

Impedance spectroscopy in water/oil emulsions in a range of intermediate frequencies

José Jorge^{*,a}, Juan Carlos Pereira^c, María Rodríguez^b, Nelson Barrios^c, David Oliva^a, José Antonio Navia^a

^a*Escuela de Física, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela, Venezuela.*

^b*Laboratorio de Separaciones Mecánicas, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, Venezuela.*

^c*Laboratorio de Petróleo, Hidrocarburos y Derivados (PHD), Facultad Experimental de Ciencias y Tecnología, Universidad de Carabobo, Venezuela.*

Abstract.- Impedance spectroscopy is the study of interaction between electromagnetic radiation and matter with absorption or emission of radiant energy; thus making a quick and non-destructive characterization of fluids, such as synthetic emulsions or natural ones (e.g. emulsified crude oil). Heterogeneous mixture composed of two immiscible liquids which differs on its electrical permittivity and conductivity shows a dielectric dispersion process due to interfacial polarization, according to the Maxwell-Wagner effect. In this work, water in oil emulsions (W/O) with 0,5:10, 1,0:10, 1,5:10 ratios are synthesized; complex electrical permittivity and conductivity are obtained in a frequency range from 400 kHz to 4,7 MHz through electrical impedance measurements using an impedance analyzer HP 4193A Vector Impedance Meter and a cell of flat and parallel plates of stainless steel of 40 ml of volume in its interior. The results showed that the real part of the electric permittivity and the conductivity of the emulsions increase with the water content. It is found that the behavior of the permittivity and electrical conductivity of the emulsions agree with Wagner's theory. The micrograph through an optical microscope showed that the droplet size of the emulsions is between 2,3 and 3,0 μm .

Keywords: spectroscopy; impedance; water:oil emulsions; permittivity; conductivity.

Espectroscopia de impedancia en emulsiones agua/aceite en un rango de frecuencias intermedias

Resumen.- La espectroscopia de impedancia es el estudio de la interacción entre la radiación electromagnética y la materia, con absorción o emisión de energía radiante, por lo que facilita una caracterización rápida y no destructiva de fluidos como emulsiones sintéticas o naturales v.g. crudos emulsionados. Una mezcla heterogénea compuesta de dos fases líquidas inmiscibles que difieren en la constante dieléctrica y en la conductividad eléctrica muestra un proceso de dispersión dieléctrica debido a la polarización interfacial de acuerdo al efecto Maxwell-Wagner. En este trabajo se sintetizan emulsiones agua en aceite (W/O) con relaciones 0,5:10, 1,0:10 y 1,5:10, para determinar tanto la permitividad eléctrica, como la conductividad eléctrica compleja en un rango de frecuencia entre 400 kHz y 4,7 MHz a partir de medidas de impedancia eléctrica, a través de un analizador de impedancias *HP 4193A Vector Impedance Meter* y una celda de placas planas y paralelas de acero inoxidable de 40 ml de volumen en su interior. Los resultados obtenidos muestran que la parte real de la permitividad eléctrica y la conductividad de las emulsiones, aumentan con el contenido de agua. Se encuentra que el comportamiento de la permitividad y conductividad eléctrica de las emulsiones concuerdan con la teoría de Wagner. La micrografía a través de un microscopio óptico arrojó que el tamaño de gota de las emulsiones se encuentra entre 2,3 y 3,0 μm .

Palabras claves: espectroscopia; impedancia; emulsiones agua:aceite; permitividad; conductividad.

Recibido: febrero 2018

Aceptado: noviembre 2018

1. Introducción.

Las emulsiones son una mezcla entre dos líquidos inmiscibles en los que la fase dispersa consiste de gotas con un tamaño que varía de 0,1 a 100 μm de diámetro, una fase continua y un estabilizador como agente emulsionante. La

*Autor para correspondencia:

Correo-e: josejorgea@gmail.com (José Jorge)

mayoría de las emulsiones tienen una fase acuosa y una fase oleosa. La dispersión que contiene aceite como fase continua y agua como fase dispersa, se denomina emulsión de agua en aceite (W/O).

Las gotas de agua se dispersan en el medio continuo produciendo una interfase, originando el aumento de la energía libre del sistema y conduciendo a un estado termodinámicamente inestable. Por lo tanto, se observa una tendencia a la separación de las fases debido a la coalescencia de las gotas, que provoca una disminución en el área interfacial, reduciendo la energía libre del sistema. Para lograr la estabilidad cinética de la emulsión, es necesario agregar un tercer componente llamado emulsionante. El emulsionante o surfactante es una sustancia química que, en baja concentración (0,5-3 %), tiene la característica de disminuir la tensión interfacial entre las fases de agua y aceite; por lo que, debido a la disminución de la energía interfacial y, considerando que las emulsiones contienen un área interfacial grande, las fuerzas responsables de la coalescencia de las gotas se reducen promoviendo la estabilidad del sistema [1].

La espectroscopia de impedancia facilita una caracterización rápida y no destructiva de fluidos como emulsiones sintéticas o naturales, entre las cuales se encuentran los crudos emulsionados. En la producción de petróleo, la emulsión está constituida por el agua contenida en los yacimientos o por agua inyectada a los pozos por métodos de extracción y recuperación, en cuyo caso la fase de aceite es el crudo. Esta mezcla, al ser bombeada y transportada por tuberías, genera la emulsión. Sin embargo, la emulsión W/O puede generarse durante diferentes procesos como en la recuperación, el transporte y la refinación de petróleo. Las emulsiones se producen cuando el petróleo y el agua se ponen en contacto en presencia de fuerzas de fricción entre la tubería y el fluido, o cuando se inyectan mezclas de vapor de agua en el pozo. Un gran porcentaje de los crudos explotados a nivel mundial están en estado emulsionado [2]. La concentración volumétrica de agua en la producción de petróleo es un parámetro importante que se monitorea constantemente para tener una estimación del contenido neto de la producción de petróleo.

Entre las técnicas de medición de la concentración volumétrica de agua en emulsiones de petróleo se encuentran *Near Infra Red* (NIR) y mediciones de rayos gamma, pero suelen ser muy costosas; sin embargo, los sensores capacitivos son sencillos y económicos, y son frecuentemente usados por diferentes técnicas eléctricas para medir la constante dieléctrica de diferentes materiales, incluidos los fluidos [1]. La espectroscopia de impedancia frecuentemente se emplea en emulsiones de agua en aceite (W/O) para obtener la constante dieléctrica en un rango de 10 mHz a 10 MHz utilizando sensores capacitivos de placas paralelas o cilíndricas.

Se conoce en la literatura que una mezcla heterogénea compuesta de dos fases que difieren en la constante dieléctrica y en la conductividad eléctrica muestran un proceso de dispersión dieléctrica debido a la polarización interfacial. Para partículas esféricas dispersas, con constante dieléctrica ϵ_p y conductividad eléctrica σ_p (S/m) en un medio continuo de constante dieléctrica ϵ_m y conductividad eléctrica σ_m , es posible conocer la permitividad eléctrica compleja y conductividad eléctrica compleja en función de la fracción volumétrica de la fase dispersa, de acuerdo a la Teoría de Wagner. Esta teoría es aplicable a emulsiones W/O en bajas proporciones de la fase dispersa. [3, 4].

La espectroscopia de impedancia consiste en aplicar una diferencia de potencial alterna a una celda, $V(j\omega) = V_0 \exp(j\omega t)$, donde ω es la frecuencia angular $\omega = 2\pi f$ y f la frecuencia en Hz, midiendo las partes real e imaginaria de la corriente $I(j\omega) = I_0 \exp[j(\omega t + \theta)]$ que circula por la celda, con el fin de obtener la impedancia $Z(j\omega)$ a través de la ley de Ohm $Z(j\omega) = V(j\omega) / I(j\omega)$. El espectro de frecuencia se obtiene al cambiar la frecuencia angular. Varios factores intrínsecos al material dentro de la celda, como la composición química, las estructuras moleculares o cristalinas, la homogeneidad, la presencia de portadores de carga y sus tipos, pueden afectar la respuesta del espectro [1].

La permitividad eléctrica compleja es una función de la frecuencia y de la temperatura, se origina en diferentes procesos: (i) fluctuaciones

microscópicas de dipolos moleculares (difusión rotacional), (ii) propagación de los portadores de carga móvil (difusión traslacional de electrones, protones o iones), y (iii) la separación de cargas en las interfases da lugar a una polarización adicional. Esta última puede tener lugar en capas límite dieléctricas internas (polarización Maxwell/Wagner/Sillars) en una escala mesoscópica y/o en los electrodos externos que entran en contacto con la muestra (polarización del electrodo), en una escala macroscópica. Su contribución a la pérdida dieléctrica puede ser de órdenes de magnitud mayor que la respuesta dieléctrica debido a las fluctuaciones moleculares [5].

En este trabajo se realiza un estudio de *espectroscopia de impedancia* en emulsiones W/O con relaciones agua/aceite de 0,5:10, 1,0:10 y 1,5:10. Se determinará la permitividad eléctrica y conductividad eléctrica compleja a partir de las medida de impedancia, en un rango de frecuencia de 400 kHz a 4,7 MHz, usando una celda de electrodos de placas planas y paralelas de acero inoxidable; y se estudia el comportamiento de la permitividad y conductividad eléctrica en función de la fracción volumétrica de agua de las emulsiones.

2. Aspectos teóricos.

La impedancia, permitividad y conductividad eléctrica complejas están descritas por:

$$Z^* = Z' + jZ''$$

$$|Z| = \sqrt{Z'^2 + Z''^2}$$

$$\varepsilon^* = \frac{1}{j\omega C_o Z} = \varepsilon' - j\varepsilon''$$

$$\sigma^* = \sigma' + j\sigma'' = j\omega\varepsilon_0\varepsilon^*$$

Donde, $j = \sqrt{-1}$, ω es la frecuencia angular; Z' y Z'' , ε' y ε'' y σ' y σ'' son la partes reales e imaginarias de la impedancia, permitividad y conductividad eléctrica descritas en las ecuaciones (1), (2), (3) y (4).

$$\varepsilon' = \frac{-Z''}{|Z|^2 \omega C_o} \quad (1)$$

$$\varepsilon'' = \frac{Z'}{|Z|^2 \omega C_o} \quad (2)$$

$$\sigma' = \omega\varepsilon_0\varepsilon'' \quad (3)$$

$$\sigma'' = \omega\varepsilon_0\varepsilon' \quad (4)$$

Donde $C_o = \frac{\varepsilon_0 A}{t}$ es la capacitancia de la celda con aire, ε_0 es la permitividad en el vacío ($8,854 \times 10^{-12} F/m$), A es el área de sección transversal de las láminas del capacitor, t es la separación entre los electrodos [6].

3. Sección experimental

Emulsiones. Se sintetizaron tres emulsiones con proporciones distintas de agua;aceite. La muestra **A** tiene una proporción agua:aceite de 0,5:10. La muestra **B**, una proporción de 1,0:10 y la muestra **C**, una proporción de 1,5:10 como se muestra en la Tabla 1, donde también se exponen los volúmenes de agua, aceite empleados.

Tabla 1: Preparación de emulsiones fase externa aceite.

	$V_a \pm 0,1$ ml	$V_s \pm 0,1$ ml	$V_o \pm 0,2$ ml	Relación Agua: Aceite
A	5,0	23,8	71,2	0,5:10
B	10,0	22,5	67,5	1,0:10
C	15,0	21,3	63,7	1,5:10

V_a : Volumen de agua. V_s : Volumen de surfactante. V_o : Volumen de aceite.

Se utilizó aceite mineral Vassa 9, como fase continua aceite, agua destilada; y como agente emulsificante se utilizó el tensoactivo nonilfenol Etoxilado de 4 moles de óxido de etileno. Se preparó una dispersión de NFE-4 al 4% v/v en el aceite para su incorporación en la emulsión. Las emulsiones se formaron mediante agitación manual (10 golpes verticales). Se realizó prueba de fase externa resultando todas las emulsiones fase externa aceite.

Equipos. Se utilizó el analizador de impedancia *HP 4193A Vector Impedance Meter*, el cual posee un rango de frecuencia desde 400 kHz a 110 MHz. También se hizo uso de un microscopio óptico

NIKON MED 600 con cámara CCD incluida para la captura de imágenes, con el propósito de determinar el área promedio y diámetro promedio de las gotas de agua.

Celda. La celda consiste en un bloque rectangular de teflón, con un sistema de refrigeración y con electrodos de acero inoxidable en su interior de área $55 \times 105 \text{ mm}^2$ separados por 5,5 mm. La capacidad del condensador C_0 resulta ser 8,79 pF. En la Figura 1 se grafica el módulo de la impedancia del condensador o celda en función de la frecuencia para un rango entre 400 kHz y 10 MHz, la celda se comporta como un condensador ideal hasta una frecuencia de 4,7 MHz. El módulo de la impedancia decae como $1/\omega C_0$ y el ángulo es aproximadamente $-\pi/2$. Por encima de 4,7 MHz el ángulo comienza a disminuir debido a efectos inductivos. Debido a este efecto las medidas realizadas en las emulsiones están comprendidas en ese rango.

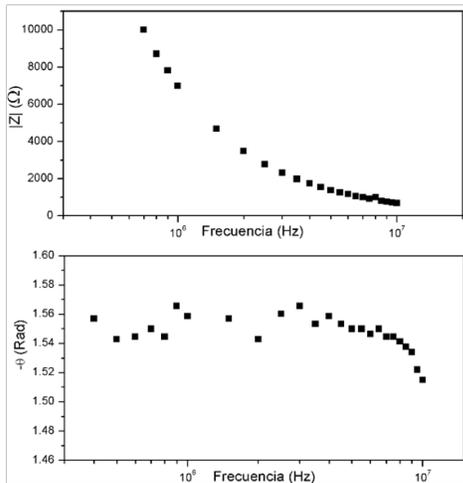


Figura 1: Diagramas de Bode de la celda con aire.

4. Resultados y Análisis.

En las Figuras 2a, 2b y 2c se muestran los diagramas de Bode de las tres muestras en un rango de frecuencias entre los 400 kHz y 4,7 MHz. En las tres gráficas se observa como el módulo de la impedancia disminuye a medida que aumenta la frecuencia y también disminuye con el aumento del volumen de agua; el ángulo de fase aumenta

a medida que aumenta la frecuencia tendiendo a $-\pi/2$, dándole características capacitivas al conjunto celda-fluido.

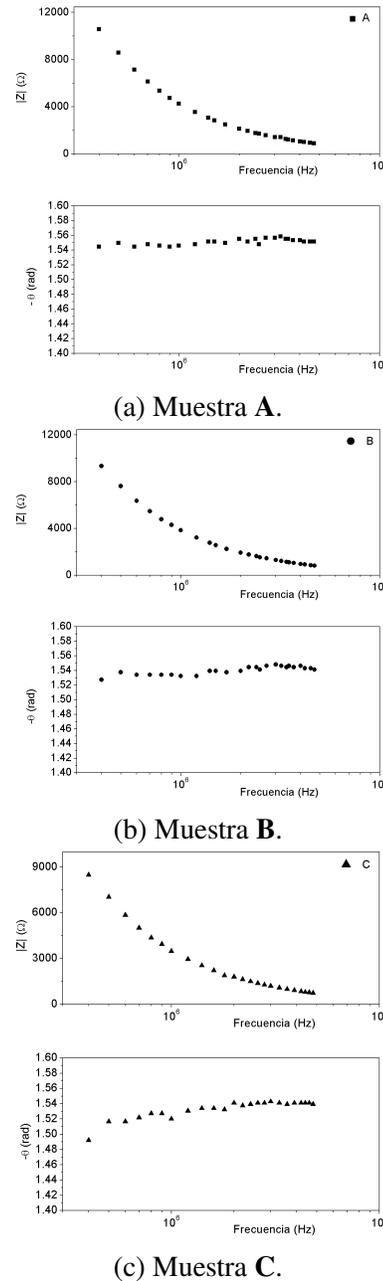


Figura 2: Diagramas de Bode de las muestras A, B y C.

En la Figura 3 se grafica la parte real (ϵ') e imaginaria (ϵ'') de la permitividad eléctrica en función de la frecuencia. Los datos de las gráficas se obtienen a partir de las ecuaciones (1) y (2). La parte real de la permitividad eléctrica de las tres emulsiones presentan un comportamiento

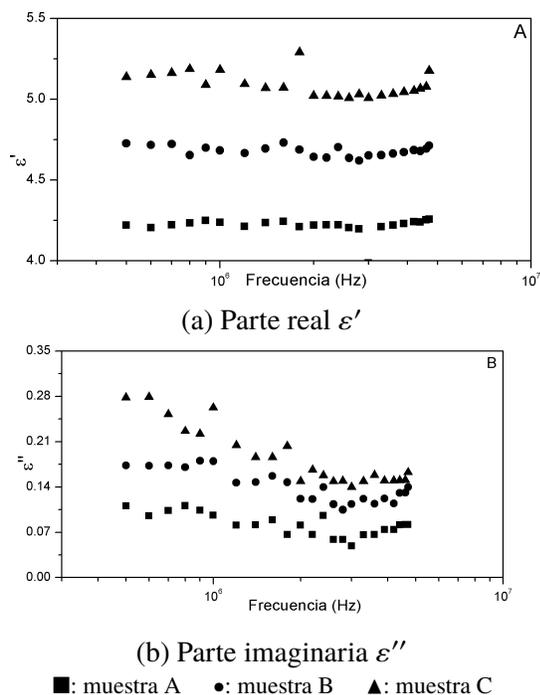


Figura 3: Permittividad eléctrica de las diferentes muestras.

prácticamente constante en todo el rango de frecuencias. Para las muestras A, B y C se obtiene un valor para la parte real de la permitividad eléctrica de alrededor de 4,28, 4,84 y 5,32, respectivamente. Se observa un aumento de (ε') con el aumento de la fracción volumétrica de agua.

En la Figura 3b, para las tres muestras se observa un decaimiento de la parte imaginaria de la permitividad eléctrica ε'' a medida que aumenta la frecuencia, obteniéndose valores más altos mientras crece la fracción volumétrica de agua.

La polarización dieléctrica describe cómo las cargas, dentro de un dieléctrico, responden a un campo eléctrico aplicado externamente. Las cargas que son libres de moverse en una escala macroscópica son las responsables de la conducción. Si el movimiento de las cargas está restringido, se dice que están polarizadas. La polarización puede ser expresada en términos de la permitividad compleja como la permitividad real ε' o constante dieléctrica, y el libre movimiento de cargas está relacionada como la parte imaginaria ε'' o pérdida dieléctrica (en inglés, *dielectric loss*). La permitividad eléctrica tiene dos contribuciones

que dependen de la frecuencia.

La dispersión dieléctrica en las emulsiones está caracterizada por un tiempo de relajación $\tau = \varepsilon/\sigma$, que surge cuando una densidad de corriente J atraviesa dos medios con permitividad y conductividad eléctrica diferentes o tiempos de relajación diferentes $\tau_p \neq \tau_m$ o $\varepsilon_p\sigma_m \neq \varepsilon_m\sigma_p$, en estas condiciones se presenta una acumulación de carga en la interfase del material, la cual se conoce como efecto Maxwell-Wagner [7, 3]

Cuando una emulsión se encuentra dentro de un campo eléctrico uniforme establecido por una diferencia de potencial eléctrico que se aplica entre dos electrodos planos y paralelos, las cargas en la interfase y la polarización de las moléculas de agua se agrupan de acuerdo a la ley de Coulomb, en consecuencia, la suma de las fuerzas en las cargas debido al campo eléctrico externo es cero y las gotas de agua no se mueven. Si el campo eléctrico se invierte repentinamente, la polarización de las gotas de agua y las cargas superficiales se redistribuirán con un tiempo de retardo correspondiente al tiempo de relajación $1/\tau$. Este es un tipo de polarización conocida como polarización interfacial [8]. Existe una frecuencia de excitación alrededor de $1/\tau$ donde la contribución a la conductividad debido a la carga interfacial tiene una mayor contribución a la permitividad compleja de la emulsión.

Wagner demostró que, para un sistema de dispersión dieléctrica donde las partículas esféricas están distribuidas en el medio continuo, la permitividad y conductividad eléctrica dependen de la fracción volumétrica de la fase dispersa ϕ y de la frecuencia. Las ecuaciones están descritas en términos de la permitividad y conductividad para los límites de baja ($\varepsilon'_l, \sigma'_l$) y alta frecuencia ($\varepsilon'_h, \sigma'_h$) [3].

En la Tabla 2 se muestran los valores de la parte real de la permitividad eléctrica en el límite de baja y alta frecuencia ε'_l y ε'_h para las tres emulsiones.

En la Figura 4 se grafican los datos de la Tabla 2; la parte real de la permitividad eléctrica ε' para la frecuencia más baja del rango estudiado (400 kHz) ε'_l y a alta frecuencia (4,7 MHz) ε'_h en función de la fracción volumétrica de agua ϕ . Se observa un aumento de ε'_l y ε'_h con el aumento de la fracción

Tabla 2: Parte real de la permitividad eléctrica ϵ_l a 400 kHz y ϵ_h a 4,7 MHz.

	Proporción agua	ϵ'_l	ϵ'_h
A	0,05	4,21	4,25
B	0,10	4,74	4,71
C	0,15	5,32	5,17

volumétrica de agua. Para $\phi = 0,05$ los valores de ϵ'_l y ϵ'_h son muy cercanos. Para $\phi = 0,1\epsilon'_l$ es un poco mayor que ϵ'_h y para $\phi = 0,15$ la diferencia entre ϵ'_l y ϵ'_h es aun mayor de acuerdo con la teoría de Wagner [3]. Ésta predice que para bajas fracciones volumétricas de agua menores a 0,2 ϵ'_l y ϵ'_h tienen comportamientos similares y a medida que aumenta ϕ , ϵ'_l crece más rápido que ϵ'_h . Esto se debe a que la parte real de la permitividad eléctrica disminuye al aumentar la frecuencia, disminuyendo la contribución a la permitividad compleja que se caracteriza frecuentemente con el nombre de constante dieléctrica.

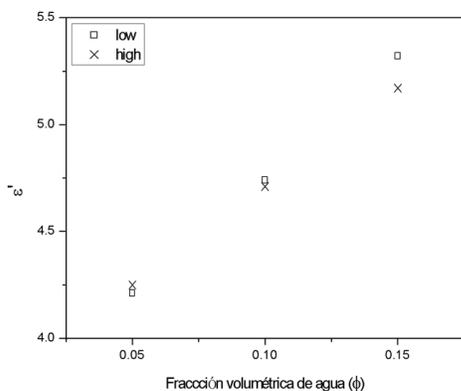
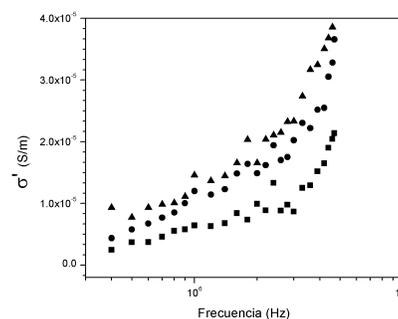


Figura 4: Parte real de la permitividad eléctrica para el límite de baja ϵ'_l y alta frecuencias ϵ'_h en función de la fracción volumétrica de agua de las emulsiones.

En la Figura 5 se grafican los datos obtenidos a través de la ecuación (3) para cada una de las emulsiones. Se observa que la conductividad crece a medida que aumenta la frecuencia, siendo mayores los valores de conductividad a medida que aumenta la fracción volumétrica de agua ϕ . En la Figura 6 se grafica la conductividad para los límites de baja σ'_l y alta frecuencia σ'_h . Se observa

como σ'_l y σ'_h aumentan con el incremento de la fracción volumétrica de agua, siendo mayor las conductividades para el límite de alta frecuencia de acuerdo con la teoría de Wagner, la cual predice que para una frecuencia de excitación mayor que $1/\tau$ disminuye la contribución de la permitividad como constante dieléctrica o polarización dieléctrica, y comienzan a tener mayor importancia los efectos conductivos. En la Tabla 3 se muestran los valores de la parte real de la conductividad eléctrica en el límite de baja y alta frecuencia σ'_h y σ'_l de las tres emulsiones [3].



■: muestra A ●: muestra B ▲: muestra C

Figura 5: Parte real de la conductividad vs. frecuencia para las tres emulsiones.

Tabla 3: Parte real de la conductividad eléctrica σ'_l para 400 kHz y σ'_h 4,7 MHz.

	Proporción agua	σ'_l (S/m)	σ'_h (S/m)
A	0,05	$2,49 \times 10^{-6}$	$2,14 \times 10^{-5}$
B	0,10	$4,70 \times 10^{-6}$	$3,66 \times 10^{-5}$
C	0,15	$9,32 \times 10^{-6}$	$4,25 \times 10^{-5}$

La Figura 7 muestra una imagen de las tres emulsiones donde se observa claramente círculos de diferentes diámetros correspondientes a las gotas de agua como fase dispersa en el medio continuo. Se observa una distribución de tamaños de gota en las tres emulsiones. De acuerdo a la micromarca, se aprecia que el diámetro de las gotas es menor a 20 μm . Se observa que el tamaño de las gotas se mantiene constante en

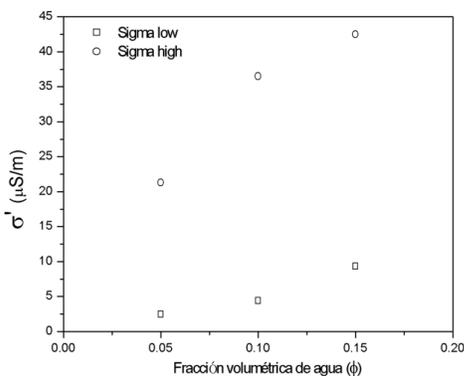
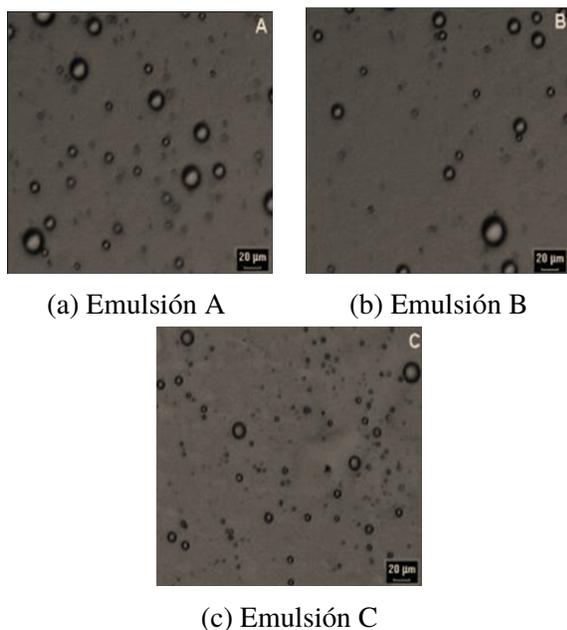


Figura 6: Parte real de la conductividad eléctrica para el límite de baja σ'_l y alta frecuencias σ'_h en función de la fracción volumétrica ϕ de agua de las emulsiones.

las muestras estudiadas, ya que las variaciones encontradas están en $\pm 1 \mu\text{m}$. Las micrografías indican emulsiones normales del tipo agua en aceite (W/O). Se observa ausencia de floculación y de emulsiones múltiples.



(a) Emulsión A

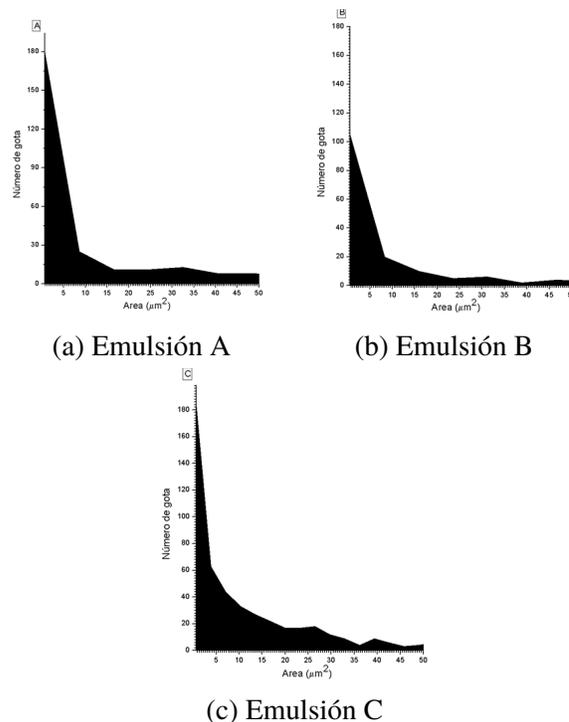
(b) Emulsión B

(c) Emulsión C

Figura 7: Micrografía de las emulsiones A, B y C.

En la Figura 8 se muestran las distribuciones log-normal del número de gotas en función del área de cada gota. El ancho a media altura de las distribuciones equivale al área promedio de las gotas correspondientes a cada emulsión, con este valor se calculó el diámetro promedio de las gotas.

En la Tabla 4 se reportan los valores del área y diámetro promedio, confirmando lo observado en la Figura 7.



(a) Emulsión A

(b) Emulsión B

(c) Emulsión C

Figura 8: Distribución de gota en las emulsiones A, B y C.

Tabla 4: Área y diámetro promedio de las gotas de agua para cada muestra.

	Área (μm^2)	Diámetro (μm)
A	7,2	3,028
B	5,4	2,622
C	4,0	2,257

5. Conclusiones.

La espectroscopia de impedancia resulta ser un método sencillo y útil para investigar las propiedades eléctricas de emulsiones, en este caso de emulsiones W/O con baja fracción volumétrica de agua. El rango de frecuencias empleado fue determinado de acuerdo a las características del analizador de impedancia *HP 4193A* y de la celda, resultando un rango de 400 kHz a 4,7 MHz. De

acuerdo a las ecuaciones derivadas de la teoría electromagnética en la materia y del concepto de impedancia eléctrica es posible determinar la permitividad y conductividad eléctrica compleja en función de la frecuencia. En el intervalo de frecuencias estudiado, la parte real de la permitividad eléctrica disminuye ligeramente con la frecuencia tendiendo a un comportamiento casi constante y crece con el aumento de fracción volumétrica de agua. La conductividad eléctrica crece con el aumento de la frecuencia de acuerdo al proceso de dispersión dieléctrica debido a la polarización interfacial y también aumenta con la fracción volumétrica de agua. Tanto la parte real de la permitividad eléctrica como la conductividad obtenida a través de medidas de impedancia, empleando un analizador de impedancia y una celda de placas planas y paralelas en el rango de frecuencia estudiado, están en buen acuerdo con la teoría de Wagner. Con las imágenes obtenidas a través de un microscopio óptico y la distribución log-normal del número de gotas en función del área de cada gota se determinó que el diámetro promedio de las gotas de agua en las emulsiones se encuentra entre 2,3 y 3,0 μm .

6. Referencias

- [1] Matheus Puttinati Casari, Niederauer Mastelari, Eugênio Spano Rosa, Vanessa Cristina Bizotto Guersoni, and Fabiana de Assis Perrechil. Determination of water concentration in water-in-oil emulsions by the impedance spectroscopy method. In *22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013)*, Ribeirão Preto, SP, Brazil, 2013.
- [2] Ingrid Velásquez and Juan C. Pereira. Emulsiones de agua en crudo. Aspectos generales. *Revista Ingeniería UC*, 21(3):45–54, 2014.
- [3] Tetsuya Hanai. Theory of the dielectric dispersion due to the interfacial polarization and its application to emulsions. *Kolloid-Zeitschrift*, 171(1):23–31, 1960.
- [4] Tetsuya Hanai and Naokazu Koizumi. Dielectric relaxation of w/o emulsions in particular reference to theories of interfacial polarization (commemoration issue dedicated to Professor Eiji Suito on the occasion of his retirement). *Bulletin of the Institute for Chemical Research, Kyoto University*, 53(2):153–160, 1975.
- [5] F. Kremer and A. Schonhals, editors. *Broadband Dielectric Spectroscopy*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2003.
- [6] Lamia Goual. Impedance spectroscopy of petroleum fluids at low frequency. *Energy & Fuels*, 23(4):2090–2094, 2009.
- [7] Bharat Bhushan, editor. *Encyclopedia of nanotechnology*. Springer Dordrecht Heidelberg New York London, 2012.
- [8] David J. Bakewell, Nuria Vergara-Irigaray, , and David Holmes. Dielectrophoresis of biomolecules. *JSM Nanotechnology & Nanomedicine*, 1(1):1–14, 2013.