



## FIA 2018

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

### INFLUENCIA DE LA APLICACIÓN DE ULTRASONIDOS EN EL SECADO POR AIRE CALIENTE DE HÍGADO DE CERDO

**PACS:** 43.35.Zc.

Sanchez-Torres, E.A.; Contreras, M.; Martinez-Sanchez, N.; Segura-Cardona, L.; Benedito, J.;  
\*Garcia-Perez, J.V.

Grupo ASPA, Food Technology Department, Universitat Politècnica de València.

E46022, Valencia, Spain.

\*jogarpe4@tal.upv.es

**Palabras Clave:** Intensificación procesos, ultrasonidos de potencia; deshidratación; cerdo; subproductos

#### ABSTRACT

This work explores the feasibility of using airborne ultrasonic application to improve the water removal during hot air drying of pork liver. Drying kinetics of pork liver cylinders were carried out from 30 to 70°C at 2 m/s with (21.5 kHz; 50W) and without power ultrasound application. Experimental results showed that hot air drying of pork liver may be considered a high demanding energy operation due to the low rate of water removal. Airborne ultrasonic application shortened drying time only at low temperatures, disappearing its effect at high temperatures. Therefore, ultrasonically assisted hot air drying may be considered as a promising technique for industrial dehydration of pork liver.

#### RESUMEN

Este trabajo explora la viabilidad de la aplicación de ultrasonidos de potencia en aire para mejorar la eliminación del agua durante el secado por aire caliente de hígado de cerdo. Las cinéticas de secado de cilindros de hígado de cerdo se realizaron de 30 a 70°C a 2 m/s con (21.5 kHz; 50W) y sin la aplicación de ultrasonidos de potencia. Los resultados experimentales mostraron que el secado por aire caliente de hígado de cerdo puede considerarse como una etapa altamente demandante de energía debido a su baja velocidad de secado. La aplicación de ultrasonidos redujo el tiempo de secado a bajas temperaturas, desapareciendo su efecto a altas temperaturas. Por lo tanto, el secado por aire caliente asistido por ultrasonidos puede considerarse como una tecnología prometedora para el secado industrial del hígado de cerdo.

#### INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el hígado de cerdo es considerado un co-producto de la industria cárnica ya que su uso en fresco presenta una baja demanda por parte de los consumidores. Así, el hígado es destinado a la elaboración de patés y principalmente, se usa en la producción de comidas para mascotas. En España, se sacrificaron en 2016 casi 5 millones de cerdos [1], lo que representa aproximadamente unas 452 mil toneladas de carne y considerando que el hígado supone un 3% de la canal, la producción de hígado superó las 13 mil toneladas. Es decir, una elevada producción y con vistas a incrementarse según las tendencias actuales del mercado, por lo que si no se buscan nuevos aprovechamientos, el hígado de cerdo puede suponer un problema medioambiental para la industria cárnica.

## FIA 2018

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

El hígado de cerdo presenta un elevado contenido de proteínas de alto valor biológico. En vistas a aprovechar la fracción proteica del hígado es necesaria una etapa de deshidratación, para estabilizar el producto. El proceso de deshidratación más común en la industria es el secado convectivo por aire caliente debido a su coste y elevada productividad. Sin embargo, el uso de temperaturas elevadas supone en muchos casos una pérdida de calidad. Así, es necesaria la búsqueda de nuevas tecnologías que permitan la intensificación del proceso sin repercutir negativamente en la calidad del producto, de manera que permitan realizar secados a temperaturas más bajas manteniendo los tiempos de secado.

La aplicación de ultrasonidos de potencia en medios gaseosos ha sido utilizada con éxito para acelerar el secado por aire caliente de multitud de vegetales y frutas [2]. Los ultrasonidos de potencia producen una serie de efectos tanto sobre el transporte interno como externo de materia que permiten incrementar la velocidad de secado. Así, su utilización permite disminuir la temperatura del aire manteniendo la velocidad de secado lo cual puede repercutir positivamente en la calidad de los productos deshidratados. No existen prácticamente referencias bibliográficas de secado asistido ultrasónicamente de productos de origen animal, y particularmente de vísceras. Así, dado que tanto los efectos como la eficiencia de la aplicación de ultrasonidos de potencia son dependientes de la matriz bajo estudio, y en vistas a evaluar su aplicabilidad es necesario el análisis del proceso de secado cuando se trata de nuevas matrices a estudio [3]. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue determinar el efecto de los ultrasonidos de potencia en la cinética de secado por aire caliente de hígado de cerdo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Materia prima

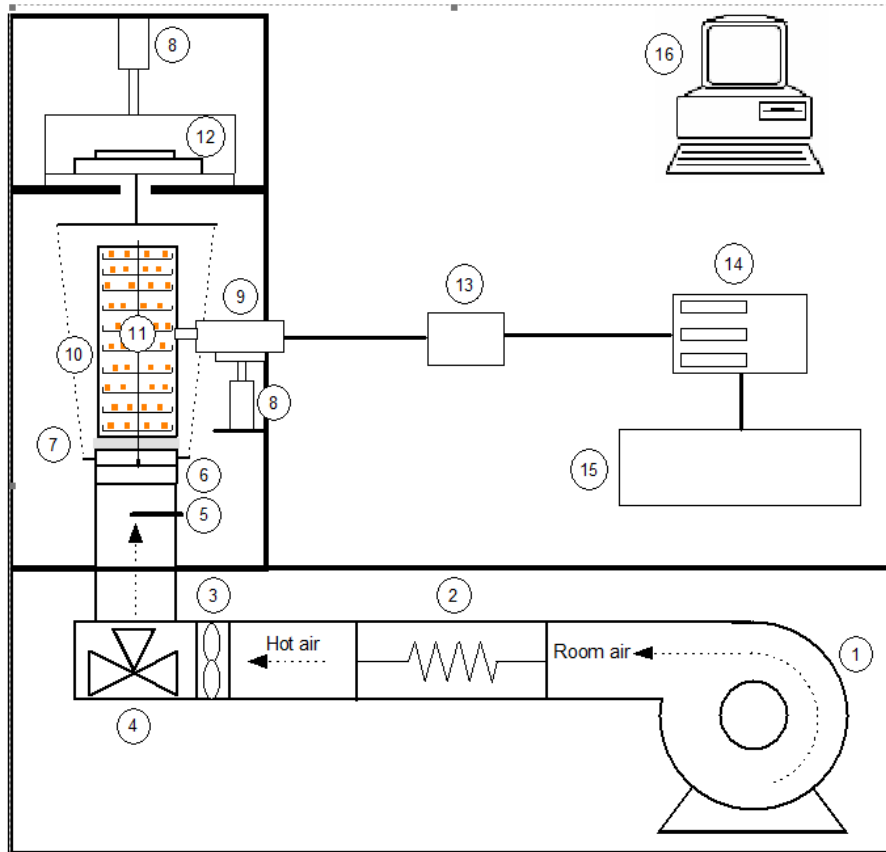
El hígado de cerdo utilizado en este trabajo fue adquirido en fresco en un mercado local (Cabañal, Valencia), se envasó a vacío y congeló en un abatidor de temperatura a  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante 240 minutos y posteriormente, se almacenó en congelación hasta su utilización. Aproximadamente, dos horas antes de realizar una experiencia de secado, el hígado se dejó descongelar parcialmente a temperatura ambiente antes de tomar muestras cilíndricas de 12.6 mm de diámetro y 15 mm de altura con ayuda de un sacabocados. En todas las experiencias, se determinó el contenido de humedad inicial mediante deshidratación a  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$  hasta peso constante (24 horas).

### Experiencias de secado

El secado de los cilindros de hígado de cerdo se realizó en un secadero convectivo, con control de temperatura y flujo de aire y pesada automática de las muestras (Figura 1). La principal novedad de este equipo se encuentra en su cámara de secado cilíndrica (10, Figura 1) que está constituida por un cilindro vibrante accionado por un transductor ultrasónico piezoeléctrico (9, Figura 1, 21.5 kHz) [4]. Así, los cilindros de hígado de cerdo se colocaron en el portamuestras en el interior del cilindro vibrante, el cual permite el paso del aire a través de él. En las experiencias donde se aplicaron ultrasonidos, se suministró una potencia eléctrica de 50 W al transductor.

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 1. Secadero convectivo por aire caliente asistido por ultrasonidos de potencia.**

1.Ventilador, 2.Resistencias eléctricas, 3. Anemómetro, 4. Válvula de 3-vías, 5.Pt-100, 6.Cámara de metacrilato, 7.Material de acople plástico, 8.Cilindros de desplazamiento neumáticos, 9.Transductor ultrasónico, 10.Cilindro vibrante, 11.Portamuestras, 12.Balanza, 13.Unidad de acoplamiento de impedancias, 14.Controlador de impedancias, 15.Generador ultrasónico.

Las experiencias de secado se realizaron con (AIR+US) y sin (AIR) aplicación de ultrasonidos de potencia a 2 m/s y diferentes temperaturas: 30, 40, 50, 60 y 70°C. En todos los casos, se realizaron tres réplicas para cada condición de secado. Se utilizaron en cada experiencia 20 cilindros lo que supuso un peso inicial de 40±1 g. Los experimentos se alargaron hasta una pérdida de peso del 60% del inicial con un intervalo de pesadas de 5 minutos.

**Modelización**

Las cinéticas de secado se modelizaron mediante un modelo difusivo para un cilindro finito considerando la simetría de la geometría, constante la difusividad efectiva y despreciando la resistencia externa a la transferencia de materia. La ecuación 1 muestra la resolución de este modelo:

$$W(t) = W_e + (W_o - W_e) \left[ \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2 \pi^2} \exp\left(-\frac{D_e (2n+1)^2 \pi^2 t}{4L^2}\right) \right] \left[ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{\alpha_n^2} \exp\left(-\frac{D_e \alpha_n^2 t}{R^2}\right) \right] \quad (1)$$

Donde W indica el contenido de humedad (kg agua/kg materia seca), t el tiempo (s), D<sub>e</sub> es la difusividad efectiva (m<sup>2</sup>/s), L y R la mitad de la altura y el radio de los cilindros, respectivamente, (m), α<sub>n</sub> representa los valores característicos determinados por las raíces de la función de Bessel

## FIA 2018

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

de primer tipo y orden cero y los subíndices  $\epsilon$  y  $\sigma$  hacen referencia estado inicial y de equilibrio, respectivamente.

El modelo se ajustó a las cinéticas de secado utilizando la herramienta de optimización Solver disponible en la hoja de cálculo Excel (Microsoft) identificando el valor de la difusividad efectiva que minimizó la suma de los errores del modelo, es decir la diferencia cuadrática entre la humedad experimental y la calculada. La bondad del modelo se estimó mediante el porcentaje de varianza explicada (VAR) y el error medio relativo (EMR). Finalmente, la influencia de la temperatura en la difusividad efectiva se cuantificó mediante una expresión de tipo Arrhenius, y se estimó la energía de activación para las experiencias AIR y AIR+US.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Cinéticas de secado

En las Figuras 2 y 3 se muestran las cinéticas de secado de cilindros de hígado de cerdo a diferentes temperaturas sin (AIR) y con (AIR+US) aplicación de ultrasonidos de potencia, respectivamente. El secado del hígado de cerdo transcurrió en todo momento en la fase de velocidad decreciente, lo que indica la importancia del transporte interno en el control de la pérdida de agua. Así, se consideró la humedad inicial (2.71 kg agua/kg de materia seca) como la humedad crítica.

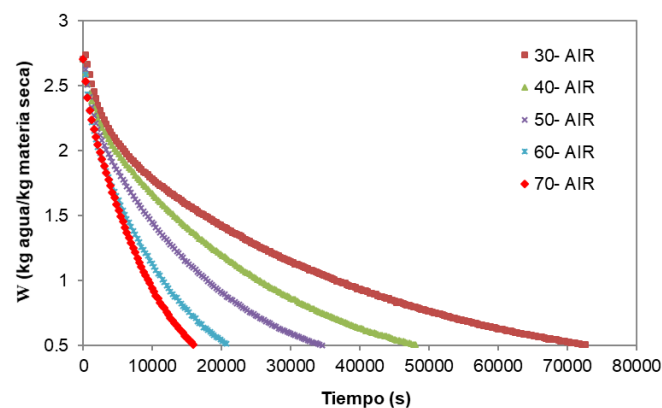


Figura 2. Cinéticas de secado de hígado de cerdo a diferentes temperaturas sin (AIR) aplicación de ultrasonidos de potencia.

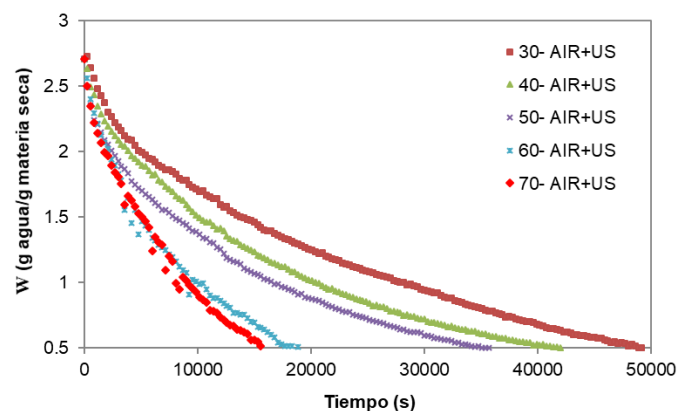


Figura 3. Cinéticas de secado de hígado de cerdo a diferentes temperaturas con (AIR+US) aplicación de ultrasonidos de potencia.

Se observó la influencia típica de la temperatura en la cinética de secado observándose una reducción del tiempo de secado con el incremento de la temperatura. Así, para alcanzar un

FIA 2018

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

contenido de humedad de 0.5 kg agua/kg de materia seca, en las experiencias AIR se necesitaron 20 horas a 30°C, mientras que si el secado se realizó a 70°C el tiempo de secado fue únicamente de 4 horas. En cuanto a la aplicación de ultrasonidos de potencia, en la Figura 4 se comparan las cinéticas de secado AIR y AIR+US a 30 y 70°C. Se puede observar que a bajas temperaturas, los ultrasonidos de potencia acortaron el tiempo de secado. Así, para alcanzar un contenido de humedad de 0.5 kg agua/kg de materia seca, en las experiencias AIR, se necesitaron 20 horas, mientras que en las AIR+US el tiempo fue inferior a 14 horas. Esto evidencia una reducción del tiempo de secado de aproximadamente un 30%, similar al observado para productos como el bacalao [5]. Sin embargo, a medida que aumentó la temperatura, la influencia de los ultrasonidos disminuyó, desapareciendo a temperaturas superiores a 50°C.

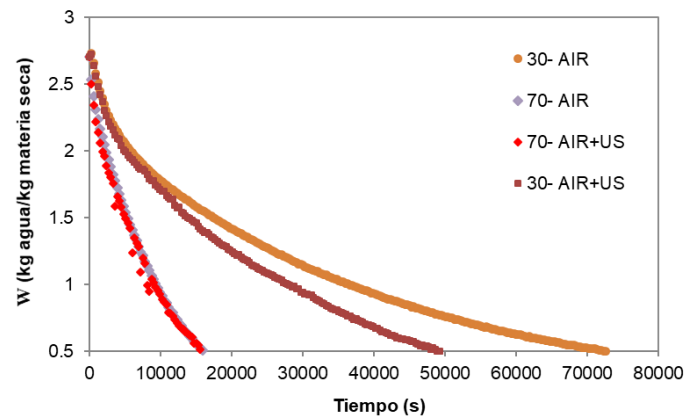


Figura 4. Comparación de cinéticas de secado de hígado de cerdo con (AIR+US) y sin (AIR) aplicación de ultrasonidos de potencia a 30 y 70°C.

**Modelización**

En la Tabla 1 se muestran los resultados del ajuste del modelo difusivo a los resultados experimentales. A todas las temperaturas, se observó que el ajuste del modelo difusivo no fue satisfactorio ya que los porcentajes de varianza explicada fueron inferiores al 99% y el error medio relativo superó el 10%. Por lo tanto, sería necesario en vistas a trabajos futuros la modificación de las hipótesis consideradas en el modelo, y probablemente la inclusión de la resistencia externa como fenómeno significativo en el control de la pérdida de agua.

Tabla 1. Resultados del modelo difusivo. Difusividad efectiva ( $D_e$ ), porcentaje de varianza explicada (VAR) y error medio relativo (EMR) para las experiencias con (AIR+US) y sin (AIR) aplicación de ultrasonidos de potencia.

Temperatura (°C)	Ultrasonidos	$D_e$ ( $10^{-11}$ m <sup>2</sup> /s)	VAR (%)	EMR (%)
30	AIR+US	14.366 ± 2.880	97.01	14.58
40	AIR+US	18.930 ± 2.069	97.93	11.24
50	AIR+US	22.024 ± 2.267	98.56	10.50
60	AIR+US	27.612 ± 9.644	95.29	27.32
70	AIR+US	38.864 ± 11.860	97.54	17.12
30	AIR	10.178 ± 1.322	98.72	6.13
40	AIR	14.585 ± 2.134	98.20	11.26
50	AIR	18.594 ± 0.711	94.91	38.77
60	AIR	28.197 ± 7.647	97.54	13.54
70	AIR	36.720 ± 6.186	95.80	27.67

## FIA 2018

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

No se encontraron resultados previos de secado de vísceras en bibliografía, por lo que no se pudieron comparar los resultados obtenidos con el de matrices similares. Así, los valores de difusividad efectiva fueron bajos, siendo similares a los observados en el secado de carne y pescado a temperaturas superiores [5], lo que indica que el secado de hígado de cerdo puede considerarse un proceso lento y altamente demandante de energía. Tal y como se observó en las cinéticas de secado, la aplicación de ultrasonidos incrementó la difusividad efectiva a temperaturas inferiores a 50°C, desapareciendo su efecto totalmente a altas temperaturas. Así, a 30 °C, la aplicación de ultrasonidos supuso un aumento de la difusividad de aproximadamente el 40%, siendo similar al obtenido para otros productos como el bacalao. No existen resultados previos de aplicación de ultrasonidos en el secado de otros productos de origen animal, pero si se comparan con los resultados obtenidos para vegetales, debería considerarse al hígado de cerdo, como un producto de baja sensibilidad al efecto de los ultrasonidos. Este hecho limitaría su posterior aplicación a escala industrial.

En la Figura 5 se muestra el ajuste de la difusividad efectiva a una ecuación de tipo Arrhenius. Se puede observar el, ya comentado, efecto de los ultrasonidos de potencia en la difusividad efectiva, y como su influencia desaparece a medida que aumenta la temperatura. Los valores de energía de activación obtenidos fueron de 27.9 kJ/mol para las experiencias AIR y 20.4 kJ/mol para las experiencias AIR+US. El descenso de la energía de activación podría utilizarse como un estimador del impacto de la aplicación de ultrasonidos en la energía necesaria para la eliminación de agua.

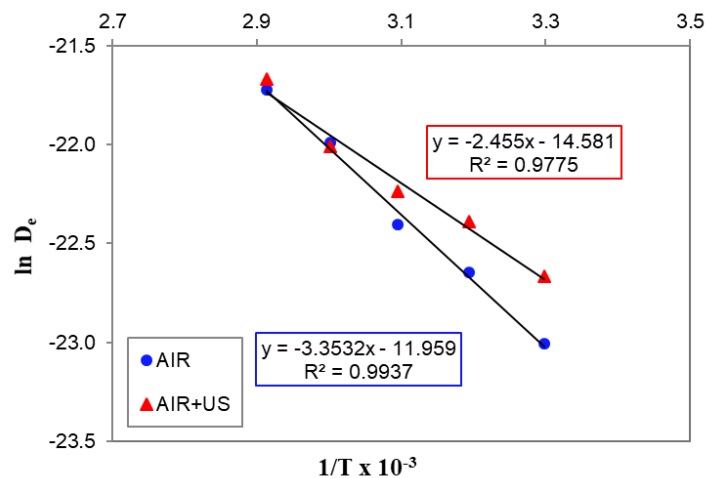


Figura 5. Ajuste lineal de la ecuación de Arrhenius a la evolución de la difusividad efectiva ( $D_e$ ) con la inversa de la temperatura ( $T$ ).

### CONCLUSIONES

La aplicación de ultrasonidos en el secado de hígado por aire caliente podría permitir el empleo de temperaturas más bajas debido a la reducción del tiempo de secado que conlleva. Sería necesario evaluar si el empleo de temperaturas de secado bajas conlleva algún efecto en la calidad del producto deshidratado, lo que podría justificar desde un punto de vista de productividad y energético, la aplicación de ultrasonidos.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación del Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) y Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA) en España y de los Fondos Europeos de Desarrollo Rural (FEDER 2014-2020) (Proyecto RTA2017-00024-C04-03) y de la Universitat Politècnica de València por el contrato predoctoral de Marina Contreras.



## FIA 2018

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

### BIBLIOGRAFÍA

- [1] MAPAMA. (2016). Indicadores de porcino primer trimestre 2016. (15-06-2018)  
[https://ec.europa.eu/agriculture/market-observatory/meat\\_en%0Ahttps://ec.europa.eu/agriculture/sites/agriculture/files/market-observatory/meat/pigmeat/doc/dashboard-pig\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/agriculture/market-observatory/meat_en%0Ahttps://ec.europa.eu/agriculture/sites/agriculture/files/market-observatory/meat/pigmeat/doc/dashboard-pig_en.pdf)
- [2] Rodríguez, O., Eim, V., Rosselló, C., Femenia, A., Cárcel, J.A., Simal, S. (2018). Application of power ultrasound on the convective drying of fruits and vegetables: effects on quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98, 1660-1673.
- [3] Ozuna, C., Álvarez-Arenas, T.G., Riera, E., Cárcel, J.A., Garcia-Perez, J.V. (2014). Influence of material structure on air-borne ultrasonic application in drying. *Ultrasonics Sonochemistry*, 21, 1235-1243.
- [4] Riera, E.; Garcia-Perez, J.V., Acosta, V.M., Carcel, J.A., Gallego-Juarez, J.A. (2011) A computational study of ultrasound-assisted drying of food materials. In *Multiphysics Simulation of Emerging Food Processing Technologies*. Knoerzer, K., Juliano, P., Roupas, P., Versteeg, C., Eds.; IFT Press: Chicago, USA; 265-302.
- [5] Ozuna, C., Cárcel, J.A., Walde, P.M., Garcia-Perez, J.V. (2014) Low-temperature drying of salted cod (*Gadus morhua*) assisted by high power ultrasound: Kinetics and physical properties. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 23, 146-155.