

DESARROLLO DE UN MÉTODO CALORIMÉTRICO NO ADIABÁTICO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA POTENCIA ACÚSTICA DE UN TRANSDUCTOR DE ULTRASONIDOS

PACS: 43.35.Yb

A. Caparrós Morente, I. López-Coto, J.P. Bolívar Raya, F. Vaca Galán
Departamento de Física Aplicada, Universidad de Huelva
Facultad de Ciencias Experimentales,
21007 Huelva
E-mail: israel.lopez@dfa.uhu.es, amparo.caparros@dfa.uhu.es

ABSTRACT

An experimental method based in non-adiabatic comparative calorimetric method has been developed in order to measure the transmitted acoustic power into the aqueous phase by application of an ultrasound transducer. Two different acoustic sources have been evaluated by applying this method, and the obtained results have been compared with the classic calorimetric model. It has been found for a cleaning bath that the classic calorimetric method underestimate the acoustic power in at least 20 % due to no considering the thermal properties and thermal losses of the system.

RESUMEN

Con el objeto de calcular la potencia acústica transmitida a un medio acuoso por un transductor de ultrasonidos, se ha desarrollado un método experimental basado en el método calorimétrico comparativo no adiabático. Dos fuentes de ultrasonidos han sido caracterizadas con el presente método y sus resultados han sido comparados con el método calorimétrico clásico, comprobándose que éste subestima la potencia acústica transmitida al sistema en torno a un 20%, debido fundamentalmente a la no inclusión de las propiedades térmicas y las pérdidas caloríficas del sistema.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio que expondremos en este trabajo es una parte de un proyecto más amplio sobre los efectos que los ultrasonidos de alta potencia producen la materia orgánica y los microorganismos, el cual trata de sustituir los tratamientos químicos tradicionales de eliminación de microalgas y microorganismos de pequeñas lagunas por tratamientos físicos no agresivos con el medio ambiente. Los tratamientos con ultrasonidos, normalmente denominados como "ultrasonificación", han demostrado ya su aplicabilidad y rentabilidad

comercial en la solución de problemas en el campo del tratamiento de aguas residuales, eliminación de aguas en estanques de riego, por ejemplo [1,2].

La mayoría de los métodos calorimétricos para la estimación de la potencia acústica de un transductor de ultrasonidos asumen que toda la potencia acústica desplegada en el interior de un medio disipativo es finalmente transformada en potencia calorífica, lo que se traduce en un aumento de temperatura del fluido, comúnmente agua [3].

El método calorimétrico clásico [4] utiliza la evolución lineal de la temperatura $T(t)$ del fluido en el periodo inicial de aplicación de la señal de ultrasonidos. Durante este tiempo, se considera que el sistema se comporta adiabáticamente, por lo cual se desprecian las pérdidas caloríficas a través de las paredes del recipiente y el resto de elementos en contacto con el fluido, a la vez que la capacidad calorífica del sistema se aproxima por la capacidad calorífica del volumen de agua empleado:

$$P_{US} = (m c_p)_{\text{agua}} \frac{dT_{US}(t)}{dt} \quad (1)$$

Los métodos calorimétricos comparativos se basan en la similitud de la respuesta térmica del medio bajo la acción de fuentes de calor de potencia equivalente [5,6]. El aumento de temperatura $T_{US}(t)$ obtenido por aplicación del ultrasonido sigue el mismo patrón que el aumento de la temperatura $T_{\text{Joule}}(t)$ que se obtendría utilizando una fuente térmica convencional, como por ejemplo un calentador eléctrico, de potencia similar conocida durante tiempos iguales de aplicación.

2. MÉTODO CALORIMÉTRICO COMPARATIVO NO ADIABÁTICO

El método calorimétrico comparativo no adiabático plantea una situación más realista del sistema en estudio, ya que se tiene en cuenta el hecho de que el dispositivo experimental dista mucho de ser adiabático. Para caracterizar los flujos de calor que se establecen entre el volumen de agua utilizado y el universo que le rodea, se asume que las transferencias de calor entre el sistema y el ambiente dependen linealmente de la diferencia de temperatura establecida [6,7]. El modelado de estas pérdidas se realiza introduciendo un nuevo término a la ecuación diferencial de evolución de la temperatura

$$\frac{dT(t)}{dt} = \frac{P_{\text{dis}}}{(m c_p)_{\text{sis}}} - \alpha (T - T_{\text{amb}}) \quad (2)$$

donde P_{dis} es la potencia disipada en el agua bajo la acción del ultrasonido o el calentador, $T(t)$ es la temperatura, $(m c_p)_{\text{sis}}$ es la capacidad calorífica del sistema y T_{amb} es la temperatura del ambiente que rodea al dispositivo de medida. El factor de pérdidas α depende de la naturaleza del dispositivo (propiedades térmicas de los materiales y geometría del dispositivo, volumen de agua, etc.) y se mantiene constante siempre que no se altere la configuración empleada del sistema completo. La expresión integral de la ecuación 2 vendría dada por:

$$T(t) = \left(\frac{P_{\text{dis}}}{\alpha (m c_p)_{\text{sis}}} + T_{\text{amb}} \right) + \left(T_0 - \frac{P_{\text{dis}}}{\alpha (m c_p)_{\text{sis}}} - T_{\text{amb}} \right) e^{-\alpha t} \quad (3)$$

De esta expresión se deduce que, partiendo de una temperatura T_0 lo suficientemente homogénea y estable en todo el volumen de agua, la acción de una fuente de calor hará aumentar la temperatura del medio siguiendo una curva característica exponencial hasta alcanzar un valor estacionario (figura 1). Si en ese punto se desconecta la fuente de calor, el

sistema se enfriará de forma exponencial con la misma constante de tiempo hasta igualar su temperatura a la del ambiente que le rodea. El análisis de la curva de calentamiento, utilizando un calentador de potencia conocida, permite calibrar el sistema, es decir, determinar experimentalmente los parámetros térmicos característicos, α y $(mc_p)_{\text{sis}}$.

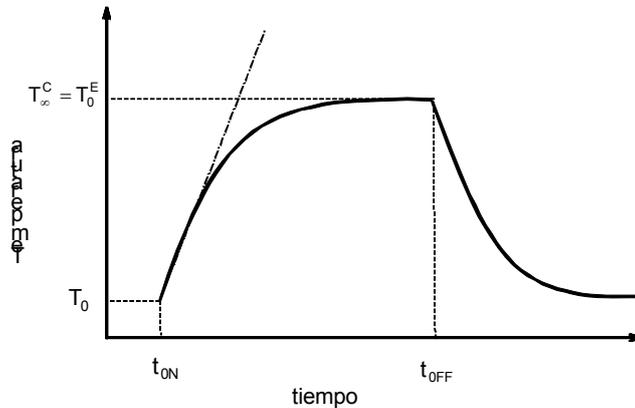


Figura 1. Evolución de la temperatura en sistemas no adiabáticos.

Hay que hacer especial hincapié en la importancia de mantener en todo momento la misma configuración del sistema durante la obtención de las series de temperatura mediante la acción del calentador y del transductor de ultrasonidos, así como señalar que la bondad de la comparación depende en gran medida de que las potencias disipadas por ambos elementos sean comparables, o no muy diferentes, pues ello asegura una dinámica semejante en la respuesta del medio.

Llegados a este punto, se han de establecer las diferencias operacionales (o diferentes hipótesis de trabajo) entre el calentador eléctrico y la fuente de ultrasonidos. Así, en ésta última hay que minimizar el aporte calorífico adicional al agua debido al calentamiento interno del propio transductor, observándose, tras unos minutos de operación, que la contribución de éste no es despreciable. Por tanto, y para excluir en lo posible este aporte, sólo se han de tomar medidas durante el tiempo necesario para obtener claramente un calentamiento lineal similar al de la zona baja de la curva de calentamiento. Bajo estas condiciones, en esta zona se realiza un desarrollo en primer grado de la ecuación 3 en la forma mostrada por la ecuación 4,

$$T(t) = T_0 - \alpha \left(T_0 - \frac{P_{\text{dis}}}{\alpha (m c_p)_{\text{sis}}} - T_{\text{amb}} \right) t \quad (4)$$

De esta forma, el valor de la pendiente $dT(t)/dt$ procedente del ajuste lineal en la forma de la ecuación 4, junto con los parámetros α y $(mc_p)_{\text{sis}}$ obtenidos en la calibración, permiten tener en cuenta la influencia de los parámetros térmicos característicos del sistema en el cálculo de la potencia acústica transmitida P_{US} .

Hasta el momento se ha considerado que la distribución de la temperatura sea siempre homogénea en el interior del fluido. Esta condición puede lograrse mediante el propio efecto del campo de ultrasonidos establecido en el medio (en ocasiones puede considerarse como un eficiente agitador) o mediante la agitación mecánica o magnética adecuada. El uso de un agitador requiere que el rozamiento viscoso con el líquido no se traduzca en un aporte adicional de calor al mismo, lo cual es imposible de conseguir. Por ello, otra ventaja del método propuesto es que permite también evaluar la potencia que este mecanismo, u otros, aporta al medio acuoso. Para ello, se hace uso de la curva de enfriamiento obtenida en la calibración con el calentador eléctrico ya que, una vez alcanzado el valor estacionario, la desconexión del mismo hará que el sistema se enfríe hasta llegar a un nuevo valor estacionario de la temperatura del cual será responsable este aporte de potencia proveniente del agitador.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la evaluación del método propuesto se han llevado a cabo una serie de experiencias con dos tipos de fuente de ultrasonidos: un transductor tipo barra de baja potencia y un baño de ultrasonidos tradicional.

En las primeras experiencias realizadas se empleó un transductor de tipo barra de 6 cm de diámetro y 15 cm de longitud cuya frecuencia de emisión es de 45 kHz. Únicamente la superficie frontal emisora se dispuso en contacto directo con el líquido, con el objeto de minimizar el aporte de potencia calorífica al medio debido al calentamiento interno del transductor. El volumen de agua empleado ha sido de 380 mL, alcanzando una altura de 2 cm en el interior de un vaso cilíndrico de acero inoxidable empleado como calorímetro. En este caso se hizo necesario el uso de un agitador magnético para una correcta homogenización de la temperatura en todo el volumen. El posible aporte de potencia por parte del agitador fue comprobado previamente y tenido en cuenta en las experiencias de calibración y sonicación.

La experiencia llevada a cabo mediante el baño de ultrasonidos ha tenido como objetivo complementario estudiar la variación de la potencia acústica disipada en función de la altura del agua en un baño de ultrasonido. El dispositivo consta con un único transductor PZT tipo sándwich acoplado en la base del recipiente, cuya frecuencia de emisión principal es de 35 kHz y con un consumo de potencia efectivo de 30 W. Se han tomado dos volúmenes de agua cuya altura H alcanzada en el interior del recipiente se relacionan con la longitud de onda en la forma $H = n\lambda/2$ ($n = 1, 2, \dots$): 600 mL ($H = \lambda$) y 300 mL ($H = \lambda/2$). Además, se ha seleccionado un tercer volumen de 400 mL sin correspondencia con λ mediante la relación anterior. Las experiencias para la medida de la potencia y de los parámetros de calibración para cada uno de los volúmenes se han repetido en un número suficiente con el fin de confirmar la reproducibilidad de los resultados. Con este mismo objetivo, se han empleado dos termopares localizados en distintos puntos del volumen, así como un tercero de control de la temperatura ambiente.

3. RESULTADOS

Transductor Tipo Barra.

La calibración realizada para la aplicación del método calorimétrico comparativo no adiabático proporcionó un valor de la capacidad calorífica del sistema $(mc_p)_{sis} = 2800 \text{ J/K}$ y un factor de pérdidas $\alpha = 3 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$. La aplicación del método clásico proporcionó un valor de potencia acústica de 0.3 W. A su vez, la aplicación del método descrito en este trabajo mostró valores de potencia acústica en torno a $1.1 \pm 0.4 \text{ W}$, lo que indica la gran importancia de estos parámetros sobre el valor obtenido. La elevada incertidumbre asociada a la potencia en este caso pone de manifiesto la proximidad al límite de detección (L_D) del método con la configuración experimental empleada ($L_D \sim 1 \text{ W}$).

Baño De Ultrasonidos.

Las calibraciones del dispositivo de ensayo con los tres volúmenes de agua estudiados se han realizado haciendo uso de un calentador eléctrico de potencia regulable. El método ha proporcionado los siguientes valores de capacidad calorífica y del factor de pérdidas:

Volumen / mL	$(mc_p)_{\text{sis}} / \text{J/K}$	α / s^{-1}
600	2900 ± 80	$3 \cdot 10^{-4}$
400	2050 ± 60	$5 \cdot 10^{-4}$
300	1580 ± 40	$6 \cdot 10^{-4}$

Tabla 1. Calibración: valores medios de la capacidad calorífica y el factor de pérdidas del sistema para distintos volúmenes de agua.

Los valores de P_{US} mostrados en la tabla 2, y graficados en la figura 2, se corresponden con los valores promedio obtenidos, empleando en su cálculo ambos métodos calorimétricos con el objeto de realizar la comparación deseada.

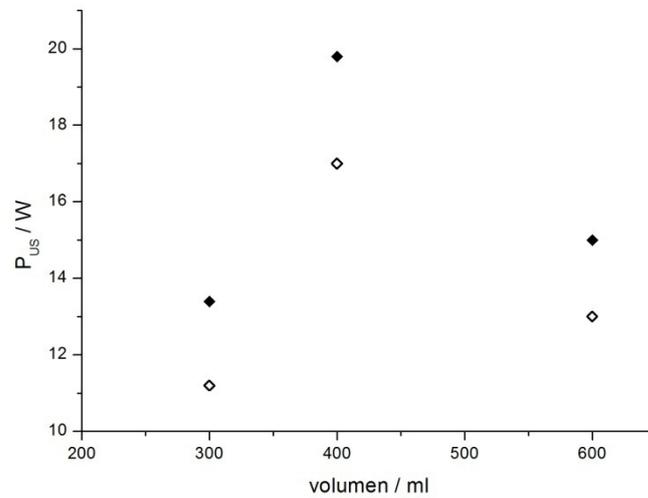


Figura 2. Comparación entre las potencias acústicas obtenidas empleando el método clásico (◇) y el método calorimétrico comparativo no adiabático(◆).

Volumen / ml	Potencia acústica / W	
	Método clásico	Método no adiabático comparativo
300	11.2	13.4 ± 0.2
400	17.0	19.8 ± 0.4
600	13.0	15.0 ± 0.2

Tabla 2. Valores promedio de potencia acústica en función del volumen de agua empleado.

A la vista de los resultados obtenidos, puede deducirse en primer lugar que la transmisión de potencia acústica al medio se maximiza si la longitud característica del medio a lo largo de la dirección principal de propagación del haz de ultrasonidos no corresponde con múltiplos de una semilongitud de onda [8]. Por otro lado, se observa que el método calorimétrico clásico subestima en un 20% los valores registrados de potencia acústica debido a la no inclusión de las propiedades térmicas y las pérdidas del dispositivo de ensayo empleado. Las incertidumbres asociadas a la potencia acústica obtenida mediante el método comparativo no adiabático se hallan en torno a un 2%, lo cual hace considerar como buena la precisión de la metodología empleada.

3. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un método de medida de la potencia acústica de un generador de ultrasonidos basado en los métodos calorimétricos comparativos, que incluye los parámetros térmicos característicos del sistema, así como las pérdidas disipativas del dispositivo de ensayo transmitidas al sistema acuoso. La inclusión de estas contribuciones ha permitido comprobar que el método calorimétrico clásico subestima la potencia acústica registrada en torno a un 20% en el sistema considerado. El método permite medir potencias acústicas de bajo valor (1-2 W), mejorando la precisión conseguida para potencias acústicas medias y elevadas.

5. REFERENCIAS

- [1] T. J. Mason, E. Joyce, S.S. Phull, J.P. Lorimer, *Potencial uses of ultrasound in the biological contamination of water*. Ultrasonics Sonoch., 10 (6) (2003), pp. 319-323
- [2] Parag R. Gogate, *Cavitation: an auxiliary technique in wastewater treatment schemes*. Advances in Environmental Research 6 (2002), pp. 335-358
- [3] B. Zeqiri, *Metrology for ultrasonic applications*. Progress in Biophysics and Molecular Biology 93 (2007), pp. 138-152
- [4] Timothy J. Mason, Andreas Tiehm, *Advances in Sonochemistry V.6*, (2001) Elsevier Science
- [5] V. Mancier, D. Leclercq, *New flowmetric measurement methods of power dissipated by an ultrasonic generator in an aqueous medium*, Ultrasonics Sonochemistry 14 (2007), pp. 99-106
- [6] M.A. Margulis, I.M. Margulis, *Calorimetric method for measurement of acoustic power absorbed in a volume of a liquid*, Ultrasonics Sonochemistry 10 (2003), pp. 343-345
- [7] C. E. Banks, R. G. Compton, A. C. Fisher, I. E. Henley, *The transport limited currents at insonated electrodes*. Phys. Chem. Chem. Phys. 6, (2004), pp. 3147-3152
- [8] M. Dular, A. Osterman, *Pit clustering in cavitation erosion*, Wear 265 (2008), pp. 81-820

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado en el marco del proyecto ASYS, en colaboración con la empresa Toscano Medio Ambiente S.L. y parcialmente financiado por la Agencia Idea y el CDTI.