

## FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

# EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA CARGA EN SISTEMAS DE EXTRACCIÓN DE ULTRASONIDO DE POTENCIA

**PACS:** 43.35.-c, 43.35.+d

Pérez, Nicolás; Gonzalez, Mariana; Budelli, Eliana; Barrios, Sofía; Lema, Patricia.  
Universidad de la República, Uruguay  
Avenida Julio Herrera y Reissig, 565  
Montevideo. Uruguay  
Tel: +598 2714 2714  
E-Mail: nico@fisica.edu.uy

**Palabras Clave:** Ultrasonido, Extracción de productos vegetales

## ABSTRACT

Ultrasound can be used as a complement in extraction of vegetal products. In the design of ultrasonic systems to such application, changes in the behavior of the system can be observed for different loads. In this work we analyse the effect of the liquid level, temperature, power level and frequency control in the delivered power to the media.

All factors presents influence in the power level delivered by the excitation electronics. Specially interesting is the phenomena of the frequency hysteresis where the load behavior depends on the frequency changes.

Results presented here can be useful in the design of an extraction ultrasonic system.

## RESUMEN

El ultrasonido se puede utilizar como un complemento en la extracción de productos vegetales. En el diseño de sistemas ultrasónicos para tal aplicación, se pueden observar cambios en el comportamiento del sistema para diferentes cargas. En este trabajo, analizamos el efecto del nivel de líquido, la temperatura, el nivel de potencia y el control de frecuencia en la potencia entregada a los medios.

Todos los factores analizados presentan influencia en la respuesta. Es especialmente interesante el fenómeno de histeresis en la frecuencia, donde el comportamiento de la carga depende del sentido del cambio de frecuencia.

Los resultados presentados aquí pueden ser de utilizados en el diseño y control de un sistema de extracción por ultrasonido.

## INTRODUCCIÓN

Los baños de ultrasonido de potencia se utilizan en numerosas aplicaciones tanto científicas como industriales. Algunos ejemplos de las mismas son la limpieza ultrasónica de piezas, la

## FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

acción sobre reacciones químicas, extracción de extractos en productos vegetales y desinfección, entre otras (Sancheti et al. 2017, Timothy 2003, Gallego-Juarez 2010). En particular, el ultrasonido está siendo propuesto como una forma de mejorar los procesos de extracción de componentes vegetales. Estas nuevas tecnologías necesitan una evaluación sistemática y detallada de los efectos logrados sobre cada matriz vegetal. En este caso es importante evaluar no solo la eficiencia de extracción sino que cuenta el estudio de la degradación o cambio de composición de los componentes (Saini et al. 2018, Chemat et al. 2017). Al tratarse de sustancias biológicas, su composición puede cambiar mucho cuando se lo somete a procesos físico-químicos durante la extracción. Debe considerarse la posible acción de los solventes, el efecto de la temperatura y el efecto de la cavitación del ultrasonido durante el proceso. Para ello es necesario contar con reactores donde sea posible controlar la frecuencia de emisión, la potencia emitida y la temperatura de la muestra (Asgharzadehahmadi et al. 2016, ).

En este trabajo se realiza el relevamiento experimental de la energía entregada al líquido en un baño ultrasónico de laboratorio utilizado para investigar procesos de extracción de productos vegetales. El sistema tiene como posibilidad el control de la frecuencia y potencia emitida, así como control de temperatura del baño. Se realiza un estudio de la influencia del nivel de líquido, de la temperatura y de la potencia emitida, en particular se evalúa la aparición de efectos no lineales como la histeresis en frecuencia y la variación de la frecuencia de emisión con la amplitud de la oscilación de los transductores (Pérez et al. 2015 , Umeda et al. 2000).

El estudio de las diferentes condiciones de carga es relevante para entender el comportamiento de los sistemas ultrasónicos, en particular cuando operan con cargas no lineales como son líquidos sometidos a cavitación y gran dependencia con el volumen y la temperatura (Petosica et al. 2017, Sona et al. 2011).

El estudio de las condiciones de carga en aplicaciones de ultrasonido de potencia no es nuevo, se encuentran numerosos trabajos que muestran el interés de conocer el efecto de la temperatura y el nivel de líquido sobre la dinámica del sistema (Arnold et al. 2014, Shuyu 2004, Nascentes et al. 2001)

## MATERIALES Y METODOS

Como setup experimental para el estudio del efecto de la carga se utilizó un baño de ultrasonido de acero con volumen máximo 4.5 l (300 mm x 150 mm x 100 mm).

El baño posee tres transductores de ultrasonido de potencia nominal 60 W y frecuencia nominal 40 kHz. Para poder identificar los efectos de la carga sobre la dinámica de un transductor, se modificó el baño para conectar un transductor individual a la fuente. En el montaje original los tres transductores se encuentran en paralelo. En este estudio se utilizó la conexión de un transductor individual, lo que permite individualizar la respuesta del mismo frente al montaje original. La figura 1 muestra un diagrama esquemático del sistema en su conjunto.

## FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

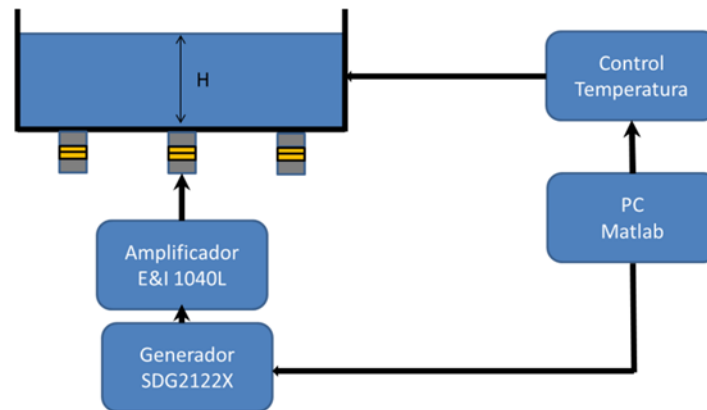


Figura 2. Setup experimental

Al tratarse de un baño de extracción para materiales biológicos, el baño cuenta con un control de temperatura con dos calentadores externos que pueden entregar hasta 500 W y un sistema de refrigeración con serpentín y bomba de flujo controlado para enfriamiento. El sistema de control mantiene la variación de temperatura acotada a  $\pm 1$  C durante todos los experimentos.

El sistema se excita con un generador de frecuencia programable SDG2122X y un amplificador de potencia E&I 1040L (400 W, 10 kHz – 5 MHz). Este equipo permite medir la potencia efectiva entregada a la carga con una apreciación de 1 W. En este trabajo todas las potencias se miden en el amplificador que excita los transductores. Se dispone también de una medida de temperatura instantánea del agua con una incertidumbre de  $\pm 0.5$  C.

Todo el sistema es controlado desde Matlab pudiendo configurar la temperatura del baño y la amplitud y frecuencia de emisión. Los transductores de ultrasonido presentan un máximo de emisión nominal de 40 kHz, experimentalmente se verifica que el máximo sin carga se encuentra en el entorno de 38 kHz, esto corresponde al transductor acoplado al acero del baño ultrasónico sin carga de líquido. Los estudios en frecuencia se acotan a la banda 32 kHz a 42 kHz.

La metodología empleada es realizar el estudio del efecto de cada uno de los parámetros relevantes en el problema intentando diferenciar el efecto de cada uno. Como parámetros relevantes se considera la temperatura, nivel de líquido, voltaje de excitación, y la dirección de barrido de la frecuencia. La potencia se mide como la entregada por el amplificador, el control se realiza sobre el voltaje de entrada del amplificador.

## RESULTADOS EXPERIMENTALES

### Estudio del Efecto del Sentido de Barrido de la Frecuencia.

Como se comentó en la introducción, los transductores de ultrasonido presentan un comportamiento fuertemente no lineal cuando se operan a altas potencias. Esto viene acompañado de grandes desplazamientos de la superficie del transductor. Uno de los efectos que puede complicar el control de la frecuencia de emisión de los transductores es la no linealidad asociada a diferentes respuestas en el barrido de frecuencias. Aquí queremos verificar dos aspectos, el primero si el fenómeno existe, ya que el transductor no está libre, está cementado al fondo del baño lo que presenta una carga mecánica al transductor. El segundo es si el fenómeno se presenta para una carga de agua normal en la operación de este tipo de baños, esto es con algunos centímetros de agua como carga.

## FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

La figura 2 muestra la respuesta de frecuencia del transductor sin carga de agua a diferentes niveles de excitación (200 mV, 300 mV, 400 mV). Se realiza el barrido de frecuencia en sentido ascendente (curva azul) y en sentido descendente (curva roja).

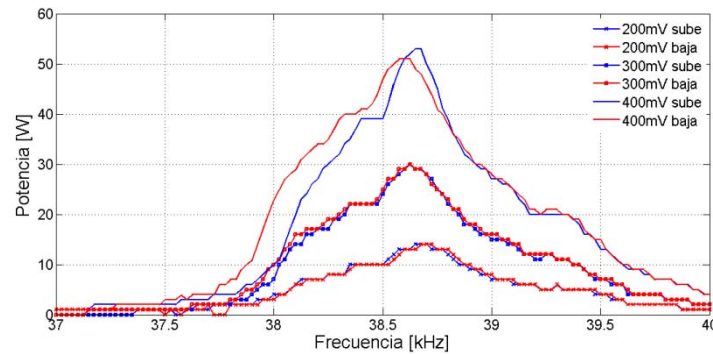


Figura 2. Barrido de frecuencia para transductor en vacío. Curva azul es frecuencia ascendente, curva roja frecuencia descendente.

En la figura 2 puede observarse claramente el fenómeno de histeresis en frecuencia para altas deformaciones. Para verificar si la carga de agua en el baño elimina el efecto, en la figura 3 se muestra un barrido con similares potencias pero colocando una carga de agua de 80 mm. Se mantiene el barrido sin carga de agua como referencia.

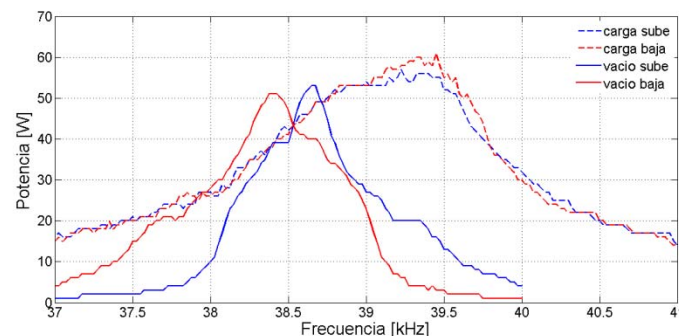


Figura 3. Respuestas de frecuencia con carga y sin carga.

Aquí se observa que hay un corrimiento de la frecuencia del máximo de emisión así como la desaparición de la histeresis en frecuencia.

### Estudio del Efecto de la Potencia Emitida

En este punto se estudia el efecto en la respuesta de frecuencia del incremento de la amplitud en carga. En particular se trata de determinar si existe un corrimiento en el máximo de emisión con el incremento de la amplitud. Para ello se realiza un ensayo con nivel de líquido 80 mm y temperatura del baño 20 C. Todos los barridos se realizan en ambos sentidos, ascendente y descendente. Como no se verificaron diferencias se muestran los barridos ascendentes.

## FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

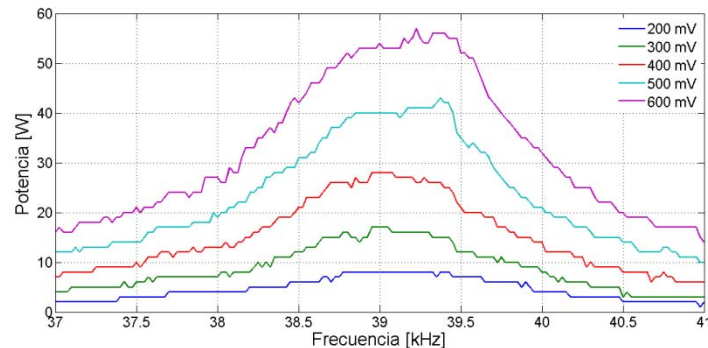


Figura 4. Barrido de frecuencia para diferentes niveles de excitación.

Aquí puede verse que el máximo de emisión permanece inalterado con el crecimiento de la amplitud. Al menos dentro del margen de operación del transductor, se limita la operación a 60 W.

### Estudio del efecto del nivel de líquido

Un factor determinante en el comportamiento del sistema es la altura de la columna de líquido que opera como carga del transductor. En este estudio se realiza un barrido de frecuencia en el rango de 30 kHz – 50 kHz con el fin de determinar el comportamiento del transductor para los diferentes niveles de líquido. La excitación se mantiene constante en 400 mV para todos los ensayos.

El estudio se realiza variando la profundidad del baño (indicada en la figura 1 como H) en pasos de a 1 mm. La figura 5 muestra la respuesta en cuatro situaciones distintas, H = 0 (sin carga de agua), H = 10 mm, H = 20 mm y H = 30 mm.

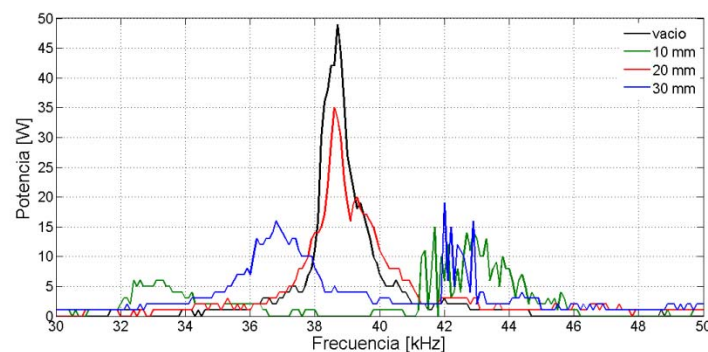


Figura 5. Respuesta del baño con diferentes cargas de agua.

Aquí se observan tres tipos de respuesta en el líquido que pueden referirse a la respuesta en vacío. Se observa que la respuesta se desplaza de la frecuencia de vacío cuando se acopla la carga de líquido. Hay una respuesta donde se produce una cavitación violenta en la zona de 42 kHz a 44 kHz, tiene un comienzo abrupto lo que es bien diferente de los otros modos observados. Otro tipo de resonancia es cuando la columna de agua se acopla con la resonancia del transductor, la forma de la resonancia es mucho más limpia, similar a la del transductor y no se producen oscilaciones violentas en el líquido. Finalmente un tercer comportamiento se da para frecuencias menores que la resonancia de vacío, aquí se observa una gran oscilación en el líquido, pero su aparición y desaparición es gradual.

En la figura 6 se muestra un mapa de color donde se ve la evolución de los diferentes modos cuando varía la profundidad del baño.

**FIA 2018**

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

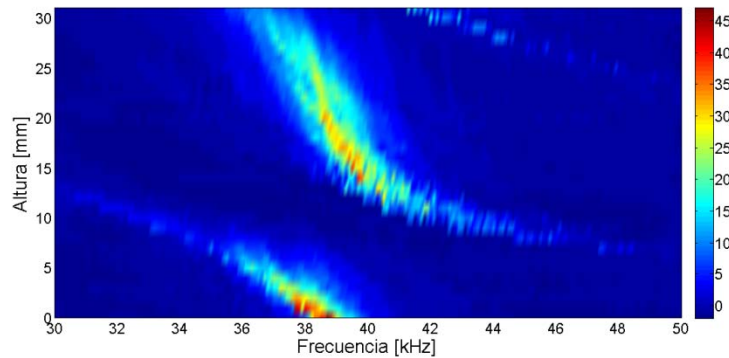


Figura 6. Mapa de evolución de modos con la profundidad del líquido

Puede observarse una respuesta máxima para una profundidad de 14 mm y una frecuencia cercana a los 40 kHz. La respuesta se repite cuando la profundidad aumenta de forma cíclica. La figura 7 muestra la evolución de la potencia consumida para una frecuencia fija de 38.6 kHz, que corresponde al máximo de emisión sin carga de agua.

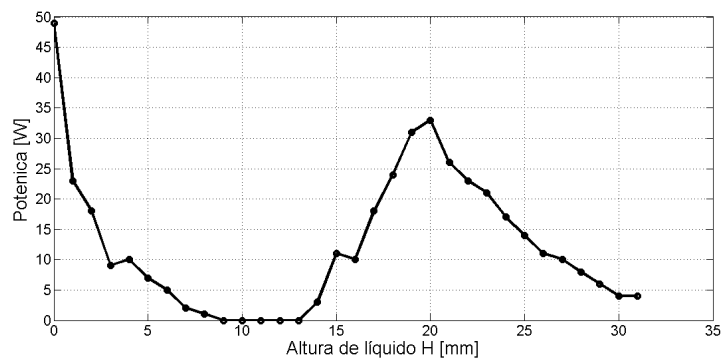


Figura 7. Evolución de la potencia a frecuencia fija 38.6 kHz.

**Estudio del efecto de la temperatura**

El otro factor que influye fuertemente sobre el comportamiento del baño es la temperatura del agua. La temperatura del agua cambia la velocidad de propagación y con ello la longitud de onda del campo de ultrasonido. Esto produce un cambio en las condiciones de resonancia del sistema. La figura 8 muestra el rango teórico de variación de la velocidad y la longitud de onda para una variación de temperatura de 20 C a 60 C (Del Grosso et al. 1972).

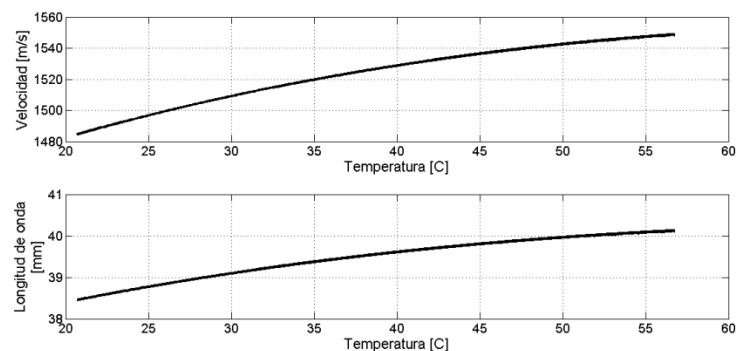


Figura 8. Variación de la velocidad y la longitud de onda en función de la temperatura

## FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

Aquí puede verse que la longitud de onda cambia casi 3 mm en ese rango de temperaturas que es habitual en los procesos de extracción. La figura 9 muestra la evolución de la potencia consumida en función de la temperatura. La profundidad del baño es de 60 mm, para homogeneizar la temperatura dentro del baño se enciende periódicamente la bomba de recirculación.

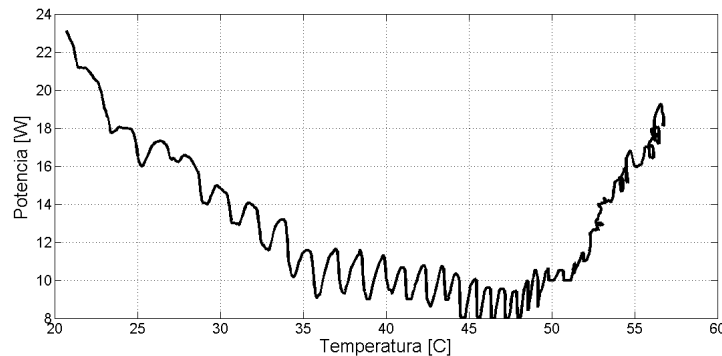


Figura 9. Potencia en función de la temperatura.

Aquí puede observarse que hay una gran variación de la potencia consumida cuando varía la temperatura. Es un fenómeno análogo a la variación de la profundidad de la columna de líquido, cambia la relación entre la profundidad y la longitud de onda en cada frecuencia.

## CONCLUSIONES

En el presente trabajo se realizó un estudio experimental sistemático de las condiciones de carga y operación que pueden afectar un baño de ultrasonido. El baño es de escala de laboratorio 4.5 l y pensado para trabajar en procesos de extracción de componentes vegetales.

Como parámetros relevantes en el estudio se utilizaron el sentido de barrido de la frecuencia, la amplitud del voltaje de excitación, la profundidad del líquido y la temperatura.

Como primera conclusión puede decirse que la carga de agua elimina el problema de la histeresis en frecuencia, al menos en las condiciones analizadas. Este problema es intrínseco a la vibración de las cerámicas piezoeléctricas, pero es eliminado por la amortiguación introducida por la carga.

En cuanto a la amplitud de excitación, puede decirse que no se producen grandes cambios en el comportamiento, más allá del obvio aumento de la potencia emitida con el voltaje de excitación. No se observa el fenómeno de corrimiento del máximo de emisión típico de las cerámicas piezoeléctricas y de los transductores poco amortiguados. Esto es debido a que la carga de agua manda en el comportamiento del sistema.

Los parámetros altura y temperatura de la columna de líquido tienen una gran influencia en el comportamiento del baño. En la figura 6 se observa que el baño no consume ninguna potencia, o lo que es lo mismo es inútil para una altura de 10 mm de agua, mientras que para 20 mm consume 30 W y se encuentra en un máximo de emisión.

Finalmente podemos decir que la temperatura del agua juega un rol semejante al de la altura de líquido ya que lo importante es la relación de la longitud de onda con la profundidad.

## FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

Sin embargo esta relación no es trivial, ya que la velocidad de propagación depende no solo de la temperatura, sino que también de la concentración de burbujas de aire debidas a la cavitación. Esto depende del nivel del campo de presión y de la concentración de gas disuelto en el agua, que a su vez depende de la temperatura. No es el mismo comportamiento cuando el agua se enfría que cuando se calienta ya que la cantidad de gas disuelto es diferente.

El trabajo presentado aquí constituye un primer estudio de nuestro grupo sobre las condiciones de operación de estos reactores. Aunque como se cita en las referencias hay numerosos trabajos al respecto, no se observa prácticamente referencia a estas condiciones en la bibliografía sobre extracción o desinfección utilizando ultrasonido. Estos factores deben tenerse en cuenta a la hora de operar el reactor.

Los estudios se continuarán con medidas más detalladas y con el ajuste de los resultados utilizando modelos analíticos y numéricos.

## REFERENCIAS

Arnold, F.; Gonçalves, M.; Roger, L.; Mühlen, S. (2014) Electrical Impedance of Piezoelectric Ceramics under Acoustic Loads. *ECTI Transactions on Electrical Engineering Electronics and Communications*, 12, 2, pp 48-54.

Asgharzadehahmadi, S.; Raman, A.; Parthasarathy, R.; Sajjadi, B. (2016) Sonochemical reactors: Review on features, advantages and limitations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 63, pp 302-314. doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.030.

Chemat, F.; Rombaut, N.; Sicaire, A.; Meullemiestre, A.; Fabiano-Tixier, A.; Abert-Vian, M. (2017), Ultrasound assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 34, pp 540–560. doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.06.035

Del Grosso, V.; Mader, C. (1972), Speed of Sound in Pure Water, *Journal of the Acoustical Society of America*, 52, pp1442-1446. doi.org/10.1121/1.1913258

Gallego-Juarez, J. (2010) High-power ultrasonic processing: Recent developments and prospective advances. *Physics Procedia*, 3, 1, pp 35-47. doi.org/10.1016/j.phpro.2010.01.006.  
Saini, R.; Keum, Y. (2018), Carotenoid extraction methods: A review of recent developments. *Food Chemistry*, 240, pp 90–103. doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.07.099

Lin Shuyu, L. (2004), Load characteristics of high power sandwich piezoelectric ultrasonic transducers. *Ultrasonics*, 43, pp 365–373. doi:10.1016/j.ultras.2004.07.008

Nascentes, C.; Kornb, M.; Sousac C.; Arrudaa, M. (2001), Use of Ultrasonic Baths for Analytical Applications: A New Approach for Optimisation Conditions. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 12, 1, pp 57-63. doi.org/10.1590/S0103-50532001000100008

Pérez, N.; Cardoni, A.; Cerisola, N.; Riera, E.; Andrade, M.; Adamowski, J. (2015), Nonlinear Dynamic Modeling of Langevin-Type Piezoelectric Transducers. *Actuators*, 4, pp 255-266. doi.org/10.3390/act4040255

Petosica, A.; Horvata, M.; Jambrakb A. (2017), Electromechanical, acoustical and thermodynamical characterization of a low-frequency sonotrode-type transducer in a small



## FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

sonoreactor at different excitation levels and loading conditions. *Ultrasonics – Sonochemistry*, 39, pp 219–232. doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.04.026

Sancheti, V.; Gogate, P. (2017) A review of engineering aspects of intensification of chemical synthesis using ultrasound. *Ultrasonics Sonochemistry* 36 (2017) 527–543. doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.08.009

Sona, Y.; Limb, M.; Khimc, J.; Kimd, L.; Ashokkumara, M. (2011), Comparison of calorimetric energy and cavitation energy for the removal of bisphenol-A: The effects of frequency and liquid height. *Chemical Engineering Journal*, 183, pp 39– 45. doi:10.1016/j.cej.2011.12.016

Timothy, M. (2003). *High Powered Ultrasound in Physical and Chemical Processing. New Acoustics – Selected Topics*, Publisher: Biblioteca de Ciecias, 7, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Editors: C.Ranz-Guerra, J.A.Gallego-Juarez, pp.105-138.

Umeda, M.; Nakamura, K.; Takahashi, S.; Ueha, S. (2000), An Analysis of Jumping and Dropping Phenomena of Piezoelectric Transducers using the Electrical Equivalent Circuit Constants at High Vibration Amplitude Levels. *Japanese Journal of Applied Physics*, 39, 1, 9B, pp 5623–5628. stacks.iop.org/1347-4065/39/i=9S/a=5623