

SECADO CONVECTIVO DE ALIMENTOS ASISTIDO POR ULTRASONIDOS DE POTENCIA

PACS: 43.35.Zc.

José V. García-Pérez¹, José Bon¹, Juan A. Cárcel¹, Antonio Mulet¹, Juan A. Gallego-Juárez², Víctor M. Acosta², Enrique Riera²

¹Grupo ASPA, Dpto. Tecnología de Alimentos, Universitat Politècnica de València, Camí de Vera s/n, E46022 Valencia, España

jogarpe4@tal.upv.es

² Grupo de Sistemas Ultrasónicos (GSU), Dpto. Sensores y Sistemas Ultrasónicos (DSSU), ITEFI, CSIC, Serrano 144, E28006-Madrid, España, enrique.riera@csic.es

ABSTRACT

This work aims to show the most recent advances on the use of power ultrasound to improve the convective drying of foodstuff. Drying tests have been performed using airborne ultrasonic radiators working at 22 kHz and power capacities up to 200 W. The ultrasound efficiency for the improvement of the drying rate has been assessed considering the influence of different process variables.

Power ultrasound was able to drastically improve the drying rate, regardless whether the water removal is by evaporation or sublimation, of several fruits and vegetables. Although, process variables seriously influenced on the ultrasonic efficiency, the internal structure resulted crucial in determining the good coupling between the ultrasound waves and the material being dried. In addition, high power ultrasound also brought about the degradation of product structure during the drying process.

RESUMEN

Este trabajo tiene como objetivo mostrar los avances más recientes en el uso de los ultrasonidos de potencia (UdP) para mejorar el secado convectivo de alimentos. Las pruebas de secado se han realizado utilizando radiadores ultrasónicos en aire que trabajan a 22 kHz con una capacidad de potencia de hasta 200 W. La eficacia del ultrasonido para la mejora de la velocidad de secado ha sido evaluada teniendo en cuenta la influencia de las diferentes variables del proceso.

Los UdP fueron capaces de mejorar claramente la velocidad de secado, independientemente de si la eliminación de agua es por evaporación o sublimación, en frutas y verduras. Aunque las variables del proceso afectaron a la eficacia de los ultrasonidos, la estructura interna resultó crucial para determinar el buen acoplamiento entre las ondas ultrasónicas y el material que se está secando. Además, los UdP también provocaron la degradación de la estructura del producto durante el proceso de secado.

INTRODUCCION

El secado convectivo con aire caliente es el método de deshidratación más común en las aplicaciones industriales, alcanzando hasta el 25 % del consumo energético en los países desarrollados. Los elevados requerimientos energéticos no son el único factor a ser considerado cuando biomateriales, como las frutas, vegetales, carne o pescado, son secados ya que el tratamiento térmico también implica una pérdida de calidad debido al gran estrés mecánico y térmico sufrido por la estructura celular. Así, a pesar de haber sido el secado convectivo estudiado en profundidad, tanto la energía consumida como la calidad final del producto siguen siendo hoy día un desafío para la comunidad científica.

Se han aplicado diversas estrategias para mejorar el proceso de secado convectivo, y de entre ellas, deberían resaltarse la introducción de fuentes de energía alternativas, tales como las microondas, la radiación infrarroja o los ultrasonidos de potencia (UdP) (Riera et al., 2011). Comparada con otras tecnologías, la generación de calor no es el principal efecto ligado a la aplicación de los UdP en los procesos de secado convectivo (Gallego-Juárez et al., 1999). Los UdP producen efectos mecánicos tanto en la interfase gas-sólido como en el interior del material a secar, lo cual puede facilitar la eliminación del agua sin introducir una gran cantidad de energía térmica (Carcel et al., 2010). Es por ello, que el uso de los UdP tiene un gran potencial tanto en el secado de materiales sensibles al calor (Mulet et al., 2003) como en los procesos de secado a baja temperatura.

A pesar de los prometedores efectos ligados a la aplicación de los ultrasonidos en procesos de secado, algunos inconvenientes técnicos hacen que el desarrollo industrial del secado ultrasónico sea complicado. La elevada atenuación energética en medios gaseosos, así como, la desadaptación de impedancia entre los generadores ultrasónicos y el aire hacen que la energía acústica se transfiera con mayor dificultad que en el medio líquido. Avances recientes en el diseño de eficientes dispositivos ultrasónicos para radiación en aire llevados a cabo por el Grupo de Ultrasonidos de Potencia (GUP) del CSIC en Madrid han mostrado su viabilidad. Estos sistemas han sido probados en colaboración con el Grupo ASPA de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV). Por ello, el principal objetivo de este trabajo es poner de manifiesto los avances más recientes de esta disciplina en las aplicaciones agroalimentarias.

MATERIALES Y METODOS

Materia Prima

La Tabla 1 resume los materiales usados con objeto de analizar la viabilidad de la aplicación de los ultrasonidos por vía aérea en el secado de alimentos. Con este propósito, se han utilizado materiales con estructura interna muy diferente. La estructura se ha caracterizado mediante análisis macroscópico y microscópico (Ozuna et al., 2011b; Puig et al., 2012), tales como medidas de densidad y porosidad y las observaciones mediante SEM y Cryo-SEM. Además, también se llevaron a cabo pruebas experimentales de textura.

Tabla1. Resumen de trabajos previos realizados conjuntamente por los grupos ASPA de la UPV y GUP del CSIC sobre la aplicación de los UdP en el secado convectivo.

Referencia	Variable del proceso bajo estudio	Material analizado	Tipo de Emisor Ultrasónico
Gallego-Juárez et al., 1999	Temperatura del aire y potencia ultrasónica	Zanahoria	PCE
Gallego-Juárez et al., 2007	Temperatura y velocidad del aire y potencia acústica	Zanahoria y manzana	PCE
Mulet et al., 2003	Potencia acústica	Zanahoria	RC
García-Pérez et al., 2011	Potencia acústica	Berenjena	RC
Ozuna et al., 2011a	Potencia acústica	Patata	RC
García-Pérez et al., 2012a	Estructura del producto y potencia acústica	Piel de naranja	RC
García-Pérez et al., 2009	Estructura del producto y potencia acústica	Piel de limón y zanahoria	RC
Puig et al., 2012	Estructura del producto y Potencia acústica	Berenjena	RC
Cárcel et al., 2010	Carga másica	Zanahoria	RC
García-Pérez et al., 2006b	Velocidad del aire, carga másica y potencia acústica	Zanahoria	RC
García-Pérez et al., 2007	Temperatura del aire	Piel de limón, Caqui y Zanahoria	RC
Carcel et al., 2007	Temperatura del aire	Caqui	RC
García-Pérez et al., 2012b	Temperatura del aire	Berenjena , Zanahoria y Manzana	RC
García-Pérez et al., 2006a	Temperatura del aire	Zanahoria	RC

*PCE: Placa Circular Escalonada, RC: Radiador Cilíndrico

Dispositivos Ultrasónicos y Pruebas de Secado

Los experimentos de secado asistido por UdP han sido realizados utilizando radiadores ultrasónicos con placa circular escalonada (PCE) y con radiador cilíndrico (RC) excitados con vibradores piezoeléctricos a frecuencias próximas a los 22 kHz (Tabla 1). Los dispositivos ultrasónicos fueron descritos en detalle por Gallego-Juárez et al., (2002; 2007; 2010) y son capaces de alcanzar NPS de 172 dB en aire con potencias eléctricas aplicadas de 200 W.

Se han realizado pruebas de secado para evaluar la eficiencia de los dispositivos ultrasónicos, así como para evaluar la influencia de las variables más relevantes del proceso, entre otras, la velocidad del aire (desde 0.5 hasta 10 m/s) y su temperatura (desde - 15 hasta 70 °C), la carga másica (hasta 108 kg/m³) y la potencia acústica aplicada (hasta 37 kW/m³). Se usaron modelos difusionales para describir los mecanismos de transporte de agua durante el proceso de secado asistido por UdP, así como, para cuantificar la influencia de los UdP en los parámetros cinéticos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La aplicación de los UdP en aire mostró una gran habilidad para acelerar los procesos de secado por aire. Tanto las variables del proceso como la estructura del producto juegan un papel destacado sobre la eficiencia de los ultrasonidos. En el caso del secado de la berenjena, se obtuvieron reducciones del tiempo de secado de hasta el 70%. Sin embargo, se obtuvieron reducciones menores del tiempo para otros productos: 32% en zanahoria, 53% en piel de limón, 45% en piel de naranja, y 40% en patata.

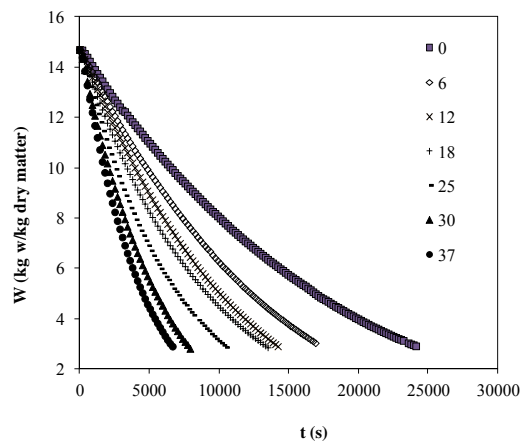


Figura 1. Cinéticas de secado de cilindros de berenjena (20 mm de altura y 24 mm de diámetro) realizadas a 40 °C y 1 m/s aplicando diferentes potencias acústicas (desde 0 – 37 kW/m³) (Garcia-Perez et al., 2011)

Como se observa en la Figura 1, la potencia acústica, definida como la potencia eléctrica suministrada al transductor dividida por el volumen de la cámara de secado, tiene una gran influencia sobre la cinética de secado. Así, al aumentar la potencia aplicada, se acelera el proceso de secado reduciendo los tiempos de tratamiento. A partir de la modelización de la cinética de secado, se ha encontrado que los UdP incrementan la velocidad tanto de los mecanismos de transporte internos como externos del agua.

Más aún, se han encontrado correlaciones lineales significativas entre la difusividad efectiva (D_e) y el coeficiente externo de transporte de agua (k) con la potencia ultrasónica aplicada (Figura 2). La pendiente de la relación lineal puede considerarse como una estimación de la eficiencia de los ultrasonidos (UE) en el proceso de secado y en cierta manera, podría también estar ligada a la sensibilidad del material a las fuerzas generadas por la onda ultrasónica. De ese modo, se confirmó que la EU, tal y como se ha definido, está muy influenciada por la estructura del producto.

Por ello, los materiales con alta porosidad y más blandos, tales como, la piel del limón y de la naranja y la berenjena, exhiben una mayor UE que los materiales con baja porosidad y más duros, tales como, la patata y la zanahoria (Figura 3).

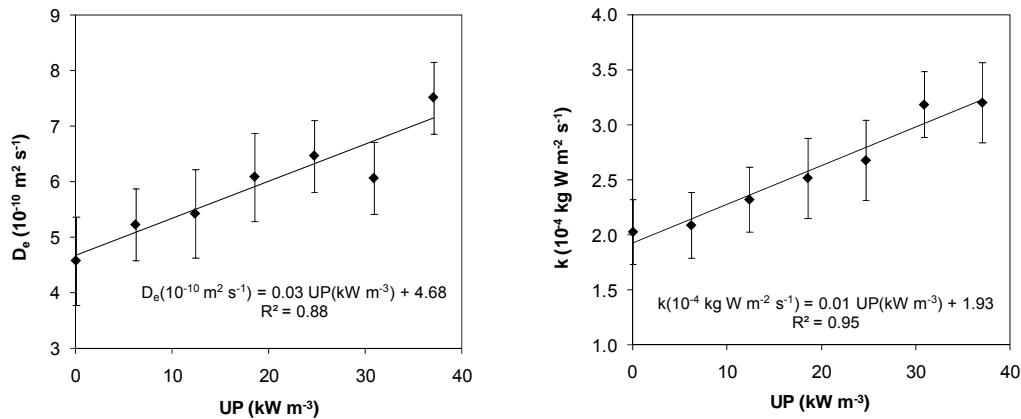


Figura 2. Influencia de la potencia acústica sobre la difusividad efectiva (D_e) y el coeficiente de transferencia de materia (k) en los experimentos de secado de cubos de patata (lado 8.7 mm) a 40 °C y 1 m/s (Ozuna et al., 2011a)

A pesar del hecho de que las aplicaciones industriales se llevan a cabo principalmente a velocidades de aire bajas (entre 1 – 2 m/s) los experimentos también se llevaron a cabo con velocidades de aire más elevadas con objeto de estudiar su influencia sobre el proceso de secado asistido por UdP. El incremento en la velocidad del aire conduce a una reducción del NPS generado en la cámara de secado (Figura 4). Así, para el radiador cilíndrico, el NPS se redujo desde aproximadamente 157 dB en condiciones estáticas de flujo de aire, a un valor asintótico próximo a 154 dB para velocidades de aire mayores a 4 m/s. Como consecuencia, para algunos materiales, tales como, la zanahoria y el caqui, el efecto de los ultrasonidos llega a desaparecer cuando se utilizan velocidades de aire elevadas.

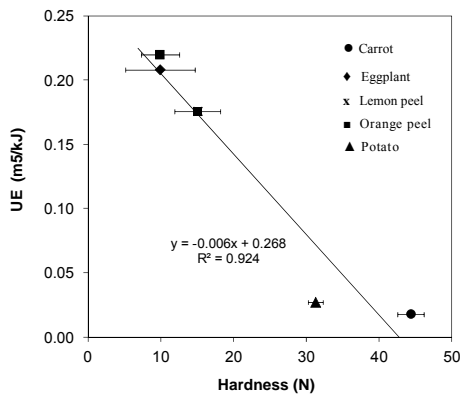


Figura 3. Influencia de la dureza del material sobre la eficiencia de los ultrasonidos (UE) en el secado (Ozuna et al., 2011b).

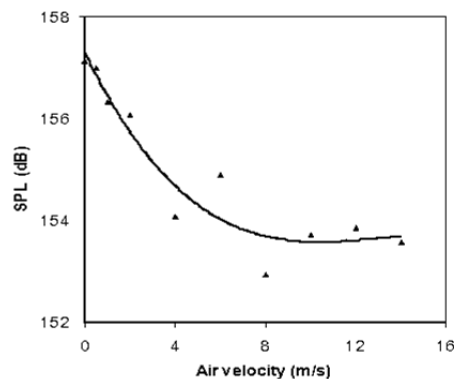


Figura 4. Influencia de la velocidad del aire sobre el NPS (dB) generado por el radiador cilíndrico (Riera et al., 2011).

La temperatura del aire es un factor clave en el secado convectivo de alimentos debido a que el aumento de temperatura acelera el proceso de secado pero puede afectar negativamente a la calidad de los productos (Soria and Villamiel, 2010), esto es especialmente relevante en el tratamiento de materiales sensibles al calor. Por lo tanto, también se abordó la influencia de la temperatura en el secado asistido por ultrasonidos. Garcia-Perez et al., (2006a) informó que el efecto de los UdP sobre el transporte de materia se hace casi despreciable a temperaturas ≥ 70

°C. Este hecho pone de manifiesto que la fracción de energía introducida en el medio por la aplicación de los ultrasonidos a elevadas temperaturas es pequeña comparada con la energía térmica disponible. Como consecuencia de ello, se consideró interesante explorar el uso de los ultrasonidos en experimentos llevados a cabo a baja temperatura (García-Pérez et al., 2012b), incluso a temperaturas por debajo del punto de congelación del producto (Figura 5). Se observó nuevamente la habilidad de los ultrasonidos para mejorar los procesos de secado independientemente de si la eliminación de agua ocurre por evaporación (Figura 1) o por sublimación (Figura 5). Además, se ha estudiado la eliminación de solventes orgánicos, como el etanol, en productos sólidos impregnados (García-Pérez et al., 2012b) lo cual es de especial interés para las industrias farmacéutica, química y biotecnológica.

Finalmente, debería mencionarse que los ultrasonidos afectan la estructura del material durante el proceso de secado. Así, se observó un colapso en las células del endocarpo de la berenjena por la acción de las ondas ultrasónicas (Puig et al., 2011). Más aún, los ultrasonidos provocaron la dispersión de las componentes cerosas sobre la superficie de la cutícula del flavedo (o capa externa) de la piel de la naranja (García-Pérez et al., 2012a).

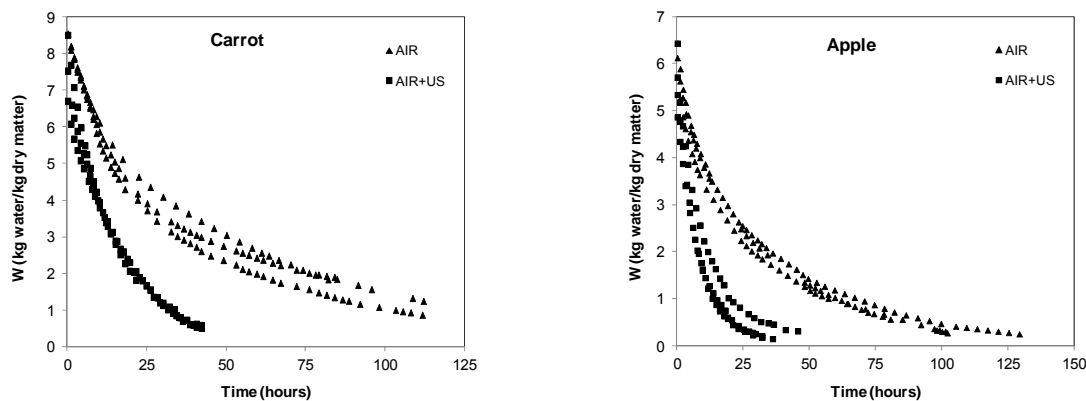


Figura 5. Cinéticas de secado de cubos de zanahoria y manzana (10 mm de lado) a $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 2 m/s con y sin aplicación de ultrasonidos (US) (García-Pérez et al., 2012b).

CONCLUSIONES

Se ha confirmado la viabilidad de los UdP para mejorar el secado convectivo de alimentos. Los ultrasonidos aceleran tanto el transporte de agua interno como externo en un amplio rango de alimentos y condiciones experimentales. Si bien, el escalado de la tecnología ultrasónica de potencia a niveles industriales, para aplicaciones de secado, es todavía un desafío pendiente.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación del Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) de los proyectos DPI2009-14549-C04-01 y DPI2009-14549-C04-04.

BIBLIOGRAFIA

Carcel, J. A., García-Pérez, J. V., Riera, E. & Mulet, A. (2007). "Influence of high intensity ultrasound on drying kinetics of persimmon", *Drying Technology*, 25, 185-193.

- Carcel, J. A., Garcia-Perez, J.V., Riera, E. & Mulet, A. (2010). "Improvement of convective drying of carrot by applying power ultrasound. Influence of mass load density". *Drying Technology*, 29, 174-182.
- Gallego-Juarez, J. A., Rodriguez-Corral, G., Galvez-Moraleda, J.C. & Yang, T.S. (1999). "A new high intensity ultrasonic technology for food dehydration", *Drying Technology*, 17, 597-608.
- Gallego-Juarez, J. A., Rodriguez, G., Riera, E., Vazquez, F., Campos, C. & Acosta, V. M., (2002), "Recent development in vibrating-plate macrosonic transducers", *Ultrasonics*, 40, 889-893
- Gallego-Juarez, J. A., Riera, E., De la Fuente, S., Rodriguez, G., Acosta, V. M. & Blanco A., (2007), "Application of high-power ultrasound for dehydration of vegetables: Processes and Devices", *Drying Technology*, 25, 1893-1901.
- Gallego-Juarez, J. A., Rodriguez, G., Acosta, V. & Riera, E., (2010) "Power ultrasonic transducers with extensive radiators for industrial processing", *Ultrasonics Sonochemistry*, 953-964.
- Garcia-Perez, J. V., Carcel, J. A., De la Fuente, S. & Riera, E. (2006a). "Ultrasonic drying of foodstuff in a fluidized bed. Parametric study", *Ultrasonics*, 44, e539-e543.
- Garcia-Perez, J. V., Rossello, C., Carcel, J. A., De la Fuente, S. & Mulet, A. (2006b). "Effect of air temperature on convective drying assisted by high power ultrasound", *Defect and Diffusion Forum*, 258-260, 563-574.
- Garcia-Perez, J. V., Carcel, J. A., Benedito, J. & Mulet, A. (2007). "Power ultrasound mass transfer enhancement in food drying", *Food and Bioproducts Processing*, 85, 247-254.
- Garcia-Perez, J.V., Carcel, J.A., Riera, E. & Mulet, A. (2009). "Influence of the applied acoustic energy on the drying of carrots and lemon peel", *Drying Technology*, 27, 281-287.
- Garcia-Perez, J. V., Ozuna, C., Ortuño, C., Carcel, J. A. & Mulet, A. (2011). "Modeling ultrasonically assisted convective drying of eggplant", *Drying Technology*, 29, 1499-1509.
- Garcia-Perez, J. V., Ortuño, C., Puig, A., Carcel, J. A. & Perez-Munuera, I. (2012a). "Enhancement of water transport and microstructural changes induced by high intensity ultrasound application on orange peel drying", *Food and Bioprocess Technology*, 5, 2256-2265.
- Garcia-Perez, J. V., Carcel, J. A., Riera, E., Rossello, C. & Mulet, A. (2012b). "Intensification of Low-Temperature Drying by Using Ultrasound", *Drying Technology*, 30, 1199-1208.
- Mulet, A., Carcel, J. A., Sanjuan, N. & Bon, J. (2003). "New food drying technologies-Use of ultrasound", *Food Science and Technology International*, 9, 215-221.
- Ozuna, C., Cárcel, J. A., Garcia-Perez, J. V. & Mulet, A. (2011a). "Improvement of water transport mechanisms during potato drying by ultrasonic application", *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91, 2511-2517.
- Ozuna, C., Cárcel, J. A., Santacatalina, J. V., Mulet, A. & Garcia-Perez, J. V. (2011a). "Improvement of water transport mechanisms during potato drying by ultrasonic application", *Proceedings of 11th International Congress of Food Engineering (ICEF 2011)*, Athens, Greece, pages. 1997-1998.
- Puig, A., Perez-Munuera, I., Carcel, J. A., Hernando, I., Garcia-Perez, J. V. (2012). "Moisture loss kinetics and microstructural changes in eggplant (*Solanum melongena* L.) during conventional and ultrasonically assisted convective drying", *Food and Bioproducts Processing*, 90, 624-632
- 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*, IFT Press.
- Soria, A.C. & Villamiel, M. (2010). "Effect of ultrasound on the technological properties and bioactivity of food: a review", *Trends in Food Science and Technology*, 21, 323-331.