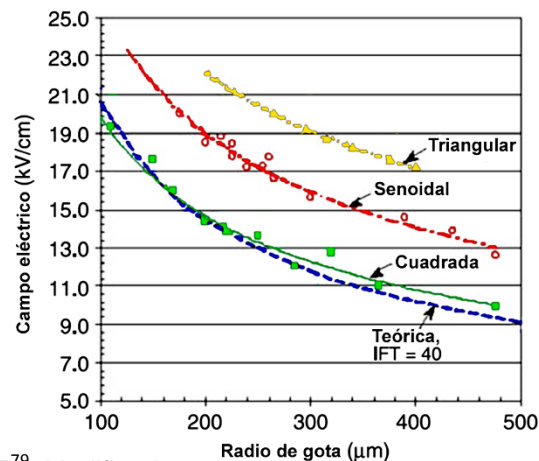
Figura 69. Magnitud del campo para separación de gota para varias frecuencias de voltaje senoidal puro.



Fuente: LUNDGAARD, Lars E⁷⁹. Modificado.

Las diferentes formas de onda de voltaje utilizadas en dicho estudio fueron triangular, senoidal, y cuadrada. Para diferentes frecuencias por encima de 100 Hz se observó que el campo crítico también era dependiente de la forma de la onda de voltaje cuando la frecuencia de onda se mantenía constante (Ver Figura 70).

Figura 70. Magnitud del campo para separación de gota para diferentes formas de voltaje aplicado a 250 Hz.



Fuente: LUNDGAARD, Lars E⁷⁹. Modificado.

⁷⁹ LUNDGAARD, Lars E; BERG, Gunnar; INGEBRIGTSEN, Stian; ATTEN, Pierre. Emulsion and emulsion stability. Capítulo 15: Electrocoalescence for oil-water separation. Editorial Taylor & Francis Group. Nueva York (Estados Unidos), 2006.

La desintegración de las pequeñas gotas de agua puede ser predicha muy bien teóricamente para aplicación de bajas frecuencias, independientemente de la forma de la onda de voltaje. Sin embargo, a medida que la frecuencia incrementa, se requerirá un campo eléctrico más fuerte para alcanzar la inestabilidad de la gota.

Esto puede entenderse teniendo en cuenta la inercia del sistema. Para una frecuencia muy baja la deformación de la gota sigue el cambio en la presión electrostática, por ende, a pesar del carácter oscilatorio, en cualquier momento la gota se encuentra en equilibrio cuasi-estático. Luego la inestabilidad ocurre cuando se alcanza el máximo valor del campo permisible, el crítico. Aumentar la frecuencia hace que se incrementen los efectos de la inercia, de tal forma que, cuando las fuerzas inerciales alcancen un valor similar a las fuerzas capilares y eléctricas, la amplitud de la oscilación de la gota disminuirá y se requerirá un mayor campo eléctrico para alcanzar la elongación crítica y posterior ruptura de la gota.

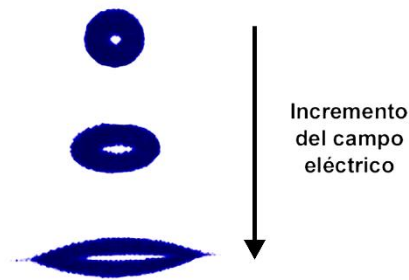
A frecuencias altas la amplitud de oscilación es muy pequeña y puede ser despreciable, por ello, la inestabilidad se da cuando el campo efectivo alcanza el valor crítico E_c . Además, es de esperarse una razón, entre valores críticos del campo efectivo de alta y de baja frecuencia, de $\sqrt{2}$ para ondas senoidales, y de $\sqrt{3}$ para ondas triangulares. Esto justifica el hecho observado en la Figura 70, en la cual se evidenció que el campo crítico de la forma de onda cuadrada es mayor al campo crítico de la forma de onda senoidal, y ésta a su vez mayor que el campo crítico de la forma de onda triangular ($E_c^{cuadrada} < E_c^{senoidal} < E_c^{triangular}$) para una frecuencia dada.

Incrementar la conductividad de la fase acuosa no indujo, de acuerdo con los resultados del experimento, un efecto notable en el campo eléctrico crítico. Esto es válido, debido a la gran diferencia de conductividad entre el agua y el aceite. La influencia de las características de la superficie también fueron estudiadas mediante la adición de asfáltenos, de los cuales ya fueron explicados sus efectos sobre la superficie con anterioridad. Con la adición de estos compuestos condujo a una disminución de la estabilidad de la gota de agua expuesta a un campo eléctrico, presuntamente debido al descenso de la tensión interfacial.

Es muy probable que las consideraciones anteriores acerca del efecto de la inercia sean sólo una parte de la realidad del fenómeno completo. Estrictamente hablando, la Ecuación 70 entrega la mayor magnitud de campo eléctrico a la cual puede aún existir la deformación estática de la gota. Esto implícitamente corresponde a un campo eléctrico DC, puesto que un campo eléctrico AC con onda de forma cuadrada prácticamente provee una presión electrostática constante. Se requiere de un análisis de inestabilidad detallado en casos de campos AC con forma de onda senoidal o triangular para tener en cuenta la influencia de la frecuencia.

La frecuencia y la forma de la onda del voltaje deberían jugar un papel importante en el desarrollo de los puntos terminales de las gotas y en la subsecuente formación de un chorro o expulsión de pequeñas gotas. La desintegración de la gota observada en la Figura 71 (Chorro cónico de Taylor), la cual asume condiciones estacionarias o un campo DC, no siempre es la que se tiene en la realidad.

Figura 71. Adelgazamiento de gota y formación del cono de Taylor durante el aumento del campo eléctrico.



Fuente: LUNDGAARD, Lars E⁸⁰. Modificado.

En condiciones de inestabilidad, la deformación y eventualmente desintegración de la gota dependen de la forma y la frecuencia de la onda del campo eléctrico AC. Se ha podido observar que el comportamiento alrededor del voltaje crítico no es estacionario, a su vez que a bajas es dominado por la pulsación de la pequeña gota. Durante esta situación dinámica, las relaciones de aspecto exceden por mucho la teórica de 1.9 determinada anteriormente en situación estacionaria. En esto entran a jugar muchos factores como pérdida de carga, viscosidad y tamaño de la gota, entre otros, todos debido a la expulsión de masa de las terminales de la gota

Diferentes inestabilidades de los puntos terminales de las gotas se observaron en los estudios llevados a cabo por Taylor, involucrando expulsión de gotas de varios tamaños desde grandes gotas a nubosidades muy finas, como se muestra en las Figuras 72, 73 y 74.

⁸⁰ LUNDGAARD, Lars E; BERG, Gunnar; INGEBRIGTSEN, Stian; ATTEN, Pierre. Emulsion and emulsion stability. Capítulo 15: Electrocoalescence for oil-water separation. Editorial Taylor & Francis Group. Nueva York (Estados Unidos), 2006.

Una vez que la inestabilidad ha comenzado, continuará hasta que el tamaño original de la gota sea reducido por debajo del límite crítico, terminando con una ruptura final microscópicamente violenta, dada en diferentes modos como separación en pocas gotas o incluso de tipo explosivo.

Figura 72. Inestabilidad de gota tipo I: Expulsión de pequeñas gotas individuales.



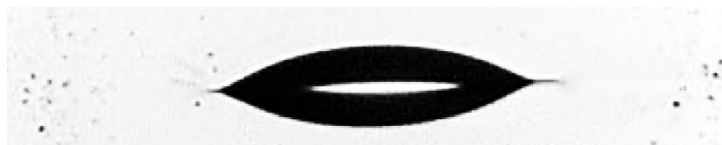
Fuente: LUNDGAARD, Lars E⁸¹.

Figura 73. Inestabilidad de gota tipo II: Expulsión de nubes de pequeñas gotas.



Fuente: LUNDGAARD, Lars E⁸¹.

Figura 74. Inestabilidad de gota tipo III: Expulsión de nubes de gotas muy finas.



Fuente: LUNDGAARD, Lars E⁸¹.

⁸¹ LUNDGAARD, Lars E; BERG, Gunnar; INGEBRIGTSEN, Stian; ATTEN, Pierre. Emulsion and emulsion stability. Capítulo 15: Electrocoalescence for oil-water separation. Editorial Taylor & Francis Group. Nueva York (Estados Unidos), 2006.

5.3.3 Estudio dinámico de la forma de la gota para campos eléctricos transitorios. Los modos de resonancia $n \geq 2$ para una gota libre fueron calculados teóricamente por Sample y Hendricks⁸², partiendo del esquema de una gota en aire. Para una gota de agua en un líquido dieléctrico el modo que domina es el segundo, $n=2$, a medida que la dinámica de la superficie de la gota es ahogada por los efectos viscosos.

Las oscilaciones transitorias de una gota alargándose hacia un esferoide en estado estable puede ser estudiada aplicando una onda corta cuadrada de voltaje pulsado. De la misma manera, la relajación de la superficie de la gota puede ser observada cuando el voltaje se apaga. Esto puede ser utilizado para medir la elasticidad de la superficie “e” y otras propiedades dinámicas de la interfase agua/aceite, como por ejemplo la constante de tiempo de absorción de surfactante, entre otras. De acuerdo con la definición de Gibbs reportada por Hansen⁸³, la elasticidad de la superficie de la gota está dada por (Ver Ecuación 71):

$$e = \frac{dT}{d \ln A} \quad (71)$$

Donde T es la tensión interfacial y A es el área superficial de la gota. El truncamiento significativo del comportamiento dinámico debido a las fuerzas viscosas afecta la formación de inestabilidad, la cual es reducida por una superficie de gota menos flexible.

⁸² SAMPLE, S. B; HENDRICKS, C. D; RAGHUPATY, B. Quiscent distortion and resonant oscillations of a liquid drop in an electric field. *Revistan Internacional de Ingeniería y Ciencia*. Vol. 8. 1970.

⁸³ HANSEN, F. K. Surface elasticity and viscosity form oscillating bubbles measured by automatic axisymmetric drop shape analysis. *Revista de Coloides y Ciencia Interfacial*. Vol. 207. 1998.

Por ello, gotas de agua con superficies saturadas de asfaltenos exhibirán frecuentemente una elongación estacionaria de más de dos veces el valor teórico de ruptura determinado con anterioridad ($a/b=1.9$)

5.4 LOS MECANISMOS DE LA ELECTROCOALESCENCIA

De los Capítulos 5.2 y 5.3 se obtienen imágenes de un campo eléctrico el cual estimula las fuerzas de atracción entre las gotas cercanas, provocando la unión de pares de gotas, y formando eventualmente la coalescencia. Esta imagen solo aplica para emulsiones estancadas ya que para el caso donde las emulsiones se encuentran en movimiento tienen un comportamiento totalmente diferente. Cuando la emulsión está caracterizada por un flujo turbulento o un flujo laminar, debido a la acción de cizallamiento, las gotas en un volumen próximo a una gota en particular tienen un movimiento relativo, lo cual puede llevar a que se acerquen en algunos momentos.

En los separadores en los cuales no se aplican campos eléctricos, estas cuasi-colisiones dan como resultado el deslizamiento buscando separarse unas de otras, durante un tiempo determinado. Sin un campo eléctrico la tasa de coalescencia natural para gotas adyacentes es muy baja, mientras que cuando es aplicado un campo eléctrico esta tasa es mucho más alta y aumenta con la magnitud del campo. Así, se pueden distinguir dos etapas durante el proceso de electrocoalescencia: La primera es la atracción entre pares de gotas (la cual está determinada principalmente por el flujo), y la segunda en la cual el campo eléctrico induce a la coalescencia. Esta sección se centrará en la segunda etapa, es decir, en la fusión de dos gotas cercanas bajo la acción de un campo eléctrico.

Esta es una situación bastante compleja y se considerará el caso más sencillo posible suponiendo que:

- ✓ Las gotas de agua son eléctricamente neutras (sin carga neta).
- ✓ Se asume que el agua es perfectamente conductora y el aceite es perfectamente aislante.
- ✓ Las dos gotas son idénticas y sus centros se encuentran alineados con el campo eléctrico.

Por otra parte, estas consideraciones asumen implícitamente que las gotas tienen un radio pequeño y que la distancia entre sus interfases enfrentadas es menor que su radio.

5.4.1 Fusión de pares de gota. La principal pregunta que se plantea es la naturaleza de la gota que resulta después de la unión de dos gotas muy cercanas; esto es importante para las aplicaciones prácticas puesto que un buen conocimiento de este mecanismo podría ayudar favorable o desfavorablemente la electrocoalescencia. Se pueden proponer tres posibles escenarios:

- ✓ La intensidad del campo entre las gotas de agua es suficiente para iniciar una descarga eléctrica y un choque de onda que perfora la capa de aceite.
- ✓ La fuerza de atracción entre las gotas hace que se acerquen más y más ocurriendo así la coalescencia al final del proceso de adelgazamiento de la película de aceite que separa dichas gotas.

- ✓ La presión electrostática induce a la deformación de las interfases agua-aceite y surge la coalescencia debido a que la separación de gota toma un valor finito cuando al menos una de estas interfases se vuelve inestable.

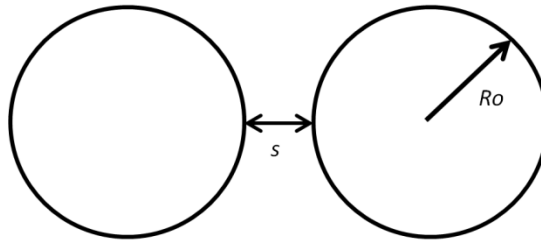
La posibilidad de conseguir descargas parciales entre las gotas de agua fue sugerida por Lundgaard y sus colegas⁸⁴. Sin embargo, parece muy poco probable que este mecanismo ayude a la activación de la coalescencia. Para gotas de tamaño mayor o igual a un milímetro, el campo eléctrico induce a su desintegración y no a una descarga. Para gotas diminutas de diámetros $2R_0 < 100 \mu m$ (que es el caso para las emulsiones tratadas por electrocoalescedores), las descargas eléctricas entre las gotas diminutas cercanas parecen imposibles. En efecto, de manera similar ocurre con los gases, puesto que éstos requieren de un diferencial de potencia mínimo para generar descarga de electrones de la fase aceite.

Ahora desde los resultados dados en el Capítulo 5.3, la diferencia de potencial ΔV entre dos gotas eléctricas neutras es menor que el producto del el campo E_0 (aplicado a las emulsiones) y la distancia entre el centro de las gotas. Para el caso de gotas diminutas cercanas se da $\Delta V < 2R_0E_0$. Con un campo de fondo $E_0 = 1 kV/mm$ (siendo este un campo alto en un dispositivo de coalescencia), se obtiene $\Delta V < 100 V$, un valor menor que la tensión mínima de Paschen para una descarga auto-sostenible en el aceite en que se encuentran suspendidas las gotas.

⁸⁴ LUNDGAARD, Lars E; BERG, Gunnar; PEDERSEN, A; NIELSEN, P. J. Electrocoalescence of water drop pairs in oil. Conferencia de Aislamiento Eléctrico y Fenómeno Dieléctrico. Austria, 2002.

Por lo tanto, en electrocoalescedores utilizados para aumentar el tamaño de las gotas diminutas en las emulsiones de agua-aceite, la coalescencia puede que no desencadene la descarga eléctrica entre las gotas diminutas. En los modelos convencionales de coalescencia, el drenaje de la película entre dos gotas juega un papel importante ya que actúa como una barrera activa que soluciona el contacto entre gotas, actuando como puente entre éstas⁸⁵.

Figura 75. Dos conductores esféricos a una distancia s .



Fuente: Autores.

Para dos esferas no distorsionadas de radio R_o en una pequeña distancia s (Ver Figura 75), la ley para deducir esta película delgada planteada por Vinogradova⁸⁶, y Allan y Mason⁸⁷ es (Ver Ecuación 72):

$$\frac{ds}{dt} = - \frac{2Fs}{3\pi\eta R_o^2} \quad (72)$$

⁸⁵ ANGLE, C. W. Chemical demulsification of stable crude oils and bitumen emulsions in petroleum recovery – a review. Encyclopedic Handbook of Emulsion Technology. Editorial J. Sjöblom, Marcel Dekker. Nueva York, 2001.

⁸⁶ VINOGRADOVA, O. I. Drainage of a thin liquid film confined between hydrophobic surfaces. Langmuir, Vol. 11. 1995.

⁸⁷ ALLAN, R. S; MASON, S. G. Particle motions in sheared suspensions. XIV. Coalescence of liquid drops in electric and shear fields. Revista Ciencia de los Coloides. Vol. 17. 1962.

Donde F es la fuerza de interacción y η es la viscosidad del aceite. Es evidente que un incremento de la fuerza de atracción causa un decrecimiento en la distancia s , la separación s de la gota se acerca a cero en un tiempo finito lo cual implica un límite para que ocurra la coalescencia. Considerando el caso más simple en el cual se encuentran dos gotas de radio R_0 entre las cuales se mantiene una diferencia de potencial ΔV . Una buena aproximación de la fuerza de atracción es (Ver Ecuación 73):

$$F = \frac{\pi}{2} \varepsilon (\Delta V)^2 \frac{R_0}{s} \quad (73)$$

Siendo la aproximación de velocidad de la gota una constante (Ver Ecuación 74):

$$\frac{ds}{dt} = - \frac{1}{3} \frac{\varepsilon (\Delta V)^2}{\eta R_0} \quad (74)$$

Definiendo t_{ec} como el tiempo necesario para la separación de la gota para pasar de $R_0/3$ a cero, se obtiene la siguiente expresión (Ver Ecuación 75):

$$t_{ec} = \frac{\eta R_0^2}{\varepsilon (\Delta V)^2} \quad (75)$$

Un valor típico de $t_{ec} \approx 50$ ms para $\Delta V/R_0 = 1$ kV/cm.

Esta imagen de la película total de drenaje es válida para esferas rígidas de radio bien definido. Al parecer, esto excluye los casos donde la gota presenta forma de canales planos, depresiones, etcétera. No obstante, la fuerte presión electrostática en la zona de la distancia más corta entre las pequeñas gotas tiende a mantener las superficies convexas enfrentadas y muy probablemente evita la formación de canales planos y/o depresiones. Por otra parte, los radios de curvatura de las partes enfrentadas de las interfases deberían tender a reducirse lo cual va ayudar al drenaje de la película y por lo tanto a disminuir el límite superior del tiempo de coalescencia.

En el escenario anterior de adelgazamiento de la película, se asumía implícitamente que las partes de la superficie de las gotas expuestas a fuertes fuerzas eléctricas tienden a mantener su forma lisa. Si se hace referencia al problema cualitativamente similar al de desintegración de una sola gota cuando es sometida a un campo uniforme, es evidente que las interfases se desestabilizarán bajo el efecto de la presión electrostática, llevando a la deformación de las interfases que enfrenta, superando así la acción de restauración de la tensión superficial. Por lo tanto se puede describir el proceso de electrocoalescencia de la siguiente manera: después de una primera etapa de aproximación de las dos gotas diminutas resultantes de la acción de la cizalla (o del campo eléctrico en una emulsión estancada), se encuentra la segunda etapa de adelgazamiento de la película y la deformación de la gota hasta desestabilizar las interfases y conducir a la generación de un puente entre las gotas en un tiempo muy corto.

El desarrollo de la inestabilidad todavía no se ha investigado ni caracterizado; a partir del estudio particular de desintegración de las gotas (Ver Capítulo 5.3), y desde observaciones recientes, solo se puede inferir que es un proceso muy rápido el cual posiblemente involucra la formación de un chorro un poco estrecho.

5.4.2 Condiciones críticas. Diversos estudios se han centrado en este tema. Estrictamente hablando no les concierne las condiciones de inestabilidad sino la determinación de la solución estacionaria para dos gotas de agua idénticas y la forma como son distorsionadas bajo la acción de fuerzas eléctricas. En estos estudios un campo de corriente continua (DC) es aplicado; los resultados también se aplican para campos sinusoidales de corriente alterna (AC) a condiciones de frecuencia muy bajas y considerando las gotas en un estado cuasi estático en cualquier momento. El campo crítico $(E_0)_{crit}$ (o diferencia de potencial crítico ΔV_{crit} entre las gotas) es determinado como el máximo valor más allá del cual no existe sino una solución estacionaria.

El primer estudio se realizó sobre las gotas de lluvia en las tormentas. Latham y Roxburgh⁸⁸ observaron que las gotas no se colocan una cerca de la otra en un campo eléctrico sino que estas se deforman a elipsoides y eventualmente se desintegran a altos esfuerzos. Si las gotas se encuentran muy cerca conllevarán a la coalescencia, ocurriendo esto por una consecuente inestabilidad en la transferencia de masa desde una gota a otra. Su derivación se basa en la suposición de que las gotas toman una forma elipsoidal y en las fórmulas de Davis⁸⁹ para los valores de campo en los polos opuestos de las esferas.

Se determinó un valor crítico del campo aplicado como una función de la relación de la separación inicial de las gotas S_0/R_0 y encontraron que se aproximaba con sus mediciones experimentales.

⁸⁸ LATHAM, J; ROXBURGH, I. W. Disintegration of pairs of water drops in an electric field. Revista Procedimientos de la Real Sociedad, Versión A Vol. 295. Londres (Inglaterra), 1966.

⁸⁹ DAVIS, M. H. Two charged spherical conductors in a uniform electric field: Forces and field strength. Quart. J. Mech. Appl. Math. Vol. 17. 1964.

Una propiedad interesante se pudo derivar de estos resultados⁹⁰: La separación crítica s_{crit} es una fracción de la separación de las gotas no distorsionadas s_o ($s_{crit} \cong 0.63 s_o$). Solo es posible una deformación limitada de la gota; más allá de la deformación crítica, la presión electrostática es mayor que la presión capilar y se da un proceso dinámico donde la gota se alarga hasta entrar en contacto con la superficie de la otra.

Taylor⁹¹ considera el caso de dos gotas donde el espacio entre ellas es demasiado estrecho, en las cuales se aplica una diferencia de potencial ΔV . Las gotas se anclan en dos anillos, que les impide moverse de una hacia la otra. Su hipótesis principal fue considerar que la forma esférica de las gotas se distorsiona solo en las zonas delimitadas por los anillos. Resolviendo numéricamente la ecuación aproximada para las interfases deformes, obtuvo predicciones cercanas con los resultados experimentales. Lo más interesante de estos resultados se refiere al caso asintótico de un espaciamiento muy pequeño o reducido de las gotas ($S_o / R_o \ll 1$) caracterizado por las siguientes condiciones críticas (Ver Ecuaciones 76 y 77):

$$s_{crit} \cong \frac{1}{2} s_o \quad (76)$$

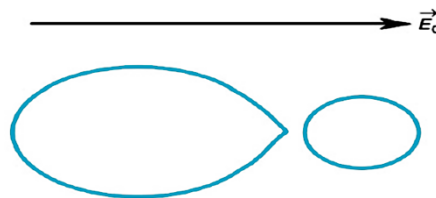
$$\Delta V_{crit} \approx 0.38 s_o \sqrt{\frac{T}{\epsilon R_o}} \quad (77)$$

⁹⁰ ATTEN, P; LUNGAARD, L; BERG, G. A simplified model of electrocoalescence of two close water droplets in oil. Proceed. 5th Intern. EHD Workshop. Editorial Poitiers. 2004.

⁹¹ TAYLOR, G. I. The coalescence of closely spaced drops when they are at different potentials. Procedimientos de la Real Sociedad, Versión A Vol. 306. Londres (Inglaterra), 1968.

Una vez más las soluciones estáticas solo existen para una deformación limitada correlacionando con una diferencia de potencial limitada. Un punto importante a resaltar aquí es que las condiciones críticas corresponden a un valor local del campo en la película de aceite entre las gotas $\Delta V_{crit}/s_{crit}$ independiente de la separación S_0 .

Figura 76. Deformación de 2 gotas cercanas.



Fuente: LUNDGAARD, Lars E⁹². Modificado.

A través de un tratamiento numérico más sofisticado del problema de deformación de la gota, Brazier-Smith⁹³ confirmó que para $s_0 \ll R_0$ la distorsión de la superficie está restringida principalmente en la zona donde las superficies de las gotas están cerca (Ver Figura 76). Examinando la evolución de la forma de las gotas en el tiempo, se demostró⁹⁴ que para una separación de la gota suficientemente grande $s_0 > 1.2R_0$, al igual que para una sola gota, la inestabilidad ocurre a través del modo de cono de chorro. Para separaciones más pequeñas no hay una evidencia de formación tipo jet o chorro.

⁹² LUNDGAARD, Lars E; BERG, Gunnar; INGEBRIGTSEN, Stian; ATTEN, Pierre. Emulsion and emulsion stability. Capítulo 15: Electrocoalescence for oil-water separation. Editorial Taylor & Francis Group. Nueva York (Estados Unidos), 2006.

⁹³ BRAZIER-SMITH, P. R. Stability and shape of isolated and pairs of water drops in an electric field. Física de Fluidos. Vol. 14, 1° Edición. 1971.

⁹⁴ BRAZIER-SMITH, P. R; JENNIGS, S. G; LATHAM, J. An investigation of the behavior of drops and drops pairs subjected to strong electrical forces. Procedimientos de la Real Sociedad, Versión A Vol. 325. Londres (Inglaterra), 1971.

En el caso de valores muy pequeños de la distancia s_0 entre cada gota no deformada, lo que es de interés para la aplicación de electrocoalescedores, se propuso un cuadro físico⁹⁵ el cual ilustra este fenómeno y es justificado por las leyes obtenidas por Taylor. Las gotas son distorsionadas sólo en las zonas donde las interfaces presentan una distancia muy corta y las presiones electrostáticas p_{es} toman valores altos (Ver Ecuación 78):

$$p_{es} = \frac{1}{2} \varepsilon E^2 = \frac{1}{2} \varepsilon \frac{\Delta V^2}{z^2} \quad (78)$$

La letra s denota la separación entre las gotas y mediante la adopción de la siguiente expresión parabólica para la distancia z entre las interfases en la distancia radial r desde el eje de dos gotas (Ver Ecuación 79):

$$z = s + \frac{r^2}{R_0} = s \left[1 + \frac{r^2}{R_0 s} \right] \quad (79)$$

Se observa que la distribución de la presión electrostática tiene una escala característica $(R_0 s)^{1/2}$. La zona deformada de las gotas tiene el siguiente radio $r_{dist} = A(R_0 s)^{1/2}$, donde A es una constante numérica (fuera de la región de deformación este valor se puede despreciar).

⁹⁵ ATTEN, P; LUNGAARD, L; BERG, G. A simplified model of electrocoalescence of two close water droplets in oil. Proceed. 5th Intern. EHD Workshop. Editorial Poitiers. 2004.

Ésta es una solución asintótica válida $s / R_0 < 1/A^2$. Asumiendo que los centros de las partes esféricas de las gotas son inmóviles y que las partes deformadas ($r \leq r_{dist}$) se caracterizan por un radio de curvatura $R < R_0$, una simple relación entre R y R_0 se puede deducir, de acuerdo con Atten y Lungaard⁹⁶ (Ver Ecuación 80):

$$\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} = \frac{1}{A^2} \frac{s_0 - s}{R_0 s} \quad (80)$$

Donde s_0 es el espaciamiento entre las gotas que no están distorsionadas. Balanceando la diferencia de presión capilar entre el polo, la parte esférica y la presión electrostática conlleva a (Ver Ecuación 81):

$$(\Delta V)^2 = \frac{4}{A^2} \frac{T}{\epsilon R_0} s (s_0 - s) \quad (81)$$

El máximo valor de ΔV a las condiciones críticas es (Ver Ecuación 82):

$$\Delta V_{crit} = \frac{1}{A} * s_0 \sqrt{\frac{T}{\epsilon R_0}}, \quad s_{crit} = \frac{s_0}{2} \quad (82)$$

Con esto se retoman las Ecuaciones 76 y 77, al remplazar la constante A ($A \cong 2.6$).

⁹⁶ ATTEN, P; LUNGAARD, L; BERG, G. A simplified model of electrocoalescence of two close water droplets in oil. Proceed. 5th Intern. EHD Workshop. Editorial Poitiers. 2004.

En el caso de dos gotas sujetas a un campo uniforme E_o , La principal dificultad es evaluar ΔV ; usando la expresión asintótica para ΔV válida para esferas (Ver Ecuación 60), se propone el siguiente valor crítico para el campo (Ver Ecuación 83):

$$(E_o)_{crit} \cong 0.058 \frac{s_o}{R_o} \log \left(\frac{2R_o}{s_o} \right) \sqrt{\frac{T}{\epsilon R_o}} \quad (83)$$

Esta relación también puede ser usada en la determinación de la separación crítica s_o para un campo E_o dado. Hasta el momento las investigaciones sólo trabajan con dos gotas idénticas. En el caso de gotas de diferente radio, la gota más grande tiene una presión interna baja (debido a la tensión superficial), y esta superficie es más fácil de deformar. Por lo tanto la interfase de la gota grande tiende a deformarse primero, tal y como se pudo observar en la Figura 74.

Hasta ahora solo se ha analizado el caso aplicando un campo eléctrico de corriente continua. Usando un voltaje de forma rectangular generado por corriente alterna define las mismas condiciones que un campo de corriente continua para la deformación de la gota. Con la aplicación de un voltaje sinusoidal, el problema es diferente y no es posible tener en cuenta la efectividad aplicando un solo campo.

La presión electrostática tiene un valor medio y un componente sinusoidal al doble de la frecuencia. Este componente periódico induce a una modulación periódica de la superficie distorsionada cuya amplitud e influencia sobre la estabilidad de la interfase dependerá de la frecuencia.

El ejemplo de desintegración de una sola gota (Ver Capítulo 5.3) ilustra cómo influye la frecuencia. Esto presume que debería influir en las condiciones críticas.

En la práctica, la desemulsificación de aceite, que contiene numerosas sustancias químicas, hace que la situación no sea tan ideal como en las hipótesis planteadas anteriormente. Con la presencia de surfactantes, la tensión superficial varía con la deformación y la expansión de la interfase, la cual debería modificar drásticamente las condiciones de electrocoalescencia (por ejemplo los ácidos nafténicos tiene un efecto estabilizante sobre las emulsiones agua-aceite). En el caso de las gotas que son cubiertas por una película de surfactantes (como asfáltenos, bitúmenes y resinas), forman cierta rigidez, y la deformación de la gota es afectada por esta rigidez, jugando un papel especial el adelgazamiento de la capa que la recubre en el control de los procesos de coalescencia.

Otro fenómeno a tener en cuenta es la presencia de partículas en la superficie de la capa que actuarían como espaciadores manteniendo la superficie de las gotas cercanas en una distancia finita dificultando así la coalescencia. En todos estos casos no es posible usar las deducciones que se obtuvieron a partir de condiciones ideales para que ocurra la electrocoalescencia y, por lo tanto, un diseño universal de electrocoalescedor; los fenómenos básicos por ende deben caracterizarse claramente antes de intentar deducir condiciones críticas para el electrocoalescedor.

5.4.3 Investigaciones experimentales de caídas de gotas. Diferentes investigaciones se han realizado acerca de los fenómenos básicos de electrocoalescencia gota-gota utilizando campos de corriente alterna.

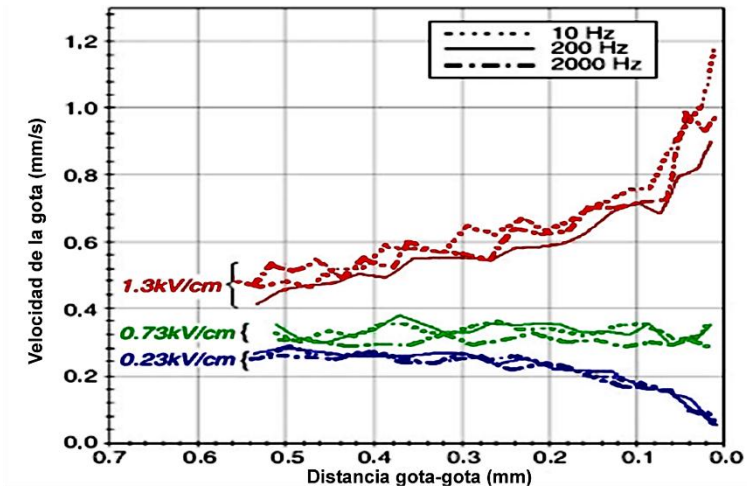
La influencia de la forma, frecuencia y magnitud del campo eléctrico de corriente alterna fue estudiada por Atten y Lungaard⁹⁷, en un banco óptico bajo condiciones de campo homogéneas descritas. Además, la influencia de factores como la salinidad y sustancias tenso-activas también fueron estudiadas. La mayor parte de los experimentos se hicieron con una pequeña gota cayendo sobre una gota larga que reposaba sobre un electrodo. La gota estacionaria se encontraba en contacto directo con la superficie del electrodo (gota sin aislamiento), o separada del electrodo por una disco de polipropileno (gota aislada).

Bajo condiciones sinusoidales de voltaje de corriente alterna se observó el comportamiento típico de la superficie inferior (con menor cobertura y presión interna), la cual empezó a deformarse y a oscilar con la aplicación del campo eléctrico a medida que éste se aproximaba a la gota, y también comenzó a deformarse mientras la gota que caía se acercaba. Cuando se utilizaron ondas cuadradas de corriente alterna las oscilaciones desaparecían. Dado que el agua tiene una densidad mayor que el aceite, la gota caerá y después de algún tiempo obtendrá una velocidad final, hasta que se acerque a la superficie de la gota inferior donde será retrasada por la fuerza que ejerce la película de drenaje (Ver Figura 77).

Sin la aplicación de un campo eléctrico, la gota que cae sobre la superficie va a rodar sobre la gota más grande, tal y como lo ilustra la Figura 78. Aplicando un campo eléctrico se creará una fuerza que incremente la velocidad.

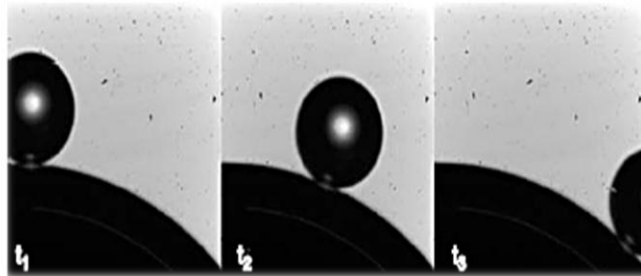
⁹⁷ ATTEN, P; LUNGAARD, L; BERG, G. A simplified model of electrocoalescence of two close water droplets in oil. Proceed. 5th Intern. EHD Workshop. Editorial Poitiers. 2004.

Figura 77. Velocidad de la interfase inferior de una gota de 200 μm cuando la gota cae sobre la gota más grande, para diferentes frecuencias y campos eléctricos aplicados con onda cuadrada de voltaje AC.



Fuente: LUNDGAARD, Lars E⁹⁸. Modificado.

Figura 78. Gota impactando un campo eléctrico nulo, rodando hacia afuera.



Fuente: LUNDGAARD, Lars E⁹⁸.

⁹⁸ LUNDGAARD, Lars E; BERG, Gunnar; INGEBRIGTSEN, Stian; ATTEN, Pierre. Emulsion and emulsion stability. Capítulo 15: Electrocoalescence for oil-water separation. Editorial Taylor & Francis Group. Nueva York (Estados Unidos), 2006.

Para campos inferiores las gotas de menor tamaño que caen reposarían por algunos segundos en el interior de la cima antes de que ocurra el fenómeno de la coalescencia, mientras que para campos más grandes el proceso de coalescencia ocurrirá rápidamente. Incluso con fotogramas de 10^4 por segundo no se puede establecer el evento final de la coalescencia. Con frecuencia, tras el colapso, una pequeña gota satélite es separada desde la gota más grande, como se observa en la Figura 79.

Figura 79. Gotas de $500 \mu\text{m}$ cayendo, coalesciendo, y formando una gota satélite.

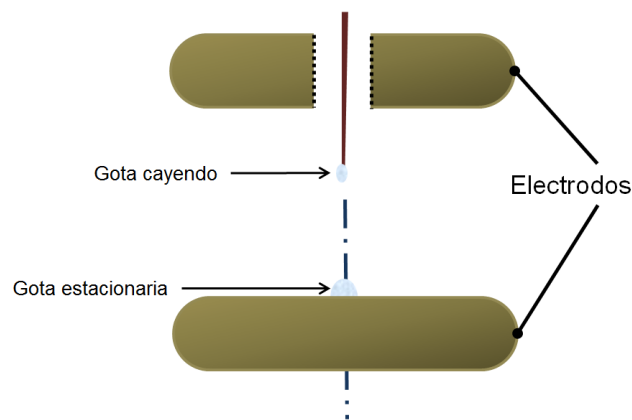


Fuente: LUNDGAARD, Lars E⁹⁹.

Un largo número de experimentos se realizaron con el fin de estudiar la eficiencia de coalescencia entre gotas que chocan. El tipo de configuración que se usó es el mostrado en la Figura 80. El tamaño de la gota estaba alrededor de $200 \mu\text{m}$, y se implementó voltaje cuadrado de corriente alterna variando la amplitud.

⁹⁹ LUNDGAARD, Lars E; BERG, Gunnar; INGEBRIGTSEN, Stian; ATTEN, Pierre. Emulsion and emulsion stability. Capítulo 15: Electrocoalescence for oil-water separation. Editorial Taylor & Francis Group. Nueva York (Estados Unidos), 2006.

Figura 80. Configuración experimental de pequeñas gotas cayendo sobre gotas grandes bajo el efecto de 3 a 4 kV/cm.



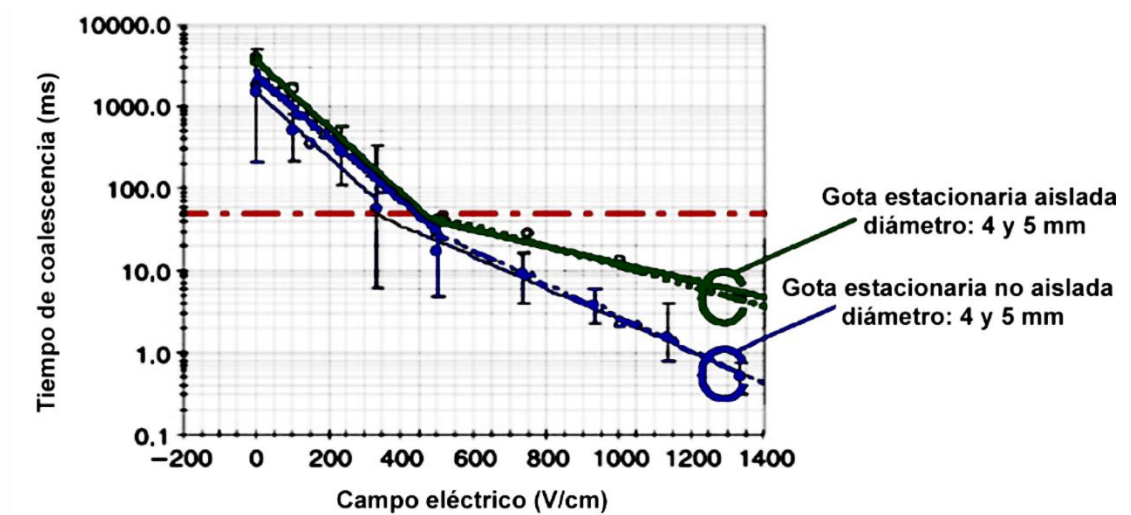
Fuente: LUNDGAARD, Lars E¹⁰⁰. Modificado.

El voltaje cuadrado fue utilizado para evitar la situación más imprecisa donde la fuerza varía con el tiempo, lo cual ocurre en ondas sinusoidales. Se registró el tiempo de coalescencia una vez se encontraban unidas o aparentemente unidas. Luego, a tensiones más altas la coalescencia ocurría de manera instantánea cuando la gota chocaba o llegaba tan cerca que parecía un impacto, e incluso a tensiones altas ocurría la coalescencia antes del impacto.

Los resultados se caracterizaron y se muestran en la Figura 81. Esta figura sugiere que se necesitan dos dependencias entre tiempos de coalescencia: Una para los tiempos mayores a 0.05 segundos que necesita más de medio periodo para que ocurra la coalescencia, y otra para tiempos cortos donde la coalescencia sucede de manera instantánea. En la actualidad no se pueden explicar los diferentes resultados entre gotas estacionarias aisladas y no aisladas.

¹⁰⁰ LUNDGAARD, Lars E; BERG, Gunnar; INGEBRIGTSEN, Stian; ATTEN, Pierre. Emulsion and emulsion stability. Capítulo 15: Electrocoalescence for oil-water separation. Editorial Taylor & Francis Group. Nueva York (Estados Unidos), 2006.

Figura 81. Tiempo de coalescencia para gotas de agua adheridas con 3.5 wt% de NaCl en aceite puro (sin aditivos) bajo la influencia de una onda cuadrada generada por un campo eléctrico con frecuencia de 10 Hz. Gota cayendo de 200 μm . Una ruptura en las curvas ocurre en 50 ms, correspondiente a la mitad del periodo del voltaje.



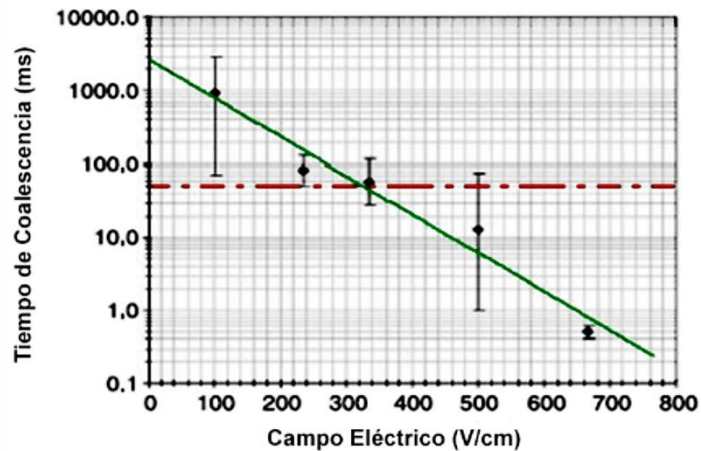
Fuente: LUNDGAARD, Lars E¹⁰¹. Modificado.

En otros experimentos se encontraron indicios de que para gotas de diámetro muy pequeño se tenía que aumentar el campo, lo cual encaja perfectamente con la hipótesis anteriormente planteada de que la coalescencia instantánea es regida por la inestabilidad de la formación en un campo crítico que incrementa a medida que se reduce el tamaño de la gota más pequeña. Sin embargo, estos resultados fueron obtenidos con excitación de voltaje sinusoidal, y por lo tanto son difíciles de interpretar.

¹⁰¹ LUNDGAARD, Lars E; BERG, Gunnar; INGEBRIGTSEN, Stian; ATTEN, Pierre. Emulsion and emulsion stability. Capítulo 15: Electrocoalescence for oil-water separation. Editorial Taylor & Francis Group. Nueva York (Estados Unidos), 2006.

5.4.4. Superficies no ideales. Cuando se estudió la influencia de los asfáltenos en las gotas de agua se mantuvieron durante 20 minutos para permitir la saturación en sus superficies. Tiempos de coalescencia típicos se muestran en la Figura 82. Las diferencias entre aceites con y sin asfáltenos se explican por la reducción de la tensión interfacial de los aceites asfálticos.

Figura 82. Tiempo de coalescencia para gotas de agua adheridas con 3.5 wt% de NaCl en aceite nafténico (100 ppm de asfáltenos disueltos en la fase aceite) bajo la influencia de una onda cuadrada generada por un campo eléctrico con frecuencia de 10 Hz. Gota cayendo de 200 μm , y gota saturada en la superficie.



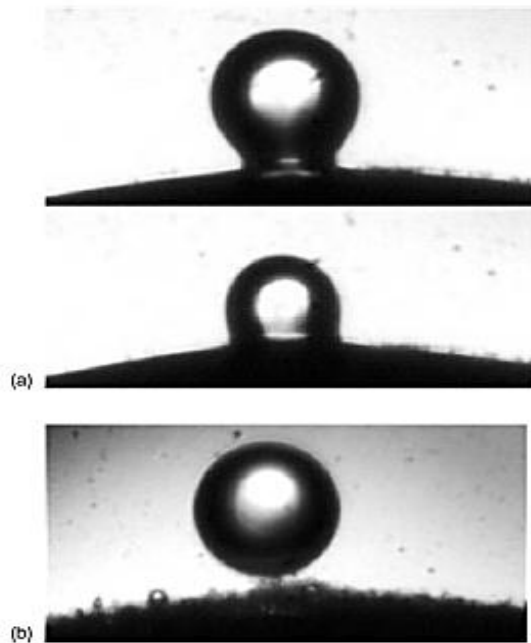
Fuente: LUNDGAARD, Lars E¹⁰². Modificado.

Para aceites con asfáltenos adheridos la tensión interfacial varía con el tiempo desde 35 mN/m hasta 5 mN/m durante un periodo de 20 minutos, en comparación con el aceite puro que tiene una tensión superficial de 40 mN/m.

¹⁰² LUNDGAARD, Lars E; BERG, Gunnar; INGEBRIGTSEN, Stian; ATTEN, Pierre. Emulsion and emulsion stability. Capítulo 15: Electrocoalescence for oil-water separation. Editorial Taylor & Francis Group. Nueva York (Estados Unidos), 2006.

Una diferencia importante entre el aceite puro y el aceite que contiene asfáltenos fue el voltaje, el cual se redujo de 1350V/cm a 700 V/cm a tiempos de 0.5 milisegundos. Otra diferencia importante que se apreció fue el tiempo necesario para que la gota que se encontraba en la parte superior drenara y penetrara la superficie que estaba estable. Para el aceite puro la gota colapsó alrededor de una milésima de segundo, mientras que para gotas de agua saturadas con asfáltenos el drenaje tomo más de un minuto (Ver Figura 83).

Figura 83. Superficie cubierta: Arriba (a): Drenaje lento de asfáltenos envolviendo la coalescencia de la gota. Abajo (b): Partículas dificultando la coalescencia de gotas diminutas de 200 μm .



Fuente: LUNDGAARD, Lars E¹⁰³.

¹⁰³ LUNDGAARD, Lars E; BERG, Gunnar; INGEBRIGTSEN, Stian; ATTEN, Pierre. Emulsion and emulsion stability. Capítulo 15: Electrocoalescence for oil-water separation. Editorial Taylor & Francis Group. Nueva York (Estados Unidos), 2006.

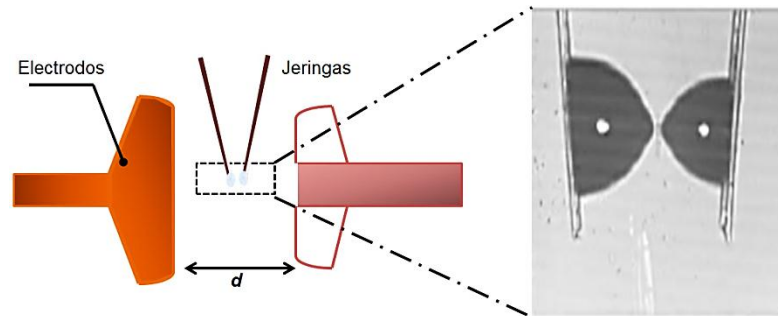
En este último caso no se presentó la forma de satélite. Esto muestra claramente la influencia de la capa de la superficie rígida. La manera en la cual una capa rígida podría influenciar en la formación de un cono de inestabilidad permanece desconocida. Sin embargo, los resultados indicaron que los plazos para la formación de inestabilidad son de sub-milisegundos en todos los casos.

Para los experimentos con asfáltenos la superficie de la gota fue contaminada con pequeñas partículas. Éstos tienden a concentrarse en la superficie de la gota previniendo así la coalescencia, como se pudo observar en la Figura 83 (b).

Experimentos de aceite con asfáltenos adheridos dieron los mismos resultados para 10, 200, y 2000 Hz voltaje de onda cuadrada. Esto sigue los lineamientos de la teoría planteada de que es el nivel para el campo instantáneo, y el dipolo de ese campo inducido, que en el caso de gotas descargadas va a regir el proceso de coalescencia.

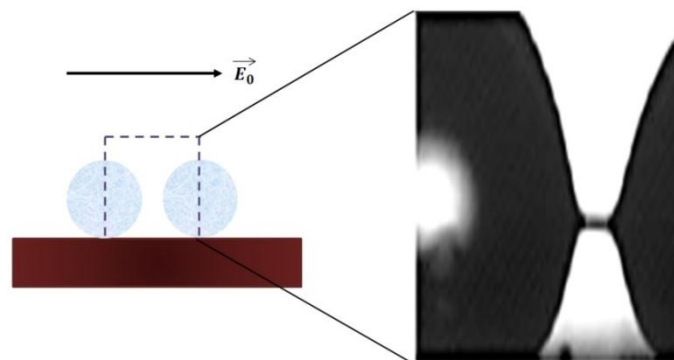
5.4.5 Ensayos con gotas compatibles. Como es problemático hacer observaciones visuales con gotas en movimiento, se realizaron varios experimentos con gotas fijadas en diferentes posiciones; colgando de capilares (Ver Figura 84) o descansando en las superficies de PTFE (Ver Figura 85). Estos experimentos con frecuencia generan efectos que quizás no se puedan repetir con cualquier gota.

Figura 84. Configuración experimental con gotas colgando desde vasos capilares.



Fuente: LUNDGAARD, Lars E¹⁰⁴. Modificado.

Figura 85. Configuración experimental con gotas descansando sobre una superficie de teflón.



Fuente: LUNDGAARD, Lars E¹⁰⁴. Modificado.

En vasos capilares saturados con agua se encontró que la coalescencia ocurre para bajas frecuencias de campos pequeños. Con el incremento de la frecuencia del campo con el cual se aumentó la coalescencia hasta llegar a 10 kHz, obteniendo la estabilización de los denominados “conos inestables” sin que se presente la coalescencia en su totalidad. Las gotas no estaban en contacto con el agua dentro del capilar como se observó en la Figura 84.

¹⁰⁴ LUNDGAARD, Lars E; BERG, Gunnar; INGEBRIGTSEN, Stian; ATTEN, Pierre. Emulsion and emulsion stability. Capítulo 15: Electrocoalescence for oil-water separation. Editorial Taylor & Francis Group. Nueva York (Estados Unidos), 2006.

Se puede deducir que la pérdida de coalescencia se debe a una fuerza generada por la buena capacidad de unión que tiene la gota de agua y la columna de agua dentro del capilar a altas frecuencias, haciendo que las gotas se adhieran a los capilares, y evitando de esta manera que se unan libremente y coalescan. Además, los chorros de agua desde los capilares se chocan entre sí.

Se desarrollaron experimentos similares con gotas que descansaban en una superficie horizontal de teflón. Pequeños pares de gotas se desestabilizaron y se unieron como se esperaba, independientemente de la frecuencia aplicada en un rango de 10 Hz a 10kHz. No obstante, con gotas de un radio aproximado de 1 mm se observó un canal estable formado entre dos gotas como se mostró en la Figura 83. Al parecer, nuevamente se pudo apreciar una fuerza de adhesión de las gotas a la superficie sólida, evitando el movimiento de sus centros de masa.

No se pudo reproducir los efectos de las gotas libres y las emulsiones de lo cual se concluye que se debe tener cuidado a la hora de extrapolar estas experiencias de gotas supuestas a emulsiones reales.

5.4 OTRAS VARIABLES DEL PROCESO ELÉCTRICO PARA EL USO DE ELECTROCOALESCEDORES

Posiblemente el problema más grande para los separadores agua aceite, y también para los electrocoalescedores, es el tratamiento de aceite con un bajo corte de agua y con pequeñas gotas de agua inmersas: La depositación de pequeñas gotas en los tanques de sedimentación ocurre lentamente, y la distancia entre las gotas son considerables.

La eficiencia global de coalescencia está dada por la tasa de colisión de la gota y la probabilidad de que las gotas se fusionen una vez que se encuentren demasiado cerca.

Hasta ahora se ha visto cómo actúan las fuerzas electrostáticas sobre las gotas o pares de gotas en condiciones de estancamiento o flujo laminar. Esto es relevante para los electrocoalescedores típicos y antiguos los cuales tienen grandes tanques de sedimentación. Sin embargo, durante la última década ha llegado un nuevo concepto, donde es aplicado un movimiento de cizallamiento a la emulsión para que la colisión entre las gotas sea más frecuente. Desde un análisis del movimiento de gotas suspendidas en líquidos es posible calcular la frecuencia de colisión.

Esto no quiere decir que ocurran impactos directos entre las gotas, pero si se da el ambiente propicio en donde las gotas se van a encontrar lo suficientemente cerca para así aplicar la fuerza electrostática necesaria ocurriendo la coalición entre ellas. Este “impacto” se determinó basado en criterios sobre el comportamiento de las gotas cuando estas se encontraban en un radio de captura, donde las fuerzas electrostáticas excedían la resistencia de viscosidad de las gotas. Incrementando la turbulencia y el flujo de cizalla puede incrementar la velocidad de colisión.

El máximo límite de turbulencia permitido es donde las gotas se separen consiguiendo la proximidad unas con otras, o en el caso más extremo; resultando en una fragmentación de la gota. Es posible desarrollar una colisión eficiente de una sección transversal dependiendo del tamaño de gota, campo eléctrico y el movimiento de cizallamiento del líquido

Una vez las gotas están dentro la sección transversal eficiente, el tiempo de coalescencia logrado es reducido con incremento de los campos inferiores. En un voltaje crítico combinado con el distanciamiento de la gota, ocurrirá la coalescencia instantemente. La eficiencia de la coalescencia puede ser incrementada si se lleva el campo al límite donde las gotas de mayor tamaño de la emulsión comienzan a desestabilizarse.

El diseñador tiene que, por un lado, balancear la turbulencia del flujo entre una alta frecuencia de colisión gota a gota y separar pares de gotas o gotas de gran tamaño. Y por otro lado, tiene que balancear el campo eléctrico necesario para conseguir secciones transversales considerables donde ocurra la colisión para una mayor eficiencia, e impedir la destrucción de grandes gotas por la inestabilidad que se genera.

El punto a analizar son las fuerzas de atracción electrostática y la inestabilidad de la superficie regida por los factores de coalescencia. Desde este punto de vista, un campo de CC, donde la conducción del campo es altamente continua, parece favorable. Sin embargo, si los electrodos cubiertos escogidos con el fin de reducir el riesgo de daño por tapones de agua, quizás dé como resultado una resistividad a la distribución del voltaje. Entonces la barrera del sólido dieléctrico, altamente resistente puede tomar todo el voltaje abandonando la emulsión.

Para electrodos descubiertos, donde las gotas se cargan en las superficies del electrodo, bajo condiciones de flujo laminar o a condiciones estáticas, los factores determinantes serán la velocidad de la corriente y la separación de las gotas. Cuando la coalescencia ocurra entre gotas individuales y no en la superficie de los electrodos, esta ocurrirá principalmente entre gotas de carga opuesta.

Entonces, a las gotas se les debe permitir mantener su carga adquirida el tiempo suficiente para que se encuentren con gotas de diferente polaridad. A medida que las gotas pierdan su carga con el tiempo en el que se propagan de un electrodo hacia el otro, podría ser ventajoso dividir las distancias entre los electrodos a distancias menores en donde se pierda menos carga. Adicionalmente, podría ser ventajoso tener un campo no-homogéneo que permita que las gotas sin carga sean atraídas a un electrodo y se carguen. También se debe considerar que además de la carga o las fuerzas repulsivas entre los pares de gotas cargados, que el campo aplicado también hará efecto sobre cada gota cargada.

Hasta este punto, se ha considerado principalmente emulsiones con bajos cortes de agua. El diseño del coalescedor tendrá que ser adaptado a las condiciones particulares del crudo de yacimiento. Para sistemas con altos cortes de agua, las colisiones gota-gota se vuelven más frecuentes y es más probable que ocurra la formación en cadena. Las fuerzas que mantienen las cadenas de gotas unidas son descritas en estudios sobre las suspensiones de partículas en aceite utilizadas para propósitos reológicos.

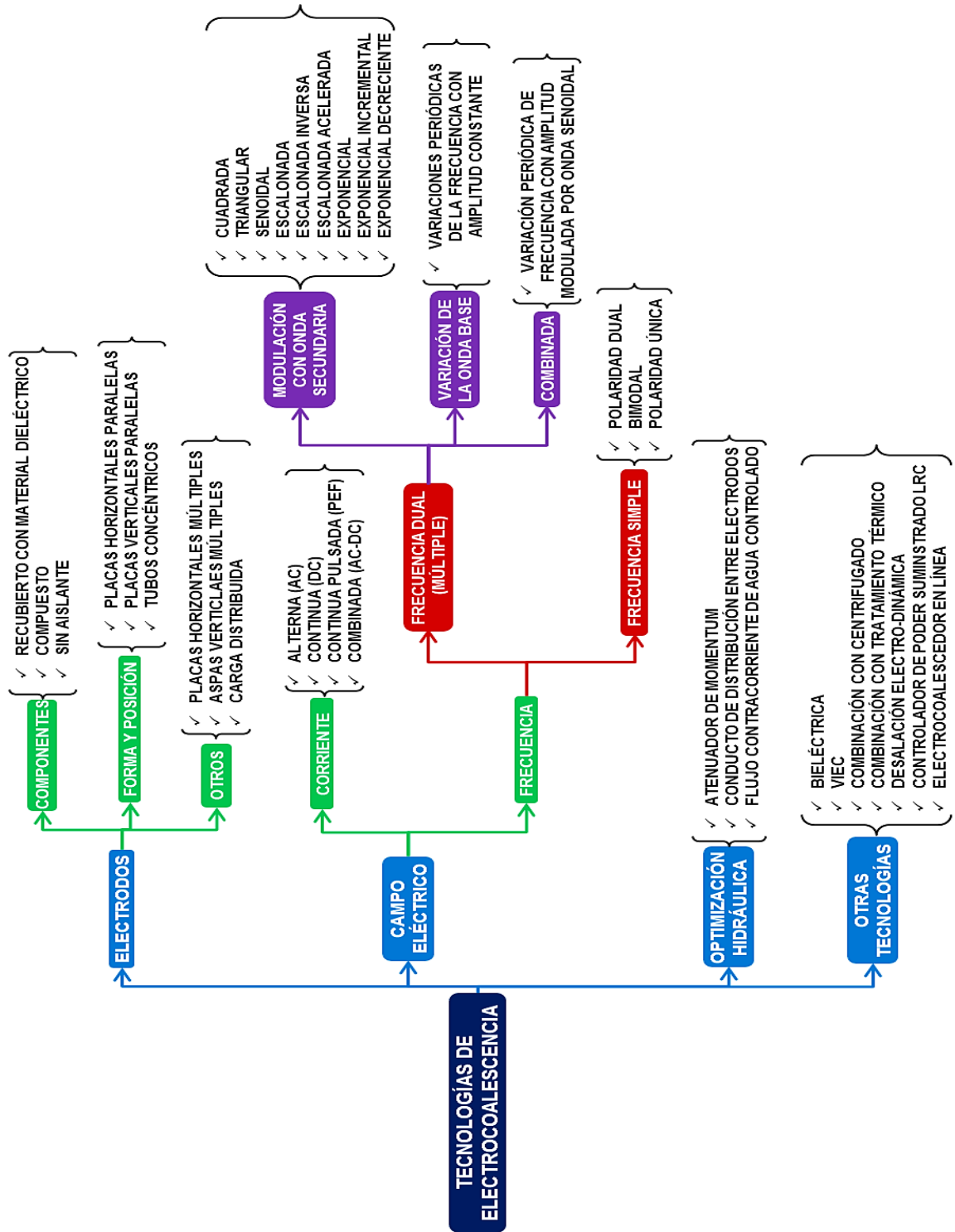
Finalmente, no se debe olvidar que la posible influencia de la electrificación por transmisibilidad y los efectos triboeléctricos pueden empezar a jugar su papel a altas velocidades de fluido, lo que podría ocasionar problemas entre los cuales se destaca la posibilidad de un corto circuito que genera daños permanentes en la unidad electrocoalescedora, traduciéndose en grandes pérdidas económicas.

6. TECNOLOGÍAS DE ELECTROCOALESCENCIA PARA EL TRATAMIENTO DE EMULSIONES

La experiencia de separadores agua/aceite reporta que la eficiencia del coalescedor a menudo varía entre pozos y también con el tiempo para un mismo pozo. La diferencia de propiedades del crudo y del agua para cada pozo como viscosidad, características reológicas, conductividad, corte de agua, película interfacial, densidades, composición, entre otras, y las condiciones externas como presión y temperatura, afectan directamente las propiedades de la emulsión y el efecto del campo eléctrico, lo que dificulta en gran medida adaptar el proceso de electrocoalescencia para cada caso en particular.

Por ello, durante el último siglo la electrocoalescencia ha sido utilizada con diferentes diseños de coalescedores y numerosas técnicas han sido desarrolladas basadas en diferentes formas de voltaje, características del flujo, forma, disposición y revestimiento de los electrodos, frecuencia del campo eléctrico, entre otras variables de diseño, para intentar abarcar el mundo de posibilidades que ofrece este tratamiento y definir la mejor configuración para cada caso específico, todas éstas recopiladas en la Figura 86, de acuerdo con las patentes que las diferentes compañías que se encuentran en el mercado de la electrocoalescencia han desarrollado.

Figura 86. Tecnologías en electrocoalescencia.



Fuente: Autores.

6.1 TECNOLOGÍAS DE CAMPO ELÉCTRICO

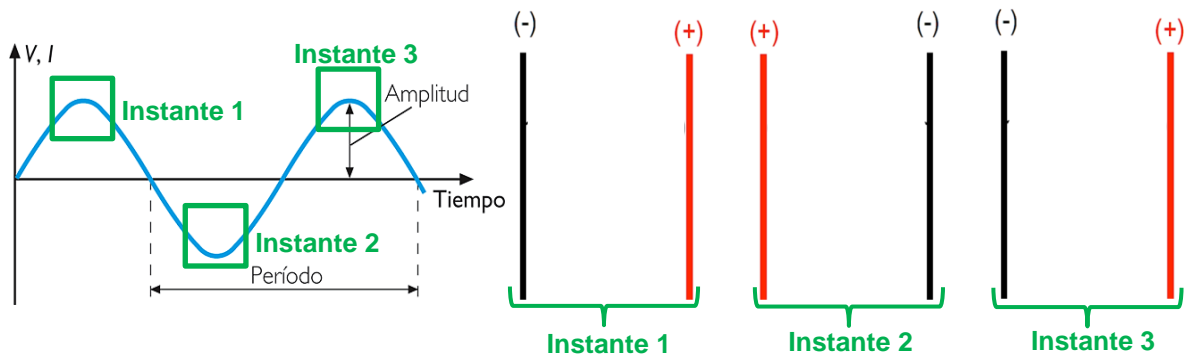
El campo eléctrico empleado en el proceso de electrocoalescencia puede ser modificado de múltiples maneras concibiendo una gran variedad de éstos en cuanto a su frecuencia, forma de la onda, e inclusive el tipo de corriente generadora. De acuerdo con esto, se clasificaron las tecnologías referentes a la modificación del campo eléctrico actuante en dos grupos: Campos eléctricos según el tipo de corriente, y campos eléctricos según el tipo de frecuencia.

6.1.1 Clasificación del campo eléctrico según el tipo de corriente. Para la separación de emulsiones de agua en aceite, se utilizan por lo menos cuatro tipos de campo eléctrico: Corriente alterna (AC), corriente continua (DC), corriente alterna combinada con corriente continua de alto voltaje (HVDC/AC), conocida en el mercado por la patente desarrollada por la empresa Natco denominada Dual Polarity (Polaridad dual en español), y corriente continua pulsada (DC pulsante o PEF).

Cada tipo de campo eléctrico actúa de acuerdo con diferentes mecanismos de coalescencia descritos anteriormente, realzando e imponiéndose unos sobre otros dependiendo del tipo de campo eléctrico. Uno de los factores a ser considerado para la escogencia del tipo correcto de campo eléctrico es la naturaleza de la fase acuosa dispersa, puesto que debido a su conductividad, puede resultar en un corto circuito del sistema.

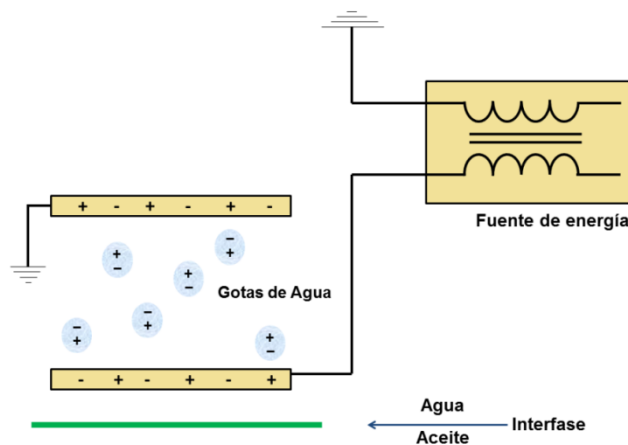
6.1.1.1 Campo de corriente alterna (AC). La corriente alterna (CA en español y AC en inglés, de Alternating Current) es la corriente eléctrica en la que la magnitud y el sentido varían cíclicamente, es decir, durante un instante de tiempo un polo es negativo y el otro positivo, mientras que en el instante siguiente las polaridades se invierten tantas veces como ciclos por segundo posea esa corriente, tal y como se puede apreciar en la Figura 87. A su vez, se puede observar la configuración generalizada de un sistema de corriente alterna en la Figura 88.

Figura 87. Inversión de polaridad en corriente alterna (AC) de forma periódica.



Fuente: Autores.

Figura 88. Esquema generalizado de un sistema de corriente alterna.



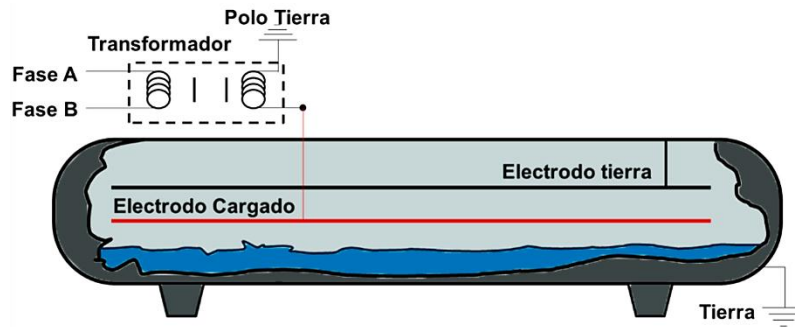
Fuente: Autores.

Como se ha explicado anteriormente los campos eléctricos generan fuerzas eléctricas las cuales al ser creadas generan repulsión y/o atracción entre las moléculas. En el caso de la corriente alterna, ésta crea un campo eléctrico el cual a través de fuerzas eléctricas causa un reordenamiento de los polos de las moléculas de agua que se encuentran presentes dentro de este (fuerzas dielectroforéticas), generando así la coalescencia.

Sin embargo la movilidad es limitada ya que estos solo promueven la coalescencia entre las gotas de agua por lo tanto la coalescencia ocurrirá solo entre gotas que se encuentren cercanas. Hay que aclarar que la frecuencia generada por la corriente alterna dependerá de la emulsión a tratar, por ejemplo, en la producción de un pozo se pueden obtener diferentes cortes de agua y la cantidad solidos presentes puede disminuir o aumentar, conllevando a cambiar la configuración de la frecuencia.

Un montaje básico de tratador electrostático y a modo de aplicación en el tratamiento de crudo se observa en la Figura 89, el cual está conformado por un transformador que se encarga de energizar el electrodo y otro electrodo que conecta el polo a tierra. Se establece un gradiente débil de corriente alterna entre el electrodo energizado y la interfaz agua-aceite, y un gradiente fuerte AC entre el electrodo energizado y el electrodo a tierra. La emulsión entra al recipiente justo por encima de la interfase de agua y es rápidamente coalescida por el campo AC inferior y luego nuevamente experimenta coalescencia y deshidratación por el campo superior.

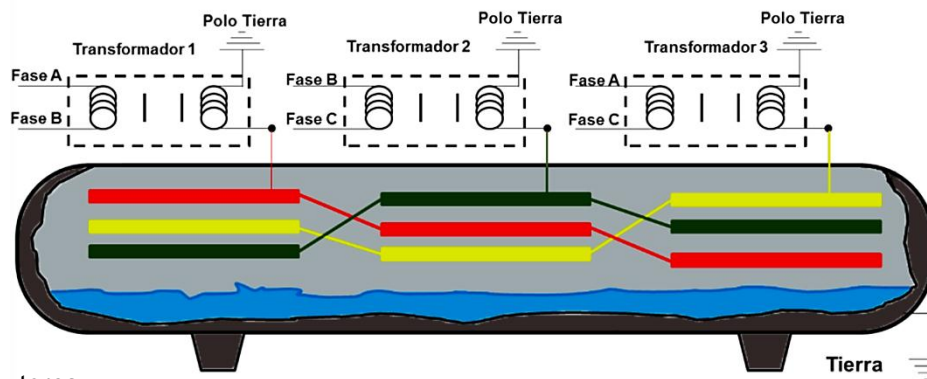
Figura 89. Deshidratador convencional de corriente alterna (AC).



Fuente: Autores.

Una configuración de tratadores electrostáticos de corriente alterna más eficiente es el comúnmente denominado tratador AC de campo profundo, el cual en su proceso establece un campo de AC entre la interfaz agua-aceite y la salida del crudo, está constituido por tres transformadores AC y tres grupos de tres electrodos como se muestra en la Figura 90. La emulsión entra justo por encima de la interfaz donde el campo AC es bajo el cual promueve la coalescencia y separación. Altos gradientes de campo de corriente alterna se establecen entre los tres electrodos donde la coalescencia y separación adicional logra el rendimiento deseado, además de multiplicarse el efecto generado con las siguientes tripletas de electrodos produciendo el mismo efecto aumentado.

Figura 90. Deshidratador convencional de corriente alterna (AC).



Fuente: Autores.

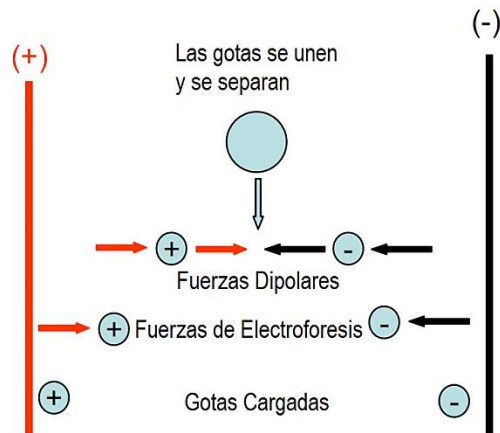
En el mundo la mayoría de los tratadores eléctricos son de corriente alterna, ya que estos toleran altos cortes de agua, su consumo de energía es eficaz y tiene baja tendencia a la corrosión electrolítica. La forma de oscilación de corriente alterna más comúnmente utilizada es la de oscilación sinusoidal, ya que esta consigue una transmisión más eficiente de energía. Sin embargo, en lo que compete al tratamiento de crudo se aplican otra forma de oscilación de la onda tales como: triangular, cuadrada y escalera, entre otras tantas un poco más complicadas, que serán tratadas con mayor énfasis posteriormente en la sección de tecnología de Frecuencia Dual.

6.1.1.2 Campo de corriente continua (DC). La corriente continua (CC en español, en inglés DC, de Direct Current) se refiere al flujo continuo de carga eléctrica a través de un conductor entre dos puntos de distinto potencial, que no cambia de sentido con el tiempo. A diferencia de la corriente alterna (AC), en la corriente continua las cargas eléctricas circulan siempre en la misma dirección. Aunque comúnmente se identifica la corriente continua con una corriente constante, es continua toda corriente que mantenga siempre la misma polaridad, así disminuya su intensidad conforme se va consumiendo la carga (por ejemplo cuando se descarga una batería eléctrica).

Ahora bien, cuando se somete una emulsión a la acción de un campo eléctrico continuo o DC, ésta experimentará un efecto de polarización y alineamiento de la gota de la misma forma que un campo AC, pero además, debido a su naturaleza unidireccional, también producirá una fuerza electroforética lo suficientemente fuerte para mover las gotas de agua cargadas hacia el electrodo de polaridad opuesta con una velocidad determinada por la viscosidad de la fase continua.

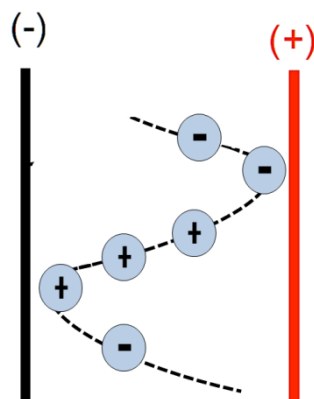
Así mismo, los campos eléctricos continuos tienen la capacidad de generar dipolos inducidos sobre las gotas cargadas, que aumentaría considerablemente la tasa de colisión de las gotas favoreciendo el proceso de coalescencia y posterior sedimentación de las gotas de agua en la fase de agua separada. Todas estas fuerzas generadas por un campo eléctrico continuo pueden apreciarse en las Figuras 91 y 92.

Figura 91. Fuerzas DC sobre las gotas de agua.



Fuente: Autores.

Figura 92. Movimiento de las gotas dentro de un campo eléctrico DC.



Fuente: Autores.

A pesar de que se ha demostrado que la electroforesis generada por campos de corriente continua es el mecanismo eléctrico disponible más fuerte para el movimiento de gotas en un flujo continuo de líquido, desafortunadamente, los mecanismos de corrosión promovidos por corrientes unidireccionales y al tendencia a generar corto circuito cuando se tienen bajos contenidos de agua han desmeritado el uso de campos DC altos en tecnologías de electrocoalescencia.

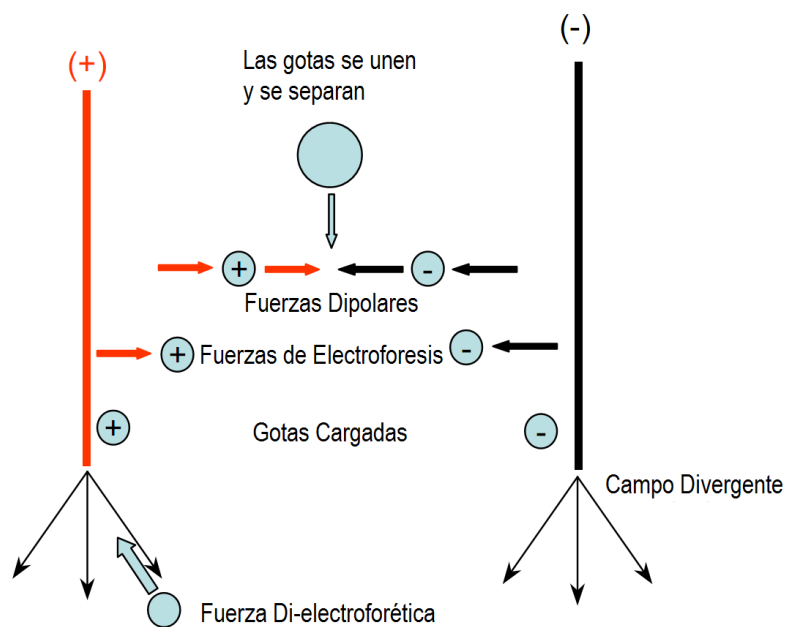
Por ello, los campos eléctricos DC tienden a ser empleados sólo para procesos de deshidratación de destilados de baja conductividad con una fase dispersa compuesta de pequeñas gotas en lo posible. Teniendo en cuenta esto, para efectos comparativos posteriores entre tecnologías no será tomado en cuenta los electrocoalescedores con campo DC, puesto que no son de amplia utilización en la deshidratación y desalación de crudo.

Cuando se dispone de electrodos aislados para la emisión de campos eléctricos continuos, las gotas cargadas serán desplazadas hacia la superficie de los electrodos causando una caída dramática del voltaje a lo largo del material aislante que cancelaría el efecto del campo dentro de la emulsión. Debido a esto se evita utilizar tecnologías de electrocoalescencia basadas en campos eléctricos continuos empleando electrodos aislados que supriman la eficiencia del proceso.

6.1.1.3 Campo de corriente continua elevada combinada con corriente alterna (Dual Polarity – Polaridad dual – HVDC/AC). Desde 1970, la compañía Natco ha desarrollado electrocoalescedores utilizando simultáneamente campos eléctricos AC y DC bajo la patente denominada Dual Polarity (Polaridad Dual en español).

Esta tecnología combina los beneficios de alta tolerancia al agua entregado por el campo AC y el movimiento forzado de gotas y habilidades mejoradas para cargarlas eléctricamente a partir de campos DC, para en últimas mejorar la efectividad de separación, exhibiendo el conjunto de fuerzas a las que están sometidas las gotas como se aprecia en la Figura 93.

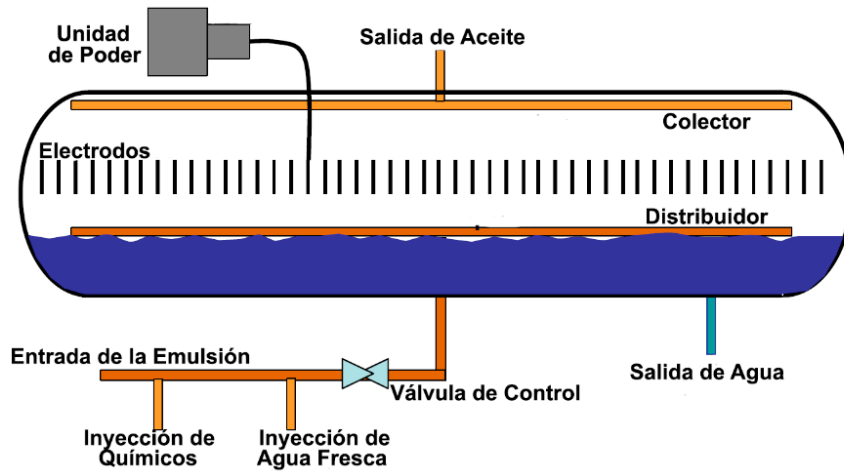
Figura 93. Fuerzas y movimiento de las gotas dentro de un campo eléctrico combinado AC/DC.



Fuente: Autores.

En síntesis lo que se buscaba con el desarrollo de esta tecnología era obtener los beneficios extras que puede dar un campo DC comparado con un AC pero evitando a su vez que ocurran los problemas asociados al campo DC mencionados anteriormente (corrosión electrolítica, corto circuito, entre otros). En la siguiente figura (Ver Figura 94) se puede apreciar la configuración estándar de esta tecnología:

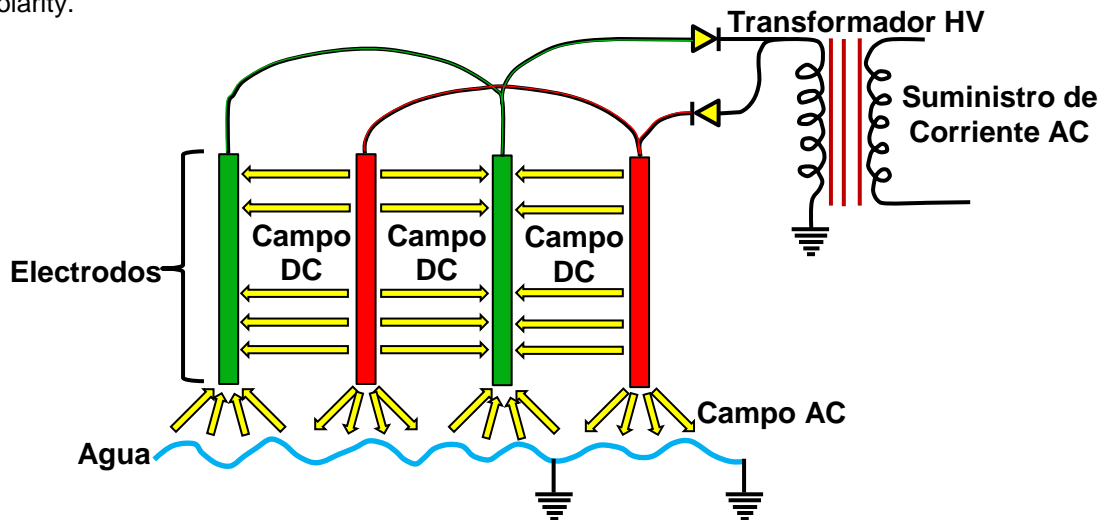
Figura 94. Configuración estándar de un electrocoalescedor Dual Polarity.



Fuente: Autores.

En esta configuración los electrodos se ubican paralelos verticalmente en una emulsión sometida tanto a un campo DC de alta tensión, entre electrodos adyacentes, como a un campo AC (50 – 60 Hz) entre los electrodos y la interfase agua-aceite (conectada a tierra), como se muestra en la Figura 95.

Figura 95. Configuración de electrodos y generación de campos eléctricos de la tecnología Dual Polarity.



Fuente: Autores.

Un puente rectificador es el responsable de la rectificación de la corriente alternada de alimentación, permitiendo el paso de sólo una polaridad, es decir, separando los componentes positivos y negativos del campo AC. Los electrodos son conectados alternadamente con los polos positivos y negativos, estableciendo un campo eléctrico continuo.

La alimentación de la carga afecta las proximidades de la interfase agua-aceite, siendo la emulsión primeramente expuesta a un campo AC de gradiente bajo, capaz de coalescer las gotas de mayor tamaño. Además, luego de esta exposición al campo AC, las gotas más pequeñas que no se han logrado coalescer, suben conjuntamente con el crudo hacia el entorno de acción del campo DC de gradiente alto, actuando como una sección de refinamiento para coalescer las gotas de menor tamaño.

Generalmente, en esta tecnología se emplean los llamados electrodos compuestos, los cuales consisten de placas de fibra de vidrio (actuando como aislante) que poseen una región conductiva, hecha de grafito, localizada en la sección central. Una capa muy fina de agua es adsorbida en las placas debido a los materiales polares presentes en la resina utilizada para la fijación de las partes del electrodo.

A diferencia de los electrodos convencionales (totalmente metálicos y conductivos), en los cuales todo el campo eléctrico colapsa cuando ocurre un arco eléctrico en una región localizada (extinguendo todo proceso de deshidratación), los electrodos compuestos eliminan el arco continuo sometiendo sólo una pequeña área de la placa a ser descargada (la sección de grafito).

Esto permite la recuperación de la estabilidad del sistema y el mantenimiento del proceso electrocoalescente en funcionamiento. Según Warren, los electrodos compuestos han demostrado grandes eficiencias en la supresión de arcos eléctricos y el aumento de la coalescencia, presentando resultados comparativos entre electrodos convencionales y electrodos compuestos, que arrojan un aumento promedio de la deshidratación del 56%.

Esta tecnología presenta otras ventajas tales como: proporciona el doble de gradiente de tensión de un campo AC convencional empleando un mismo transformador, permite mayores tasas de procesamiento, posibilita la creación de gotas de mayores tamaños que los tratadores AC convencionales favoreciendo y acelerando el proceso de sedimentación de la fase dispersa, el contenido de agua y sales (BS&W) en el aceite a la salida es menor puesto que trata mayores volúmenes de crudo en recipientes de menor tamaño, y requiere de temperaturas de operación más bajas, entre otras.

Los resultados documentados por el fabricante registran:

- ✓ Mejoras de hasta un 25% en eficiencia
- ✓ Mejora de la tolerancia a la acumulación de impurezas en la interface.
- ✓ Reducción del deslizamiento del crudo no tratado por el campo electrostático.

6.1.1.4 Campo de corriente continua pulsada (PEF). La corriente continua pulsante es una corriente continua que sufre cambios regulares de magnitud a partir de un valor constante, cambios los cuales pueden ser en intensidad o en tensión.

Estos cambios o pulsos son siempre en el mismo sentido de la corriente, por lo que todos los tipos de corrientes alternas, ya sean cuadradas, sinusoidales o en sierra (triangulares) no son pulsantes.

De la misma forma que con un campo AC, el campo DC pulsante genera dipolos inducidos de las gotas de agua, pero solo debido a este tipo de campo pueden crearse cadenas de gotas (denominadas collar de perlas), las cuales pueden ser observadas durante los períodos de alta tensión, seguido de coalescencia en los períodos en que la tensión es reducida.

También existen ciertas variaciones tecnológicas del campo pulsante DC, como por ejemplo el desarrollo de campo DC pulsante con electrodos aislados para emulsiones con altos cortes de fase acuosa dispersa.

6.1.2 Clasificación del campo eléctrico según la frecuencia de onda. Para la comprensión de la diversidad de electrocoalescedores que se pueden crear a partir de modificaciones en la frecuencia de onda y por ende en el voltaje efectivo entregado, son necesarios unos conceptos previos en cuanto a voltajes y frecuencias límites o frontera.

Un campo eléctrico puede tener una tensión o su frecuencia modulada con auxilio de controladores electrónicos, mejorando significativamente la deshidratación en comparación con los campos eléctricos convencionales. Estos controladores electrónicos pueden asumir funciones esenciales de protección del transformador en cuanto están en la capacidad de suprimir la potencia bajo condiciones de proceso severas.

En la mayoría de las aplicaciones de desalación electrostática se aplica un voltaje simple o único a los electrodos para obtener el nivel de beneficio de deshidratación o desalación deseado. Sin embargo, como se pudo observar en las ecuaciones de las fuerzas presentes en el proceso de electrocoalescencia (Ver Capítulo 5), las gotas de agua más pequeñas requieren de voltajes mayores para desarrollar una fuerza suficiente para superar la tensión interfacial y promover la coalescencia.

No obstante, si el voltaje es muy alto, las fuerzas electrostáticas pueden exceder las fuerzas interfaciales de las nuevas gotas ya de mayor tamaño resultando en la ruptura de dicha gotas y la posterior dispersión. Existen dos voltajes que definen los límites en la eficiencia de un proceso de deshidratación electrostática. El primer voltaje puede definirse como voltaje umbral o voltaje mínimo, por debajo del cual no se provee suficiente energía electrostática para iniciar la coalescencia.

Existe un beneficio en el proceso al operar a niveles de voltajes cercanos al voltaje mínimo puesto que se maximiza el diámetro de las gotas, facilitando el proceso de sedimentación y por ende acelerando la deshidratación del crudo. Sin embargo, se ha demostrado que operar a niveles de bajo voltaje puede impedir que se alcance a afectar y estimular las gotas más pequeñas necesarias para obtener las especificaciones de contenido de agua y sal en el crudo de venta.

Por otra parte, se encuentra el segundo voltaje límite, el cual se denomina voltaje crítico, por encima del cual se generan rupturas de las gotas ya coalescidas debido al incremento sustancial de las fuerzas electrostáticas, resultando en una reducción significativa del diámetro máximo alcanzado por las gotas, traduciéndose en una menor tasa de sedimentación de las gotas y por ende de la

eficiencia del proceso. Luego, un gradiente de tensión óptimo está situado entre el gradiente de tensión mínima para que ocurra la coalescencia y el campo eléctrico crítico.

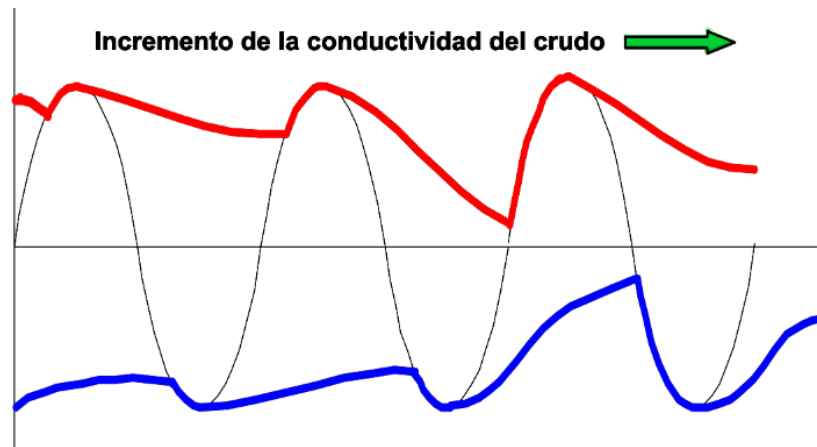
De la misma forma en que existen dos límites de voltaje, se define las fronteras para la eficiencia de deshidratación electrostática teniendo en cuenta dos frecuencias límites en el proceso. Estas dos frecuencias son dependientes de la tasa a la que la gota es cargada y descarga eléctricamente, y de la frecuencia de oscilación fundamental de las gotas de agua que poseen el definido con anterioridad diámetro de Stokes.

Como se muestra en la figura 96, cuando se utilizan 50 o 60 Hz de poder, la tasa de decrecimiento de voltaje en los electrodos aumenta a medida que la conductividad del aceite se incrementa, lo cual permite que la carga en las gotas de agua se reduzca. De hecho, a medida que la conductividad del aceite incrementa, el voltaje del electrodo se reducirá por debajo del nivel mínimo o umbral durante una parte significativa del ciclo de voltaje.

Por ello, para reponer la carga de la gota y mantener las fuerzas electrostáticas para la coalescencia, la frecuencia del voltaje aplicado debe incrementarse. Para un crudo con conductividad de 100 nS/m, la frecuencia debe ser cercana a los 1600Hz. Operar por encima de esta frecuencia base asegura el más alto nivel de fuerzas electrostáticas. De acuerdo con Ivanitskii¹⁰⁵, la frecuencia de oscilación fundamental de las gotas de agua puede ser determinada utilizando una analogía simple masa-resorte.

¹⁰⁵ IVANITSKII, K. Modeling of deformation and breakup of drops moving in liquid. Heat Transfer Research. 1998.

Figura 96. Decaimiento del voltaje como efecto del incremento de la conductividad del crudo.



Fuente: Autores

Ahora bien, luego de comprender los límites que deben establecerse en el voltaje y de cómo afecta la frecuencia el proceso de electrocoalescencia, se procede con una clasificación de la frecuencia teniendo en cuenta que para una onda de voltaje dado, la frecuencia puede mantenerse como una constante o puede ser modulada por una onda con una frecuencia menor, para otorgarle a la onda del campo eléctrico una forma y amplitud característica, que mejore los efectos y permita sortear diversas situaciones como la que respecta a la conductividad del crudo, la cual fue tratada con anterioridad.

Teniendo en cuenta surgen dos grandes grupos, el primero al que pertenecen aquellas tecnologías que mantienen una frecuencia simple o única, y el otro, el de la tecnología de la empresa NATCO, denominada Dual Frequency o Multiple Frequency, que consta de ondas moduladoras que permiten aumentar la eficiencia del proceso aprovechando los efectos de ambas frecuencias de onda.

Este último grupo será tratado con mayor detalle y dedicación en el siguiente capítulo, puesto que es la base fundamental de este proyecto investigativo y por ende es merecedor de una completa, dedicada y profunda investigación. Retomando aquellos campos eléctricos que poseen una frecuencia simple o única, en la actualidad solo se dispone de los campos eléctricos bimodales.

6.2 TECNOLOGÍAS DE ELECTRODOS

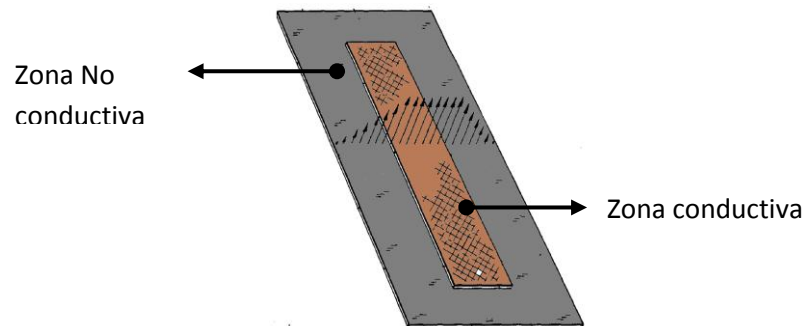
Diferentes configuraciones de electrodos se han desarrollado para optimizar el proceso de deshidratación y desalación de crudo de los electrocoalescedores, se han variado la composición, diseño, la estructura física, la posición dentro del recipiente, entre otros, lo que ha conducido a innovaciones y/o mejoras de los tratadores electrostáticos. Un electrodo es un conductor eléctrico utilizado para hacer contacto con una parte no metálica de un circuito, por ejemplo un semiconductor, un electrolito, el vacío (en una válvula termoiónica), un gas (en una lámpara de neón).

La palabra fue acuñada por el científico Michael Faraday y procede del griego *elektro*, de la cual proviene la palabra electricidad; y *hodos*, que significa camino. Los tipos de electrodos compuestos que son implementados en el tratamiento de crudo deben tener en cuenta ciertos parámetros como la constante dieléctrica, que no generen corto circuito, que sean hidrófobos, distribución y dimensionamiento.

6.2.1 Electrodos compuestos de carga distribuida. Estos electrodos son una construcción laminar que tiene un miembro conductor localizado de manera central, rodeada por una región eléctricamente no conductiva, ver Figura 97.

Varios campos eléctricos (algunos con gradientes uniformes), con un suministro de voltajes no modulados son establecidos en medio de los electrodos compuestos adyacentes, y son colocados en la dirección del flujo del aceite producido proveniente de los pozos y en la dirección del agua fresca. Las celdas compuestas tienen una corriente inherente que regula la característica permitiendo una reducción de la tendencia a producir corriente y suprime las corrientes sostenidas para evitar que ocurran descargas indeseadas.

Figura 97. Electrodo compuesto



Fuente: Floyd L. Prestidge, Sapula; Bruce C. Johnson, Broken Arrow.¹⁰⁶

Los requerimientos típicos para desalar el crudo son que el crudo producido debe tener máximo una libra de sal por 1000 barriles de crudo. La sal es contenida normalmente en la salmuera producida y suspendida dentro del crudo. Entonces, la remoción del agua remueve la mayoría de la sal del crudo. Sin embargo, algunas gotas muy pequeñas de salmuera permanecen en el crudo deshidratado el cual puede resultar en un nivel de sal inaceptable (20 o 30 lb/1000 bbl de crudo).

¹⁰⁶ Floyd L. Prestidge, Sapula; Burce C. Johnson, Broken Arrow. National Tank company, Tulsa, Okla. Patent Number: 4702812. Octubre 27 1987

Es por esto que se añade agua fresca, para que contacte y diluya la salmuera que pudiera permanecer en el crudo deshidratado, seguido por otra etapa de deshidratación.

Los separadores de crudo con tecnología de campos eléctricos han sido usados en la industria por mucho tiempo, sin embargo, una de las desventajas es la generación de descargas eléctricas indeseadas. Cuando esto ocurre, se consume una gran cantidad de energía. Aún peor, aun si estas descargas ocurren en solo un punto de un plato de electrodos, el campo eléctrico colapsa sobre todo el electrodo, terminando el proceso de deshidratación hasta que cese la descarga.

Otras desventajas en el uso de platos de electrodos reside en que se genera un potencial en todos los puntos del plato de electrodos, en las paredes, en los cortes y en los puntos de soporte además de en los puntos del electrodo, lo cual genera distorsiones en el campo eléctrico. Estas distorsiones pueden alterar la coalescencia de las gotas de agua.

Todos estos problemas conllevaron a crear un equipo y un método para separar la salmuera de una emulsión de crudo en el cual no ocurran las descargas eléctricas indeseadas, estuviera libre de distorsiones en el campo y cargas puntuales y que pudiera someter al crudo producido de los pozos a un campo eléctrico incremental que coalesciera y removiera las gotas más grandes de agua, seguido por un campo eléctrico de alta intensidad que pudiera remover las gotas más pequeñas, seguido por un campo eléctrico decreciente que pudiera remover los esfuerzos de corte a los cuales el agua coalescida es sometida en el área de salida, para minimizar el arrastre de las gotas.

Tal método y aparato podría después tener un contra flujo o una disolución por agua la cual es mezclada con la emulsión en la zona del alto campo eléctrico, incrementando la posibilidad de contacto y diluyendo la salmuera remanente, seguido por su coalescencia para su posterior remoción.

El desarrollo de esta tecnología provee un método y un equipo que suministra una corriente de agua fresca que pasa en contraflujo en la dirección de la emulsión a un deshidratador en el cual, solo ha pasado por el separador, la mezcla es sometida a un eficiente proceso similar a un mezclador, coalescedor y separador en conjunto, en el cual un voltaje no modulado es aplicado a los electrodos en el deshidratador.

Los electrodos son hechos de un diseño compuesto el cual puede ser considerado un solo campo eléctrico que tiene varias regiones de gradientes variables o una variedad de campos eléctricos, que existen en la dirección del flujo de la emulsión y del agua fresca.

6.2.2 Electrodo horizontales múltiples. Un deshidratador electrostático o un separador equipado con por lo menos dos electrodos horizontales, funcionará como separador para agua y crudo, o para gas, agua y crudo. La separación gas/líquido ocurrirá en la sección frontal del recipiente. La separación agua/aceite ocurrirá en la siguiente sección del recipiente, la cual podría tener dos o tres electrodos horizontales independientes o celdas espaciadas a diferentes distancias sobre la interfaz agua/aceite (la cual es generalmente horizontal).

Los dos o tres electrodos independientes o celdas tendrán cada una su propio transformador. Las celdas superiores continuarán operando aún si las celdas inferiores hacen corto circuito. En este tipo de configuración los tratadores electrostáticos deben tener presente por lo menos dos electrodos horizontales orientados de forma paralela al eje horizontal, en el cual el primer electrodo horizontal es colocado a una distancia sobre el eje horizontal intermedio, y el segundo electrodo es colocado a una distancia diferente por encima del eje horizontal.

La segunda distancia es mayor que la primera. Un transformador independiente es conectado eléctricamente a cada electrodo horizontal. La distancia dos es mayor que la distancia uno, así los dos electrodos se encuentran a diferentes alturas por encima de la interfaz agua aceite. Un transformador independiente es eléctricamente conectado a cada electrodo horizontal.

Existe una salida de aceite en la sección superior del tanque de separación, para poder extraer aceite del separador, y también se presenta una salida de agua en la parte inferior del separador para poder sustraer agua del separador. El uso de por lo menos dos electrodos horizontales permite al coalescedor operar aún si la interfaz agua aceite se eleva lo suficiente para contactar y provocar un corto circuito en el electrodo inferior.

El campo de alto voltaje generado por el electrodo superior todavía seguiría siendo funcional y permitiría que el coalescedor siga funcionando. Puede haber por lo menos tres electrodos horizontales independientes en varios recipientes flexibles, cada uno con su propio transformador.

6.2.3 Electrodo para coalescencia eléctrica de emulsiones líquidas. En lo que concierne al tratamiento de emulsiones, empleando tratadores electrostáticos, debe usarse electrodos aislados ya que estos ayudan a minimizar o evadir cortocircuitos de los campos eléctricos. Para seleccionar el tipo de aislante se deben tener en cuenta: Constante dieléctrica y energía libre de superficie.

La *hidrofobicidad* requerida puede ser inherente en el material aislante o puede ser alcanzada con un revestimiento aplicado al electrodo compuesto. El material para cubrir el electrodo debe tener la energía libre de superficie adecuada, por debajo de 75 dinas/cm y preferiblemente por encima de 40 dinas/cm. Varios materiales son bien conocidos en el arte. Una lista ilustrativa (Ver Tabla 5), pero no limitante, de materiales adecuados es la siguiente.

Tabla 5. Tipos de materiales para el recubrimiento de electrodos.

Tipo de material	Energía libre superficial [dinas/cm]
Polihexafluoropropileno	16
Politetrafluoroetileno	18,5
Poli(hexafluoropropleno-CO-tetrafluoroetileno)	16-19
Polialquilsiloxano	24-30
Polietileno y Polipropileno	31
Poliestireno	33
Cloruro de Polivinilo	40
Fuente: Autores	

Por *aislante* se refiere a un medio sólido dieléctrico con una constante de al menos 3 o al menos 3,5, y sería ideal una constante dieléctrica de 4 en por lo menos una porción del campo AC adyacente a al menos uno de los electrodos cooperantes.

Los siguientes ejemplos ilustran el tipo de aislante que se usan en el contexto de los tratadores electrostáticos, pero no limitantes de medios sólidos dieléctricos incluyen varios materiales orgánicos e inorgánicos como vidrio, cuarzo, cerámica, varios óxidos de metal refractario, etc. También son usados varios tipos de cauchos y plásticos que tienen la constante dieléctrica requerida. El aislante puede tener una estructura por capas de dos o más materiales. El aislante debe además tener una fuerza de ruptura eléctrica suficiente para resistir el voltaje usado y debe tener una baja impedancia.

6.3 TECNOLOGÍAS DE OPTIMIZACIÓN HIDRÁULICA Y DEL PROCESO

Los principales factores que están directamente involucrados en el proceso de tasa de tratamiento y temperatura de tratamiento de crudo son el tiempo de contacto y la gravedad. Para una óptima deshidratación, todas las técnicas deben ser aplicadas de una manera sistemática con el fin de ahorrar energía, reducir costos y cumplir con el proceso de la manera más rápida y eficiente como sea posible.

Se busca calcular la tasa de tratamiento (caudal de aceite en metros cúbicos por día) y la temperatura de tratamiento ($^{\circ}\text{C}$) para los tratadores AC y dual polarity, se requiere la gravedad específica del aceite. La curva da mejor ajuste, con una desviación mínima por parte de todos los datos de campo, se puede obtener por el método de los mínimos cuadrados para las dos funciones principales de los tratadores electrostáticos, el tratador de polaridad convencional y el tratador electrostático AC dual.

Las ecuaciones 84 y 86 son para determinar la tasa de tratamiento, q , y la temperatura de tratamiento, T , para el tratador electrostático AC convencional son:

$$q = 6277.2\gamma_o^2 - 12406\gamma_o + 6140.4 \quad (84)$$

$$T = 13.089\gamma_o^2 - 429.54\gamma_o - 326.38 \quad (85)$$

Mientras que las ecuaciones 87 y 88 son para determinar la tasa de tratamiento, q , y la temperatura de tratamiento, T , para el tratador polaridad dual son:

$$q = 6026.4\gamma_o^2 - 12303\gamma_o + 6283.9 \quad (87)$$

$$T = 382.38\gamma_o^2 - 219.05\gamma_o - 49.288 \quad (88)$$

6.3.1 Energía de precalentado requerida. La energía requerida para que el crudo húmedo ingrese al tratador se puede calcular a través de la siguiente ecuación 89:

$$Q = 53.09 [(0.5\gamma_o q_o) + (\gamma_o q_w)] \Delta T \quad (89)$$

6.3.2 Correlación para determinar el diámetro mínimo de la gota de agua. Si se conoce la distribución y el tamaño de las gotas de agua en la fase continua del aceite, que se encuentra encima de la interfase agua-aceite, se podría determinar el mínimo diámetro (d_{min}) de las gotas que deben conformarse fuera del aceite para producir el corte de agua deseado.

Es decir, si el volumen de agua tiene presente gotas de 300 μm y son más pequeñas del 1% del volumen total, entonces, mediante la separación todas las gotas mayores a 300 micras de diámetro, se puede asegurar un corte de al menos del 1 % de agua.

Como se ha dicho anteriormente, la velocidad de asentamiento de las gotas de agua que se encuentran presentes en la fase continua del aceite está definida por la ley de Stokes. Como resultado, una vez conocida el d_{min} y el patrón de flujo del tratador puede determinarse la geometría de este.

El tamaño mínimo de las gotas que se asentarán de la fase continua del aceite está en función de la velocidad final de asentamiento de las gotas y la geometría del flujo que está encima de la interfase agua-aceite. La velocidad final a su vez depende del tamaño de la gota y de las propiedades del fluido. La geometría del flujo está en función de la tasa de flujo y la dirección que ésta presente. Una ecuación típica para determinar el dimensionamiento del tratador de calor es la mostrada en la ecuación 90.

$$dL_e = 438 \left[\frac{q_o \mu_o}{\Delta \gamma d_{min}^2} \right] \quad (90)$$

La ecuación 90 relaciona el tamaño de la gota (d_{min}), la tasa de flujo (q_o), y las propiedades del fluido tales como viscosidad (μ_o) y gravedad específica de los fluidos ($\Delta\gamma$). Actualmente para escoger el tamaño adecuado del recipiente es necesario escoger un tamaño de gota basado en las propiedades del fluido. Dado que la distribución real de las gotas por encima de la sección del agua de lavado es desconocida, se ha realizado un intento para correlacionar los datos de campo y el proveedor acomodándose a la viscosidad del petróleo crudo y a la salida del corte de agua presente en el aceite.

Es decir, se supone que el proceso de coalescencia en la sección de agua de lavado está relacionado con la viscosidad del crudo de base, y el tamaño mínimo de las gotas que deben ser removidas por un corte de agua del 1% es una función única de la viscosidad. En ese orden de ideas un tamaño de gota para cortes de agua menos al 1% será requerido, y un mínimo tamaño de gota se puede tolerar para cortes de agua más altas.

A partir de estudios realizados por M.E. Thro y K. E. Arnold¹⁰⁷, encontraron una correlación, la cual fue obtenida a partir de datos de tres tratadores convencionales diferentes que arrojaron cortes de agua del 1% y se suponiendo que dependía netamente de la viscosidad se llegó a la ecuación 91.

$$d_{m1\%} = 200\mu_o^{0.25} \quad \text{para} \quad \mu_o < 80cp \quad (91)$$

¹⁰⁷ M. E. Thro y K. E. Arnold. "Water-droplet-size determination for improved oil treating sizing" SPE production and facility 1997.

Esta correlación puede ser usada para viscosidades que se encuentren entre 1 y 80cp. Realizando el mismo proceso para los tratadores electrostáticos se obtuvo la ecuación 92.

$$d_{m1\%} = 170\mu_o^{0.4} \quad \text{para} \quad 3cp < \mu_o < 80cp \quad (92)$$

6.3.3 Efecto del corte de agua sobre el diámetro mínimo de la gota. Datos reservados obtenidos de tratadores convencionales y electrostáticos dieron una variedad de cortes de agua, los cuales se utilizaron para respaldar el cálculo del tamaño de gota que se le atribuyo a la función corte de agua. A partir de estos valores que estudiaron M.E. Thro y K. E. Arnold¹⁰⁸ encontraron la siguiente ecuación 93.

$$\frac{d_{min}}{d_{m1\%}} = W_c^{0.33} \quad (93)$$

6.3.4 Practicas Operacionales. La deshidratación electrostática de crudos pesados, medianos y livianos ha demostrado que tratadores de alta calidad se pueden obtener. El desarrollo de la deshidratación electrostática puede ser mejorado siguiendo unos direccionamientos operacionales y teniendo en cuenta consideraciones de diseño tales como:

¹⁰⁸ M. E. Thro y K. E. Arnold. "Water-droplet-size determination for improved oil treating sizing" SPE production and facility 1997.

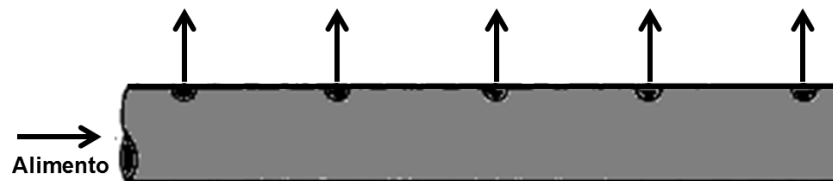
- ✓ Maximizar el tamaño de las gotas de agua que entran: Revisar el proceso del flujo de fluido desde la cabeza de pozo hasta el tanque de secado se deben determinar las condiciones de flujo para minimizar el cizallamiento innecesario de las gotas de agua que ocurre en las válvulas y curvas. Por ejemplo, si el control de las válvulas es diseñado para una máxima producción y ocurre que la producción es solo el 50%, la válvula deberá tener una restricción en el flujo para evitar el cizallamiento.
- ✓ Caracterizar las propiedades de la emulsión: Determinar las características del fluido como lo es viscosidad, densidad, conductividad eléctrica y tensión interfacial, y detectar cualquier cambio desde que comienza la producción. Identificar los tipos de sólidos presentes.
- ✓ Optimizar el uso de calor: Determinar el parámetro de Stokes (referido al tamaño de gota) y operar una temperatura lo suficientemente baja para obtener crudo de calidad en el tratador.
- ✓ Recudir los aumentos repentinos de flujo: Mantener el flujo constante y no operar por debajo de caudal de diseño para evitar cortocircuitos.
- ✓ Reducir contenido de sólidos: Identificar la fuente y los tipos de sólidos, y retirar la capa de impurezas que se encuentra en fondo y manejarla por separado para sostener una interfaz claramente definida en el tratador.
- ✓ Optimizar el tratamiento químico: Comprobar si el interruptor emulsión es compatible con el crudo y la emulsión dispersa, usando una centrifuga de mesa.

- ✓ Mejorar el diseño de la entrada y la salida barras esparcidoras: Basado en la tasa de alimento, se deben diseñar las esparcidoras, estas deben suministrar una distribución homogénea a través del área transversal del tratador.
- ✓ Modificar interiores del recipiente: Colocar mallas en la parte superior del recipiente, lo más cerca posible de la salida de aceite y colocarlos por lo menos a 8 pulgadas de la pared del depósito. Colocar esparcidores a la salida tanto como sea posible en la parte inferior del recipiente. La emulsión debe entrar unas pulgadas por debajo de la interfase agua/aceite. Proporcionar un medio para retirar la capa de impurezas en el fondo sin perturbar la emulsión agua-aceite.
- ✓ Optimizar las válvulas de descarga de agua: El continuo abastecimiento de agua para evitar la extracción de petróleo en la descarga de agua, a través de un controlador de nivel y no usar válvulas automáticas de encendido y apagado.
- ✓ Optimizar consumo de energía: Siempre comience la deshidratación electrostática con aceite seco entre las mallas.

6.3.5 Optimización de la hidráulica de fluidos en los tratadores electrostáticos. El diseño de la hidráulica influye altamente en la eficiencia del proceso. Con el fin de buscar la optimización de los métodos hidráulicos, se han desarrollado diferentes paquetes de software que se encuentran disponibles en el mercado en los cuales se puede examinar el comportamiento propiedades físico químicas del fluido cuando se expone a determinadas condiciones.

Como se ha mencionado a lo largo de este trabajo los tratadores electrostáticos están conformados por unas tubos esparcidores (ver figura 98) por el cual entra la emulsión de agua-aceite y es distribuida en los electrodos que se encuentran dentro del tratador con el objetivo de garantizar que el fluido tenga un contacto homogéneo con los electrodos que se encuentran dentro del tratador. Cuando se consigue una distribución eficaz del flujo tanto en la dirección longitudinal como en la transversal del tubo esparcidor y se utiliza un colector de longitud completo y adecuado, la mejora resultante en el rendimiento del proceso puede ser significativa.

Figura 98. Conducto esparcidor



Fuente: Autores

Dimensionar los orificios es una labor cautelosa ya que si, el diámetro es extremadamente pequeño las pérdidas por fricción pueden impedir que el flujo llegue hasta los últimos orificios y/o una mala distribución longitudinal puede representar una disminución de hasta del 25% en el rendimiento del proceso de deshidratación. Mediante la aplicación repetitiva¹⁰⁹ de un simple balance de energía de Bernoulli entre los orificios, es posible determinar el grado de la mala distribución entre el primer y último orificio del mismo tubo esparcidor.

¹⁰⁹ Aplicación repetitiva: se refiere al hecho de combinar diferentes distribuciones de orificios en el tubo esparcidor con el fin de buscar la configuración óptima, se pueden determinar los cálculos manualmente o simplificar los cálculos mediante la implementación de un software.

También se debe tener en cuenta que cuando se combinan vigorosamente el agua y el aceite la viscosidad de la mezcla aumenta significativamente. Una manera adecuada de hacer el diseño del tubo dispersor es calcular el valor de la viscosidad resultante y con este valor determinar las pérdidas de presión entre y a través de los orificios. Un diseño óptimo considera costos, capacidad de construcción, funcionalidad y flexibilidad.

6.3.5.1 Ecuaciones de balance de energía. La figura 99 muestra los puntos 1, 2 y 3 de la cual se deducen las ecuaciones que establecen la energía y el balance de masa (ecuación 94), y a su vez la velocidad a través del orificio. Puesto que la relación de esparcidores de longitud/diámetro es típicamente alta y la velocidad de flujo son bajas, es esencial tener en cuenta el efecto de la energía cinética en la distribución de flujo para el diseño de un tubo esparcidor eficiente.

Figura 99. Balance de energía.



Fuente: Autores.

El balance de energía de Bernoulli indica que; la reducción de la energía cinética en 2 debe ser igualada por un aumento en la energía potencial para mantener el balance de energía requerida. Por lo tanto, inmediatamente después de cada orificio hay un aumento de la presión estática en P2.

Este aumento en la energía potencial proporciona una presión adicional para ayudar a distribuir el flujo hasta el final de la barra de dispersión. En su forma más simple, el balance de energía iguala al total de la energía estática más la cinética en el punto 1 con la energía total en el punto 2 menos las pérdidas por fricción que se presentan en la tubería entre el punto 1 y 2.

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{\Delta P_{1-2}}{\rho} \quad (94)$$

Dónde:

P_1 = Presión estática después del primer orificio, psi

v_1 = velocidad del flujo después del primer orificio, fpm

P_2 = Presión estática después del segundo orificio, psi

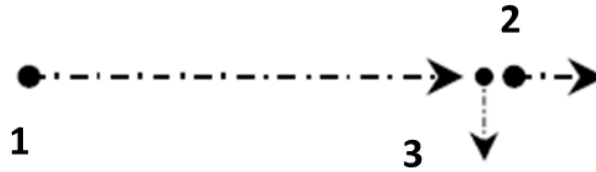
v_2 = velocidad del flujo después del segundo orificio, fpm

ΔP_{1-2} = Perdidas por fricción en el tubo entre los orificios, psi

ρ = Densidad del fluido, lb/ft³

6.3.5.2 Balance de masa. El balance de masa asociada es también bastante sencillo de establecer. La tasa de flujo volumétrico en el punto 1 debe ser igual a la suma de la velocidad del flujo a través del orificio en el punto 3 y a través de la tubería en 2. Con la ayuda de la figura 100 se deduce las ecuaciones para el balance de masa (ecuación 95), en la mayoría de las aplicaciones el diámetro de la tubería se mantiene constante.

Figura 100. Balance de masa.



Fuente: SAMS, Gary W – NATCOGROUP¹¹⁰.

$$A_1 A v_1 - A_3 v_3 = A_2 A_2 \quad (95)$$

Dónde:

A_1 = Flujo en el área del primer orificio de la tubería, ft²

A_2 = Flujo en el área del segundo orificio de la tubería, ft²

A_1 = Flujo en el área del primer orificio, ft²

v_1 = Velocidad de flujo en el esparcidor, fpm

v_2 = Velocidad de flujo en el esparcidor, fpm

v_3 = Velocidad que hay a la salida del tubo, fpm

6.3.5.3 Velocidad del orificio. Finalmente la velocidad de flujo a través del orificio es determinado por el diferencia entre la presión P₂ y la presión de operación del tratador P_O. Para un óptimo rendimiento se debe evitar altas caídas de presión a través de los orificios. En otras palabras, son requeridos grandes orificios para reducir la velocidad en el orificio y de ese modo se evita la caída de presión.

¹¹⁰ SAMS, Gary W. and Harry G. Wallace, NATCOGROUP. "Improving process efficiencies by optimizing fluid in electrostatic oil dehydrators". OTC13216 2001.

Sin embargo, el tamaño del orificio debe ser equilibrado con los otros orificios con el fin de lograr una distribución homogénea a lo largo del eje longitudinal de la tubería. Tamaños de orificios comunes van desde ½ pulgada hasta 1 pulgada en la mayoría de tratadores de crudo. Aunque la velocidad del orificio puede ser baja, el flujo se puede asumir totalmente turbulento permitiendo así que a través de una simple ecuación se puede determinar la velocidad (ecuación 96) con la que sale el fluido en el orificio.

$$v_3 = 245 \sqrt{\frac{\Delta P_{2-0}}{\rho}} \quad (96)$$

Dónde:

ΔP_{2-0} = Presión diferencial a través del orificio, psi

ρ = Densidad del fluido, lb/ft³

v_3 = Velocidad del orificio, fpm

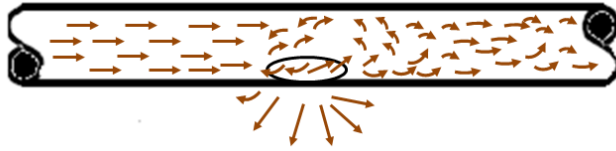
Cuando se está diseñando un óptimo esparcidor, varios parámetros deben ser tenidos en cuenta. Diámetros de tubería pequeños crean altas velocidades de los líquidos reduciendo la presión estática disponible para entregar el flujo a través de los orificios; el resultado es menos flujo en el orificio cerca del extremo de la entrada y un mayor flujo en el esparcidor final. Por el contrario, para un tamaño y distribución constante de orificios, las velocidades bajas permiten que la mayor parte del fluido salga por la entradas más cercana, en su defecto no se logra distribuir uniformemente hasta el final del tubo esparcidor.

Por lo general, la velocidad transversal y la del orificio deben estar alrededor 1.5 ft/s para obtener una distribución óptima. Sin embargo, incluso a 1.5 ft/s la energía cinética contenida en el flujo del orificio es suficientemente como para dominar el patrón de distribución, en ocasiones parte del flujo se escapa por la salida del tubo. Como consecuencia de este fenómeno cinético la mezcla agua/aceite se va por las paredes del tratador en lugar de distribuirse de manera uniforme esquivando los electrodos.

6.3.5.4 Control de momentum. La energía cinética de la mezcla agua/aceite es suficiente para llevar a cada chorro del orificio a la pared opuesta, donde se desvía hacia arriba por la curvatura de la tubería. A medida que el chorro se mueve a través del flujo que lo rodea crea un cono creciente de fluido a medida que “arrastra” fluido adyacente a lo largo de su recorrido (observe el fenómeno que ocurre en la figura 101).

Investigaciones posteriores indicaron que los fluidos más ligeros, los que tienen menos resistencia al movimiento, tienden a permanecer como una corriente, mientras que los líquidos más pesados, oponen mayor resistencia al movimiento, tienden a enredar líquidos adyacentes y desembolsar rápidamente. En ambos casos, la circulación de líquidos “parásitos” no deseados da como resultado que los chorros de los orificios tiendan a luchar en contra flujo como se mencionó anteriormente. Los resultados no fueron solo la dirección del flujo de fluidos en la dirección equivocada de los electrodos, sino que también una reducción en el tiempo aparente de residencia en el recipiente alrededor del 45%.

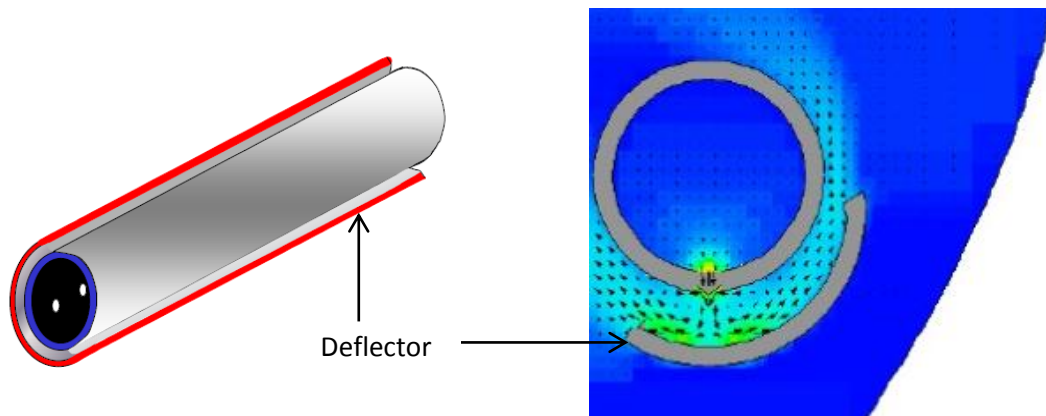
Figura 101. Comportamiento del flujo de fluido dentro de un tubo esparcidor.



Fuente: Autores

Los intentos de controlar la precipitación del chorro por el tamaño del orificio, caída de presión, la orientación y la ubicación no tuvieron éxito. El único método eficaz para reducir el impulso de cada chorro que salía del orificio era capturarlos y redirigirlos al recipiente. Para lograr una mejor distribución del flujo que sale de los orificios del tubo esparcidor se implementa un *deflector* que lo recubre 120 ° como se ilustra en la figura 102, y las dimensiones de este deflector dependerán del tubo esparcidor.

Figura 102. Deflector y funcionamiento.



Fuente: SAMS, Gary W – NATCOGROUP¹¹¹.

¹¹¹ SAMS, Gary W. and Harry G. Wallace, NATCOGROUP. "Improving process efficiencies by optimizing fluid in electrostatic oil dehydrators". OTC13216 2001.

6.4 OTRAS TECNOLOGÍAS EN ELECTROCOALESCENCIA

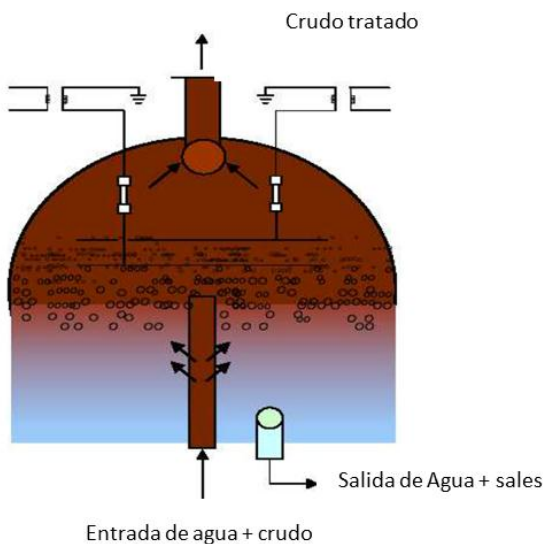
A las tecnologías en configuración y composición de electrodos, de campo eléctrico, y de configuración de equipos para optimización de la hidráulica, se le suman aquellas que propiamente dicho no hacen parte exclusiva de alguna de las anteriormente mencionadas, sino más bien se componen de varias de ellas para obtener una combinación de mejoras que garanticen una mayor eficiencia en el proceso de deshidratación y/o desalación de crudos pesados, inclusive combinándose no solo con tecnologías eléctricas, sino también con aquellas denominadas anteriormente como convencionales (térmicas, químicas, mecánicas, etcétera).

6.4.1 Sieléctrica. Todos los electrocoalescedores comerciales de campo AC hasta 1960 fueron diseñados para mantener un alto grado de turbulencia, rompiendo así mismo las cadenas de gotas de agua dispersa que originan descargas eléctricas o arcos entre los electrodos. Los electrocoalescedores comerciales modernos adoptan flujo laminar, colocando el proceso de sedimentación gravitacional en primer lugar dentro del recipiente.

Los tratadores AC convencionales pueden ser modificados para adoptar un régimen de flujo preferencial que otorgue beneficios únicos dependiendo de las características de la emulsión y de la configuración de las facilidades en superficie o en la planta de tratamiento. Éstos pueden ser tratadores AC con flujo laminar establecido o tratadores de baja velocidad (SIELECTRIC), y tratadores AC con flujo turbulento establecido o tratadores de alta velocidad (BIELECTRIC).

En los modelos de baja velocidad, la emulsión es introducida por la parte inferior del coalescedor y descargada en la fase acuosa, a lo largo de su longitud, de tal forma que sufre un lavado capaz de remover cristales de sales y otras partículas sólidas presentes en la fase oleosa, más allá de promover alguna coalescencia entre las gotas de agua. A medida que asciende en la dirección del campo eléctrico, la emulsión también sufre una coalescencia debido al campo eléctrico débil establecido entre el electrodo inferior y la interfase agua-aceite (conectada a tierra). Cuando la emulsión finalmente alcanza el campo eléctrico principal, con mayor gradiente de tensión, ocurre la coalescencia principal esperada en el proceso. El modelo SIELECTRIC de Petreco sigue este arreglo (Ver Figura 103).

Figura 103. Esquema general de la tecnología SIELECTRIC (electrocoalescedor AC de baja velocidad).

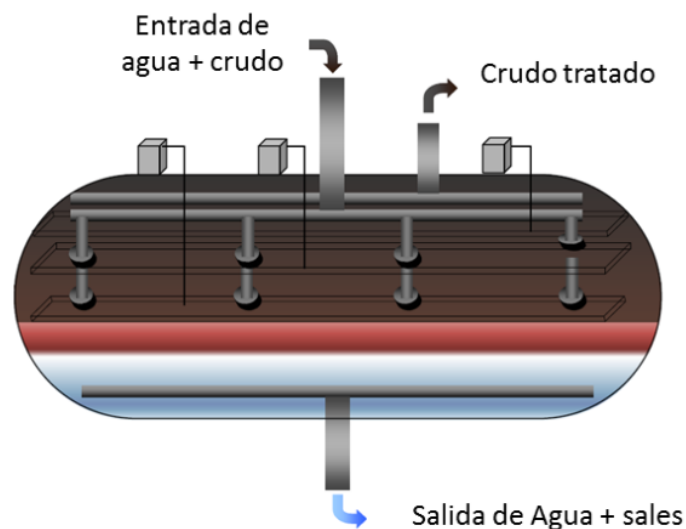


Fuente: Coutinho, R. C. C.¹¹²

¹¹² COUTINHO, R. C. C. Estudo da estabilidade de emulsões de água em petróleos. Proyecto de Maestría en Ingeniería Química, Universidad Federal de Río de Janeiro. Río de Janeiro (Brasil), 2005.

6.4.2 Bielétrica. En los modelos de alta velocidad, como lo es la tecnología BIELECTRIC de la empresa Petreco, la emulsión es inyectada directamente en la región comprendida entre los electrodos, con la posibilidad de empelarse dos o tres niveles de gradas. Cuando son utilizados dos niveles grandes, la emulsión es inyectada a través de un distribuidor especial, de abertura variable y control externo, conocido como válvula distribuidora. Cuando son utilizados tres niveles de gradas, las válvulas distribuidoras son sustituidas por distribuidores fijos. La Figura 104 ilustra simplificada un electrocoalescedor con alimentación de carga del tipo de alta velocidad.

Figura 104. Esquema general de la tecnología SIELECTRIC (electrocoalescedor AC de baja velocidad).



Fuente: Coutinho, R. C. C.¹¹³

¹¹³ COUTINHO, R. C. C. Estudo da estabilidade de emulsões de água em petróleos. Proyecto de Maestría en Ingeniería Química, Universidad Federal de Río de Janeiro. Río de Janeiro (Brasil), 2005.

La principal ventaja de este último tipo de electrocoalescedor es la duplicación de la región del campo eléctrico principal en función de la introducción de la tercera grada de electrodos. Al igual que con el tratador de baja velocidad, entre el electrodo inferior y la interfase agua-aceite (conectada a tierra) se establece un campo eléctrico débil, prevaleciendo en esta región el fenómeno de decantación o coalescencia de las gotas contenidas en la interfase.

El flujo turbulento es controlado en una dirección horizontal impuesto sobre una emulsión en los tratadores de alta velocidad, causando una circulación de la emulsión debajo de los electrodos, lo que aumenta las probabilidades de que las gotas alcancen la distancia ideal para que ocurra la coalescencia. Para conseguir este efecto de circulación el flujo de emulsión debe ser limitado, por lo cual estos tratadores generalmente son modulados.

Se encuentran otras tecnologías similares en las cuales otras compañías adaptaron el proceso de electrocoalescencia de campo AC de alta velocidad con sus propias configuraciones encontrando patentes como el equipo EDGE del fabricante Howe-Baker, y TRIVOLT del fabricante Natco. Las diferencias de éstas con respecto a la tecnología BIELECTRIC de Petreco se concentran en la forma de conexión entre los electrodos, en el tipo de transformador y en detalles constructivos, como colectores y distribuidores.

Los electrodos utilizados en los tratadores AC pueden ser de dos tipos: A y B. El electrodo de tipo A está diseñado en forma de módulos que consisten en varias partes metálicas energizadas configurando un formato circular, y son tantos como el número de módulos que constituyen el tratador.

El electrodo tipo B consiste de varas metálicas energizadas que se extienden uniformemente a lo largo de la sección longitudinal del recipiente, confiriendo al tratador una mayor área total de electrodos para un mismo tiempo de residencia del petróleo. Como los tratadores de bajas velocidades no son divididos en módulos, entonces se utilizan electrodos tipo B en este modelo.

6.4.2.1 Principio de operación y características principales. En el proceso de desalación electrostática, el crudo es previamente calentado disminuyendo su viscosidad. Este es mezclado con agua fresca, que se dispersa en el crudo en pequeñas gotas. Esta dispersión de agua-crudo es introducida en el tratador a la presión que este se encuentre, donde es sometida a un campo eléctrico de alto voltaje el cual acelera la separación de las gotas de agua que se encuentra con alto contenido de sal y otros contaminantes del petróleo.

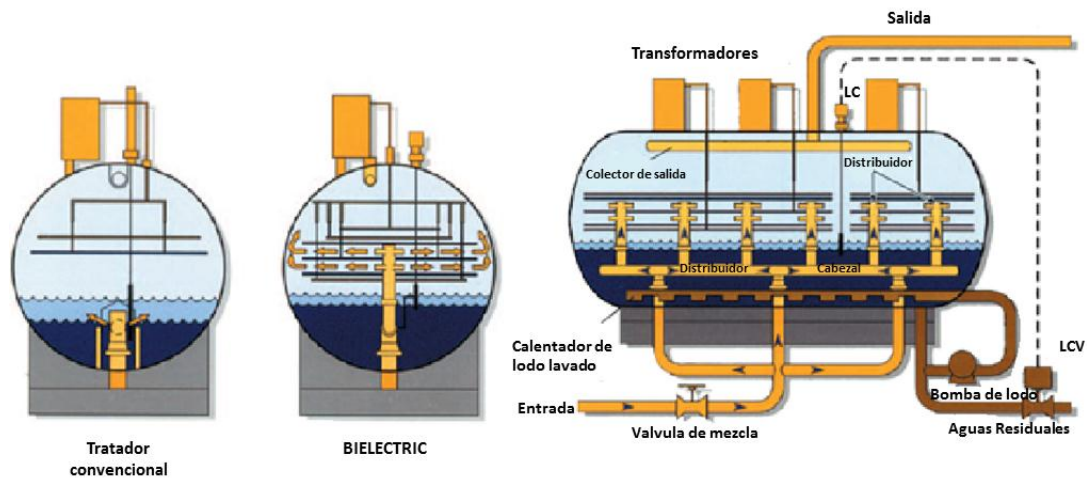
Los distribuidores alimentan el crudo y la emulsión de agua en dos corrientes radiales y horizontales entre los tres electrodos. La corriente de emulsión fluye hacia el exterior donde encuentra las condiciones óptimas para que ocurra rápidamente la coalescencia. A medida que avanza coalescencia, las gotas de agua son lo suficientemente grandes para superar la viscosidad del crudo y caer debido a la gravedad. Estas descienden en forma de lluvia, saliendo del flujo de aceite y sin generar turbulencia, llegan a una piscina de agua que se encuentra en la parte inferior.

Los electrodos están diseñados para maximizar el rendimiento de la distribución dual del sistema. La configuración del sistema también permite realizar una mezcla agresiva con una válvula especializada para el lavado de agua y crudo, de modo que cuando ocurre la coalescencia más impurezas son removidas con el

agua y la limpieza al producto tratado es realizada. El fuerte campo eléctrico también es menos dependiente de químicos para que ocurra la coalescencia, siendo más bajo que el de un tratador típico.

El crudo tratado, libre de contaminantes, se eleva continuamente por la parte superior del recipiente y fluye hacia afuera, mientras que el acumulado de agua y mezcla de sedimentos es retirado automáticamente de la parte inferior del sistema para su posterior disposición. La doble distribución horizontal del tratador Bielectric mejora significativamente la capacidad de tratamiento y mejora el control de la interfaz de la emulsión, comparado con un tratador convencional. Ver configuración figura 105.

Figura 105. Comparación de diseño del tratador Bielectric contra el tratador convencional.



Fuente: NATCO. Centro de Servicios para Partes y Dimensionamiento (www.natcoparts.com).

El tratador Bilectric permite el máximo rendimiento, flexibilidad y fiabilidad de cualquier tamaño determinado de recipiente, se encarga de una amplia gama de gravedades de crudo y viscosidades y trabaja supervisión mínima del operador. La configuración de doble flujo proporciona hasta el doble de capacidad por unidad volumen del recipiente que los tratadores de flujo vertical. El diseño BILECTRIC retiene un alto nivel de, llegando a la mitad del contenedor, para permitir el máximo tiempo de residencia para que el aceite se separe del agua. Por ser de menor tamaño y peso presenta una ventaja para poder ser implementados en operaciones offshore.

Cameron diseña el tratador de acuerdo a las necesidades del cliente:

- ✓ Gravedad API desde 12 a 50 API
- ✓ Las unidades manejan tasas de flujo desde 160m³/día hasta 47700m³/día (1000 BPD a 300000 BPD) con la versatilidad de combinar múltiples unidades.
- ✓ BS/W por debajo del 0.2%

Ventajas:

- ✓ Flexibilidad de rendimiento.
- ✓ Flexibilidad en la tasa de alimento.
- ✓ El crudo sale con alta calidad.
- ✓ El agua sale con alta calidad.
- ✓ Reduce costos de operación y mantenimiento.
- ✓ Reduce dependencia de químicos.
- ✓ Excelente distribución de flujo.
- ✓ Coalescencia de manera más rápida con el mínimo consumo de energía eléctrica.
- ✓ Control de la interfase de la emulsión.

6.4.3 Coalescedor electrostático interno (VIEC). Este tiene variaciones, todas creadas por la compañía Hamworthy, como el VIEC de alta temperatura (HT VIEC), el cual permite superar la temperatura límite de un VIEC convencional de 90° C, operando regularmente hasta temperaturas de 150° C por lo que es más adecuado para tratamiento de crudos pesados; y por otro lado está el VIEC para bajos contenidos de agua (VIEC LV), el cual utiliza fuerzas dielectroforéticas y fue diseñado para operar aguas abajo de un equipo VIEC convencional o HTVIEC dentro de un separadores de alta y baja presión, para mejorar el crudo y obtener calidad de exportación.

La tecnología VIEC utiliza una estructura metálica que combina las funciones de un enderezador de flujo mecánico y un coalescedor electrostático. Cada módulo de un VIEC contiene un conector de bajo voltaje, un transformador de alto voltaje y un conversor dedicado de frecuencia para ajustar la frecuencia de operación a los KHz de la región. Operar el electrocoalescedor en el rango de frecuencia de KHz previene una alta caída de voltaje a lo largo de la capa de aislamiento de los electrodos debido a la baja impedancia de la emulsión.

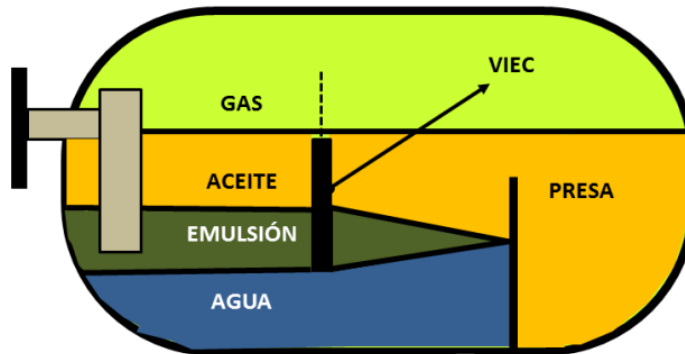
La combinación de alta frecuencia y aislamiento eléctrico de los electrodos le permite al equipo VIEC tolerar presencia de agua libre y por ende ser empujado en el primera etapa robusta de separación, contribuyendo con la separación temprana de agua en la planta de tratamiento del crudo. Estos beneficios son potencialmente importantes debido a que una mejora en la separación temprana del agua en las plantas de tratamiento reduce la carga del siguiente intercambiador de calor inter-etapa, y a su vez contribuye a reducir el volumen de flujo entrante a la segunda etapa de separación.

La tecnología VIEC es modular, permitiendo hacer uso de varios elementos o equipos VIEC ensamblados juntos como una malla o rejilla dentro del separador, de tal forma que la emulsión agua en aceite fluya a través de ésta. El tamaño de un elemento VIEC es de 15x45x45 cm, y pesa alrededor de 33 Kg, por lo cual puede ser instalado fácilmente dentro del separador sin necesidad de maquinaria para transporte pesado o de gran tamaño. El consumo de poder de un elemento VIEC es de aproximadamente 250 Watts, por lo cual, un paquete de electrocoalescencia VIEC compuesto de 36 módulos instalados en un separador común consumirá sólo 9 Kilo-watts de potencia (Ver Figura 106).

Ventajas:

- ✓ Aumento en la capacidad para tratar los aceites pesados de alta viscosidad.
- ✓ Mejora en la calidad del agua producida
- ✓ Reduce costos en cuanto a consumo de energía requerida para el calentamiento y menos gastos en desémulsificantes
- ✓ Mejor conducción del proceso
- ✓ Menor consumo de insumos químicos
- ✓ Menos emisiones nocivas
- ✓ Mejora la eficiencia de la planta en lo que concierne al agua producida
- ✓ Menos contaminación en el agua de descarga
- ✓ Controla la reducción de riesgos de vertimiento de crudo.
- ✓ Características:
 - ✓ API entre 12 y 50
 - ✓ Adecuado para realizar mantenimiento en caso de revisión
 - ✓ Electroodos 100% asilados resistentes al agua y al gas

Figura 106. Esquema de electrocoalescedor VIEC



Fuente: Autores

Vetco Aibel ofrece comercialmente un separador con coalescedor electrostático interno (VIEC) y un coalescedor para bajos cortes de agua (LOWACC). Desafortunadamente, ambos sistemas comerciales sufren problemas de depositación en los electrodos, los cuales consisten de estructuras parecidas a un panal de abejas colocadas horizontalmente. Los sólidos contenidos en el crudo se precipitarán y depositarán en las secciones horizontales de la estructura. Estos sólidos son finos suspendidos de arena y arcilla dentro del crudo. Son problemáticos porque también (como el agua) tienden a formar cortos circuitos.

6.4.5 Coalescedor eléctrico compacto (CEC). Statoil es la compañía dueña de a la patente de la tecnología de coalescencia electrostática compacta. Este producto consta de una serie de electrodos concéntricos circulares, alojados dentro de una sección de coalescencia. Una importante diferencia respecto a la tecnología VIEC es que el CEC es un equipo en-línea instalado fuera del separador, y no un equipo interno como lo es el VIEC.

Esta consideración tiene dos importantes consecuencias, primero que la acción coalescente en un CEC toma lugar en flujos con un número de Reynolds mucho mayor comparado con las restricciones de flujo a lo largo de los canales de un VIEC, y segundo, la tecnología CEC no requiere del apagado de la planta durante el mantenimiento, debido a que pueden instalarse fácilmente líneas que permitan un bypass para mantener la producción a un caudal reducido pero existente.

El rango de caudal tolerado por una unidad CEC va desde 3000 barriles de crudo por día (3 MBPD) a 220000 barriles de crudo por día (220 MBPD). Este equipo es tolerante a salpicaduras, corto circuito de la malla, y baches de agua, pero está limitado a un máximo de 7% de fracción volumétrica de gas, por lo cual, la instalación típica de un equipo CEC va después de una segunda etapa de separación.

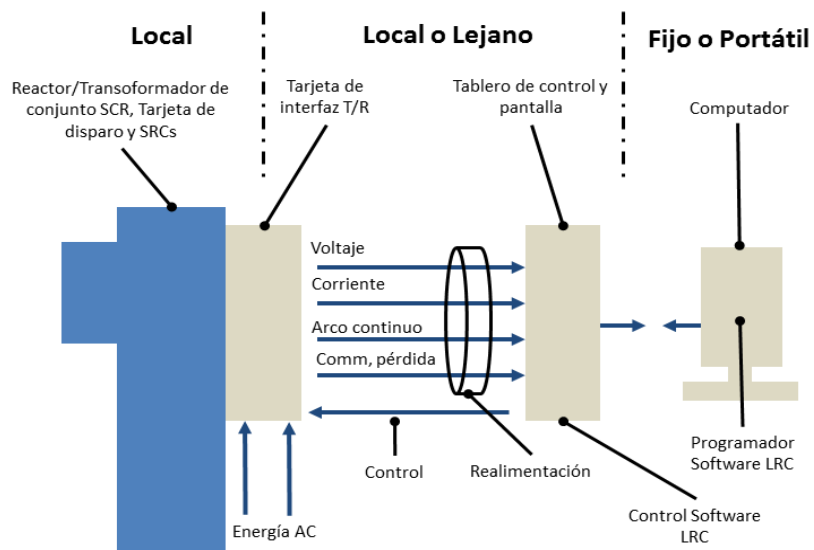
6.4.6 Controlador de poder suministrado (LRC). La tecnología LRC consiste en un transformador combinado con un dispositivo electrónico que auto-regula el flujo de corriente eléctrica a través de un ajuste de la potencia del circuito primario del transformador, optimizando la tensión enviada al tratador.

El LRC posee un detector de altas corrientes (arcos eléctricos), de tal forma que cuando se detecta un arco eléctrico, la tensión es desconectada por un instante muy pequeño (algunos microsegundos), haciendo que el arco se extinga y el proceso continúe con una perturbación mínima. Utilizar una capa aislante entre electrodos adyacentes previene la formación de corto circuito debido al puenteo generado por las gotas. Sin aislamiento, se requiere de una herramienta limitante de corriente para prevenir el corto.

Adicionalmente, el campo electrostático efectivo sobre la emulsión se anulará de golpe o se reducirá mucho durante el período de corto circuito, disminuyendo la eficiencia del proceso de coalescencia. El aislamiento del electrodo también tiene el beneficio de reducir en general el drenaje de corriente del sistema, permitiendo entonces el uso de un transformador de gama baja, ver figura 107.

Figura 107. Configuración de hardware (LRC)

Configuración de Hardware (LRC)



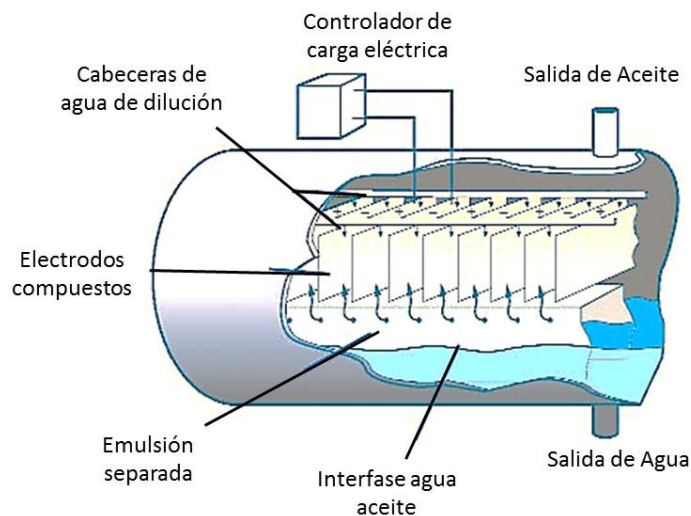
Fuente: NATCO. Centro de Servicios para Partes y Dimensionamiento (www.natcoparts.com).

Utilizar aislamiento, no obstante, limita el tipo de excitación electrostática que puede ser utilizada. Si un campo generado por corriente continua (DC) es aplicado a un sistema aislado eléctricamente, ocurrirá una polarización interfacial. En este proceso el aislante es cargado con la polaridad opuesta del electrodo adyacente y reduce enormemente el campo eléctrico efectivo actuando sobre la emulsión. Esto limita los procesos de coalescencia mejorada electrostáticamente.

Para solucionar este problema, debe aplicarse un campo eléctrico variante con el tiempo que prevenga la construcción de carga en la capa aislante.

6.4.7 Desalación electro-dinámica (EDD). La tecnología EDD de la empresa Natco, también basada en la configuración del electrocoalescedor Dual Polarity con electrodos compuestos, adicionalmente incorpora una inyección de agua de dilución a través de un distribuidor localizado en la parte superior del equipo, así como un sistema electrónico de control de transformador, denominado Load Responsive Controller (LRC). La configuración de esta tecnología se puede apreciar en la Figura 108 mostrada a continuación:

Figura 108. Desalador electro dinámico (EDD)



Fuente: NATCO. Centro de Servicios para Partes y Dimensionamiento (www.natcoparts.com).

Como anteriormente se mencionó, en un proceso de desalación convencional, el agua de dilución se adiciona totalmente a la corriente oleosa, y se circula a través de una válvula mezcladora, la cual alimenta el equipo de desalación a través de un distribuidor. Por otra parte, esta tecnología aprovecha el campo eléctrico no sólo para separar la emulsión presente en el crudo, sino también para realizar un proceso de mezclado mejorado de las gotas de agua de la fase dispersa con el agua de dilución, optimizando de esta manera el proceso de desalación.

Para lograr este objetivo, parte del agua de dilución es introducida directamente dentro del coalescedor con la ayuda de un distribuidor, filtrándose hacia abajo y pasando entre los electrodos dispuestos verticalmente. De acuerdo con esto, la dirección del agua de dilución será contraria a la de la emulsión, la cual es introducida por debajo de los electrodos y fluyendo hacia arriba, siendo un proceso entonces en contracorriente. Parte del agua de dilución continúa siendo adicionada a la corriente oleosa, pasando por una válvula mezcladora, para garantizar que las impurezas sean mojadas por el agua.

Cuando el agua de dilución fluye a través de los electrodos adyacentes, es sometida a un rápido aumento del gradiente de tensión en la región poco conductiva de las placas, de tal forma que las gotas grandes se dispersarán en gotas más pequeñas. Luego, las gotas de agua pequeñas son expuestas a un campo eléctrico alto cuando pasan por la región conductiva de las placas (centro de las placas), mientras que simultáneamente las gotas de agua dispersas y emulsionadas en el crudo también son expuestas a este campo pero fluyendo en sentido contrario, generándose un choque entre las gotas de agua de dilución y las gotas de salmuera emulsionada, las cuales coalescerán debido a la acción del campo eléctrico, proceso que se denomina mezcla electrostática.

Las gotas de agua mezclada posteriormente descenderán por el aumento significativo del tamaño debido al proceso de electrocoalescencia previo, y atravesarán por último la región de disminución del gradiente de tensión correspondiente a la parte dieléctrica inferior del electrodo compuesto, aumentando aún más la eficiencia de coalescencia entre las gotas de agua mezclada y por ende acelerando el proceso de deshidratación y desalación.

Ventajas:

- ✓ Reequipamiento para actualizar el sistema de una sola etapa con el rendimiento de dos etapas.
- ✓ Aumentar los niveles de extracción de sal por encima de cualquier otro proceso de una sola vasija.
- ✓ El doble de capacidad que los sistemas de dos etapas.
- ✓ Reduce la inversión inicial para nuevas instalaciones.
- ✓ Permite mayor corte de agua durante condiciones adversas, manteniendo los requisitos efluentes establecidos.
- ✓ Mejora la calidad del agua que sale.
- ✓ Reduce el uso de productos químicos.
- ✓ Requiere menos espacio, comparado con un montaje de dos etapas.
- ✓ Mayor remoción de sal.
- ✓ Proporcionar una mejor capacidad de deshidratación.

La tecnología LRC hace este proceso posible a través de dos niveles de tensión que son modulados y ajustados para adaptar el ritmo óptimo de flujo de agua de dilución con el ciclo de dispersión/mezcla/coalescencia/separación. Cabe aclarar que la mayor parte de contacto entre la salmuera emulsionada y el agua de dilución ocurre cuando las gotas coalescen.

Por ende, múltiples ciclos de coalescencia contribuyen en mayor medida en la eficiencia de contacto que una válvula mezcladora. Esta tecnología a su vez posee estas ventajas adicionales: proporciona la eficiencia de dos etapas de desalación en un único tratador, dobla la capacidad de los sistemas con dos etapas, reduce el consumo de agua de dilución, aumenta la eficiencia de remoción de sal, y aumenta la eficiencia de mezclado, entre otras.

6.4.8 Electrocoalescedor en línea. Tecnologías FMC ha agregado satisfactoriamente un nuevo electrocoalescedor en línea a su portafolio de Sistemas de separación CDS de tecnología de separación. Este desarrollo ha sido dirigido a la siguiente generación de sistemas de separación de superestructura y submarinos, ver figura 109.

Figura 109. Electrocoalescedor INLINE



Fuente: FMC Technologies (www.fmctechnologies.com)

Electrocoalescedor Inline usa un campo eléctrico que promueve el crecimiento de las gotas de agua en aceite y el rompimiento de la emulsión para que sea efectiva la separación agua-aceite. Este está diseñado para ser montado en el tubo de conducción aguas arribas del separador. Un nuevo voltaje de alto poder en el sistema y el proceso planteado resulto dar una alta eficiencia, un diseño más compacto y además un menor consumo de energía comparado con las tecnologías actuales disponibles en el mercado.

Ventajas:

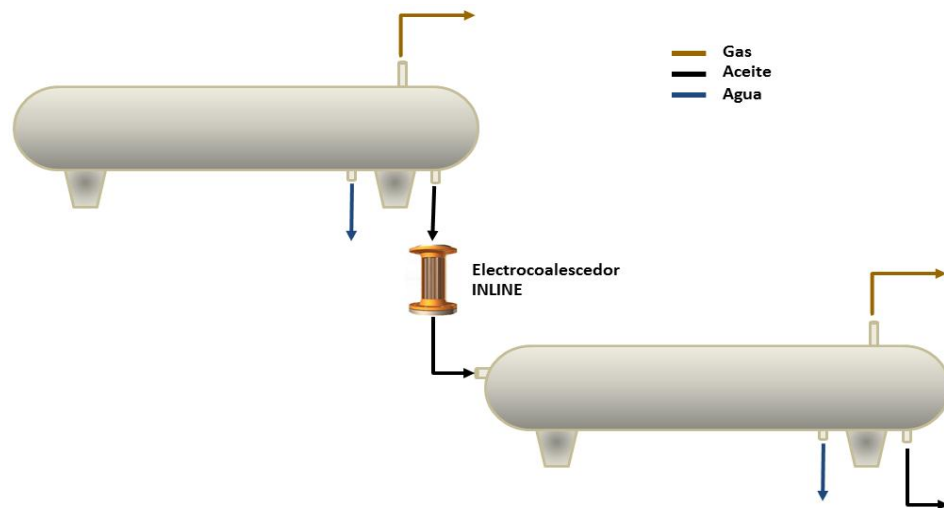
- ✓ Compacto: Contribuye a la reducción de CAPEX para nuevas instalaciones. El electrocoalescedor Inline es más pequeño necesita menos espacio permitiendo la flexibilidad de posicionamiento del sistema.
- ✓ Alta eficiencia: Baja el OPEX por la alta eficiencia de separación que puede lograr con un menor consumo de energía.
- ✓ Verdadera aplicación del electrocoalescedor Inline: Reduce el tiempo de residencia, es menos pesado y deja más espacio disponible. Este no necesita reducir el flujo con el cual se está llevando el proceso.
- ✓ Fácil instalación: Ideal para adaptar en los procesos existentes, así como para su uso en procesos de nueva construcción en combinación con el separador gravitacional.
- ✓ Diseño solido: No hay partes móviles lo cual reduce el tiempo de inactividad y de mantenimiento. Debido a la naturaleza del material tiene una larga vida útil.
- ✓ Optimiza la fuente de alimentación: Este opera con un menor consumo de energía comparado con otros electrocoalescedores. Tiene un circuito de auto regulación.

La tecnología de electrocoalescencia compacta cumple con las expectativas para ser aplicadas en crudos pesados y emulsiones apretadas de agua/petróleo. Los electrocoalescedores inline usan un campo eléctrico que promueve el crecimiento de las gotas de agua en aceite y el rompimiento de la emulsión para así lograr la separación del agua y del aceite. Estos se acoplan fácilmente a otros procesos de escisión ya sea tecnología convencional o compacta, ver figura 110.

Información técnica:

- ✓ 50m³ /h unidad de 4''
- ✓ Tiempo de residencia: 0.14s
- ✓ Crudo
- ✓ Corte de agua 20%

Figura 110. Acoplamiento Electrocoalescedor Inline



Fuente: Autores

6.4.9 Combinación con otro tipo de tratamiento. La electrocoalescencia como proceso para tratamiento de crudo pesado, en algunos casos por sí solo no llega a ser suficiente para obtener las especificaciones deseadas en el punto de salida. Por tanto se ha observado en la práctica la modificación en la configuración de los equipos mostrados anteriormente, que permita la combinación de las tecnologías de tratamiento electrostático con otros tipos de procesos conocidos para deshidratar y desalar el crudo, tal cual se mencionó anteriormente: tratamiento térmico, adición de químicos, centrifugado, entre otros.

Las configuraciones disponibles para combinar diversas tecnologías es un tema bastante amplio por lo cual solo se enfocará en las variaciones posibles sobre la tecnología Dual Frequency, invocando los beneficios de procesos térmicos, centrífugos y de separación mecánica, lo cuales serán tratados en el siguiente capítulo en mayor detalle (Ver Capítulo 7).

7. TECNOLOGÍA DUAL FREQUENCY

Retomando la clasificación de las tecnologías en electrocoalescencia para la deshidratación y desalación del crudo, y haciendo énfasis en aquella caracterización de éstas a partir de modificaciones sobre la onda de acción del campo eléctrico, se mencionó con anterioridad la existencia de dos grandes grupos, uno el cual se refería a aquellas equipos y procesos en los cuales la onda del campo eléctrico no sufría modificación alguna en su frecuencia, forma o amplitud (ya descrito con anterioridad), y el otro, el grupo donde radica el interés primordial de este proyecto investigativo, a saber, el correspondiente a la tecnología Dual Frequency, la cual involucra cambios y modulaciones en la frecuencia base, obteniendo beneficios incomparables respecto a las demás técnicas existentes en el mercado.

7.1 DESARROLLO DE LA TECNOLOGÍA

Debido al considerable aumento de la rentabilidad generada dentro de la industria petrolera en los últimos años, muchas compañías en todo el globo terrestre se han preocupado por entrar desempeñar un papel importante dentro de esta industria e ir evolucionando con la misma, por lo que a nivel mundial durante el último siglo se ha generado una carrera investigativa y de desarrollo de diferentes tecnologías que le permitan a las empresas posicionarse en tan apetecido mercado, innovando cada día y creando revolucionarios y totalmente nuevos conceptos en las diferentes áreas de acción en el mundo del petróleo.

La deshidratación y desalación del crudo no es la excepción, encontrando nuevas tendencias como la deshidratación asistida por electrocoalescencia, campo en el

cual la filial especializada en tratamiento de fluidos de la empresa CAMERON, NATCO, se ha posicionado como líder en innovación y desarrollo tecnológico a lo largo del tiempo con tecnologías de alta gama y con un futuro prometedor debido a su significativo aumento en la eficiencia respecto a su competencia, como lo son los procesos Dual Polarity, tratado en el capítulo anterior, y Dual Frequency.

Desde 1971, el proceso electrostático Dual Polarity ha sido utilizado para deshidratar y desalar el crudo a nivel mundial. Esta tecnología, como se mencionó anteriormente, busca combinar las cualidades y el potencial de efectividad de coalescencia de campos generados por ambos tipos de corriente eléctrica, AC y DC, y a su vez eliminando los aspectos negativos que salen a relucir cuando se aplican individualmente. Estos beneficios fueron probados durante alrededor de 30 años de experiencia en campo con la tecnología Dual Polarity de NATCO.

Sin embargo, como también se indicó anteriormente, observando las ecuaciones de las fuerzas presentes en el proceso de electrocoalescencia (Ver Capítulo 5), las gotas de agua más pequeñas requieren de voltajes mayores para desarrollar una fuerza suficiente para superar la tensión interfacial y promover la coalescencia, pero de ser este voltaje muy alto, las fuerzas electrostáticas pueden exceder las fuerzas interfaciales de las nuevas gotas producto de la coalescencia, resultando en la ruptura de dicha gotas y la posterior dispersión, lo que se traduciría en un problema de emulsificación recurrente.

Teniendo esto en cuenta, no es recomendable operar tratadores electrostáticos con campos eléctricos cercanos al límite inferior (voltaje umbral) o al límite superior (voltaje crítico), puesto que se podría no estar generando la coalescencia suficiente o rompiendo las gotas que ya se lograron coalescer, respectivamente.

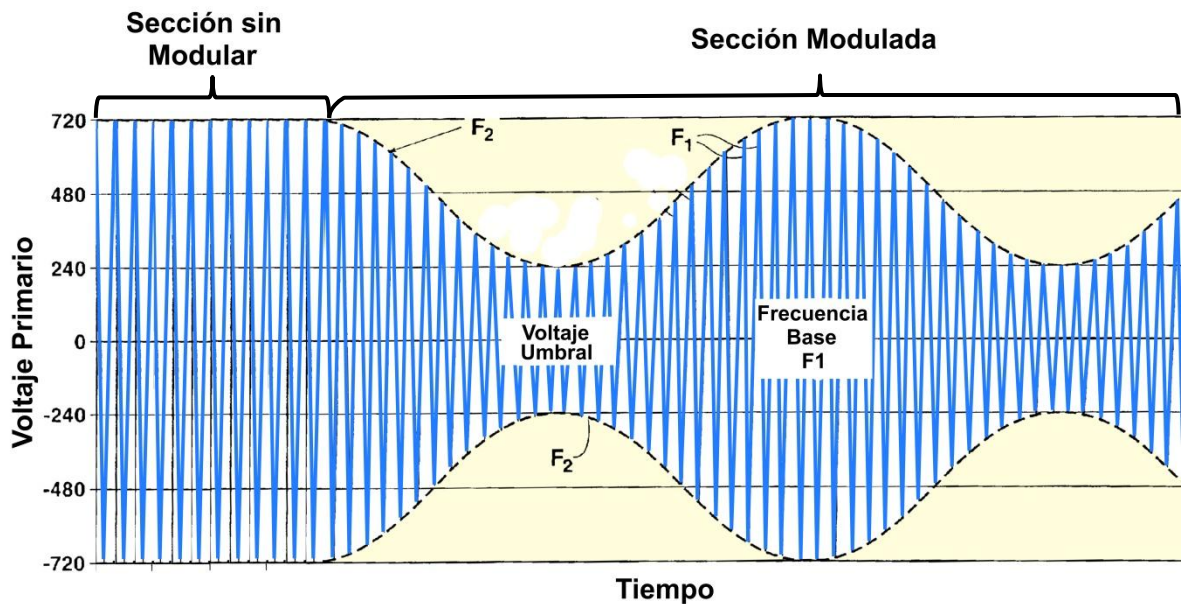
Por ello es necesario generar un campo eléctrico que se encuentre dentro de este rango, pero que a su vez pueda ser modificado en tiempo real, para que el proceso de coalescencia abarque los diferentes tamaños de gota presentes en la emulsión, desde las más grandes y fáciles de coalescer hasta aquellas que por su tamaño tan diminuto requieren de un campo de mayor voltaje, de tal manera que primero se apliquen campos de gran voltaje (menores al voltaje crítico) para coalescer gotas muy pequeñas y luego se vaya reduciendo para que las gotas un poco más grandes generadas por esas pequeñas gotas a su vez experimenten nuevamente un proceso de coalescencia, obteniendo gotas de gran tamaño que faciliten la separación y extracción como como fase libre.

Por todo esto, y otros factores que entorpecían el adecuado funcionamiento de este y otros equipos de tratamiento electrostático, como lo es el incremento de la conductividad del aceite, lo cual ocasiona que el voltaje del electrodo se reduzca hasta quedar por debajo del nivel mínimo o umbral durante una parte significativa del ciclo de voltaje, se pensó en la creación de una nueva tecnología en tratadores electrostáticos que permitiera variar el voltaje del campo eléctrico aplicado dentro de un rango establecido y con una forma de variación determinada acorde con las necesidades impuestas por el tipo de crudo y las propiedades del agua emulsionada en éste.

Como consecuencia de esto surgió en el 2002 la revolucionaria tecnología Dual Frequency de NATCO, la cual solo entro al mercado como ya un producto patentado 3 años después de haber sido creada y de estudiar su potencial y confirmar los grandes beneficios y mejoras prometedoras que proponía en ese momento dicho equipo.

Este proceso electrostático a grandes rasgos consiste en una combinación de tecnologías (como Dual Polarity por ejemplo) y equipos anteriormente desarrollados también por NATCO, con el aditamento de una configuración electrónica que permite la generación de un campo eléctrico con una onda de voltaje variable en el tiempo con forma definida por el usuario a partir de una onda base de gran amplitud (F1) y una onda moduladora caracterizada por ser mucho menor a la onda base (F2) que se encarga de variar en el tiempo la amplitud de onda de voltaje entregada a la emulsión en el tiempo (Ver Figura 111).

Figura 111. Interacción de frecuencia base F1 y frecuencia moduladora F2 para generar una onda de frecuencia dual.



Fuente: Autores.

De ahí que esta tecnología lleve el nombre de Dual Frequency, puesto que en todo momento se maneja una frecuencia de onda dual, es decir, constituida por la interacción de dos ondas de diferentes características.

A su vez, sobre esta misma tecnología, la filial NATCO continuo investigando sobre mejoras que aumentaran aún más la eficiencia del proceso, entregando a la industria en Abril de 2008 una segunda patente denominada Multiple Frequency, que correspondería a una continuación de la patente registrada en 2005 como Dual Frequency, y en la cual muestra posibles optimizaciones sobre la forma de onda que permitan discretizar el uso de la tecnología electrostática Dual Frequency para diversos casos de emulsiones, teniendo en cuenta que factores como la conductividad de las fases, las impurezas, entre otros, son determinantes en el efecto que tenga cada forma de onda sobre el proceso de coalescencia y separación de las emulsiones.

7.2 PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO

Como con la tecnología Dual Polarity, un campo DC es creado entre los electrodos de un coalescedor Dual Frequency, generando un movimiento de las gotas que aumente la coalescencia y la eficiencia del proceso. Simultáneamente, un campo AC es creado entre los electrodos y la conexión a tierra que posee la interfaz agua-aceite, permitiendo una máxima excitación de las gotas, una mayor tasa de contacto entre gotas y por ende un crecimiento del tamaño de gotas que conlleve a una separación más rápida.

Tecnologías electrostáticas tradicionales aplicadas a emulsiones de agua en aceite, generalmente exhiben un rápido decaimiento del voltaje o un arqueo eléctrico. Este decaimiento reduce la eficiencia del proceso de deshidratación puesto que lleva el voltaje a un valor menor que el requerido para una deshidratación efectiva.

El proceso Dual Frequency mejora el rendimiento de un proceso de deshidratación electrostática mediante la creación de un campo eléctrico de alto voltaje que promueve agresivamente el movimiento y coalescencia de las gotas de agua. Operando con una frecuencia incrementada, el controlador del equipo Dual Frequency reduce este decaimiento en el voltaje y activa la deshidratación efectiva. Utilizando una unidad de poder de frecuencia media se supera el problema de caída de voltaje asociada a transformadores convencionales de 50/60 Hz. Este proceso entonces logra acabar con problemas generados por crudos de alta conductividad y baja tensión interfacial.

Los químicos de tratamiento, la temperatura y las propiedades (agua-aceite) específicas del aceite se combinan para crear una emulsión única que a menudo puede ser muy difícil de resolver. Para romper la emulsión, la tecnología Dual Frequency además utiliza un sistema basado en microprocesadores (consiste en un panel de computador y un controlador LRC-II diseñado por NATCO), el cual define el patrón y la magnitud de los voltajes que son aplicados a los electrodos. El controlador LRC-II permite la selección de la forma y la magnitud de la onda de voltaje para obtener el punto óptimo de coalescencia para un crudo conduciendo a una coalescencia de gotas rápida y efectiva.

La tecnología Dual Frequency, así como la EDD mencionada en el capítulo anterior, a su vez se basa en una combinación de tecnologías y patentes previas, involucrando la configuración Dual Polarity para generación de campos AC/DC, el sistema de control de voltaje automatizado LRC (mencionado anteriormente), y la tecnología de electrodos compuestos, y obviamente incluyendo las partes y configuraciones necesarias que le permitan los pasos o etapas esenciales presentes en todo tratador a través del cual se hace circular una emulsión, con el valor agregado de establecer un campo eléctrico de frecuencia dual dentro del electrocoalescedor, variando selectivamente el campo eléctrico en una frecuencia $F1$ modulada en intensidad a una frecuencia $F2$, donde $F1$ es mayor que $F2$.

Sin embargo, a diferencia de todas las tecnologías mencionadas con anterioridad, está es la única existente con la capacidad de entregar simultáneamente altas y bajas frecuencias para abordar el fuerte decaimiento del campo eléctrico que ocurre cuando se tratan crudos altamente conductivos (por encima de 80 nS/m) con técnicas eléctricas convencionales, lo cual podría generar arcos eléctricos que reduzcan la eficiencia del proceso de coalescencia, y para debilitar la interfase de las gotas con mayor facilidad. A su vez, la tecnología Dual Frequency puede fácilmente ser una gran mejora a facilidades instaladas de tecnología Dual Polarity, debido a que no se requieren cambios internos al sistema eléctrico.

Adicionalmente a la mejoras en cuanto al rendimiento del proceso de deshidratación, la tecnología Dual Frequency generalmente provee un mejor desempeño a menores niveles de voltaje que el típico proceso Dual Polarity u otras tecnologías de corriente alterna (AC). Esto reduce la tensión eléctrica impuesta en bujes, cables, diodos, suspensores, etcétera.

7.2.1 Parámetros fundamentales de la tecnología Dual Frequency. Teniendo lo anterior y los procesos esenciales llevados a cabo en ella, se puede establecer seis parámetros fundamentales en los cuales está basada la electrocoalescencia obtenida a través de un tratador electrostático Dual Frequency, de los cuales se destacan los tres primeros:

- Frecuencia base (responsable de atacar la conductividad del crudo).
- Frecuencia modulada (responsable de atacar la tensión interfacial del crudo).
- Forma de onda.
- Factor de deformación de la forma de onda.
- Tensión mínima
- Tensión máxima.

7.2.1.1 Frecuencia base y frecuencia modulada. La tecnología Dual Frequency aumenta la frecuencia base del campo AC obteniendo una frecuencia base elevada de 800 a 1600 Hz aproximadamente (optimizada en la región de kHz para limitar el tiempo para decaimiento de voltaje), la cual experimenta una modulación de su amplitud gracias a la acción de una frecuencia de pulso pequeña sobre el campo DC (0.2 a 2 Hz) adaptada para maximizar la absorción de energía de la fase de gotas dispersas.

La eficiencia de separación entonces aumenta debido a un campo eléctrico promedio más grande que actúa desestabilizando las gotas energizadas cercanas a su frecuencia de resonancia.

La posibilidad de aumentar la frecuencia base, usualmente definida en 60 Hz, permite que el proceso de electrocoalescencia sea optimizado para diferentes crudos, puesto que a medida que la frecuencia base aumenta, las fuerzas electrostáticas aumentan, incrementándose considerablemente la eficiencia de deshidratación.

Esta ampliación de la frecuencia base de onda y la modulación en amplitud de la misma se logra gracias a una serie de equipos con ciertas configuraciones especiales. Inicialmente se tienen tres componentes principales que son empacados en un único recipiente lleno con aceite. El primero es la electrónica del poder diseñada para operar en tres fases, 480 voltios (50/60 Hz) para producir una amplitud variable y un suministro de voltaje de frecuencia variable. Para muchas instalaciones en campo, esto es un factor clave de esta tecnología, puesto que habilita una optimización del perfil de voltaje.

El segundo, un transformador trifásico de frecuencia media que provee el incremento del voltaje secundario conocido por promover coalescencia efectiva. El tercero y último, un rectificador de voltaje que permita que el voltaje polarizado pueda ser aplicado a los electrodos para crear los beneficios tanto de AC como campos DC dentro del tratador.

7.3 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DUAL FREQUENCY

Describiéndolo a grandes rasgos, el equipo fue diseñado para incluir los pasos o etapas esenciales presentes en todo tratador a través del cual se hace circular una emulsión, con el valor agregado de establecer un campo eléctrico de frecuencia dual dentro del electrocoalescedor, variando selectivamente el campo eléctrico en

una frecuencia $F1$ modulada en intensidad a una frecuencia $F2$, donde $F1$ es mayor que $F2$. Este sistema incluye un recipiente que contiene una entrada de emulsión y por lo menos una salida de fluido.

Se colocan una serie de electrodos dentro del recipiente para proveer un área de tratamiento entre éstos a través de la cual debe circular la emulsión a medida que fluye desde la sección de entrada de la emulsión hasta la salida de fluido. Los circuitos conectados a los electrodos proveen un campo eléctrico dentro del área de tratamiento, sirviendo a su vez para variar el campo eléctrico y obtener las mencionadas frecuencias $F1$ y $F2$.

Para una explicación en mayor detalle de la configuración del equipo Dual Frequency, es necesario dividir el tratador o sus componentes en dos grandes grupos, el primero correspondiente a la sección de componentes y accesorios que permiten el suministro y la regulación de la energía eléctrica, incluyendo transformadores, bujes, rectificadores, cableado externo, controladores, etcétera, que como tal no se encuentran dentro del tratador y no influyen directamente en el tratamiento de la emulsión, pero que se constituyen como un servicio auxiliar necesario para el correcto funcionamiento del equipo.

Por otro lado, el segundo gran grupo, se encuentra constituido por ahora sí las piezas, equipos y accesorios internos del tratador que hacen parte del proceso de electrocoalescencia directamente, por lo cual necesitan ser descritos aún con más detalle.

7.3.1 Equipo auxiliar de suministro y control de energía eléctrica.

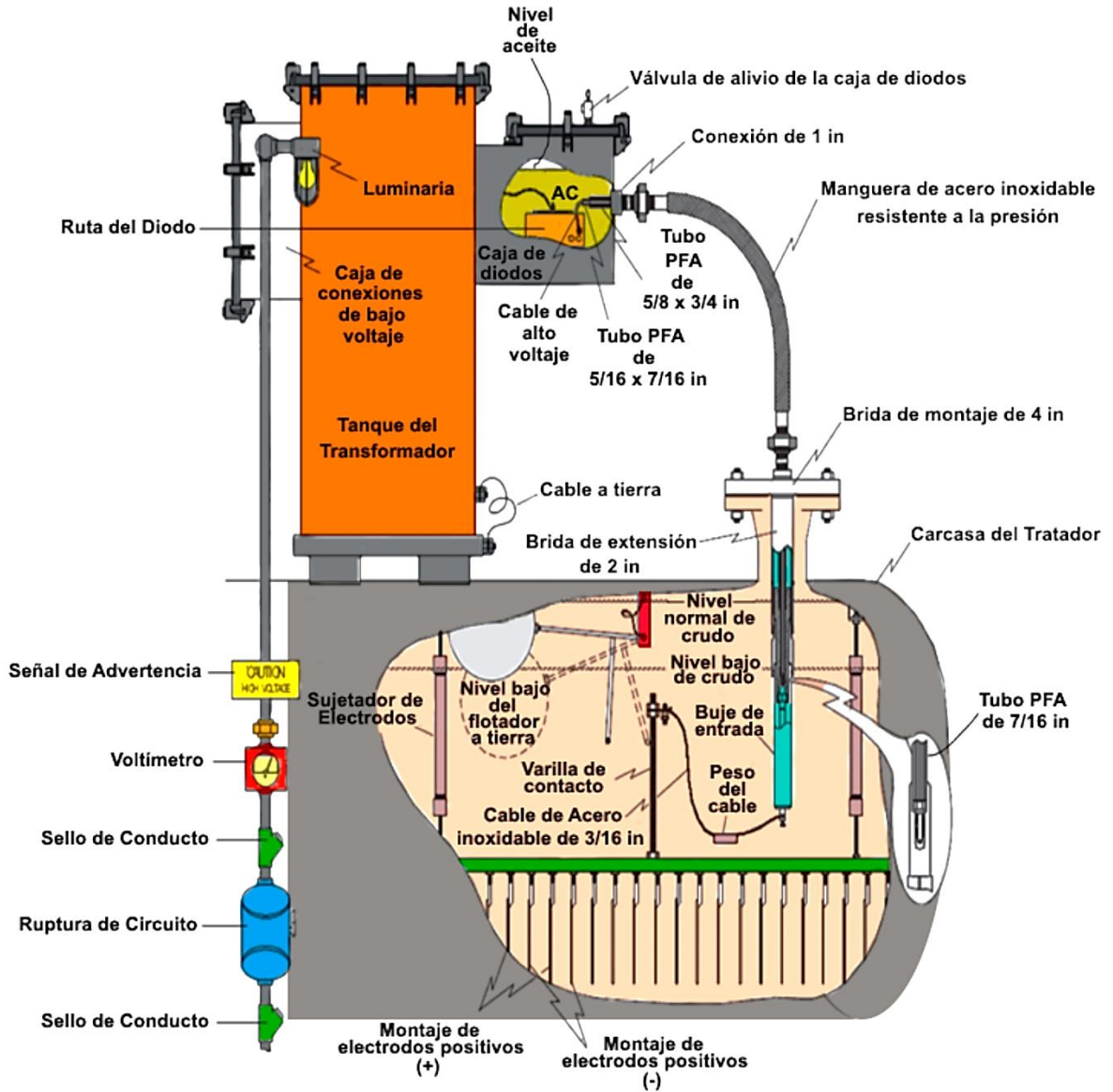
Inicialmente se debe considerar los equipos que permiten la transmisión de energía eléctrica, su debido control, sistemas de seguridad por riesgo eléctrico, equipos rectificadores, moduladores, entre otros. A continuación (Ver Tabla 6) se presenta un listado de los equipos y accesorios del sistema de suministro eléctrico y algunos componentes necesarios para la conexión con el enmallado de electrodos. A su vez estos componentes se encuentran esquematizados en la Figura 112.

Tabla 6. Equipos y accesorios del sistema de suministro eléctrico.

Referencia Producto	Descripción
48126009	EDD 1500 Buje de Entrada (Cuerpo)
48126048	Cable de Alto Voltaje (78 in)
11650065	Tubo PFA de 5/16 x 7/16 (78 in)
11650067	Tubo PFA 5/8 (78 in)
48126051	Buje de Entrada (120 in)
N/A	Tope superior del Buje de Entrada (Orden Especial)
42220000	Transformador de Aceite (20 litros)
42221000	Flex del Buje de Entrada (1 in)
42221006	Cable SS (1/8 in)
42220002	Abrazadera del Cable (1/8 in)
48126010	Pesa del Cable (1/8 in)
48400010	Buje Ciego Grueso de Entrada (3 in x 150 x 2 in)
48400020	Buje Ciego Grueso de Entrada (4 in x 150 x 2 in)

48400022	Enterrosca de Extensión (10 in x 2 in)
48400022	Enterrosca de Extensión (15 in x 2 in)
48400026	Enterrosca de Extensión (19 in x 2 in)
48400028	Enterrosca de Extensión (22 in x 2 in)
42001800	Sujetadores de Tapa NWL del Transformador
48012218	Teflón de Suspensión de 8 pies (estándar)
48012220	Teflón de Suspensión de 6 pies (estándar)
N/A	Suspensión de Alta Resistencia (HTA-15)
N/A	Suspensión de Alta Temperatura (HTA-2000)
N/A	Suspensión Howmar de Varilla Sólida (2 in)
48126035	Aislante TI-23 (Transformador)
N/A	Aislante TI-60 (Transformador)
N/A	Aislante TI-60FT del Alimentador
61321121	Voltímetro 0-100 VAC
N/A	Amperímetro 0-XXX AAC
N/A	Caja del Medidor CI-1 DIV 1
N/A	Luminaria CI-1 DIV 2
N/A	Interruptor del Transformador (Orden Especial)
42001122	Fusible y Portafusibles de 2 Amperios
N/A	Placas Enmalladas de Acero y Equipo Accesorio (Orden Especial)
N/A	Placas Enmalladas de Fibra de Vidrio Compuestas (Orden Especial)
48012200	Puntas Exteriores de Fibra de Vidrio para placas enmalladas de acero
Fuente: NATCO. Centro de Servicios para Partes y Dimensionamiento (www.natcoparts.com)	

Figura 101. Componentes de la malla, del transformador y accesorios.



Fuente: NATCO. Centro de Servicios para Partes y Dimensionamiento (www.natcoparts.com).

Con respecto a los elementos presentes en la Figura 112, debe asegurarse que la porción de aislante blanco del buje de entrada se extienda dentro de la fase oleosa lo suficientemente profundo para mantenerse cubierta cuando las esferas flotantes puestas a tierra estén en su posición más baja (acortada).

Ambos electrodos DC (positivo y negativo) están similarmente conectados a sus polaridades en el paquete de diodo.

7.3.1.1 Controlador sensible a la carga (LRC). Este equipo de control denominado LRC por sus siglas en inglés *Load Responsive Controller* (Controlador Sensible a la Carga), es en general el encargado de regular la cantidad de energía suministrada a los electrodos y por ende a la emulsión de acuerdo con la medición en tiempo real de la relación de descarga de los electrodos, es decir, que tanta energía eléctrica está absorbiendo la emulsión y por ende está cargando las gotas, lo que permite ajustar los niveles energéticos para crudos de distinta conductividad y por eventos inesperados y peligrosos en el sistema, principalmente. A continuación se enlistan las funciones principales de este equipo de control:

- Provee una secuencia de perfil de voltaje programado por el usuario a la malla del transformador para producir una coalescencia o mezclado óptimo y específico para el tratamiento de crudo.
- Monitorea el rendimiento de la malla eléctrica del tratador y protege todos los componentes contra alteraciones o condiciones peligrosas tales como sobrecarga eléctrica.
- Retorna el sistema de enmallado eléctrico a la operación normal inmediatamente después de un suceso inesperado o una corrección de una alteración encontrada.
- Apaga el suministro de energía para cancelar situaciones de arqueamientos de corriente altos.

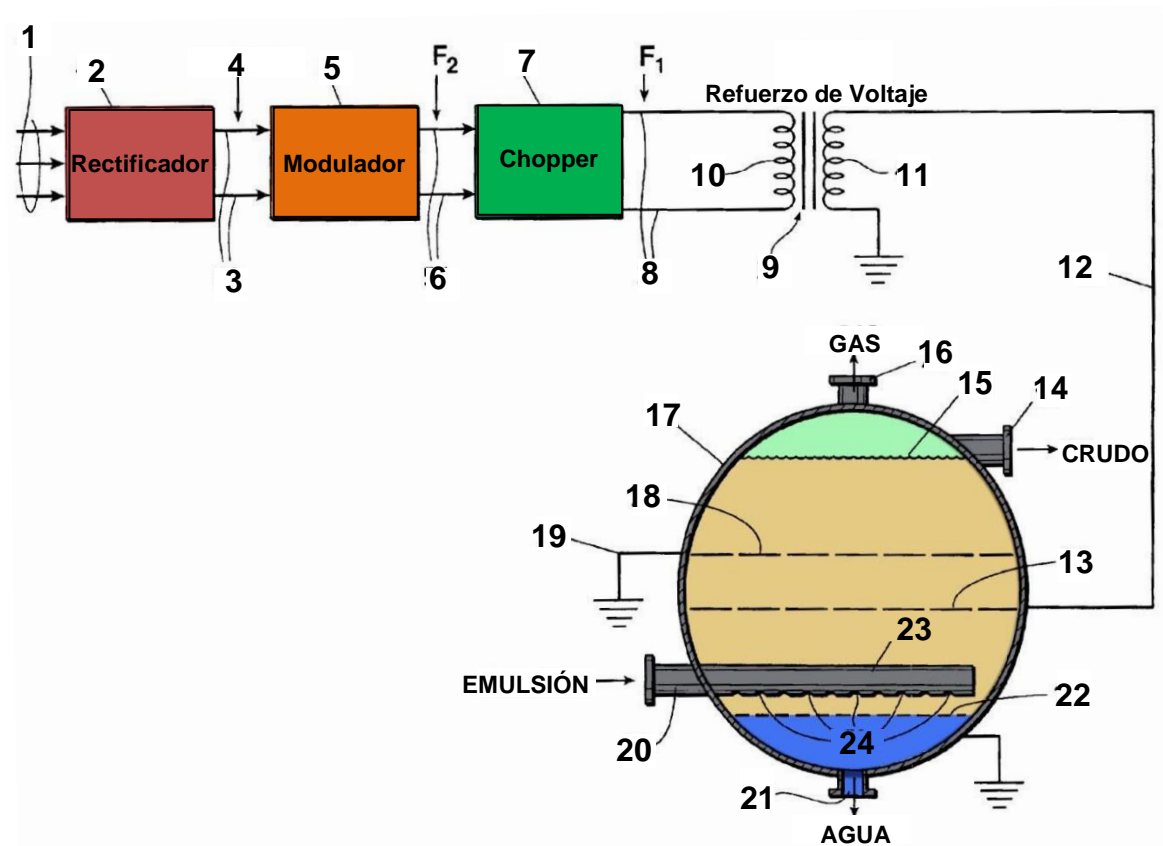
7.3.1.2 Transformador de malla NWL de NATCO. El transformador de malla NWL con funcionamiento a aceite, también fabricado por NATCO, es el empleado para configurar la corriente que viene del sistema de suministro de energía de la zona, para que esté acorde con las necesidades del tratador electrostático. A continuación se enlistan las características principales de este equipo de gran importancia en el proceso de suministro de energía:

- Dimensionamiento del requerimiento de área de la malla eléctrica para ofrecer desde 5 hasta 250 kilo-vatio-amperio (kVA).
- El voltaje primario es de corriente alterna (AC) monofásico y se dispone de las siguientes capacidades: 240, 400, 480 o 600 Voltios AC (VAC).
- El voltaje secundario entregado proviene de cintas de tensión DC con las siguientes capacidades: 12, 16.5, 20, 23 o 25 Kilovoltios (kV DC).
- Equipado con bobinas de núcleo del 35% o 100% de reactancia.
- Posee certificación UL/CSA/EX Clase 1, División 2.
- El transformador está lleno de aceite.
- El voltaje AC es convertido a Alto Voltaje DC mediante rectificación por diodo.

7.3.2 Equipo interno del electrocoalescedor Dual Frequency. Ahora bien, luego de conocer las piezas y equipos que permiten la generación, transmisión y control de la energía eléctrica que se va a transmitir como campo eléctrico a la emulsión a través de los electrodos internos, se prosigue a detallar completamente la sección interna del electrocoalescedor Dual Frequency, analizando parte a parte en cuanto a su función, conexión con las demás piezas, influencia directa en el proceso, entre otras cosas.

Primero se presenta la Figura 113, la cual es un esquema simplificado mostrando un circuito que supe energía eléctrica a electrodos separados y posicionados en un recipiente de tratamiento, con una emulsión fluyendo dentro del tratador. Por lo menos una porción de la emulsión pasa a través del campo eléctrico creado entre los electrodos.

Figura 113. Equipo Dual Frequency simplificado.



Fuente: Autores.

Teniendo en cuenta la Figura 113, la numeración de los componentes presentes en ella, y la descripción de los mismos mostrada a continuación (Ver Tabla 7), se puede realizar una descripción del funcionamiento del equipo pieza por pieza.

Tabla 7. Descripción de componentes enumerados en Figura 113.

#	Descripción
1	Entrada de Voltaje Trifásico
2	Rectificador
3	Bus de Voltaje
4	Bus DC
5	Modulador
6	Cables de Conducción
7	Chopper
8	Flex del Buje de Entrada (1 in)
9	Transformador
10	Embobinado Primario
11	Embobinado Secundario
12	Cable Conductor (Sistema Eléctrico – Electrodo)
13	Electrodo Conectado a Sistema Eléctrico
14	Conducto de Descarga de Componente Liviano de la Emulsión
15	Nivel de Crudo (Interface Crudo-Gas)
16	Conducto de Salida de Gas
17	Tratador Electrostático
18	Electrodo Conectado a Tierra
19	Cable Conductor (Electrodo – Tierra)
20	Conducto de Entrada de Emulsión
21	Conducto de Descarga de Componente Pesado de la Emulsión

22	Interface Agua-Aceite
23	Tubos de Distribución
24	Distribuidores
Fuente: SAMS, Gary W – NATCO ¹¹⁴ .	

Inicialmente se muestra a simple vista en forma de círculo como vista seccionada transversal el correspondiente tratador electrostático con un conducto de entrada para la emulsión, un conducto de descarga para el componente pesado de la emulsión en la sección inferior, y un conducto de descarga para el componente liviano de la emulsión en la sección superior. En este caso no se definen los conductos de descarga inmediatamente para agua y crudo tratado, puesto que originalmente el equipo se diseñó para considerar componente liviano al crudo y pesado al agua, tal y como lo muestra la Figura 113, pero en el caso de estar tratando crudo pesado y extrapesado, el funcionamiento del equipo es igual en cuanto a efecto del campo eléctrico de frecuencia dual, solo que se invierten los caminos de salida para el agua y el crudo debido a la diferencia de gravedades.

Cuando se separan las fases debido al efecto del tratamiento electrostático, se logra definir una clara interfase agua-aceite representada también en la Figura 113. El aceite se separa del agua formando dicha interfase, y en dado caso que este sea liviano se formará inmediatamente encima una cámara de gas hidrocarburo liberado en el proceso, el cual saldrá por un conducto de salida de gas en el tope del tratador.

¹¹⁴ SAMS, Gary W. Dual frequency electrostatic coalescence. Patente No. US 6,860,979 B2. Compañía asignada: National Tank Company (NATCO). Estados Unidos, 2002.

Sin embargo, de estar tratándose un crudo de tipo pesado o extrapesado, en caso de liberar gas, este aumentará aún más la eficiencia del proceso de deshidratación al remover más gotas de agua del aceite gracias al efecto de arrastre de las burbujas de gas y el efecto gravitacional que estaría experimentando el aceite.

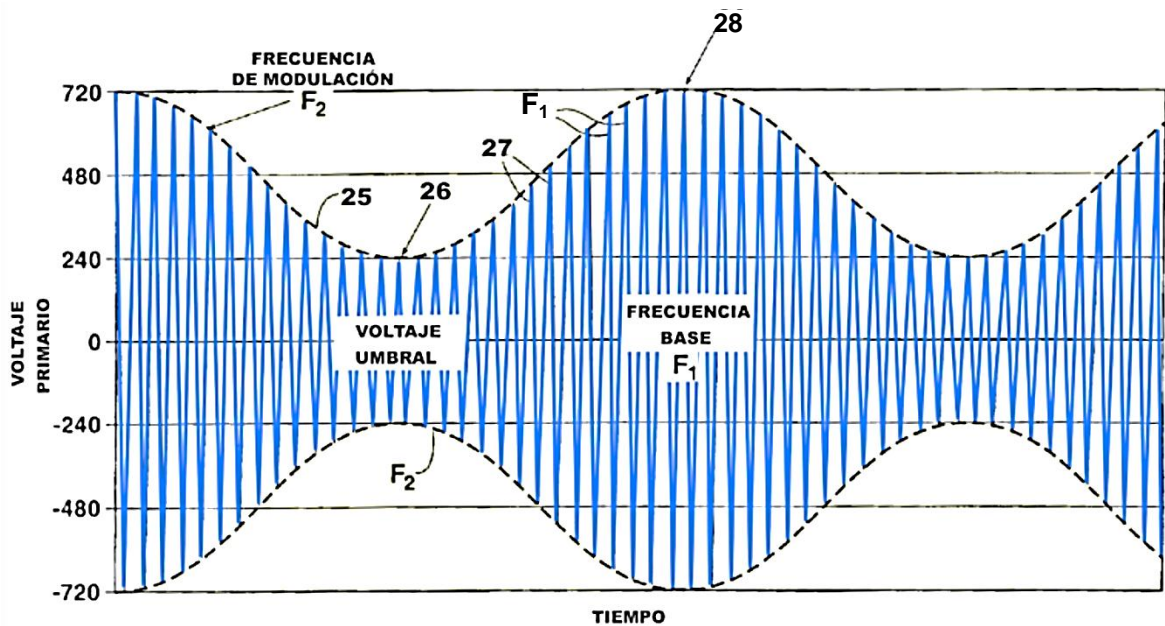
Retomando la sección de entrada de la emulsión, el conducto por el cual ingresa dicha emulsión está conectado a uno o más tubos de distribución los cuales poseen unas aberturas de pequeño diámetro que permiten el ingreso de la emulsión al tratador, denominadas distribuidores, entregando un flujo tipo rocío a la entrada a la sección de coalescencia. El tubo de distribución es representativo para varios tipos de sistema de entrada de fluido que buscan minimizar la turbulencia generada.

Ya dentro del tratador electrostático, se encuentran posicionados un primer electrodo conectado a un cable conductor que le transmite energía proveniente del transformador, es decir, del sistema eléctrico, y un segundo electrodo separado de este por una distancia definida, el cual se encuentra conectado a tierra a través de otro cable conductor. Ambos electrodos se deben posicionar por encima de la interfase agua-aceite, y estar los suficientemente separados para establecer un camino entre ellos por donde circule la emulsión al intentar salir por la sección superior, entregándole el campo eléctrico que se desea aplicar.

Debido a que generalmente el tratador se encuentra puenteado a tierra para evitar cortos, el electrodo inferior (el cual debe estar puesto a tierra) puede conectarse directamente a la sección inferior del tratador, eliminando la necesidad del cable conductor a tierra.

Antes de continuar describiendo los elementos de la Figura 113 que controlan la forma de onda de la energía eléctrica aplicada al embobinado primario del transformador, se debe hacer una referencia a la Figura 114, la cual es un patrón de forma de onda representativo del potencial eléctrico aplicado a los electrodos en un electrocoalescedor. Este gráfico muestra el patrón de voltaje aplicado a la fase primaria del transformador para crear un campo eléctrico que posee una forma de onda base con una frecuencia F_1 modulada en intensidad a una frecuencia F_2 .

Figura 114. Patrón de onda senoidal del potencial eléctrico aplicado a los electrodos.



Fuente: Autores.

En esta Figura (Ver Figura 114), analizándola en detalle, se puede decir que lo que se está representando es un gráfico de Voltaje Primario vs Tiempo, estando el voltaje primario en el eje de las abscisas, y el tiempo en el eje de la ordenadas, indicando como la amplitud o intensidad de la frecuencia base varía con el tiempo.

Para mejor comprensión se presenta una descripción de los componentes numerados (Ver Tabla 8):

Tabla 8. Descripción de componentes enumerados en Figura 114.

#	Descripción
25	Amplitud de Modulación de la Onda Base
26	Voltaje Umbral o Voltaje Mínimo
27	Frecuencia Base de Onda
28	Voltaje Crítico o Voltaje Máximo
Fuente: SAMS, Gary W – NATCO ¹¹⁵ .	

La forma de onda del voltaje consta de una frecuencia base F1 que es aplicada al embobinado primario del transformador, observada en la Figura 114 bajo la numeración 27, cuya amplitud o intensidad es modulada a una frecuencia F2, como se mencionó con anterioridad, en este caso bajo la forma de una onda senoidal. La amplitud de la modulación de la onda base, es decir, la frecuencia de la forma de onda modulada F2 se representa bajo la numeración 25.

Cabe resaltar que los niveles representados en la Figura 114 como 26 y 28, deben de ser cuidadosamente manejados, puesto que están directamente relacionados con el voltaje umbral y el voltaje crítico de la emulsión, respectivamente, de tal forma que deben estar contenidos dentro del rango definido por dichas limitantes.

¹¹⁵ SAMS, Gary W. Dual frequency electrostatic coalescence. Patente No. US 6,860,979 B2. Compañía asignada: National Tank Company (NATCO). Estados Unidos, 2002.

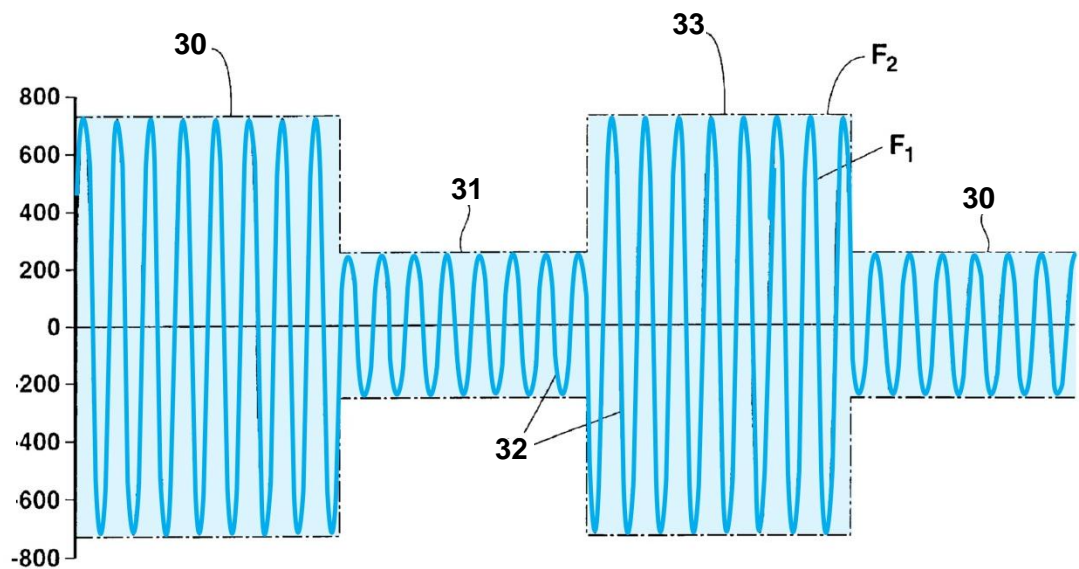
Entonces debe entenderse de ahora en adelante la frecuencia base F_1 como la frecuencia mínima requerida para prevenir la descarga completa de las gotas de agua dispersas, siendo esta frecuencia principalmente influenciada por la conductividad del aceite. La habilidad de incrementar la frecuencia base F_1 (por encima de 60 Hz) permite que el proceso de coalescencia electrostática sea optimizado para un amplio rango de crudos.

A su vez, la frecuencia de modulación F_2 debe ser entendida entonces como la frecuencia natural de la gota de agua más grande que se formará con el mínimo voltaje, de tal forma que ninguna gota formada a partir de procesos electrocoalescentes se posteriormente desintegra por la frecuencia base sin modular. A pesar de que esta frecuencia pueda ser calculada por diámetro de gota, tensión interfacial y masa de gota, en la práctica lo mejor es que sea determinada experimentalmente, debido a la variación de las eficiencias hidráulicas de los diferentes recipientes utilizados en los procesos de tratamiento.

Otra anotación válida para tener en cuenta es que los límites de voltaje impuestos por el voltaje umbral y el voltaje crítico de la emulsión en la práctica no son estrictamente tenidos en cuenta a la hora de seleccionar las dos frecuencias F_1 y F_2 , puesto que se recomienda, para máxima efectividad sin riesgos de entorpecer el proceso de coalescencia, utilizar intensidades de voltaje referenciadas a F_1 y F_2 que estén ligeramente por encima del voltaje crítico y ligeramente por debajo del voltaje umbral, respectivamente, y por cortos períodos de tiempo, todo esto teniendo consideración sobre todas las variables que influyen directamente el efecto de la intensidad de la onda, como por ejemplo la conductividad del aceite para la onda base y la tensión interfacial para la onda modulada.

La frecuencia de onda modulada F_2 puede estar en forma de onda senoidal como se observó en la Figura 114, pero también puede estar en otras muchas formas que se detallarán más adelante, una de ellas por ejemplo, la forma cuadrada representada en la Figura 115 mostrada a continuación, y la respectiva descripción de sus componentes enumerados (Ver Tabla 9):

Figura 115. Patrón de onda cuadrada del potencial eléctrico aplicado a los electrodos.



Fuente: Autores.

No solo la forma de la frecuencia moduladora F_2 puede ser modificada, sino también, en algunas formas de onda, la inclinación de la onda puede variar. Por ejemplo una onda de forma triangular puede ser simétrica, cambiando en ascenso y descenso a la misma velocidad, o podría también ser asimétrica, de tal forma que pueda ascender rápidamente y descender lentamente, o viceversa, otorgando con cada variación ventajas únicas al proceso. Estas variaciones de ondas en simetría también serán explicadas con mayor detalle más adelante.

Tabla 9. Descripción de componentes enumerados en Figura 115.

#	Descripción
30	Amplitud de Modulación de la Onda Base
31	Voltaje Umbral o Voltaje Mínimo
32	Frecuencia Base de Onda
33	Voltaje Crítico o Voltaje Máximo
Fuente: SAMS, Gary W – NATCO ¹¹⁶ .	

Retomando la Figura 113, la señal del tipo de onda ilustrada en la Figura 114 puede ser creada utilizando una entrada de voltaje trifásico que alimente un rectificador para producir un voltaje DC que se transmita a través del Bus DC¹¹⁷. Un modulador convierte luego el voltaje DC a una señal de modulación del tipo F2 observado en la Figura 114, la cual alimenta los cables conductores.

Posteriormente un circuito chopper eleva la señal de voltaje F2 a una frecuencia base mayor F1, también observada en la Figura 114. La señal base de voltaje F1 modulada en intensidad por la señal F2 es luego enviada a través de los cables conductores al embobinado primario del transformador.

¹¹⁶ SAMS, Gary W. Dual frequency electrostatic coalescence. Patente No. US 6,860,979 B2. Compañía asignada: National Tank Company (NATCO). Estados Unidos, 2002.

¹¹⁷ En el área de distribución de poder eléctrico, un bus-bar (también denominado simplemente bus) es una tira o barra de cobre, latón o aluminio que conduce la electricidad dentro de una placa de interruptores, una placa de distribución, una subestación, un banco de batería u otro aparato eléctrico. Su función principal es conducir la electricidad, pero no funcionar como un miembro estructural. El tamaño transversal del bus determina la cantidad máxima de corriente que puede ser transportada de manera segura.

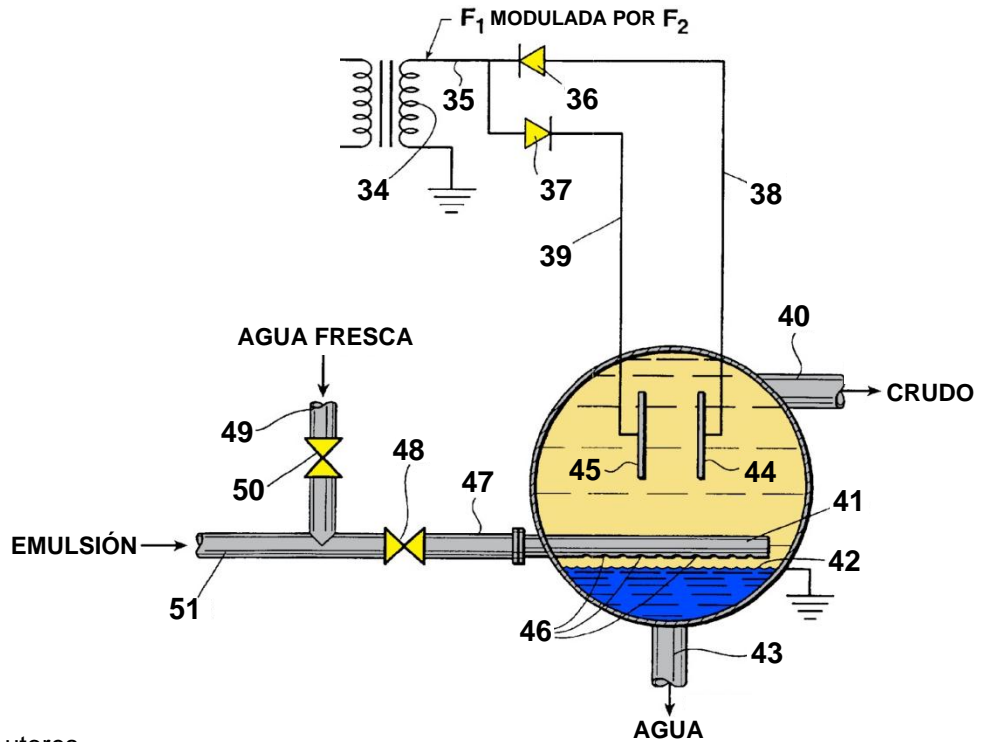
La forma de onda de frecuencia dual que aparece en el embobinado secundario del transformador de alto voltaje puede ser creada de diferentes maneras. La porción del circuito de la Figura 113, como se describió anteriormente, es un sistema en el cual una modulación de la forma de onda F2 es primero creada y luego incrementada para producir una forma de frecuencia base mucho mayor F1.

Alternativamente, un sistema de circuitos similar a un radio transmisor AM puede ser empleado, en el cual la frecuencia base F1 es primero creada y luego modulada en intensidad por una señal F2. El sistema de circuitos eléctricos particular utilizado para proveer la señal de frecuencia dual de alto voltaje fue descrito ya anteriormente en la sección de equipos auxiliares para el suministro de energía eléctrica.

Ahora bien, en la Figura 116 se ejemplifica un tratador alterado con respecto al concepto básico del equipo Dual Frequency, en el cual un diodo se encuentra en serie con cada electrodo en el tratador de tal manera que la forma de onda de voltaje, con respecto a la conectada a tierra, es un ciclo de media onda con un electrodo teniendo un ciclo positivo de media onda y a su vez otro electrodo un ciclo negativo de media onda.

Además, la Figura 116 muestra la adaptación del equipo básico para utilizarlo en procesos de desalación (en vez de deshidratación únicamente), en el cual se inyecta agua fresca al sistema para utilizarla como portadora y fluido de extracción del exceso de sal contenido en la emulsión, mientras al mismo tiempo la característica electrocoalescente del sistema reduce la cantidad de agua contenida en el crudo que circula dentro del equipo. También se relacionan a continuación los elementos presentes en dicho equipo (Ver Tabla 10):

Figura 116. Desalador Dual Frequency conectado con diodo en serie.



Fuente: Autores.

Tabla 10. Descripción de componentes enumerados en Figura 116.

#	Descripción
34	Embobinado Secundario
35	Cable Conductor (Embobinado Secundario – Rectificadores Paralelos)
36	Primer Rectificador en Paralelo
37	Segundo Rectificador en Paralelo
38	Cable Conductor (Primer Rectificador – Primer Electrodo)
39	Cable Conductor (Segundo Rectificador – Segundo Electrodo)
40	Conducto de Descarga de Componente Liviano de la Emulsión

41	Tubos de Distribución
42	Interface Agua-Aceite
43	Conducto de Descarga de Componente Pesado de la Emulsión
44	Primer Electrodo
45	Segundo Electrodo
46	Distribuidores
47	Conducto de Entrada de la Mezcla al Tratador
48	Válvula de Control de Mezcla entrando al Tratador
49	Conducto de Entrada de Agua de Dilución (Agua Fresca)
50	Válvula de Control de Agua
51	Conducto de Entrada de Emulsión
Fuente: SAMS, Gary W – NATCO ¹¹⁸ .	

Agua fresca es adicionada a través de un conducto de entrada que conecta con la entrada de la emulsión, para que estas dos corrientes se mezclen antes de ingresar al tratador, permitiendo que el agua fresca o de dilución absorba las sales de la emulsión y las arrastre consigo al separarse del crudo. Tanto la cantidad de agua adicionada a la emulsión como la cantidad de mezcla de agua y emulsión entrando al tanque, son reguladas por válvulas de control. Además, la válvula de entrada genera una caída de presión de 5 a 15 psi que permite un mejor mezclado.

¹¹⁸ SAMS, Gary W. Dual frequency electrostatic coalescence. Patente No. US 6,860,979 B2. Compañía asignada: National Tank Company (NATCO). Estados Unidos, 2002.

Al igual que en el electrocoalescedor Dual Frequency sin arreglos especiales observado en la Figura 113, en esta modificación (Ver Figura 116) se muestra a simple vista en forma de círculo como vista seccionada transversal el correspondiente tratador electrostático con un conducto de entrada para la emulsión, un conducto de descarga para el componente pesado de la emulsión en la sección inferior, y un conducto de descarga para el componente liviano de la emulsión en la sección superior. También aplica en este caso, la aclaración realizada anteriormente en cuanto a la definición de las corrientes pesada y liviana de salida de acuerdo con la gravedad del crudo de entrada del cual se compone la emulsión.

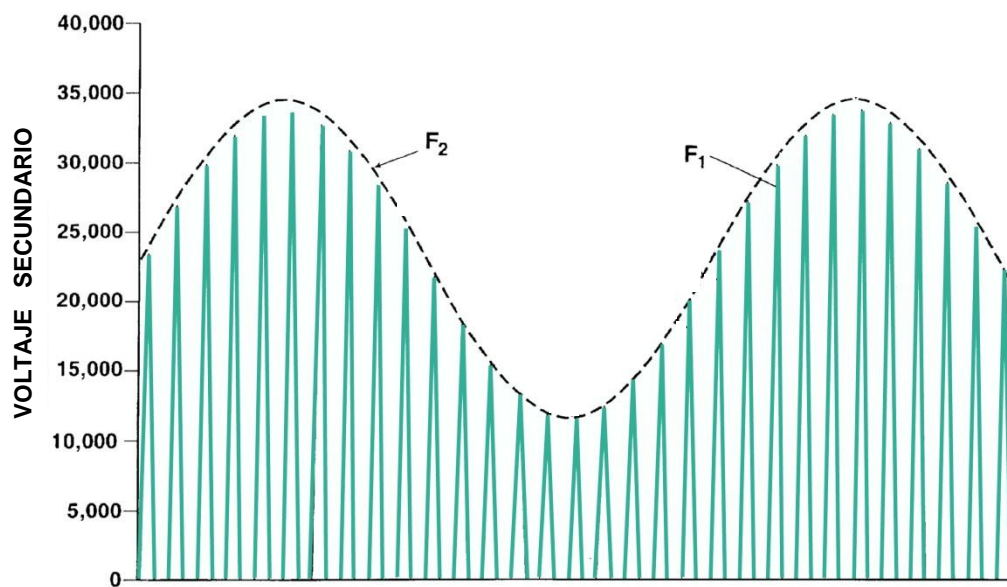
En este equipo modificado también se puede observar claramente la interfase agua-aceite dentro del tratador, y de cómo los electrodos deben ser ubicados siempre por encima de dicha fase. También se puede apreciar en la Figura 116 un sistema de distribución equivalente al utilizado en el equipo Dual Frequency de la Figura 113, que incluye tubos de distribución y pequeños orificios distribuidores separados unos de otros.

Ya dentro del tratador electrostático, y enfocados en la configuración de las partes encargadas de la transmisión eléctrica y de la generación del campo eléctrico, el equipo presentando en la Figura 116 empieza a diferir de la configuración general mostrada en la Figura 113, puesto que los electrodos, denominados primer y segundo electrodo para entender mejor como están conectados al sistema de suministro de energía, están orientados verticalmente y no de manera horizontal como se mostraba anteriormente.

La salida del embobinado secundario del transformador alimenta a un primer rectificador y a un segundo rectificador a través de cables conductores, ambos colocados en paralelo uno a otro, y denominados de esta manera puesto que cumplen funciones similares pero no exactamente iguales debido a su ubicación siguiendo la línea de circulación de la corriente eléctrica. Luego un cable conductor conecta en serie el primer rectificador con el primer electrodo, y otro cable conductor conecta en serie el segundo rectificador con el segundo electrodo.

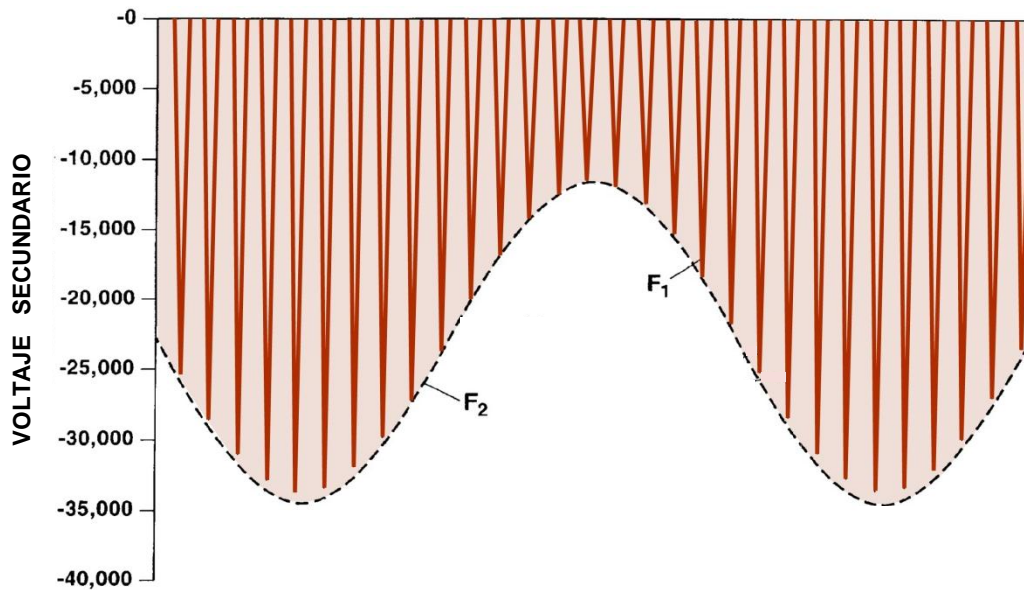
La señal de voltaje aplicada a cada electrodo es entonces una señal rectificadora de media onda, obteniendo cada electrodo una señal igual en intensidad y frecuencia pero de polaridad invertida y solo de media onda, para que ambas señales constituyan la onda de campo eléctrico completa. A continuación se muestran las señales de onda obtenidas en cada electrodo (Ver Figura 117 para el primer electrodo y Figura 118 para el segundo electrodo):

Figura 117. Señal de media onda positiva obtenida en el primer electrodo.



Fuente: Autores.

Figura 118. Señal de media onda negativa obtenida en el segundo electrodo.

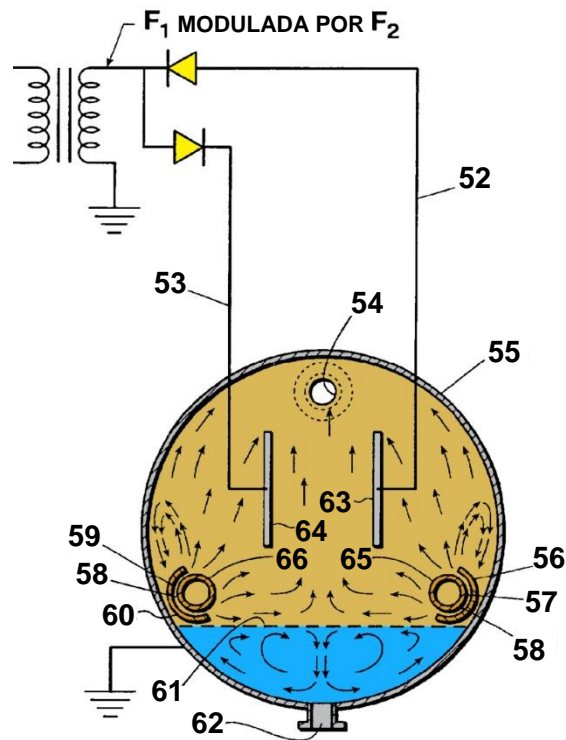


Fuente: Autores.

Adicionalmente, uno de los soportes del embobinado secundario del transformador está puentado a tierra así como generalmente también lo está el tratador, de tal forma que el campo electrostático establecido dentro del tratador no sólo existe entre los electrodos opuestos sino también entre los electrodos y las paredes del tratador.

Tanto el electrocoalescedor Dual Frequency visualizado en la Figura 113 como el presentado anteriormente en la Figura 116, pueden ser modificados en la sección de conductos de entrada y distribución de la emulsión para mejorar la eficiencia del proceso. A continuación se presenta un ejemplo de una modificación para optimizar hidráulicamente el equipo y mejorar la eficiencia del proceso (Ver Figura 119), y las respectivas descripciones de los componentes presentados (Ver Tabla 11):

Figura 119. Deshidratador Dual Frequency con diverter de entrada para optimización hidráulica.



Fuente: Autores.

Tabla 11. Descripción de componentes enumerados en Figura 119.

#	Descripción
52	Cable Conductor (Primer Rectificador – Primer Electrodo)
53	Cable Conductor (Segundo Rectificador – Segundo Electrodo)
54	Conducto de Descarga de Componente Liviano de la Emulsión
55	Tratador Optimizado Hidráulicamente
56	Atenuador de Momentum del Primer Tubo de Distribución
57	Espacio Semi-Anular entre Primer Tubo de Distribución y Atenuador
58	Distribuidores (Orificios de pequeño diámetro separados)

59	Espacio Semi-Anular entre Segundo Tubo de Distribución y Atenuador
60	Atenuador de Momentum del Segundo Tubo de Distribución
61	Interface Agua-Aceite
62	Conducto de Descarga de Componente Pesado de la Emulsión
63	Primer Electrodo
64	Segundo Electrodo
65	Primer Tubo de Distribución en Paralelo
66	Segundo Tubo de Distribución en Paralelo
Fuente: SAMS, Gary W – NATCO ¹¹⁹ .	

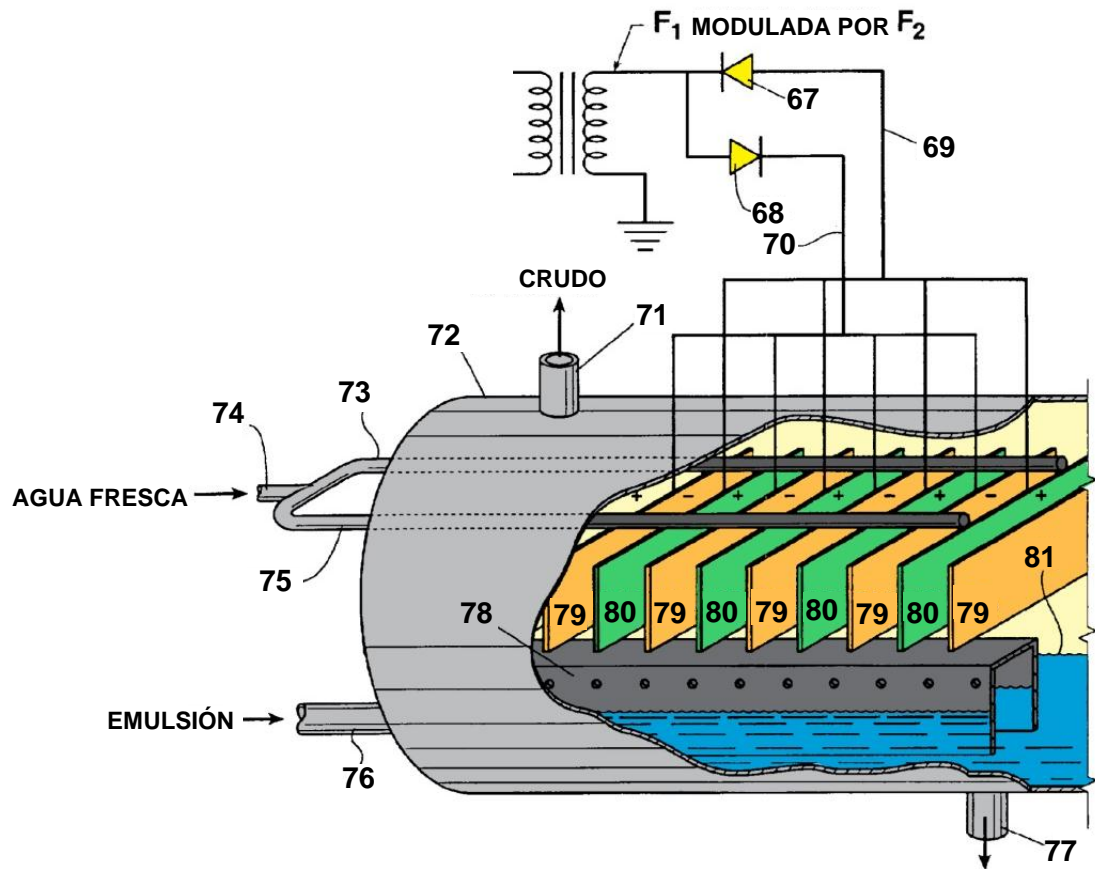
La Figura 119 ilustra un arreglo empleando el mismo circuito de la Figura 116, pero en el cual el tratador tiene equipado un sistema especial para el ingreso de la emulsión, que consiste en dos conductos de distribución paralelos uno al otro dentro del electrocoalescedor, los cuales posee gran cantidad de aberturas de pequeño diámetro espaciadas entre sí a través de las cuales se descarga la emulsión en pequeñas corrientes.

El flujo de líquido a través de aberturas de pequeño diámetro normalmente produce un efecto tipo jet y por ende un flujo saliente turbulento que tiende a reducir la eficiencia del proceso de separación gravitacional de las gotas de agua coalescidas de la emulsión.

¹¹⁹ SAMS, Gary W. Dual frequency electrostatic coalescence. Patente No. US 6,860,979 B2. Compañía asignada: National Tank Company (NATCO). Estados Unidos, 2002.

Sin embargo, adicionalmente a estos distribuidores ubicados en paralelo, adyacentes a cada uno se encuentran equipados dos atenuadores de momentum, también llamados baffle o diverter, configurado de tal manera que intercepte las pequeñas corrientes de fluido, y conformen junto con los tubos de distribución espacios semi-anulares que permitan la mitigación del efecto jet generado a la salida de los orificios disipando la energía cinética del fluido. Esto aumenta la eficiencia del proceso, puesto que la separación de gotas coalescidas de una emulsión en últimas depende de la acción de la gravedad, y la turbulencia es un factor contraproducente para dicha separación gravitacional.

Figura 120. Desalador Dual Frequency de múltiples electrodos de placa verticales paralelos.



Fuente: Autores.

La Figura 120 con sus componentes respectivos (Ver Tabla 12), es una estructura más elaborada de la tecnología Dual Frequency para cuando se requieren sistema de alta remoción de agua como en el caso de procesos de desalación implementando una configuración similar a la mostrada en la Figura 116.

Tabla 12. Descripción de componentes enumerados en Figura 120.

#	Descripción
67	Rectificador Primario con Carga Positiva
68	Rectificador Secundario con Carga Negativa
69	Cable Conductor (Primer Rectificador – Primer Electrodo)
70	Cable Conductor (Segundo Rectificador – Segundo Electrodo)
71	Conducto de Descarga de Componente Liviano de la Emulsión
72	Desalador Dual Frequency de múltiples electrodos de placa
73	Ramal de distribución izquierdo de Agua de Dilución (Agua Fresca)
74	Conducto de Entrada de Agua de Dilución (Agua Fresca)
75	Ramal de distribución derecho de Agua de Dilución (Agua Fresca)
76	Conducto de Entrada de Emulsión
77	Conducto de Descarga de Componente Pesado de la Emulsión
78	Tubo de Distribución
79	Electrodos de Placa Negativos
80	Electrodos de Placa Positivos
81	Interface Agua-Aceite
Fuente: SAMS, Gary W – NATCO ¹²⁰ .	

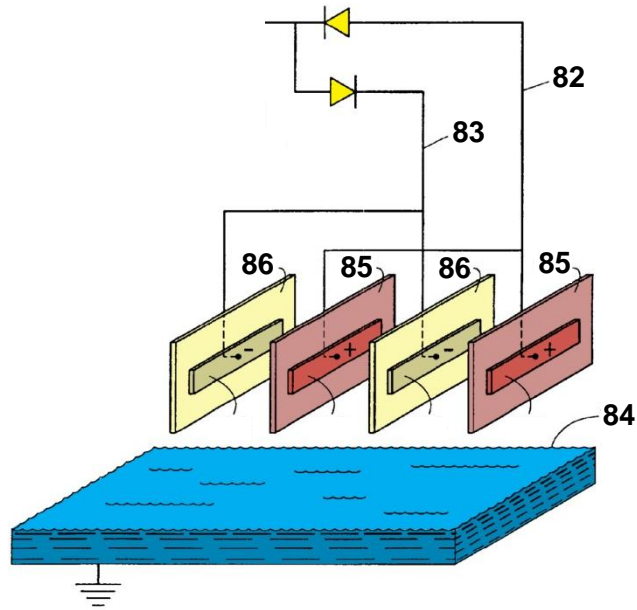
¹²⁰ SAMS, Gary W. Dual frequency electrostatic coalescence. Patente No. US 6,860,979 B2. Compañía asignada: National Tank Company (NATCO). Estados Unidos, 2002.

En este arreglo se posicionan verticalmente varios electrodos de placas paralelas espaciados entre sí, los cuales proveen espacios en los que se generan campos electrostáticos por la aplicación del voltaje con una forma de onda de frecuencia base F_1 modulada en intensidad a una frecuencia F_2 . Las placas enumeradas en la Figura 120 como 79 corresponden a los electrodos que son alimentados a partir del cable conductor que conecta en serie con el rectificador secundario de tal forma que estos electrodos poseen carga negativa. A su vez, las placas enumeradas en la Figura 120 como 80 corresponden entonces a los electrodos conectados al rectificador primario que les otorga carga positiva.

La entrada de emulsión está conectada a un esparcidor o distribuidor similar al empleado en equipos Dual Frequency anteriormente descritos, ubicándose entre los electrodos y la interfase agua-aceite, permitiendo que la emulsión migre hacia la sección superior mientras fluye entre los pares de electrodos. El agua fresca es suministrada a través de un conducto que se divide en dos ramales con pequeños orificios, rociando el agua por encima de los electrodos de tal forma que el campo eléctrico suministrado no solo sirva para coalescer las gotas de agua en la emulsión, sino también para ayudar en el proceso de mezclado a contra corriente del agua.

Ahora bien, para mejorar aún más el proceso se emplea un tipo especial de electrodo en las configuraciones anteriormente descritas que permitan otorgar efectos únicos sobre el campo eléctrico suministrado a la emulsión. Estos electrodos pueden observarse en las Figuras 121 y 122. De igual manera, sus componentes se encuentran descritos en las Tablas 13 y 14, respectivamente.

Figura 121. Aplicación de electrodos compuestos a tecnología Dual Frequency.



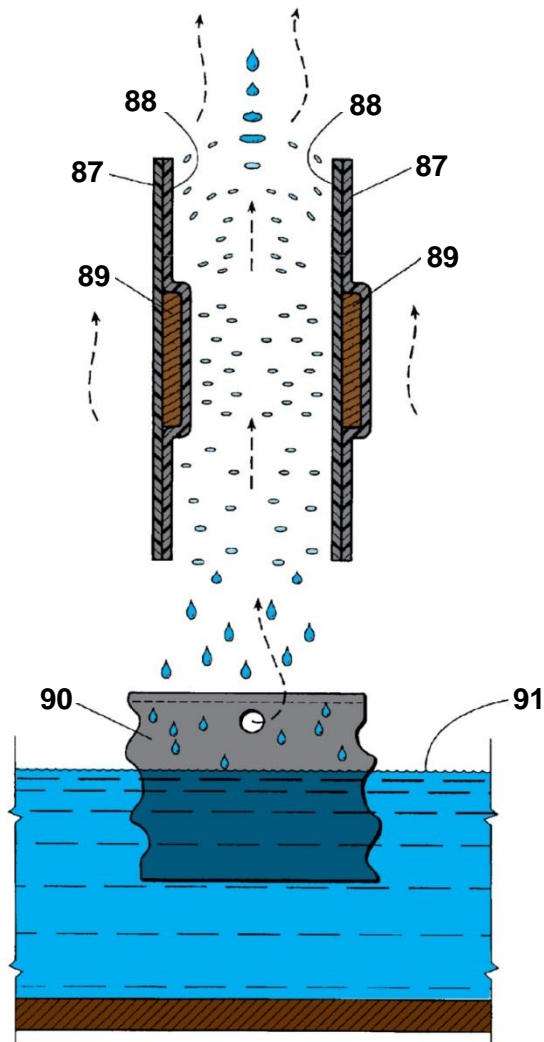
Fuente: Autores.

Tabla 13. Descripción de componentes enumerados en Figura 121.

#	Descripción
82	Cable Conductor (Rectificador Primario – Electrodos Positivos)
83	Cable Conductor (Rectificador Secundario – Electrodos Negativos)
84	Interface Agua-Aceite
85	Electrodos Compuestos cargados Positivamente
86	Electrodos Compuestos cargados Negativamente
Fuente: SAMS, Gary W – NATCO ¹²¹ .	

¹²¹ SAMS, Gary W. Dual frequency electrostatic coalescence. Patente No. US 6,860,979 B2. Compañía asignada: National Tank Company (NATCO). Estados Unidos, 2002.

Figura 122. Efecto de flujo a través de regiones de conductividad y no conductividad impuestas por pares de electrodos compuestos.



Fuente: Autores.

Tabla 14. Descripción de componentes enumerados en Figura 122.

#	Descripción
87	Recubrimiento con Aislante Eléctrico de la Sección Trasera de la Placa
88	Electrodo de Placa Compuesta (Sección no Conductiva)
89	Electrodo de Placa Compuesta (Sección Central Conductiva)

90	Distribuidor
91	Interface Agua-Aceite
Fuente: SAMS, Gary W – NATCO ¹²² .	

La Figura 121 es una visión en perspectiva de dos pares de electrodos compuestos espaciados entre sí que forman pasajes o caminos a través de los cuales circula la emulsión. El tratador como tal no está siendo ilustrado en su totalidad, puesto que el interés radica en la relación entre los electrodos y la capa de agua (la cual inicia en la interfase agua-aceite) que reposa en la sección inferior del tratador, capa la cual forma una conexión conductiva a tierra.

Los electrodos compuestos, como se observó en el capítulo anterior (Ver Capítulo 6) poseen un componente plano sustancialmente no conductor de electricidad, y un segundo componente plano más pequeño que el anterior, sustancialmente capaz de conducir la electricidad, laminado al primer componente, entregando en conjunto a la emulsión una región eléctricamente conductiva rodeada por una región eléctricamente no conductiva.

La Figura 122 es una vista transversal diagramática fragmentada y ampliada de la estructura del electrodo de la Figura 121, permitiendo observar dos electrodos compuestos adyacentes, cada uno formado por una porción conductiva y otra no conductiva, como se mencionó anteriormente, los cuales forman un pasaje a través del cual fluye la emulsión.

¹²² SAMS, Gary W. Dual frequency electrostatic coalescence. Patente No. US 6,860,979 B2. Compañía asignada: National Tank Company (NATCO). Estados Unidos, 2002.

En esta figura se puede apreciar el efecto del campo eléctrico, de la variación del voltaje, y de la implementación de electrodos compuestos, los cuales no solo evitan formación de arcos eléctricos, sino también en este caso permiten transmitir el campo eléctrico por zonas de intensidad, concentrándose la mayor cantidad de energía en el centro de éstos. A su vez, este sistema puede implementarse en los equipos configurados para procesos de desalación anteriormente descritos (Ver Figuras 116 y 120), pero con el condicional de que el agua fresca debe ser introducida al tratador por conductos superiores como los mostrados en la Figura 120 y no mezclada previamente como se mostró en la Figura 116, para permitir que circule en contra flujo a la ruta que tiene la emulsión dentro del tratador electrostático.

Cuando se dispone un sistema con estas descripciones, el agua fresca introducida por la parte superior fluye en gotas relativamente grandes en contra al flujo de la emulsión, a través de los pares de electrodos de placas compuestas, mientras que la emulsión fluye a través del distribuidor de la sección inferior para luego subir y entrar al campo eléctrico establecido entre placas adyacentes, sometiendo la emulsión a un gradiente incremental del campo eléctrico mientras pasa por la región no conductiva creada por la parte inferior de la placa.

Luego la emulsión entra a una región de campo eléctrico de alta intensidad creada por la sección conductiva central de las placas, y por último atraviesa nuevamente una zona de gradiente de campo eléctrico pero esta vez decreciente, a medida que sale del campo de acción de los electrodos, pasando por la zona no conductiva generada por la sección superior de las placas.

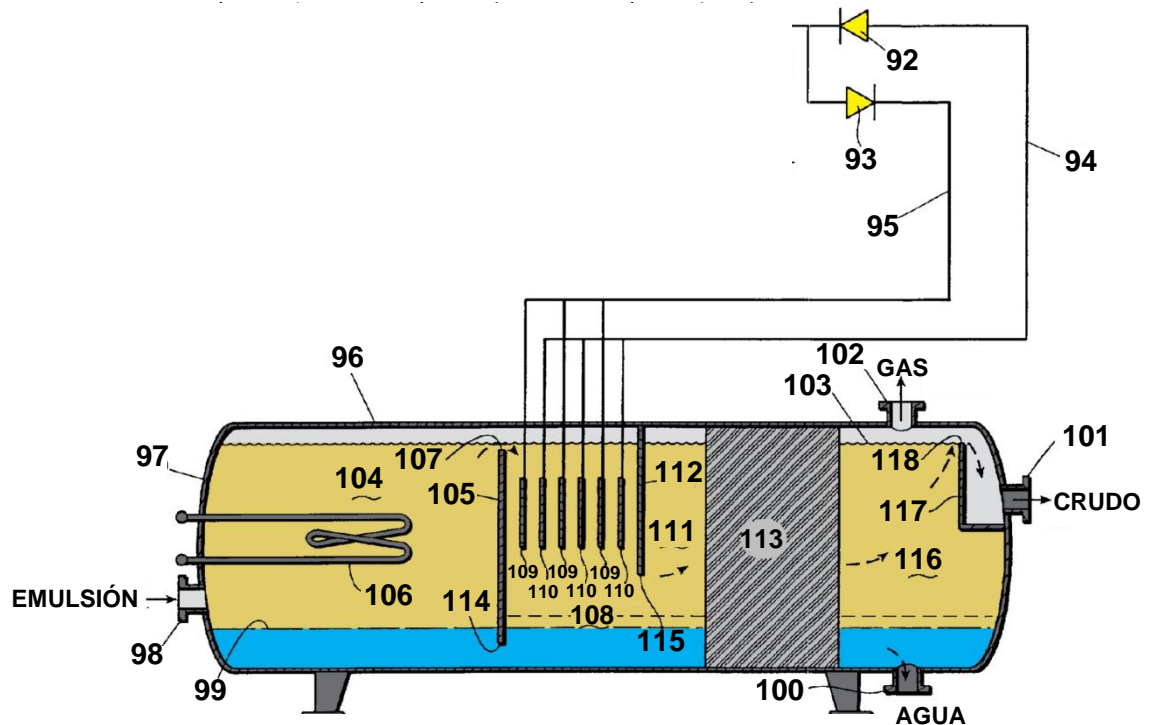
Similarmente, a medida que el agua fresca fluye en contra corriente a través del campo eléctrico generado entre placas adyacentes, el agua es sometida primero a un gradiente incremental del campo eléctrico establecido en la región no conductiva de la sección superior de las placas, en donde las gotas más grandes son cizalladas para formar gotas más pequeñas de agua fresca.

Luego estas gotas entran a la zona de mayor intensidad de campo eléctrico, generada por la sección conductiva central de las placas compuestas, donde continuamente las gotas más pequeñas son coalescidas (formando gotas de mayor tamaño) y las gotas más grandes son cizalladas (formando gotas de menor tamaño), permitiendo un mejor mezclado entre las gotas de agua de la emulsión, las gotas de agua fresca y las trazas de sales presentes en la emulsión, obteniendo un mayor grado de eficiencia en el proceso de desalado del crudo.

Las gotas más grandes de agua que contienen la salmuera luego son sometidas a un gradiente decreciente del campo eléctrico en la zona no conductiva inferior de las placas compuestas, estabilizando las gotas y evitando que se cizallen nuevamente. En la Figura 122, además de los dos componentes de las placas compuestas (secciones conductiva y no-conductiva), se ilustra un tercer componente de las placas compuestas, referenciado como el número 87 en la respectiva lista de componentes, el cual corresponde a una capa de aislante eléctrico ubicada en la parte posterior de cada placa de tal forma que la sección conductora de electricidad no esté en continuidad eléctrica directa con el fluido que fluye a través de todo el tratador, asegurando de esta manera que el campo eléctrico al cual es sometido el fluido sea esencialmente limitado solo a campos electrostáticos. El empleo de esta capa de aislante eléctrico también ayuda a reducir la posibilidad de arqueo eléctrico entre las porciones conductivas de los platos.

A pesar de que la esencia de los electrodos compuestos y sus beneficios parten de la utilización de una sección central conductiva, al combinarse con la tecnología Dual Frequency en la práctica, es preferible que las placas de electrodos estén formadas de solo material no conductor, es decir, que no se disponga de porciones de metal conductor. Los electrodos no conductivos están generalmente hechos de plástico reforzado con fibra de vidrio el cual es apto para transportar cargas eléctricas y para establecer campos electrostáticos para la emulsión.

Figura 123. Electrocoalescedor Dual Frequency multi-etapa con tratamiento térmico y mecánico.



Fuente: Autores.

A continuación se relacionan los componentes del equipo presentado en la Figura 123 (Ver Tabla 15):

Tabla 15. Descripción de componentes enumerados en Figura 123.

#	Descripción
92	Rectificador Primario con Carga Positiva
93	Rectificador Secundario con Carga Negativa
94	Cable Conductor (Primer Rectificador – Electrodo Positivo)
95	Cable Conductor (Segundo Rectificador – Electrodo Negativo)
96	Electrocoalescedor Dual Frequency multi-etapa
97	Pared del Electrocoalescedor conectada a Tierra
98	Conducto de Entrada de Emulsión
99	Interface Agua-Aceite
100	Conducto de Descarga de Agua
101	Conducto de Descarga de Crudo Tratado
102	Conducto de Descarga de Gas
103	Nivel de Crudo dentro del Electrocoalescedor (Interface Aceite-Gas)
104	Cámara de Entrada y Pre calentamiento
105	Pared Vertical de Separación de Secciones 1 (Pre calentamiento – Tratamiento Electroestático)
106	Calentador de Tubos de Fuego
107	Borde Superior de la Pared de Separación 1
108	Cámara de Tratamiento Electroestático
109	Electrodos de Placa Negativos
110	Electrodos de Placa Positivos
111	Cámara de Reposo
112	Pared Vertical de Separación de Secciones 2 (Tratamiento Electroestático – Separación Mecánica)
113	Sección de Separación Mecánica (Empaque de Láminas Corrugadas)

114	Borde Inferior de la Pared de Separación 1
115	Borde Inferior de la Pared de Separación 2
116	Zona Muerta (Piscina de Sedimentación)
117	Pared Tipo-L de Separación de Secciones 3 (Separación Mecánica – Zona Muerta)
118	Borde Inferior de la Pared de Separación 3
Fuente: SAMS, Gary W – NATCO ¹²³ .	

La Figura 123 ilustra un tratador electrostático horizontal alargado desde un punto de vista transversal, en el cual se puede apreciar la configuración multi-etapa que contiene varias secciones separadas, incluyendo una sección de calentamiento, una sección de campos electrostáticos generados aplicando la tecnología Dual Frequency, una sección de separación mecánica a partir de separadores de platos corrugados inclinados, y una sección inactiva o muerta que provee una trampa de sedimentación con un funcionamiento similar a las piscinas de tratamiento.

Esta Figura (Ver Figura 123) permite observar cómo se puede configurar el sistema de coalescencia electrostática Dual Frequency para emplearse en conjunto con otras tecnologías de deshidratación y desalación, y de esta manera obtener una separación enormemente mejorada del crudo y el agua.

¹²³ SAMS, Gary W. Dual frequency electrostatic coalescence. Patente No. US 6,860,979 B2. Compañía asignada: National Tank Company (NATCO). Estados Unidos, 2002.

Entrando en detalle, inicialmente la emulsión entra a una primera sección, utilizando un distribuidor ubicado por encima de la interfase agua-aceite similar a los empleados en equipos anteriormente descritos (no se muestra en la Figura 123), sección la cual está limitada por una pared vertical interna que fuerza el flujo de la emulsión por la parte superior y el de agua separada por la parte inferior gracias a la diferencia de gravedades. En esta zona denominada cámara de entrada y/o precalentamiento, se encuentra un calentador similar a los tubos de fuego empleado en los tratadores térmicos de crudo, el cual eleva la temperatura de la emulsión acelerando el proceso de coalescencia de acuerdo con la mencionada con anterioridad Ley de Stokes (Ver Capítulos 2 y 3).

Si se dispone de un tratador de este tipo pequeño y es conveniente y económico el use de energía eléctrica, este calentador puede ser alimentado con corriente eléctrica. Sin embargo, en casos más comunes, el diseño de este tipo de tratadores generalmente es de grandes dimensiones y el acceso a energía eléctrica es a veces limitado, por lo cual en la práctica normalmente se emplean tubos de fuego como se mencionó anteriormente con alimento de gas combustible que puede ser generado en la misma planta de tratamiento.

Luego la emulsión precalentada pasa sobre el borde superior de la pared de separación mencionada anteriormente, y debido a que el borde inferior se encuentra debajo de la interfase agua-aceite, esencialmente circula agua por este pasaje recolectada del proceso de tratamiento térmico. El aceite con un contenido de agua ya un poco menor es forzado a atravesar por una sección de electrocoalescencia, en la cual se utiliza la tecnología Dual Frequency para otorgar al proceso de separación todos los beneficios mostrados anteriormente.

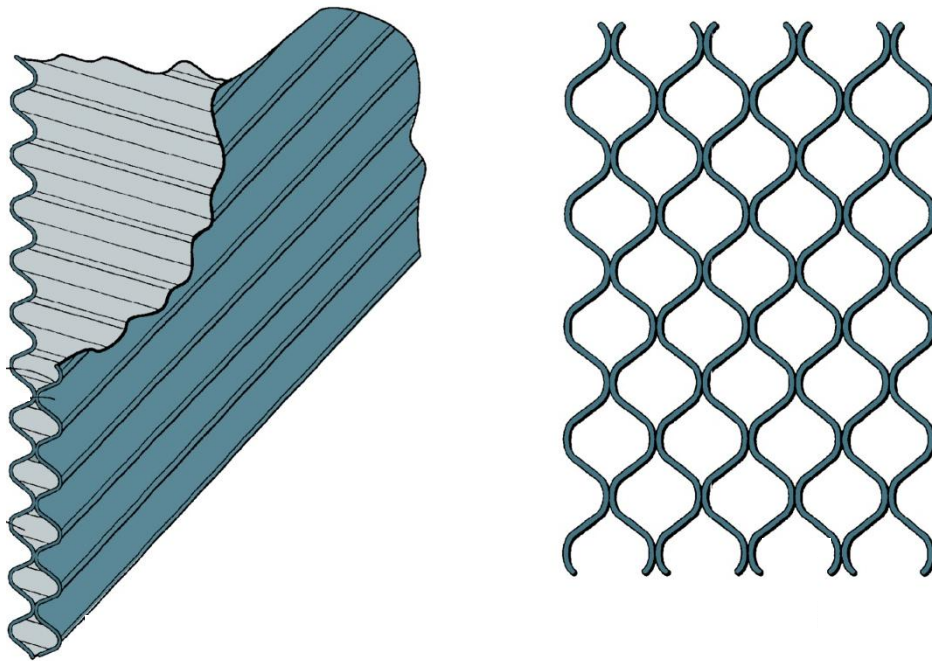
Esta sección o cámara de electrocoalescencia Dual Frequency se encuentra limitada por la pared anteriormente mencionada de separación entre la cámara de precalentamiento y la sección actual, y una segunda pared vertical conectada al techo del tratador multi-etapa de tal forma que solo permite el flujo a una siguiente zona de tratamiento a través de un espacio entre el borde inferior de ésta y el fondo del tratador, logrando con esto forzar el flujo de la emulsión desde la sección superior a la inferior y que obligadamente tenga que pasar entre los múltiples electrodos de placas y por ende someterse a la acción del campo eléctrico de frecuencia dual.

Posteriormente, luego de que ya gran parte de las gotas hayan coalescido gracias a los efectos combinados del tratamiento térmico y de la tecnología Dual Frequency, la emulsión continúa su camino hacia una tercera zona o sección relativamente quieta o tranquila para permitir la separación de las gotas que han coalescido pero que aún no han descendido completamente hasta incorporarse a la capa de agua separada que se encuentra en el fondo.

Luego de pasar por esta pequeña zona de quietud relativa, la emulsión migra hacia una cuarta sección o cámara de separación mecánica compuesta por láminas corrugadas no conductoras espaciadas unas de otras, ubicadas paralelamente unas a otras y al flujo de la emulsión. Estas láminas corrugadas están configuradas de tal manera que las corrugaciones formen un ángulo entre 30 y 60 grados con respecto a la horizontal, y generalmente están hechas de plástico, fibra de vidrio, metal u otro material adecuado que sea tanto químicamente estable en contacto con fluidos hidrocarburos a las condiciones de presión y temperatura de operación.

La Figura 124 es una vista isométrica detallada del sistema de separación mecánica de láminas corrugadas anguladas empleado en la tercera sección del tratador compuesto ilustrado en la Figura 123.

Figura 124. Láminas corrugadas para separación mecánica de emulsiones.



Fuente: Autores.

Estas laminas proveen grandes áreas superficiales en las cuales las gotas de agua coalescidas del proceso electrostático anterior pueden adherirse y agrandar de esta manera la gota aún más, para luego tender a fluir hacia abajo en los caminos inclinados provistos por las corrugaciones.

Otra posible combinación de tecnologías de tratamiento de crudo es representada en la Figura 125, en la cual se ajusta la tecnología Dual Frequency para funcionar en equipos que permitan efectos de centrifugación que aumenten los beneficios otorgados por las fuerzas gravitacionales. A continuación se referencian los componentes presentes en dicho esquema (Ver Tabla 16):

Tabla 16. Descripción de componentes enumerados en Figura 125.

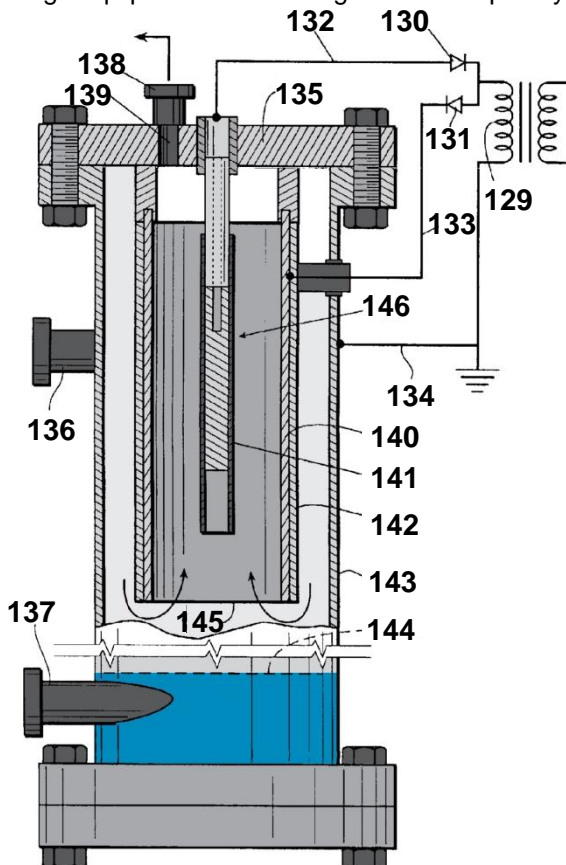
#	Descripción
119	Embobinado Primario
120	Embobinado Secundario
121	Cable Conductor (Embobinado Primario – Electrodo Positivo)
122	Cable Conductor (Embobinado Primario – Electrodo Negativo)
123	Entrada de Emulsión
124	Electrodo Concéntrico
125	Barra Conductiva (Componente del Electrodo)
126	Electrocoalescedor Dual Frequency con Flujo Centrifugo
127	Manga Aislante (Componente del Electrodo)
128	Salida de Emulsión Tratada
Fuente: SAMS, Gary W – NATCO ¹²⁴ .	

El equipo mostrado en la Figura 125 ajusta los modelos anteriores para poder funcionar verticalmente y que esto no afecte el flujo que debería tener la emulsión.

¹²⁴ SAMS, Gary W. Dual frequency electrostatic coalescence. Patente No. US 6,860,979 B2. Compañía asignada: National Tank Company (NATCO). Estados Unidos, 2002.

Para ello se ayuda de la gravedad y ubica la entrada de emulsión en la parte superior del tratador y la salida de emulsión en la parte inferior o fondo del recipiente, forzando un flujo en espiral a través de un sistema de un único electrodo concéntrico conformado por una sección interna conductiva (Barra conductiva) y una manga de material aislante de electricidad. Nótese que no existen salidas separadas para corrientes de agua y crudo, por lo que este equipo es un coalescedor y no un separador, es decir, cumple la función de mejorar la coalescencia de las gotas y aumentarlas de tamaño, pero sale de éste todavía emulsionadas y requieren de otro recipiente que por lo menos le otorgue dos salidas de fluidos y un tiempo de reposo para que logren separarse las gotas coalescidas.

Figura 126. Tratador centrífugo equipado con tecnología Dual Frequency de doble electrodo.



Fuente: Autores.

Por último, existe otra configuración para aplicar de igual manera la electrocoalescencia Dual Frequency y la centrifugación en conjunto, integrando la esencia del equipo mostrado en la Figura 125, pero con dos electrodos concéntricos en vez de uno y dos salidas de fluidos en vez de una única salida, lo que le permite constituirse como un separador y no solo como coalescedor (Ver Figura 126). A continuación se relacionan los componentes presentes en la Figura 126 (Ver Tabla 17):

Tabla 16. Descripción de componentes enumerados en Figura 113.

#	Descripción
129	Embobinado Secundario
130	Rectificador Secundario con Carga Negativa
131	Rectificador Primario con Carga Positiva
132	Cable Conductor (Primer Rectificador – Electrodo Axial)
133	Cable Conductor (Segundo Rectificador – Electrodo Tubular Externo)
134	Cable Conductor (Embobinado Primario – Carcasa Tratador)
135	Tapa del Tratador (Placa Superior)
136	Entrada de Emulsión Tangencial
137	Salida de Agua
138	Salida de Crudo Tratado
139	Abertura para el flujo de Crudo hacia la Salida de Crudo Tratado
140	Electrodo Tubular Conductivo Externo
141	Manga Aislante para el Electrodo Axial
142	Manga Aislante para el Electrodo Tubular Externo
143	Separador Dual Frequency de Doble Electrodo con Flujo Centrífugo

144	Interface Agua-Aceite
145	Tope Inferior del Electrodo Tubular Externo
146	Electrodo Axial Conductivo
Fuente: SAMS, Gary W – NATCO ¹²⁵ .	

En este equipo (Ver Figura 126) la emulsión entra, al igual que el coalescedor anterior (Ver Figura 125), por un conducto tangencial al tratador, para luego descender, en forma de espiral por efectos centrífugos de la gravedad y el caudal alto, por un espacio anular creado entre las paredes del recipiente y el primer electrodo denominado electrodo tubular conductivo externo, el cual tiene en su parte externa una manga aislante.

Este electrodo está conectado a la fuente de energía a través del rectificador primario positivo, por lo cual adquiere la carga positiva, mientras que las paredes del tratador están conectadas al embobinado primario, obteniendo una carga negativa. El electrodo tubular y las paredes del recipiente forman entonces el par de electrodos adyacentes necesarios para la creación del primer campo electrostático Dual Frequency al que es sometida la emulsión.

Al final de electrodo tubular, en el borde inferior, la emulsión cambia súbitamente de rumbo ascendiendo por un anular creado entre el electrodo tubular y un segundo electrodo concéntrico denominado electrodo axial, el cual está recubierto por una manga aislante y conectado al rectificador secundario que le entrega electricidad con polaridad negativa.

¹²⁵ SAMS, Gary W. Dual frequency electrostatic coalescence. Patente No. US 6,860,979 B2. Compañía asignada: National Tank Company (NATCO). Estados Unidos, 2002.

Entonces los pares de electrodos formarían el segundo par adyacente de electrodos para generar un segundo campo electrostático activo por el cual debe atravesar la emulsión, aumentando de esta manera la incidencia y el tiempo de exposición de la emulsión a un campo eléctrico, y por ende la eficiencia del proceso de deshidratación del crudo.

7.4 CONSIDERACIONES OPERATIVAS Y DE DISEÑO DEL EQUIPO

Luego de conocer las configuraciones disponibles para el equipo Dual Frequency y como es el funcionamiento de éstas para otorgar beneficios únicos frente a las demás tecnologías en electrocoalescencia, es necesario establecer ciertos parámetros de diseño de los equipos y el manejo de diversas variables operacionales que permitirán obtener mejores resultados a la hora de utilizar equipos basados en la tecnología Dual Frequency.

Inicialmente, dentro del grupo de parámetros de diseño, se encuentran las posibles modificaciones que se le pueden hacer a la forma de la onda modulada del voltaje entregado a la emulsión, así como el dimensionamiento generalizado y la determinación de requerimientos energéticos extras en equipos como el mostrado anteriormente en la Figura 123.

7.4.1 Modificaciones de la forma de onda modulada. La frecuencia de onda modulada F2 puede estar en forma de onda senoidal como se observó en la Figura 114, pero también puede estar en otras muchas formas como por ejemplo, la forma cuadrada representada anteriormente en la Figura 115.

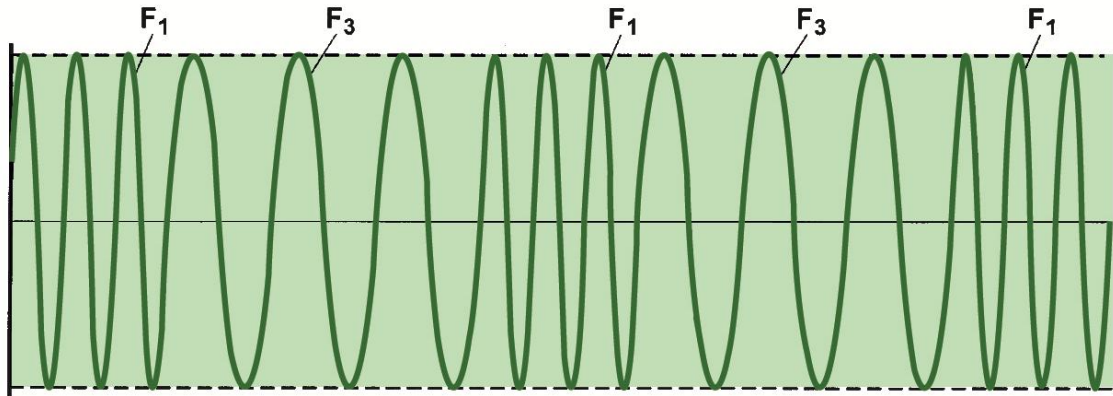
Sin embargo, la aplicación del tipo y forma de onda de voltaje enviado a los electrodos no es una decisión indiscriminada, puesto que está fuertemente ligado a condiciones propuestas por las propiedades del crudo y la salmuera presentes en la emulsión a tratar, principalmente aquellas de tipo eléctrico, para evitar fallas operacionales como cortos circuitos y formación de arcos eléctricos, y de igual manera incrementar la eficiencia de los procesos electrocoalescentes.

Estas modulaciones de onda pueden darse en la forma de modificaciones de la amplitud, modificaciones netamente de la frecuencia o una modificación combinada y simultánea de la amplitud y la frecuencia, de ahí que la tecnología Dual Frequency también reciba la denominación de Multiple Frequency, por la gran variedad de frecuencias que pueden generarse a partir de un mismo equipo y en un mismo instante de tiempo, cada una con beneficios únicos y sus respectivas aplicaciones especiales.

7.4.1.1 Onda modulada de amplitud constante y frecuencia variable. En la Figura 127 se puede apreciar una modulación diferente a las mostradas anteriormente, en la cual la amplitud se mantiene esencialmente constante mientras que la frecuencia base varía secuencialmente. Específicamente, la forma de onda varía de una frecuencia $F1$ a una frecuencia $F3$ en un paso periódico, es decir, el modulador de frecuencia. Este tipo de modulación es relacionada por su similitud con la modulación de frecuencia comúnmente empleada en la transmisión de ondas de radio FM.

Modificar la frecuencia por encima de un espectro general tal y como se hace en la modificación ilustrada en la Figura 127 promueve significativamente la desestabilización de la población de gotas de mayor tamaño.

Figura 127. Onda modulada de amplitud constante y frecuencia variable.

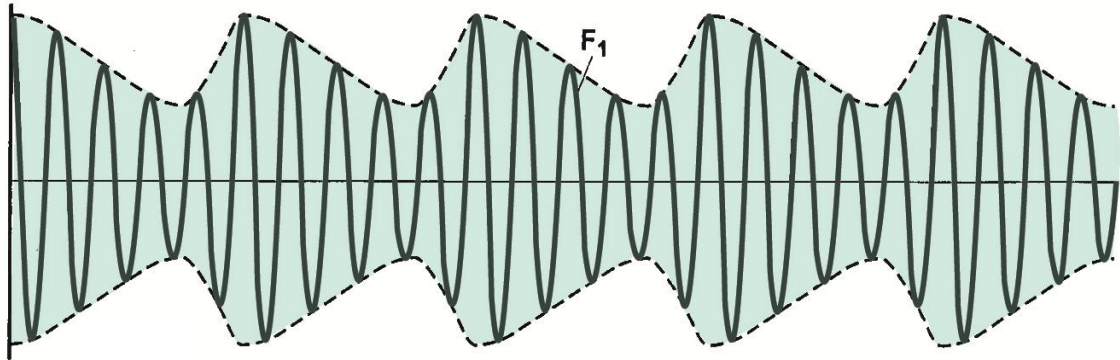


Fuente: Autores.

Las gotas más pequeñas de agua dispersa se desestabilizan a una frecuencia mucho mayor. A medida que la frecuencia decae, las gotas más grandes empezarán a desestabilizarse y coalescer formando gotas de mayor tamaño hasta que la frecuencia llegue a su nivel mínimo.

7.4.1.2 Onda modulada de amplitud variable con patrón escalonado. La Figura 128 ilustra un diferente tipo de onda en la cual la frecuencia base F_1 , que es esencialmente senoidal, sufre una modulación de amplitud para formar un patrón escalonado o “paso de escalera”. En detalle, la intensidad de la amplitud de la frecuencia base F_1 es periódicamente incrementada a gran velocidad y luego reducida lentamente. Generalmente hablando, cuando una emulsión atraviesa un campo eléctrico como el mostrado en la Figura 128, la sección de incremento de la amplitud de la onda desestabiliza las gotas de agua mientras que en la sección de reducción de la amplitud se genera la coalescencia de las gotas.

Figura 128. Onda modulada de amplitud variable con patrón escalonado.

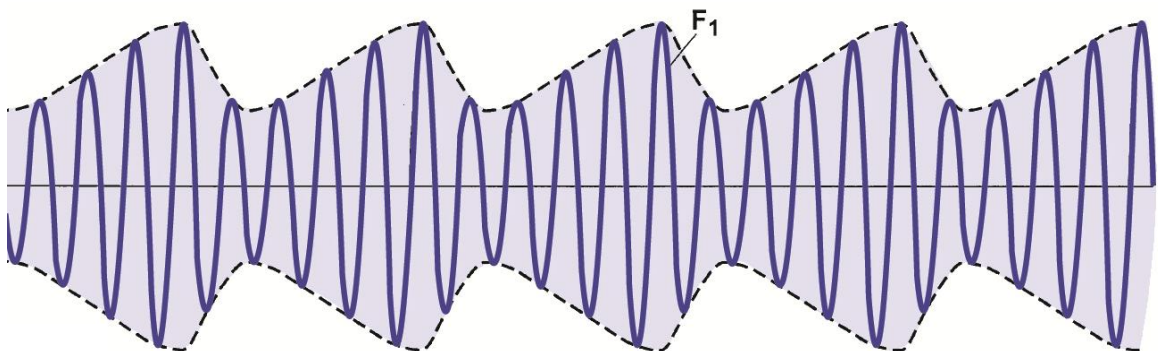


Fuente: Autores.

7.4.1.3 Onda modulada de amplitud variable con patrón escalonado inverso.

La Figura 129 es un ejemplo de modificación de forma de onda similar al observado en la Figura 128, pero en el cual la amplitud de la onda base F_1 incrementa gradualmente y luego decrece rápidamente, simulando un paso escalonado pero invertido al mostrado anteriormente.

Figura 129. Onda modulada de amplitud variable con patrón escalonado inverso.

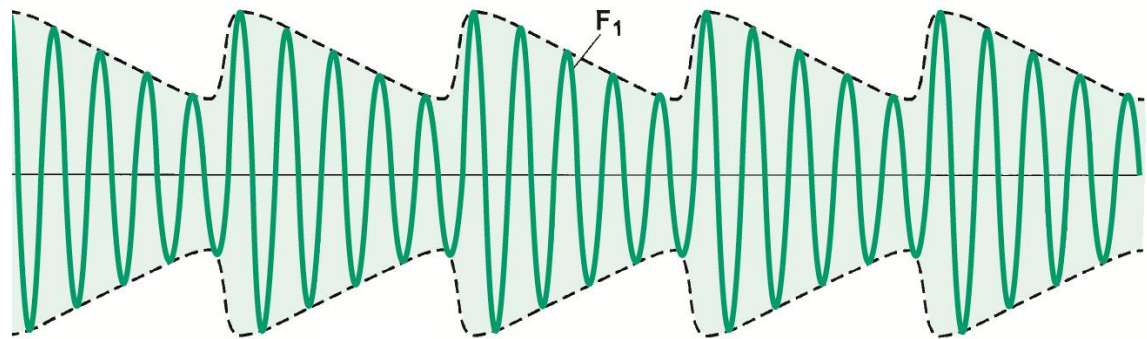


Fuente: Autores.

En esta configuración específica de la onda, las gotas de agua presentes en la emulsión son desestabilizadas más lentamente y la coalescencia ocurre en un corto periodo de tiempo. Este tipo es uno de los más adecuados para aplicar la tecnología de frecuencia múltiple con éxito, cuando se requieren tratar crudos de baja conductividad.

7.4.1.4 Onda modulada de amplitud variable con patrón escalonado acelerado. La Figura 130 ilustra un patrón de onda similar al escalonado (Ver Figura 128), excepto en la porción incremental, la cual es mucho más rápida comparada con la porción de onda correspondiente al decrecimiento de la amplitud.

Figura 130. Onda modulada de amplitud variable con patrón escalonado acelerado.

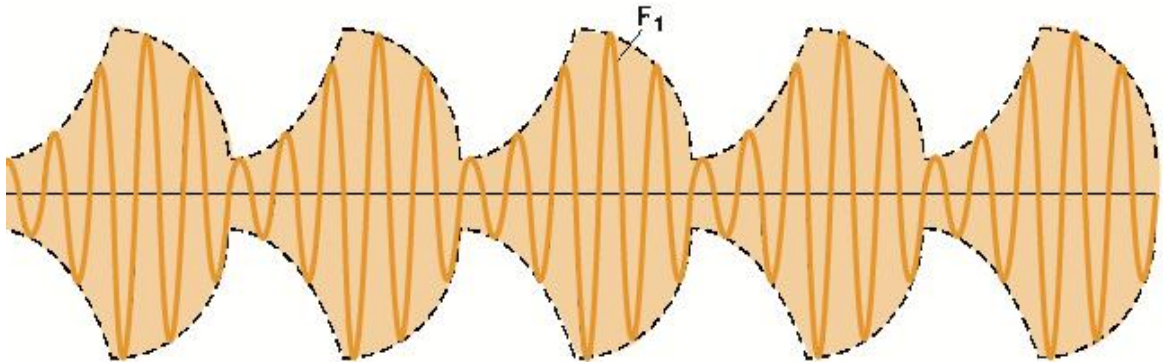


Fuente: Autores.

7.4.1.5 Onda modulada de amplitud variable con patrón exponencial equilibrado. La Figura 131 muestra un patrón de modulación de una señal eléctrica que puede ser aplicado a electrodos separados para la coalescencia de una emulsión, en la cual la intensidad de la frecuencia base F_1 incrementa y luego decrece, siempre exhibiendo un comportamiento exponencial.

Para este tipo de patrón (exponencial equilibrado), la tasa exponencial de incremento y decrecimiento son esencialmente iguales.

Figura 131. Onda modulada de amplitud variable con patrón exponencial equilibrado.

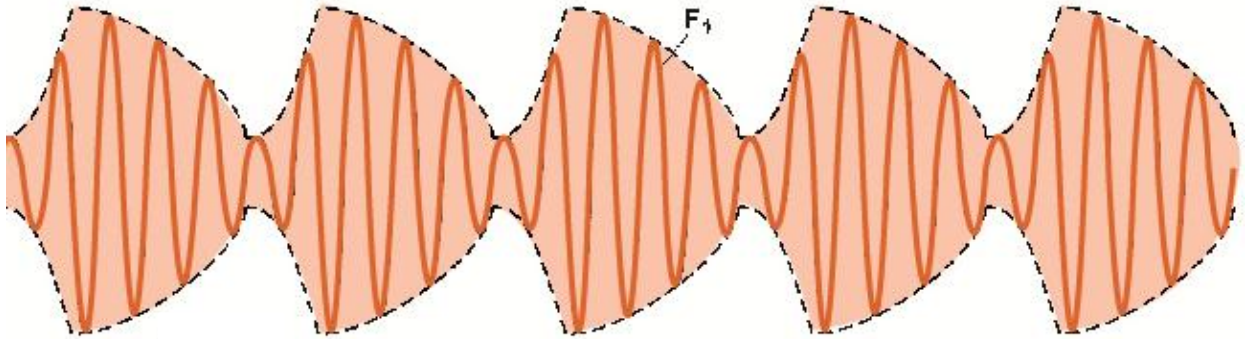


Fuente: Autores.

Este tipo de patrón de onda es utilizado preferentemente en tratamiento de emulsiones asociado a crudos de conductividad moderada, para permitir un máximo aprovechamiento de los beneficios otorgados por las tecnologías de frecuencia múltiple sin obtener contratiempos eléctricos.

7.4.1.6 Onda modulada de amplitud variable con patrón exponencial de ascenso súbito y caída lenta. La Figura 132 es un ejemplo de modificación de forma de onda similar al observado en la Figura 132, pero en el cual las tasas exponenciales de aumento y reducción de la amplitud no son iguales, observándose una tasa exponencial de crecimiento mucho más rápida en comparación con lenta tasa exponencial de decaimiento que experimenta la onda de voltaje.

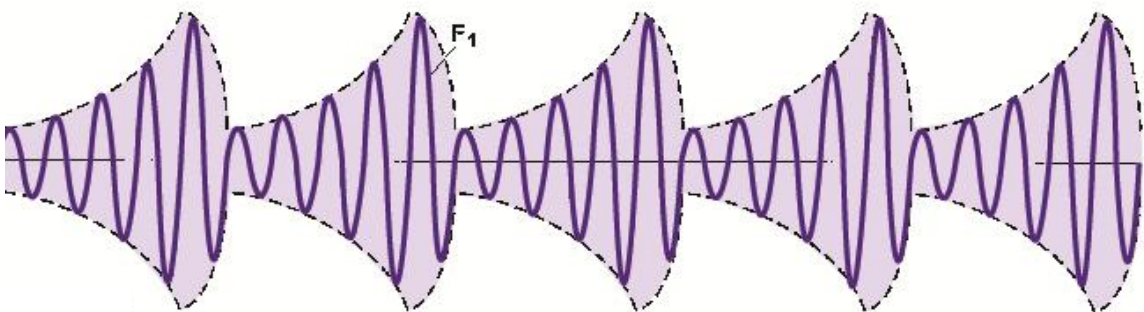
Figura 132. Onda modulada de amplitud variable con patrón exponencial de ascenso súbito y caída lenta.



Fuente: Autores.

7.4.1.7 Onda modulada de amplitud variable con patrón exponencial de ascenso lento y caída súbita. La Figura 133 ejemplifica un patrón de onda inverso al mostrado en la Figura 132, puesto que a diferencia del anterior, en este el ascenso de amplitud es lento y el descenso ocurre de manera muy rápida, ambos exhibiendo tendencias exponenciales.

Figura 133. Onda modulada de amplitud variable con patrón exponencial de ascenso lento y caída

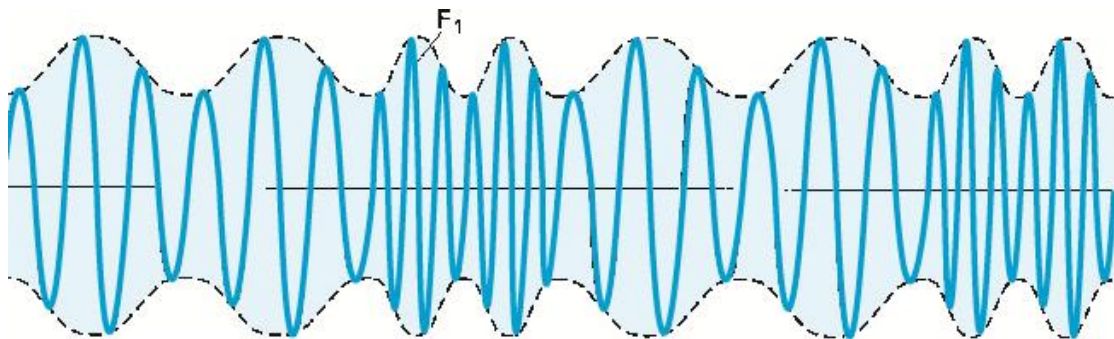


Fuente: Autores.

Generalmente, el patrón de onda mostrado en la Figura 133 es utilizado en el tratamiento de emulsiones de crudos que reportan conductividad elevada, a diferencia del patrón exponencial de crecimiento súbito y caída lenta, el cual es empleado preferentemente en procesos asociados a crudos de baja conductividad.

7.4.1.8 Onda modulada de amplitud variable con patrón exponencial decreciente. Por último se tiene el patrón de onda modulada ilustrado en la Figura 134, el cual ejemplifica la combinación de modulaciones tanto en la amplitud como en la frecuencia, en este caso, con una onda base F1 de tipo senoidal modulada que está variando su amplitud mientras al mismo tiempo lo hace su frecuencia de una frecuencia relativamente baja a una frecuencia relativamente alta. Esta combinación de modificaciones en el patrón de onda contempla los beneficios ofrecidos por cada tipo de modulación en un solo equipo de generación de campos eléctricos, lo que se traduciría en mejoras en la eficiencia del proceso, siempre y cuando sea bien diseñado y se realicen estudios de compatibilidad con la conductividad de las fases presentes en la emulsión.

Figura 134. Onda modulada de amplitud variable con patrón exponencial equilibrado.



Fuente: Autores.

7.5 COMPARACIÓN CON TECNOLOGÍAS DE ELECTROCOALESCENCIA

La tecnología Dual Frequency, además de los numerosos beneficios únicos otorgados que se mencionaron anteriormente, posee las siguientes ventajas adicionales:

- ✓ Aumento de la capacidad de procesamiento para un recipiente existente
- ✓ Menor contenido de BS&W a la salida
- ✓ Menor tamaño del equipo y espacio ocupado en planta comparado con otros equipos a un BS&W equivalente.
- ✓ Mayor rendimiento comparado con un tratador electrostático convencional de igual dimensión.
- ✓ Reducción del consumo de químicos.
- ✓ Menor temperatura de operación del tratador.
- ✓ Menor costo operativo en general.
- ✓ Evita problemas eléctricos gracias a su transformador trifásico balanceado.
- ✓ Salida de agua de mejor calidad y más limpia.

Adicionalmente, se presenta en el Anexo D un cuadro comparativo referente a las características diferenciales entre las tecnologías de electrocoalescencia existentes para la deshidratación y desalación del crudo pesado.

Por último, se realizó un estudio comparativo de carácter técnico apoyado en la investigación realizada por Montes E.¹²⁶, complementada con la evaluación cualitativa de los autores, fundamentada en la información mostrada en este capítulo y en el capítulo anterior (Ver Capítulos 6 y 7), estudio el cual se muestra en el Anexo E.

¹²⁶ MONTES PÁEZ, Erick Giovany. Tecnologías de tratamiento de emulsiones en campos petroleros. Escuela de Petróleos, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2010.

CONCLUSIONES

- ✚ Los crudos pesados y extra-pesados generalmente tienden a formar emulsiones muy apretadas las cuales presentan dificultad en los procesos de separación y/o rompimiento, suscitando la necesidad de implementar tecnologías de electrocoalescencia avanzadas.
- ✚ El tratamiento de emulsiones es un proceso trascendente en toda actividad de explotación de hidrocarburos, puesto que causan serios problemas en las líneas y equipos de producción tales como generación de altas presiones, tránsito lento, corrosión, entre otros.
- ✚ De acuerdo con la velocidad terminal de Stokes, se puede acelerar la separación de las emulsiones a partir de una reducción en la viscosidad, de un aumento del diferencial de densidad entre las fases, inhibición del agente emulsificante y de la coalescencia de gotas pequeñas.
- ✚ En lo que concierne al tratamiento de emulsiones en la industria petrolera se dispone de diversas tecnologías las cuales se pueden agrupar en convencionales (químicas, térmicas y mecánicas) y no convencionales (combinación de convencionales y aplicación de coalescencia electrostática a las tecnologías convencionales).

- ✚ La aplicación de campos eléctricos a las gotas de agua dispersas en una emulsión permite la reorganización de sus cargas y la aparición de tres fuerzas electrostáticas que ayudan a su coalescencia: electroforesis, di-electroforesis y dipolo-dipolo.

- ✚ En el contexto de electrocoalescencia se han desarrollado numerosas tecnologías aplicadas a: variaciones del campo eléctrico, configuraciones de los electrodos, optimizaciones hidráulicas del equipo y combinaciones específicas de éstas que dan lugar a otras tecnologías.

- ✚ La tecnología que combina los campos eléctricos de corriente alterna y continua (AC/DC), denominada Dual Polarity, ha demostrado un gran aumento de la eficiencia de reducción del contenido de agua y sales disueltas en procesos de deshidratación y desalación de crudo pesado para equipos de un mismo dimensionamiento y tiempo de tratamiento de la emulsión.

- ✚ La optimización hidráulica de los electrocoalescedores radica en la correcta ubicación del conducto de distribución de la emulsión, la adecuada selección del diámetro apropiado de las boquillas de distribución a partir de la ecuación de Bernoulli, y de la implementación de un baffle atenuador de momentum, todo orientado a la disminución de la agitación que pueda promover el apretamiento de la emulsión.

- ✦ Se han desarrollado diversas configuraciones de electrodos, destacándose los electrodos compuestos por una sección conductiva y otra no conductiva, las cuales en conjunto proporcionan un gradiente de campo eléctrico que mejora el proceso electrocoalescente y previene la ruptura de las gotas ya coalescidas por efectos de la intensidad del campo eléctrico.
- ✦ La tecnología Dual Frequency surge como una necesidad de controlar la frecuencia del campo eléctrico y modularla, permitiendo establecer una variación del mismo en un rango óptimo entre el voltaje umbral y el voltaje crítico, obteniendo acceso a los beneficios de los campos de alta y baja frecuencia, y a su vez contrarrestando los efectos negativos presentes en cada uno de ellos.
- ✦ Los tratadores electrostáticos Dual Frequency comprenden una aplicación de transformadores trifásicos, doble embobinado, un modulador y un rectificador, a la tecnología existente Dual Polarity para entregar campos AC/DC modulados en frecuencia, los cuales, en combinación con otras tecnologías como electrodos compuestos y atenuadores de momentum, permiten obtener una mejoría considerable en la eficiencia del proceso de deshidratación y desalación de crudos pesados.
- ✦ El tratamiento electrocoalescente Dual Frequency puede ser combinado con otras tecnologías convencionales en el tratamiento de emulsiones como la centrifugación, la separación mecánica asistida por empaques corrugados, y la aplicación de energía térmica, buscando obtener la mayor eficiencia posible.

- ✚ Al igual que para las demás tecnologías en electrocoalescencia, la tecnología Dual Frequency puede ser mejorada por diámetro óptimo de gota, flujo de calor óptimo en el tubo de fuego, y temperatura de pre-calentamiento de la emulsión, entre otros.

- ✚ Se han desarrollado diez posibles configuraciones de la forma de onda a partir de la modulación de su frecuencia y su amplitud, cada una con características únicas, en búsqueda de optimizar el tratamiento de las emulsiones de acuerdo con sus cualidades específicas como conductividad de sus fases, tamaño de gota óptimo de remoción, grado de estabilidad de la emulsión, entre otras.

RECOMENDACIONES

- ✚ Conformar grupos de estudio interdisciplinario a partir de los centros de investigación en los cuales se realicen análisis de las nuevas tecnologías desarrolladas en el marco de la deshidratación y desalación de crudos pesados, puesto que se vaticina prontamente una fuerte fijación en la industria por la explotación de este tipo de crudos.
- ✚ Realizar una investigación a fondo de las tecnologías convencionales (diseño y operación) y de otras tecnologías modernas en el sector de tratamiento de crudos pesados (ultrasonido, microondas, campos electromagnéticos, entre otras), buscando complementar el presente proyecto investigativo y obtener un completo referente bibliográfico en la temática de emulsiones al servicio de la industria petrolera.
- ✚ Efectuar pruebas experimentales a nivel de laboratorio y/o pilotos a nivel de campo que permitan conectar las variables influyentes en el proceso y desarrollar una correlación para la determinación del rango óptimo operativo del voltaje aplicado a la emulsión acorde con las especificaciones de la misma.
- ✚ Realizar un estudio técnico-económico sobre el impacto de la implementación de esta nueva tecnología en electrocoalescencia u optimización de una pre-existente en una planta de tratamiento de crudo, que permita establecer bases sólidas para la toma de decisiones al momento de seleccionar el equipo adecuado en procesos de deshidratación y desalación para nuevas plantas de tratamiento de crudos pesados.

BIBLIOGRAFÍA

- ✚ ABDEL-AAL, H. K; AGGOUR, M. Petroleum and gas field processing. Universidad de Kuwait. Editorial Marcel DEKKER, Inc. Safat (Kuwait). 2003.

- ✚ ABDEL-RAUF, M. E. S. Factor affecting the stability of crude oil emulsions. Departamento aplicado del petróleo, Instituto de investigación del petróleo egipcio, Egipto.

- ✚ ALAYON, M. Asfáltenos ocurrencia y floculación. Universidad de los Andes, escuela de ingeniería química, Laboratorio de formulación, interfaces, reología y procesos, cuaderno FIRP S369-PP, Mérida (Venezuela). 2004.

- ✚ ALVES, R. P; OLIVEIRA, R. C. How to establish a mathematical model for the electrostatic desalting process based on pilot plant studies. SPE, Petrobras. 2006.

- ✚ AMSTRONG, J; NATCO UK Limited, and SAMS, G. W. Oil dehydration improved by dual frequency electrostatic process. Conferencia internacional del petróleo (IPTC). 2007.

- ✚ API SPECIFICATION 12J. Specification for oil and gas separators. Cuarta Edición. Instituto Americano del Petróleo. Diciembre 1, 1989.

- ✚ API SPECIFICATION 12L. Specification for vertical and horizontal emulsion treaters. Cuarta Edición. Insituto Americano del Petróleo. Noviembre 1, 1994.

- ✚ ARNOLD, Ken. Surface production operations: Design of oil-handling systems and facilities. Volumen 1, Segunda Edición. Gulf Publishing Company. Texas (USA), 1986.

- ✚ ATTEN, P; FOULC, J. N; BOISSY, C. Slightly conducting spheres immersed in a dielectric liquid subjected to a DC field: Attraction force, electric field on the liquid and partial discharges. Presentación en la 13° Conferencia Internacional de Líquidos Dieléctricos (ICDL). Japón, 1999.

- ✚ ATTEN, P; GONON, P; FOULC, J. N; BOISSY, C. Estimate of the electric stress in the liquid lying between particles of an electrorheological fluid. Presentación Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE): Conferencia de Aislamiento Eléctrico y Fenómeno Dieléctrico. Colorado (USA), 1999.

- ✚ BAHADORI, A; MONTAZERI, G. H; BAHADORI Sh. Analysis of crude oil electrostatic desalters performance. Universidad de ciencia y tecnología de Irán. 2004.

- ✚ BAHADORI, A; ZEIDANI, K. Analysis of crude oil electrostatic desalters performance. Universidad de Alberta. 2005.

- ✚ BAHADORI, A; ZEIDANI, K. Analysis of crude oil electrostatic desalters performance. Universidad de Alberta. 2006.

- ✚ BATISTA DA SILVA, E. Quebra de emulsoes de petróleo via micro-ondas: Estudo da particao de espécies ácidas. Universidad de Tiradentes-UNIT. Aracaju (Brasil). 2010.

- ✚ BOLING, D. R. The Use of electrostatic coalescence in the dehydration of gulf coast crudes.

- ✚ BONNECAZE, R. T; BRADY, J. F. Dynamic simulation of an electrorheological fluid. Revista Química-Física. Vol. 96. 1992.

- ✚ CARDOZO FILHO, A. Avaliacao de propiedades de correntes oleosas da industria de petróleo vía conductivimetría. Universidad de Tiradentes-UNIT, ARACAJU (BRASIL). 2007.

- ✚ CAUBY COUTINHO, R. C. Estudo da estabilidade de emulsoes de água em petróleo. Universidad federal de Rio de Janeiro. 2005.

- ✚ CHANDRA, A. W. Chemical demulsification of stable crude oil and bitumen emulsions in petroleum recovery-a review. Encyclopedic Handbook of emulsion technology. Capítulo 24. Recursos naturales de Canadá, Devon, Alberta (Canadá).

- ✚ CHEN, J. C. T. Electrostatic separator with multiple horizontal electrodes. Patente No. US 2009/0159426 A1. Compañía asignada: Cameron International Corporation. Estados Unidos, 2008.

- ✚ CHIESA, M; MELHEIM, J. A; PEDERSEN, A; INGEBRIGSTEN, S. BERG, G. Forces acting on water droplets falling in oil under the influence of an electric field: numerical predictions versus experimental observations. Revista europea de mecánica de fluidos. Editorial Elsevier. 2005.

- ✚ CLERCX, H. J; BOSSIS, G. Many-body electrostatic interactions in electrorheological fluids. Revista Computer Physics Communications. 1993.

- ✚ CUMMINGS, C. B; ENGELMAN C. E. The theory and economics of electrostatics treaters. Engelman-General Inc. SPE. 1989.

- ✚ DARSH, T; WASAN, A; NIKOLOV D. Structure and stability of emulsions. Encyclopedic Handbook of emulsion technology Capítulo 3. Instituto de tecnología Illinois, Chicago (Illinois).

- ✚ DAVIS, L. C. Polarization forces and conductivity effects in electrorheological fluids. Revista Aplicaciones Físicas. Vol. 72. 1992.

- ✚ EOW, S. J; GHADIRI M. Electrocoalescence-separators for the separation of aqueous drops from a flowing dielectric viscous liquid. Tecnología de separación y purificación, Editorial Elsevier. 2002.

- ✚ EOW, S. J; GHADIRI M. Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil: a review of the technology. Revista de ingeniería química. Editorial Elsevier. 2001.

- ✚ EOW, S. J; GHADIRI M. Motion, deformation and break-up of aqueous drops in oils under high electric field strengths. Revista de ingeniería química. Editorial Elsevier. 2003.

- ✚ EOW, S. J; GHADIRI M; SHARIF, A. O; WILLIAMS, T. O. Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil: a review of the current understanding. Revista de ingeniería química. Editorial Elsevier. 2000.

- ✚ FAN, T; WANG, J; BUCKLEY, J. S: Evaluating crude oils by SARA analysis. SPE/New Mexico tech. 2002.

- ✚ FENWICK, B. T. Method and apparatus for treating oil-water emulsions. Patente No. US 6,827,865 B1. 2002.

- ✚ FJELDLY, T. A; HANSEN E. B; NILSEN, P. J. Novel coalescer technology in first-stage separator enables one-stage separation and heavy-oil separation. Conferencia tecnologia offshore, Houston, Texas (USA). 2006.

- ✚ FRIEDEMANN, J. D. Design criteria and methodology for modern oil-water separation systems. Emulsions and emulsion stability, Segunda edición. Capítulo 17.

- ✚ FRISING, T; NOIK C; DLMAZZONE, C. The liquid/liquid sedimentation process: From droplet coalescence to technologically enhanced water/oil emulsion gravity separators: A review. Instituto francés del petróleo, Rueil-Malmaison (Francia). Revista de tecnología y ciencia de la dispersión. 2006.

- ✚ HEATHERLY, M. W, BUCHANAN, V. P.; RAWLINS, C. H. Optimization of a horizontal flow electrostatic coalescer in offshore gulf of Mexico service. SPE, Marathon oil company, Kavaemer process systems US. 2002.

- ✚ HEIMAN, M. S; PELLEGRINO, V. L; PANTERMUEHI L. A; CRANE, T. L. Maximize revenue by analyzing crude oil treating parameters. Amoco Production Co. (USA). 1983.

- ✚ HSU, D. C; EDISON, N. L; ISELIN, T. H. Electrodes for electrical coalescence of liquid emulsions. Patente No. US 4,415,426. Compañía asignada: Exxon Rescarch and Engienering Co., Florham Park, N. J. 1981.

- ✚ KHATIB, Z. I. Dehydration of crude using electrostatic treaters: Development of design and operating guidelines. SPE, Shell Oil Co. 1996.

- ✚ KLINGENBERG, D. J; VAN SWOL, F; ZUKOSKI, C. F. Dynamic simulation of electrorheological suspensions. *Revista Química-Física*. Vol. 91. 1989.

- ✚ KLINGENBERG, D. J; VAN SWOL, F; ZUKOSKI, C. F. The small shear rate response of electrorheological suspensions. II. Extensions beyond the point-dipole limit. *Revista Química-Física*. Vol. 94. 1991.

- ✚ KOKAL, S. Crude oil emulsions: a state of the art review. SPE, Saudi Aramco. 2005.

- ✚ KOKAL, S; AL-GHAMDI, A.; MEERANPILLAL, N. S. An investigative study of potential emulsion problems before field development. SPE, Saudi Aramco. 2007.

- ✚ KOKAL, S; WINGROVE, M. Emulsion separation index: From laboratory to field case studies. SPE, Saudi Aramco. 2000.

- ✚ LANGEVIND, D; POTEAU, S; HÉNAUT, I; ARGILLER, J. F. Crude oil emulsion properties and their application to heavy oil transportation. *Revista de ciencia y tecnología de aceite y gas*, Instituto francés del petróleo. 2004.

- ✚ LESS, S; HANNISDAL, A; SJOBLOM, J. Dehydration efficiency of water-in-crude oil emulsions in alternating current electrical fields. Universidad de ciencia y tecnología de Noruega (NTNU). 2010.

- ✚ LESS, S; VILAGINES, R: The electrocoalescers' technology. Advances, strengths and limitations for crude oil separation. Saudi Aramco, centro de investigación y desarrollo, Dhahran, Arabia Saudita. 2012.

- ✚ LUCAS, R. N. Performance of heavy oil dehydrators. Petreco filial de Petrolite Corp. 1969.

- ✚ LUNDGAARD, L. E; BERG, G; INGEBRIGSTEN, S; ATTEN, P. Electrocoalescence for oil-water separation: Fundamental aspects. Segunda edición. Capítulo 15.

- ✚ MARFISI, S; ALVAREZ, G; PARUTA, E; MORENO, P; ANTÓN, R; SALAGER, J. L. Deshidratador electrostático de laboratorio para probar formulaciones desemulsionantes. Artículo de investigación revista ciencia e ingeniería, Vol. 30, No. 3. Mérida (Venezuela). 2009.

- ✚ MARFISI, S; SALAGER, J. L. Deshidratación de crudo principios y tecnología. Universidad de los Andes, escuela de ingeniería química, Laboratorio de formulación, interfaces, reología y procesos, cuaderno FIRP S853-PP, Mérida (Venezuela).

- ✚ MECON, Gerardo. Diseño y montaje de una estación para tratamiento y manejo de crudo. Proyecto de Grado. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Universidad Industrial de Santander. 1986.

- ✚ MELLO DUARTE DA CUNHA, P. S. Modelagem matemática do proceso de desidratacao eletrostática de petróleos. Universidad federal de Rio de Janeiro, escuela de química. Rio de Janeiro (Brasil). 2008.

- ✚ MICHAELSEN, J. Advanced methods for dehydration of heavy oils. Aibel Technology. Vera Cruz (Mexico). 2009.

- ✚ MIDGARD, O. M. Electrostatic field theory and circuit analysis in the design of coalescers with pulsed dc voltage. Revista de ingeniería química. Editorial Elsevier. 2009.

- ✚ MONTES PÁEZ, Erik Giovany. Tecnologías de tratamiento de emulsiones en campos petroleros. Escuela de Petróleos, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2010.

- ✚ NOIK, C. CHEN, J; DALMAZZONE, C. Electrostatic demulsification on crude oil: state of the art review. SPE, Instituto Frances del Petróleo. 2006.

- ✚ NOIK, C; TRAPY, J; MURET, A; IFP (Institut Francais du Petrole), LOBORIE, G; PROSERMAT. Design of a crude oil dehydration unit. SPE. 2002.

- ✚ OPAWALE, A. Oilfield emulsion control: a major issue during heavy crude oil production. Departamento de ingeniería química. Universidad tecnológica Ladoke Akintonla, Ogmoboso (Nigeria). 2009.

- ✚ PRESTIGE, F. L; SHUETZ, A. A; WHEELER, H. L. Voltage control system for electrostatic oil treater. Patente No. US 4,400,253. Compañía asignada: Combustion Engineering, Inc. Windsor, Conn. 1982.

- ✚ PRESTIGE, F. L; JOHNSON, B. C. Patente No. US 64,702,815 B2. Compañía asignada: National Tank Company (NATCO). Estados Unidos, 1986.

- ✚ POINDECTER, M. K; CHUAI, S; MARBLE, R. A; MARSH, S. C. The key to predicting emulsion stability: Solid Content. Servicios energéticos NALCO, Centro de oncología Memorial Sloan-Kettering. SPE, 2006.

- ✚ PONTES CUNHA, R. E. Modelagem matemática da separacao gravitacional de emulsoes de petróleo. Universidad de Tiradentes-UNIT, ARACAJU (BRASIL). 2007.

- ✚ SAMS, G. W. Dual frequency electrostatic coalescence. Patente No. US 6,860,979 B2. Compañía asignada: National Tank Company (NATCO). Estados Unidos, 2002.

- ✚ SAMS, G. W. Multiple frequency electrostatic coalescence. Patente No. US 7,351,320 B2. Compañía asignada: National Tank Company (NATCO). Estados Unidos, 2005.

- ✚ SAMS, G. W; WALLACE, H. G. Improved process efficiencies by optimizing fluid hydraulics in electrostatic oil dehydrators. Grupo NATCO. 2001.

- ✚ SAMS, G, W; WARREN, K. W. New methods of application of electrostatic fields. Grupo NATCO, Inc. New Orleans (Louisiana). 2003.

- ✚ SAMS, G, W; ZAOUK, M. The practiced art of emulsion resolution in electrostatic processes. Grupo NATCO. Houston (Texas, USA). 1999.

- ✚ SIU, Y. L; WAN, T. K; YU, K. W. Interparticle force in polydisperse electrorheological fluids: Beyond the dipole approximation. Revista Computer Physics Communications. 2001.

- ✚ SJOBLOM, J; JOHNSEN E. E; WESTIVK, A; ESE M. H; DJUVE, J; AUFLEM, I. H. KALLEVIK, H. Demulsifiers in the oil industry. Encyclopedic Handbook of emulsion technology Capitulo 25. Statoil A/S Trondheim, Universidad de Bergen, Universidad Noruega de ciencia y tecnología.

- ✚ STEWART, M; ARNOLD, K. Emulsions and oil treating equipment selection, sizing and troubleshooting. Editorial Elsevier. 2009.

- ✚ VAN DE ZANDE, M. J; VEN HEUVEN, K. R; MUNTINGA, J. H.; VAN DEN BROEK, W. M. G. T. Effect of flow through a choke valve on emulsion stability. SPE, Universidad Delf. 1999.

- ✚ VANEGAS, Alfonso; VERA, Gerardo. Diseño de sistemas de separación y tratamiento en la producción de crudo. Proyecto de Grado. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Universidad Industrial de Santander. 1988.

- ✚ THOMASON, W. H; BLUMER, D. J; COPE, D. P; ZAOUK, M. Advanced electrostatic technologies for dehydration of heavy oils. SPE, Conocophillips Sing, Natco. Conferencia internacional de operaciones térmicas y simposio de crudo pesado. 2005.

- ✚ THRO, M. E; ARNOLD, K. E. Water-droplet-size determination for improved oil treating sizing. SPE production and facility 1997.

- ✚ URDHAI, O; NORDSTAD, K; BERRY, P; WAYTH, N; WILLIAMS, T; BAILEY, A. Development of a new, compact electrostatic coalescer concept. SPE, Statoil, KPS, BP, Universidad de Southampton y Universidad de Bradford. 2001.

- ✚ URDAHI, O; WAYTH N. I; FORDEDAL, H; WILLIAMS, T. J; BAILEY, A. G. Encyclopedic Handbook of emulsion technology Capítulo 28. BP Amoco exploration Greenford, Escocia. Universidad de Southampton, Inglaterra.

- ✚ WINSLOW, Jr. J. D. Electrical treater with AC-DC electrical fields. Patente No. US 4,049,535. Compañía asignada: Petrolite Corporation, St. Louis, Mo, 1975

- ✚ VERNON S. H; ARNOLD K. E. Crude oil emulsions. Capítulo 19, Meridian corp. Servicios ingenieriles Paragon, Inc.

- ✚ WARREN, K. W. New tools for heavy oil dehydration. SPE/NATCO. Conferencia internacional de operaciones térmicas, simposio de crudo pesado y tecnología de pozos horizontales. 2002.


- ✚ XU, J; YU, H; ZHANG, F; BOUYOU; LI, R. Design of ARM-Based inverter electrostatic dehydrator for crude oil emulsions. Presentación Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE), Universidad de ciencia y tecnología Harbin, China. 2008.

- ✚ YU, K. W; WAN JONES, T. K. Interparticle force in polydisperse electrorheological fluids. Revista Computer Physics Communications. 2000.


- ✚ ZHANG, Y; LIU, Y; JI, R. Dehydration efficiency of high –frequency pulsed DC electrical fields on water-in-oil emulsion. . Universidad del petróleo en china. Coloides y superficies A: aspectos fisicoquímicos e ingenieriles. Editorial Elsevier. 2011.

- ✚ ZHANG, Y; LIU, Y; JI, R; WANG, F; CAI, B; LI, H. Application of variable Frequency technique on electrical dehydration of water in oil emulsion. Universidad del petróleo en china. Coloides y superficies A: aspectos fisicoquímicos e ingenieriles. Editorial Elsevier. 2011.


 www.fre-flooil.com/products.html

 www.txunidosnet/oil_and_gas.html

 www.amrprocess.com/oil%20dehydration.html

 www.c-a-m.com

 www.natcogroup.com

 www.prosep.com/sub_products/crude_treatment.html

ANEXOS

ANEXO A. LISTADO BIBLIOGRÁFICO: DISEÑO DE EQUIPOS CONVENCIONALES PARA EL TRATAMIENTO DE EMULSIONES

- ✚ ABDEL-AAL, H. K; AGGOUR, M. Petroleum and gas field processing. Universidad de Kuwait. Editorial Marcel DEKKER, Inc. Safat (Kuwait). 2003.

- ✚ API SPECIFICATION 12L. Specification for vertical and horizontal emulsion treaters. Cuarta Edición. Instituto Americano del Petróleo. Noviembre 1, 1994.

- ✚ ARNOLD, Ken. Surface production operations: Design of oil-handling systems and facilities. Volumen 1, Segunda Edición. Gulf Publishing Company. Texas (USA), 1986.

- ✚ CHANDRA, A. W. Chemical demulsification of stable crude oil and bitumen emulsions in petroleum recovery-a review. Encyclopedic Handbook of emulsion technology. Capítulo 24. Recursos naturales de Canadá, Devon, Alberta (Canadá).

- ✚ FRIEDEMANN, J. D. Design criteria and methodology for modern oil-water separation systems. Emulsions and emulsion stability, Segunda edición. Capítulo 17.

- ✚ KHATIB, Z. I. Dehydration of crude using electrostatic treaters: Development of design and operating guidelines. SPE, Shell Oil Co. 1996.

- ✚ MECON, Gerardo. Diseño y montaje de una estación para tratamiento y manejo de crudo. Proyecto de Grado. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Universidad Industrial de Santander. 1986.

- ✚ STEWART, M; ARNOLD, K. Emulsions and oil treating equipment selection, sizing and troubleshooting. Editorial Elsevier. 2009.

- ✚ VANEGAS, Alfonso; VERA, Gerardo. Diseño de sistemas de separación y tratamiento en la producción de crudo. Proyecto de Grado. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Universidad Industrial de Santander. 1988.

ANEXO B. LISTADO BIBLIOGRÁFICO: ELECTROREOLOGÍA

- ✚ ATTEN, P; FOULC, J. N; BOISSY, C. Slightly conducting spheres immersed in a dielectric liquid subjected to a DC field: Attraction force, electric field on the liquid and partial discharges. Presentación en la 13^o Conferencia Internacional de Líquidos Dieléctricos (ICDL). Japón, 1999.

- ✚ ATTEN, P; GONON, P; FOULC, J. N; BOISSY, C. Estimate of the electric stress in the liquid lying between particles of an electrorheological fluid. Presentación Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE): Conferencia de Aislamiento Eléctrico y Fenómeno Dieléctrico. Colorado (USA), 1999.

- ✚ BONNECAZE, R. T; BRADY, J. F. Dynamic simulation of an electrorheological fluid. Revista Química-Física. Vol. 96. 1992.

- ✚ CLERCX, H. J; BOSSIS, G. Many-body electrostatic interactions in electrorheological fluids. Revista Computer Physics Communications. 1993.

- ✚ DAVIS, L. C. Polarization forces and conductivity effects in electrorheological fluids. Revista Aplicaciones Físicas. Vol. 72. 1992.

- ✚ KLINGENBERG, D. J; VAN SWOL, F; ZUKOSKI, C. F. Dynamic simulation of electrorheological suspensions. Revista Química-Física. Vol. 91. 1989.

- ✚ KLINGENBERG, D. J; VAN SWOL, F; ZUKOSKI, C. F. The small shear rate response of electrorheological suspensions. II. Extensions beyond the point-dipole limit. *Revista Química-Física*. Vol. 94. 1991.

- ✚ SIU, Y. L; WAN, T. K; YU, K. W. Interparticle force in polydisperse electrorheological fluids: Beyond the dipole approximation. *Revista Computer Physics Communications*. 2001.

- ✚ YU, K. W; WAN JONES, T. K. Interparticle force in polydisperse electrorheological fluids. *Revista Computer Physics Communications*. 2000.

ANEXO C. INVESTIGACIONES Y EXPERIMENTOS EN TEMÁTICA DE SEPARACIÓN ELÉCTRICA DE FASES PARA EMULSIONES AGUA EN ACEITE

Investigador	Tipo ⁱ	Equipo ⁱⁱ	Electrodo - Campo Eléctrico ⁱⁱⁱ	Fase continua	Fase dispersa (hold-up, vol %)
Charles and Mason	B	VC	CP, d.c.	Heptano	Agua
Bailes and Larkai	C	DR	CP; pulso d.c. (1, 1.5, 60 Hz)	Escaid 100-LIX64N	H ₂ SO ₄ (saturado)
Ino et al.	B	VC	GT; a.c.	Queroseno-Span 80-LIX64N	NaCl solución acuosa.
Galvin	C	DR	CP; pulso d.c. (1-10 ⁴ Hz)	Mezcla Sol.-alámnia 336	Agua (50%)
Yamaguchi et al.	C	CV	BP; d.c.	Queroseno- Span 80	NaCl solución acuosa.
Hsu Li	C	VC	CT; a.c.	Parafina-Poliámnia-D2EHPA	FeSO ₄ sol. Acuosa (33%)
Kriechbaumer and Marr	C	DR	CP; a.c.	Shellisol-ECA4360-LIX64N	CuSO ₄ sol. Acuosa (14%)
Kataoka and Nishiji	C	DR	BP; pulso d.c.	Queroseno-Span 80-TOA, LIX64N	NaCl solución acuosa, otros.
Mori and Eguchi	B	DR	CP; a.c. (60-1800 Hz)	Dodecano-SP-010, ECA4360J	LiOH, HCl solución acuosa.
Bailes and Still	C	CV	CT; pulso a.c. (4 Hz)	Isopar M	NMP+etilenglicol (80%)
Yan et al.	B	VC	CT; pulso d.c. (0.5, 5, 50, 500 Hz)	Queroseno-Poliámnia TOA, otros	NaOH sol. Acuosa (20, 70 %)
Kumar et al.	C	CV	CT; pulso d.c. (1-100 Hz)	Escaid 100-LIX64N	Cu solución acuosa. (25, 50%)
Taylor	B	CM	GT; a.c.	Crudo	Agua destilada (5%)
Hano et al.	C	VC	CT; a.c.	Queroseno-Span 80, otros	CuSO ₄ sol. Acuosa, otros (50%)
Golp et al.	C	TH	CP; a.c.	Queroseno-Span 80-LIX64N, otros	CuSO ₄ sol. Acuosa, otros
Hauertman et al.	C	DR	CP; a.c. (0.1-2 kHz)	Queroseno-Span 80- D2EHPA, otros	H ₂ SO ₄ solución acuosa
Taylor	B	CCM	GT; a.c.	Aceite seco de Kuwait	Doble destilación de agua contenido 0-0.5M (4%)
Hirato et al.	B	TH	BP; d.c.	Queroseno	Na ₂ CO ₃ acuoso (50%)
Chen et al.	B	CME	BP; a.c. (1-50 Hz)	Aceite Buchan	Agua (20%)
Williams et al.	C	DR	CP; a.c.	Gas oil	Agua (4, 5%)
Taylor	B	CME	CP; a.c. (1-300 Hz) y pulsos d.c. (1-200 Hz)	Jet A1 Queroseno	Agua (10-20%)
Figueroa and Wagner	B	VC	CT; CT; a.c. (2000 Hz); pulsos d.c. (600 Hz)	Resinas de guayule disueltas en xileno	Agua destilada (25-50%)

ⁱ B: desemulsificación por baches; C: desemulsificación continua.

ⁱⁱ CV: columna vertical; VC: Vasija circular con flujo radial; DR: ducto rectangular; TH: vasija tubular (posición horizontal); CM: Celda microscópica; CME: celda microscópica estacionaria; CCM: Celda cilíndrica microscópica.

ⁱⁱⁱ BP: Plato desnudo; CP: Plato recubierto; CT: Tubo recubierto; GT; Tubo de vidrio; a.c.: corriente alterna; d.c.: corriente continua.

ANEXO D. CUADRO COMPARATIVO ENTRE TECNOLOGÍAS DE ELECTROCOALESCENCIA

Empresa	Hamworthy		Aker Solution		Natco	
	VIEC™	VIEC™ LV	CEC	Dual Polarity®	Dual Polarity®	Dual Frequency®
Producto	Dispositivo de Campo modular AC para ser montado existiendo el recipiente	Dispositivo de campo AC para operar aguas debajo del equipo VIEC™	Recipiente vertical con campo en línea AC aguas arriba del separador	Recipiente del separador equipado con paquetes de electrodos	Igual a dual Polarity solo cambia la frecuencia de modulación	
Voltaje secundario estimado	5kV	5kV	5kV	30kV	30kV	
Campo eléctrico estimado	2kV/cm AC	2kV/cm AC	2kV/cm AC	2kV/cm DC 0.4kV/cm AC	2kV/cm DC 0.4kV/cm AC	
Aislamiento	Electrodos aislados	-	Electrodos recubiertos cargados	Acero desnudo o electrodos recubiertos	-	
Exposición a el campo eléctrico	Electrodos aislados	30 a 150s	4 a 20s	110 a 160s	70 a 120s	
Atracción dipolar	Moderado	Bajo	Alto	Moderado	Moderado	
Electroforesis	Baja	Baja	Baja	Alta	Alta	
Campo eléctrico estimado	Bajo	Alto	Moderado	Bajo	Bajo	
Máximo BS&W	100%	100%	40%	40%	40%	
Máxima tracción de Gas	100%	100%	7%	Menos del 7% (desgasificado)	Menos del 7% (desgasificado)	
Acceso para mantenimiento	Cierre de planta	Cierre de planta	-	Cierre de planta	Cierre de planta	
Máxima tasa de flujo	Modularidad del dispositivo existiendo el separador	Puede ser adaptado existiendo el separador	-	-	-	
Fuente: Autores.						

ANEXO E. CUADRO COMPARATIVO TÉCNICO ENTRE TECNOLOGÍAS PARA EL TRATAMIENTO DE CRUDO

EQUIPO	COSTO DE INSTALACIÓN	COSTO DE OPERACIÓN	EFICIENCIA	COMPLEJIDAD DEL EQUIPO	MANTENIMIENTO	CAPACIDAD	DESARROLLO
Gun Barrel	MEDIO	BAJO	MEDIA	SIMPLE	BAJO	ALTA	AVANZADO
Tratador Térmico	ALTO	ALTO	ALTA	ALTA	ALTO	MEDIA	AVANZADO
Tratador Centrifugo	ALTO	MEDIO	ALTA	MEDIA	ALTO	ALTA	INTERMEDIO
Tratamiento Químico	MUY BAJO O NULO	ALTO	ALTA	SIMPLE	BAJO	ALTA	AVANZADO
AC	ALTO	MEDIO	ALTA	ALTA	MEDIO	ALTA	AVANZADO
DC	ALTO	ALTO	MEDIA	ALTA	ALTO	ALTA	AVANZADO
CEC	MEDIO	MEDIO	ALTA	MEDIA	MEDIO	BAJA	AVANZADO
VIEC	ALTO	MEDIO	ALTA	ALTA	MEDIO	MEDIA	INTERMEDIO
Dual Polarity	ALTO	ALTO	MUY ALTA	ALTA	ALTO	ALTA	INTERMEDIO
Dual Frequency	ALTO	ALTO	MUY ALTA	ALTA	ALTO	ALTA	INTERMEDIO
Dual Frequency Multiple Etapa	MUY ALTO	MUY ALTO	MÁXIMA	MUY ALTA	ALTO	ALTA	ESCASO
Centrifugador Dual Frequency	ALTO	ALTO	MUY ALTA	ALTA	ALTO	ALTA	ESCASO

Fuente: Autores.