

**UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE QUÍMICA**



**“SEPARACIÓN ELECTROSTÁTICA CONTINUA DE EMULSIONES
SINTÉTICAS, MEDIANTE LA APLICACIÓN DE UN CAMPO ELÉCTRICO DE
CORRIENTE DIRECTA”**

**Trabajo Especial de Grado
presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela,
por el T.S.U. Isaí López, para optar
al título de Licenciado en Química**

Caracas, Septiembre 2009

Dedicatoria

En especial a mi madre **Rosa** por su apoyo en todo momento. Siempre te he considerado una mujer virtuosa y luchadora, como muchas madres de las que existen en nuestra hermosa Venezuela.

Dios te bendiga

Agradecimientos

Después de un largo recorrido y haber alcanzado dos de mis metas, el título de Licenciatura Química mención Tecnología y la Licenciatura en Educación mención Química, en la máxima casa de estudios del país, **Universidad Central de Venezuela**, calificada, además, como “**La Casa que vence las sombras**”. Es un honor y privilegio haber compartido con tantos compañeros y compañeras de aula, momentos inolvidables que quedarán en el recuerdo. También, sin pasar por alto, a los profesionales del saber, a los profesores y profesoras, que con tanto esfuerzo, dedicación y ética profesional, impartieron parte de sus conocimientos, para que hoy mis seres queridos, que también fueron pilares fundamentales en mi carrera, familiares, amigos y amigas, vean coronado el triunfo a mi constancia. Soy de los que piensa que estudiar en la UCV no es fácil, pero el triunfo no es del que se inicia en la carrera, sino del que culmina.

Por estas razones, entre otras, agradezco sobre todas las cosas a Dios el Todopoderoso por haberme permitido culminar felizmente mi carrera terrenal. Pidiéndole siempre en oración que pueda alcanzar, en un futuro no lejano, la corona de la vida que Él tiene reservado a todos aquellos que le han dado su corazón de verdad.

Al Profesor, Dr. José Ángel Sorrentino, Director de la Facultad de Ingeniería Química de la UCV y a la Profesora, Dra. Mary Lorena Araujo, Profa. Titular de la Escuela de Química de la UCV, por ser mis tutores de la Tesis Especial de Grado, que el Dios Omnipotente bendiga el fruto de sus manos y que les dé mucha salud para que continúen con tan digna y loable labor, como es la de enseñar. De igual manera, a la Profa. María Antonieta Ranaudo y el Prof. Ramón Montero por haber formado parte del jurado calificador; Dios les bendiga de igual manera y recompense su esfuerzo.

A la Universidad Central de Venezuela, Laboratorio de Separaciones Mecánicas y su personal técnico, a todo el personal Docente de Química, Administrativo y Obrero, técnico y preparadores, a mis amigos y amigas de siempre, que nunca olvidaré, Dios les bendiga y haga resplandecer su rostro sobre cada uno de ustedes.

Drs. Mary Lorena Araujo Freschi y José Ángel Sorrentino, Profesores e Investigadores Titulares de la Universidad Central de Venezuela (UCV).

CERTIFICAMOS: Que el presente Trabajo Especial de Grado, titulado:

“ SEPARACIÓN ELECTROSTÁTICA CONTINUA MEDIANTE APLICACIÓN DE UN CAMPO ELÉCTRICO DE CORRIENTE DIRECTA ”

que presenta el **Lic. Isaí W. López Rincones**, para aspirar al Título de Licenciado en Química, ha sido realizado en los laboratorios de la Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería de la UCV bajo nuestra dirección durante el año 2009 y con esta fecha autorizamos su presentación.

Caracas, Septiembre de 2009

Dra. Mary Lorena Araujo Freschi
(Tutora)

Dr. José Ángel Sorrentino
(Tutor)

Los abajo firmantes designados por la Universidad Central de Venezuela, como integrantes del jurado examinador del Trabajo Especial de Grado titulado:

**“ SEPARACIÓN ELECTROSTÁTICA CONTINUA DE EMULSIONES SINTÉTICAS,
MEDIANTE APLICACIÓN DE UN CAMPO ELÉCTRICO DE CORRIENTE DIRECTA ”**

presentado por el **T.S.U. Isaí W. López Rincones**, certificamos que este trabajo cumple con los requisitos exigidos por nuestra Magna Casa de Estudios para optar por el título de Licenciado en Química.

Dra. Mary Lorena Araujo
(Tutora)

Dr. José Ángel Sorrentino
(Tutor)

Dra. María Antonieta Ranaudo
(Jurado)

Dr. Ramón Montero
(Jurado)

Resumen

En el presente Trabajo Especial de Grado se estudió las variables que afectan el proceso de deshidratación a emulsiones sintéticas (parafina-Span 80-Genapol 080-agua), al inducir un campo eléctrico de corriente directa.

Para abatir el fenómeno de percolación y caída del potencial eléctrico, se propuso diseñar un sistema de flujo continuo, en el cual se introdujeron dos placas de cobre, de geometría rectangular, recubiertas con material anticorrosivo y conectado a una fuente de poder en kV.

Entre las variables que afectan la rapidez de deshidratación se pueden mencionar: el voltaje, la concentración de desemulsificante, el porcentaje de agua emulsionada, la temperatura, entre otras. Éstas variables, juntamente con la aplicación de técnicas de separación mecánica, como es el proceso de centrifugación, coadyuvan a la deshidratación de la muestra en estudio.

La comparación de este modelo con los datos experimentales arrojados en una celda, mostró ser más eficiente el sistema de flujo continuo al reducir el fenómeno de percolación entre los electrodos de cobre, producto de un menor tiempo de residencia.

	Pág.
Dedicatoria.....	i
Agradecimientos.....	ii
Certificado.....	iv
Resumen.....	vi
Índice.....	viii
I- Introducción.....	1
II- Marco teórico.....	7
II.1. Naturaleza de la fase continua.....	9
II.2. Contenido de fase interna.....	10
II.3. Mecanismos de desestabilización.....	12
II.3.1. Sedimentación o formación de nata.....	13
II.3.2. Floculación.....	14
II.3.3. Coalescencia.....	14
II.3.4. Inversión de fase.....	14
II.4. Mecanismo de estabilización.....	15
II.4.1. Estabilidad dinámica.....	16
II.4.2. Estabilidad estática.....	16
II.5. Propiedades físicas de las emulsiones	16
II.5.1. Distribución y diámetro promedio de gotas.....	17
II.5.2. Conductividad eléctrica.....	17
II.5.3. Dispersión de la luz.....	17
II.6. Factores que afectan las propiedades reológicas de una emulsión	18
II.6.1. Viscosidad de la fase externa.....	18
II.6.2. Viscosidad de la fase interna.....	18
III- Antecedentes.....	19
IV. Justificación de la propuesta y Objetivos.....	25

	Pág.
IV.1. Objetivo general.....	27
IV.2. Objetivos específicos.....	27
V- Metodología experimental.....	29
 V.1. Formulación de emulsión parafina-agua y surfactantes no-iónicos (Genapol 080 y Span 80).....	 30
 V.2. Aplicación de la técnica de separación mecánica (centrifugación), a la emulsión sintética (parafina-agua y surfactantes no-iónicos), antes de la inducción del campo eléctrico D.C.....	 31
 V.3. Aplicación del campo eléctrico, de corriente directa, a la emulsión sintética, parafina-agua y surfactantes no iónicos, en una celda.....	 33
 V.4. Centrifugación de la emulsión después de la inducción del campo eléctrico de corriente directa.....	 34
 V.5. Microscopia óptica antes y después de someter la emulsión sintética al campo eléctrico de corriente directa.....	 35
 V.6. Aplicación del campo eléctrico de corriente directa a la muestra empleando un sistema de flujo continuo.....	 36
 V.7. Determinación de la viscosidad cinemática y dinámica de la emulsión sintética.....	 38

	Pág.
V.8. Determinación de la densidad relativa de la emulsión sintética	39
V.9. Aplicación del campo eléctrico de corriente directa, a la emulsión sintética , al sumergirse la celda electrostática en un baño térmico a T= (60-70) °C +/-1°C.....	40
VI - Resultados y discusión.....	42
VII - Conclusiones.....	69
VIII- Recomendaciones.....	72
IX - Bibliografía.....	74
X - Anexos.....	81

I. Introducción

El proceso de producción y procesamiento de petróleo, involucra cada vez con más frecuencia, la separación de agua, crudo y sólidos, tanto para la producción de crudos pesados, como la extracción en yacimientos tradicionales cuyo corte de agua es cada vez más alto, así como para el tratamiento de residuos acumulados en fosas petrolíferas.

Venezuela es un país caracterizado por un largo historial petrolero, de allí que desde los años 30 se conoce la existencia de grandes acumulaciones de crudo en la Faja Petrolífera del Orinoco o como fue llamada originalmente Faja Bituminosa del Orinoco (FBO). Ésta comprende grandes extensiones de tierra, donde se encuentran las mayores reservas mundiales de crudo pesado y extrapesado. Dichas reservas aún no han sido desarrolladas a plenitud, posiblemente en vista de su baja gravedad específica ($< 10^{\circ}$ API), aunado además por estar caracterizada por poseer:

- pobre o ninguna movilidad en el reservorio.
- alta viscosidad.
- elevadas concentraciones de metales, específicamente níquel y vanadio.
- altos valores de concentración de azufre, de resinas y asfaltenos.

Estas propiedades inciden negativamente en los tres procesamientos básicos del petróleo, a saber: producción, transporte y refinación. Por su parte, la alta viscosidad dificulta el uso de procesos convencionales como dilución y calentamiento, requiriéndose el desarrollo de métodos alternos, en los que se pueden mencionar la inyección de vapor de agua y adición de aditivos químicos que faciliten la formación de emulsiones con menor viscosidad que el crudo original.

Sin embargo, la necesidad de deshidratar al hidrocarburo para su procesamiento implica la adición de costosos surfactantes sintéticos (**anexo 1**),^[1] que compiten con los surfactantes naturales (**anexo 2**),^[2] del crudo; así mismo, los crudos ya deshidratados

deben ser sometidos a procesos de desmetalización y desulfuración previa a la refinación, a fin de evitar taponamiento y envenenamiento de los catalizadores.

Es obvio que la aplicación de estos procesos adicionales, involucra un incremento sustancial en el costo de producción, colocando a estos crudos en desventaja con los medianos y livianos que tienen mayor demanda en el mercado mundial. En este sentido, se han realizado trabajos relacionados con la geoquímica orgánica de la Cuenca Barinas-Apure, la tercera en importancia en Venezuela. Esto debido a que la mayor explotación petrolera se ha realizado en la Cuenca del Lago de Maracaibo y la Cuenca Oriental. ^[3]

Dentro de la Cuenca Barinas-Apure, existe una serie de campos petrolíferos que pueden ser de interés para la explotación del petróleo. Estos campos poseen crudo de importancia económica para el país, entre ellos está el Campo Guafita. Estos crudos presentan una gravedad API de 28° a 30°, lo que permite clasificarlos como crudos livianos. ^[4] Sin embargo, se conoce muy poco de sus características geoquímicas, cuyos estudios en esta área del conocimiento pueden contribuir a los estudios de exploración, con miras a futuras explotaciones en este campo, que faciliten aplicar procedimientos de separaciones mecánicas para extraer la mayor cantidad de agua y recuperar el hidrocarburo. ^[5]

La Cuenca de Barinas-Apure, se encuentra ubicada en una depresión estructural situada en la región Sur-Occidental del país. Está limitada hacia el noroeste por los contrafuertes de las cadenas de los Andes Venezolanos; al norte por la prolongación Occidental de la Serranía del Interior Central; al este y noroeste por el levantamiento de El Baúl; y al sur está separada de la Cuenca de los llanos colombianos por un alto gravimétrico situado entre los ríos Apure y Arauca. ^[5]

El Campo Guafita está ubicado al suroeste del estado Apure, en la zona fronteriza con Colombia (**figura 1**).^[5] Con la perforación de quince pozos en el Campo Guafita y cinco en el Campo la Victoria, se probó la existencia de crudos livianos en una secuencia estratigráfica entre la discordancia del Neógeno y la discordancia en el tope del Cretáceo. Para esa secuencia se introdujo el nombre Formación Guafita, a la cual se le asigna una edad del Oligoceno al Mioceno Temprano.^[5]

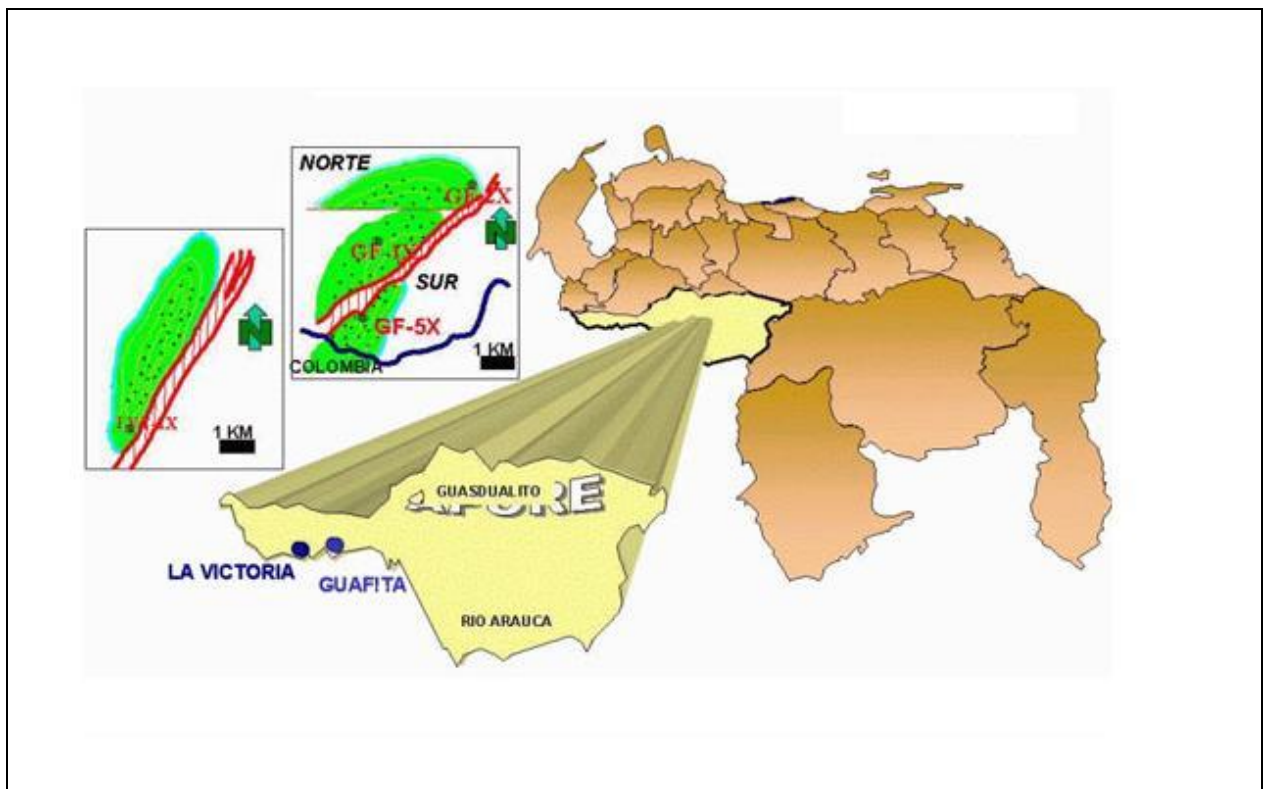


Figura 1. Ubicación del Campo Guafita.^[5]

En Venezuela operan alrededor unas 15 mil fosas de reserva petrolera, (**figura 2**)^[6] las cuales contienen un gran número de barriles de petróleo, agua, sedimentos y lodos. En ese sentido, se tienen 9 millones de barriles de crudo oxidado,

70 millones de barriles de agua, 50 millones de barriles de sedimentos y lodos (**anexo 3**). ^[7] Este crudo contiene un alto porcentaje de agua bajo la forma de emulsiones, que se van estabilizando con el tiempo, creando una barrera energética difícil de desestabilizar. Por otra parte, las partículas sólidas suspendidas en la zona interfacial de la suspemulsión se hacen más estables, trayendo como consecuencia que los procesos empleados de separación sean más difíciles y costosos. Como por ejemplo el empleo de aditivos químicos surfactantes, desemulsificantes, entre otros. ^[8]



Figura 2. Fosa de residuo petrolero. ^[6]

En ese sentido, todos estos tratamientos requieren uso de cantidades importantes de aditivos químicos para desestabilizar.

En este trabajo fueron empleadas técnicas de separación no químicas, como es el uso de un campo eléctrico de corriente directa ^[9] a muestras de suspemulsión y la técnica de centrifugación. Para ello, se prepararon emulsiones sintéticas a base de parafina-agua, empleando surfactantes no iónicos, que simulen las propiedades de desechos de fosas de reservas petroleras. ^[10] Para cumplir este propósito, se tomaron

trabajos preliminares realizados en el Laboratorio de Separaciones Mecánicas de la Facultad de Ingeniería de la UCV; así mismo, se establecieron mecanismos de movimientos de fluidos, a fin de promover la remoción del agua coalescida de los alrededores de las placas metálicas para tratar de mejorar los resultados de la separación electrostática. Por otra parte, se determinó la cantidad de agua presente en la fase dinámica empleando la técnica de centrifugación. Todo esto con propósito de encontrar un aporte alternativo en las técnicas de separación en las suspensions, a fin de recuperar gran parte de los desechos hidrocarbonados, producto de la producción y extracción en la industria petrolera. ^[11]

II. Marco teórico

Una emulsión estable y homogénea, provenientes de los procesos de producción petrolera, está constituida esencialmente por agua, aceite y sólidos. El aceite y los sólidos suspendidos, poseen componentes que estabilizan la dispersión al transcurrir el tiempo. En la interfase agua-aceite de una emulsión natural, pequeñas partículas sólidas alteran de forma drástica su energía libre interfacial o tensión interfacial, trayendo como consecuencia la estabilidad de la mezcla, y por ende de la emulsión formada. ^[12]

Una emulsión es un sistema disperso, constituido básicamente por dos líquidos inmiscibles, con la fase dispersa (interna), presente en la forma de pequeñas gotas en una fase continua (externa). ^[12] El agua como fase dispersa le proporciona al petróleo un volumen adicional al transporte así como propiedades corrosivas, el cual se ve reflejado en la reducción de la vida útil de los equipos de proceso. Debido a esto, es necesario aplicarle un proceso de deshidratación, como es el de suministrar campo eléctrico de corriente directa, mediante el cual se logra la coalescencia de las gotas de agua emulsionada. ^[13]

La aplicación de campo eléctrico a la emulsión del crudo, orienta las cargas eléctricas dentro de las gotas de agua emulsionada causando su coalescencia. Por lo tanto, esto provoca que se formen gotas más grandes, las cuales precipitarán debido a la fuerza eléctrica y de la gravedad. ^[14]

Como el proceso de emulsión no es espontáneo, las emulsiones son sistemas termodinámicamente inestables, por lo que debe existir una barrera de energía que se oponga al rompimiento (fraccionamiento de fases); esto implica que las emulsiones son estables sólo desde el punto de vista cinético. ^[14] La emulsificación de un líquido inmiscible en otro, normalmente requiere la presencia de un tercer componente con

actividad interfacial, conocido como emulsionante, que facilita la formación de una emulsión estable. ^[15]

Las emulsiones se clasifican según la naturaleza de la fase continua, el contenido de la fase interna, la cual viene a ser aquella que se encuentra ocluida, bajo la forma de emulsiones, en la fase continua. ^[16]

II.1. Naturaleza de la fase continua

En la mayoría de los casos una emulsión es preparada con dos líquidos inmiscibles, uno de los líquidos es una fase acuosa y el otro una fase aceitosa u orgánica. En los párrafos que siguen se emplearán las abreviaturas W (agua) y O (aceite) para dichas fases.

Los tipos más comunes de emulsiones son aquellas en los que un aceite se dispersa en agua, en cuyo caso el sistema se conoce como emulsión de aceite en agua (O/W del inglés oil/water), o cuando el agua se dispersa en el aceite para formar las emulsiones de agua en aceite (W/O). Pueden existir casos más complejos, por ejemplo si las gotas de aceite de una emulsión O/W contienen en su interior gotas de agua, se dice que se tiene una emulsión múltiple de tipo W/O/W (**figura 3**). ^[17]

En la **figura 3**, se muestra cómo están clasificadas las emulsiones según la naturaleza de la fase continua. En las emulsiones W/O, la fase dispersa está representada por los puntos de color blanco y la fase continua es la de color azul. En este tipo de emulsiones, la estabilidad de la misma, dependerá de la composición de los constituyentes que la conforman; además, de la viscosidad de la fase continua.

En las emulsiones O/W, mostradas en la **figura 3**, la fase dispersa son los puntos de color azul oscuro y la fase continua, el color beige.

Los casos más complejos o emulsiones múltiples, se presentan cuando la emulsión está constituida por W/O/W o O/W/O.

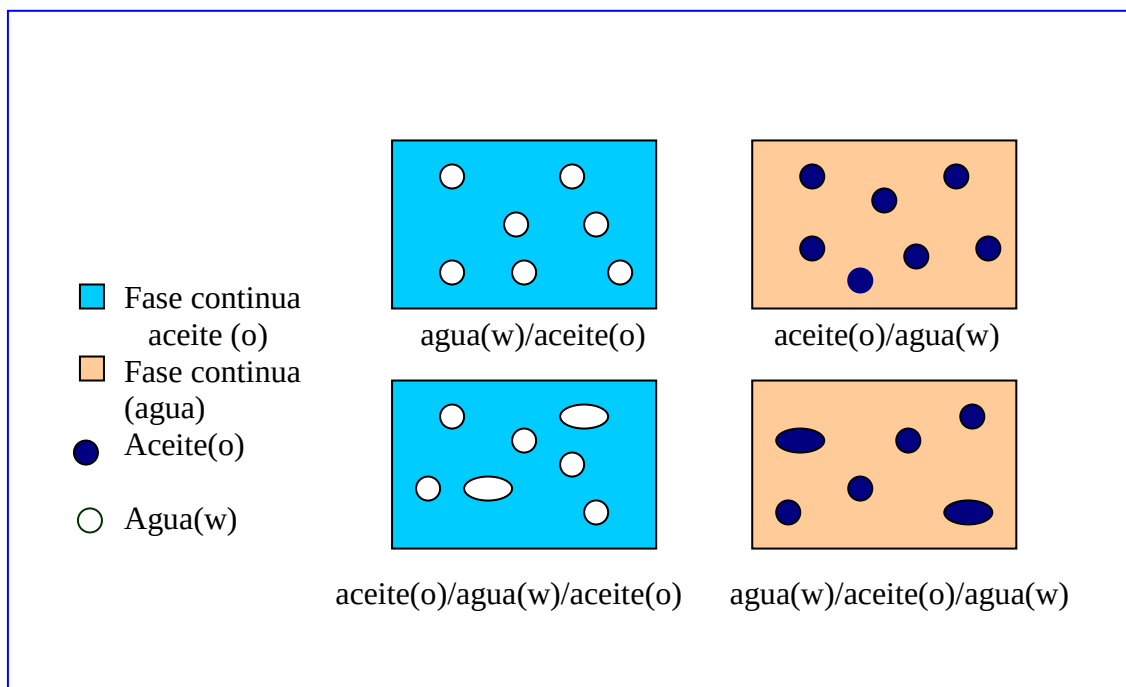


Figura 3. Clasificación de las emulsiones según la naturaleza de la fase continua. ^[17]

II.2. Contenido de fase interna

La fase interna viene a ser aquella que se encuentra ocluida, bajo la forma de emulsiones, en la fase continua. Por ejemplo, las gotas de agua emulsionadas en el petróleo.

En los procesos de producción de petróleo, en áreas donde emerge contaminado con salmueras subterráneas y en otros casos con agua de mar, estas pueden estar en forma libre o emulsionada en el petróleo. Tan pronto como llega a la superficie, el agua libre se elimina por sedimentación, sin embargo el agua emulsionada no es directa, debido a la estabilidad que presentan las gotas de agua emulsionada a la fuerza de gravedad.

A continuación se presentan algunos casos de fase interna en una emulsión del tipo W/O.

- Entre 0 y 5% de fase interna: son aquellas emulsiones de muy bajo contenido de fase agua, en las cuales las gotas no presentan interacciones directas entre sí.
- Entre 5% y 30% de fase interna: se trata de emulsiones de bajo contenido de fase interna (agua).
- Entre 30% y 70% de fase interna: se trata de emulsiones de mediano contenido de fase interna. Sus propiedades dependen considerablemente de su formulación, en particular es el intervalo en el cual se pueden obtener los dos tipos de emulsiones (O/W o W/O).

Por encima del 70% de fase interna o HIPR ("High internal phase ratio"): se trata de emulsiones de alto contenido de fase dispersa, que en general no son estables si no tienen un emulsionante adecuado. El contacto entre gotas es muy frecuente y la coalescencia puede ocurrir fácilmente. Adicionalmente, se presenta el problema del aumento de la viscosidad con el aumento de contenido de fase interna, debido a que las gotas están muy cercanas y ocurre mayor fricción entre ellas cuando fluyen.

Las emulsiones se pueden formar por:

- dos líquidos inmiscibles
- suficiente agitación para dispersar un líquido en pequeñas gotas
- un emulsificador para estabilizar las gotas dispersas.

Una emulsión puede ser obtenida a través de un proceso denominado *emulsiónación*. Éste proceso consiste en agitar una mezcla de agua-aceite-surfactante con un equipo mecánico que genere turbulencia, produciendo en consecuencia, un aumento del área interfacial.^[18]

El resultado dependerá de la habilidad de combinar adecuadamente dos tipos de variables, para poder lograr la estabilidad cinética requerida: las de formulación y las de formación. Las variables de formulación comprenden el efecto de pH, salinidad de la fase acuosa y temperatura, entre otras; mientras que, las variables de formación se refieren al efecto de la relación aceite-agua, velocidad y tiempo de mezclado, tipo de mezclador y concentración de surfactante.

II.3. Mecanismos de desestabilización

Existen cuatro procesos principales que causan cambios en las propiedades de las emulsiones y por tanto afectan su estabilidad: sedimentación o formación de nata, floculación, coalescencia e inversión (**figura 4**).^[19]

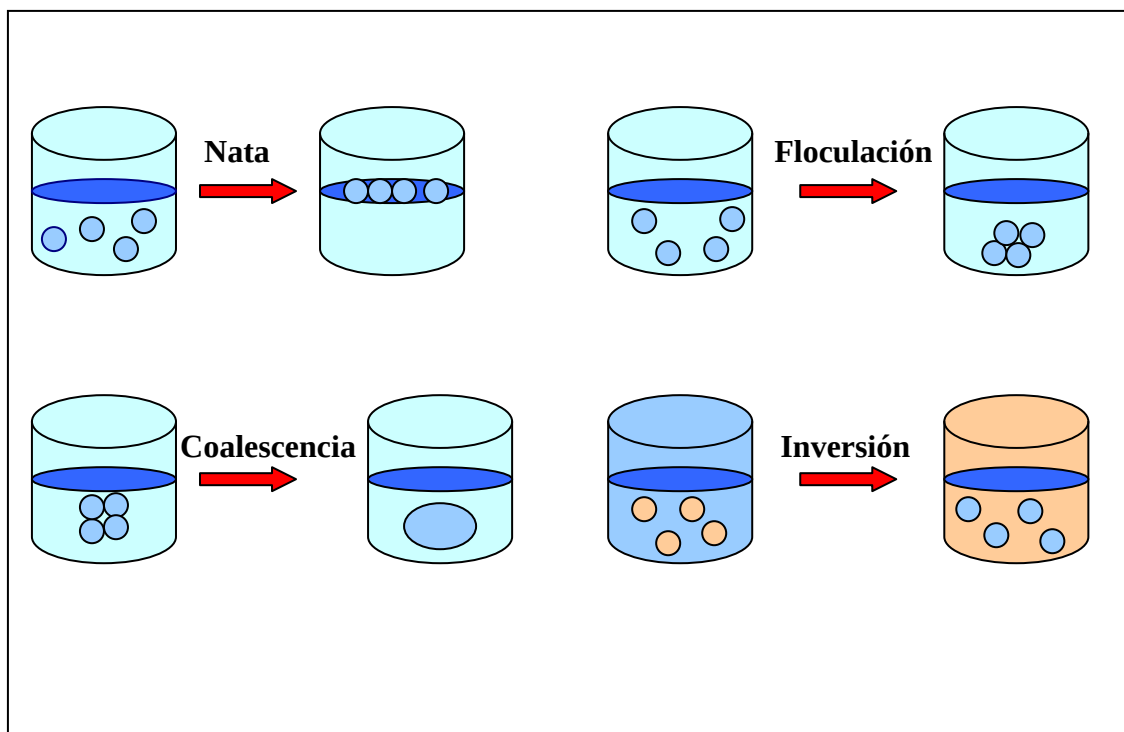


Figura 4. Mecanismos de desestabilización de las emulsiones. ^[19]

II.3.1. Sedimentación o formación de nata

Es la agregación de las gotas bajo la influencia de la gravedad, producidas por una diferencia de densidad apreciable entre la fase continua y dispersa. Cuando la fuerza de gravedad excede el movimiento térmico de las gotas, se desarrolla un gradiente de concentración en el sistema en el que las gotas más grandes se mueven a mayor velocidad hacia la superficie (si la densidad de la fase dispersa es mayor que la continua). En los casos extremos, las gotas se concentran en la superficie ("creaming") o en el fondo (sedimentación) en ninguna de estas situaciones las gotas pierden su individualidad y el proceso es reversible. ^[20]

II.3.2. Floculación

Este se refiere al proceso de agregación de gotas, sin que estas pierdan su identidad y sin cambio en el diámetro promedio de las mismas. Es el resultado de las atracciones de Van der Waals y de las interacciones electrostáticas y estéricas entre las moléculas de surfactante adsorbidas sobre la superficie de gotas adyacentes. ^[20]

II.3.3. Coalescencia

Es una dispersión de gotas de un líquido (la fase interna o discontinua) en un segundo líquido (la fase externa o continua) con el primero, que presentan una cierta estabilidad respecto a la coalescencia, estabilidad cuya magnitud o escala de tiempo depende esencialmente de las aplicaciones. ^[20]

Cuando dos gotas de la fase dispersa están ubicadas a una distancia suficientemente pequeña (por ejemplo, una distancia más pequeña que su radio), están sometidas a dos tipos de fuerzas atractivas de Van der Waals, que tienen que ver con la masa de materia presente en las dos gotas y por otra parte, las fuerzas de repulsión que dependen de las propiedades interfaciales que el surfactante adsorbido les confiere y que resulta de una fuerza repulsiva. ^[20]

II.3.4. Inversión de fase

La fase continua se convierte en fase dispersa y viceversa. Este proceso no conlleva a la separación de las fases, sino a la alteración de la naturaleza de la emulsión. La inversión puede ser promovida por varios factores entre los cuales destacan la temperatura, cambios en la formulación del sistema y efectos de tipo mecánico. ^[21]

II.4. Mecanismos de estabilización

Las gotas dispersas en la fase continua de una emulsión están siempre sometidas a un movimiento Browniano, lo que ocasiona que con gran frecuencia se produzcan choques entre ellas.^[22] La estabilidad de las emulsiones depende, por lo tanto, de la magnitud de las interacciones entre las gotas durante tales choques.^[22]

Básicamente, las interacciones entre las partículas dispersas son de dos tipos: unas de atracción y las otras de repulsión. Cuando las de atracción predominan sobre las de repulsión, las gotas se adhieren y la emulsión flocula y/o coalesce.^[22]

Cuando la repulsión domina, las energías libres de activación frente a la floculación y a la coalescencia son altas, por lo que la emulsión permanece estable en su estado disperso. Las fuerzas de Van der Waals están siempre presentes en cualquier sistema disperso y son atractivas, de allí que una emulsión es estable cuando existe una fuerte energía de repulsión que contrarreste la atracción de Van der Waals.^[23]

Las fuerzas de repulsión en emulsiones son normalmente de origen eléctrico, debido a la repulsión electrostática entre la doble capa eléctrica que rodea cada una de las gotas dispersas, o de origen estérico, debido a la repulsión entre las capas de surfactantes, adsorbidas sobre la superficie de las gotas dispersas. Para el caso específico de emulsiones estabilizadas con emulsificantes no-iónicos, la estabilización se basa en la interacción entre las cadenas hidrofílicas del surfactante, que penetra en la fase acuosa, formando una película protectora alrededor de las gotas dispersas.

II.4.1. Estabilidad dinámica

Se dice que una emulsión presenta estabilidad dinámica cuando al ser sometida a fuerzas de cizallamiento durante un determinado lapso de tiempo, las propiedades que la caracterizan permanecen inalteradas, es decir que no ocurre coalescencia o inversión de la emulsión. ^[24] La estabilidad dinámica de emulsiones, la cual se determina midiendo los cambios en la distribución y el diámetro promedio de las gotas durante los procesos de transporte y manejo, depende de varios factores, especialmente de la concentración de surfactante y de la temperatura.

II.4.2. Estabilidad estática

Este tipo de estabilidad está referida a los cambios que sufren las emulsiones aceite en agua, esencialmente en cuanto a distribución y diámetros promedio de gota y viscosidad, durante su almacenamiento bajo diferentes condiciones de formulación y temperatura.

II.5. Propiedades físicas de las emulsiones

Las razones por las que se necesita conocer las propiedades físicas de las emulsiones se deben a que estas propiedades son las verdaderas consideraciones que permiten identificar el tipo de sistema o sus posibles aplicaciones. Las principales propiedades físicas de las emulsiones son: distribución y diámetro promedio de gotas, conductividad eléctrica y dispersión de la luz.

II.5.1. Distribución y diámetro promedio de gotas

Un cambio radical en la distribución asociada al diámetro promedio de gotas, suscita con frecuencia en una marcada variación de las propiedades.^[25] Relacionan esto con una reducción en la distribución del diámetro promedio de gotas, lo cual da lugar a un incremento del área interfacial y a un incremento en la viscosidad.

II.5.2. Conductividad eléctrica

La mayoría de los aceites son malos conductores de la electricidad, mientras que los sistemas acuosos que contienen uno o varios electrolitos, son buenos conductores de la electricidad.^[25]

Una medida de la conductividad puede servir para identificar la fase continua, es así como esta propiedad es de tanta relevancia, ya que permite identificar el tipo de emulsión: aceite en agua (O/W) de alta conductividad y agua en aceite de (W/O) de baja conductividad.

II.5.3. Dispersión de la luz

Se debe a la reflexión y refracción de los rayos luminosos sobre las gotas dispersas. En otras palabras, el haz de luz incide directamente en las diferentes gotas de agua, penetrando dentro de las mismas, reflejándose totalmente en su interior y al salir de ellas, se refractan originando la dispersión de la luz, por lo que las gotas actúan como pequeños prismas. Las técnicas actuales de medición están basadas en este principio.^[26]

II.6. Factores que afectan las propiedades reológicas de una emulsión

La viscosidad es una propiedad que caracteriza la resistencia de un fluido a desplazarse. Se define la viscosidad a partir de un caso simple, en el cual el fluido se ubica entre dos láminas paralelas con distancias entre ellas. Una de las láminas se mantiene fija, mientras la otra se mantiene en movimiento al aplicar una fuerza (figura 5).^[27]

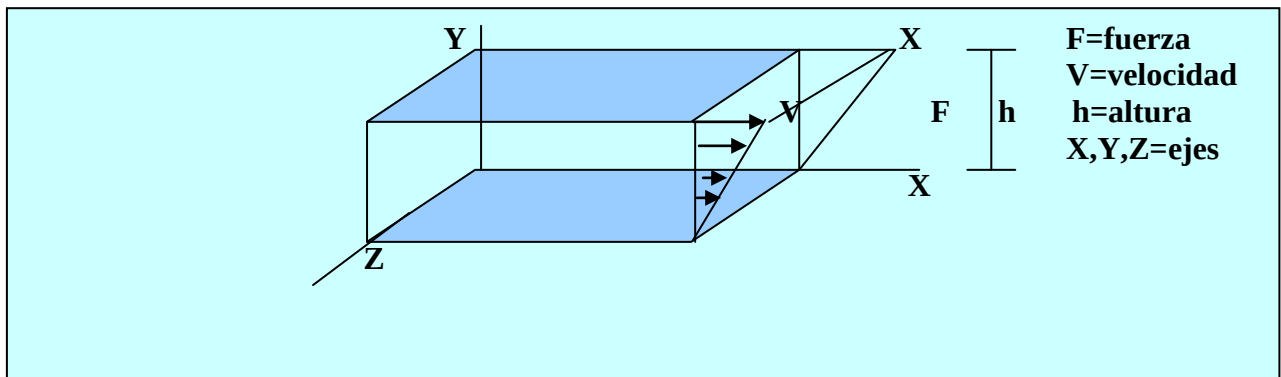


Figura 5. Deformación de un fluido en dos platos paralelos.^[27]

II.6.1. Viscosidad de la fase externa

Todos los modelos teóricos o empíricos, indican una relación de la proporcionalidad entre la viscosidad de la emulsión y la viscosidad de la fase externa.

II.6.2. Viscosidad de la fase interna

Este es un efecto que no se ha estudiado, sino sólo para emulsiones de muy bajo contenido de fase interna, pero algunos autores la han incluido en el desarrollo de sus ecuaciones empíricas.

III. Antecedentes

La tecnología para el mejoramiento de la unión electrostática de gotas de agua en las emulsiones de tipo W/O, siempre ha sido un tema de estudio. Históricamente la coalescencia electrostática fue un hallazgo propiciado por la industria petrolera en California (EE.UU). Hoy en día esta tecnología se considera generalmente para la separación de una fase acuosa dispersa en una fase de aceite dieléctrico, con una constante dieléctrica significativamente menor que el de la fase dispersa. Varios diseños han sido introducidos con la mayor utilización de corriente alterna (A.C.). No obstante, la corriente directa (D.C.) de campo eléctrico ha sido menos común en el pasado, en comparación a la corriente alterna. A partir del año 1981, el concepto de campos eléctricos pulsados D.C. se introdujo, junto con electrodos aislados. Desde entonces este se ha vuelto más común en la tecnología de electrocoalescencia.

La creación de campos eléctricos son especialmente útiles, cuando el contenido de la fase acuosa de la emulsión es alto, para evitar cortocircuitos entre el par de electrodos. Tratamiento de los viejos pozos de petróleo es un buen ejemplo, donde el volumen de agua contenido podría variar significativamente. Se han realizados trabajos que indican la existencia de una frecuencia óptima que depende del material del electrodo, su revestimiento, geometría y su espesor, entre otras, como por ejemplo la composición del líquido de emulsión. Este es, sin embargo, una cuestión polémica que no ha sido completamente resuelto.

Las características y geometría de los sistemas de electrodos (cilíndricos o placas), influyen en el rendimiento de la coalescencia electrostática, estos están estrechamente relacionadas con el tipo de campo eléctrico aplicado y la emulsión utilizada. Otros métodos que pueden ser combinados con el tratamiento eléctrico como la centrifugación, la filtración, el empleo de métodos de alta presión y temperatura; así como la mezcla, la calefacción y la adición de productos químicos, entre otros, han mejorado el rendimiento de coalescencia de las gotas de agua en la emulsión de tipo W/O. ^[28]

A continuación se presentan algunos avances en la investigación de separación de emulsiones del tipo W/O:

Bailes y Larkai ^[29] investigaron la importancia de aislar los electrodos empleados en la deshidratación electrostática de emulsiones sintéticas; demostrando que al formarse un puente de gotas de agua entre estos, la carga se reduce sólo a la superficie de los mismos; evitando la descarga completa de la energía almacenada en el condensador, lo que trae como consecuencia que el campo eléctrico aplicado no disminuya significativamente.

Posteriormente, Bailes y Larkai ^[30] en su trabajo titulado *“Influencia de la relación de fases en la coalescencia electrostática de dispersiones de agua en aceite”*, notaron el efecto de la relación de fases en la coalescencia electrostática en las emulsiones W/O. Ellos concluyeron que el aumento de la composición de la fase acuosa, afecta el tamaño y el número de gotas en la fase dispersa; así como también, a la carga polarizada que puede ser inducida en cada gota para un campo eléctrico dado. Por lo tanto, el incremento de la composición de la fase acuosa tiene un efecto sobre el promedio de colisiones de las gotas y del porcentaje coalescido. Incluso estos autores pudieron determinar un valor óptimo de concentración de la fase acuosa, para favorecer la coalescencia y obtener una correlación que expresa de forma cuantitativa el número promedio de colisiones por segundo. Esto depende de parámetros como la composición de agua, el factor de empaque, la conducción de corriente promedio, el área de los electrodos y la fuerza máxima del campo eléctrico aplicado.

Taylor ^[31] evaluó las emulsiones de agua en crudo, preparando emulsiones de agua en Kerosén. Posteriormente las desestabilizó aplicando campo eléctrico A.C. y D.C. pulso. Adicionalmente aplicó la técnica de video/microscopía bajo el efecto del

campo D.C. pulso, encontrando que la atracción gota-gota y la coalescencia ocurre en el levantamiento y en la caída de la sucesión del pulso.

Eow y Ghadiri ^[32] sugirieron que la técnica de coalescencia electrostática, es eficiente para la separación de emulsiones W/O. Además, concluyeron que el uso de energía térmica junto a la aplicación del campo eléctrico, desestabiliza la emulsión por lo que la rapidez de coalescencia es mayor.

Einhorn-Stoll y col ^[33] estudiaron la influencia de la composición de la emulsión, así como el procedimiento de preparación de éstas. Seguidamente las caracterizaron en base a su estructura y estabilidad, empleando la técnica de fotometría.

Novales y col ^[34] desarrollaron un método para el estudio de la desestabilización de emulsiones y suspensiones a través de la técnica de análisis de imagen asistida por videos. Logrando obtener la secuencia cinética del proceso de deshidratación, tanto de la emulsión como el de la suspensión. La ventaja de la técnica empleada es que no requiere el conocimiento a priori de la emulsión ni de sus componentes para poder obtener la cinética de desestabilización.

Marfisi ^[35] estudió la influencia de la variación de la fase dispersa (agua), en el proceso de coalescencia electrostática de una emulsión sintética, confirmando que el uso de campo eléctrico de corriente directa (D.C.), acelera la coalescencia de las gotas en la fase dispersa. Asimismo, concluyó que para cada experiencia, la velocidad de separación de la fase acuosa aumenta considerablemente por la presencia del campo eléctrico. Además, en su estudio utilizó el deshidratador eléctrico DEP-2, el cual está conectado a un computador para el registro de datos durante la ejecución de las pruebas. Asimismo, también concluyó que al aumentar la composición de la fase acuosa, la desestabilización de la emulsión aumenta. Aunado a ello, estudió la

geometría de electrodos de acero inoxidable con formas de espiral, de rejilla, de placa y tubos cilíndricos paralelos. Esto le permitió demostrar que al realizar la deshidratación eléctrica, la estabilidad de la emulsión varió respecto a cada geometría, concluyendo que puede deberse a que el área de contacto de la emulsión con el electrodo es diferente en cada geometría, así como la alineación de las gotas entre los electrodos y el balance de fuerzas de atracción-repulsión entre las gotas.

Donis y Ricaurte ^[36] llevaron a cabo un trabajo de investigación sobre la deshidratación de crudo contenido en el patio de tanques en Lagunillas Norte, empleando aditivos químicos, desemulsificantes y la deshidratación termoquímica. Los resultados obtenidos indican que la filtración de la muestra no es favorable para el proceso de separación de fases, pues el tamaño de las gotas disminuye, estabilizando aún más la emulsión.

Por su parte Morales y col ^[37] empleando la técnica de microscopia óptica, mostraron que al suministrar un campo eléctrico de corriente directa, a las muestras emulsionadas, se logra la ruptura de las emulsiones. Esto les permitió comprobar la efectividad de la aplicación del campo eléctrico, que conlleva a acelerar el proceso de desestabilización de las emulsiones.

Zúñiga y Padrón ^[38] emplearon la técnica de microscopia óptica y técnicas estándares ASTM para la caracterización de emulsiones provenientes de fosas petroleras. Estos autores observaron que el diámetro promedio de las gotas coalescidas aumentaba, al ser inducidas con el campo eléctrico D.C.

De Almeida y Rodríguez ^[39] realizaron la construcción y puesta en marcha de un equipo de deshidratación electrostática para el estudio de la separación de fases de emulsión W/O, a través del estudio del efecto del campo eléctrico en la sedimentación y

coalescencia de emulsiones de agua en aceite. Estos autores determinaron que al aplicar corriente eléctrica a las emulsiones por tiempos menores o iguales a dos horas, no se afecta la temperatura de la emulsión en estudio, pero sí se acelera la desestabilización de las mismas y el posterior rompimiento en sus fases originales.

Guerra ^[40] elaboró el protocolo seguido en el presente trabajo para la formulación de emulsiones de agua en aceite, utilizando surfactantes no iónicos (Span 80 y N 40), demostrando que se alcanza mayor estabilidad de las emulsiones W/O con un valor de HLB entre 5 y 6, con un mecanismo de agitación continuo y una salinidad de la fase acuosa entre 4 y 8 g/dL.

Finalmente, Hidalgo ^[41] deshidrató muestras sintéticas, empleando colorantes orgánicos naturales con el fin de visualizar mejor la separación de fases. Permitiendo de esta manera realizar mejor aún, los gráficos % Parafina en función del tiempo y % Agua coalescida en contra del tiempo.

IV. Justificación de la propuesta y objetivos

A fin de recuperar desechos de mezclas de los procesos de producción petrolera, agua-aceite-sólidos, sin emplear aditivos químicos, se ha establecido como propuesta de trabajo, la aplicación de técnicas de separación de bajo costo, como por ejemplo:

1. Suministro de un campo eléctrico de corriente directa a emulsiones sintética en una celda, en sistemas de flujo continuo.
2. Aplicación de la técnica de separación mecánica como la centrifugación, a emulsiones sintéticas.
3. Re-tratamiento electrostático a la emulsión sintética, después de la centrifugación.

En esta investigación se emplearon emulsiones sintéticas a base de parafina-agua y de surfactantes no iónicos (Span 80 y Genapol 080). La emulsión sintética se preparó en el Laboratorio de Separaciones Mecánicas de la Facultad de Ingeniería Química de la UCV

El primer punto que se consideró fue el estudio del campo eléctrico asociado con las moléculas de aguas emulsionadas en la muestra sintética, desde el punto de vista de un observador en un referencial tal que las cargas estén en reposo; es decir, se estudió la electrostática; el segundo punto, fue someter a la emulsión sintética, previamente energizado con el campo eléctrico de corriente directa, a procesos de separación mecánica, mediante la centrifugación. Una vez finalizado el proceso de inducción electrostática y separación de la emulsión en estudio, se procedió a observar el fenómeno de coalescencia, antes y después de la inducción del campo eléctrico, después de la centrifugación y, por último, el re-tratamiento del sobrenadante con el campo eléctrico D.C. Esto se alcanzó empleando la técnica de microscopia óptica.

Finalmente, la investigación, traerá a posteriori, beneficios a la industria petrolera venezolana para que los productos de desechos de las fosas petroleras sean aprovechables, con una mejor calidad, menos contaminación ambiental, con una sustancial ganancia. Además, para alcanzar los objetivos propuestos, como la aplicación de campo eléctrico D.C. como técnica desestabilizadora de emulsiones sintéticas, mediante la inducción de movimiento del fluidos, para retirar las fases separadas de los alrededores de los electrodos, conocido como el fenómeno de percolación.

IV.1. Objetivo general

Mejorar la separación electrostática de emulsiones sintéticas, agua-parafina, empleando como técnica desestabilizadora, el campo eléctrico de corriente directa en un sistema de flujo continuo.

IV.2. Objetivos específicos

- a. Construir un sistema de deshidratación eléctrica de flujo continuo, que permita variar la velocidad con la que la mezcla circula entre los electrodos y modifique la configuración de los mismos.
- b. Aplicar técnicas de separación mecánica, como la centrifugación, una vez que las muestras han sido sometidas al campo eléctrico de corriente directa y medir el corte de agua coalescida.
- c. Estudiar experimentalmente las variables de formulación y formación, como son: el voltaje, porcentaje de dilución, concentración de desemulsificante, la

temperatura y la velocidad de circulación entre los electrodos; que afectan la rapidez de deshidratación al aplicar un campo eléctrico de corriente directa a muestras sintéticas.

- d. Calcular el tiempo mínimo de residencia de las emulsiones sintéticas, al ser sometidas al campo eléctrico de corriente directa.

V. Metodología experimental

V.1. Formulación de emulsión parafina-agua y surfactantes no-iónicos (Genapol 080 y Span 80). ^[42]

En un vaso de precipitado de 250 mL se vertieron 50,0 mL de parafina líquida, (figura 6). Se agregaron 0,4 mL y 1,6 mL de Genapol 080 y Span 80, respectivamente. Se mezclaron hasta obtener una mezcla homogénea. Seguidamente, se procedió a colocar el sistema bajo agitación constante. Posteriormente se vertieron 50,0 mL de agua destilada (a una velocidad de aproximadamente $7 \text{ cm}^3/\text{min}$). Se obtuvo una mezcla homogénea, en un tiempo total de agitación de 10 minutos. Luego se dejó reposar la emulsión durante 2 horas, antes de proceder con la aplicación del campo eléctrico de corriente directa. En el **anexo 4**, ver el modelo de cálculos para la preparación de la emulsión sintética.

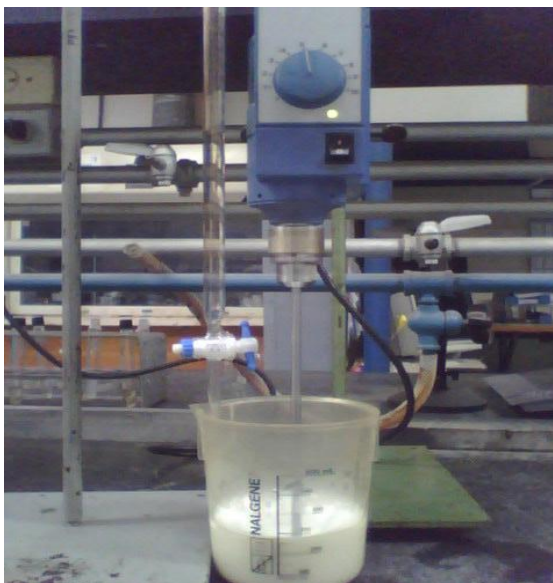


Figura 6. Preparación de la muestra sintética (parafina, Span 80, Genapol 080 y agua). Agitador eléctrico Kika Labortechnik. Rw 1b Basic con rango de velocidades entre 100 rpm y 1000 rpm y una potencia de 75 W.

V.2. Aplicación de la técnica de separación mecánica (centrifugación), a la emulsión sintética (parafina-agua y surfactantes no-iónicos), antes de la inducción del campo eléctrico D.C.

Las muestras sintéticas antes de aplicarle el campo eléctrico de corriente D.C., fueron sometidas a un proceso de centrifugación, a 5000 rpm en un lapso de tiempo de 10 minutos, con el fin de verificar la estabilidad de las mismas. Al finalizar el proceso, se observó que las emulsiones eran completamente monofásicas. Su apariencia física era de color blanco lechoso y homogénea (**figura 7**). Una vez confirmada la estabilidad de la emulsión sintética, se procedió a realizar las demás pruebas de aplicación del campo eléctrico D.C. a una alícuota de 20,0 mL de la emulsión sintética contenida en una celda (**figura 8**)

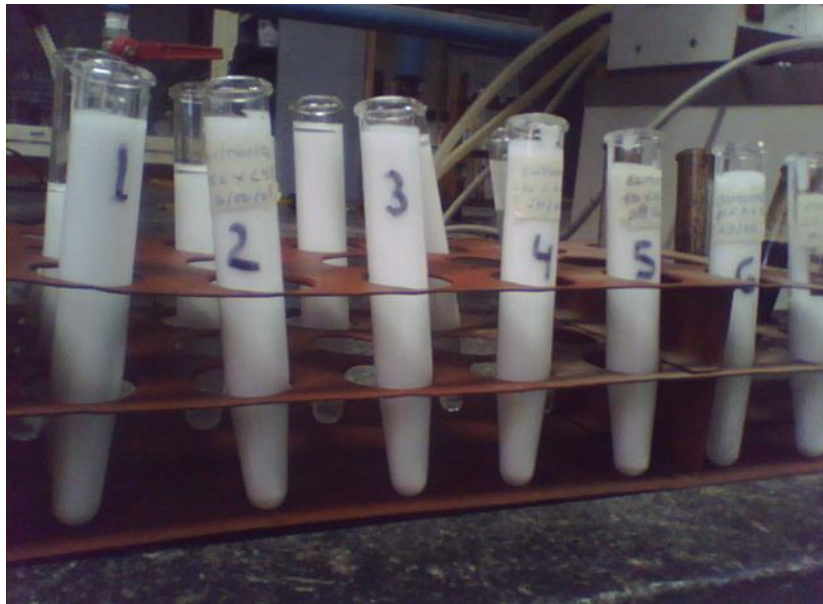


Figura 7. Emulsión sintética después de centrifugar y antes de la inducción del campo eléctrico D.C.

Se pudo observar que durante el proceso de separación electrostática, al finalizar la misma, quedaba en el fondo la fase coalescida de aspecto cristalino; mientras que en la parte superior, el sobrenadante, constituido por una fase intermedia de color blanco lechoso y otra superior totalmente transparente de consistencia oleosa. Al re-tratar el sobrenadante con el campo eléctrico D.C., su aspecto se iba tornando más cristalino, con un mayor volumen de la fase superior traslúcida.



Figura 8. Celdas. **Izquierda:** muestra sintética separada por acción del campo eléctrico DC; fase inferior la coalescida y la superior emulsión sintética con líquido de consistencia oleosa. **Intermedia:** Celda electrostática con la fase intermedia constituida por la emulsión sintética y la fase líquida oleosa y la última, **derecha:** celda electrostática con la emulsión sintética retratada con el campo eléctrico D.C.

V.3. Aplicación del campo eléctrico, de corriente directa, a la emulsión sintética, parafina-agua y surfactantes no iónicos, en una celda

Se procedió a llenar la celda electrostática (**figura 9**), con 20,0 mL de la emulsión en estudio (**sección V.1.**), verificando que durante el llenado de la celda electrostática, no quedaran burbujas de aire atrapadas en la emulsión. La celda electrostática fue colocada en una superficie plana.

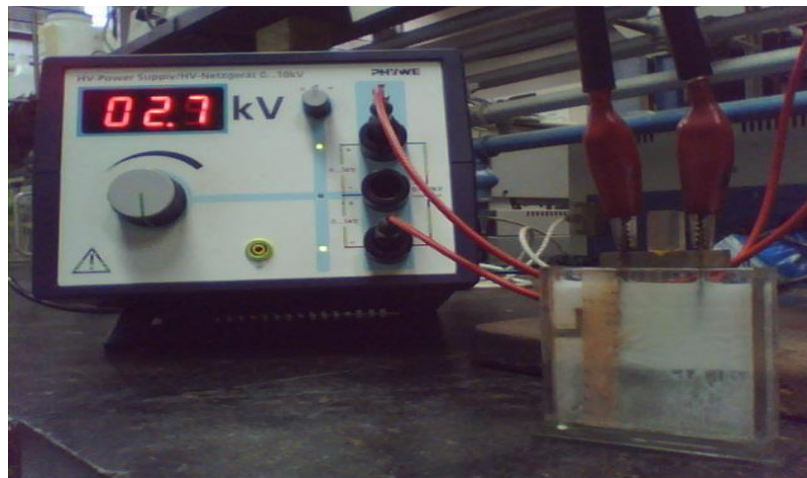


Figura 9. Deshidratador eléctrico. Modelo HV-Power supply/HV Netzgerat 0-10 kV Celda Cap. 23 cm³ con placas de cobre.

Los electrodos (dos placas de cobre), fueron seguidamente conectados a la fuente de poder (**figura 9**). Se empleó un voltaje D.C. de aproximadamente 2 kV. Seguidamente se tomó nota del volumen de agua separada (mL), el tiempo (min) y el voltaje (kV), justo hasta que el volumen del agua alcanzó el 20 % del volumen total de la misma contenida en la emulsión sintética (volumen total de emulsión empleado de 10 mL).

Cuando no se observó más separación de agua, durante la aplicación del campo eléctrico, se apagó la fuente de poder. Se retiraron los electrodos.

V.4. Centrifugación de la emulsión después de la inducción del campo eléctrico de corriente directa

El sobrenadante obtenido de la emulsión ya separada por la acción del campo eléctrico, se coloca en los tubos de centrifuga graduados, (**figura 10**) y son llevados al equipo de centrifugación por espacio de 10 minutos a 5000 rpm (**figura 11**). Finalizado éste tiempo, se procedió a medir el volumen de agua coalescida.

El sobrenadante proveniente de la centrifugación, es sometido nuevamente al campo eléctrico de corriente directa y separación mecánica.

El volumen total (mL) de agua recuperada durante la inducción del campo eléctrico de corriente directa, es recolectado, antes y después de someter la emulsión al proceso de centrifugación. Finalmente se determinó el % agua recuperada (**anexo 5**).

[43]



Figura 10. Tubos de centrifugas graduados de capacidad, 15 mL c/u, con la muestra sintética, después del proceso de centrifugación.



Figura 11. Equipo centrífuga. Modelo EHNISA. 330 Watt y 220 V. Max. rpm 10000.

V.5. Microscopia óptica antes y después de someter la emulsión sintética al campo eléctrico de corriente directa

Una vez finalizada la preparación de la emulsión sintética, centrifugada, inducida con el campo eléctrico D.C. y re-tratada con el campo eléctrico D.C., se colocó una gota de la misma, para cada experiencia, en un portaobjeto que fue llevada a un microscopio óptico (**figura 12**), modelo 107.AXIOM. Marca NIKON Eclipse ME 600D. Japan P10X (WF10X) P16X. Objetivos: 5X, 10X, 20X, 50X(S) y 100X. Ocular 10X. Todo esto se realizó con el fin de obtener las diferentes micrografías y corroborando la coalescencia electrostática de la emulsión sintética preparada en el Laboratorio.



Figura 12. Microscopio óptico. Modelo 107.AXIOM. Marca NIKON Eclipse ME 600D. Japan. P10X (WF10X) P16X

V.6. Aplicación del campo eléctrico de corriente directa a la emulsión sintética empleando un sistema de flujo continuo

En la **figura 13**, se muestra el montaje utilizado para esta experiencia, donde se emplearon dos buretas conectadas a través de una llave. Ambas buretas conteniendo la emulsión sintética. En la bureta inferior se emplearon 107,0 mL de emulsión sintética, y la bureta superior 50,0 mL.

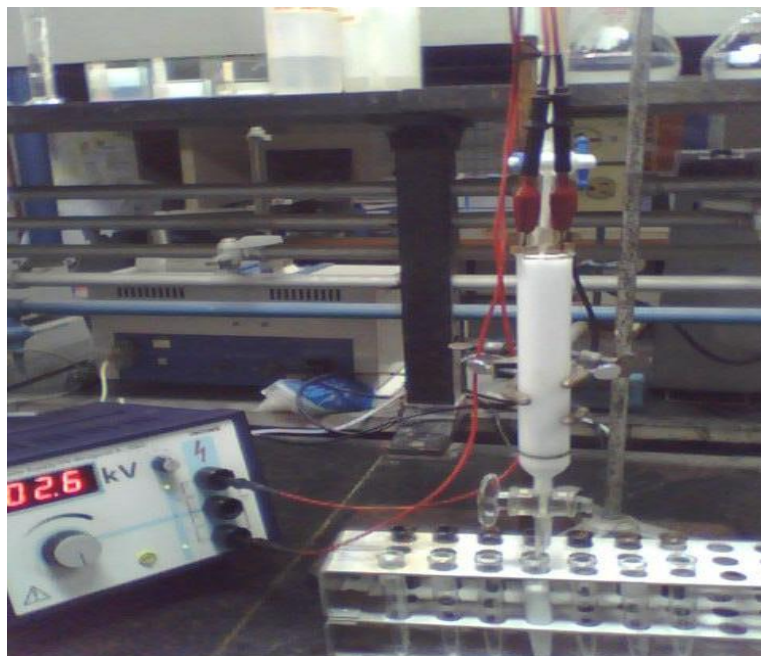


Figura 13. Montaje empleado para la deshidratación electrostática de flujo continuo. Bureta inferior $\varnothing=2.58$ cm, $h=23$ cm, Cap. 107 mL. Bureta superior Cap. 50 mL ± 0.1 mL Tubos de centrifugas graduadas Cap. 15 mL c/u.

Seguidamente se introducen los electrodos en la bureta inferior y se aplica el campo eléctrico D.C. (2 kV). Se procede a abrir la llave de la bureta superior e inferior a un caudal de $2,34 \text{ cm}^3/\text{min}$. y se mide el tiempo de separación del agua coalescida por cada cm^3 , con el uso de un cronómetro.

Una vez iniciada la separación de la fase acuosa, se almacenaron las diferentes fracciones en los respectivos tubos de centrifuga. Finalizado el proceso de recolección de las diferentes fracciones, se midió el volumen de agua, antes de proceder con el proceso de separación mecánica (centrifugación, 5000 rpm y un tiempo de 10 minutos).

Finalizado el proceso de centrifugación, fue medido el volumen de agua coalescida. Posteriormente se separó la fase acuosa de la orgánica. Ésta última fue

tratada de nuevo con el campo eléctrico de corriente directa, hasta obtener nuevos cortes de agua. Los volúmenes de agua obtenidos se emplearon para determinar el % H₂O total recuperada

V.7. Determinación de la viscosidad cinemática y dinámica de la emulsión sintética. Según norma ASTM D-445, IP-71 y ASTM D-2515

Para la determinación de la viscosidad cinemática y dinámica se empleó, el equipo mostrado en la **figura 14**.



Figura 14. Viscosímetro Cannon-Fenske. Serie: 400. No.3188. Constante a 40°C: 1.1727. Constante a 100°C: 1.1681 Cst/s. Incertidumbre: +/- 0.5 %.

Fueron medidos 10,0 mL de la emulsión sintética, previamente homogenizada, seguidamente vertido en el viscosímetro evitando la formación de burbujas. Luego se procedió succionar la muestra del viscosímetro con la ayuda de una propipeta, la cual fue retirada dejando fluir el líquido libremente. Cuando el líquido alcanzó la marca superior del viscosímetro, se dio inicio a la secuencia de medidas (tiempo min), con la ayuda de un cronómetro, realizando tres repeticiones. Con los valores del tiempo y la

constante del viscosímetro se determinó la viscosidad cinemática y dinámica (anexo 6).^[44]

V.8. Determinación de la densidad relativa de la emulsión sintética (anexo 7).^[45]

Para la determinación de la densidad relativa de la emulsión sintética se empleó, el equipo mostrado en la **figura 15**.



Figura 15. Pícnómetro modelo DIN/in Brand Duran. W. Germany. Capacidad 50.629 cm³ con termómetro incorporado.

En este caso se pesó previamente el picnómetro limpio y seco, en una balanza de precisión, **figura 16**.



Figura 16. Balanza modelo S-2000. Marca: BOSH Merck Cofasa S.A. $\pm 0.0001\text{g}$.

Seguidamente se llena el picnómetro con la emulsión sintética y se pesa su contenido, para así determinar la densidad de la muestra a la temperatura de trabajo ($22 \pm 1^\circ\text{C}$).

V.9. Aplicación del campo eléctrico de corriente directa, a la emulsión sintética (parafina-agua y surfactantes no iónicos), al sumergirse la celda electrostática en un baño térmico a $T = (60-70)^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$

La **figura 17** muestra el montaje de la celda empleada para realizar las medidas de aplicación del campo eléctrico de corriente directa, a la emulsión sintética en un baño térmico $T = (60-70)^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$.

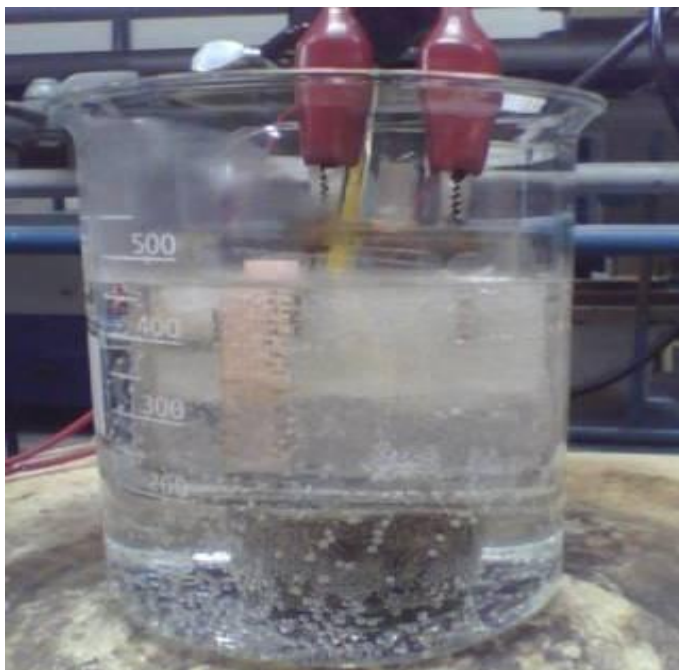


Figura 17. Baño térmico de la celda electrostática a $T = (60-70) ^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$.

Se procedió a llenar la celda electrostática con 20,0 ml de la emulsión sintética, luego fue sumergida en un baño térmico a $T = (60-70) ^\circ\text{C}$. Seguidamente se conectaron los electrodos a la fuente de poder, aplicando un voltaje D.C. (2 kV). Posteriormente, se midió el volumen de agua coalescida (mL), el tiempo (min) y el voltaje (kV), hasta que el volumen de agua alcanzó el 20,0 % del total contenida en la emulsión (10,0 mL). Cuando no se observó más separación de agua, se detuvo la aplicación del campo eléctrico D.C.

VI. Resultados y discusión

En las **tablas 1 - 6** se muestran los datos de volumen de agua recuperada y el porcentaje de la misma, de la emulsión sintética, parafina-agua-Genapol 080 y Span 80, en función del tiempo, antes de centrifugar y a diferentes tiempos de estabilidad.

Tabla 1. Porcentaje de agua recuperada de la emulsión sintética (parafina-agua-Genapol 080 y Span 80) frente al tiempo en minutos y segundos, antes de centrifugar. Tiempo de estabilidad de la emulsión sintética: **2 horas**.

v/mL H ₂ O +/- 1mL	t/min.	t/s	% H ₂ O
0	0	0	0
1,0	1,4	84,0	10,0
2,0	2,3	138,0	20,0
3,0	3,9	234,0	30,0
4,0	4,8	288,0	40,0
5,0	7,2	432,0	50,0
6,0	9,2	552,0	60,0
7,0	11,0	660,0	70,0
8,0	14,0	840,0	80,0

Tabla 2. Porcentaje de agua recuperada de la emulsión sintética (parafina-agua-Genapol 080 y Span 80) en función del tiempo en minutos y segundos, antes de centrifugar. Tiempo de estabilidad de la emulsión sintética: **5 días**.

v/mL H ₂ O +/- 1mL	t/min.	t/s	% H ₂ O
0	0	0	0
1,0	1,1	66,0	10,0
2,0	2,0	120,0	20,0
3,0	2,9	174,0	30,0
4,0	4,0	240,0	40,0
5,0	5,2	312,0	50,0
6,0	6,4	384,0	60,0
7,0	8,0	480,0	70,0
8,0	13,2	792,0	80,0

Tabla 3. Porcentaje de agua recuperada de la emulsión sintética (parafina-agua-Genapol 080 y Span 80) frente al tiempo en minutos y segundos, antes de centrifugar. Tiempo de estabilidad de la emulsión sintética: **15 días**.

v/mL H ₂ O +/-1 mL	t/min.	t/s	% H ₂ O
0	0	0	0
1,0	1,1	66,0	10,0
2,0	2,3	138,0	20,0
3,0	3,9	234,0	30,0
4,0	5,1	306,0	40,0
5,0	6,2	372,0	50,0
6,0	8,2	492,0	60,0
7,0	10,3	618,0	70,0
8,0	15,1	906,0	80,0

A partir de estos datos fueron construidas las diferentes curvas de deshidratación electrostática, antes de centrifugar, para la emulsión sintética. Las **gráficas 1 - 3**, son los resultados expresados en las **tablas 1-3**. En el **anexo 8** se muestran los resultados de esta sección en términos de % agua recuperada en función del tiempo en segundos.

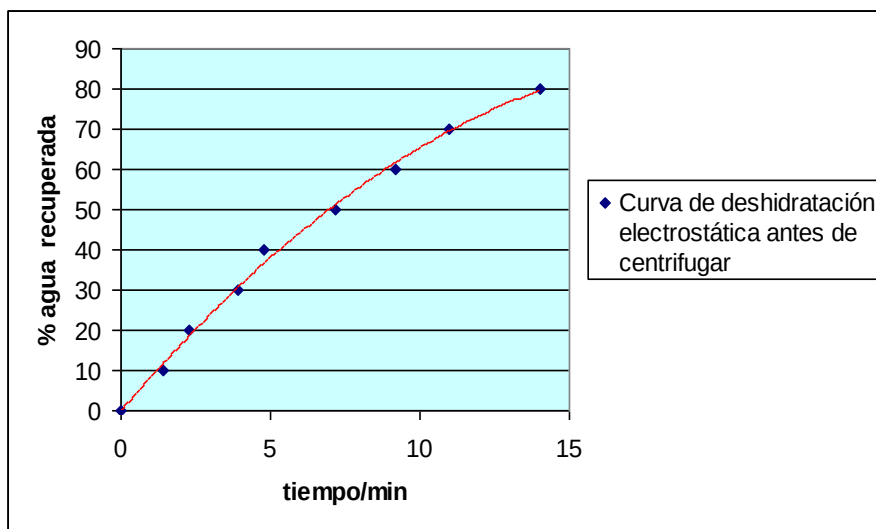


Gráfico 1. Porcentaje de agua recuperada de la emulsión sintética (parafina-agua-Genapol 080 y Span 80) contra el tiempo en minutos antes de centrifugar. Tiempo de estabilidad de la emulsión sintética: **2 horas**.

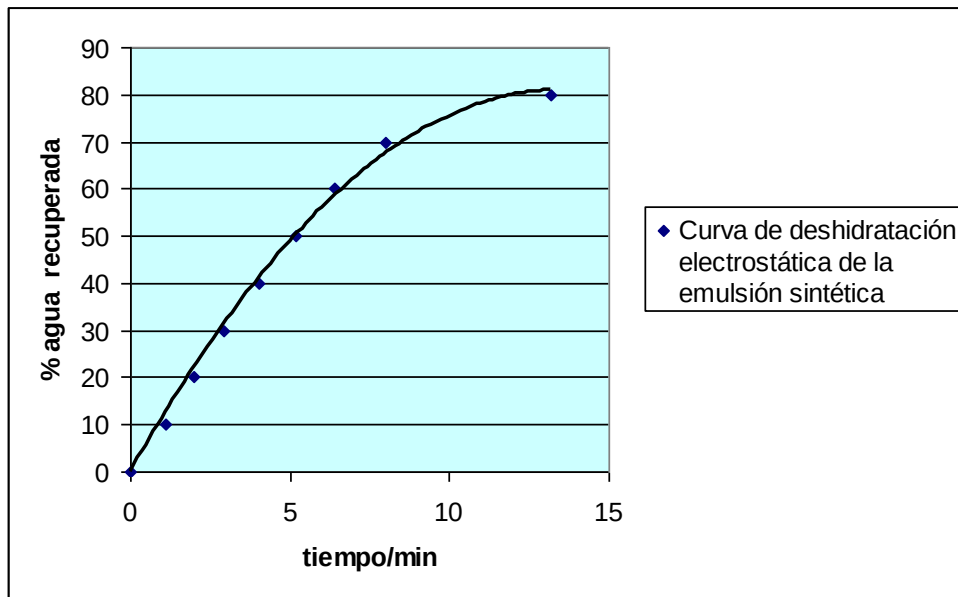


Gráfico 2. Porcentaje de agua recuperada de la emulsión sintética (parafina-agua-Genapol 080 y Span 80) frente al tiempo en minutos antes de centrifugar. Tiempo de estabilidad de la emulsión sintética: **5 días**.

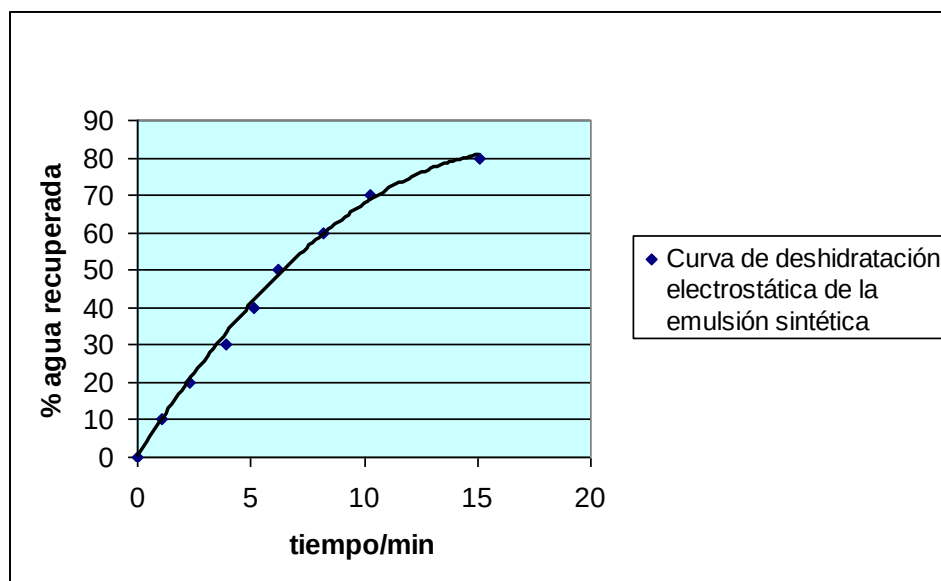


Gráfico 3. Porcentaje de agua recuperada de la emulsión sintética (parafina-agua-Genapol 080 y Span 80) en función del tiempo en minutos antes de centrifugar. Tiempo de estabilidad de la emulsión sintética: **15 días**.

De las graficas anteriores, puede observarse gran similitud entre las curvas de deshidratación obtenidas. Se presenta una ligera linealidad a tiempos bajos, hasta alcanzar un máximo, a partir de aquí se observa una ligera declinación en la curva, que se hace más evidente al pasar de un tiempo de estabilidad de 2 horas a un tiempo de 15 días.

Durante esta experiencia, se observó al alcanzar un volumen de 8,0 mL de fase acuosa, que la fase coalescida era atraída hacia uno de los electrodos, con crepitación. Se notó además la formación de pequeños canales en la fase orgánica que iban de un electrodo a otro, generando fluctuaciones en las lecturas del potencial. A los 15 minutos aproximadamente de producirse este fenómeno, había una disminución del potencial.

Esta ligera caída del potencial eléctrico es producto del fenómeno de percolación. Este fenómeno, podría interpretarse, como si se forma un gradiente de cargas provenientes de los electrodos y son las cargas negativas las que se moverían más rápidamente hasta la interfase agua-parafina, que las cargas positivas del medio produciendo una atracción de las gotas de agua emulsionada en la parafina, favoreciéndose el transporte por migración de las mismas de un electrodo a otro.

Además, se pudo observar la gran estabilidad de la emulsión al pasar de horas a días.

Las siguientes tablas **4 - 6** y sus correspondientes graficas **4 - 6** muestran los resultados cuando la muestra es sometida a un mayor tiempo de inducción eléctrica.

Tabla 4. Porcentaje de agua recuperada de la emulsión sintética (parafina-agua-Genapol 080 y Span 80) contra el tiempo en minutos y segundos, antes de centrifugar. La muestra fue sometida a inducción eléctrica durante **20 min.** Tiempo de estabilidad de la emulsión sintética: **15 días.**

v/mL H ₂ O +/-1 mL	t/min.	t/s	% H ₂ O
0	0	0	0
1,0	1,5	90,0	10,0
2,0	3,5	210,0	20,0
3,0	5,0	300,0	30,0
4,0	6,8	408,0	40,0
5,0	7,6	456,0	50,0
6,0	9,8	588,0	60,0
7,0	13,0	780,0	70,0
8,0	20,0	1200,0	80,0

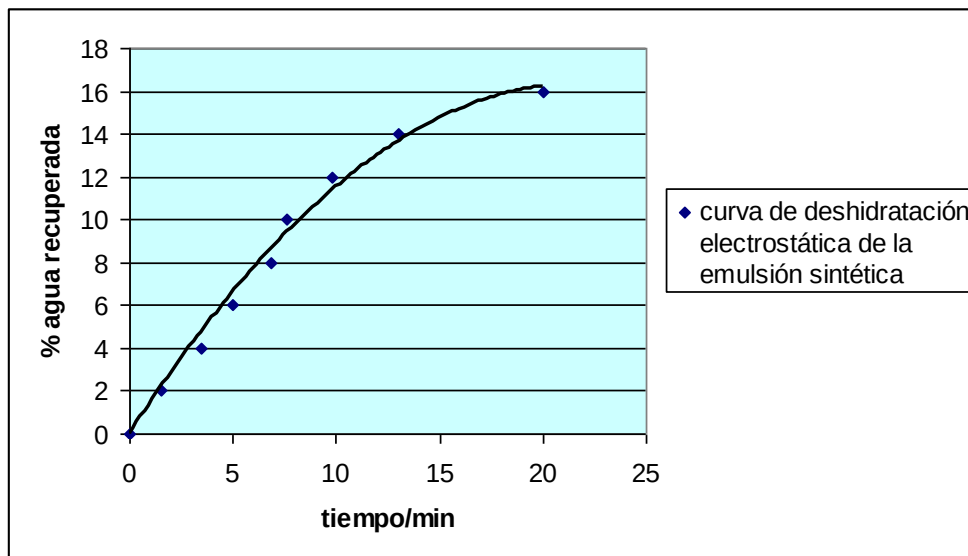


Gráfico 4. Porcentaje de agua recuperada de la emulsión sintética (parafina-agua-Genapol 080 y Span 80) en función del tiempo en minutos, antes de centrifugar. La muestra fue sometida a inducción eléctrica durante **20 min.** Tiempo de estabilidad de la emulsión sintética: **15 días.**

Tabla 5. Porcentaje de agua recuperada de la emulsión sintética (parafina-agua-Genapol 080 y Span 80) frente al tiempo en minutos y segundos, antes de centrifugar. La muestra fue sometida a inducción eléctrica durante **24.5 min.** Tiempo de estabilidad de la emulsión sintética: **15 días.**

v/mL H ₂ O +/- 1mL	t/min.	t/s	% H ₂ O
0	0	0	0
1,0	1,4	84,0	10,0
2,0	2,2	132,0	20,0
3,0	3,5	210,0	30,0
4,0	5,3	318,0	40,0
5,0	7,1	426,0	50,0
6,0	8,6	516,0	60,0
7,0	10,8	648,0	70,0
7,5	13,0	780,0	75,0
8,0	15,9	954,0	80,0
8,0	24,5	1470,0	80,0

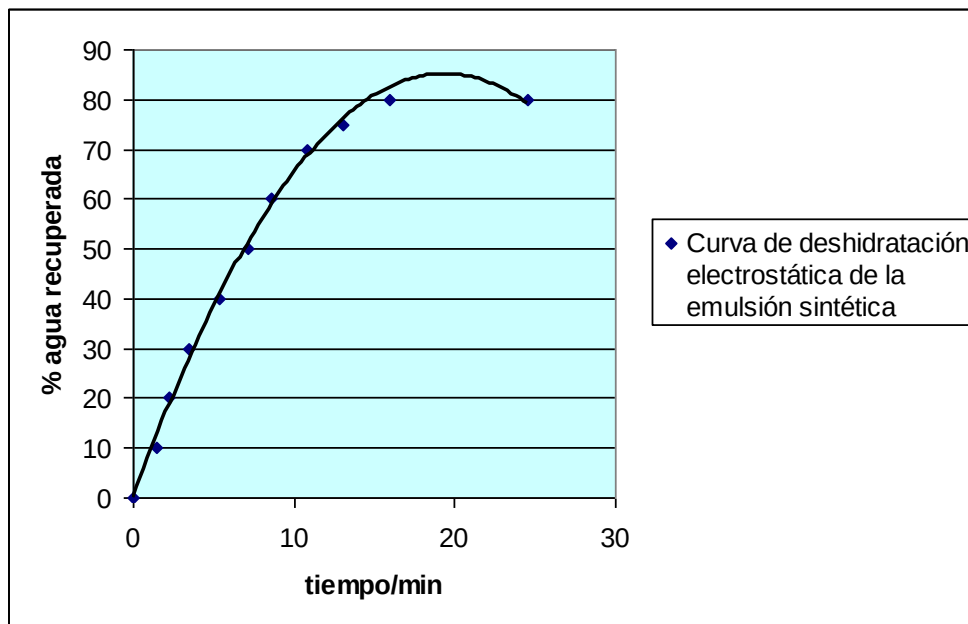


Gráfico 5. Porcentaje de agua recuperada de la emulsión sintética (parafina-agua-Genapol 080 y Span 80) contra el tiempo en minutos y segundos, antes de centrifugar. La muestra fue sometida a inducción eléctrica durante **24.5 min.** Tiempo de estabilidad de la emulsión sintética: **15 días.**

Tabla 6. Porcentaje de agua recuperada de la emulsión sintética (parafina-agua-Genapol 080 y Span 80) en función del tiempo en minutos y segundos, antes de centrifugar. La muestra fue sometida a inducción eléctrica durante **58.18 min**. Tiempo de estabilidad de la emulsión sintética: **15 días**.

v/mL H ₂ O +/-1 mL	t/min.	t/s	% H ₂ O
0	0	0	0
1,0	2,6	157,2	10,0
2,0	5,7	339,0	20,0
3,0	9,0	540,0	30,0
4,0	12,7	763,8	40,0
5,0	16,7	1002,0	50,0
6,0	28,9	1734,0	60,0
7,0	39,7	2379,0	70,0
7,5	49,9	2995,0	75,0
8,0	58,2	3490,8	80,0

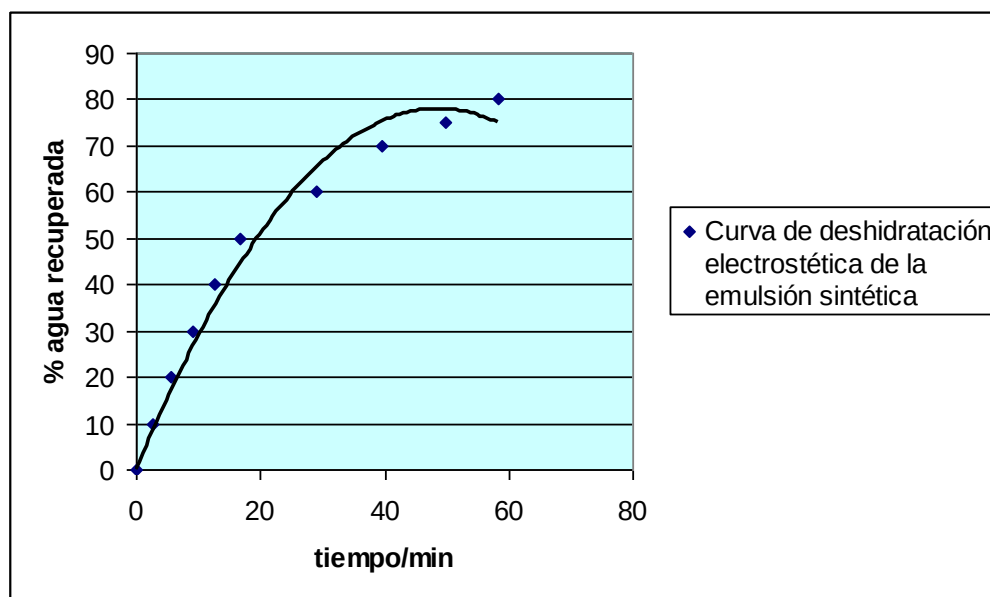


Gráfico 6. Porcentaje de agua recuperada de la emulsión sintética (parafina-agua-Genapol 080 y Span 80) contra el tiempo en minutos y segundos, antes de centrifugar. La muestra fue sometida a inducción eléctrica durante **58.18 min**. Tiempo de estabilidad de la emulsión sintética: **15 días**.

Se puede decir que cuando la emulsión sintética es sometida a un tiempo mayor de inducción eléctrica D.C., el fenómeno de percolación se acentúa aún más. Esto se debe a que las moléculas de agua como poseen momentos dipolares permanentes, (esto debido a que es un material polar), tienden a alinearse con el campo eléctrico externo, trayendo como consecuencia una cadena electrolítica de gotas de agua entre los electrodos de cobre, produciendo una caída abrupta del potencial eléctrico. Además, esto se ve reflejado, en las gráficas, desde la **4** hasta la **6**, cuando el tiempo de deshidratación electrostática supera a los **20 min.**, perdiéndose la linealidad de las curvas como consecuencia del llamado fenómeno de percolación.

Finalizada la aplicación del campo eléctrico, la muestra fue sometida a centrifugación. La **tabla 7** muestra a modo comparativo los porcentajes de agua coalescida antes y después de someter la muestra al proceso de separación mecánica (centrifugación) para un tiempo de deshidratación de **14 min.** Mientras que la **tabla 8** es a un tiempo de deshidratación de **20 min.**

Tabla 7. Porcentaje de agua recuperada de la emulsión sintética (parafina-agua-Genapol 080 y Span 80) en función del tiempo en minutos, después de centrifugar y aplicar el campo eléctrico. Tiempo de la deshidratación **14 minutos**. Ensayo 1.

v/mL H ₂ O +/-1mL antes centrifugar	t/min.	% H ₂ O antes centrifugar	% H ₂ O después centrifugar *	v/mL H ₂ O +/-1mL antes centrifugar
0	0	0	0	0
1,0	1,4	10,0	10,4	1,0
2,0	2,3	20,0	20,8	2,1
3,0	3,9	30,0	31,2	3,1
4,0	4,8	40,0	41,6	4,2
5,0	7,2	50,0	53,0	5,3
6,0	9,2	60,0	64,0	6,4
7,0	11,0	70,0	78,0	7,8
8,0	14,0	80,0	82,0	8,2

* Tiempo de centrifugación: 10 minutos a 5000 rpm

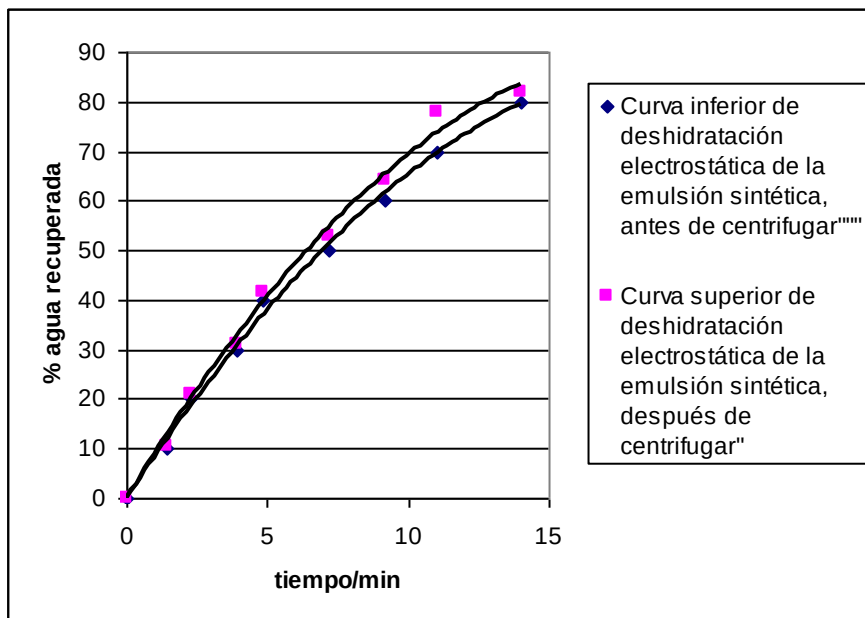


Gráfico 7. Porcentaje de agua recuperada de la emulsión sintética (parafina-agua-Genapol 080 y Span 80) frente al tiempo en minutos, después de centrifugar y aplicar el campo eléctrico. Tiempo de la deshidratación **14 minutos**. Ensayo 1.

Tabla 8. Porcentaje de agua recuperada de la emulsión sintética (parafina-agua-Genapol 080 y Span 80) contra el tiempo en minutos, después de centrifugar y aplicar el campo eléctrico. Tiempo de la deshidratación **20 minutos**. Ensayo 2.

v/mL H ₂ O +/-1mL antes centrifugar	t/min.	% H ₂ O antes centrifugar	% H ₂ O después centrifugar *	v/mL H ₂ O +/-1mL antes centrifugar
0	0	0	0	0
1,0	1,5	10,0	10,5	1,0
2,0	3,5	20,0	22,0	2,2
3,0	5,0	30,0	33,0	3,3
4,0	6,8	40,0	44,0	4,4
5,0	7,6	50,0	55,0	5,5
6,0	9,8	60,0	66,0	6,5
7,0	13,0	70,0	77,0	7,7
8,0	20,0	80,0	88,0	8,8

* Tiempo de centrifugación: 10 minutos a 5000 rpm

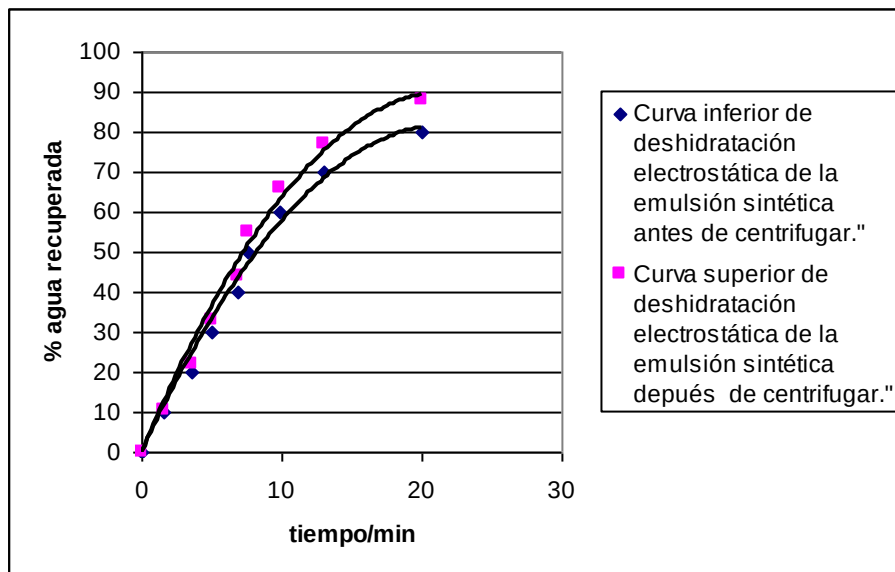


Gráfico 8. Porcentaje de agua recuperada de la emulsión sintética (parafina-agua-Genapol 080 y Span 80) en función del tiempo en minutos, después de centrifugar y aplicar el campo eléctrico. Tiempo de la deshidratación **20 minutos**. Ensayo 2.

Puede señalarse que la centrifugación ayuda a completar el proceso de separación. Se observa además que el tiempo de deshidratación de 14 a 20 min, aumenta ligeramente el porcentaje de agua recuperada de la emulsión sintética.

Una vez separada ambas fases, la fase orgánica es sometida nuevamente a inducción de campo eléctrico D.C. La **tabla 9** muestra los resultados. Se observa que este nuevo tratamiento de la emulsión sintética es bastante efectivo, lográndose obtener ahora un 84,0% de agua total recuperada.

En la gráfica **9** se puede apreciar que la emulsión sintética, una vez que es sometida a la técnica de separación mecánica (centrifugación), ésta ayuda a que las gotas de agua coalescidas durante la inducción del campo eléctrico D.C. y que no hayan sido separadas por la acción de la fuerza de gravedad, puedan hacerlo a través

de la fuerza centrífuga. Obteniendo un mayor porcentaje de agua, reflejado cuando las curvas sesgan o se separan, desde un corte de agua menor a otro mayor.

Tabla 9. Tiempo en minutos, % H₂O antes y después de centrifugar la emulsión sintética y emulsión re-tratada con campo eléctrico D.C.

t/min.	% H ₂ O antes de centrifugar	% H ₂ O después de centrifugar.*	%H ₂ O emulsión re-tratada
0	0	0	0
1,4	10,0	10,2	12,6
2,3	20,0	20,4	22,8
3,9	30,0	30,6	33,0
4,8	40,0	40,8	43,2
7,2	50,0	51,0	53,4
9,2	60,0	61,2	73,8
11,0	70,0	71,4	73,8
14,0	80,0	81,6	84,0

* Tiempo de centrifugación: 10 minutos a 5000 rpm

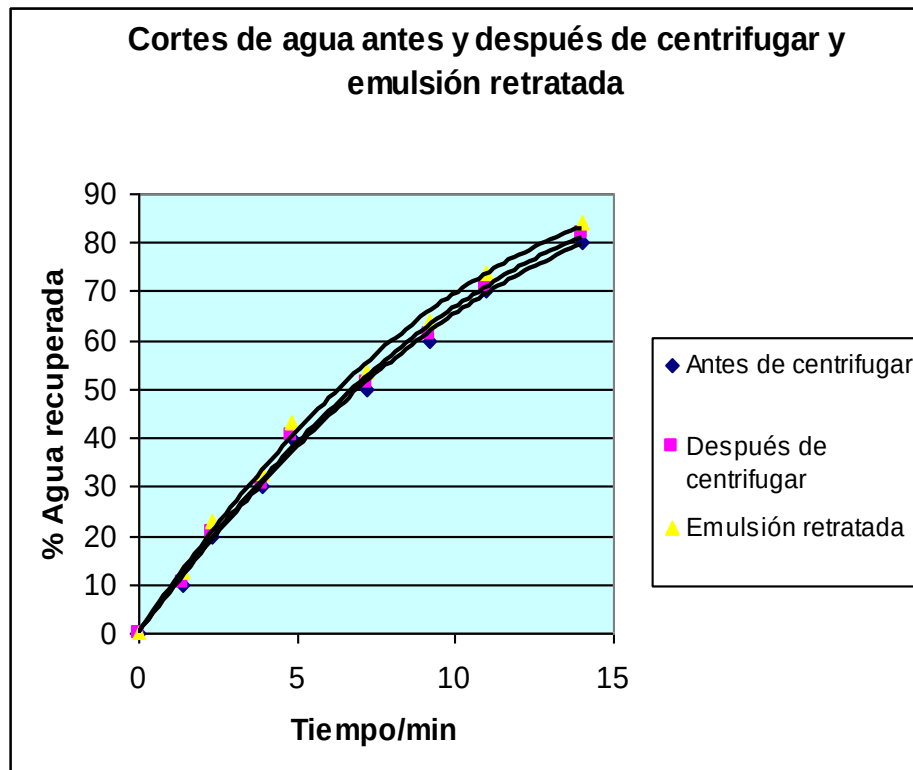


Gráfico 9. Tiempo en minutos, % agua recuperada, antes y después de centrifugar la emulsión sintética y emulsión re-tratada con campo eléctrico D.C.

Realizando nuevas experiencias de desestabilización de la emulsión sintética, en una celda electrostática, comparando con los resultados arrojados con un sistema diseñado de flujo continuo, se puede observar, al representar gráficamente los valores experimentales mostrados en las **tablas 10 y 11**, que las tendencias de las curvas de deshidratación son marcadamente diferentes, pese a que en ambos sistemas se da el fenómeno de percolación (**gráfico 10**).

Tabla 10. Deshidratación electrostática de la emulsión sintética en la celda, antes y después de centrifugar

Tiempo/min	vH ₂ O/mL +/-1 mL antes de centrifugar	vH ₂ O/mL +/- 1 mL después de centrifugar.*	%H ₂ O antes de centrifugar	% H ₂ O después de centrifugar.*
0	0	0	0	0
1,2	0,5	0,8	1,0	1,6
2,2	1,0	1,3	2,0	2,6
3,3	2,0	2,4	4,0	4,8
4,3	3,0	3,1	6,0	6,2
5,1	4,0	4,4	8,0	8,8
5,9	5,0	5,2	10,0	10,4
7,2	6,0	6,3	12,0	12,6
8,4	7,0	7,2	14,0	14,4
9,4	8,0	8,1	16,0	16,2
11,9	9,0	9,4	18,0	18,8
13,0	10,0	10,3	20,0	20,6
14,9	11,0	11,2	22,0	22,4
19,9	12,5	12,8	25,0	25,6
22,8	13,5	13,6	27,0	27,2
26,7	15,0	15,2	30,0	30,4
29,8	16,0	16,1	32,0	32,2
38,2	18,0	18,2	36,0	36,4

* Tiempo de centrifugación: 10 minutos a 5000 rpm

Tabla 11. Deshidratación electrostática de la emulsión sintética para el sistema de flujo continuo, antes y después de centrifugar

Tiempo/min. para sistema de flujo continuo	Voltaje para sistema de flujo continuo	Volumen/mL antes de centrifugar	Volumen/mL después de centrifugar	Agua recuperada antes de centrifugar	Agua recuperada después de centrifugar
Tiempo/min	kV	v/mL +/-1mL	v/mL +/-1mL	%	%
0	0	0	0	0	0
9,2	1,1	5,0	5,3	5,0	5,3
18,9	2,0	11,0	11,7	11,0	11,7
33,2	3,1	13,4	14,2	13,4	14,2
30,0	2,8	16,1	17,0	16,1	17,0
38,0	3,2	20,3	21,3	20,3	21,3
49,0	3,7	27,1	28,3	27,1	28,3
66,4	4,3	30,0	31,3	30,0	31,3
94,0	4,2	38,0	39,6	38,0	39,6
104,0	4,1	41,0	42,8	41,0	42,8

* Tiempo de centrifugación: 10 minutos a 5000 rpm

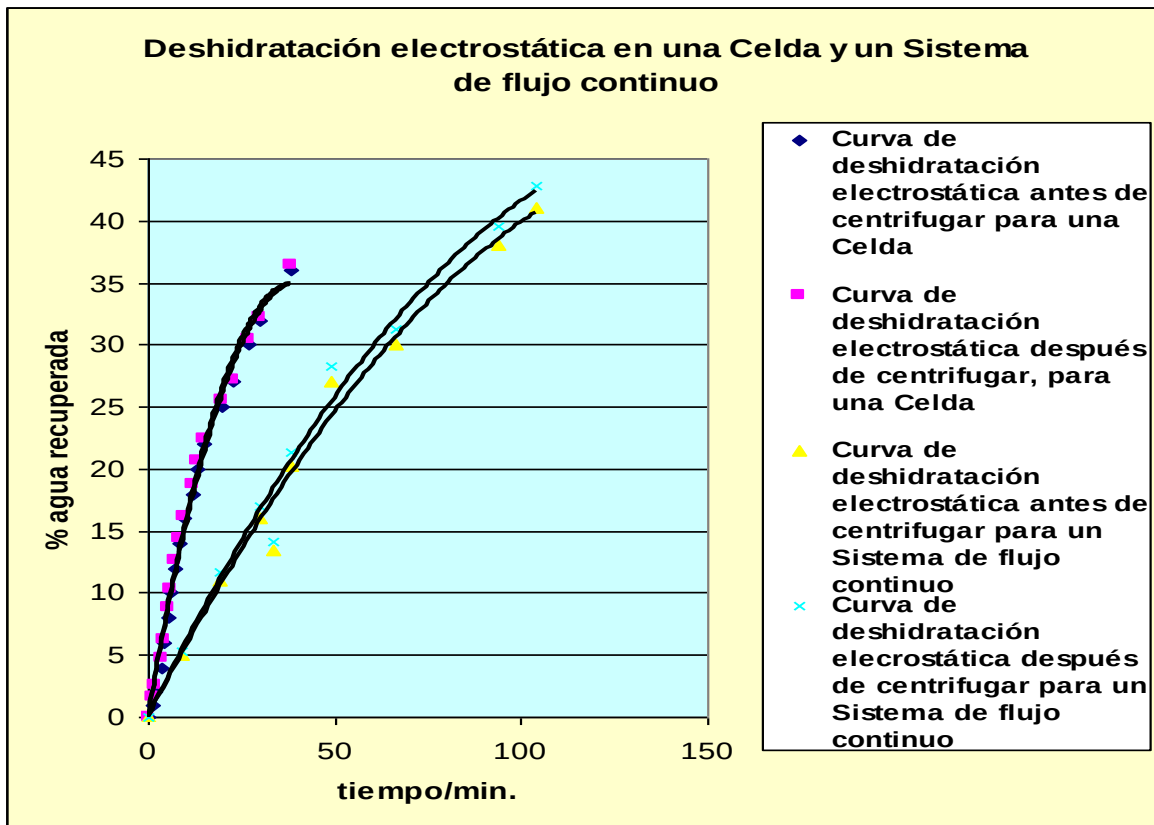


Gráfico 10. Curvas de deshidratación electrostática para la celda y el sistema de flujo continuo, antes y después de aplicar la técnica de centrifugación*

* Tiempo de centrifugación: 10 minutos a 5000 rpm

La explicación a este fenómeno se debe a que cuando se hace pasar un dieléctrico, como el agua, en un campo eléctrico, aparecen cargas superficiales en las gotas de agua que tienden a debilitar el campo original dentro del dieléctrico **(figura 18)**

[46]

Este debilitamiento del campo eléctrico se manifiesta como una reducción en la diferencia de potencial entre las placas de cobre cargado y aislado, cuando se introduce

al dieléctrico entre las placas. En otras palabras, cuando las gotas de agua de la emulsión sintética son inducidas al campo eléctrico de corriente directa, las placas de cobre que están cargadas superficialmente, en cargas positivas y cargas negativas (**figura 19**) ^[47], actúan sobre las gotas de agua, fuerzas que tiran de ellas hacia las placas, dependiendo de la distancia en que se encuentran de las mismas. Esta fuerza es suministrada por la atracción electrostática entre las cargas $\pm q$ de las placas de cobre y las cargas superficiales inducidas en las gotas de agua.

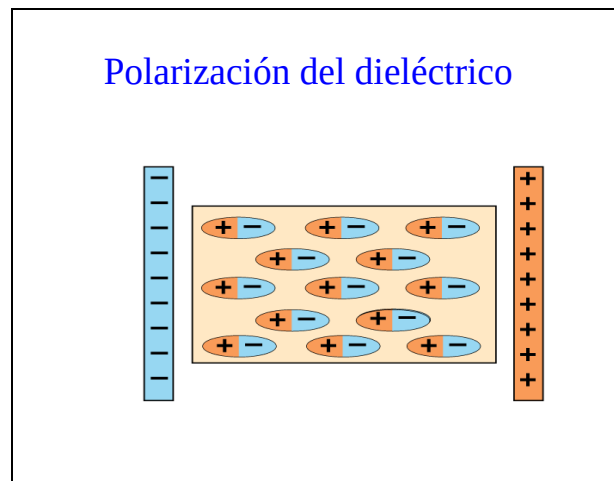
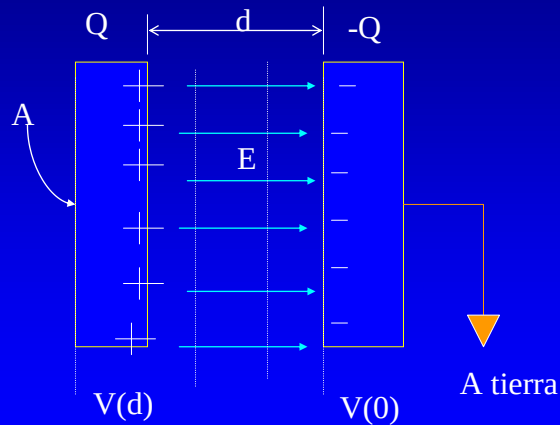


Figura 18. Polarización de las gotas de agua al someterse a un campo eléctrico D.C. ^[46]

Parámetros del capacitor



8

Figura 19. Campo eléctrico D.C. entre dos placas metálicas, separadas una distancia “d”. ^[47]

Haciendo referencia al tiempo de residencia de la emulsión sintética, antes y después de centrifugar, para una celda y un sistema de flujo continuo (**tablas 12 y 13; y gráfico 11**), puede demostrarse que a menor tiempo de residencia del fluido en el campo eléctrico, el fenómeno de percolación se manifiesta en un tiempo más prolongado utilizando un sistema de flujo continuo; así mismo el % agua coalescida es menor. Por otra parte, cabe destacar que para una celda electrostática no hay caudal de entrada y salida ($Q = 0 \text{ m}^3/\text{min.}$), por ende el tiempo de residencia tiende a ser infinito, incrementando así el fenómeno de adhesión de gotas de aguas en los alrededores de los electrodos de cobre. También puede notarse que a pesar que el % agua coalescida recuperada en un sistema de flujo continuo es menor en comparación al de la celda, sin embargo el volumen de emulsión sintética a tratar con el campo eléctrico D.C., es mayor comparado con el de la celda.

Tabla 12: Tiempo de residencia) (anexo 9), ^[48] de la emulsión sintética antes y después de centrifugar para una celda

Tiempo/min	v/mL +/-1mL antes de centrifugar	v/mL +/-1mL después de centrifugar	% H ₂ O antes de centrifugar	%H ₂ O después de centrifugar. *
0	0	0	0	0
4,4	2,5	2,3	5,0	4,6
14,9	5,0	5,5	10,0	11,0
24,8	10,0	10,3	20,0	20,6
30,4	15,0	15,2	30,0	30,4
39,0	20,0	20,4	40,0	40,8
59,7	25,0	25,3	50,0	50,6
67,8	30,0	30,5	60,0	61,0
100,0	35,0	35,4	70,0	70,8
111,0	40,0	40,6	80,0	81,2

Nota: Volumen total de emulsión sintética (agua-parafina- Span 80 y Genapol 080), 100 mL para una celda

* Tiempo de centrifugación 10 min. rpm = 5000

Tabla 13. Tiempo de residencia de la emulsión sintética antes y después de centrifugar para un sistema de flujo continuo

Tiempo/min	v/mL+/-1mL antes de centrifugar	v/mL+/-1mL después de centrifugar	% H ₂ O antes de centrifugar	%H ₂ O después de centrifugar. *
0	0	0	0	0
9,2	5,0	5,3	5,0	5,3
18,9	11,0	11,7	11,0	11,7
33,2	13,4	14,2	13,4	14,2
30,0	16,1	17,0	16,1	17,0
38,0	20,3	21,3	20,3	21,3
49,0	27,1	28,3	27,1	28,3
66,4	30,0	31,3	30,0	31,3
94,0	38,0	39,6	38,0	39,6
104,0	41,0	42,8	41,0	42,8

Nota: Volumen total de emulsión sintética (agua-parafina- Span 80 y Genapol 080), 200 mL para el sistema de flujo continuo

* Tiempo de centrifugación 10 min. rpm = 5000

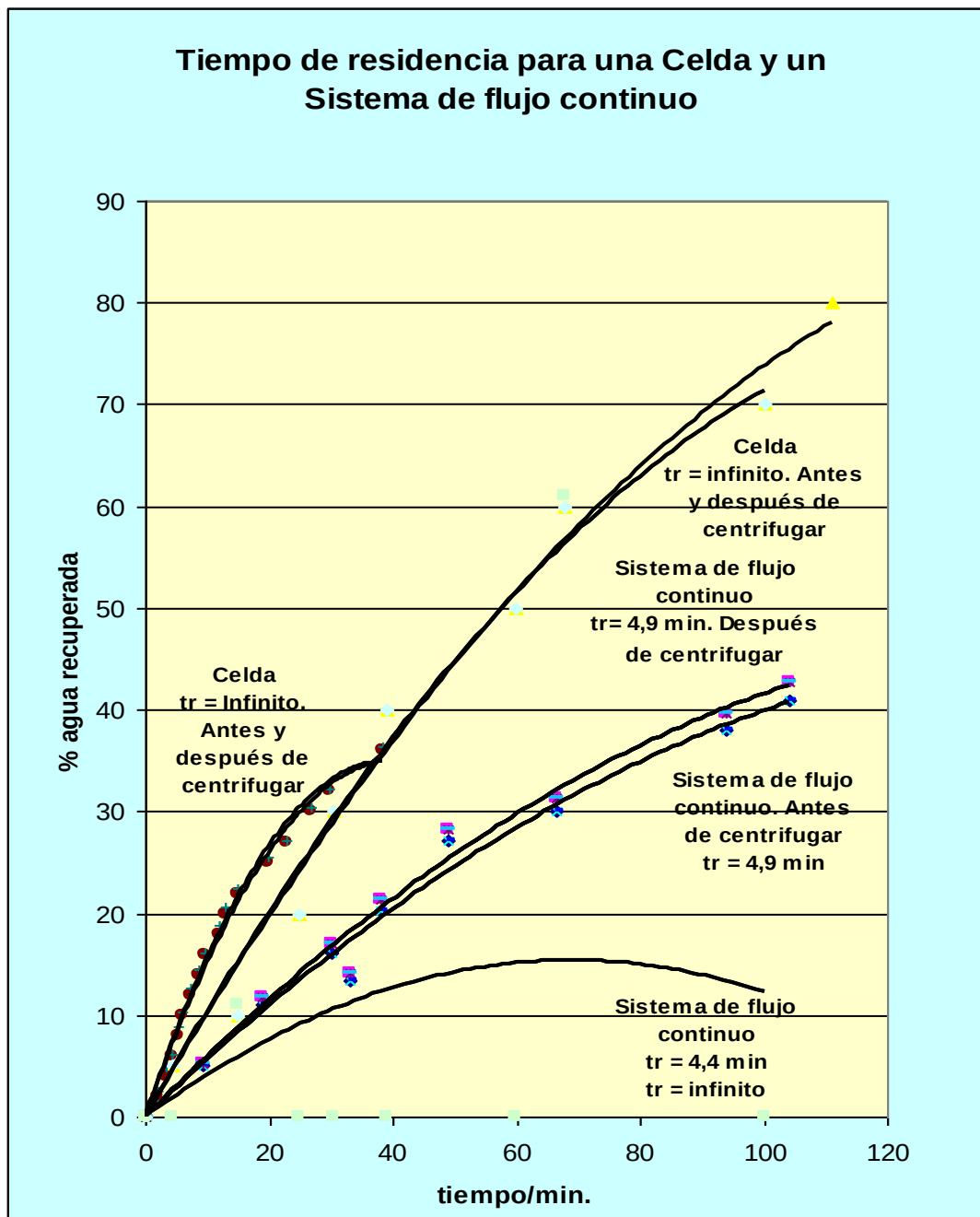


Gráfico 11. Tiempo de residencia de la emulsión sintética antes y después del proceso de centrifugación para una celda y un sistema de flujo continuo.

Otro de los factores que influyen directamente en el proceso de deshidratación electrostática, es la temperatura. Ésta variable, acelera la cinética entre las gotas de agua en la emulsión sintética, la floculación, y por ende, a la coalescencia de las mismas en la emulsión tipo W/O. Por otra parte, el movimiento del fluido en los sistemas de flujo continuo, retarda el alineamiento de las moléculas de agua. Para entender esto, en términos atómicos, lo que ocurre cuando un dieléctrico como el agua, es sometido a la acción de un campo eléctrico D.C., las moléculas de agua tienden a alinearse con el campo eléctrico aplicado o externo (**figura 20**).^[49]

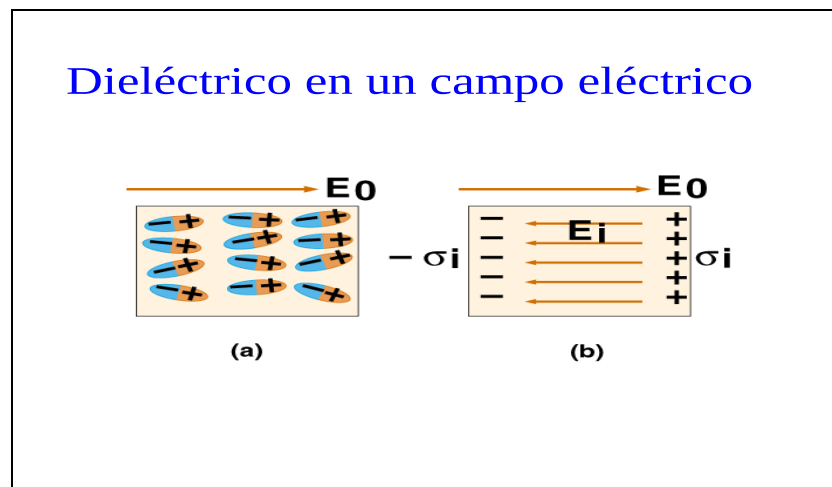


Figura 20. Alineamiento de las gotas de agua al someterse a un campo eléctrico D.C.^[49]

Otro aspecto a considerar, es el factor temperatura, el cual permite que la viscosidad de la muestra en estudio disminuya, favoreciendo la energía cinética entre las gotas emulsionadas.

A pesar que el % agua recuperada para el sistema de flujo continuo es menor en comparación al de la celda electrostática, producto del campo eléctrico D.C. y la temperatura, la ventaja que trae el primero, es que da lugar al re-tratamiento de la

emulsión sintética, separando el agua de la emulsión estable a través de una alimentación fresca de emulsión sintética y de emulsión re-tratada electrostáticamente y, finalmente centrifugada (**tabla 14 y gráfico 12**).

Tabla 14: % agua recuperada contra el tiempo en minutos de la emulsión sintética en una celda, en un baño térmico a $T = (60-70) \pm 1^\circ\text{C}$ y $T = 41^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$

Baño térmico $T=(60-70)^\circ\text{C}$ $\pm 1^\circ\text{C}$	Corte de agua	Volumen/mL	Voltaje	Celda a $T= 41^\circ\text{C}$ $\pm 1^\circ\text{C}$	Corte de agua	Volumen/mL
t/min.	%H ₂ O	+/-1mL	kV	t/min.	% H ₂ O	+/-1mL
0	0	0	0	0	0	0
0,3	10,0	1,0	0,7	1,4	10,0	1,0
0,4	20,0	2,0	0,8	2,3	20,0	2,0
0,6	30,0	3,0	0,9	3,9	30,0	3,0
0,8	40,0	4,0	1,0	4,8	40,0	4,0
1,1	50,0	5,0	1,2	7,2	50,0	5,0
1,3	60,0	6,0	1,3	9,2	60,0	6,0
2,2	70,0	7,0	1,8	11,0	70,0	7,0
6,6	80,0	8,0	2,8	14,0	80,0	8,0
8,2	80,0	8,0	3,5			
9,0	85,0	8,5	3,9			
11,6	85,0	8,5	4,4			
14,6	85,0	8,5	4,9			

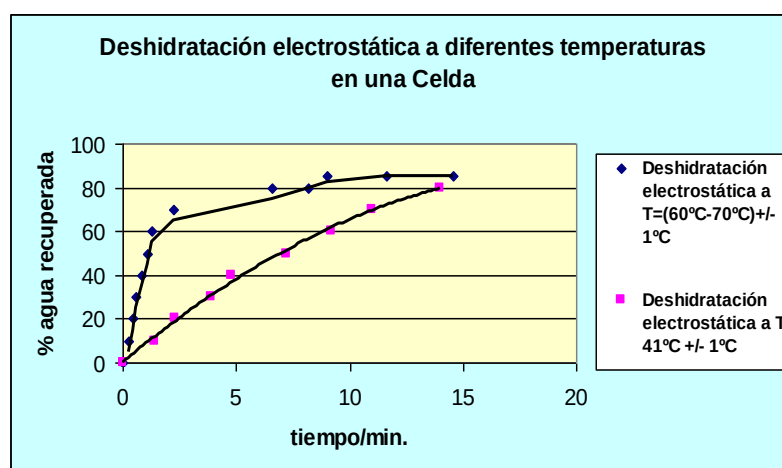


Gráfico 12. % agua recuperada en función del tiempo en minutos de la emulsión sintética en una celda en un baño térmico a $T = (60-70) \pm 1^\circ\text{C}$ y $T = 41^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$

Al aumentar el caudal en un sistema de flujo continuo, trajo como consecuencia que el tiempo de residencia de la emulsión sintética sea menor. Logrando de esta manera que el fenómeno de percolación no afecte cuantitativamente el proceso de deshidratación electrostática. Pese a que el % agua recuperada en este tipo de sistema es menor, en comparación al de la celda, garantiza que hay un mayor volumen de emulsión sintética tratada con el campo eléctrico D.C. (**tabla 15 y gráfico 13**).

Tabla 15: % agua recuperada frente al tiempo en segundos de la emulsión sintética en un sistema de flujo continuo, antes y después del proceso de centrifugación. $Q = 22.3 \text{ cm}^3/\text{min}$.

t/s	% H ₂ O	v/mL +/-1mL antes	v/mL +/-1mL después	Voltaje kV
0	0	0	0	0
1,5	1,3	1,3	1,4	0,5
2,3	1,5	1,5	1,6	0,3
2,9	1,6	1,6	1,8	0,7
3,4	1,6	1,6	1,8	1,1
4,9	1,5	1,5	1,7	1,5
5,3	1,1	1,1	1,3	1,8
3,6	1,6	1,6	1,9	2,1

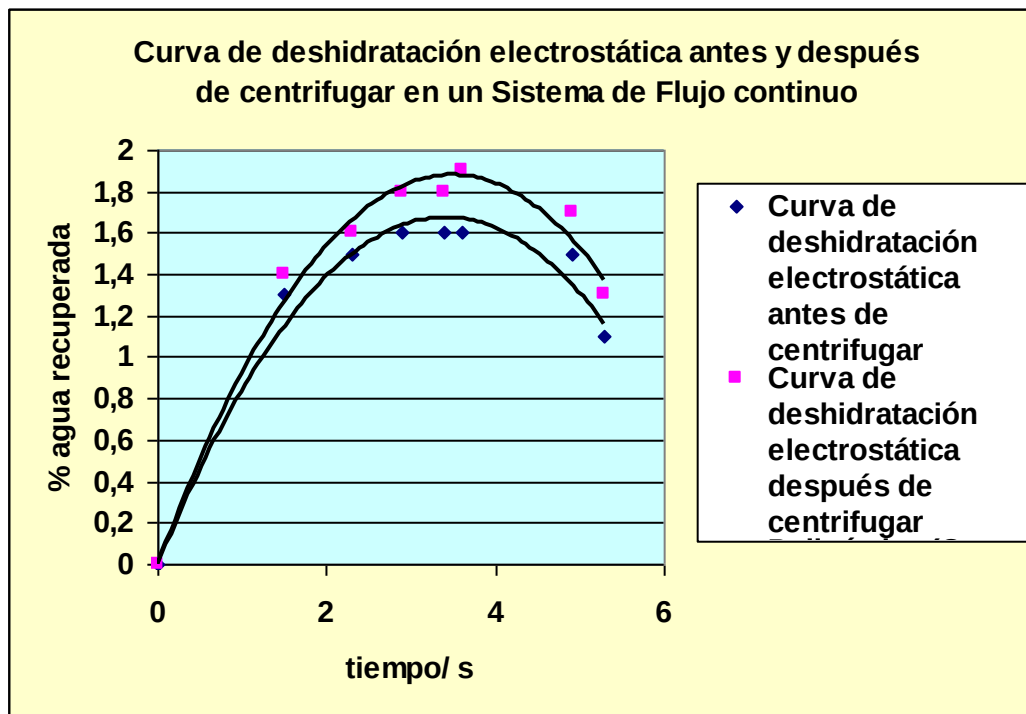


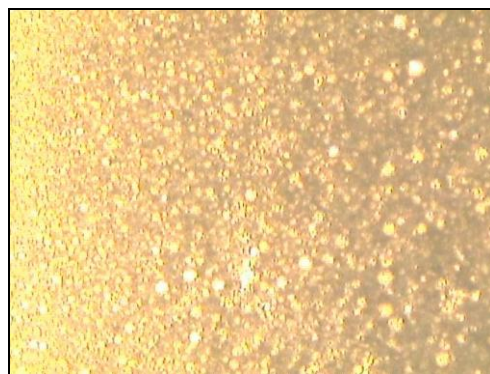
Gráfico 13. % agua recuperada en función del tiempo en minutos de la emulsión sintética en un sistema de flujo continuo, antes y después del proceso de centrifugación. $Q = 22.3 \text{ cm}^3/\text{min}$.

La microscopia óptica, proporcionó información morfológica de las muestras sintéticas, antes y después, de que éstas fuesen sometidas al campo eléctrico de corriente directa. Las micrografías **21.1** hasta **21.12**, permiten apreciar, desde un punto de vista cualitativo, que la emulsión al someterse a un campo eléctrico D.C., las gotas de agua aumentan de tamaño. Esto se debe a que el campo eléctrico induce a la formación de dipolos en las moléculas de agua, trayendo como consecuencia a una atracción entre ellas predominantemente por fuerzas de tipo Van der Waals, incrementando el contacto y su posterior coalescencia, permitiendo la sedimentación por acción de la fuerza de gravedad.

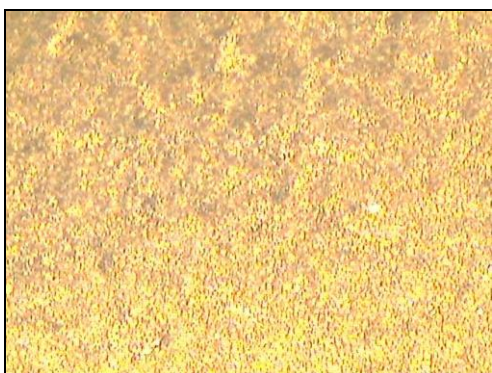
Figura 21. Micrografías de la muestra sintética (parafina-Span 80-Genapol 080-agua), vistas a través del microscopio óptico y los objetivos: 5X, 10X, 20X, 50X y 100X. Ocular 10X



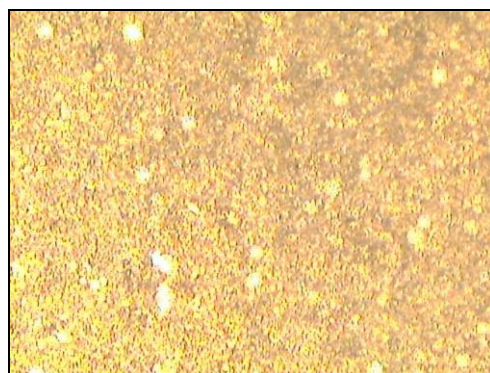
F.21.1.Emulsión sintética antes del campo eléctrico D.C. Objetivo 5X
Aumento= 50X. T estabilidad = 2h



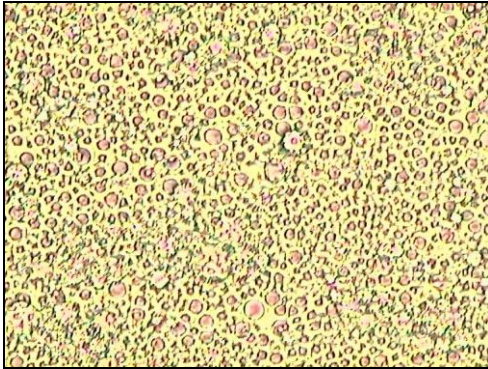
F.21.2.Emulsión sintética después del campo eléctrico D.C. Objetivo 5X
Aumento= 50X. T estabilidad = 2h



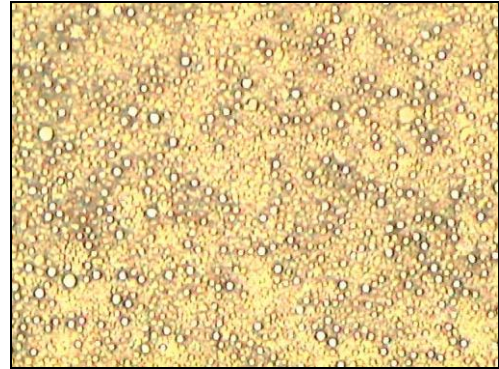
F.21.3.Emulsión sintética antes del campo eléctrico D.C. Objetivo 10X
Aumento= 100X. T estabilidad = 5 días



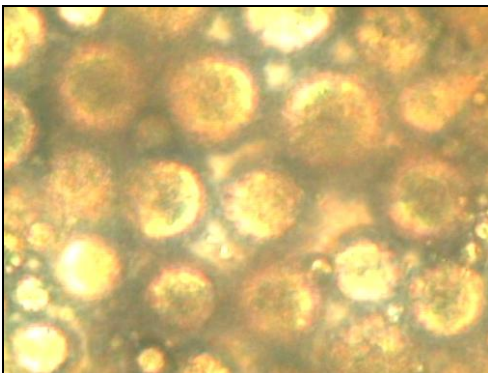
F.21.4.Emulsión sintética después del campo eléctrico D.C. Objetivo 10X
Aumento= 100X. T estabilidad = 5 días



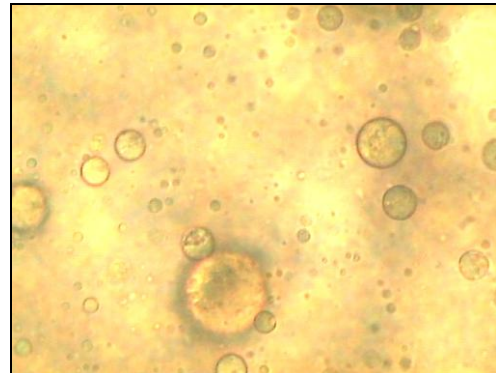
F.21.5.Emulsión sintética antes del campo eléctrico D.C. Objetivo 20X
Aumento= 200X. T estabilidad = 15días



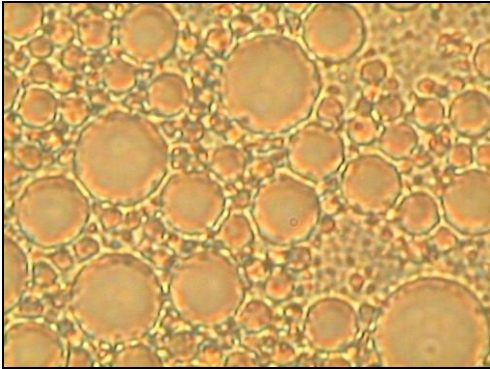
F.21.6.Emulsión sintética después del campo eléctrico D.C. Objetivo 20X
Aumento= 200X. T estabilidad = 15 días



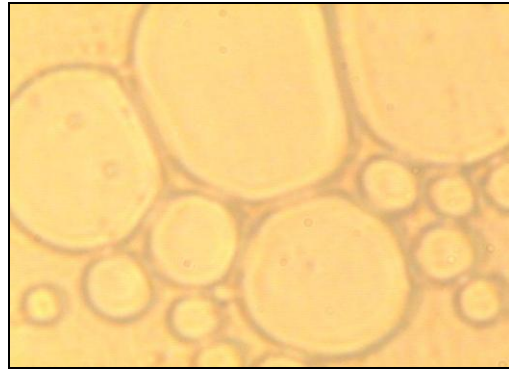
F.21.7.Emulsión sintética antes del campo eléctrico D.C. Objetivo 50X
Aumento= 500X. T estabilidad = 5 días
Tiempo inducción eléctrica = 20 min.



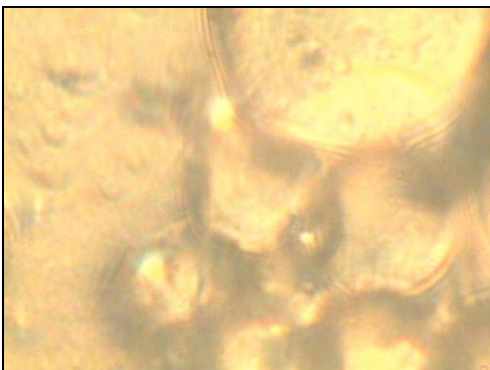
F.21.8.Emulsión sintética después del campo eléctrico D.C. Objetivo 50X
Aumento= 500X. T estabilidad = 5 días
Tiempo inducción eléctrica = 20 min.



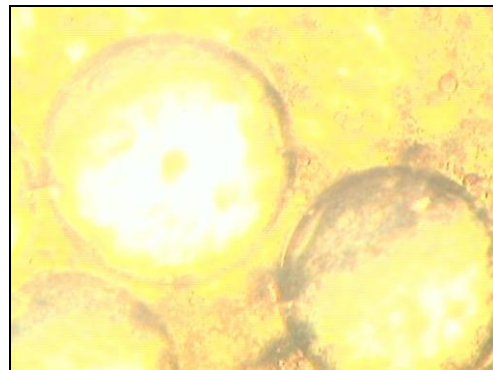
F.21.9.Emulsión sintética antes del campo eléctrico D.C. Objetivo 100X Aumento= 1000X. T estabilidad = 5 días
Tiempo inducción eléctrica = 58.18 min.



F.21.10.Emulsión sintética después del campo eléctrico D.C. Objetivo 100X Aumento= 1000X. T estabilidad = 5 días
Tiempo inducción eléctrica = 58.18 min.



F.21.11.Emulsión sintética retratada con el campo eléctrico D.C. Objetivo 50X. Aumento= 500X
T estabilidad = indefinido



F.21.12.Emulsión sintética retratada con el campo eléctrico D.C. Objetivo 100X. Aumento = 1000X
T estabilidad = indefinido

VII. Conclusiones

- 1- La utilización de la técnica de deshidratación y desestabilización de emulsión, aplicando campo eléctrico de corriente directa, en sistemas de flujo continuo y en celdas, mejoró la separación electrostática en emulsiones sintéticas (Parafina-agua-Span 80 y Genapol 080). Además, re-tratando la emulsión separada en el proceso de centrifugación, arrojó una ponderación de agua recuperada de 87,5 % para la celda y de 6,0 % para el sistema de flujo continuo.
- 2- El estudio de deshidratación de una emulsión sintética, empleando campo eléctrico en un sistema de flujo continuo a diferentes caudales es novedoso. Así mismo, permite la reducción de un porcentaje apreciable del voltaje originalmente requerido. Además, incrementa la rapidez de inducción de las gotas de agua emulsionada, promoviendo la separación de las fases. Por otra parte, evita la caída del potencial eléctrico, producto del fenómeno de percolación o adhesión de gotas de agua entre las placas de cobre, ocasionando un corto circuito y por ende, caída del potencial eléctrico.
- 3- La técnica de separación mecánica, centrifugación, permite obtener un mayor corte de agua coalescida, después que las muestra sintética han sido sometidas al campo eléctrico D.C.
- 4- Para deshidratar la emulsión sintética (parafina-agua-Span 80-Genapol 080), es necesario la integración del campo eléctrico, químico y térmico aunado al de la separación mecánica, para la desestabilización de la emulsión sintética. Sin embargo, incluye en grado considerable a la sedimentación por gravedad, por acción del proceso de centrifugación. Por lo tanto, este proceso integrado supera el rendimiento producido por cualquiera de los métodos anteriores si se emplearan aisladamente.

- 5- En orden de magnitud se encuentra primeramente la coalescencia eléctrica, seguidamente la temperatura, la acción del agente químico (surfactantes no iónicos) y finalmente la fuerza de gravedad. El proceso global es el más apropiado para la deshidratación de la emulsión sintética.
- 6- El re-tratamiento de la emulsión antes y después de aplicar el proceso de centrifugación, aumenta el % de agua recuperada o coalescida.
- 7- El fenómeno de percolación es más factible en una celda que en un sistema de flujo continuo. Esto se debe a que en el primero se presenta la alineación, casi completa, de las moléculas de agua por la poca movilidad de las mismas, crepitando en un tiempo menor. En el segundo caso, la movilidad del fluido y la energía térmica, favorecen la deshidratación y retardan el fenómeno de percolación.
- 8- En un sistema de flujo continuo, el fenómeno de percolación es disminuido cuando se aplica el campo eléctrico de corriente directa y se aumenta la temperatura.
- 9- La coalescencia eléctrica depende directamente del porcentaje de agua emulsionada.
- 10- El tiempo mínimo de residencia de las emulsiones sintéticas, cuando son inducidas por un campo eléctrico de corriente D.C., es favorable cuando el tiempo de residencia es menor. Esto trae como consecuencia el retardo del fenómeno de percolación y caída del potencial eléctrico.

VIII. Recomendaciones

- 1-** Aplicar otro método de separación electrostática a la emulsión sintética (parafina-agua-span 80-genapol 080), como por ejemplo, electroforesis, el cual involucra partículas cargadas eléctricamente. Este método requiere la presencia de un campo eléctrico de alta tensión y la inducción de cargas eléctricas en la superficie de las partículas. Entre ellas se pueden mencionar: bombardeo iónico y fricción.
- 2-** Trabajar con muestras naturales de fosas petroleras con cortes de agua superior o igual al 50%, para poder aplicarlo en la producción petrolera y obtener resultados óptimos que redunden económicamente en pro del país.
- 3-** Crear un sistema de agitación constante en el sistema de flujo continuo, cuando se esté empleando la técnica de deshidratación electrostática. Esto con el fin de minimizar el fenómeno de percolación y la caída del campo eléctrico.

IX. Bibliografía

- 1- **J. Salager.** *Surfactantes IV. Surfactantes no iónicos.* Cuaderno FIRP 303. Laboratorio FIRP, Escuela de Ingeniería Química. Universidad de los Andes. Mérida.(2002)

- 2- **J. Salager.** *Surfactantes. Tipos y usos.* Cuaderno FIRP 303A. Laboratorio FIRP. Escuela de Ingeniería Química. Universidad de los Andes. Mérida. (2002)

- 3- **J. González y J. Picard.** *Geología de Venezuela y de sus cuencas petrolíferas.* Ediciones Foninves, Caracas 2:1030 p. (1980).

- 4- **J. Ortega y A. Monrroy.** **Formación Guafita:** Nueva unidad litoestratigráfica del terciario en el subsuelo de la Cuenca Barinas-Apure, Venezuela Sur Occidental. Boletín Sociedad Venezolana de Geólogos, N: 31, 9-35. (1987).

- 5- **H. Labrador, L. López y F. Galárraga.** *Estudio Geoquímico de Crudos del Campo Guafita, Estado Apure, Venezuela.* Copyright © 1995. Depósito legal pp. 76-0010 ISSN 0378-1844. INTERCIENCIA 20(1):30-36

- 6- **M. Rebolledo.** *Estudio del Efecto del Sólidos en la estabilidad de una emulsión de agua en aceite bajo un campo eléctrico D.C. Trabajo Especial de Grado.* Universidad Central de Venezuela. Escuela de Ingeniería Química. pp 10.(2007)

- 7- http://www.veneconomy.com/site/files/articulos/artEsp3479_2411.pdf
Veneconomía PetróleoVol. 23 No. 4 – Enero de 2006.

- 8- **J. Salager.** *El Mundo de los Surfactantes.* Cuaderno FIRP 311. Laboratorio FIRP. Escuela de Ingeniería Química. Universidad de los Andes. Mérida. (1992)

- 9- **B. Pérez y F. Garfias.** *Deshidratación del Crudo Maya mediante un Campo Eléctrico de corriente continua.* Revista de la Sociedad Química de México. Vol 46, N°3 (2002)
<http://www.textoscientificos.com>

- 10- **J. Salager.** *Formulación, composición y fabricación de emulsiones para obtener las propiedades deseadas.* Cuaderno FIRP 747 parte A: Introducción y conceptos de formulación fisicoquímica. Laboratorio FIRP. Escuela de Ingeniería Química. Universidad de los Andes. Mérida. (1999).
- 11- http://www.inredh.org/index.php?option=com_content&view=article&id=176:los-impactos-de-la-explotacion-petrolera-en-relacion-al-derecho-humano-al-agua&catid=61:boletines&Itemid=126
- 12- **L. Laurier.** *Emulsions, fundamentals and Applications in the petroleum Industry,* Amer. Chem. Soc. Washington, p.319. (1992).
- 13- **R. Santana.** *Orimulsión: Producción y Tecnología.* pp24. (2006)
<http://www.monografias.com/trabajos12/orimu/orimu.shtml>.
- 14- **S. Sams y K. Warren.** *New Methods of application of electrostatic fields.* AIChE Spring Nacional Meeting for recent advances in desalting. Natco group, Inc. pp 28. (2004)
- 15- **H. Rivas.** *Emulsiones de bitumen en agua.* Acta Científica Venezolana, Vol. 54. Nº3. pp11 (2003)
- 16- **L. Laurier.** *Petroleum emulsions.* American Chemical Society. Washington, DC. (1992)
- 17- **E. Bauer.** *Influencia del Campo Eléctrico D.C. en la distribución de tamaño de partícula de Sistemas dispersos crudo, agua y sólidos provenientes de lodos petrolizados.* pp 9 (2007)
- 18- **F. Méndez.** *Estabilidad dinámica de emulsiones de aceite en agua.* Trabajo Especial de Grado. Escuela de Ingeniería Química. pp 23 (1992)

- 19- **V. Rivera.** *Desestabilización de emulsiones estables empleando diferentes temperaturas y relaciones de fases agua-aceite en combinación con campo eléctrico. Trabajo Especial de Grado. Escuela Ingeniería Química. UCV. pp 18. (2007)*
- 20- **F. Sánchez.** *Efectos de la mezcla de agua agria y agua del Condominio de Jose en la Formulación de Emulsiones de Bitumen en agua. Pp.15 (2004).*
- 21- **J. Salager.** *Phase Transformation and emulsion inversion on the basics of catastrophe theory. Enciclopedia of emulsion technology. Vol 3, Chap. 3, (1988)*
- 22- **F. Sánchez.** *Efectos de la mezcla de agua agria y agua del Condominio de Jose en la Formulación de Emulsiones de Bitumen en agua. Pp.16 (2004).*
- 23- **L. Schramm.** *Emulsions, foams and suspensions. Fundamentals and applications. Wiley-VCH, Weinheim. pp 9 (2005)*
- 24- **F. Sánchez.** *Efectos de la mezcla de agua agria y agua del Condominio de Jose en la Formulación de Emulsiones de Bitumen en agua. Pp.17 (2004).*
- 25- **J. Salager.** *Emulsiones, propiedades y formulación. Cuaderno FIRP.No.231. Universidad de los Andes. (1993).*
- 26- **H. Hamaker.** *Physica. Vol.4 .(1973).*
- 27- **J. Boyd y C. Parkinson.** *Emulsions Science. Academic, Press.Inc.,New York.(1974).*
- 28- **I. Cheme.** *Patentes del Reino Unido. pp.59(1981). 229-237; pp.217(1986).*
- 29- **P. Bailes y S. Larkai.** *An experimental investigation into the use on high voltaje DC fields for liquid phase separation. Transactions of the institution of chemical Engineers. Vol. 59. 229 (1981)*

- 30- **P. Bailes y S. Larkai.** *Influencia de la relación de fases en la coalescencia electrostática de dispersiones de agua en aceite.* (1984)
- 31- **Taylor, S.E. (1996).** *Theory and practice of electrically-enhanced phase separation of water in oil emulsions.* *transactions of the institution of chemical engineers.* Vol 74 (1996), 526-540
- 32- **J.S. Eow y M. Ghadiri.** *Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil. A review technology :* *Chemical Engineering Journal.* Vol.84. (2001).
- 33- **Einhorn-Stoll, U.; Weiss, M. and Kunzek H.** *Influence of the emulsions components and preparation method on the Laboratory-scale preparation of o/w emulsions containing different types of dispersed phases and/ or emulsifiers.* *Nahrung/food,* 46 N°. 4, 294-301 (2002)
- 34- **Novales, B., Papineau, P., Sire, A. y Axelos, M.** *Characterization of emulsions and suspensions by video image analysis.* *Colloids and surfaces A : physicochem. Eng. Aspects,* 221, 81-89 (2003)
- 35- **V. Marfisi y Shierly.** *Estabilidad de emulsions relacionadas con el proceso de deshidratación de crudos.* Universidad de los Andes: Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química. Laboratorio FIRP. (2004).
- 36- **F. Donis y M. Ricaurte.** *Evaluación integral de la deshidratación del crudo slop en patio de tanques Lagunillas Norte.* Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química. (2005)
- 37- **C. Morales.** *Seminario de tesis doctoral.* Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química. (2008).

- 38- **A. Padrón y P. Zúñiga.** *Aplicación de la técnica de microscopia óptica para la caracterización de sistemas dispersos formados por crudos, agua y sólidos.* Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química. (2005).
- 39- **De Almeida y N. Rodríguez.** *Estudio de la coalescencia y sedimentación de emulsiones de agua en aceite bajo efecto de campo eléctrico D.C.* (2006)
- 40- **Guerra.** *Formulación de emulsiones de agua en aceite utilizando surfactantes no iónicos (Span 80 y N 40)* (2006)
- 41- **Hidalgo.** *Formulación de emulsiones de agua en parafina utilizando colorantes orgánicos naturales.* (2008)
- 42- <http://www.slideshare.net/zinzita/emulsiones>
- 43- **De Almeida y N. Rodríguez.** *Estudio de la coalescencia y sedimentación de emulsiones de agua en aceite bajo efecto de campo eléctrico D.C.* pp 97 (2006)
- 44- **W. Puente.** *Efecto de la geometría del electrodo en el proceso de deshidratación electrostática de emulsiones w/o.* pp12. (2007)
- 45 -
<http://74.125.47.132/search?q=cache:uekfWSy20YEJ:www.cienciaspuras.com/practicas/P58%2520Densidad.doc+C%C3%A1lculo+de+la+densidad+absoluta+y+relativa&cd=5&hl=es&ct=clnk&gl=ve>
- 46- **Raymond A. Serway.** *Física Tomo II Cuarta Edición Editorial: McGraw-Hill* (2002)
- 47- **R. Resnick.** *Física.* Tomo II. Capítulo 30. pp. 112 (1984).
- 48- <http://www.cricyt.edu.ar/enciclopedia/terminos/TiempodeRe.htm>

- 49- **R. Resnick.** *Física*. Tomo II. Capítulo 30. pp 111 (1984).
- 50- **W. C. Griffin.** *Clasification of surface active agents by HLB. Jornal Society Cosmetic Chemists. Vol 1, 311. (1949)*
- 51- <http://www.chemblink.com/products/1338-43-8.htm>
- 52- <http://clamcoatzacoalcos.com.mx/Archivos/ALFABETICO/G/GENAPOL%20X%20080.PDF>
- 53- **R. Resnick.** *Física*. Tomo II. Capítulo 30. pp. 131 (1984).
- 54- <http://www.slideshare.net/zinzita/emulsiones>
- 55- http://www.firp.ula.ve/archivos/cuadernos/s853pp_deshidratación.pdf

Anexo1. Surfactantes sintéticos

NO IÓNICOS	IÓNICOS
Genapol PF 20	AFS (Ácido fenilsulfónico)
Genapol 080	Genagen CAB-V
Genaminox	
* Span 80 (Monooleato de sorbitán)	
N40 (Nonifenol etoxilado)	

Anexo 2. Surfactantes naturales de los hidrocarburos naturales

Asfaltenos
Resinas
Sulfuros de metales
Arcillas
Sulfatos metálicos

Anexo 3. Distribución de fosas petroleras a nivel Nacional

Fosas de perforación: **5.818**

Fosas de producción: **2.995**

Muros quemadores: **6.715**

TOTAL: 15.528

Las fosas de producción a nivel nacional,
se pueden discriminar de la siguiente forma:

Fosas de estaciones: **667**

Fosas de plantas compresoras: **189**

Fosas de servicio: **2.139**

TOTAL: 2.995

De las **15.528** fosas en el país, **94,0%**, es decir

14.520 fosas, está ubicado en el oriente del país:

Ubicación geográfica Número de fosas

Anaco: **7.813**

Distrito San Tomé: **6.414**

Punta de Mata: **284**

Maturín/Morichal: **10**

TOTAL: 14.520

Anexo 4. Modelo de cálculos para la preparación de la emulsión sintética parafina-agua y surfactantes no iónicos (Span 80 y Genapol 080)

Cálculo del valor de HLB de mezclas tensioactivas, según Griffin ^[50]
Buscar en la escala HLB de Griffin los valores para el tipo de emulgente a preparar

Caso: Agente emulgente W/O (agua/aceite)

Lipófilos

Hidrófilos

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

Agentes antiespumantes: (1 – 3)

Agentes emulgentes, agua/ aceite: (3 – 8)

Agentes humectantes y de extensión: (7 – 9)

Agentes emulgentes, aceite/agua: (8 – 16)

Agente solubilizante: (16 – 18)

Promediar el rango de HLB para el emulgente tipo agua/aceite: $(3 + 8) / 2 = 5,5$

Aplicar la fórmula de HLB (balance lipofílico-hidrofílico), según Griffin (1949):

$HLB = HLB_{emulsionante(A)} \times F_{emulsionante(A)} + HLB_{emulsionante(B)} \times F_{emulsionante(B)}$

$5,5 = HLB_{emulsionante(A)} \times F_{emulsionante(A)} + HLB_{emulsionante(B)} \times F_{emulsionante(B)}$

Para la preparación de una mezcla de emulsionante Span 80 y Genapol 080

Buscar en la tabla de surfactantes los valores de HLB

Surfactante	HLB
-------------	-----

Span 80	4, 3
---------	------

Genapol 080	11, 0
-------------	-------

$$5,5 = 4,3 \times F \text{ Span } 80 + 11,0 \times F \text{ Genapol } 080$$

Para el cálculo de los factores F, se aplica la siguiente expresión empírica:

$$\text{HLB} = \text{HLB Span } 80 \times \% \text{ Span} + \text{HLB Genapol } 080 (100 - \% \text{ Span}) / 100$$

$$5,5 = 4,3 \times F \text{ Span } 80 + 11,0 (100 - F \text{ Span } 80) / 100$$

$$5,5 = 4,3 \times F \text{ Span } 80 + 1100 - 11,0 F \text{ Span } 80 / 100$$

$$550 = 4,3 \times F \text{ Span } 80 + 1100 - 11,0 F \text{ Span } 80 \quad \text{Agrupo términos semejantes}$$

$$4,3 \times F \text{ Span } 80 - 11,0 F \text{ Span } 80 = 550 - 1100$$

$$F \text{ Span } 80 \% (4, 3 - 11, 0) = - 550$$

$$F \text{ Span } 80 \% (- 6, 7) = - 550$$

$$F \text{ Span } 80 \% = - 550 / - 6, 7$$

$$F \text{ Span } 80 = 82,1 \%$$

Luego por diferencia obtenemos el % F Genapol 080: $100 \% - 82,1 \% = 17,9 \%$

Sustituimos en la ecuación de HLB:

$$\text{HLB} = 4,3 \times 0,821 + 11,0 \times 0,179 = 5,5$$

La composición final de la emulsión Parafina-agua-Span 80 y Genapol 080:

$$\text{Span } 80 = 4,3 \times 0,821 = 3,53 \%$$

$$\text{Genapol } 080 = 11,0 \times 0,179 = 1,97 \%$$

Parafina: 47,25 %

Agua: 47,25 %

Ejemplo: Para la preparación de 100,0 mL de emulsión: Parafina-agua-Span 80 y Genapol 080, se miden los volúmenes 47,2 mL, 47,2 mL, 3,5 mL y 2,0 mL, respectivamente, homogeneizar con la ayuda de una varilla de vidrio y finalmente aplicar agitación eléctrica a 5000 r.p.m. Tomar una alícuota de unos 20,0 mL de la emulsión preparada y someter al campo eléctrico de corriente directa a 2,0 kV.

Anexo 5. Cálculo para el porcentaje de agua recuperada en el proceso de deshidratación electrostática, antes y después de centrifugar y de la emulsión sintética re-tratada con el campo eléctrico D.C.

$$\%H_2O = [(Vol. Sep. (mL) / Vol. total de emulsión en la celda (mL)) * Fw] * 100$$

$\%H_2O_{recuperada}$ = Separación de agua en base al contenido total de agua de la emulsión, antes y después del proceso de separación por centrifugación y de la emulsión re-tratada con el campo eléctrico D.C.

Vol. Sep. /mL = volumen de agua total separada en ml, antes y después del proceso de separación por centrifugación y de la emulsión re-tratada con el campo eléctrico D.C.

Fw = fracción volumétrica de agua con respecto a la emulsión (adimensional)= 0.5

Ejemplo: Si en el proceso de separación electrostática se recupera, en un tiempo promedio de 15 minutos, un volumen total de agua de 8,75mL y la celda electrostática, contiene un volumen de emulsión de 20,0 mL y una fracción volumétrica de agua de 0,5, entonces el % de agua recuperada será:

$$\% H_2O_{recuperada} = (8,75 \text{ mL} / 20,0 \text{ mL} * 0,5) * 100 = 87,5\%$$

Anexo 6. Cálculo de la viscosidad

6.1. Cálculo de la viscosidad cinemática y dinámica a 22 °C +/- 1°C de la emulsión sintética, parafina-agua y surfactantes no iónicos

Tiempo/s = 2,50 min. , 2,48 min. , 2,50 min.

Tiempo promedio/ min. = (2,50 min.+2,48 min.+2.50 min.) / 3 = 2,49 min.

Conversión del tiempo a segundos: 2,49 min. * 60,0 s/1 min. = 149,4 s

$$V_c = K * T \quad ; \quad V_c = \text{viscosidad cinética / Cst}$$

$$K = \text{constante del viscosímetro Cst/s}$$

$$T = \text{tiempo/s}$$

Ejemplo: $V_c = 1,1681 \text{ Cst/s} * 149,4 \text{ s} = 174,5 \text{ Cst}$.

6.2. Cálculo de la viscosidad dinámica a 22 °C +/- 1°C

Ejemplo: $V_d = D * V_c \quad ; \quad V_d = \text{viscosidad dinámica/cP}$

$D = \text{densidad de la muestra/ g/mL}$

$$V_d = 0,9187 \text{ g/mL} * 174,5 \text{ Cst} = 160,3 \text{ cP}$$

Anexo 7. Cálculo para determinar la densidad relativa de la emulsión sintética, parafina-agua y surfactantes no iónicos a T= 22 °C +/- 1 °C

Masa picnómetro vacío: 23,6883 g

Masa del picnómetro lleno: 70,2012 g

Diferencia de masa: $70,2012 \text{ g} - 23,6883 \text{ g} = 46,5129 \text{ g}$

Aplicando la ecuación: $D = m \text{ (g)} / V \text{ (mL)} = 46,5129 \text{ g} / 50,629 \text{ mL} = 0,9187 \text{ g/mL}$

Anexo 8. % agua recuperada en función del tiempo en segundos, a diferentes tiempos de estabilidad y de inducción eléctrica D.C.

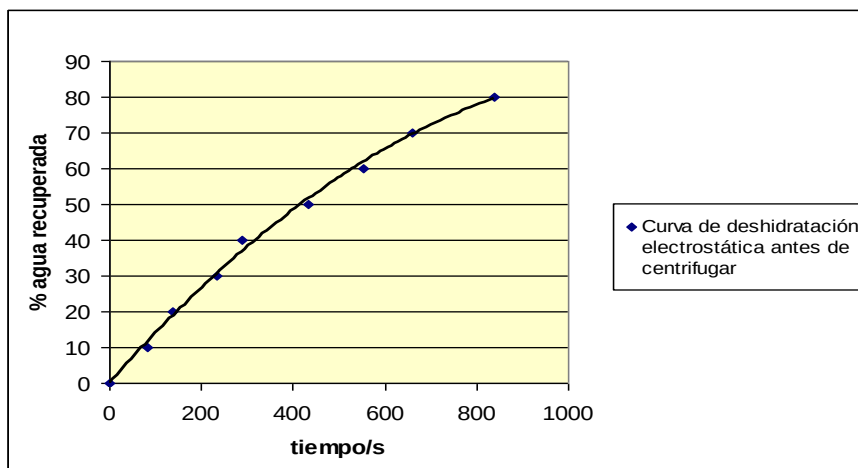


Gráfico 1. % agua recuperada de la emulsión sintética (parafina-agua-Genapol 080 y Span 80) contra el tiempo en segundos antes de centrifugar.
Tiempo de estabilidad de la emulsión sintética: **2 horas**

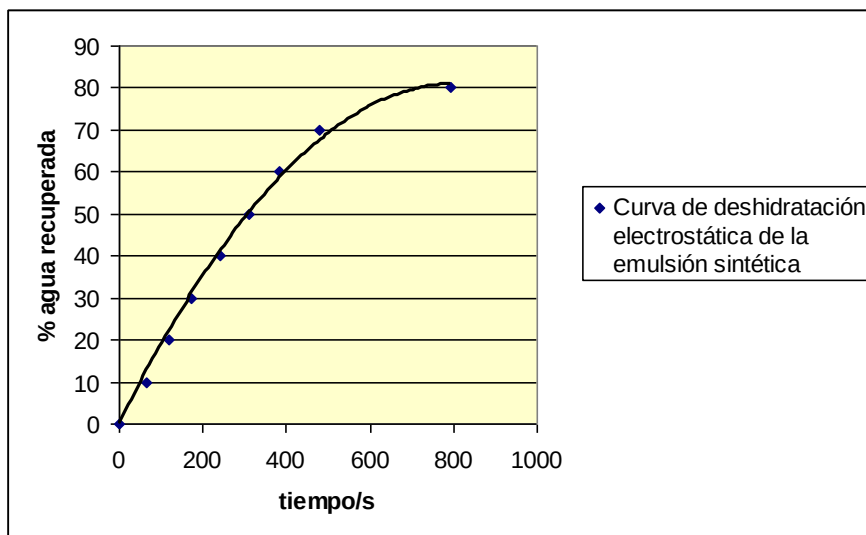


Gráfico 2. % agua recuperada de la emulsión sintética (parafina-agua-Genapol 080 y Span 80) contra el tiempo en segundos antes de centrifugar.
Tiempo de estabilidad de la emulsión sintética: **5 días**

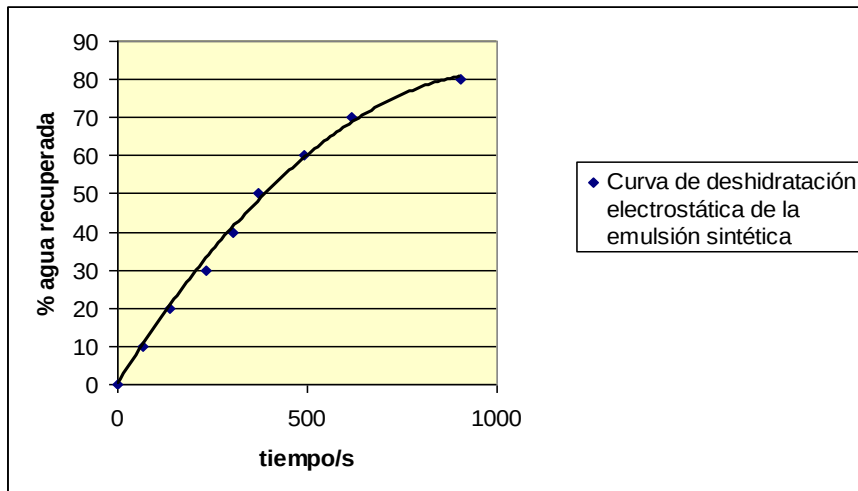


Gráfico 3. % agua recuperada de la emulsión sintética (parafina-agua-Genapol 080 y Span 80) frente al tiempo en segundos antes de centrifugar.
Tiempo de estabilidad de la emulsión sintética: **15 días**

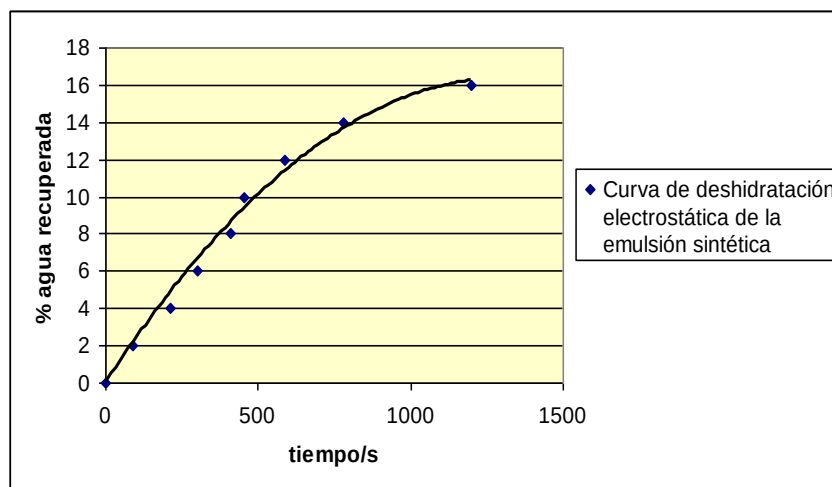


Gráfico 4. % agua recuperada de la emulsión sintética (parafina-agua-Genapol 080 y Span 80) contra el tiempo en segundos antes de centrifugar.
Tiempo de estabilidad de la emulsión sintética: **15 días** y menor tiempo de inducción eléctrica (**20,0 min.**)

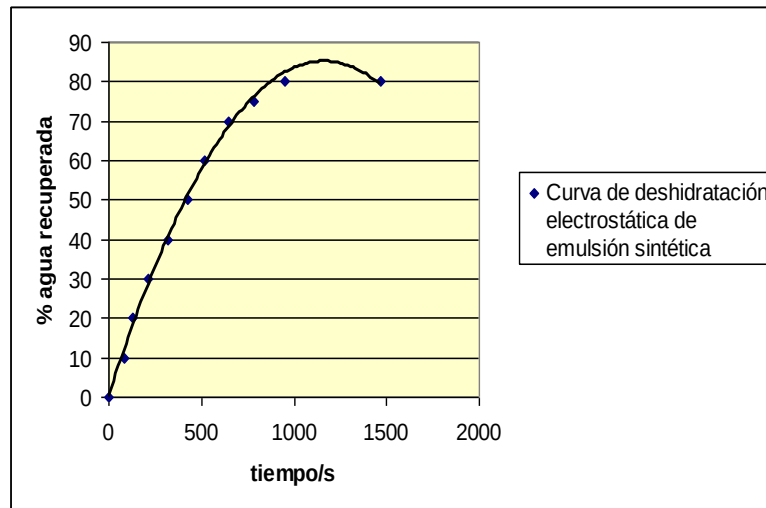


Gráfico 5. % agua recuperada de la emulsión sintética (parafina-agua-Genapol 080 y Span 80) en función del tiempo en segundos antes de centrifugar. Tiempo de estabilidad de la emulsión sintética: **15 días** y mayor tiempo de inducción eléctrica (**24.5 min.**)

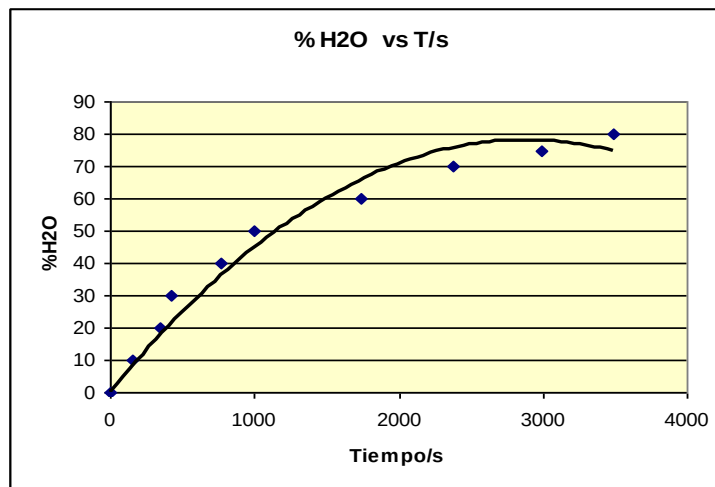


Gráfico 6. % agua recuperada de la emulsión sintética (parafina-agua-Genapol 080 y Span 80) contra el tiempo en segundos antes de centrifugar. Tiempo de estabilidad de la emulsión sintética: **15 días** y mayor tiempo de inducción eléctrica (**58.2 min.**)

Anexo 9. Determinación del tiempo de residencia para diferentes placas de cobre en un sistema de flujo continuo de altura 23,0 cm.

$$T_r = V / Q; \quad T_r = \text{tiempo de residencia/min.}$$

$$V = \text{capacidad volumétrica del reactor de flujo continuo/cm}^3$$

$$Q = \text{caudal / cm}^3/\text{min.}$$

1- Se determina el caudal de entrada al sistema de flujo continuo ($\text{cm}^3 / \text{min.}$) =
2,34 $\text{cm}^3 / \text{min.}$

2- La capacidad volumétrica (cm^3) del reactor de flujo continuo es: 107,0 cm^3

3- Entonces el tiempo de residencia será: $T_r = 107,0 \text{ cm}^3 / (2,34 \text{ cm}^3 / \text{min.}) =$

$T_r = 45,7 \text{ min.}$ Este es el tiempo de residencia en que tarda el fluido en dejar el reactor de flujo continuo de longitud de 23,0 cm.

4- Para determinar el tiempo de residencia de un reactor de flujo continuo, cuando el fluido pasa a través de unas celdas de cobre en posición vertical, de longitud de 2,48 cm. Tenemos:

$$Tr = 2,5 \text{ cm.} * 45,7 \text{ min.} / 23,0 \text{ cm.} = 4,9 \text{ min.}$$

5- El tiempo de residencia para los electrodos de longitud 13,0 cm. Será:

$$Tr = 13,0 \text{ cm.} * 45,7 \text{ min.} / 23,0 \text{ cm.} = 25,8 \text{ min.}$$

6- Para los electrodos de cobre de longitud de 11,6 cm. Será:

$$Tr = 11,7 \text{ cm.} * 45,7 \text{ min.} / 23,0 \text{ cm.} = 23,2 \text{ min.}$$

7- Para los electrodos de longitud 2,2 cm.

$$Tr = 2,2 \text{ cm.} * 45,7 \text{ min.} / 23,0 \text{ cm.} = 4,4 \text{ min.}$$

8- En una celda el tiempo de residencia es infinito ($T_r = \text{infinito}$); $Q = 0 \text{ cm}^3/\text{s}$

Anexo 9. Cálculo de la resistencia eléctrica para cada sistema químico

9.1. Cálculo de la resistencia eléctrica para un sistema de flujo continuo y una celda

$$R = \rho * L / A \text{ (Ec.1); } \quad R = \text{resistencia } / \Omega$$

ρ = resistividad del cobre ($1,7 * 10^{-8} \Omega \cdot m$)

L= longitud de la placa de cobre/m

A= área/ m

9.2. Cálculo de la corriente eléctrica por la ley de Ohmio

$$V = R * I \text{ (Ec.2) } ; I = \text{intensidad de corriente en amperios (Amp.)}$$

R= resistencia / Ω

V= voltaje/ V

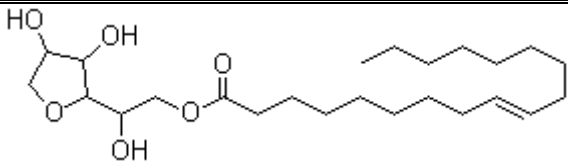
$$1 \text{ kV} = 1000 \text{ V}$$

Despejando de la Ec.2 "R" e igualándola a la Ec.1 se obtiene:

$$V / I = \rho * L / A \quad ; \text{ luego despejando "I" se llega a la expresión:}$$

$$I = V / (\rho * L / A) \quad \text{entonces} \quad I = V * A / \rho * L$$

Anexo 10. Propiedades físicas del surfactante Span 80. ^[51]

Nombre	Span 80
Sinónimos	Sorbitan oleate; Sorbitan (Z)-mono-9-octadecenoate
Estructura molecular	
Fórmula molecular	$C_{24}H_{44}O_6$
Peso molecular	428,61
Número de registro CAS	1338-43-8
EINECS	215-665-4
Densidad (g/ml)	0,986
Índice de refracción	1,4800 a T = 25,0 °C
Punto de Flash	>110,0 °C

Es un líquido de color ámbar aceitoso, olor a grasa, no es tóxico.

Uso: en la industria farmacéutica, pinturas, petróleo, polvo para emulgentes, por disolventes, estabilizantes, lubricantes, suavizantes, agentes antiestáticos, agente dispersante, agente de acabado, inhibidor, cosolvente, aditivos para hilados. Facilitará la solución de dos líquidos para formar una emulsión más estable.

El Span 80 Sri Lanka 80, el nombre químico de sorbitán éster de aceite, también conocido como S-80 emulsionante. Es soluble en disolventes orgánicos y no se disuelve en el agua. Con capacidad de dispersión y emulsificación. Su valor de saponificación está entre 140-160 mg KOH/g 4,3 HBL. Valor de hidroxilo entre 190-220 mg KOH/g ácido, 8,0 mg KOH/g de emulsionante no iónico.

Anexo 11. Propiedades del surfactante: Genapol 080. ^[52]

- **GENAPOL:** es un surfactante no iónico. Es lauril sulfato de sodio. Un ácido graso de 12 átomos de carbono, con un punto de fusión 44°C, que se encuentra principalmente en el aceite de coco y de laurel; se obtiene por cristalización fraccionada de aceite de la planta después de su extracción con disolvente. Su fórmula es $\text{CH}_3 (\text{CH}_2)_{10} \text{CO}_2\text{H}$. Se usa en preparaciones cosméticas, saborizantes sintéticos de alimentos y detergentes

Nombre comercial: GENAPOL X 080

Familia química: Poliglicoleter de alcohol graso

Inflamabilidad: 1

Reactividad: 0

Sección IV. Propiedades fisicoquímicas

Estado físico: líquido

Color: de incoloro a ligeramente amarillento

Olor: propio, débil

pH: 6 - 8 (20,0 °C, 50,0 g/L)

Método: DIN 53996

Etanol/agua 1:1.

Densidad: 8,1785 lb/gal (0,98 g/cm³, 50,0 °C)

Método: DIN 51757

Punto de ebullición: Sin determinar

Punto de inflamación: aprox. 190,0 °C (374,0 °F)

Método: DIN/ISO 2592 (copa abierta)

HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD

Viscosidad: 100 mPa.s

Método: DIN 53015

Los gases de combustión de materias orgánicas deben considerarse siempre como tóxicos por inhalación.

Contacto con los ojos: Irrita los ojos.

Contacto con los ojos:

Lavar cuidadosamente y a fondo con agua abundante y acudir al médico.

Contacto y/o absorción por la piel:

Lavar la zona afectada inmediatamente con agua y jabón.

Anexo 12. Características de las placas de cobre empleadas en la deshidratación electrostática

Placas	Área/cm ²	Longitud/cm.	Ancho/cm.	Resistividad del cobre a T=20°C
1	19,5	13,0	1,5	$1,7 \cdot 10^{-8} \Omega.m$ *
2	25,0	11,7	2,1	
3	5,2	2,5	2,1	

* [53]

Placa Cu	Resistencia/ Ω	Constante de la placa de cobre/cm
1	$1,13 \cdot 10^{-6}$	169,0
2	$0,79 \cdot 10^{-6}$	59,0
3	$0,81 \cdot 10^{-6}$	2,5

Anexo 13. Tamaño de las emulsiones por observación directa. [54]

Emulsión	Tamaño/ μm
Transparente	$\leq 0,05$
Gris semitransparente	0,05 a 0,1
Blanca azulada	0,1 a 1,0
Blanca lechosa	$\geq 1,0$

Anexo 14. Lista de símbolos

kV = kilovoltio	c.m ³ = centímetro cúbico
°C = grados centígrados	°API = American petroleum institute
% = porcentaje	w = agua
D.C. = corriente directa	o = aceite
A.C. = corriente alterna	Hz = Hertz
T = temperatura	
ASTM = American Society Testing Material	mL= mililitros
d = distancia	Cap. = capacidad
t = tiempo	rpm = revoluciones por minutos
s = segundos	c/u = cada uno
min. = minutos	Q = caudal
h = altura	E = campo eléctrico
cm. = centímetros	HLB = balance lipofílico hidrofílico

Anexo 15. Glosario

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

Coloide: es un sistema heterogéneo formado por una fase dispersante y una fase dispersa. En un sistema coloidal las partículas dispersas tienen un tamaño que varía

entre los 2 nm y los 2000 nm. Una de las consecuencias físicas de esta diferencia de tamaño consiste en que los sistemas coloidales dispersan la luz (efecto Tyndall).

Efecto electrostático: es cuando se somete a la emulsión a un campo electrostático para la polarización de las gotas adyacentes de agua para crear un dipolo, y al trasladarse las gotas de agua con sus respectivas cargas hacia el electrodo afín, se promueve la atracción y choque entre éstas, favoreciendo la coalescencia donde aumenta de tamaño y después se asientan por gravedad. Acelerando este proceso, aplicando la técnica de centrifugación.

Emulsión: es una dispersión de gotas de un líquido (la fase interna) en un segundo líquido inmiscible (la fase externa o continua) con el primero, que presentan una cierta estabilidad respecto a la coalescencia, estabilidad cuya magnitud o escala de tiempo depende esencialmente de las aplicaciones. Además, una emulsión estable es aquella que no es capaz de sedimentar por sí misma en un tiempo definido sin alguna forma de tratamiento mecánico o químico.

HLB: es un agente tensioactivo, el cual es adsorbido en la interfase agua-aceite a causa de sus grupos hidrófilos y lipófilos

Percolación: es la acumulación o agregado de gotas de agua en las placas metálicas, producto de la inducción del campo eléctrico; formando a su vez, una cadeneta de gotas de agua entre las placas, trayendo como consecuencia fluctuaciones y/o caída del potencial eléctrico (**figura 22**).

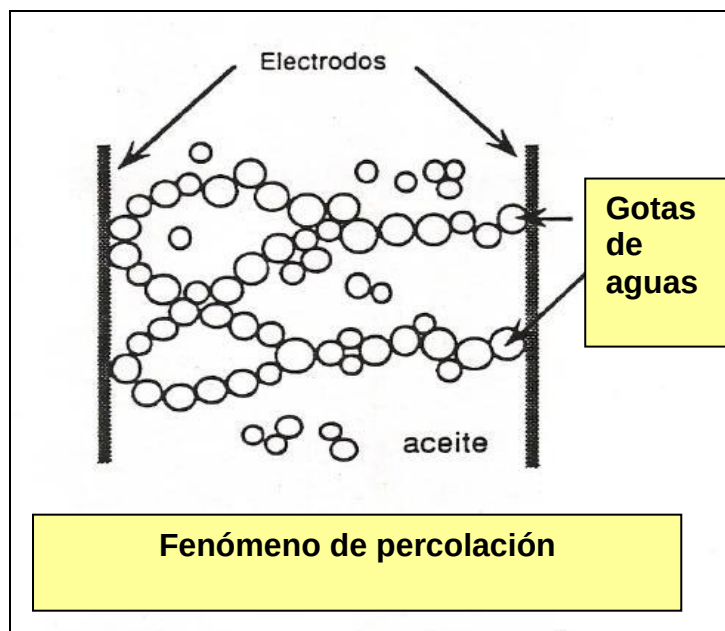


Figura 22. Fenómeno de percolación en una celda electrostática. [55]

Surfactante: es un agente activo superficial que reduce la tensión superficial de los líquidos y que contienen un segmento liposoluble (soluble en aceite) y otro hidrosoluble (soluble en agua). La solubilidad parcial tanto en agua como en aceite permite al surfactante ocupar la interfase. Los surfactantes se clasifican en agentes aniónicos, agentes catiónicos y agentes no iónicos.

Tiempo de residencia: Es el tiempo requerido para que un determinado material (emulsión sintética), complete su ciclo de ingreso, permanencia y egreso entre los capacitores o placas de cobre. Para estimar el tiempo de residencia promedio, deben conocerse:

- Volumen total del reactor.
- Caudal del fluido.

La relación entre el caudal y el volumen total equivale al tiempo de residencia (de permanencia) del fluido dentro del sistema de flujo continuo.

$$Tr = V / Q; \quad Tr = \text{tiempo de residencia/min}$$

$$V = \text{Volumen cm}^3$$

$$Q = \text{Caudal cm}^3/\text{min}$$