

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

**Programa Oficial de Posgrado Ciencia,
Tecnología y Gestión Alimentaria**

Máster en Gestión y Seguridad Alimentaria



Desarrollo de un sistema de aplicación de ultrasonidos en extracción supercrítica

TÉSIS DE MÁSTER

ALUMNA: Gracia María Bonet Sellens

DIRECTOR: D. José Javier Benedito Fort

Valencia, Diciembre 2007

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE APLICACIÓN DE ULTRASONIDOS EN EXTRACCIÓN SUPERCRÍTICA

Bonet , G. M., Peña, R., García-Pérez, J.V. y Benedito, J.

RESUMEN

Con el fin de estudiar el efecto de los ultrasonidos sobre la extracción supercrítica de aceite de almendra se desarrolló un sistema de aplicación de ultrasonidos en un medio supercrítico. Se caracterizó el campo acústico producido por el transductor y posteriormente se instaló el transductor en el equipo de extracción supercrítica para estudiar su comportamiento en un medio presurizado. En este medio el menor desfase se obtuvo para un valor de frecuencia de 46.4 KHz y una potencia de 17 W. La medida de los parámetros ultrasónicos durante el proceso de extracción permitió estudiar la estabilidad de los mismos. Se realizaron pruebas de extracción supercrítica de aceite de almendra con y sin aplicación de ultrasonidos y se estudiaron las diferencias en los rendimientos. Los ultrasonidos se mostraron como una herramienta eficaz para mejorar la extracción supercrítica cuyo rendimiento al final del proceso aumentó un 4%.

ABSTRACT

An ultrasonic system was designed in order to examine the effect of ultrasonic waves on supercritical fluid extraction of almond oil. Once the acoustic field of the transducer was evaluated, the ultrasonic system was introduced in a supercritical medium. The lowest phase value was obtained at 46.4 KHz and 17 W. The stability of the ultrasonic parameters was examined by their acquisition during a supercritical extraction process. Supercritical extraction experiments of almond oil were performed with and without ultrasound application and the extraction yields were studied in order to examine the influence of the acoustic waves. The results showed that the extraction yield was enhanced 4%.

INTRODUCCIÓN

El uso de los ultrasonidos de potencia en la industria agroalimentaria ha aumentado en los últimos años. Destacan las aplicaciones en procesos de transferencia de materia, transferencia de calor, inactivación de microorganismos y enzimas, operaciones de limpieza, mejora de reacciones químicas, tenderización de carne, formación de emulsiones y en procesos de corte de alimentos (Cárcel et al., 1999).

Los fluidos supercríticos tienen la capacidad de extraer ciertos compuestos químicos bajo determinadas combinaciones de temperatura y presión (Rozzi y Singh, 2002; Brunner, 2005). El proceso de extracción con fluidos supercríticos maximiza la recuperación y la calidad del material extraído además de minimizar los costes energéticos, debido a que es más rápido y selectivo que los métodos convencionales de separación. Es altamente efectivo para aplicaciones en procesos químicos, farmacéuticos, alimentarios, en la eliminación de residuos y en la industria del petróleo (del Valle y de la Fuente, 2006).

Sin embargo, esta tecnología presenta algunos inconvenientes prácticos como es la lentitud del proceso debido a la dificultad de introducir agitación mecánica a altas presiones y a la baja solubilidad de los solutos. En este sentido, los ultrasonidos de alta intensidad (o de potencia) se han empleado para acelerar el proceso y minimizar los tiempos de extracción (Jun et al., 1997).

Así pues, existen estudios en los que se demuestra que los ultrasonidos mejoran los rendimientos de los procesos de extracción en medios supercríticos de aceite de jengibre (Balachandran et al., 2006), aceite de almendra (Riera et al., 2004), en extracción de aceite de semillas de "lágrimas de Job" (*Coix lacrimal-jobi* L. var. Adlay) (Hu et al., 2007) o en extracción de resveratrol a partir de uva (Cho et al., 2006).

Fundamento y propiedades de los fluidos supercríticos

Un fluido supercrítico es aquel que se encuentra en condiciones de presión y temperatura por encima de su punto crítico (PC), definido éste como el punto a partir del cual puede producirse un tránsito entre los estados líquido y gas sin que se observe cambio de fases (Figura 1). En dicho estado, los fluidos presentan valores de densidad similares a los líquidos, difusividades con órdenes de magnitud ligeramente inferiores a la de los gases y viscosidades entre gas y líquido. La baja viscosidad de los fluidos supercríticos facilita la entrada de éstos en las matrices a extraer e incrementa la difusividad, mejorando el poder de penetración y el transporte de materia en su seno (Rizvi et al., 1986).

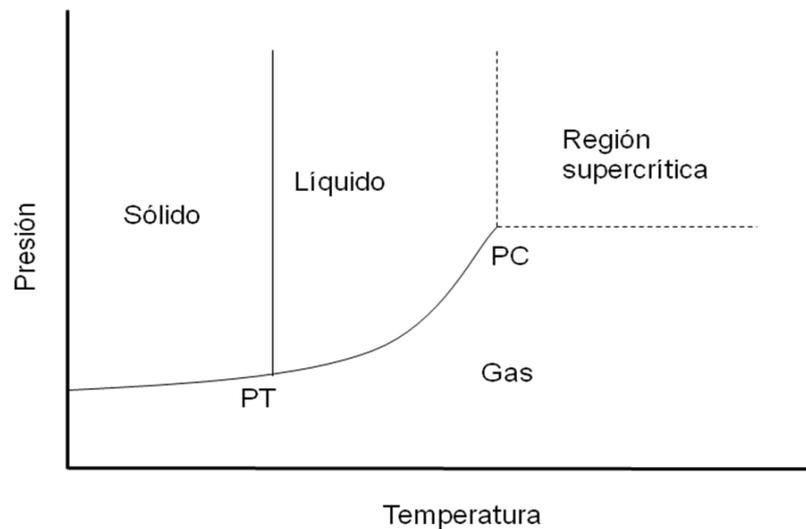


FIGURA 1. Diagrama de fases de una sustancia pura, donde PT hace referencia al punto triple y PC indica el punto crítico.

Las sustancias tienen distintos valores de presión y temperatura críticas. Estos valores son importantes para seleccionar el fluido adecuado y las condiciones de extracción con fluidos supercríticos. El dióxido de carbono es el fluido supercrítico más utilizado en la industria agroalimentaria siendo su punto crítico de 31 °C y 72.8 atm. El uso del anhídrido carbónico está justificado por tener presión y temperatura críticas relativamente bajas, ser inocuo para la salud, por el hecho de no dejar residuos en los alimentos, no ser explosivo y tener un coste relativamente bajo (Reverchon y De Marco, 2006).

Ultrasonidos de potencia

Los ultrasonidos son las ondas acústicas de frecuencia superior al límite de audición humano, es decir 20 KHz (Kocis y Figura, 1996). Se puede establecer una clasificación de los ultrasonidos atendiendo a su frecuencia e intensidad (McClements, 1997). Los ultrasonidos de potencia, o de alta intensidad, son aquellos que operan con intensidades superiores a 1 W/cm² y frecuencias relativamente bajas, entre 20 y 100 Hz. Los ultrasonidos de alta intensidad se utilizan para provocar un cambio en un sistema o afectar a un proceso o producto (Boisier-Marquis et al., 1999).

Un punto importante en la evaluación de la influencia de los ultrasonidos sobre los procesos a los que afecta es la determinación de las características del campo acústico que realmente se aplica. Los equipos de producción de ultrasonidos transforman un determinado tipo de energía en energía acústica. Los sistemas más utilizados son los sistemas piezoeléctricos en los que la energía eléctrica se transforma en energía ultrasónica mediante cerámicas piezoeléctricas. No toda la energía eléctrica suministrada al transductor es transformada en energía acústica. Todos los sistemas presentan un determinado rendimiento en la transformación de

energía eléctrica a energía mecánica. Y no toda la energía acústica producida por el transductor es transmitida al medio. Además, las características del medio líquido en el que se trata la muestra también atenúan la señal acústica (Raso et al., 1999). Por lo tanto, la cantidad de energía ultrasónica que recibe la muestra no puede ser determinada exclusivamente a partir de la cantidad de energía eléctrica consumida (Perkins, 1986). La intensidad de un campo acústico puede caracterizarse mediante un hidrófono.

Un hidrófono es un sensor electroacústico capaz de indicar la presión acústica u otro parámetro cuantificable de un campo acústico en cualquier punto del mismo sin perturbarlo (Kutruff, 1991). Cuando una onda mecánica llega al hidrófono hace vibrar la cerámica del mismo produciendo una señal eléctrica. Esta señal se recoge y almacena para su posterior análisis mediante un osciloscopio. La señal se encuentra expresada en magnitudes eléctricas por lo que es necesario traducir su valor a una medida de presión acústica. Ello se realiza mediante la sensibilidad de recepción del hidrófono que relaciona medidas eléctricas y de presión. Se obtiene por calibrado y normalmente es proporcionada por el fabricante del hidrófono. Así pues, los hidrófonos permiten la determinación de la presión acústica y de la frecuencia de un campo de ultrasonidos de una manera local (Pugin y Turner, 1990). De esta manera se pueden detectar campos estacionarios, la situación de zonas de máxima o mínima intensidad, etc. Entre los parámetros ultrasónicos que caracterizan un campo acústico y el funcionamiento del transductor cabe resaltar la frecuencia y la presión acústica.

Objetivo

El principal objetivo de este trabajo fue desarrollar un sistema de aplicación de ultrasonidos en un sistema de extracción supercrítica. Se pretende estudiar, tanto el campo generado por el transductor como los principales parámetros ultrasónicos que caracterizan su funcionamiento. Además se planteó estudiar la influencia de la aplicación de ultrasonidos en el proceso de extracción supercrítica de aceite de almendra (*Prunus amygdalus*).

MATERIALES Y MÉTODOS

Materia prima

Se realizaron extracciones de aceite de almendra en medio supercrítico para demostrar la influencia de la aplicación de los ultrasonidos. Se emplearon almendras (*Prunus amygdalus*) de la variedad Marcona común molturadas con un tamaño de partícula entre 3 y 4 mm.

Equipo de extracción supercrítica

Para obtener los extractos con CO₂ supercrítico se empleó un equipo de extracción a escala laboratorio del grupo ASPA (Anàlisi i Simulació de Processos Agroalimentaris) de la Universidad Politécnica de Valencia. Tal y como se muestra en la figura 2, el equipo de extracción supercrítica consta de cuatro partes fundamentales: una bomba de alta presión, un extractor, un separador donde se realiza la descompresión y se recoge el extracto separado del disolvente y un equipamiento de control para hacer operativo el proceso. La despresurización del CO₂ procedente del extractor se realiza mediante la válvula micrométrica que comunica el extractor con el separador.

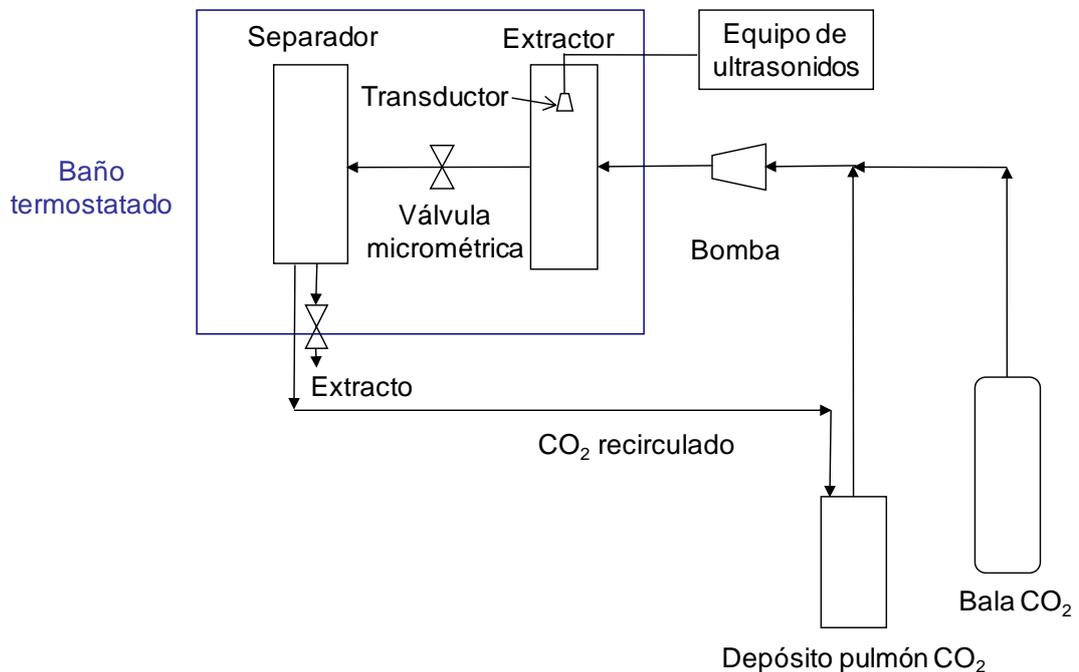


FIGURA 2. Esquema de la planta de extracción de fluidos supercríticos.

El volumen interior del depósito extractor (250 ml) permite la introducción del dispositivo de ultrasonidos de potencia y dispone de las entradas para las conexiones pertinentes. En este equipo se empleó una bomba de inyección modelo 100DM de Isco (Isco Inc. Lincoln, EEUU) cuyo rango de presiones de trabajo son 0.6895 hasta 689.5 bar y caudales desde 0.01µl/min hasta 25 ml/min.

Equipo generación ultrasonidos

El equipo (figura 3) estaba compuesto por un generador de funciones, un amplificador de señal y un transductor. Mediante el generador de funciones se generaba una señal eléctrica sinusoidal. En el presente trabajo se empleó un generador de funciones HP 33120 (Hewlett-Packard Española, S. A., Madrid, España) con una tensión pico a pico de salida variable entre 50 mV

y 10 V y un rango de frecuencias para ondas sinusoidales que variaba entre 100 μ Hz y 15 MHz. El amplificador tenía la misión de amplificar la señal que le llegaba desde el generador hasta la amplitud requerida. Se utilizó un amplificador ENI modelo 1040 L (ENI, Rochester, EE.UU) con una ganancia de 22 dB, un rango de frecuencias de trabajo que variaba desde 10 hasta 500 KHz y una potencia de salida de 400 W. Por último el transductor transformaba la señal eléctrica aplicada en una vibración ultrasónica. El transductor empleado fue construido por el Instituto de Acústica de Madrid (CSIC). La frecuencia de resonancia del mismo se situaba entre 45 y 47 KHz.

La variación de la frecuencia se realizaba variando la frecuencia de la señal eléctrica producida en el generador. Por lo tanto, este sistema presentaba una gran versatilidad a la hora de aplicar diferentes intensidades y frecuencias ultrasónicas.

Caracterización transductor en agua

En primer lugar se caracterizó el transductor de ultrasonidos en agua. En el presente trabajo se utilizó un hidrófono modelo TC4013 de Reson (Reson A/S, Slengerup, Dinamarca). Este modelo presenta un rango de frecuencias de trabajo entre 1 y 170 KHz. La sensibilidad de recepción es de -211 ± 3 dB (re 1 V/ μ Pa) y puede utilizarse bajo condiciones de temperatura que oscilen entre -2 y 80 °C. Su forma es cilíndrica y presenta unas dimensiones de 5 cm de longitud y 0.95 cm de diámetro. Este hidrófono se conectó a un osciloscopio digital Tektronik TDS 420 A (Tektronix Inc. Oregon, EE.UU). El osciloscopio sirvió para recoger y digitalizar la señal enviada por el hidrófono. Los datos de frecuencia y de tensión pico a pico de la señal del osciloscopio fueron adquiridos y almacenados por un ordenador mediante un programa desarrollado específicamente para esta aplicación en lenguaje Visual Basic 6.0 TM.

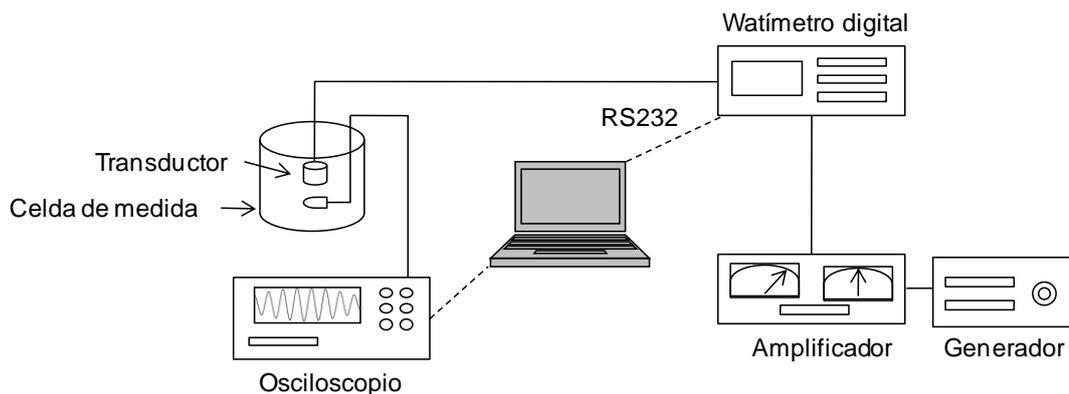


FIGURA 3. Principales elementos del sistema ultrasónico.

Simultáneamente fueron medidos los distintos parámetros eléctricos de la señal ultrasónica con un watímetro digital (WT, Yokogawa, Japón). Los principales parámetros medidos con el watímetro fueron la frecuencia (Hz),

potencia (W), intensidad (A), voltaje (V) y desfase (°). Tal y como muestra el esquema de la figura 3, el watímetro se encontraba conectado a un PC a través de una interfase RS-232.

El transductor se sumergió parcialmente en una celda de medida aislada acústicamente para evitar los campos estacionarios. La caracterización del campo ultrasónico consistió en desplazar el hidrófono sobre la vertical del emisor en intervalos de 2 mm hasta una profundidad de 100 mm. La caracterización se realizó sometiendo al transductor a los valores de frecuencia y potencia que se muestran en la tabla 1.

TABLA 1. Valores de frecuencia y potencia empleados en la caracterización del transductor en agua.

Frecuencia (KHz)	Potencia (W)
45	2
45	5
45	15
46	2
46	5
47	2
47	5

Caracterización del transductor en condiciones supercríticas

Posteriormente se procedió a la caracterización del transductor en condiciones supercríticas. En este caso no se usó el hidrófono ya que éste no soportaba las condiciones supercríticas que se alcanzaban en el interior de la cámara de extracción. Así pues se instaló el transductor en el interior del extractor y se sometió a condiciones supercríticas. Se estudió el comportamiento del transductor en condiciones estáticas sin recirculación de dióxido de carbono y con recirculación, con y sin cesta con materia prima en el interior de la cámara de extracción. La presión fue de 300 bar y la temperatura de 50 °C. En las pruebas en las que se recirculaba CO₂ se introducía con un caudal de 10 ml/min.

En primer lugar se estudió el valor del desfase para distintos valores de frecuencia y potencia. Se estudiaron valores de frecuencia desde 44 hasta 47 KHz, en intervalos de 0.2 KHz, en un rango de potencias desde 1 hasta 20 W en intervalos de 2 W.

Posteriormente se eligieron aquellas condiciones de potencia y frecuencia que menor desfase producían y se estudió la estabilidad de los parámetros ultrasónicos a largo de un proceso de extracción.

Tal y como se realizó en la caracterización del transductor en agua, se utilizó un watímetro digital para medir los distintos parámetros eléctricos de la señal ultrasónica. Con el objetivo de encontrar posibles deficiencias en el funcionamiento del transductor durante las experiencias de extracción supercrítica, se utilizó una aplicación para la visualización y adquisición de

los parámetros eléctricos de la señal que se utilizan para excitar el transductor. Dicha aplicación se realizó utilizando el lenguaje de programación de LabVIEW™ (National Instruments).

Experiencias de extracción supercrítica

La celda de extracción se cargó con 25 gramos de almendras molidas. La bomba elevaba la presión del CO₂ líquido hasta el valor deseado, luego éste era conducido a través de la celda de extracción, que se encontraba a la temperatura deseada para operar en la región supercrítica de interés. Posteriormente el CO₂ era despresurizado en la válvula micrométrica y el aceite se recogía en el separador. Se realizaron experiencias de extracción de aceite de almendra con y sin aplicación de ultrasonidos con una presión en la cámara de extracción de 200 bar y recirculando dióxido de carbono con un caudal de 10 ml/min. En todos los casos la temperatura de la cámara de extracción fue de 50 °C y cada experiencia duró 4 horas. En aquellas experiencias en las que se aplicaron ultrasonidos se aplicó una potencia de 15 W y una frecuencia de 46.4 KHz.

Se recogió el extracto del separador en intervalos de tiempo regulares de 10 minutos. El rendimiento del proceso de extracción se calculó como el cociente entre la cantidad de extracto recogido y la cantidad de producto introducido en la cámara de extracción.

La almendra molida, la almendra molida agotada tras el proceso de extracción y el extracto recogido fueron analizados por triplicado para determinar el contenido en aceite y agua siguiendo las directrices establecidas en los métodos AOAC 948.22 y AOAC 934.06 respectivamente (AOAC, 1997).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización del transductor en agua

Las medidas de la tensión pico a pico de la señal del osciloscopio procedente del hidrófono a distintas distancias entre el transductor y el hidrófono muestran que el campo acústico generado es muy irregular. La figura 4 muestra los resultados obtenidos con una frecuencia de 45 KHz para las potencias ensayadas de 2, 5 y 15 W. Tal y como se observa, en las proximidades del transductor la amplitud de la señal aumenta hasta alcanzar su valor máximo.

Debido a la configuración del sistema transductor/celda de medida, y a pesar de aislamiento acústico de la pared de la celda, se pueden producir diferentes reflexiones de la onda acústica dando lugar a un campo estacionario irregular como el mostrado en la figura 4.

De la figura 4 se desprende que la amplitud de la señal aumenta con la potencia para una frecuencia de 45 KHz en las proximidades del transductor (entre 2 y 30 mm). Tal y como muestra la figura 3, a los 20 mm la amplitud pico a pico de la señal es de 3.84 V para una potencia de 15 W. A esa

misma distancia la señal tiene una amplitud de 2.76 V para la potencia de 5 W y esta amplitud disminuye hasta 2.08 V cuando la potencia aplicada es de 2 W.

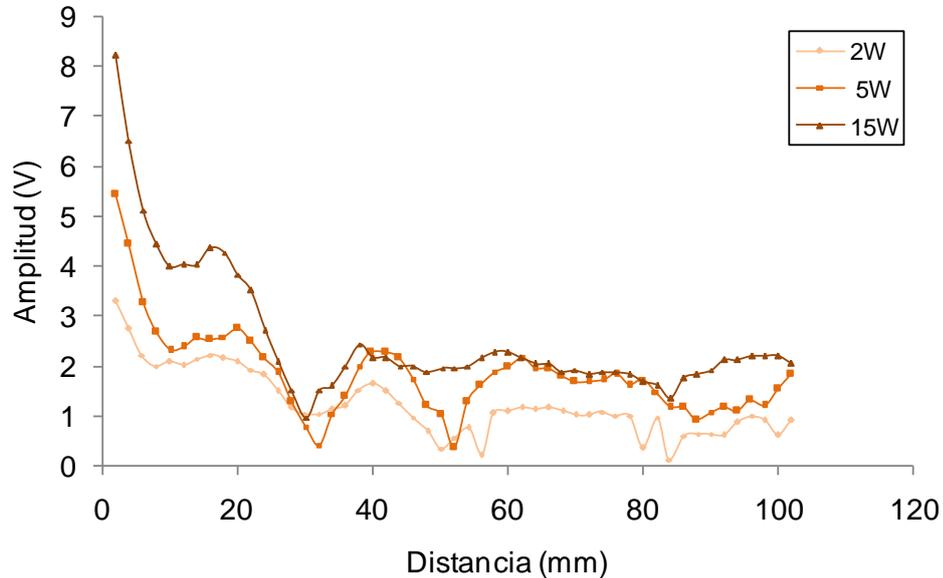


FIGURA 4. Distribución de las amplitudes pico a pico de las señales de ultrasonidos generadas a 45 KHz.

De igual forma, los resultados obtenidos para las frecuencias de 46 y 47 KHz muestran que la amplitud pico a pico de la señal aumenta con la potencia aplicada.

Tal y como muestra la figura 4, el valor de la amplitud pico a pico de la señal desciende de manera brusca para todas las potencias aplicadas debido a la absorción de energía en el medio. Así pues cuando se aplica una potencia de 15 W la amplitud toma un valor de 8.24 mm a los 2 mm y este valor desciende hasta 0.96 V cuando la distancia del hidrófono al transductor es de 30 mm.

En la tabla 2 se muestran los valores del desfase que se obtuvo para las distintas combinaciones de frecuencia y potencia ensayadas.

TABLA 2. Valor del desfase en función de la potencia aplicada para las frecuencias de 45, 46 y 47 KHz.

45 KHz		46KHz		47 KHz	
Potencia (W)	Desfase (°)	Potencia (W)	Desfase (°)	Potencia (W)	Desfase (°)
2	36	2	36	2	37
5	23	5	24	5	33
15	17	*	*	*	*

* Potencias no alcanzadas con el dispositivo de ultrasonidos

Tal y como muestra la tabla 2 para una misma frecuencia el valor del desfase disminuye al aumentar la potencia aplicada. Por otra parte, para un mismo valor de potencia el valor del desfase es similar al variar la frecuencia aplicada por lo que la frecuencia no es un factor limitante en el rango ensayado en este trabajo. El menor desfase se obtuvo para la potencia de 15 W y frecuencia de 45 KHz.

Caracterización del transductor en condiciones supercríticas

Tal y como se ha comentado, se instaló el transductor en el interior del extractor y se sometió a condiciones supercríticas. Se realizaron pruebas con y sin cesta en el interior y recirculando CO₂ y con el extractor aislado sin recirculación. Se ensayaron distintos valores de potencia y frecuencia y se registraron los valores del desfase de la señal. Los resultados del menor desfase obtenido para las distintas condiciones se muestran en la tabla 2. Tal y como se observa en todos los casos el menor desfase se alcanza en torno a los 7° cuando se aplica una frecuencia cerca de los 47 KHz.

TABLA 3. Valores de frecuencia y potencia para los cuales se obtiene el menor desfase.

	Potencia (W)	Frecuencia (KHz)	Desfase (°)
Sin recirculación de CO ₂ y sin cesta	21	46.8	6.6
Sin recirculación de CO ₂ y con cesta	19	47	7
Con recirculación de CO ₂ y con cesta	17	46.4	7
Con recirculación de CO ₂ y sin cesta	23	46.6	8.6

Las diferencias en el comportamiento del transductor en agua y en medio supercrítico no sólo pueden ser debidas al diferente medio que envuelve al transductor sino también a las diferentes condiciones de presión y temperatura.

La figura 5 muestra los valores de desfase obtenidos en función de la potencia y la frecuencia aplicadas sometiendo el extractor con cesta llena de almendra a una presión de 300 bar y recirculando CO₂ con un caudal de 10 ml/min.

Como puede observarse en medio supercrítico se pueden alcanzar potencias mayores que en agua debido a una mayor adaptación de la impedancia del transductor a este medio. Por otra parte en medio supercrítico las frecuencias de excitación entre 45 y 47 KHz tienen una gran influencia en el funcionamiento del sistema, determinando el desfase y la potencia alcanzadas.

En cualquier caso las medidas de caracterización en agua son fáciles de realizar y por lo tanto adecuadas para una comprobación rutinaria del funcionamiento del sistema y además permite el uso del hidrófono, siendo posible la caracterización del campo ultrasónico en las proximidades del transductor.

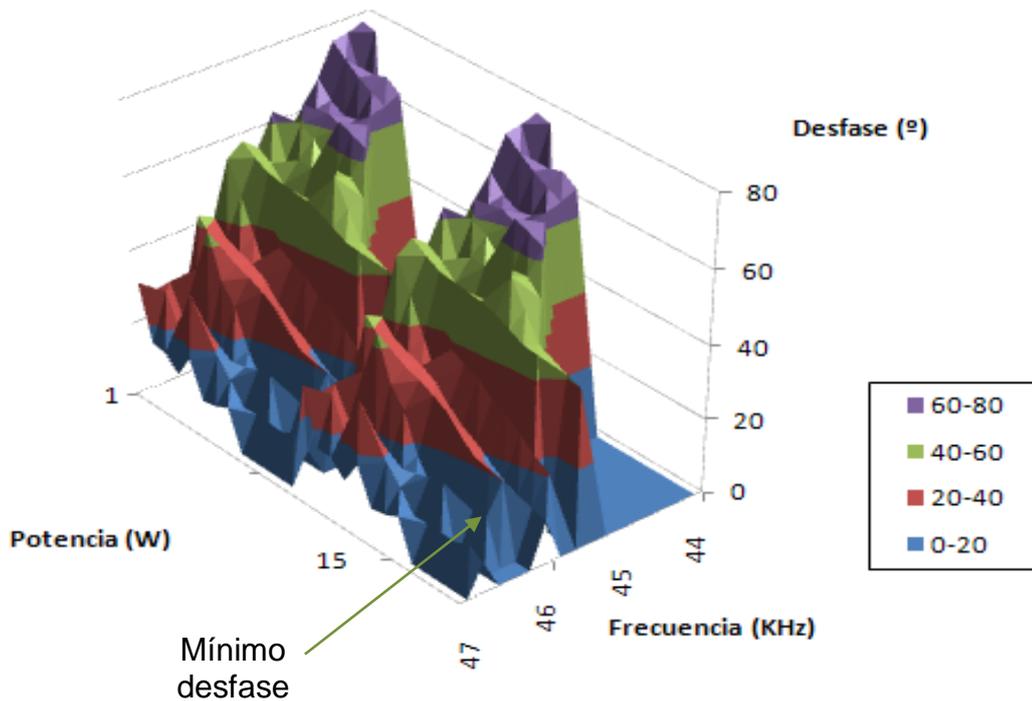


FIGURA 5. Distribución de desfases en función de la potencia y la frecuencia para una presión de trabajo de 300 bar, temperatura de 50 °C y caudal de CO₂ de 10 ml/min.

En la figura 5 se observa que a la frecuencia de 46.4 KHz y potencia de 17 W se alcanza el mínimo de desfase que toma un valor de 7°.

Estabilidad de los parámetros acústicos

El estudio de los parámetros acústicos es muy útil para evaluar el funcionamiento del transductor ultrasónico en condiciones de trabajo además de compararlos con los registrados durante la caracterización previa. En la figura 6 se muestra, a modo de ejemplo, la evolución de las principales variables de la señal eléctrica que excita el transductor durante una experiencia de extracción realizada a una presión de 300 bar y una temperatura de 50 °C. En este caso se aplicó una potencia de 15 W y una frecuencia de 46.4 KHz. Se circulaba un caudal de dióxido de carbono de 10 ml/min.

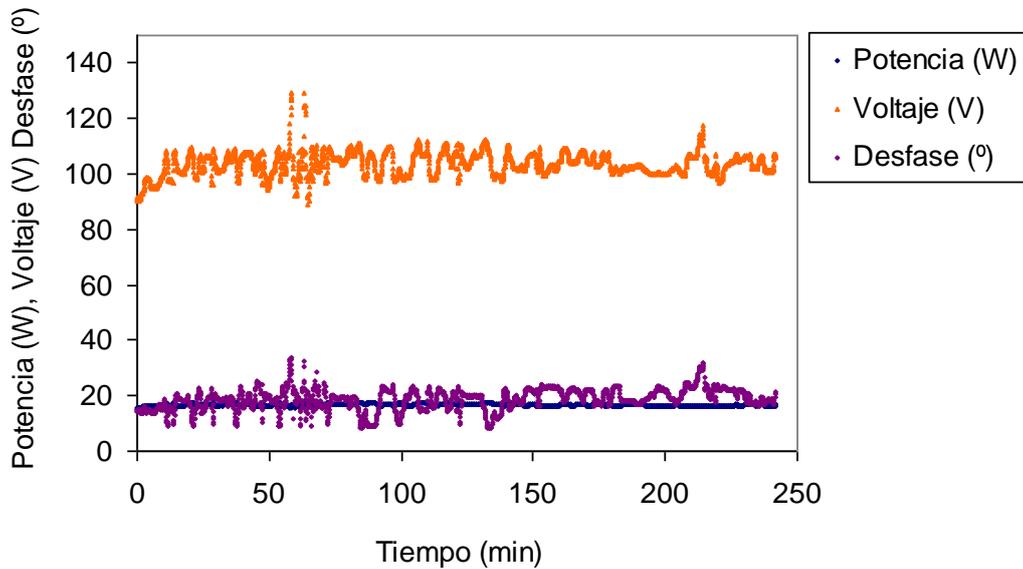


FIGURA 6. Potencia, desfase y voltaje de la señal eléctrica que excita el transductor ultrasónico para una presión de trabajo de 300 bar, temperatura de 50 °C y caudal de CO₂ 10 ml/min.

Tal y como muestra la figura 6 la potencia a la que se excita el transductor se situó en torno a los 17 W durante toda la experiencia, pese a que inicialmente se aplicaba una potencia de 15 W. Esto podría ser debido a que el transductor se calentaba a medida que avanzaba el proceso de extracción. La influencia de los ultrasonidos sobre el rendimiento en la extracción supercrítica está relacionada con la potencia aplicada por lo que conviene que ésta sea lo más estable posible. El voltaje tomó valores entre 90 y 110 V a lo largo de toda la experiencia. Además, los valores del desfase se situaron entre 10 y 25°.

Para aquellas experiencias de extracción con presiones de trabajo de 200 bar se obtuvo resultados similares en la estabilidad de la potencia, desfase y voltaje de la señal eléctrica que excitaba al transductor ultrasónico. Así pues, las variaciones que sufrían tanto el voltaje como el desfase se podría deber a que en el interior del extractor estaba circulando dióxido de carbono en condiciones supercríticas.

Extracción supercrítica de aceite de almendra

La figura 7 muestra el rendimiento de la extracción de aceite de almendra en función del tiempo con y sin aplicación de ultrasonidos. Ambas pruebas se realizaron con una presión de 200 bar y una temperatura de 50 °C. Además se recirculó dióxido de carbono con un caudal de 10 ml/min. En aquella prueba en que se aplicó ultrasonidos el transductor se sometió a una potencia de 15 W y una frecuencia de 46.4 KHz. El rendimiento se expresa

como cantidad de extracto recogido por cada 100 gramos de muestra introducida en el equipo.

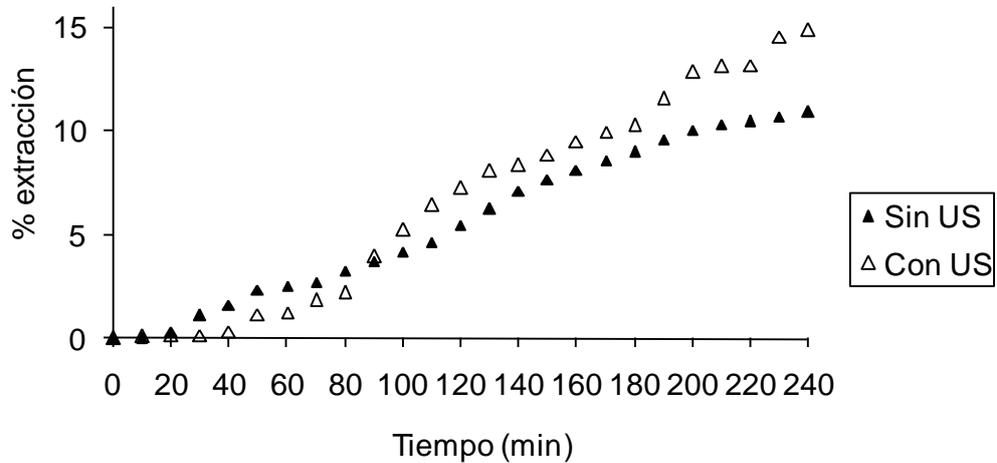


FIGURA 7. Rendimiento del proceso de extracción supercrítica de aceite de almendra a 200 bar, 50 °C y caudal de CO₂ de 10 ml/min con y sin aplicación de ultrasonidos.

Como puede observarse en la figura 7 el proceso de extracción se acelera cuando se emplean ultrasonidos y el rendimiento de la extracción se incrementa hasta un 4% al final de la experiencia.

Además se analizó la materia prima, la materia prima agotada y el extracto recogido en las experiencias que se muestran en la figura 7. En el caso en el que se aplicaron ultrasonidos el total del extracto recogido contenía el 24.2% de la grasa que inicialmente contenía la almendra molturada. Cuando no se aplicaron ultrasonidos el extracto recogido contenía el 17.61% de la grasa que contenía la almendra molturada.

CONCLUSIONES

Se diseñó un sistema de aplicación de ultrasonidos de potencia en un medio supercrítico. Se encontraron las condiciones de funcionamiento del transductor de ultrasonidos que disminuían el desfase y maximizaban la potencia aplicada. La potencia ultrasónica aplicada influyó en los rendimientos de extracción de aceite de almendra en condiciones supercríticas. Los ultrasonidos se mostraron como una herramienta eficaz para aumentar el rendimiento al final de la extracción en un 4%.

REFERENCIAS

- AOAC (1997). CD-ROM Official method of analysis of the Association of Official Analytical Chemists International. 16 edición, 3ª revisión.
- Balanchandran, S., Kentish, S. E., Mawson, R. y Ashokkumar, M. (2006) Ultrasonic enhancement of the supercritical extraction from ginger. *Ultrasonics Sonochemistry*, 13: 471-479.
- Boisier-Marquis, E., Lagsir-Olahal, N. y Callard, M. (1999). Applications des ultrasons de puissance en industries alimentaires. *Industries Alimentaries et Agricoles*, 166: 23-31.
- Brunner, G. (2005). Supercritical fluids: technology and application to food processing, *Journal of Food Engineering*, 67: 21-33.
- Cárcel, J. A., Benedito, J., Sanjuán, N. y Sánchez, E. (1999). Aplicación de los ultrasonidos en las industrias de productos lácteos y derivados. *Alimentación, Equipos y Tecnología* Septiembre: 135-141.
- Cho, Y., Hong, J., Chen, H., Lee, S. y Min, H. (2006). Ultrasonication-assisted extraction of resveratrol from grapes. *Journal of Food Engineering*, 77: 725-730.
- Hu, A., Zhao, S., Liang, H., Qiu, T. y Chen, G. (2007). Ultrasound assisted supercritical fluid extraction of oil and coixenolide from adlay seed. *Ultrasonics Sonochemistry*, 14: 219-224.
- Jun, C., Kedie, Y., Shulai, C., Adschiri, T. y Ara, K. (1997). Effects of Ultrasound on Mass Transfer in Supercritical Extraction. *The 4th Symposium on Supercritical Fluids*, Mayo 11-14, Sendai, Japón.
- Kocis, S y Figura, Z. (1996). *Ultrasonic measurements and technologies*. Chapman and Hall, London.
- Kuttruff, H. (1991). *Ultrasonics. Fundamentals and applications*. Elsevier. Reino Unido.
- McClements, D. J. (1997). Ultrasonic characterization of Foods and Drinks: Principles, Methods and Applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 37: 1-46.
- Perkins, J. (1986). Power ultrasonic equipment. Practice and application. En: <http://www.sonicsystems.co.uk>. Fecha de consulta: 13 Noviembre 2007.
- Pugin, B. y Turner, A. T. (1990). Influence of ultrasound on reactions with metals. En *Advances of Sonochemistry*. Mason, T. J. (editor). JAI Press Ltd. Londres, 81-118.
- Raso, J., Mañas, P., Pagán, R. y Sala, F. J. (1999). Influence of different factor son the output power transferred into médium by ultrasound. *Ultrasonics Sonochemistry*, 5: 157-162.
- Reverchon, E. y De Marco, I. (2006). Supercritical fluid extraction and fractionation of natural matter. *Journal of Supercritical Fluids*, 38: 146-166.
- Riera, E., Golás, Y., Blanco, A., Gallego, J. A., Blasco, M. y Mulet, A. (2004). Mass transfer enhancement in supercritical fluids extraction by means of power ultrasound. *Ultrasonics Sonochemistry*, 11: 241-244.
- Rizvi, S. S. H., Benado, J. A. y Daniels, J. A. (1986). Supercritical Fluid Extraction: Fundamental Principles and Modeling Methods. *Food Technology*: 55-56.
- Rozzi, N. L y Singh, R. K. (2002). Supercritical Fluids and the Food Industry. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 1: 33-44.
- Valle, J. M. y Fuente, J. C. (2006). Supercritical CO2 extraction of oilseeds: review of kinetics and equilibrium models. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 46: 131-160.