

# Secado y desalado de emulsiones de petróleo mediante microondas

Arturo López Marure, Ariana Margarita Vázquez Almaguer, Luis Javier Andrade Cruz, Adrián Vázquez Vázquez  
Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada,  
Instituto Politécnico Nacional, Tamaulipas, México  
adrianvaz@hotmail.com

## RESUMEN

*Las emulsiones en la industria del petróleo son comúnmente mezclas de crudo, agua y productos químicos, y no son deseables. Se propone la separación de emulsiones con microondas como una alternativa para la deshidratación y desalación del petróleo. Por tal motivo se diseñó un equipo que permite evaluar el comportamiento de la temperatura de una emulsión cuando se expone a tratamiento por microondas y confirmar que se deshidrata y desala.*

## PALABRAS CLAVES

Microondas, desalado, emulsión, petróleo.

## ABSTRACT

*The emulsions in the oil industry are usually mixtures of oil, water and chemicals, and are not desirable. The separation of emulsions with microwaves is proposed as an alternative to oil dehydration and desalting. Therefore a device was designed to assess the temperature behavior of an emulsion when exposed to microwave treatment and confirm that is dehydrated and desalted.*

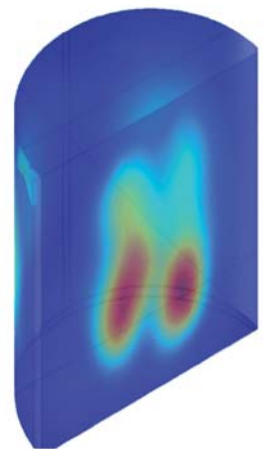
## KEYWORDS

Microwave, desalted, emulsion, oil.

## INTRODUCCIÓN

En los últimos 30 años se han diseñado e implementado distintos equipos para la dispersión de fases inmiscibles como las emulsiones de agua y aceite.<sup>1,2</sup> En la actualidad existen además una amplia gama de productos e industrias que producen emulsiones, tales como las industrias de alimentos, detergentes, productos farmacéuticos, cosméticos, pesticidas, la industria del petróleo y plantas de procesamiento de petróleo. También hay situaciones en que las emulsiones no se pueden evitar y se debe recurrir a diferentes técnicas para separar las dos fases, como en el caso de los procesos de producción y extracción de petróleo.<sup>3-5</sup>

Los yacimientos petroleros se encuentran con alto contenido de agua y aceite, y el agua por lo general contiene sales disueltas formando salmueras. El aceite y el agua al pasar a través de una válvula parcialmente abierta se mezclan y se forman emulsiones estables, generalmente del tipo agua en aceite.<sup>3,5</sup>



Los métodos tradicionales para separar estas emulsiones incluyen calentamiento, descomposición microbiana, centrifugación y químicos, muchos de los cuales sólo ofrecen una separación parcial.<sup>1,6</sup>

Se plantea que el uso de microondas es una solución alternativa efectiva, limpia y libre de químicos al problema de la deshidratación y desalado de petróleo. Se demuestra en este trabajo que es posible utilizar las microondas en el deshidratado y desalado de petróleo como se hace con tratamientos que combinan el calentamiento por convección y fuerzas centrífugas.

### METODOLOGÍA

El área de estudio se encuentra ubicada en los campos de extracción de petróleo localizados en la ciudad de Altamira, Tamaulipas, México. Se probaron dos tipos de muestras; 100% petróleo y 50-50% crudo-agua.

Las variables a considerar fueron la temperatura de la emulsión durante la irradiación de microondas y el tiempo de irradiación. Se construyó un equipo que permitiera irradiar emulsiones y medir la temperatura, en un tiempo predeterminado. Se diseñó el módulo de medición de temperatura y el módulo de disparo del magnetrón.

#### Módulo de medición de temperatura

Para medir la temperatura de las muestras de petróleo se utilizó un sensor infrarrojo (Raytek modelo RAYTXSLTCF1) (figura 1), junto con el programa DataTemp Multidrop. El cual permite medir en tiempo real la temperatura mientras se están irradiando las muestras.

Cabe señalar que la ventaja principal al medir la temperatura con el sensor infrarrojo, con respecto a sensores de fibra óptica o termopares,<sup>7</sup> es que se puede medir la temperatura a distancia sin necesidad de que el sensor esté en contacto con la muestra a medir.

#### Módulo de disparo del magnetrón

El magnetrón opera a una frecuencia de trabajo de 2.45 GHz y a una potencia nominal de salida de 950 W. El módulo de disparo del magnetrón tiene una interfaz gráfica que controla el disparo del

magnetrón, el tiempo de duración de la irradiación de microondas, así como el muestreo (figura 2).

El circuito de disparo del magnetrón se muestra en la figura 3, y está conectado por medio de un puerto USB.



Fig. 1. Sensor infrarrojo.

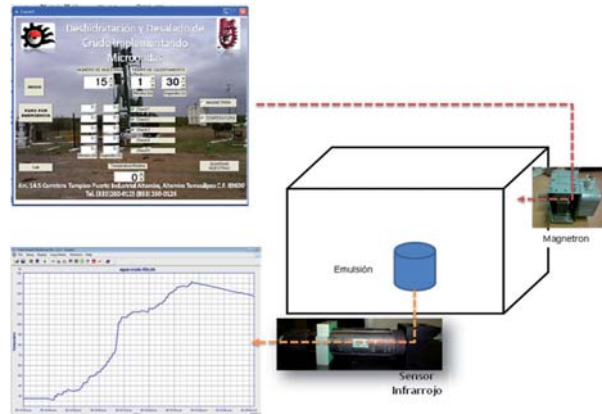


Fig. 2. Módulo de disparo y Medición de la temperatura.

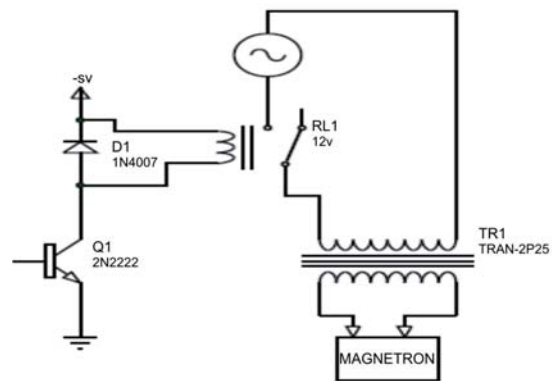


Fig. 3. Circuito de control de disparo del magnetrón.

## Simulación

Se seleccionó el método de elementos finitos empleando el software COMSOL Multiphysics, empleando los módulos de Ondas Electromagnéticas (RF) y Convección y Conducción de Calor. Se utilizan las dimensiones de la cavidad donde se irradian las muestras de petróleo junto con las condiciones iniciales reales (figura 4).

Se hicieron dos simulaciones: Crudo y Crudo-agua (50-50) irradiadas durante 30 y 60 segundos cada una. La simulación fue corroborada mediante el dispositivo que se construyó y que se utilizó para hacer las pruebas.

Se analizaron dos muestras de líquidos la primera crudo-agua y la segunda crudo recolectado de los campos de extracción de petróleo Tamaulipas-Constituciones, cada muestra de 50 ml y fue irradiada durante 30 segundos y 60 segundos y se midió su temperatura durante todo el tiempo de irradiación.

## Caracterización por espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier

El presente análisis tiene como objetivo observar los cambios funcionales obtenidos después de irradiar muestras de crudo en el rango de microondas; es de especial interés observar el comportamiento de las resinas y asfaltenos, ya que son estos los estabilizadores naturales de las emulsiones de crudo en agua. De igual manera el grupo funcional de los OH, C=C y los C=O representan la solubilidad de los hidrocarburos

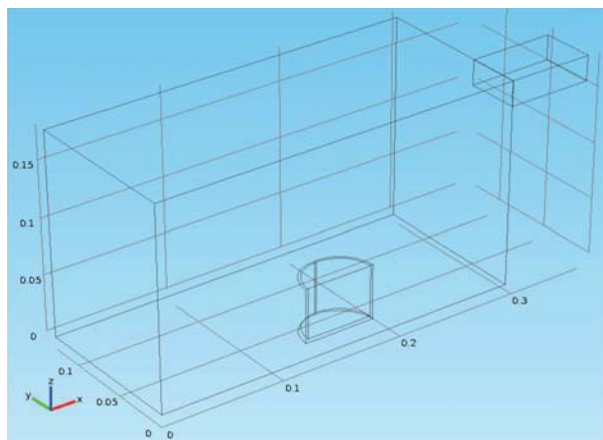


Fig. 4. Esquema del equipo de irradiación de microondas en COMSOL Multiphysics.

con el agua tanto por los puentes de hidrógeno que suelen presentarse como su comportamiento polar frente a un campo magnético.

Se ha comprobado en otros trabajos que, los asfaltenos y resinas, estabilizan las emulsiones de crudo. La estabilidad de la emulsión no solo se define por la naturaleza química de los asfaltenos y resinas presentes en los crudos que varían en relación del yacimiento petrolero de origen, sino también por la capacidad de dispersión de estos materiales y la viscosidad del crudo mismo. Siendo los crudos pesados los de mayor grado de estabilidad en las emulsiones con agua por su alto contenido de estos grupos orgánicos.

## RESULTADOS

### Muestra de crudo-agua irradiada durante 30 segundos

La muestra fue tomada directamente de la cisterna de la planta de inyección del campo Tamaulipas-Constituciones, ver figura 5. Ésta tenía alto contenido de crudo, por lo que se diluyó a un 50 % de agua de inyección y un 50 % de crudo, teniendo una temperatura inicial de 27 °C, y se irradió durante 30 segundos llegando a una temperatura final de 42 °C (figura 6).



Fig. 5. Muestras de Agua-Crudo (50-50).

### Muestra de crudo-agua irradiada durante 60 segundos

Con una temperatura inicial de 26 °C y una temperatura final de 140 °C, se irradió una muestra durante 60 segundos (figura 7), y se observó que el



Fig. 6. Muestra de Agua-Crudo Irradiada durante 30 segundos.



Fig. 7. Muestra de Agua-Crudo Irradiada durante 60 segundos.

gradiente de temperatura es de 114 °C, visualizándose un incremento considerable en la temperatura en el segundo 25.

### Muestra de Crudo irradiada durante 30 segundos

La muestra de la figura 8, fue tomada directamente de la cisterna de la planta de inyección del campo Tamaulipas-Constituciones, no se diluyó, y se tenía una temperatura inicial de 25 °C, posteriormente fue irradiada durante 30 segundos llegando a una temperatura final de 53 °C (figura 9).

### Muestra de Crudo irradiada durante 60 segundos

Con una temperatura inicial de 26 °C y una temperatura final de 105 °C, se irradío una muestra durante 60 segundos (figura 10), se observa que el gradiente de temperatura comparada con la muestra de crudo-agua (50-50), irradiada durante 60 segundos es de -35 °C. Con esto se puede concluir que la relación



Fig. 8. Muestras de Crudo.



Fig. 9. Muestra de Crudo Irradiada durante 30 segundos.

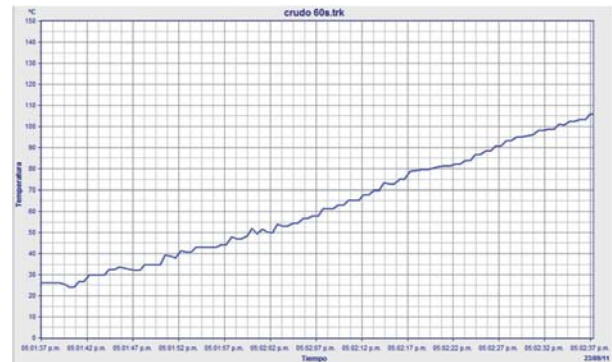


Fig. 10. Muestra de Crudo Irradiada durante 60 segundos.

crudo-agua tiene un papel importante en el proceso de calentamiento de emulsiones de crudo-agua y por consiguiente, en el proceso de deshidratación.

En la tabla I se muestran una comparación de las diferentes muestras que fueron irradiadas observándose un incremento de temperatura mayor en la emulsión de crudo-agua (50-50), al ser irradiada durante 60 segundos y de acuerdo al perfil de temperatura de la figura 7, un cambio en las

Tabla I.- Tabla comparativa de muestras irradiadas.

Muestras de 50 ml	Tiempo de Irradiación (s)	Temperatura Inicial (°C)	Temperatura final (°C)
Muestra de Crudo-Agua (50-50%)	30s	27	42
Muestra de Crudo-Agua (50-50%)	60s	26	140
Muestra de Crudo	30s	25	53
Muestra de Crudo	60s	26	105

propiedades físico-químicas de la muestras lo cual es corroborado por FTIR en la figura 11.

### Espectros de FTIR

Se caracterizaron las muestras por FTIR antes de ser irradiado, y posteriormente a los 30 y 60 segundos de ser irradiados.

Los grupos funcionales principales de absorción para las resinas y asfaltenos son cualitativamente idénticos. En los espectros obtenidos se pueden identificar los grupos funcionales listados en la tabla II.

De acuerdo con los cambios de intensidad de las bandas de absorción después de interacción con la radiación de microondas (figura 11) se puede resumir que se produce:

- Un aumento en el contenido de estructuras aromáticas, que se manifiesta en una mayor intensidad de las bandas en las regiones 1600, 3040, 870, 815 y 750  $\text{cm}^{-1}$ . Esto también puede relacionarse con un aumento en el grado de sustitución del hidrógeno en las estructuras aromáticas.
- Un aumento en el contenido de (nafténicos) alifáticos y alicíclicos principalmente a expensas de los grupos  $\text{CH}_2$ , como lo indica el aumento de la intensidad de las bandas en la región 2930, 2860 y 1470  $\text{cm}^{-1}$  y del doblete en 730 - 720  $\text{cm}^{-1}$ . Un aumento en el número de grupos  $\text{CH}_3$  se indica mediante el fortalecimiento de la banda en la región de 1380  $\text{cm}^{-1}$  y un crecimiento en el “valle” en 2950  $\text{cm}^{-1}$ .
- Un aumento importante presenta la banda del grupo funcional OH a los 3400  $\text{cm}^{-1}$  y en la

Tabla II. Grupos funcionales orgánicos de los espectros FTIR de Crudo.

	N° de onda	Grupo	Descripción
1	3400 $\text{cm}^{-1}$	OH	Alcoholes
2	3059 $\text{cm}^{-1}$	=CH, =CH <sub>2</sub>	aromáticos
3	2953 $\text{cm}^{-1}$	CH <sub>3</sub>	metilo
4	2920 $\text{cm}^{-1}$	=CH <sub>2</sub>	metilenos
5	2850 $\text{cm}^{-1}$	CH <sub>3</sub>	metilo
6	2732 $\text{cm}^{-1}$	C-H	hidrógeno aldehídico
7	1774 $\text{cm}^{-1}$	C=O	esteres ácidos y anhídrido ácido
8	1642 $\text{cm}^{-1}$	NH <sub>2</sub>	aromáticos
9	1600 $\text{cm}^{-1}$	C=C	compuestos aromáticos
10	1455 $\text{cm}^{-1}$	CH <sub>3</sub> =CH <sub>2</sub>	metilo y metileno
11	1375 $\text{cm}^{-1}$	CH <sub>3</sub>	metilos
12	1308 $\text{cm}^{-1}$	S=O	sulfuros
13	1250 $\text{cm}^{-1}$	C-O	ácidos carboxílicos
14	1175 $\text{cm}^{-1}$	C=S	Amina en anillo
15	1100 $\text{cm}^{-1}$	C-N	Amina
16	1032 $\text{cm}^{-1}$	C-N	aromático sustituido
17	949 $\text{cm}^{-1}$	=CH	aeromático sustituido
18	871 $\text{cm}^{-1}$	=CH	Alquenos aromáticos
19	815 $\text{cm}^{-1}$	=CH	Anillo
20	750 $\text{cm}^{-1}$	C-H	Anillo
21	720 $\text{cm}^{-1}$	4(CH <sub>2</sub> )	metilenos

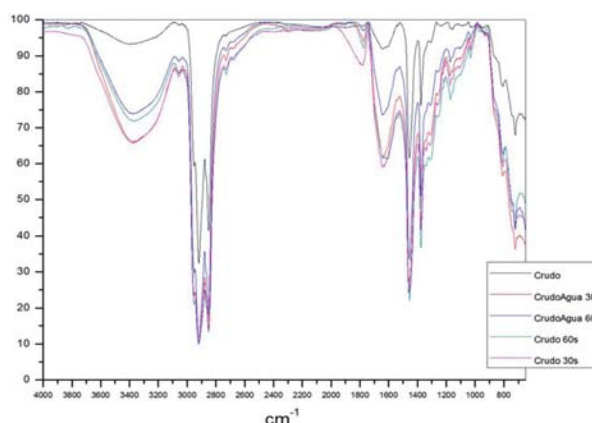


Fig. 11. Espectros FTIR de las muestras de crudo agua.

región 1774  $\text{cm}^{-1}$  correspondiente a C=O. Esto se atribuye a la recuperación de compuestos polares solubilizados en el agua de inyección, como lo son alcoholes ésteres, ácidos y anhídrido ácidos.

- El aumento de las bandas pertenecientes a la región comprendida en 1350 a 1000  $\text{cm}^{-1}$ , se traduce como un aumento de asfaltenos recuperados del agua de inyección durante la irradiación de microondas.

## SIMULACIÓN

Mediante los datos obtenidos en laboratorio es posible validar el modelo propuesto por el simulador. En las figuras 10 y 11 se muestra el resultado de esta simulación después de introducir todas las condiciones iniciales, tales como: Temperatura inicial, Dimensiones del recipiente, cavidad, Potencia y Frecuencia del Magnetrón, Materiales y formas geométricas de todos los elementos que integran el dispositivo.

### Simulación de Crudo-Agua (50-50) irradiada durante 60 segundos

En la figura 12 se muestra la simulación de la irradiación de crudo-agua, se consideró una temperatura inicial de 26 °C, se irradian durante 60 segundos 50 ml de crudo-agua, se observa una temperatura final de 130 °C en el centro de la base del recipiente; comparándola con los datos obtenidos experimentalmente en el cual se midió una temperatura final de 140 °C (figura 7), se puede ver que el modelo que utiliza el simulador se comporta de manera similar, permitiendo predecir el comportamiento de la temperatura dentro de la emulsión para así poder simular el equipo antes de construirlo.

### Simulación de Crudo irradiado durante 60 segundos

En la figura 13 se muestra la simulación de la irradiación de crudo durante 60 segundos llegando a una temperatura final de 100 °C, se observa que el calentamiento se comporta de diferente manera con respecto a las muestras anteriores, propagándose el calentamiento por las paredes del recipiente, esto se debe al bajo valor de la constante dieléctrica del material lo cual no permite que las microondas penetren al centro del material, calentando primeramente el líquido que se encuentra en las paredes del recipiente. Lo anterior nos dará una idea de cómo calentar el líquido dependiendo de

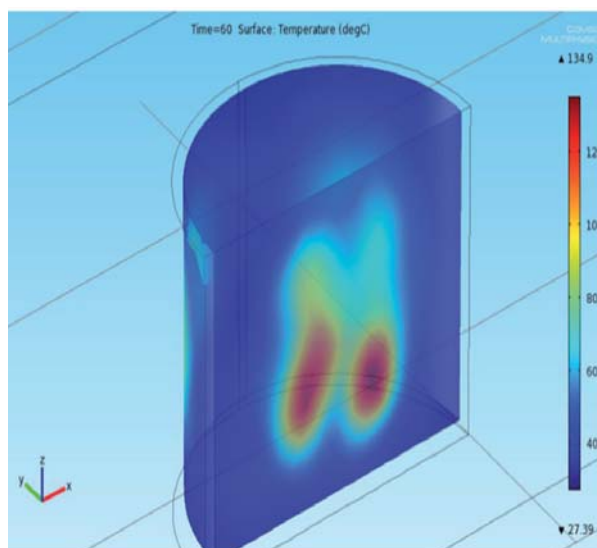


Fig. 12. Visualización en 3D de la irradiación de Crudo-Agua (50-50) durante 60 segundos.

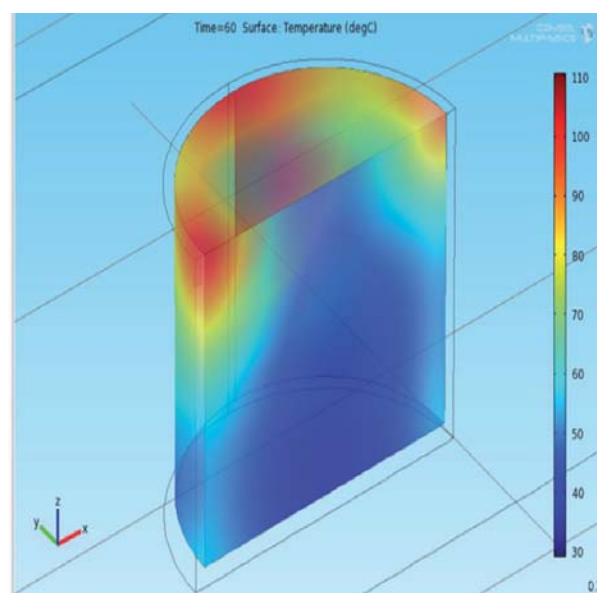


Fig. 13. Visualización en 3D de la irradiación de Crudo durante 60 segundos.

su constante dieléctrica, cuál va ser la propagación de las microondas y la forma geométrica de la cavidad resonante, para obtener la mayor eficiencia energética en la separación del agua-aceite.

## CONCLUSIONES

Mediante el módulo de temperatura y con el sensor infrarrojo se mide la temperatura en tiempo real y sin necesidad de introducir ningún sensor dentro de la muestra ya que esto contaminaría la

muestra o el crudo dañaría al sensor. Mediante este módulo se puede visualizar la señal representativa de la temperatura y hacer un historial, para ser estudiadas posteriormente.

Con el módulo de disparo del magnetrón se puede programar mediante la interfaz gráfica el tiempo o los intervalos de tiempo que se quiere que las muestras sean irradiadas, y hacer un paro por emergencias si la temperatura eleva los límites establecidos previamente y así tener el proceso de calentamiento por microondas bajo control.

El crudo, después de ser irradiado con microondas, cualitativamente conserva los grupos funcionales que lo integran, solo existen modificaciones cuantitativas que se asumen por la recuperación de compuestos solubles en el agua de inyección.

El aumento de intensidad del grupo OH ( $3400\text{ cm}^{-1}$ ) y C=O ( $1774\text{ cm}^{-1}$ ) confirma la recuperación de compuestos polares solubles en el agua de inyección.

Los asfaltenos, principales estabilizadores de emulsiones, presentes en el agua de inyección se recuperan.

Los espectros demuestran que el tiempo de irradiación correspondiente a 30 segundos arrojó mejores resultados de recuperación de hidrocarburos disueltos.

Al simular el equipo para el calentamiento de emulsiones de petróleo por medio de microondas para el deshidratado y desalado de petróleo en COMSOL Multiphysics se comprueba que el modelo matemático que implementa el simulador se comporta de forma similar al proceso real ayudándonos a entender la interacción de las microondas con los líquidos y obteniendo una herramienta imprescindible en el diseño del equipo

para la industria petrolera especialmente para el deshidratado y desalado de petróleo.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Grupo de Modelación Matemática y Computacional de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) en especial al Dr. Ismael Herrera Revilla.

## REFERENCIAS

1. M. Clause and P. Becher, Encyclopedia of emulsion technology. New York: Marcel Dekker Ltd., 1985.
2. M. T. Toral, Fisicoquímica de superficies y sistemas dispersos: Ed. URMO, 1985.
3. S. Kokal and S. Aramco, Crude oil emulsions: A state of the art review, in Society of Petroleum Engineers SPE 77497 paper presented at the Annual Technical Conference and Exhibition held Texas, 2002, pp. 1-11.
4. C. Vega and M. Delgado, Treatment of waste-water/oil emulsions usign microwave radiation, in Society of Petroleum Engineers SPE 74167 paper presented at the Conference on Health Safety and Enviromental in Oil and Gas Exploration and Production held in Kulua Lumpur-Malasya 2002, pp. 1-12.
5. L. L. Schramm, Emulsions: Fundamentals and applications in the petroleum industry. Washington D.C.: American Chemistry Society, 1992.
6. P. Rajinder, Techniques for measuring the composition (oil and water content) of emulsions - a state of the art review, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, vol. 84, pp. 141-193, 1994.
7. Fabián Ortiz, Medición en línea de la temperatura de una muestra en una cavidad de microondas, 2010.