



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

TECNOLOGÍAS DE DESEMULSIFICACIÓN MEDIANTE
CAMPO ELÉCTRICO.

TRABAJO MONOGRÁFICO DE
ACTUALIZACIÓN.

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO QUÍMICO



P R E S E N T A
FERNANDO MENA ARELLANO

MÉXICO, D.F. A 22 DE OCTUBRE DEL 2012.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

...Yahveh es mi pastor, nada me falta.
Por prados de fresca hierba me apacienta. Hacia las aguas de reposo me conduce,
y conforta mi alma; me guía por senderos de justicia, en gracia de su nombre.
Aunque pase por valle tenebroso, ningún mal temeré, porque tú vas conmigo; tu vara y tu
cayado, ellos me sosiegan.
Tú preparas ante mí una mesa frente a mis adversarios; unges con óleo mi cabeza,
rebosante está mi copa.
Sí, dicha y gracia me acompañarán todos los días de mi vida; mi morada será la casa de
Yahveh a lo largo de los días.

Salmo 23
Fuente(s):
Biblia de Jerusalem
Revisión 1976.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: PROFESOR: JOSE ANTONIO ORTIZ RAMIREZ.
VOCAL: PROFESOR: FRANCISCO JAVIER GARFIAS VAZQUEZ.
SECRETARIO PROFESOR: PEDRO ROQUERO TEJEDA.
1er. SUPLENTE PROFESOR: TATIANA EUGENIEVNA KLIMOVA
BERESTNEVA
2º SUPLENTE PROFESOR: ALFONSO DURAN MORENO.

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: FACULTAD DE QUÍMICA EDIFICIO “E” LABORATORIO 222 CIUDAD UNIVERSITARIA

ASESOR DEL TEMA: PEDRO ROQUERO TEJEDA _____

SUSTENTANTE: FERNANDO MENA ARELLANO _____

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	5
CAPÍTULO I. EMULSIONES	7
1. Emulsiones	8
1.1 Emulsión agua en petróleo. (A/O).	9
1.2 Emulsión petróleo en agua. (O/A)	11
CAPÍTULO II. MECANISMO DE COALESCENCIA DE GOTAS	13
2. Mecanismo de coalescencia de gotas	14
2.1 Procedimiento numérico	17
CAPÍTULO III. SEPARACIÓN DE EMULSIONES AGUA EN PETRÓLEO	32
3. Separación de emulsiones agua en petróleo	33
CAPÍTULO IV. FUERZAS QUE INTERVIENEN	39
4.1 Gravedad	40
4.2 Fuerza eléctrica	43
CAPÍTULO V. EQUIPOS	53
CONCLUSIONES	59
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
AGRADECIMIENTOS	66

INTRODUCCIÓN.

El petróleo crudo proveniente de los diversos pozos petroleros contiene ciertas impurezas, que es necesario eliminar para el buen funcionamiento de las plantas de procesamiento del crudo, para evitar dañar los equipos principalmente por corrosión.

Entre los contaminantes que pueden estar presentes se tienen los siguientes:

SÓLIDOS: Son partículas no solubles en agua ni en aceite, las cuales pueden ser eliminadas en el proceso de lavado del petróleo crudo antes de recibirlo en los tanques, o bien en las desaladoras. Entre los sólidos más comunes se encuentran: arena, arcilla, ceniza volcánica, lodo, herrumbre, sulfato férrico, y algunos metales.

COMPUESTOS ORGANOMETÁLICOS: estos compuestos están presentes en el crudo en altas concentraciones, y son principalmente compuestos de coordinación formados entre elementos metálicos (Vanadio, Níquel, Cobre y Hierro entre otros) y moléculas orgánicas

SALES : Entre las sales que pueden estar presentes en el crudo se encuentran, NaCl, CaCl₂, MgCl₂, sulfatos y carbonatos, las cuales son los contaminantes de mayor cuidado, ya que se hidrolizan con la temperatura formando ácidos clorhídrico y sulfúrico; originando corrosión, incrustación en los equipos y ocasionando efectos adversos en la cantidad y calidad de productos refinados. Las sales de sodio representan el 75% de las sales totales, las de magnesio el 15% y las de calcio el 10%.⁽¹⁾

La sección de desalado en las plantas de destilación atmosférica es un proceso de extracción líquido - líquido, donde el crudo es mezclado mecánicamente con agua para posteriormente ser desemulsificado bajo el efecto de un campo eléctrico, permitiendo remover las impurezas (sólidos, sedimentos, sales) en la fase acuosa, dentro de este proceso intervienen fuerzas de atracción y de repulsión entre las gotas de agua, como la fuerza eléctrica y la fuerza de gravedad. Básicamente el proceso consiste en generar un campo eléctrico sobre la emulsión, de tal forma que las gotas de agua que contienen sales disueltas se orienten eléctricamente, con el fin de generar un movimiento de éstas dentro de la emulsión así como las colisiones que fomentarán la coalescencia de estas, concluyendo con la separación de fases. Además, que es posible agregar otros factores que se encuentran relacionados con la separación de las fases, como la agitación, el calentamiento y factores propios de la emulsión como el tipo de emulsión, referente a cuál es la fase que se tiene como fase continua y fase dispersa, el tamaño de las gotas dispersas, las densidades de los líquidos, la tensión interfacial, y la existencia de otras sustancias dentro de la emulsión además de sales, como por ejemplo sustancias que actúen físicamente como tensoactivos o presenten alguna otra propiedad que tenga un efecto sobre la emulsión.

En el presente trabajo se analiza teóricamente el proceso físico que se lleva a cabo dentro de una emulsión con base en teorías propuestas por diversos autores, haciendo múltiples consideraciones, con el fin de ofrecer conclusiones que puedan ser útiles en el desarrollo de procesos de desalado de petróleo.

CAPÍTULO I

EMULSIONES.

1.- EMULSIONES.

A continuación se enumeran algunas de las múltiples definiciones de emulsión:⁽²⁾

- 1.- Una emulsión es una dispersión muy fina de un líquido en otro con el que es inmisible.
- 2.- Una emulsión es un sistema que contiene dos fases líquidas, una de ellas se dispersa en forma de glóbulos en la otra.
- 3.- Las emulsiones son mezclas mecánicas de líquidos que son inmiscibles en condiciones ordinarias, las cuales pueden ser separadas en capas mediante reposo, calentamiento, enfriamiento, por agitación o por adición de otros productos químicos.
- 4.- Una emulsión es un sistema líquido de dos fases que consiste en dispersiones abundantes de un líquido en otro con el que no es miscible.
- 5.- Las emulsiones son mezclas íntimas de dos líquidos inmiscibles, uno de ellos se dispersa en el otro en forma de finas gotas.
- 6.- Las emulsiones son líquidos finamente divididos en sustancias semi-sólidas.
- 7.- Las emulsiones son gotas visibles al microscopio, de un líquido suspendido en otro.
- 8.- Las emulsiones son mezclas estables e íntimas de aceite o material oleoso con agua.
- 9.- Una emulsión consiste en una dispersión estable de un líquido en otro líquido.

Todas estas definiciones son válidas, sin embargo no todas abarcan completamente las características de las emulsiones, por ejemplo, sólo las definiciones (8 y 9) hacen referencia a la estabilidad de las emulsiones, sólo la definición (3) hace referencia a la inestabilidad, sólo la definición (7) tiende a limitar el tamaño de las gotas de la fase dispersa, algunas de

las definiciones no hacen referencia a la inmiscibilidad (2,6,7,8 y 9) y por último la definición (6) se encuentra completamente fuera de la idea de emulsión.

A partir de lo anterior trabajaremos con una definición propia que retoma parte de las anteriores para complementarse, así una emulsión es una dispersión de un líquido en otro, siendo estos líquidos inmiscibles entre sí.

1.1 Emulsión agua en petróleo. (A/O).

El petróleo se encuentra compuesto de muchos componentes de unas pocas series de hidrocarburos, así como de diversos elementos como Hierro, Calcio, Magnesio, Silicio, Aluminio, Vanadio, Níquel, Cobre, Manganeso, Estroncio, Bario, Boro, Cobalto, Zinc, Molibdeno, Plomo, Estaño, Potasio, Litio, así como de compuestos de Azufre, estos elementos pueden encontrarse disueltos en la fase continua (petróleo crudo) o en la fase dispersa (agua), o como sólidos insolubles y representan al grupo de impurezas que se deben eliminar del petróleo mediante la aplicación de distintos métodos. El petróleo lo podemos describir físicamente como una mezcla líquida de color verde oscuro a negro, de peso específico comprendido entre 0.810 a 0.985 con un intervalo de ebullición de 27° a 370° C.

Debido a la explotación de un pozo petrolero, existe una disminución de la presión dentro del mismo, por lo que es necesario introducir un gas o agua en el pozo, para mantener la presión interior y así extraer la mayor cantidad de petróleo posible.

La proporción de agua emulsionada con el petróleo puede ser mayor, particularmente cuando existe una repentina caída de presión dentro del yacimiento, y cuando esto sucede es muy probable que el agua suba a la superficie emulsionada con el petróleo.

Parece probable que las emulsiones se formen por agitación que lleva consigo la etapa de producción-bombeo, o flujo a través de pequeños orificio, por lo que, cualquier cosa que reduzca la agitación también reducirá la cantidad de emulsión generada.⁽³⁾

Un fenómeno interesante reportado en la bibliografía refiere que se ha observado que prácticamente nunca se producen emulsiones con petróleos parafínicos de baja densidad, y que en cambio son frecuentes con petróleos pesados de tipo asfáltico.

Uno de los primeros trabajos precursores referentes al tema en cuestión realizado por Sherrick, demuestra que la naturaleza de las emulsiones son siempre del tipo agua en petróleo crudo, y que en sus muestras estudiadas, las gotas de agua estaban cargadas negativamente,⁽³⁾ sugirió que los agentes emulsionantes y estabilizadores son partículas de lodo que transportan partículas de material asfáltico absorbido, y posteriormente se demuestra que prácticamente estas emulsiones pueden descomponerse al eliminar de la misma el asfalto, independientemente del método que se utilice.

La emulsión agua en petróleo crudo es considerada una dispersión de gotas de agua en petróleo, en la cual las gotas de agua pueden variar de tamaño, así como la concentración de agua en relación con la cantidad de petróleo que se tenga. Físicamente hablamos de dos líquidos que son inmiscibles entre sí, además de contar con otras características como la diferencia de densidades o la tensión interfacial, que los hace prácticamente imposible de mezclar uno en el otro.

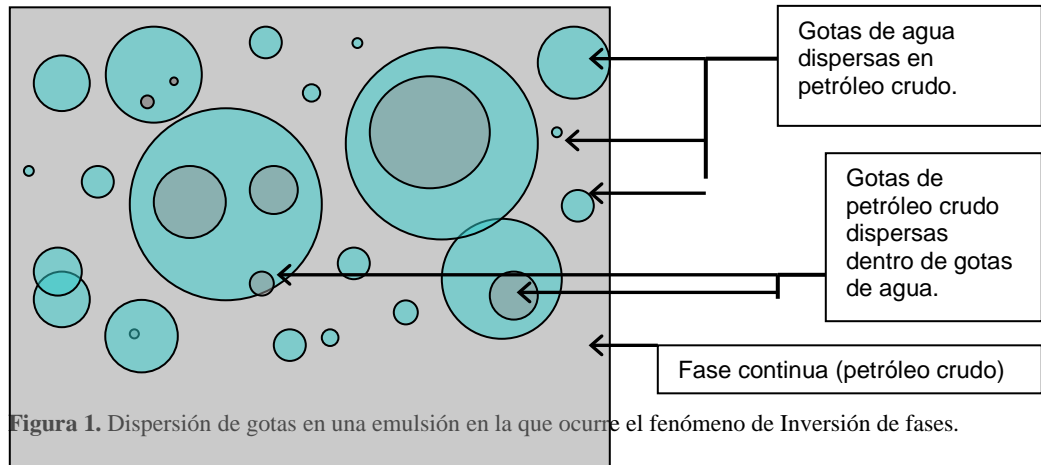
La emulsión agua en petróleo así como la emulsión petróleo crudo en agua contendrá ciertas impurezas que deben ser eliminadas dentro de los procesos a los que es sometido,

como sales, sólidos insolubles y múltiples compuestos que se encuentran en estado líquido, que dan diversas propiedades a la emulsión, como por ejemplo los compuestos de azufre que contiene el petróleo y que además tienen la característica de ser polarizables al encontrarse bajo el efecto de un campo eléctrico.

1.2 Emulsión petróleo en agua.

Cuando la emulsión agua en petróleo crudo se rompe mediante algún método químico, se suministra un agente tal que, añadido solo, formaría una emulsión del tipo opuesto al que se tenía originalmente. Así, a una emulsión del tipo agua en petróleo, se le puede agregar un agente emulsionante hidrofóbico, es decir soluble en petróleo, como por ejemplo jabón sódico, el cual disminuirá la acidez de la emulsión que le da estabilidad a la misma, formando una dispersión del tipo inverso (petróleo en agua). Estos métodos han sido aplicados con gran éxito, salvo la dificultad de que los agentes emulsionantes del tipo petróleo en agua no suelen ser fácilmente solubles en el petróleo, que es normalmente la fase continua, de manera que es necesario incluir una sustancia soporte que ayude a la distribución del agente activo.

Existe un fenómeno llamado “inversión de fases,” que puede iniciarse en un sistema que contenga una emulsión, para este caso podemos decir que si tuviéramos una emulsión del tipo agua en petróleo crudo, podría ocurrir una inversión de fases, lo que causaría que dentro de nuestro sistema tuviéramos ambos tipos de emulsión coexistiendo simultáneamente, teniendo pequeñas gotas de petróleo crudo, dentro de las gotas de agua que se encuentran dispersas en una fase continua de petróleo crudo.



Durante una inversión de fases se puede presentar la situación de tener gotas de petróleo crudo dispersas en gotas de agua dispersas en una fase continua de petróleo crudo.

La causa fundamental de la existencia de este tipo de emulsión (petróleo en agua), es explicada de manera tal que se atribuye en gran parte a la relación en volumen de cada una de las fases que exista en el sistema.

CAPÍTULO II

MECANISMO DE COALESCENCIA

DE GOTAS.

2.- MECANISMO DE COALESCENCIA DE GOTAS.

La coalescencia es la unión entre las gotas en el sistema líquido-líquido, denominado emulsión. Ya sea por la aplicación de un campo eléctrico de alto voltaje que da origen a la migración de las gotas hacia los electrodos, al movimiento ocasionado por las corrientes térmicas del calentamiento, a la agitación mecánica de la emulsión, o la fuerza de gravedad que actúa sobre las gotas suspendidas en la emulsión, lo importante es que el movimiento ocasione choques entre gotas e inestabilidad de las películas líquidas que las rodean para lograr la coalescencia.

La colisión de dos gotas en una emulsión puede ser acompañada por una deformación, dependiendo de la energía de interacción entre las gotas. En general el espacio entre dos gotas no deformadas puede ser considerado como una película líquida de un desigual espesor. Estas finas películas de líquido pueden ser mejor apreciadas en aquellas emulsiones de estructuras parecidas a las espumas. Se puede esperar que la estabilidad de las emulsiones esté fuertemente determinada por las propiedades de la fina película.

Son tres los escenarios que pueden representar el comportamiento de dos gotas chocando en una emulsión, dependiendo de las propiedades de la película.

1.- Cuando la película formada entre las partículas que choca es estable, las partículas forman un floculo.

2.- Cuando la interacción atractiva a través de la película es predominante, la película es inestable y se rompe, esto conduce a la unión de las gotas en la emulsión o a la unión de las burbujas en el caso de una espuma.

3.- Si las fuerzas repulsivas son predominantes, las dos partículas que chocan se rechazan mutuamente y la emulsión permanecerá estable.

La interacción hidrodinámica entre partículas depende tanto del tipo de movimiento del fluido como del tipo de interfase.

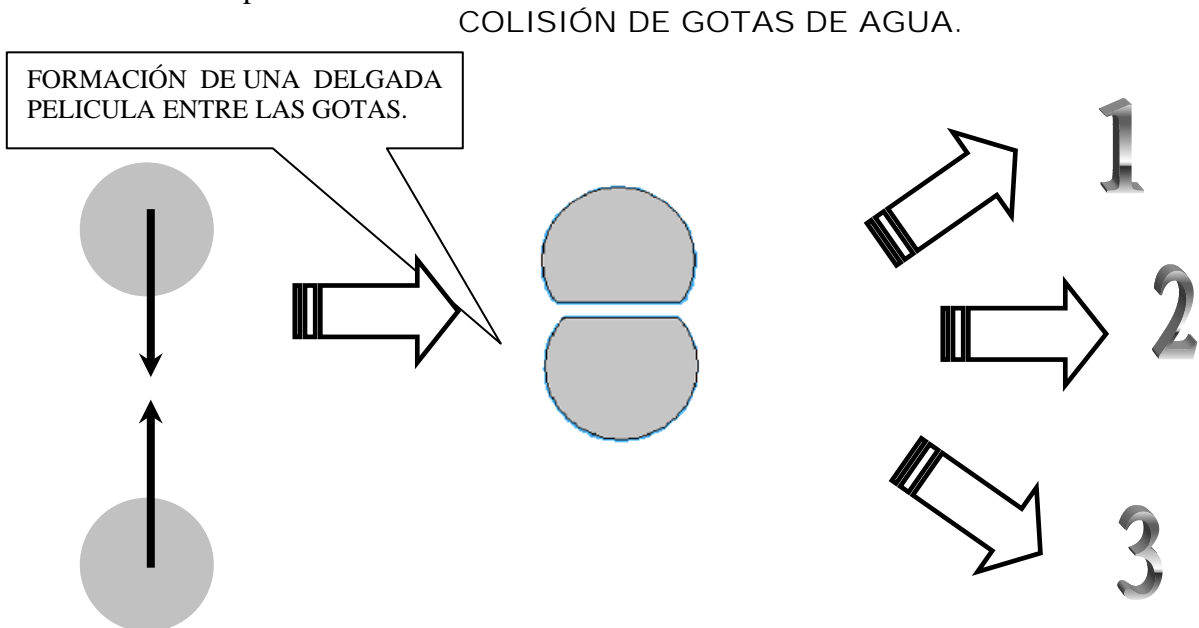


Figura 2. Colisión de gotas de agua en una emulsión de tipo (agua en petróleo). Ref. (4).

FLOCULACIÓN: Las gotas de la fase dispersa se agrupan formando agregados de gotas sin unirse. En estos grupos las gotas no pierden completamente sus características individuales, y la formación de estos grupos es reversible.

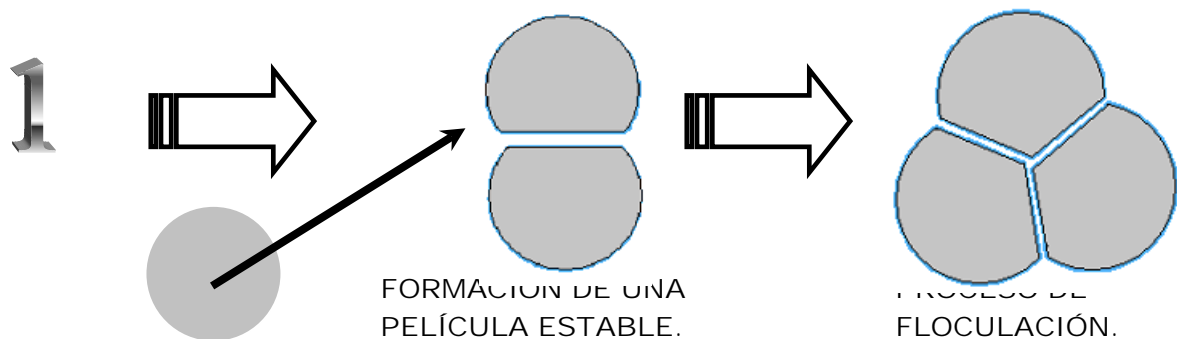


Figura 3. El primero de los escenarios dentro del mecanismo de coalescencia de gotas es aquel que da lugar a la floculación... Ref. (4).

El segundo escenario dentro del mecanismo de coalescencia corresponde a la posibilidad en la que la fuerza de las películas líquidas de las gotas sea mucho mayor a la fuerza con la que colisionan, ocasionando la repulsión de las gotas.

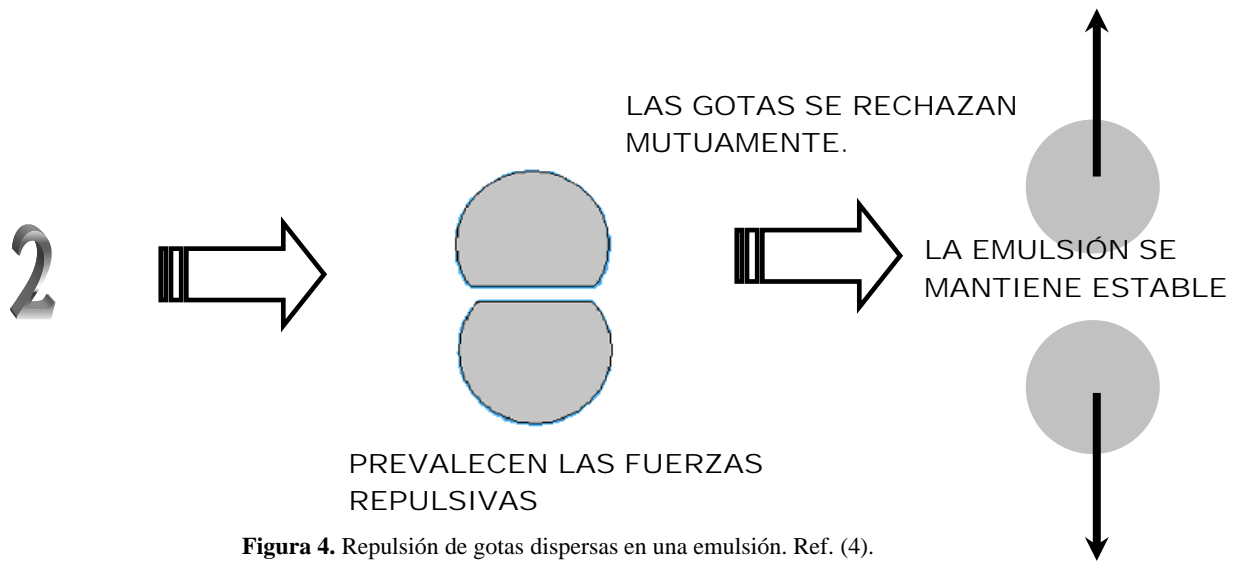


Figura 4. Repulsión de gotas dispersas en una emulsión. Ref. (4).

COALESCENCIA: Las pequeñas gotas dispersas, así como los agregados formados de la posible floculación se unen para formar gotas más grandes.

Este último escenario ocasiona una disminución en el número de gotas y que finalmente se complete la desemulsificación, ya que las gotas de mayor tamaño, resultado de la coalescencia tienden a desplazarse a su homofase por gravedad.

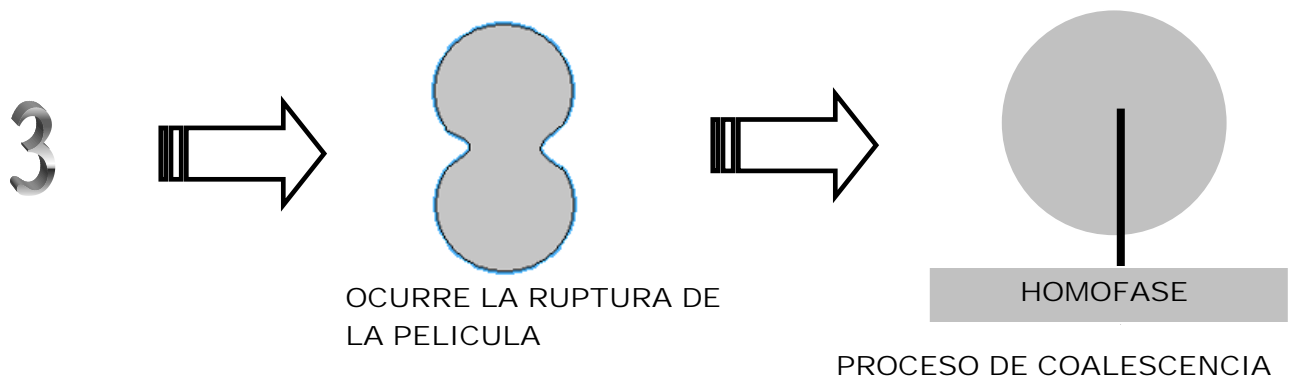


Figura 5. Unión de gotas pequeñas para formar gotas de mayor tamaño, que tienden a caer debido a la fuerza de gravedad. Ref. (4).

2.1 Procedimiento numérico.

SITUACIÓN I

Para cualquiera de los tres escenarios antes mostrados que puedan presentarse, se tendrá como principio fundamental que las gotas deben interactuar debido a una determinada velocidad y fuerza.

Esta primer situación contempla una velocidad de aproximación de dos gotas que sufren una deformación en el momento preciso de la colisión, y se encuentra dada por la siguiente ecuación⁽⁴⁾:

$$V = \frac{2}{3} \frac{hFz}{\pi\eta R_*^2 \left(1 + \frac{R^2}{hR_*} + \frac{R^4}{h^2 R_*^2} \right)} \dots\dots\dots(1)$$

Esta ecuación se encuentra determinada a partir de ciertas consideraciones que es preciso mencionar, ya que surge de considerar la aproximación de dos discos planos de distinto tamaño de radio, como analogía de una colisión de gotas de diferente tamaño, como se observa en la siguiente figura.

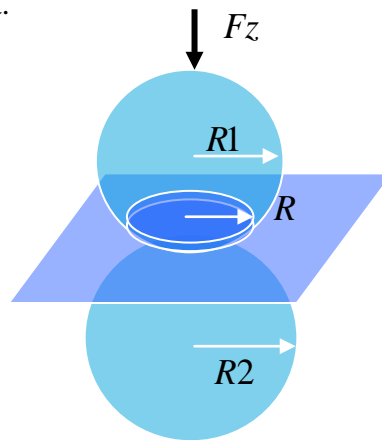


Figura 6. Interacción de dos gotas de diferente radio. Ref. (4).

El espesor de la película denominado (h), entre dos gotas, sufre de una pequeña deformación que no será considerada.

Por lo tanto:

[R] es la longitud de la deformación de las gotas, que será igual a:

$$R = (Fz R_d / 2 \pi \sigma)^{1/2} \dots\dots\dots(2). \text{ Ref. (4).}$$

Donde:

Fz es la fuerza de atracción entre las gotas.

η es la viscosidad [Poise]

h es el espesor de la película entre las gotas.

π toma el valor de 3.14159265

σ es la tensión interfacial del sistema [N/m]

Rd es el radio de las gotas [m].

Así mismo, R* representa el ajuste que se hace para la situación en que se tengan gotas de diferente radio que colisionan.

$$R_* \equiv \frac{2R_1R_2}{(R_1+R_2)} \dots\dots\dots(3). \text{ Ref. (4).}$$

R1 representará el radio de la gota número 1

R2 será el radio de la gota numero 2

Si R1 es igual a R2 las gotas tienen el mismo radio y se utilizara R* igual a 2 Rd cuando la distancia (h) entre gotas sea pequeña comparada con su radio⁽⁴⁾.

Si la velocidad con la que se rompe la película entre las gotas se define como el cambio del espesor h con respecto al tiempo.

$$V = -\frac{dh}{dt} \dots\dots\dots (4).$$

$$\int dt = -\int \frac{dh}{dV} \dots\dots\dots (5).$$

así entonces podemos obtener el tiempo de vida de las gotas a partir de la integral definida siguiente:

$$\tau = -\int_{hi}^{hf} \frac{dh}{V} \dots\dots\dots (6).$$

Introduciendo el signo negativo a la integración se invierten los límites de integración, y tenemos que:

$$\tau = \int_{hf}^{hi} \frac{dh}{V} \dots\dots\dots (7).$$

Si se considera una situación en la que las gotas sufren cierta deformación debida a la colisión, y sustituyendo la ecuación (1) en (4) e integrando, se tiene el tiempo de vida de las gotas (τ).

$$\tau = \int_{hf}^{hi} \frac{dh}{V} = \int_{hf}^{hi} \frac{3\pi\eta R_*^2 dh}{2hFz} \left[1 + \frac{R^2}{hR_*} + \frac{R^4}{h^2 R_*^2} \right] \dots\dots\dots (8)$$

Integrando:

$$\tau = \frac{3\eta\pi R_*^2}{2Fz} \left[\text{Ln} \left(\frac{h_i}{h_f} \right) + \frac{R^2}{h_f R_*} \left(1 - \frac{h_f}{h_i} \right) + \frac{R^4}{2h_f^2 R_*^2} \left(1 - \frac{h_f^2}{h_i^2} \right) \right] \dots\dots\dots (9)$$

En donde R corresponde a la ecuación (2):

$$R^2 = \frac{FzRd}{2\pi\sigma} \dots\dots\dots (10)$$

En la que:

σ es la tensión interfacial del sistema [N/m]

Rd es el radio de las gotas [m].

hi es el espesor inicial de la película [m].

hf es el espesor final de la película y puede corresponder al espesor crítico de ruptura de la película [m].

Fz es la fuerza de atracción entre las gotas [N]

En este caso la fuerza de atracción entre gotas corresponde a la fuerza gravitatoria dada por la ecuación:

$$Fz = m \cdot g \dots\dots\dots (11).$$

En la que (m) es la masa de las gotas y es igual al volumen, multiplicado por la densidad de las mismas (ρv), y (g) corresponde a 9.81m/s^2 , (v) se considera el volumen de una esfera, para finalmente obtener la ecuación siguiente:

$$Fz = \frac{4}{3} \pi R_d^3 g \Delta \rho \dots\dots\dots (12).$$

SITUACIÓN II

Para esta situación se parte de la hipótesis de que **no existe deformación de las gotas en el momento de la colisión, y que la velocidad de aproximación de estas dos gotas, estará dada por la ecuación (1)^{REF(4)}, en la que se reducen algunos términos al considerar $R = 0$.**

$$V = \frac{2}{3} \frac{hFz}{\pi\eta R_*^2 \left(1 + \frac{(R \rightarrow 0)^2}{hR_*} + \frac{(R \rightarrow 0)^4}{h^2 R_*^2} \right)} \dots\dots\dots (13).$$

Originando que:

$$V = \frac{2hFz}{3\pi\eta R_*^2} \dots\dots\dots (14)$$

De esta forma, (V) es la velocidad de aproximación de dos gotas que no presentan deformación en el momento que ocurre la colisión, por lo que se entenderá que coalescen en el momento preciso en que tienen contacto unas con otras, lo que dará una aproximación a una situación ideal en la que se tendrá una desemulsificación rápida.

Fz es la fuerza en la dirección z, (Rd) es el radio de la gota, h es el espesor de la película, y R es el radio de la película líquida que se forma debido a la interacción de las gotas.

(η) es la viscosidad [Poise], y (π) toma el valor de 3.14159265.

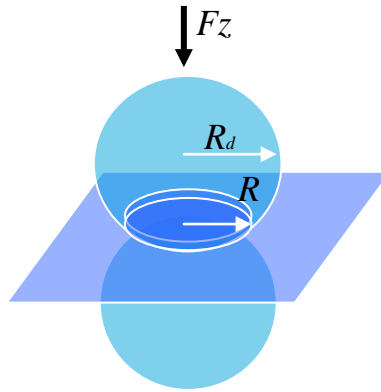


Figura 7. Interacción de dos gotas de igual radio. ($R_1=R_2=R_d$).

Supondremos gotas con el mismo radio para utilizar R_* igual a $2 R_d$ en la ecuación (3), quedando de la siguiente manera:

$$V = \frac{2hFz}{3\pi\eta(2R_d)^2} \dots\dots\dots (15).$$

Es necesario mencionar que en el momento de una colisión entre gotas de agua de distinto tamaño existirá una deformación de la película líquida que es considerado despreciable.

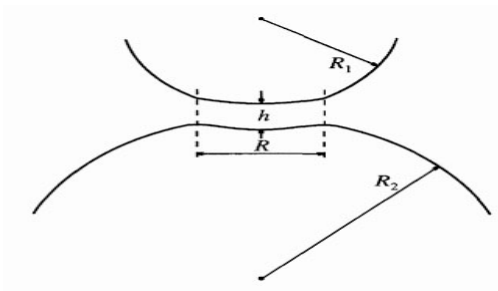


Figura 8. Deformación de la película líquida entre dos gotas de diferente radio.

Por consiguiente al sustituir e integrar de manera similar que la primera de las situaciones, tendremos que:

$$\tau = \frac{6\pi\eta R d^2}{F_z} \operatorname{Ln} \frac{h_i}{h_f} \dots\dots\dots (16)$$

Considerando Fz de la misma manera que en la primera situación y sustituyendo se tendrá:

$$\tau = \frac{9\eta}{2gRd\Delta\rho} \operatorname{Ln} \frac{h_i}{h_f} \dots\dots\dots (17)$$

Función que corresponde a una situación en la que tenemos una separación ideal de fases.

Ahora ya contando con las ecuaciones de (τ) tiempo de vida de gotas, se utilizaron los siguientes valores para cada una de las variables y así tabular los datos generados en ambas situaciones.

$$\Delta\rho = 200 \text{ [Kg/ m}^3\text{]}$$

$$\eta = 0.001 \text{ [Poise]}$$

$$\sigma = 0.001 \text{ [N/m]}$$

$$h_i = 5 \text{ [nm]}$$

$$h_f = R d / 10 \text{ [nm]}$$

Rd tomará el valor arbitrario inicial de 1E-6 [m].

Como resultado de sustituir valores variables de Rd en la ecuación de tiempo de vida de gotas en emulsión para la **situación** específica tipo **I**, así como valores variables de tensión

interfacial (de 0.001,0.003, 0.010, y 0.030 [N/m]) tendremos como resultado la siguiente tabla de datos.

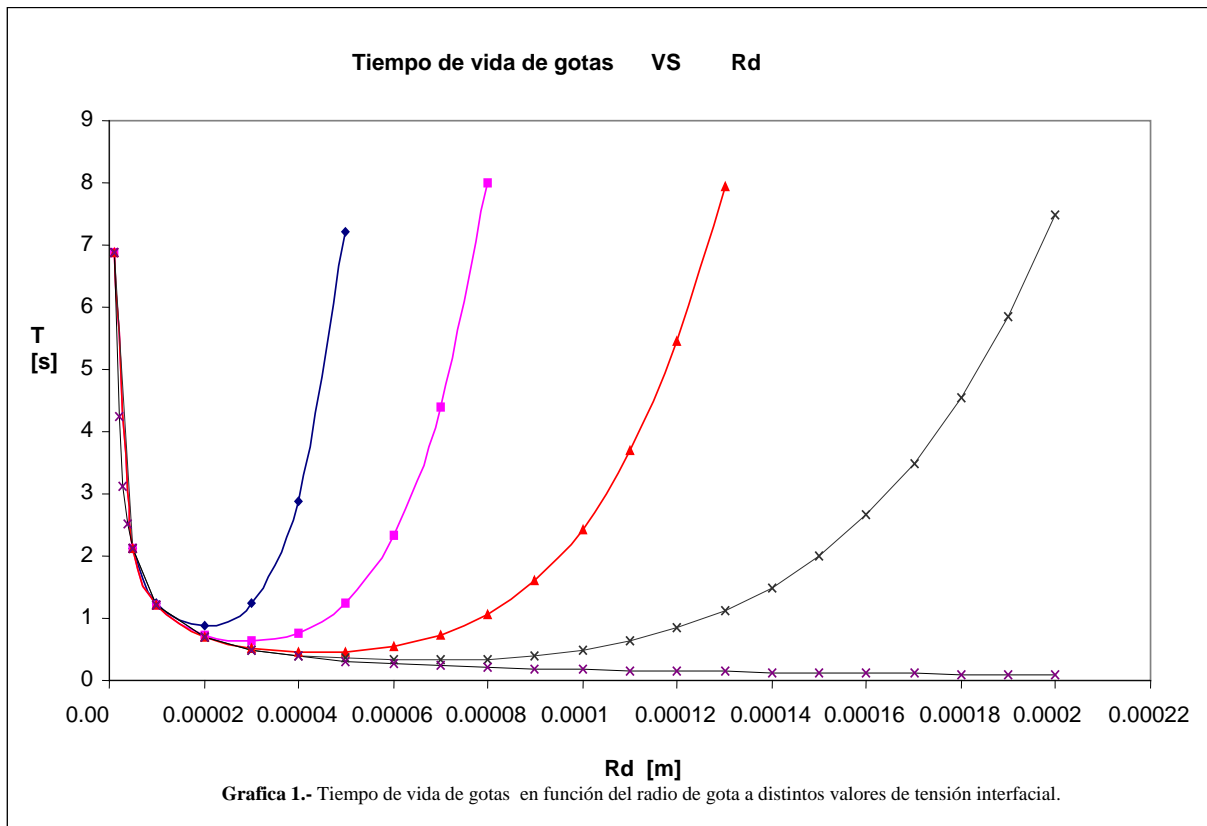
Rd(m)	hin (m)	G (m/s ²)	$\Delta\rho$ (Kg/m ³)	R* (m)	Fz(Kg m / s ²)	Tension interf.(N/m)	Viscosidad (Poise)	R(m)	hf (m)	Tiempo de vida (τ)[s]
1.00E-06	1.00E-07	9.81	200	2.00E-06	8.22E-15	0.001	0.001	1.14368E-09	5.00E-09	6.870000000
5.00E-06	5E-07	9.81	200	0.00001	1.0273E-12	0.001	0.001	2.8592E-08	5.00E-09	2.119949694
1.00E-05	1E-06	9.81	200	0.00002	8.21841E-12	0.001	0.001	1.14368E-07	5.00E-09	1.247022356
2.00E-05	2E-06	9.81	200	0.00004	6.57472E-11	0.001	0.001	4.57471E-07	5.00E-09	0.869578166
3.00E-05	3E-06	9.81	200	0.00006	2.21897E-10	0.001	0.001	1.02931E-06	5.00E-09	1.235376576
4.00E-05	4E-06	9.81	200	0.00008	5.25978E-10	0.001	0.001	1.82989E-06	5.00E-09	2.871776818
5.00E-05	5E-06	9.81	200	0.0001	1.0273E-09	0.001	0.001	2.8592E-06	5.00E-09	7.197363377

Y obteniendo los siguientes datos para la **SITUACIÓN II**: En la que consideramos que no existe deformación de las gotas en el momento de la colisión.

Rd(m)	hin (m)	g (m/s ²)	dw - doil (Kg/m ³)	R* (m)	Fz(Kg m / s ²)	Tensión inter.(N/m) (P)	Viscosidad (P)	R(m)	hf (m)	Tiempo de vida (s)
1.00E-06	1.00E-07	9.81	200	2.00E-06	8.22E-15	0.001	0.001	1.1437E-09	5.00E-09	6.87E+00
5.00E-06	5E-07	9.81	200	0.00001	1.0273E-12	0.001	0.001	2.8592E-08	5.00E-09	2.11E+00
1.00E-05	0.000001	9.81	200	0.00002	8.21841E-12	0.001	0.001	1.1437E-07	5.00E-09	1.22E+00
2.00E-05	0.000002	9.81	200	0.00004	6.57472E-11	0.001	0.001	4.5747E-07	5.00E-09	6.87E-01
3.00E-05	0.000003	9.81	200	0.00006	2.21897E-10	0.001	0.001	1.0293E-06	5.00E-09	4.89E-01
4.00E-05	0.000004	9.81	200	0.00008	5.25978E-10	0.001	0.001	1.8299E-06	5.00E-09	3.83E-01
5.00E-05	0.000005	9.81	200	0.0001	1.0273E-09	0.001	0.001	2.8592E-06	5.00E-09	3.17E-01

La gráfica (tiempo de vida de gotas vs. radio de gotas) muestra que al principio para valores relativamente pequeños de Rd, el tiempo de vida tiende a disminuir hasta llegar a un rango de valores de Rd que hacen que el tiempo de vida de estas gotas sea mínimo, para después comenzar a aumentar nuevamente, ya sea debido a que las gotas se rechazan o simplemente sólo llegan a flocular.

Las cuatro primeras curvas son útiles para el efecto benéfico que se tiene al aumentar la tensión interfacial para lograr la coalescencia de gotas. La quinta curva asintótica en ambos ejes es la que muestra el comportamiento de las, suponiendo que estas coalescen en el momento de la colisión. gotas



Grafica 2.- Tiempo de vida de gotas en función del radio de gota [m] y de la tensión interfacial [N/m].

Al aplicar un campo eléctrico de alto voltaje, existe una aportación de fuerza sobre las gotas. La fuerza eléctrica, F_e , hace que el término de F_z aumente y por consiguiente se espera que disminuya el tiempo de vida de las gotas.

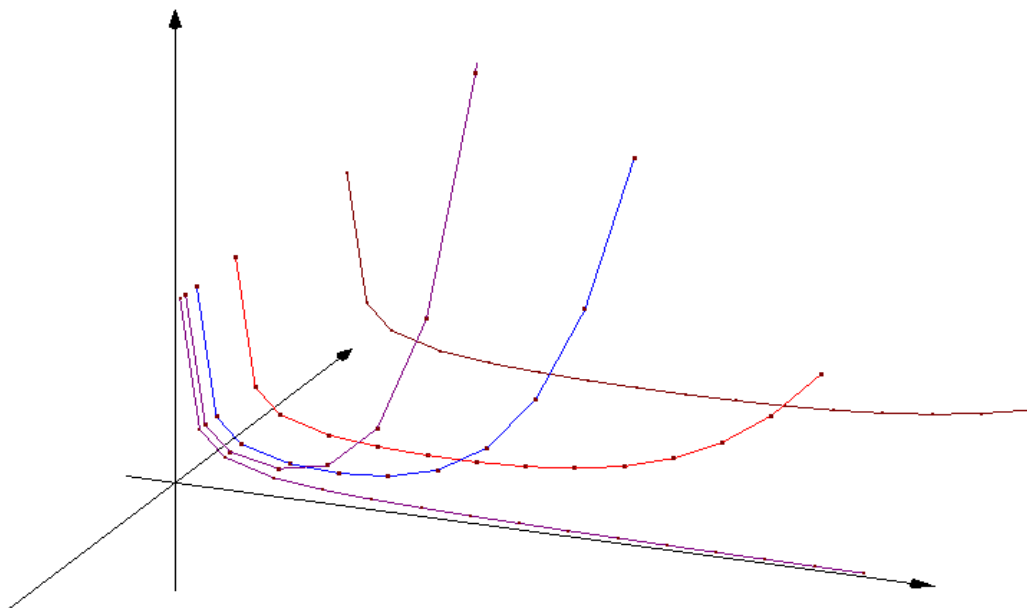
De esta manera la fuerza total ejercida sobre las gotas será:

$$F_T = F_z + F_e \dots\dots\dots(18)$$

Por lo que es importante encontrar una relación entre el potencial aplicado y la fuerza eléctrica para sumarlo a la F_z y conocer el efecto, el cual se espera de antemano benéfico para lograr la coalescencia de gotas.

Así al aumentar la fuerza eléctrica sobre las gotas, se podría esperar que el tiempo de vida de estas disminuya, es necesario utilizar una relación matemática entre la intensidad de campo eléctrico aplicado y la fuerza que este ejercerá sobre dichas gotas.

Una ecuación matemática que es útil para relacionar la fuerza eléctrica ejercida sobre las gotas de agua al aplicar un campo eléctrico es: ⁽⁵⁾:



$$F_e = 4 \pi \epsilon \epsilon_0 C_f R_d^2 E^2 \dots\dots\dots(19)$$

Donde: C_f coeficiente de carga, aproximadamente igual a 1.12

ϵ_0 permitividad del vacío = 8.85 E-12 (F/m)

ϵ constante dieléctrica de la fase continua = 2

R_d radio de la gota en (m)

E Intensidad de campo eléctrico (V/m)

Para conocer el efecto de la fuerza eléctrica sobre el tiempo de vida de gotas, consideramos sólo el efecto de esta fuerza sobre las gotas, sustituyendo la ecuación (19) en (8), para analizar el efecto de la fuerza eléctrica F_e en lugar de F_z , de la siguiente manera:

$$\tau = \frac{3\eta\pi R_*^2}{2(C_f \epsilon_o \epsilon R_d^2 E^2)} \left[\text{Ln} \left(\frac{h_i}{h_f} \right) + \frac{R^2}{h_f R_*} \left(1 - \frac{h_f}{h_i} \right) + \frac{R^4}{2h_f^2 R_*^2} \left(1 - \frac{h_f^2}{h_i^2} \right) \right] \dots\dots(20)$$

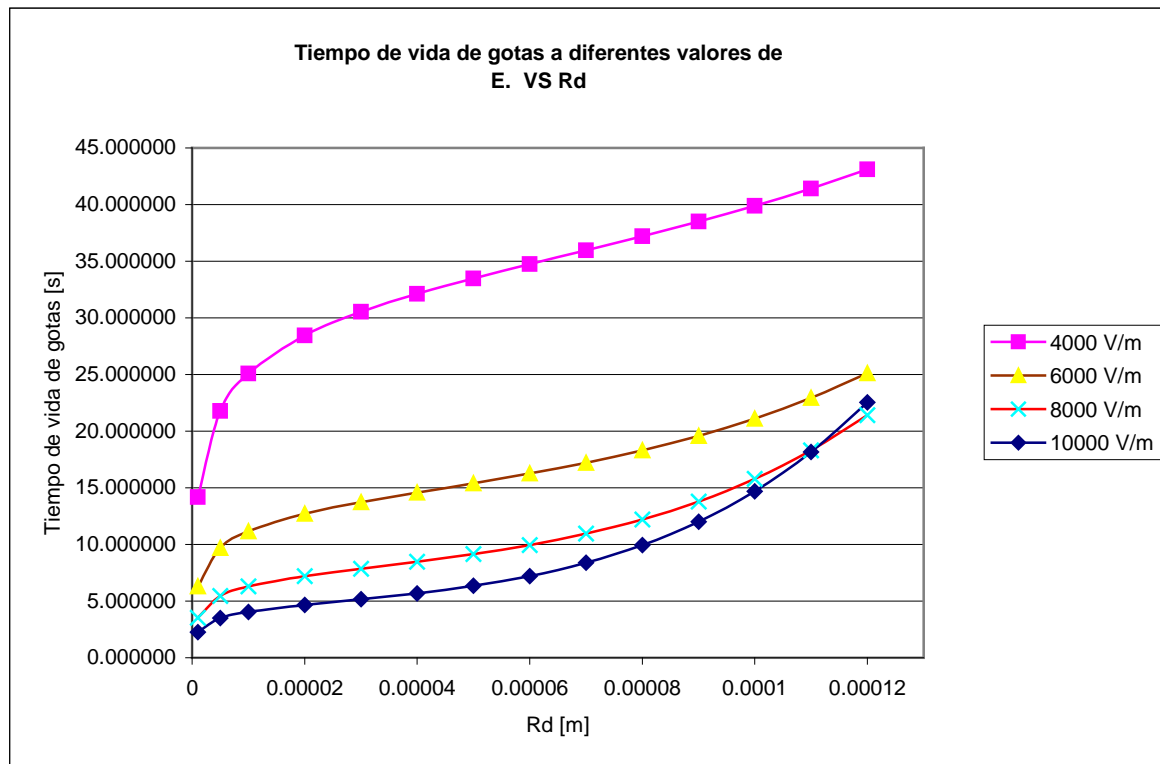
De igual forma se sustituye (19) en (2).

$$R^2 = \frac{(C_f \epsilon_o \epsilon R_d^2 E) R_d}{2\pi\sigma} \dots\dots\dots(21)$$

Para conocer el efecto de la fuerza eléctrica sobre el tiempo de vida de las gotas consideramos distintos valores de intensidad de campo eléctrico aplicado, de (4000, 6000, 8000, y 10000 V/m) (en México se aplican intensidades de campo eléctrico de hasta 10000 V/m).

Resultados.

Resultados obtenidos para conocer el efecto de la fuerza eléctrica sobre el tiempo de vida de las gotas al variar el valor de la intensidad de campo eléctrico.



Grafica 3.- Tiempo de vida de las gotas en función del radio de gotas R_d , al variar la intensidad del campo eléctrico aplicado.

Ahora sólo falta conocer el efecto de las dos fuerzas combinadas. F_z es la fuerza gravitacional, que sumada a F_e (fuerza eléctrica) en (2), da origen a un tiempo de vida medio de gotas como sigue:

$$\tau = \frac{3\eta\pi R_*^2}{2(F_z + F_e)} \left[\text{Ln} \left(\frac{h_i}{h_f} \right) + \frac{R^2}{h_f R_*} \left(1 - \frac{h_f}{h_i} \right) + \frac{R^4}{2h_f^2 R_*^2} \left(1 - \frac{h_f^2}{h_i^2} \right) \right] \dots\dots\dots(22)$$

Y sustituyendo las ecuaciones (19) y (12) en la ecuación (2), tendremos

$$R^2 = \frac{(F_z + F_e) R d}{2\pi\sigma} \dots\dots\dots(23)$$

El efecto de estas dos fuerzas combinadas es un tema de gran interés que nos acerca de manera mas precisa a la realidad de la coalescencia de gotas en una emulsión sobre la que actúan, tanto la fuerza eléctrica como la gravitacional y brinda una opción más para investigaciones posteriores.

CAPITULO III

SEPARACIÓN DE EMULSIONES

AGUA EN PETRÓLEO CRUDO.

3.- SEPARACIÓN DE EMULSIONES AGUA EN PETRÓLEO CRUDO.

El crudo presenta ciertas características que es importante conocer para su estudio, primero consideraremos al sistema agua /petróleo crudo como una emulsión también conocida como agua / aceite o (A / O) (agua en orgánico), en la que el agua es la fase dispersa y el crudo es la fase continua con ciertas características.

Pero bien podría tratarse de una emulsión del tipo aceite / agua, abreviada de la forma (O/A) (orgánico en agua).

La distinción entre (O/ A) y (A/ O), consiste en distinguir cuál fase es la continua y cuál la fase dispersa.

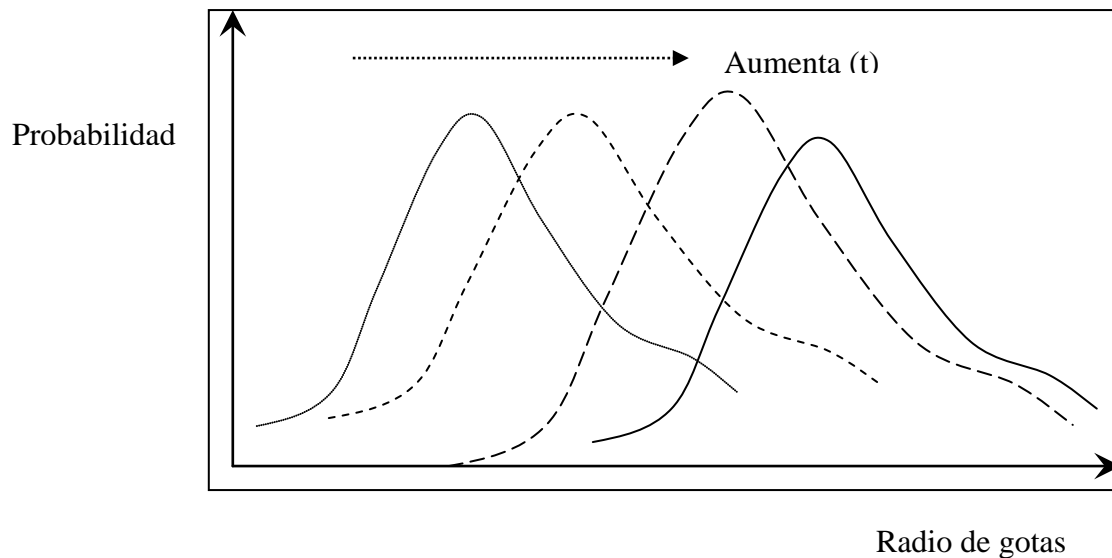


Figura 9. Variación de las distribuciones de tamaño de gota en función del tiempo.

En relación con el tamaño de las gotas en una emulsión (A/O), como en otras emulsiones, no se tiene un valor uniforme del tamaño de las gotas, lo que se tiene es una distribución de tamaños dependiendo del crudo que se esté tratando, incluso esta distribución de tamaños de gotas puede variar en función del tiempo.

Es decir que al transcurrir el tiempo de separación de fases, si se pudiera tomar una muestra por un instante y detener la coalescencia por completo, para determinar la probabilidad de encontrar gotas de distintos tamaños, para después comparar los resultados, en diferentes momentos, se tendría que la probabilidad de encontrar gotas de cierto tamaño es máxima en un instante y varía con el tiempo.

En la figura 10 se puede observar la amplia variedad de tamaño de las gotas de agua en una emulsión del tipo agua en petróleo crudo.⁽⁶⁾

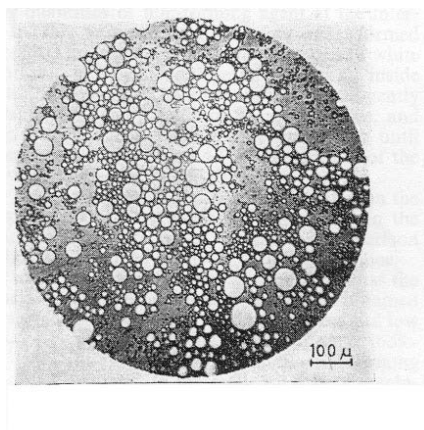


Figura 10. Microfotografía de una emulsión que contiene 10% de agua Ref. [6].

Con respecto de la distribución de tamaño de gota que se puede tener en una emulsión tipo A / O, se puede decir que la distribución de tamaño de gota tendrá algún efecto en la viscosidad de la emulsión, ya que la resistencia a fluir que presentan las emulsiones es probablemente una de las propiedades más importantes, ya que muchas veces algunos productos comerciales sólo son comerciales con cierto valor de viscosidad. Teóricamente la

viscosidad también nos proporciona una idea de la estabilidad de la emulsión. En relación con el tamaño de las gotas, suelen ser las más pequeñas las que dan mayor estabilidad a las emulsiones. Mientras que una emulsión es termodinámicamente inestable, una micro emulsión puede ser completamente estable sin la adición de un agente emulsionante.

Al referirnos a gotas muy pequeñas es necesario tomar en cuenta que algunos autores han definido el límite más pequeño en el radio de una gota como 1μ .⁽²⁾ aunque en algunas emulsiones estabilizadas con jabones o alcoholes grasos de cadenas largas, se han encontrado gotas con diámetros del orden de 100 a 500 Å.

El tamaño de las gotas también tiene un efecto en la apariencia de la emulsión.

La tabla (1) muestra cómo puede variar la apariencia de cierto tipo de emulsiones con respecto del tamaño de las gotas de la fase dispersa.

TAMAÑO DE GOTAS	APARIENCIA
Macro glóbulos	Se pueden distinguir las fases
Tamaño mayor a 1μ	Emulsión blanco-lechosa
1μ a aproximadamente 0.1μ	Emulsión blanco-azulada
0.1μ a 0.05μ	Gris semitransparente

Tabla 1. Apariencia que presentan emulsiones en relación con el tamaño de las gotas dispersas.

Lo anterior da origen a otro tema relacionado con el estudio de la emulsión agua en petróleo crudo que es el de las propiedades ópticas de las emulsiones.⁽²⁾

Por otra parte, la emulsión agua / petróleo crudo debe recibir un tratamiento previo en combinación con el desalado electrostático, en tal tratamiento, los siguientes factores son benéficos para lograr separar agua del crudo.

El tratamiento químico original de Barnickel se refiere a la adición de Sulfato Ferroso así como de otras sales inorgánicas. Sin embargo las técnicas modernas se basan en el empleo de agentes tensoactivos orgánicos relativamente complejos.

Los aditivos químicos, como los desemulsificantes, inyectados a la corriente de agua / crudo y combinado con la separación mediante gravedad, que se lleva a cabo en tanques de sedimentación, propicia una eficiente separación de fases.

Una técnica más reciente relacionada con la utilización de desemulsificante químico es el llamado método “fondo de pozo”⁽²⁾, en el que los productos químicos desemulsificantes son bombeados hacia el fondo del pozo, para evitar que se produzca la emulsificación.

Uno de los problemas de estas técnicas es que al recobrar el crudo de la emulsión, éste contendrá al desemulsificante químico.

El calentamiento.

El calentamiento ayuda a dispersar los agentes desemulsionantes que se encuentran en la fase oleosa y que posteriormente se desplazan químicamente hacia las gotas de agua.

El calor adiciona energía al sistema, creando una corriente térmica y originando el movimiento de las gotas de agua, movimiento tal que ocasiona la unión entre estas debida a colisiones azarosas, sobre todo tiene un mayor efecto en las gotas más finas de agua que se encuentran dispersas.

Esta adición de energía calórica depende mucho de la mezcla de crudo que se maneje, pero también puede resultar poco económico si no es determinada adecuadamente, ya que el calentamiento usado para desemulsificación requiere un alto consumo de energía.

De acuerdo con las referencias consultadas, se han obtenido buenos resultados en la deshidratación de crudo con viscosidad entre los 5 y 10 centistokes y como normalmente la viscosidad del crudo a temperatura ambiente es mucho más elevada, entonces se debe determinar una temperatura adecuada de operación.

A continuación se describe de manera breve el proceso de desalado mediante la aplicación de un campo eléctrico, no debemos olvidar que este proceso presenta una enorme similitud con el proceso de deshidratación del petróleo y que la diferencia entre uno y otro radica básicamente en que en el desalado de petróleo se adiciona agua para disolver las sales en la emulsión.

Proceso De Desalado Eléctrico De Crudo.

En términos generales el proceso de desalado consiste en:

- Adicionar agua de lavado a la emulsión agua salada-crudo previamente calentada a aproximadamente 80°C, para disolver con mayor facilidad las sales.
- La emulsión agua salada-crudo pasa a través de una válvula mezcladora.
- Posteriormente es alimentada a un tanque que tiene en su interior electrodos para someter a la emulsión agua salada-crudo a un campo eléctrico de alto voltaje y así propiciar la separación de las fases.

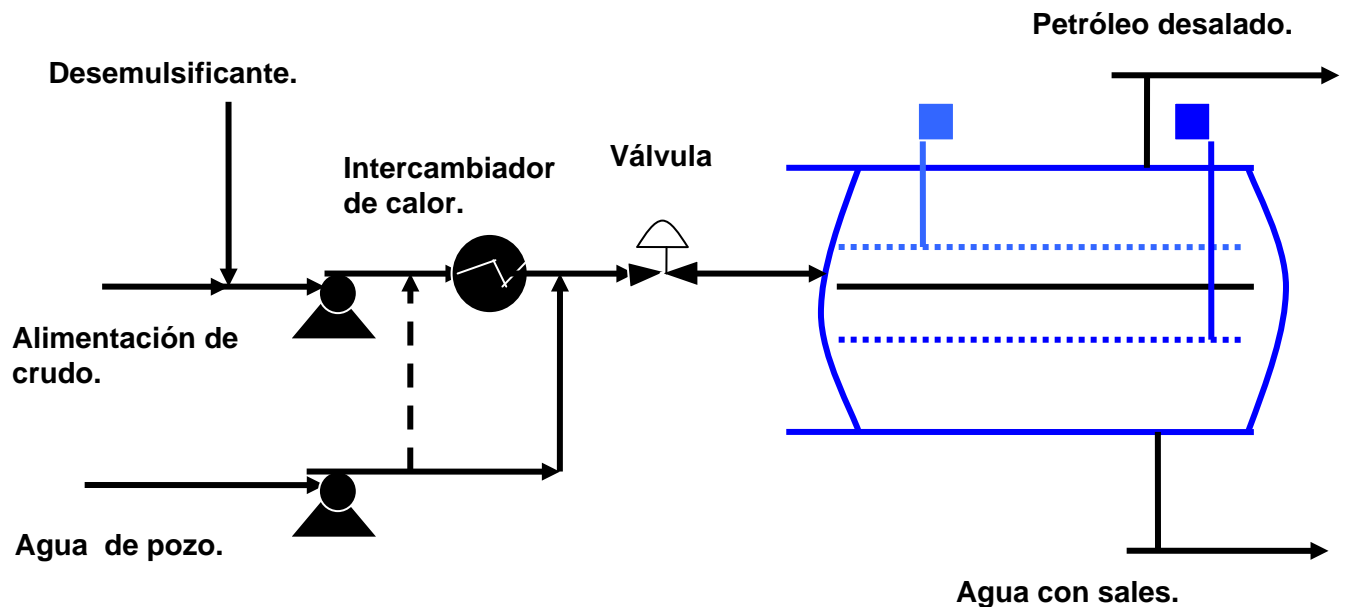


Figura 11. Diagrama básico del proceso de desalado de petróleo crudo.

Las condiciones de generales de operación pueden variar dentro del siguiente rango:

Temperatura: 93-149°C

Presión: 20 psig

Los equipos varían de acuerdo con las necesidades de cada proceso en particular.

CAPÍTULO IV

FUERZAS QUE INTERVIENEN.

4.- FUERZAS QUE INTERVIENEN.

4.1 Gravedad.

Campo gravitatorio.

Un ejemplo para entender mejor el concepto de campo gravitatorio es suponer un salón de clases en el cual tomamos la temperatura, que tiene un valor definido en cada punto del salón en el que nos encontremos.

Podemos medir la temperatura en cada punto colocando un termómetro en ese punto, y podríamos entonces representar la distribución de temperaturas a través del salón con una función matemática, digamos $T(x,y,z)$, tal distribución de temperaturas se llama campo de temperaturas.

Si esta temperatura no varía con el tiempo se conoce como un campo estático, de lo contrario sería un campo variable.

De forma análoga el campo gravitatorio (g) está definido por la fuerza gravitatoria (F) por unidad de masa de prueba (m_0) .

$$g = F / m_0 \dots\dots\dots(24)$$

Este campo es también un campo vectorial y además es usualmente estático cuando la distribución de la masa del cuerpo gravitatorio, que es la fuente del campo, permanece constante. Cerca de la superficie de la tierra, y para puntos no demasiado alejados, es también un campo uniforme, queriendo decir que g es la misma tanto en dirección como en magnitud para todos los puntos.

Para nuestro tema en particular en el que tenemos un sistema de gotas de agua dispersas en una fase continua de petróleo crudo, la fuerza gravitatoria tiene efectos mayores sobre las gotas de mayor densidad, actuando sobre estas durante todo el proceso al que sea sometida la emulsión.

Podemos decir que el campo gravitatorio se encuentra relacionado con la separación de fases debido a la fuerza gravitatoria, una ecuación de velocidad de separación de fases fue propuesta, en la que intervienen las gravedades específicas del aceite y del agua, así como la constante gravitacional, la velocidad de caída de gotas, el radio de gotas y la viscosidad del aceite.

La ecuación de Stokes⁽⁷⁾ se utiliza para determinar la velocidad de descenso de las gotas:

$$U = 2gRd^2(\rho_2 - \rho_1)/9\eta \dots\dots\dots(25)$$

Donde: U es la velocidad terminal de descenso de las gotas.

g es la constante gravitacional

Rd es el radio de la gota

ρ_2 es la gravedad específica del agua.

ρ_1 es la gravedad específica del crudo.

η es la viscosidad, del crudo

Se puede apreciar que la velocidad depende principalmente de las características de la gota de agua.

Un ejemplo de ecuación empírica para determinar la velocidad de separación de fases de una emulsión es la siguiente⁽⁸⁾:

$$W = A (E / H)^{0.5} H^{1.3} dp^3 Cs^{-0.5} (1 - \Phi) \dots\dots\dots(26)$$

Donde A es una constante que depende del tipo de electrodo, tipo y concentración del electrolito así como del agente surfactante.

La ecuación anterior sólo es útil para un sistema específico, así que lo importante es que da una idea de la influencia de diversos factores sobre la separación de fases en una emulsión del tipo A/O, bajo la acción de un campo eléctrico.

4.2 Fuerza eléctrica.

Es necesario considerar que la molécula eléctricamente neutra de agua presenta una separación de cargas, que puede considerarse como un dipolo eléctrico y ya que un dipolo eléctrico se define por el producto de las cargas electrónicas acumuladas en cualquiera de los extremos por la distancia entre los centros⁽⁹⁾. La separación de las cargas dentro de la molécula eléctricamente neutra de agua, le confiere la disponibilidad de establecer enlaces electrostáticos con otros dos átomos de hidrógeno, originando el llamado puente de hidrógeno.

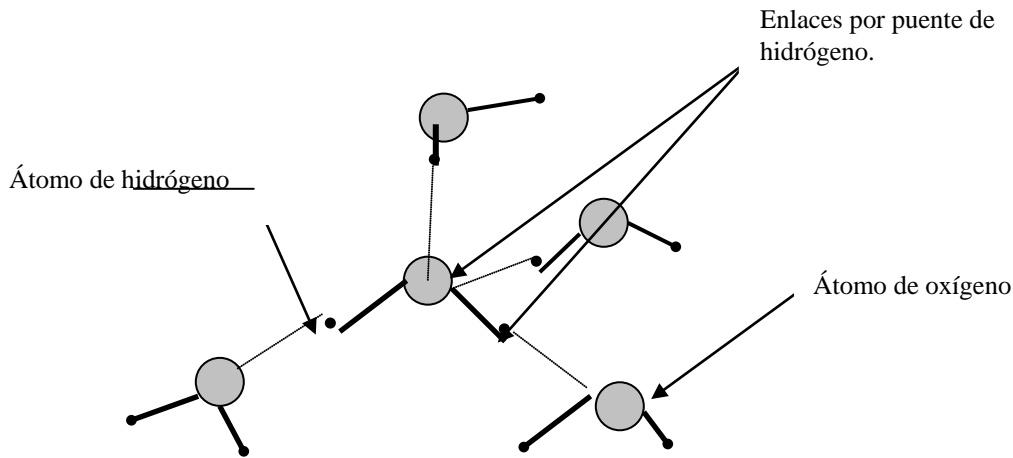


Figura 12. Enlaces por puente de hidrógeno. Ref. [9].

Por lo tanto, en el caso de tener agua en estado líquido, se tendrá una red de moléculas conformada por pequeñas redes así como de moléculas no asociadas, dando pauta a una idea más clara de la forma en que se lleva a cabo el transporte de iones dentro de esta red al aplicar un campo de alto voltaje.

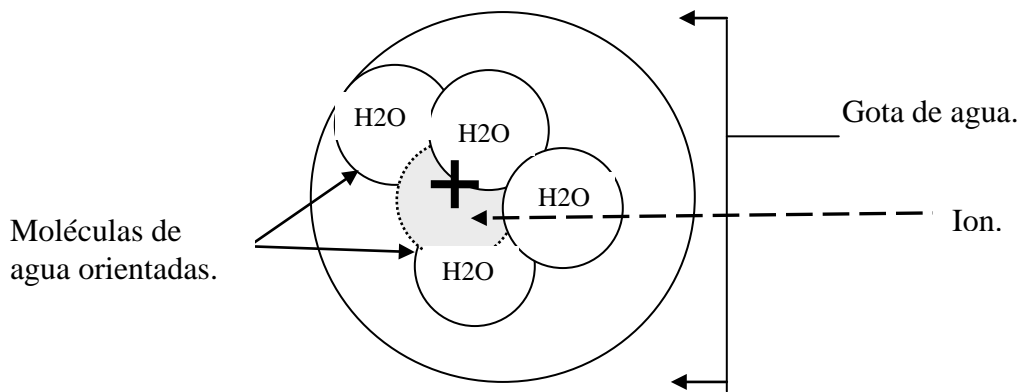


Figura 13. Transporte de iones entre las moléculas de agua.

La figura anterior muestra cómo puede ser el transporte de iones en un sistema en el que se tiene agua como disolvente, en nuestro caso en particular lo que tendremos serán gotas de diferentes tamaños flotando entre petróleo y transportando iones, debido a que el medio continuo será petróleo, se podría decir que no es un conductor electrónico y puede ser considerado como un dieléctrico, debido a que sólo permitirá el transporte de iones.

De esta manera es como la fuerza eléctrica a través de campo eléctrico que genera, induce dipolos y promueve el movimiento de las gotas en la emulsión, para finalmente ocasionar la coalescencia de las gotas por el efecto de las colisiones.

La carga de las partículas en sistemas coloidales, generalmente puede tener tres orígenes diferentes, esto es, por ionización, adsorción o por contacto friccional⁽²⁾.

En el caso de emulsiones O/A es relativamente sencillo afirmar que por estar estabilizadas por el grupo Carboxilo ($-\text{COO}^-$) de un jabón, las gotas estarán rodeadas por un revestimiento de cargas negativas o si son estabilizadas con agentes cationicos se espera un revestimiento de cargas positivas sobre las gotas.

Pero para el caso de emulsiones A/O algunos autores niegan la existencia de cargas en las gotas de agua,⁽¹⁰⁾ sin embargo en el caso de emulsiones agua / petróleo crudo, la carga se encuentra relacionada con la existencia de iones debido al contenido de sales solubles en

agua. Otras teorías afirman que el origen de la carga puede deberse a un mecanismo de fricción entre las gotas de agua y la fase continua.⁽²⁾

La aplicación de un campo eléctrico al proceso representa ventajas tanto económicas, debido a la utilización de energía eléctrica, como de manejo, ya que la aplicación del campo eléctrico y la separación de fases puede llevarse a cabo dentro del mismo equipo de proceso. La utilización de este método eléctrico para lograr la ruptura de la emulsión, es posible gracias a que se trata de una emulsión del tipo A/O, así el sistema es no conductor, de tratarse de una emulsión en la que la fase continua fuera agua, la ruptura de la emulsión mediante este método eléctrico resultaría muy poco económico.

Cuando una gota de agua se encuentra suspendida en el petróleo crudo, esta asume una forma perfectamente esférica de radio r , cuando no existen fuerzas externas actuando sobre esta.

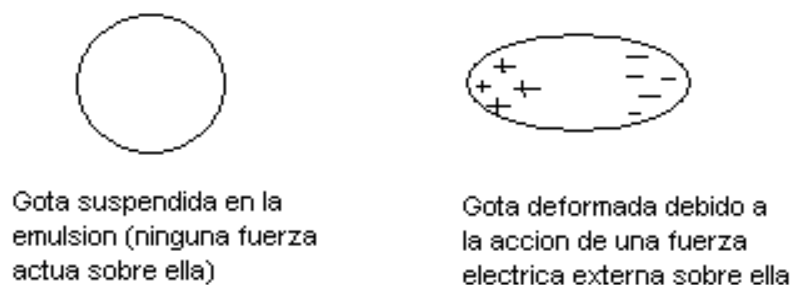


Figura 14. Orientación de las cargas dentro de una gota de agua. Ref. [9].

Si un campo eléctrico de alto voltaje es aplicado, la gota de agua se distorsiona tomando una forma elíptica o de un elipsoide de revolución con cargas opuestas en los extremos.

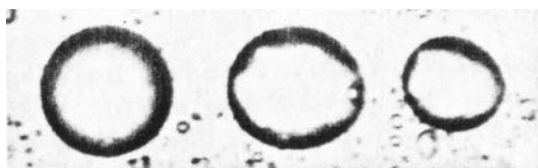


Figura 15. Evolución de la deformación que sufren unas gotas bajo un campo eléctrico.

Una vez orientadas, las cargas en las gotas por la acción de un campo eléctrico, la parte positiva de la gota se dirige al electrodo negativo, y de igual forma la parte negativa de la gota será atraída por el electrodo positivo, durante este proceso, la parte positiva de una gota que se encuentre cerca de la parte negativa de otra gota, ocasionará que exista una fuerza atractiva entre estas, y por consiguiente, que tiendan a juntarse. En la antigüedad este movimiento fue llamado Cataforesis, actualmente se le llama Electroforesis (migración de las gotas sujetas a un campo eléctrico, hacia los electrodos).

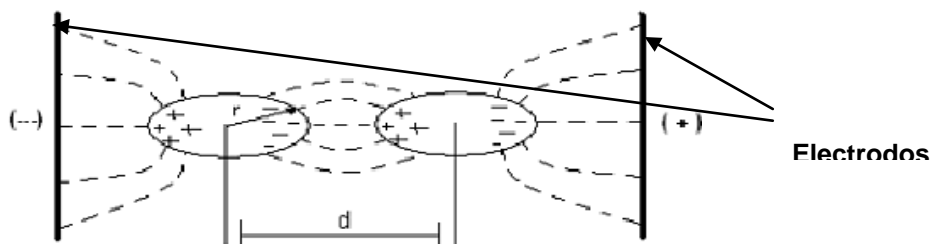


Figura 16. Gotas de agua suspendidas, bajo la acción de un campo eléctrico originando la orientación de cargas.

La aplicación de un campo electrostático da origen a la orientación de las cargas en las gotas de agua. A nivel molecular el comportamiento de los iones cargados se puede considerar similar al comportamiento que tienen las partículas cargadas a distancias muy pequeñas entre sí, la ley de Charles Augustin Coulomb explica el comportamiento de repulsión y atracción de los objetos cargados eléctricamente, considerándolos cargas puntuales. La ley de Coulomb expresada en forma vectorial es de mayor utilidad, debido a que proporciona información sobre la dirección de F (fuerza eléctrica) y de si ésta fuerza es de atracción o de repulsión.

$$F = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \hat{r}_{12} \dots\dots\dots(27)$$

Donde:

F es la magnitud de la fuerza entre dos cargas [N]

ϵ_0 constante de permitividad ($8.85418781762 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N m}^2$)

\hat{r}_{12} vector unitario

q_1q_2 magnitud de las cargas 1 y 2 [C]

r es la posición de la carga 1 en relación con la carga 2 [m]

De igual forma es de utilidad para determinar la fuerza ejercida por diversas cargas sobre una carga en particular, por ejemplo la fuerza sobre la carga puntual 1, será la suma de todas las fuerzas debidas a otras cargas que actúan sobre ella

$$F_1 = F_{12} + F_{13} + F_{14} + \dots, \dots\dots\dots(28)$$

La fuerza de atracción entre estas gotas puede ser calculada aproximadamente, a partir de ecuaciones empíricas propuestas por diversos autores, de la forma siguiente⁽¹⁰⁾:

$$F_e = \frac{(\text{Constante}) \times (\text{Gradiente de voltaje})^2 \times (\text{radio de la gota})^6}{(\text{distancia entre los centros de las gotas})^4}$$

Esta ecuación sólo proporciona una idea de la dependencia de la fuerza de atracción entre estas gotas, en función de sus dimensiones, y del voltaje aplicado.

Otra ecuación propuesta para calcular la fuerza de atracción entre las dos gotas es la siguiente⁽⁷⁾:

$$F_e = \epsilon E^2 D^6 / d^4 \quad (\text{con } d \geq D) \quad \dots\dots\dots(29)$$

Donde:

F_e = es la fuerza de atracción entre las gotas

ϵ = es la constante dieléctrica del sistema

E = es el gradiente de voltaje

D = es el diámetro de la gotas

d = es la distancia entre las gotas

Un importante factor que debe ser considerado es el concerniente a la respuesta de las gotas a un ilimitado aumento en el gradiente de voltaje (E). Si el gradiente de voltaje es aplicado a una gota en particular, mas allá de cierto voltaje crítico (Ec), entonces la gota se distorsionará lo suficiente como para romper la película que la rodea, ocasionando la división de la gota en otras gotas mas pequeñas, por consiguiente dificultando la coalescencia. Este voltaje crítico puede ser calculado para una gota en particular. Se observa que es inversamente proporcional a la raíz cuadrada del diámetro de la gota⁽⁷⁾.

$$E_c \leq \varepsilon \sqrt{\frac{\sigma}{D}} \dots\dots\dots(30)$$

De donde: Ec es el gradiente de voltaje crítico

ε es la constante dieléctrica para el sistema

σ es la tensión interfacial.

D es el diámetro de la gota

La fuerza eléctrica de atracción entre gotas está dada por la siguiente ecuación⁽²⁾:

$$F_e = \varepsilon E^2 R d^2 \Psi^2(h/Rd) \dots\dots\dots(31)$$

Donde: ε es la constante dieléctrica de la fase continua

E es la intensidad de campo eléctrico

Ψ²(h/r) es una serie infinita, en función de espesor de la película (h) y del radio de gotas no distorsionadas (r).

Otra ecuación propuesta para evaluar la fuerza de atracción entre dos gotas es⁽¹¹⁾.

$$F_e = \epsilon_0 \epsilon E^2 \eta^2 \psi (D / R_d) \dots\dots\dots(32)$$

En donde: d es la distancia entre las gotas de radio R_d, ε es la constante dieléctrica, ε₀ es la permitividad del vacío, E es el gradiente de campo eléctrico y ψ (D / R_d) es una serie de funciones aproximadamente igual a 6 (R_d / D)⁽⁴⁾, η es la viscosidad de la fase continua.

Afirmando también que el efecto de la fuerza eléctrica excede al efecto de la fuerza gravitacional en aproximadamente 10 veces. Encontramos una ecuación para F_e (fuerza eléctrica entre gotas), cuando se trata de gotas sometidas a la acción de un campo eléctrico en una columna de platos perforados⁽⁵⁾. Esta propuesta es además la que parece más próxima a lo que realmente ocurre en el mecanismo de coalescencia de gotas. Por lo tanto es la relación matemática a utilizar en el modelo matemático:

$$F_e = 4 \pi \epsilon \epsilon_0 C_f R_d^2 E^2 \dots\dots\dots(33)$$

Donde: C_f coeficiente de carga, aproximadamente igual a 1.12

ε₀ permitividad del vacío [F/m]

ε constante dieléctrica de la fase continua

R_d radio de la gota [m]

E campo eléctrico [V/m]

Campo eléctrico.

La descripción anterior de campo gravitatorio puede traspasarse directamente a la electrostática, en donde la Ley de Coulomb permite comprender la interacción entre cargas separadas a cierta distancia representado como:

$$\text{carga} \quad \Leftrightarrow \quad \text{carga.}$$

Introduciendo el campo como un intermediario entre las cargas,

$$\text{carga} \quad \Leftrightarrow \quad \text{campo} \quad \Leftrightarrow \quad \text{carga}$$

es decir, que la primera carga establece un campo eléctrico y la segunda carga interactúa con el campo eléctrico de la primera carga, entonces se tienen dos problemas al intentar determinar la interacción entre las cargas.

El primero es determinar el campo eléctrico establecido por la primera carga en cada punto del espacio y el segundo problema es conocer la fuerza que el campo eléctrico ejerce sobre la segunda carga situada en un punto en particular en el espacio.

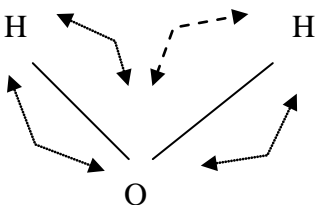
Haciendo la analogía con la ecuación para campo gravitatorio, se define el campo eléctrico E , asociado con un cierto conjunto de cargas en términos de la fuerza ejercida sobre una carga de prueba positiva q_0 , en un punto en particular.

$$\text{Así: } \mathbf{E} = \mathbf{F} / q_0 \quad \dots\dots\dots(34)$$

Dimensionalmente el campo eléctrico es la fuerza por unidad de carga, y su unidad en SI es el newton / coulomb (N/C), frecuentemente es expresado en una unidad equivalente, el volt/metro (V/m).

Teóricamente al inducir un campo eléctrico sobre una emulsión agua / petróleo, se estarían induciendo dipolos, primero a nivel molecular, por ejemplo considerando que se tiene agua en la fase dispersa, la cual a su vez contiene sales disueltas como Cloruro de Sodio.

Sabemos que debido a su estructura, el agua presenta un dipolo eléctrico, ahora también se debe considerar el dipolo inducido sobre la molécula de NaCl que se disocia.



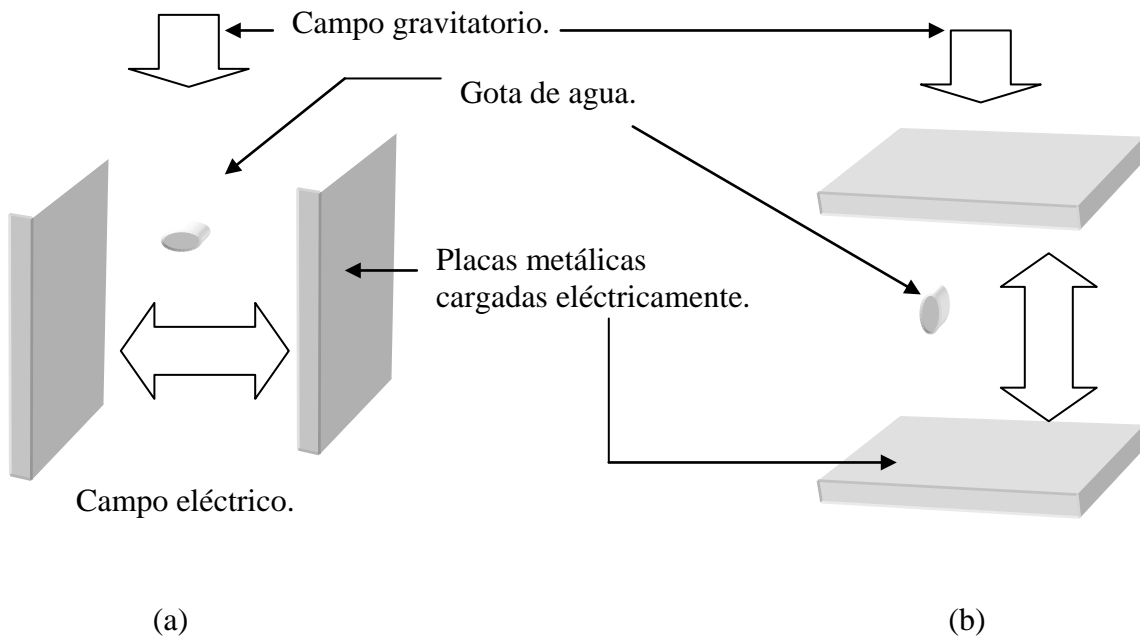


Figura. 19. (a) Campo eléctrico y gravitatorio actuando sobre una gota de agua suspendida en una emulsión, arreglo en vertical. (b) Campo eléctrico y gravitatorio actuando sobre una gota suspendida dentro de una desaladora eléctrica industrial.

CAPÍTULO V

EQUIPOS.

5.- EQUIPOS.

En la actualidad existe una gran variedad de equipos diseñados para la separación de fases de diversos tipos de emulsiones, no solo para la separación de fases de una emulsión del tipo agua en petróleo crudo o petróleo en agua, por mencionar algunos, tenemos:

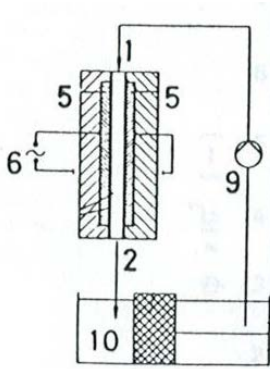


Figura. 19. Coalescedor de conducto formado por electrodos de placas paralelas.

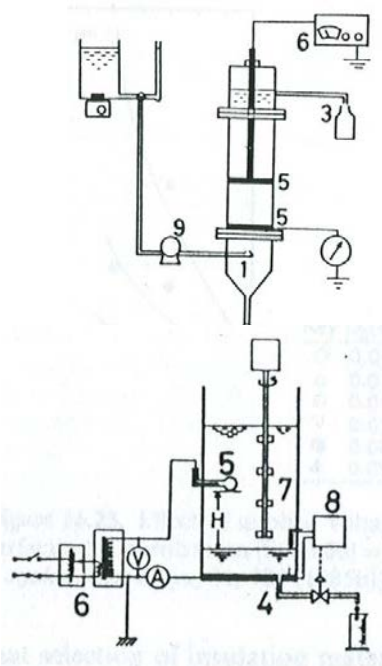


Figura. 20. Coalescedor de columna con electrodos perforados.

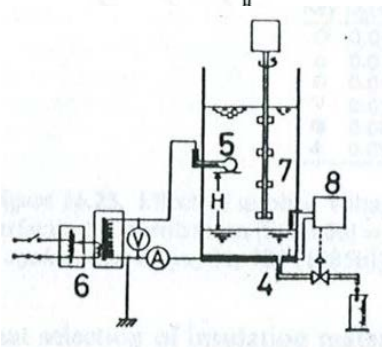


Figura. 21. Coalescedor de tanque con electrodo cubierto.

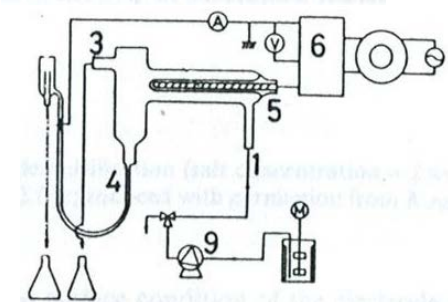


Figura. 22. Coalescedor tubular con electrodo cubierto.

En donde, para los diagramas de las figuras 19, 20, 21, 22 se enumeran cada uno de sus componentes:

1. Entrada de la emulsión agua/aceite; 2, salida de la emulsión agua/aceite; 3, salida del aceite desemulsionado; 4, salida de agua desemulsionada; 5, electrodo; 6, generador de voltaje; 7, agitador; 8, controlador de nivel; 9, tubería.

A nivel industrial existen varios tipos de desaladoras y deshidratadoras que difieren entre sí, por la localización de la distribución de la emulsión (agua-aceite), el tipo de corriente con el que operan, numero de etapas, etc., y se han ido adaptando a las necesidades de desalado que se requieren.

Los principales equipos comerciales son:

La llamada desaladora CIELECTRICA⁽¹²⁾.- Es una desaladora que en un solo paso elimina sales como NaCl en un porcentaje mayor de 90%, no permite la adecuada remoción de las sales de calcio y de magnesio, se recomienda para flujos viscosos pesados.

Desaladora DE BAJA VELOCIDAD⁽¹²⁾. Este tipo de desaladora opera mejor para crudos ligeros a medios, el desalado se hace en dos etapas. El agua de lavado fresca se alimenta a la segunda etapa y de ésta se manda a la primera etapa. Llega a remover el 90% de sales como NaCl en la primera etapa y en la segunda etapa remueve sales como cloruros de calcio y magnesio, asimismo, se logra una remoción de sedimentos en un 90% y los sólidos suspendidos de un 10 a 4%.

La desaladora Bielétrica⁽¹²⁾. Alimenta dos corrientes de la emulsión agua-aceite entre tres electrodos permitiendo una mayor capacidad por unidad de volumen de recipiente que las desaladoras de flujo vertical. Su eficiencia en el desalado es del 98-99%, remueve del 10 al

15% de sólidos, disminuye el consumo de aditivos y disminuye considerablemente el arrastre de aceites en el agua de salmuera.

Es importante distinguir entre desaladora y deshidratadora a continuación se muestran las principales diferencias.

Diferencias entre **Deshidratadoras** y **Desaladoras**

- No se requiere adicionar agua de lavado a la deshidratadora
 - No se requiere válvula mezcladora en deshidratadora
 - Válvula de mezclado de agua de lavado solo en la desaladora
- todo el demás equipo puede ser es el mismo.

Sin embargo a pesar de estas diferencias, es posible encontrar equipos que sean diseñados para llevar a cabo ambas funciones.

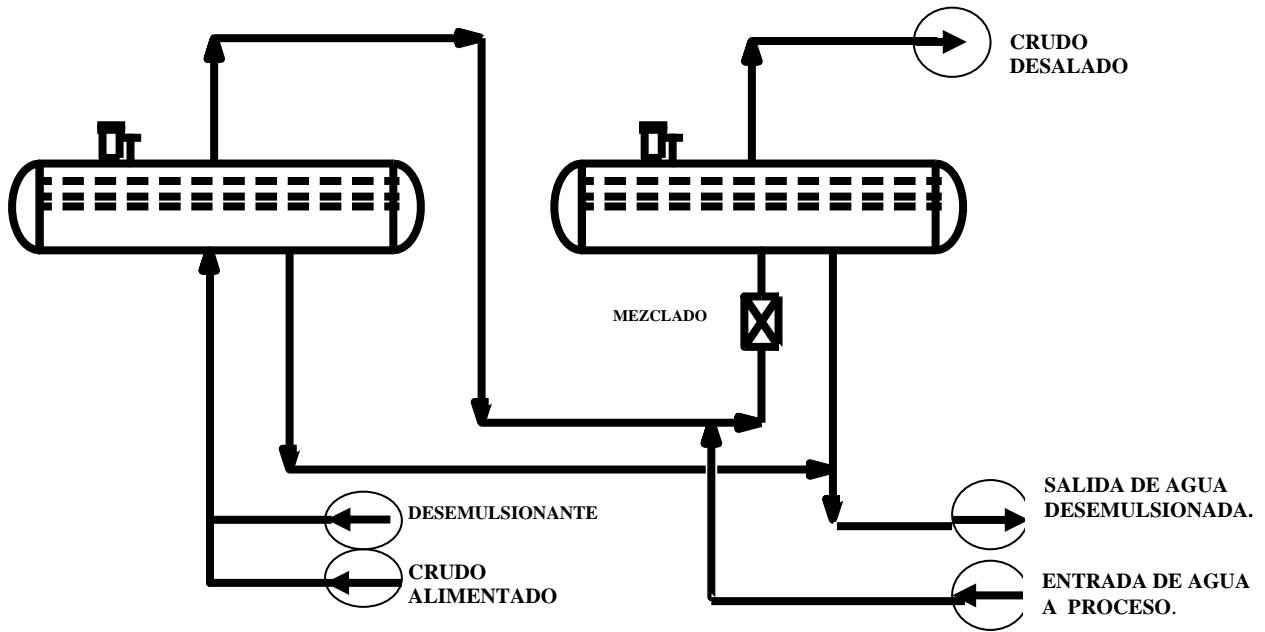


Figura. 23. Desalador y deshidratador eléctrico en dos etapas.

Comercialmente existen aquellas desaladoras que incluyen una o varias etapas y en cada una de ellas, la capacidad de manejar diferentes valores de voltaje, de corriente alterna o continua, equipos que incluyen desaladora y deshidratadora a la vez, en los que se diseñan las alimentaciones de acuerdo a necesidades, como para variar tiempos de residencia y capacidades, diversas configuraciones de electrodos, cabezales opcionales que facilitan la remoción de sólidos y la limpieza del equipo, incluyen además instrumentos de control de interfases, diseños horizontales o verticales, en fin una amplia gama de diseños que son ajustados de acuerdo con las necesidades de cada proceso en particular.

Así mismo existen aquellos equipos que operan con dos, tres, o cuatro campos eléctricos, combinando campos eléctricos de alto voltaje con campos eléctricos de bajo voltaje para obtener mejores resultados en el proceso de coalescencia.

A continuación se muestran algunos arreglos internos que pueden presentar las desaladoras para optimizar el proceso de desalado de petróleo crudo

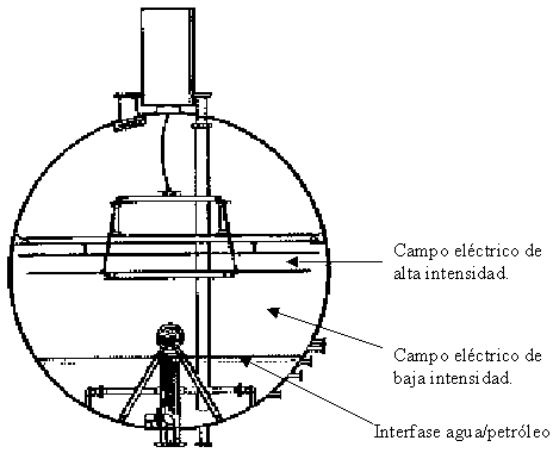


Figura 24. Arreglo interno de una desaladora la cual consta de un campo eléctrico de alta intensidad, un campo eléctrico de baja intensidad.

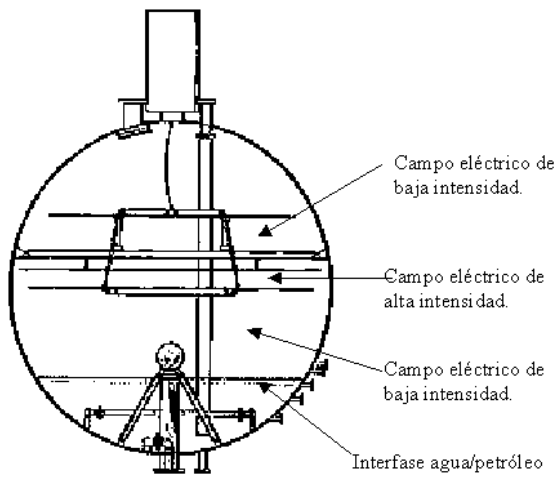


Figura 25. Arreglo interno de una desaladora que presenta dos campos eléctricos de baja intensidad y un campo eléctrico de alta intensidad.

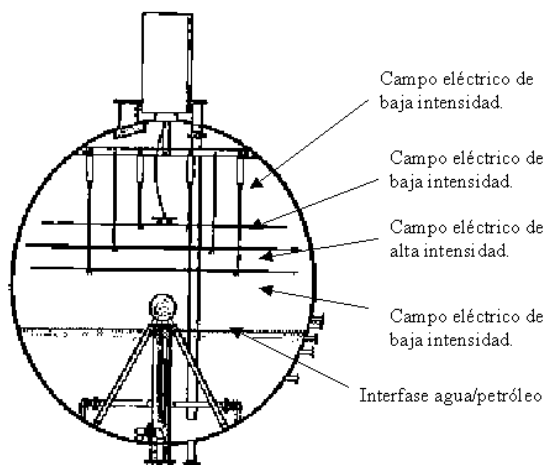


Figura 26. Arreglo interno de una desaladora que presenta dos campos eléctricos de baja intensidad y dos campos eléctricos de alta intensidad.

CONCLUSIONES.

CONCLUSIONES.

Se puede concluir que es amplia la gama de factores que intervienen en el fenómeno de coalescencia de gotas y es importante darles un valor relativo de acuerdo con el objetivo que se desee lograr. Algunos de estos múltiples factores y su efecto posible en el fenómeno de coalescencia de gotas en emulsión son los siguientes.

Después de consultar múltiples trabajos de investigación, se pueden relacionar las características de la emulsión con sus efectos sobre la coalescencia de gotas de agua, como por ejemplo:

- Efecto del diámetro de la gota dentro de la emulsión.

El tiempo de separación de fases de la emulsión y la intensidad de campo eléctrico tienden a aumentar al disminuir el diámetro de las gotas de agua en la emulsión.

Por este motivo es posible que el campo eléctrico ejerza efecto mayor sobre las gotas de diámetro menor que se encuentren en la emulsión.

- Efecto de la concentración de emulsionante.

La concentración de emulsionante afecta principalmente a la viscosidad de la emulsión, cuando hablamos de una emulsión preparada para fines de experimentación.

El aumento de la concentración del emulsionante origina un aumento en la viscosidad de la emulsión y un aumento en el tiempo de separación de las fases.

- Efecto del voltaje aplicado.

El tiempo de separación de fases disminuye al aumentar el voltaje aplicado, sin llegar a un valor de campo eléctrico crítico en el que las gotas de agua se vuelven inestables y pueda ocurrir su ruptura nuevamente.

- Efecto de la fracción volumen de agua en la emulsión.

Experimentalmente se ha observado que el aumento de la fracción volumen de agua (Φ) en la emulsión, causa un aumento notable en la viscosidad de la emulsión.

Y al disminuir el valor de Φ , disminuye el tiempo de separación de fases.

- Efecto de la temperatura sobre la desemulsificación eléctrica.

La temperatura origina dos efectos sobre la emulsión. Como la temperatura aumenta, la viscosidad de la emulsión disminuye.

Además la alta temperatura origina corrientes térmicas y por ende, aumentan las colisiones y uniones entre gotas de agua.

Aparentemente, el tiempo de separación de fases disminuye con el aumento de la temperatura.

- Efecto de la viscosidad y la densidad de las fases. Principalmente la viscosidad de la fase continua, tiene un efecto sobre el transporte de las gotas dispersas, en el medio. Y la diferencia de densidades de las fases es la responsable de la efectividad de separación de estas por efecto del campo gravitatorio.⁽²¹⁾

En algunos casos, por la variación de la concentración del electrólito o del pH, es posible aumentar la repulsión entre las partículas, causando el proceso inverso.

Además de las anteriores observaciones, se propone un modelo matemático en el que se relaciona el campo eléctrico aplicado a una emulsión, con el tiempo de coalescencia de gotas y se hace una comparación entre la coalescencia debida a la fuerza gravitatoria y la fuerza eléctrica.

Y finalmente es de mencionar que en este trabajo se hace una amplia revisión bibliográfica de las tecnologías utilizadas en el proceso de desemulsificación del petróleo crudo.

Siendo de gran importancia los estudios realizados por investigadores de la Facultad de Química de esta Universidad de Nacional Autónoma de México. Como por ejemplo la determinación de la temperatura optima de desalado de petróleo crudo Maya.⁽²²⁾

Así como las importantes conclusiones del estudio del campo eléctrico de corriente continua en el proceso de deshidratación del petróleo crudo.⁽²³⁾

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- 1.- Desalado Electrostático de Crudo en Plantas de destilación primaria. M. En C. Gildardo González Camacho, ing. Patricia Flores Sánchez, Ing. René González Fernández, Ing. Humberto Barreda Aguayo Instituto mexicano del petróleo.
- 2.- Emulsiones Teoría y Práctica. Paul Becher, Becher, Versión española, Julián Fuentes Marcuello, Rosario, 17 - Madrid, Editorial Blume.
- 3.- Tecnología Química del petróleo, William A. Gruse, Donald R. Stevens Trad. a la 3ª ed. Julian Dominguez Sanz, José Capsir Albalat ed. Omega S. A.Barcelona 1964.
- 4.- Stability of Emulsions Under Equilibrium and Dynamic Conditions. Ivan b. Ivanov, Peter a. Kralchevsky. Coloids and Surfaces. 1987.
- 5.- Liquid-Liquid Extraction Equipment. J.C. Godfrey, M.J. Slater John Wiley & Sons, 1994
- 6.- Interfacial Films Affecting the Stability of Petroleum Emulsion. Charles M. Blair. Chemistry and Industry May 14 1960.
- 7.- Field Desalting of Wet Crude in Kuwait.M.l. chawala, kuwait oil co. Society of Petroleum Engineers march 7 1987
- 8.- Demulsification of W/O Emulsion by Use of High Voltage of A.C. Field.Katsuhiko Fujinawa, Mitsugu Morishita Journal of Chemical Engineering of Japan. March 14 1984.
- 9.- Electroquímica Moderna Vol. 1, John O. M. Bockns, ed. Reverte S.A. Barcelona España, 1978.
- 10.- Theories and Benefits of Desalting. Logan C. Waterman. Petrolite Corporation, Petreco Division. Box 2546, Houston Texas.
- 11.- Macro and Microemulsions Theory and Applications. American Chemical Society. Washington D.C. 1985. Dinesh O. Shah Editor
- 12.-Desalter Presentation, The Howe- Baker EDGE (Enhanced Deep-Grid Electrical).
- 13.- Beneficios del Desalado en Dos Etapas. Ingeniero Químico Eduardo Hernández Osorio.
- 14.- Demulsification Kinetics of W/O Emulsion in an A.C. Electric Field. Tadashi Hano, Takaaki Ohtake and Kazumi Takagi. Journal of Chemical Engineering of Japan. August 27 1987.
- 15.- Break-down of Liquid Membrane Emulsion Under High electric Field. Lu Gang, Lu Qionghua, Li Pansheng. Journal of Membrane Science. October 7 1996.
- 16.- Influence of pH on the Stability of Oil-Water Emulsions Stabilized by a Splittable Surfactant Chin-Ming Chen, Chun-Hsiung 1 feb 2000.
17. Static Equilibrium Build-up Model for Dielectrophoretic Capture on a Single Rod Israel J. – Allen L. Shalom. June 20 1987.

18. Demulsification of Water in Oil Emulsion by Using Porous Glass Membrane. Dezhi Sun , Xiaodong Duan. March 7 1998.
- 19.- First Course In Electrochemical Engineering, Frank Walsh. Electrochemical Consultancy, Hants, England, 1993
- 20.- Hydrocarbon Engineering, Nov. 1998 pag 51
- 21.- Macro and Microemulsions Theory and Applications. Demulsification. vol. 13. American Chemical Society. Washington D.C. 1985. Dinesh O. Shah Editor.
- 22.- Optimum Temperature in the Electrostatic Desalting of Maya Crude Oil. Erik Fetter Pineda, Enrique Rivero Borrell Escobedo, Francisco Javier Garfias Vázquez. Journal Of the Mexican Chemical Society, año/Vol. 49, numero 001, Sociedad Química de México pp. 14-19 (2005)
- 23.- Deshidratación del Crudo Maya Mediante un Campo Eléctrico de Corriente Continua. Bartolo Pérez Hernández, Francisco Javier Garfias Vázquez, Journal Of the Mexican Chemical Society, julio- septiembre, año/vol. 46, numero 003 pp 227-234 (2002).
- 24.- Crude Oil Chemistry, Vsily Simanzhenkov, Rápale Idem, ed. Marcel Dekker. Inc. 2003. (p221 a 230.).
- 25.- Water in Crude Oil emulsion Stability and Emulsion Destabilization by Chemical Demulsifier. T. J. Jnes, E. L. Neustadter and K.P. Whittingham. The Journal of Canadian Petroleum (1978).
- 26.- Separation of Emulsions Using Fibrous Fabric B. J. Briscoe, P.F. Luckham, J. N. Jyarajah, T. Akeju. Colloids and Surfaces (2000).
- 27.- Separation of Oil from Water by Dissolved Air Flotation. A.A. Al-Shamrani, A. James, H. Xiao. Colloids and Surfaces (2002).
- 28.- Demulsification of Water-in-Oil Emulsion by Wetting Coalescence Materials in Stirred and Packed Columns. Colloids and Surfaces (1999).
- 29.- The Effect of Air Sparging on the Electrical Resolution of Water- in Oil Emulsions. P. J. Bailes, P. K. kuipa. Chemical Engineering Science (2001).
30. Performance of Emulsions: Entrainment Problems in Solvent Extraction, A, M. Spasic, N.N. Djokovic, M. D. Babic, M.M. Marinko and G. N. Joranovic, Chemical Engineering Science Vol 52 (1997).
- 31.- Surfactan Stabilized Crude Oil- in Water Emulsions for Pipeline Transportation of Viscous Crude Oils. Nael N. Kaki, Colloids and Surfaces (1997).
- 32.- Emulsion Technology 2a Ed., Sutheim, G. M. Chemical Publishing Co, (1946)
- 33.- Demulsification: Industrial application, Marcel Dekker, Surfactant Science Series, Vol 13, New York (1983)

- 34.- Chemical Demulsification of Petroleum Emulsion Using Oil-Soluble Demulsifiers, M. A. Krawczyk, D.T. Wasan , C. S. Shetty, Ind. Eng. Chem. (1991) 367
- 35.- Demulsification of Water-in-Oil Emulsion by an Electrostatic Coalescence Method, T. Hirato, K. Koyoma, Mater Traslation (1991) 257
- 36.- Application of Batch Ultrafiltration to the Separation of W/O Emulsion in Liquid Surfactant Membrane processes, R.S. Juang, J. D. Jiang, J. (1994) 193
- 37.- Demulsification of Water/Oil/solid Emulsions by Hollow-Fiber Membranes, N.P. Tirmizi, B. Raghuraman, J. Wiencj, AIChE J. (1992) 1263.
- 38.- Shear- Induced Phase Inversion and Size Control of Water/Oil/Water Emulsion Droplets With Porous Membrane, Y. Kawashima, T. Hino, J. Colloid Interface (1991).

Agradecimientos.

Doy gracias a DIOS por la oportunidad única y maravillosa de vivir, a mi madre que con cariño me ha concebido, a mi padre que acompaña a Dios en su eterna gloria, a mi esposa por ser mi compañera a mis hermosas hijas, Camila y Brenda por quienes gustoso daría mi vida, al angel que me cuida y guía mi camino a mis profesores que compartieron su conocimiento conmigo y a todas las personas que se han ganado un lugar en mi corazón...

Gracias Universidad Nacional Autónoma de México.

“POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU”