



## Rompimiento de la viscosidad en líquidos por cavitación hidrodinámica y acústica

**M. Navarrete, A. Vargas, y D. Esquivel**

LPND, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México  
Av. Universidad 3000, UNAM C.U. Distrito Federal 04520  
Distrito Federal, México  
[mnm@pumas.iingen.unam.mx](mailto:mnm@pumas.iingen.unam.mx)

**J. Naude y F. Méndez,**

Facultad de Ingeniería Universidad Nacional Autónoma de México  
Departamento de Termofluidos, DIMEI.

**M Villagrán-Muniz<sup>1</sup> y E. V. Mejía-Uriarte<sup>2</sup>**

CCADET, Universidad Nacional Autónoma de México  
<sup>1</sup>Fotofísica y Películas delgadas y <sup>2</sup>Fotonica de Microondas

### RESUMEN

Para disminuir la viscosidad e incrementar el porcentaje de moléculas ligeras en los líquidos viscosos es común aplicarles ultrasonido después de refinarlos o romperlos por catálisis, debido a que las macromoléculas todavía se encuentran unidas por enlaces débiles. En este trabajo se desarrolla un estudio para determinar el umbral de cavitación, tiempo de aplicación y eficiencia para disminuir la viscosidad de un líquido aplicando tanto cavitación hidrodinámica como la ultrasónica. El líquido muestra es 1,2 propanodiol que tiene una viscosidad de 60 mPa·s a 20°C. Para generar la cavitación hidrodinámica se utiliza un circuito hidráulico de 70 litros, dicho circuito se compone de una bomba centrífuga con el impulsor modificado de 5 HP con control de frecuencia, un Venturi, sistemas de almacenamiento y de enfriamiento. Para la generación de cavitación acústica se utiliza procesador ultrasónico comercial de 750 W a una frecuencia de 20 kHz, cuyo sonotrodo se mantiene inmerso en un matraz de 500 mL con el líquido muestra. Para verificar los cambios en la viscosidad dinámica en función del tiempo de cavitación, ésta se mide con un viscosímetro digital, además se realiza espectroscopia infrarroja para verificar si se generan cambios moleculares en las muestras. Como se esperaba los resultados muestran que la cavitación hidrodinámica es más eficiente, sin embargo tiene que ser aplicada con los parámetros adecuados ya que al alcanzar coeficientes de cavitación del orden 0.5 se presenta la cavitación luminiscente en donde se producen reacciones químicas.

**PALABRAS CLAVE:** Cavitación, cavitación acústica, cavitación hidrodinámica, viscosidad.

### 1 INTRODUCCIÓN

La fuerza de atracción entre las moléculas determina algunas propiedades de los líquidos, tales como la presión de vapor, viscosidad, tensión superficial entre otras, ésta atracción se llama enlace intermolecular y hay de tres tipos: dipolos temporales, dipolos permanentes, y enlaces de hidrogeno. Estos enlaces denominados “débiles” se producen por atracciones electroestáticas (enlaces iónicos, puentes o enlaces de hidrógeno), interacciones hidrofóbicas o fuerzas de Van der Waals y son el principal problema que hay que disminuir para aumentar la fluidez de un líquido [1]. Entre los distintos métodos que se aplican industrialmente para reducir



la viscosidad de los líquidos que tienen que ser transportados por ductos se encuentran las *diluciones, el calentamiento y la formación de emulsiones* [2- 6]. Existen otros métodos que disminuyen la viscosidad de los líquidos, como el proceso ultrasónico que se aplica después de la etapa de refinación. A este proceso se le conoce como “upgrade” o mejoramiento. Las ideas patentadas y comercializadas para lograr lo anterior se basan en el uso de reactores sonoquímicos, en donde voluminosos piezoeléctricos enfocan la energía en el seno del líquido, éste es un proceso caro e ineficiente, ya que la mayoría de la energía se transforma en calor y ruido. Otros diseños emplean cambios de fase usando calderas u energía solar para hacer vibrar estructuras que generan energía acústica. Otro método, cuyo principio es similar al de las vibraciones ultrasónicas, es el uso de un activador hidrodinámico, donde el líquido a procesar circula a alta velocidad en un circuito hidráulico y es sometido a cambios de presión causado por accesorios, dispositivos o modificaciones en la geometría de la tubería produciendo el fenómeno de cavitación. Bajo este régimen, se producen burbujas en el seno del líquido al disminuir la presión por debajo de la presión de vapor del líquido [7]. El colapso de ellas se alcanza al subir otra vez la presión. Si se diseña el sistema para que el colapso sea abrupto (no lineal) la energía acumulada durante la expansión se libera en forma de un pulso de presión (onda de choque), y hay emisión de luz. La temperatura y la presión dentro de la burbuja durante el colapso alcanzan aproximadamente entre 500 y 15000 °C y (200-400) MPa respectivamente [8]. En la actualidad existe una variedad de dispositivos que aprovechan el fenómeno de la cavitación que ya se emplean en diversas áreas, entre las cuales se incluyen tratamientos médicos, diagnóstico médico, producción de reacciones químicas, procesamiento de hidrocarburos, etc.

En este trabajo se desarrolla un estudio para determinar el umbral de cavitación, tiempo de aplicación y eficiencia para disminuir la viscosidad en un orden de magnitud la viscosidad de un líquido de bajo peso molecular aplicando tanto cavitación hidrodinámica como la ultrasónica.

## 1.1 Cavitación y Viscosidad

La generación y desarrollo de la cavitación depende de las propiedades del líquido, la presencia de contaminantes en el mismo, la presión y temperatura del líquido, los gases o vapores disueltos, entre otros parámetros [11]. Ocurre en forma natural en muchas máquinas hidráulicas, lo que ocasiona que su intervalo de operación esté limitado [4]. Las mismas condiciones dinámicas del fluido permiten altos esfuerzos de corte que a menudo incrementan la probabilidad que el fluido presente cavitación. La cavitación ocurre cuando la presión en un líquido cae abajo del nivel crítico. En estas condiciones, dos tipos de cavitación puede ocurrir: a) *cavitación vaporosa*, las burbujas de vapor del líquido se forman si la presión en el líquido cae por debajo de la presión de su vapor, y b) *cavitación gaseosa*, las burbujas se forman cuando la presión cae debajo de la presión de vapor de equilibrio del gas disuelto en el líquido. Si, después de la reducción de la presión ésta aumenta, las burbujas colapsan violentamente. Las fuerzas generadas por el colapso de las burbujas son sustancialmente más grandes que las fuerzas de cortante típicas que presentan los líquidos que fluyen. Por ejemplo, la bien conocida erosión metálica que se presenta en las hélices de los barcos. La probabilidad de que la cavitación ocurra se predice usando el número de cavitación,  $\sigma$ .

Existe un parámetro adimensional llamado *número de cavitación*  $\sigma$  que nos mide la resistencia del flujo a cavitación en forma vaporosa. El número de cavitación está definido como [9, 10]. Cuanto mayor sea el coeficiente de cavitación menos probable es que ocurra y viceversa. El

inicio de la cavitación ocurre cuando el número de cavitación disminuye a bajo de un valor crítico que está en función de la geometría del dispositivo. Las mismas condiciones dinámica □ del fluido que permiten altos esfuerzos de corte a menudo incrementan la probabilidad que el fluido cavite.

$$\sigma = \frac{p_0 - p_v}{\frac{1}{2} \rho v^2} \quad (1)$$

donde: □ = número de cavitación  
 $p_0$  = presión del sistema  
 $p_v$  = presión de vapor  
 $\frac{1}{2} \rho v^2$  = presión dinámica  
 $v$  = velocidad del fluido

La viscosidad, es la resistencia que ejercen los fluidos al ser deformados cuando se les aplica esfuerzo cortante. Existen diferentes formas de expresar la viscosidad de un fluido pero la más importante es la *viscosidad absoluta o dinámica*, □. La viscosidad depende de la temperatura en donde las fuerzas de cohesión desempeñan un papel dominante. En muchos casos, esta relación se aproxima con la ecuación de *Andrade* [5]:

$$\mu = A e^{\frac{E_a}{T}} \quad , \quad \ln(\mu) = \ln(A) - E_a \frac{1}{T} \quad (2)$$

En donde  $T$  es la temperatura, y las constantes  $A$  y  $E_a$  se determinan experimentalmente [5]. Graficando los valores en su forma lineal y se obtiene  $E_a$  que es la energía de activación [16].

## 2 ARREGLOS EXPERIMENTALES Y METODOLOGÍA

El líquido muestra es 1,2 propanodiol ( $C_3H_8O_2$ ) con una densidad similar a la del agua pero una viscosidad más alta. Se utiliza este líquido, debido a que se ha estudiado en trabajos previos [11, 12]. Sus propiedades [13, 14] tanto físicas como químicas se enlistan en la Tabla 1.

### 2.1 Arreglo hidrodinámico con Tubo Venturi

La cavitación hidrodinámica en 1,2 propanodiol se generó en un circuito hidráulico que se despliega en la Figura 1. El circuito hidráulico se diseñó e implementó en el Laboratorio de Pruebas no Destructivas del Instituto de Ingeniería de la UNAM y ha sido usado en estudios previos [15]. El sistema consta de: bomba centrífuga de 5 HP con el impulsor modificado, un tubo Venturi, una válvula de regulación de gasto, un tinaco de almacenamiento con sistema de enfriamiento y un tinaco de almacenamiento auxiliar. La tubería del circuito es de PVC con diámetro de 2" (cédula 40 y 80).

Tabla I. Propiedades físicas del 1,2 Propanediol

Propiedad	Valor
Fórmula química	$C_3H_8O_2$
Punto de ebullición	187.6°C @ 1 atm
Punto de fusión	-60°C @ 1 atm
Temperatura de ignición	107 °C
Presión de vapor 20 °C	0.08 mm Hg
25 °C	0.13 mm Hg
Peso molecular	76.10 g/mol
Viscosidad, 20 °C	48.60 mPas
60 °C	08.42 mPas
Densidad a 20°C	1036.2 Kg/m <sup>3</sup>

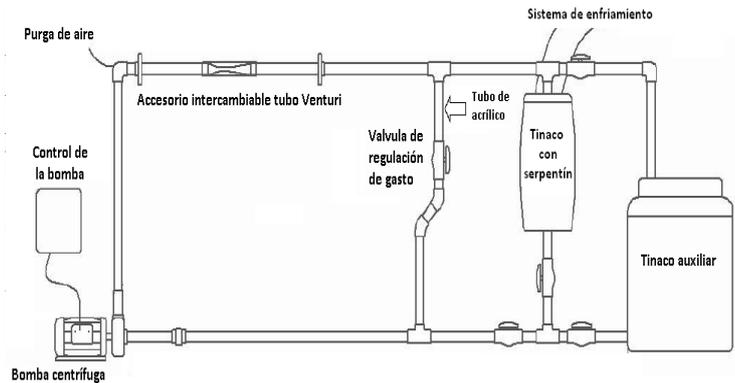
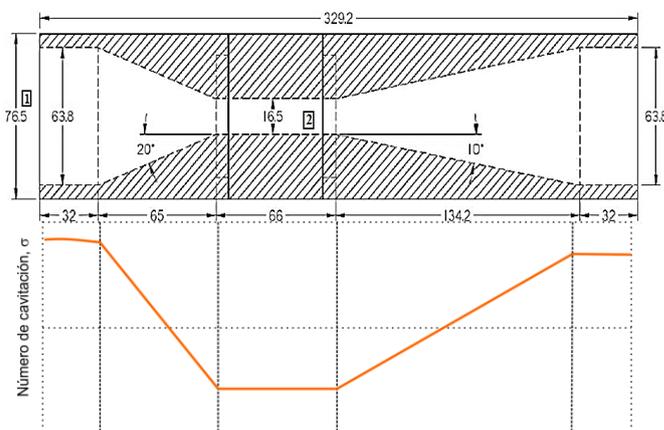


Figura 1. Diagrama esquemático del circuito hidráulico y sus accesorios para la producción de cavitación hidrodinámica.

En la Figura 2 se despliega un diagrama con las características geométricas del Venturi. Como se observa nuestro Venturi no presenta cambios suaves, además la longitud de la garganta es larga (66 mm), éstos se decide así, ya que se diseñó para producir cavitación. Así, cuando se produce el cambio de fase en la zona de la garganta se tiene el tiempo suficiente para que por difusión entren, a las burbujas en expansión, micro gotas de líquido así como vapor del líquido. Los núcleos gaseosos que llegan a la garganta son producidos en la bomba centrífuga mediante una obstrucción en el rodete.

Una caracterización preliminar del sistema hidrodinámico con el líquido de trabajo 1,2 propanediol, dio la gráfica que se despliega en la Figura 3a, en donde la relación entre coeficiente de cavitación  $\sigma$  versus la potencia administrada a la bomba presenta un decaimiento exponencial. Condiciones de cavitación en el Venturi midiendo el gasto de salida y la corriente eléctrica suministrada a la bomba. Al cincuenta por ciento de la bomba el coeficiente de cavitación gaseosa en el Venturi es de aproximadamente de 0.2



Punto 1	Punto 2
$\sigma_1 = 0.638$	$\sigma_2 = 0.0165m$
$m$	

$$A_1/A_2 = 3.87$$

Material: PMMA

Figura 2. Diagrama superior, esquema del tubo Venturi con sus dimensiones. Diagrama inferior, distribución de presiones para el flujo a través del tubo Venturi.

**Metodología. Cavitación hidrodinámica.** Se llena el sistema con 70 L de líquido, se enciende sistema de enfriamiento y se espera alrededor de 40 minutos hasta que la temperatura del propanodiol alcance  $15^{\circ}\text{C}$ . Se enciende el control de la bomba y se comienza a aumentar el porcentaje de la potencia hasta el sistema empieza a cavitarse a  $\sim 1.7 \text{ kW}$ . El porcentaje de potencia se mantiene así durante una hora y se realizan lecturas de la corriente suministrada a la bomba y la temperatura del líquido. Durante el proceso el coeficiente de cavitación se mantiene aproximadamente de 0.5. El proceso descrito anteriormente se repite hasta completar las 10 horas de tratamiento y se toman muestras de 5 ml a distintos tiempos del proceso para el análisis espectroscópico.

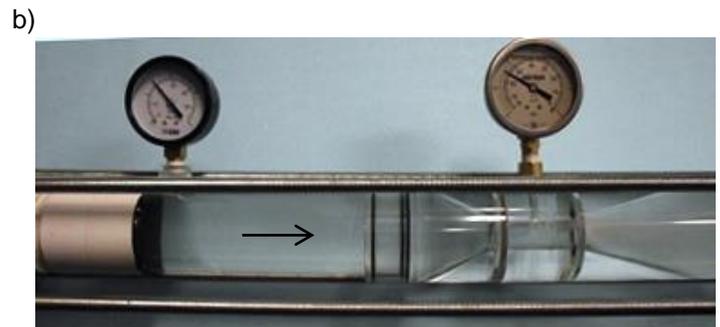
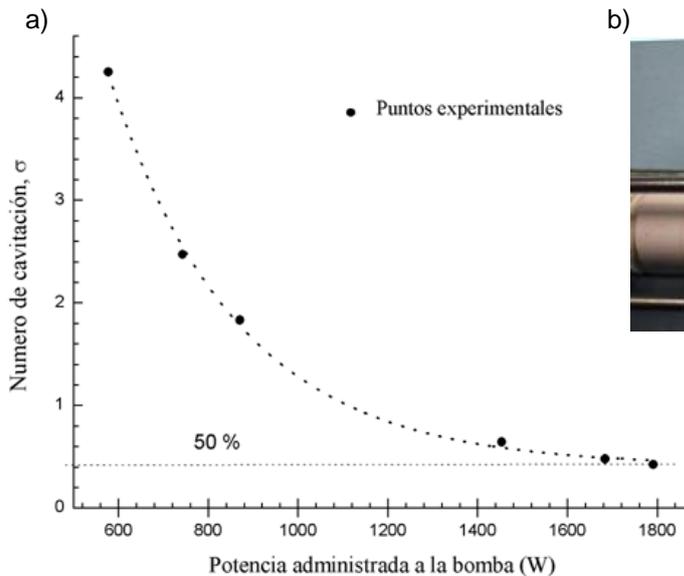


Figura 3. a) Condiciones de cavitación en el sistema hidrodinámico. Al cincuenta por ciento de la bomba el coeficiente de cavitación es de aproximadamente de 0.2. b) Tubo Venturi con flujo cavitante, note el color blanquizco del líquido saliendo de la garganta. La flecha indica la dirección del flujo.

## 2.2 Arreglo Ultrasónico con sonotrodo de 500 W

El inicio de la cavitación acústica empieza con la formación de burbujas en un líquido homogéneo irradiado acústicamente. La amplitud del campo aplicado para generar dicho fenómeno depende de parámetros como son frecuencia, tipo de líquido, cantidad de gas e impurezas disueltas, presión estática, entre otros. Sin embargo un fenómeno casi universal es que una vez generada las burbujas estas forman estructuras. La distribución espacial de las burbujas en las nubes observadas por lo general no es homogénea. En cambio, los patrones filamentosos de burbujas emergen como se muestra en la Figura 4a. El arreglo experimental para aplicar la cavitación ultrasónica consta de un procesador ultrasónico de 750 W a 20 kHz (Sonics) a máxima potencia con un diámetro de punta de 13 mm y 14 cm de longitud (sonotrodo), un matraz de forma de corazón con cuatro entradas de 500 ml, un termómetro de mercurio y un sistema de refrigeración externo. Con el generador se varía el porcentaje de potencia aplicada y el tiempo de suministro de energía. El arreglo experimental para aplicar la cavitación ultrasónica se despliega en la Figura 4b. Una imagen del matraz y su sistema de enfriamiento en forma manual se aprecia en la Figura 4c. Los diferentes estados de cavitación variando frecuencia del sonotródo y midiendo la temperatura del líquido se aprecian en la figura 4d.

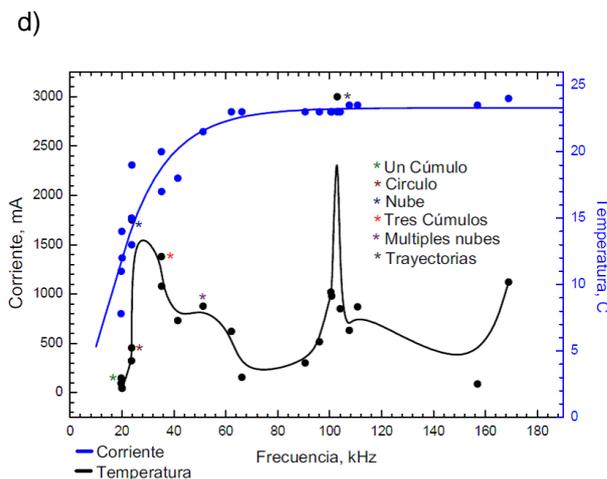
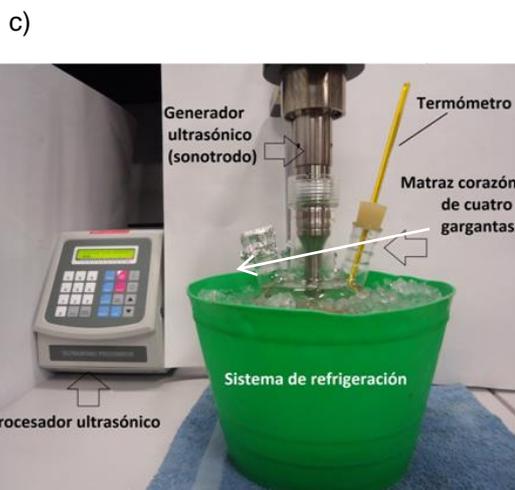
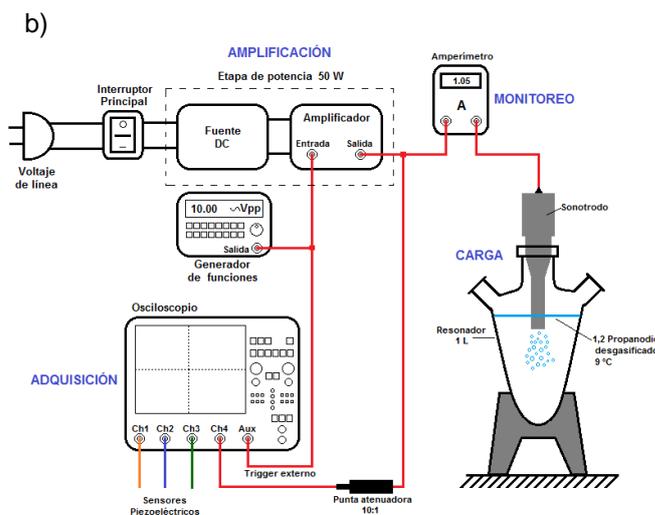
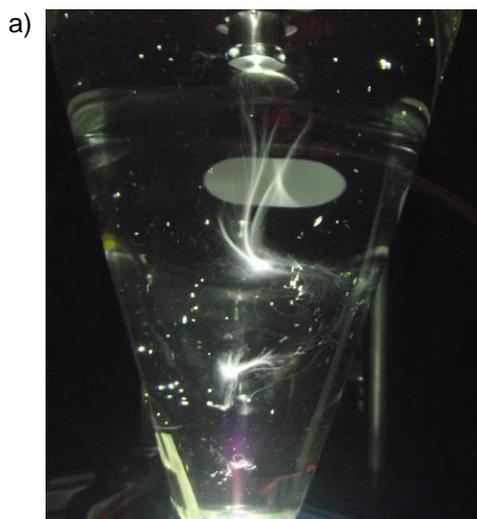


Figura 4. a) Formación de tres cúmulos burbujas por cavitación acústica en resonador cónico de 1 litro, líquido 1,2 propanodiol, frecuencia aplicada 33.32 kHz, b) Diagrama de conexión entre la etapa de amplificación, monitoreo y carga del sistema para reproducción de la cavitación ultrasónica, c) Imagen del arreglo experimental con el procesador ultrasónico de 750 W. El sistema de enfriamiento se mantiene en forma manual d) Corriente medida a través del sonotrodo, temperatura del líquido en función de las estructuras que forman las burbujas por la tensión superficial.

**Metodología. Cavitación ultrasónica.** Una vez implementado el arreglo experimental se procesan cuatro de 500 mL, en condiciones ambientales: presión atmosférica 78 kPa, y temperatura 20°C, temperatura inicial del líquido 5°C y se toman muestras para determinar la viscosidad y el espectro IR. Se programa el procesador ultrasónico una hora a potencia máxima y se inicia el proceso de cavitación tratando que la temperatura se mantenga constante. El proceso se detiene cada media hora para dejar enfriar el sonotrodo que alcanza una temperatura de aproximadamente 120 °C. Una vez que el sonotrodo se estabiliza a la temperatura ambiente se reanuda el proceso hasta terminar la hora en donde se toma una muestra, así se sigue hasta completar un total de 10 horas de tratamiento.

### 2.3 Análisis de las muestras

**Viscosimetría.** Se mide viscosidad de cada una de las muestras procesadas y se obtiene su curva de Viscosidad vs. Temperatura. Esto se realiza con un viscosímetro digital rotatorio LVDV-II marca Brookfield, la medición se repite cuatro veces para cada una de las muestras. Usando un software comercial los datos se ajustan a la ecuación de Andrade para obtener sus constantes que se relacionan con la energía absorbida por el líquido para fluir.

**Espectroscopía** Se obtiene de cada muestra su espectro infrarrojo con la ayuda de La Unidad de Servicios de Apoyo a la Investigación (USAI) de la Facultad de Química de la UNAM.

En la figura 5 y 6 se da un ejemplo de la curva de viscosidad y espectro IR de una muestra procesada hidrodinámicamente. En la primera se colocan líneas punteadas para ayudar a ver las diferencias que se detectan en la viscosidad cuando la muestra lleva diez horas de procesamiento hidrodinámico, en la figura 5 se despliega sus espectros infrarrojos correspondientes.

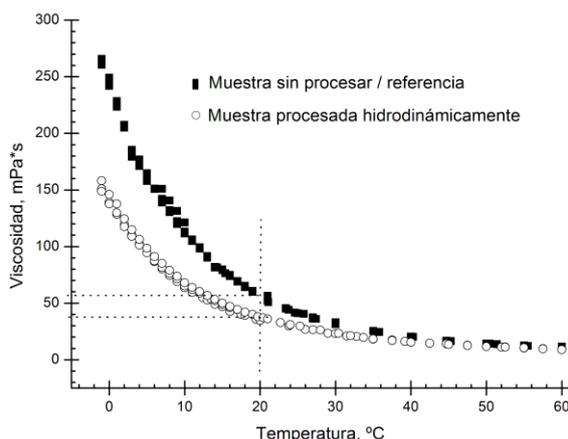


Fig. 5. Viscosidad versus la temperatura de la muestra procesada hidrodinámicamente y sin procesar.

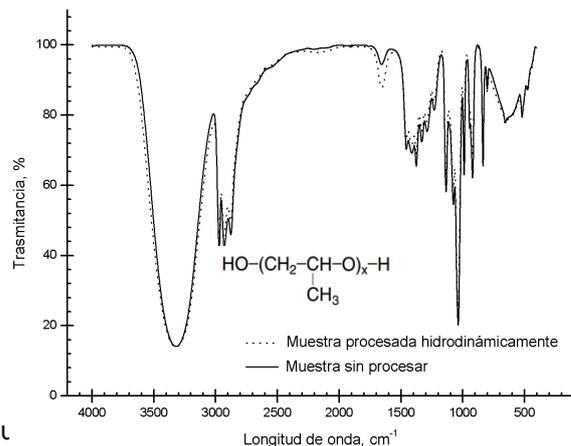


Fig. 6. Espectro IR de una muestra procesada hidrodinámicamente y sin procesar.

### 3 RESULTADOS

La Figura 6 despliega el comportamiento promedio de la viscosidad en función de  $1/T$  de las muestras procesadas ultrasónicamente e hidrodinámicamente y sin procesar. Las líneas continuas son un ajuste de los valores experimentales a la ecuación de Andrade que nos da la energía de activación; es decir la energía que el fluido necesita para contrarrestar las fuerzas viscosas. Para la muestra aplicándole el proceso ultrasónico la energía de activación fue de  $E_U = 36.13 \text{ kJmol}^{-1}$ , y de la muestra aplicándole cavitación hidrodinámica fue de  $E_H = 22.85 \text{ kJmol}^{-1}$ . Estas cantidades nos indican que la muestra procesada hidrodinámicamente presenta menor resistencia para hacerla fluir. En la Tabla 1 se enlistan los parámetros de corriente y potencia de la bomba centrífuga para alcanzar números indicados en el coeficiente de cavitación,  $\beta$ . Al trabajar a  $\beta < 1$  implica que nuestro Venturi trabaja totalmente en el intervalo turbulento.

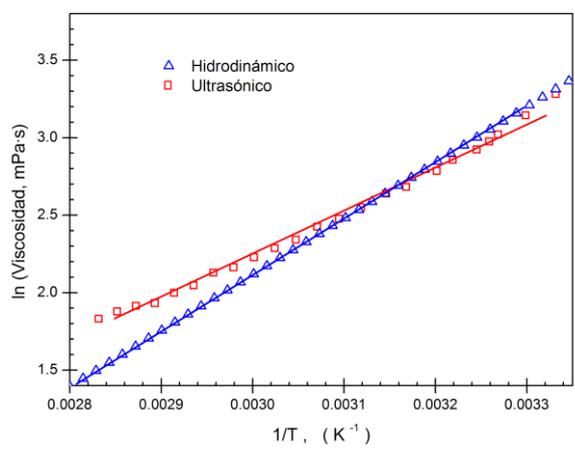


Figura 6. Datos de viscosidad para la muestra procesada ultrasónicamente (triángulos) y procesada hidrodinámicamente (cuadros).

**Tabla 1. Características del Sistema**

Corriente [l]	Potencia [W]	Cav [%]	%
9.40	1790	0.42	41
8.84	1684	0.47	37
7.63	1453	0.64	35
4.57	870	1.8	23
3.90	743	2.4	20
3.03	577	4.2	15

**Tabla 1. Propiedades finales después de la aplicación de los procesos de cavitación.**

1,2 Propanodiol, a 20 °C	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Viscosidad [mPa.s]
Referencia	1028.5±0.6	40±0.37
Procesada ultrasónicamente	1033.3±0.2	30±1.76
Procesada hidrodinámicamente	1032.5±0.2	28±0.14

En la Tabla 2 se aprecia que las muestras del líquido después del proceso con cavitación acústica e hidrodinámica comparadas a 20 °C, ambas presentan una viscosidad menor a la del líquido sin tratamiento, sin embargo debe recordarse que mientras la muestra para el proceso ultrasónico fue de 500 ml, para el procesamiento hidrodinámico fue de 70 l, lo que significa que el gasto energético del proceso hidrodinámico es dos órdenes de magnitud menor que el ultrasónico.

#### 4 CONCLUSIONES

Se implementaron dos sistemas cavitantes para comparar su eficiencia en la disminución de la viscosidad de un polímero de bajo peso molecular. El primero emplea un sistema hidrodinámico que se mantuvo con número de cavitación de aproximadamente de 0.5 y el segundo es un sistema ultrasónico a máxima potencia de 700 W a 20 kHz. Ambos sistemas probaron que son eficaces para disminuir la viscosidad, alcanzando una reducción de varios órdenes de magnitud en la viscosidad después de 10 horas de aplicación en forma intermitente. La reducción de la viscosidad fue muy similar para ambos sistemas, con lo que se demuestra que la cavitación es un medio viable para disminuir la viscosidad de líquidos de bajo peso molecular. Sin embargo, la cavitación hidrodinámica es más eficiente ya que se gastó dos órdenes de magnitud menor en energía consumida.



## 5 agradecimientos

Este trabajo se patrocinó por varios proyectos: UNAM-DGAPA-PAPIIT (IN10512 y IN115712); Proyecto interno del Instituto de Ingeniería (3130); Proyecto conjunto Instituto de Ingeniería-Facultad de Ingeniería, UNAM (1135 y IISGBAS-114-2013).

## REFERENCIAS

- [1] Ghannam MT, Hasan SW, Abu-Jdayil B, Esmail N. Rheological properties of heavy & light crude oil mixtures for improving flow ability. *J of P Sci and Eng* 2012; 81:122–8.
- [2] Martínez R, Mosqueira M, Zapata B, Mar-Juárez E, Bernal C, Clavel J, Aburto J. Transportation of heavy and extra-heavy crude oil by pipeline: A review. *J of P Sci and Eng* 2011; 75: 274–82.
- [3] Ghannam MT, Hasan SW, Esmail N. Heavy crude oil viscosity reduction and rheology for pipeline transportation. *Fuel* 2010; 89:1095–100.
- [4] Pal R, Rhodes E. Viscosity/concentration relationships for emulsions. *J Rheol.* 1989; 33:1021–45.
- [5] Potter MC, Wiggert DC. *Mécanica de fluidos*. 2<sup>nd</sup> ed. México: Pearson Education 1998.
- [6] Hernández J. Tesis: Emulsificación de un líquido viscoso en agua. Facultad de Ingeniería, UNAM. 2007.
- [7] Berlizov YS, Nesterenko AI. The possibility of cracking hydrocarbons with cavitation. *Chem and Tech of F and O.* 2007; 43:515-8.
- [8] Lecoffre Y. *Cavitation, Bubble Trackers*. A. A. Balkema, 1999.
- [9] Knapp RT, Daley JW, Hammitt RG. *Cavitation*. 1<sup>st</sup>ed. New York: McGraw-Hill, 1970.
- [10] Gogate PR, Mededovic-Thagardb S, McGuirec D, Chapas G, Blackmond J, Cathey R. Hybrid reactor based on combined cavitation and ozonation: From concept to practical reality. *U Sono* 2014; 21: 590–8.
- [11] Godínez FA, Navarrete M, Sánchez-Ake C, Mejía-Uriarte EV, Villagrán-Muñiz M. Spectroscopic and thermodynamic features of conical bubble luminescence. *U Sono.* 2012; 19:668-81.
- [12] S Cruz. Tesis: Detección pasiva de agentes de contraste por arreglo confocal. Programa de Posgrado en Ingeniería, UNAM, 2013.
- [13] Bajic DM, Ivaniš GR, Visak ZP, Zivkovic EM, Šerbanovic SP, Kijevcanin ML. Densities, viscosities, and refractive indices of the binary systems (PEG200 + 1,2- propanediol, +1,3-propanediol) and (PEG400 + 1,2-propanediol, +1,3-propanediol) at (288.15 to 333.15)K and atmospheric pressure: Measurements and modeling. *J. Chem. Thermodynamics.* 2013; 57:510–529
- [14] Riddick JA, Bunger WB. *Organic Solvents: Physical properties and methods of purification. Techniques of chemistry*; 4<sup>th</sup> ed. Vol. 2. New York 1970



**CCADET**  
CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS  
Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

**SOMI** CONGRESO  
DE  
INSTRUMENTACIÓN



XXIX Edición, Puerto Vallarta, Jalisco, México, octubre 2014

- [15] Carrillo OE, Galindo G, García I. Tesis: Reproducción de cavitación hidrodinámica luminiscente para limpieza de agua a nivel terciario. Facultad de Ingeniería, UNAM. 2012
- [16] Iribarren J. Una introducción a la reología de las cubiertas y los aceites lubricantes. J of Mat E. 2002; 24: 243-50.