

MEJORA DEL PROCESO DE TRANSFERENCIA DE MATERIA EN EL SECADO DE ALIMENTOS ASISTIDO POR ULTRASONIDOS DE ELEVADA INTENSIDAD

PACS: 02.70.Bf, 02.60.Lj, 07.64.+z, 43.35.+d, 43.80.Jz, 66.10.cg, 66.30.-h, 66.30.jj, 68.47.-b

Enrique Riera¹, José V. García-Pérez², Juan A. Cárcel², Víctor M. Acosta¹, Juan A. Gallego Juárez¹, Antonio Mulet²

¹ Grupo de Ultrasonidos de Potencia, CSIC, Serrano 144, Madrid E28006, España;

E-mail: eriera@ia.cetef.csic.es; vacosta@ia.cetef.csic.es; jgallego@ia.cetef.csic.es

² Grupo de Análisis y Simulación de Procesos Agroalimentarios, Departamento de Tecnología de Alimentos, Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera s/n, Valencia E46022, España

E-mail: jogarpe4@tal.upv.es; jcarcel@tal.upv.es; amulet@tal.upv.es

ABSTRACT

Power ultrasound is an innovative technology being applied to improve mass transfer kinetics during convective drying process of natural products. The different effects produced by the application of high-intensity ultrasonic waves may affect the drying rate without causing a significant increase in the temperature of the product. Due to the fact that the effect of power ultrasound depends of the product, the aim of this paper is to present several examples that show the influence of the acoustic energy applied to the convective drying of carrot, orange peel and lemon peel.

Convective drying kinetics of carrot cubes and orange and lemon peel slabs were carried out at a fixed temperature and air velocity applying different power acoustic levels from 0 to 90 W. The ultrasonic energy was generated by an airborne power ultrasonic transducer at a frequency of 21.7 kHz. The application of power ultrasound improves the mass transfer process in all cases. The effect of the acoustic energy was more intense in the case of orange and lemon peel samples than with carrots which may be explained by the fact that the porosity of the latter is lower than the other two products.

RESUMEN

Los ultrasonidos de potencia (UdP) representan una tecnología novedosa que está siendo aplicada con objeto de mejorar la transferencia de materia durante la cinética del proceso de secado convectivo de productos naturales. Los diferentes efectos producidos por la aplicación de los UdP pueden influir en la velocidad del secado sin provocar un incremento significativo en la temperatura del producto. Debido al hecho de que el efecto de los ultrasonidos de potencia depende del producto, el objetivo de este trabajo es presentar varios ejemplos que muestran la influencia de la energía acústica aplicada en el secado convectivo de zanahoria, piel de naranja y de limón.

Las cinéticas de secado convectivo se llevaron a cabo con cubos de zanahoria y láminas de piel de naranja y limón a una temperatura y velocidad del aire fijas aplicando diferentes niveles de potencia acústica entre 0 y 90 W. La energía ultrasónica fue generada por un transductor ultrasónico de potencia que radia en aire a una frecuencia de 21.7 kHz. En los tres productos la

aplicación de los UdP mejora el proceso de transferencia de materia. El efecto de la energía acústica fue mas intenso en los casos de la piel de naranja y de limón que en la zanahoria lo cual podría explicarse por el hecho de que la porosidad de esta última es menor que la de los otros dos productos.

INTRODUCCION

Las aplicaciones de las ondas ultrasónicas se dividen por lo general en dos grupos: baja y elevada intensidad. Las aplicaciones de baja intensidad son aquellas cuyo objetivo es obtener información acerca del medio de propagación sin producir ninguna modificación en su estado. Por el contrario, las aplicaciones de elevada intensidad son aquellas en la que la energía ultrasónica se utiliza para producir cambios permanentes en el medio tratado. Por ello, los ultrasonidos de potencia (UdP) se asignan a las aplicaciones de elevada intensidad. El límite entre baja y alta intensidad es difícil de fijar, pero puede establecerse de forma aproximada para aquellos valores de la intensidad para los que, dependiendo del medio, varían entre 0.1 W/cm^2 y 1 W/cm^2 .

El uso de ondas ultrasónicas de elevada intensidad en procesos industriales se basa generalmente en una explotación adecuada de una serie de mecanismos activados por la energía ultrasónica tales como transferencia de calor, agitación, difusión, inestabilidades en las interfases, fricción, rotura mecánica, efectos químicos, etc. Estos mecanismos son empleados para producir o mejorar una amplia gama de procesos tales como soldadura de plásticos y metales, mecanizado, formación de metales, etc., en sólidos o limpieza, atomización, emulsificación y dispersión, desgasificación, extracción desespumación, aglomeración de partículas, secado y extracción de líquidos en suspensiones, reacciones sonoquímicas, etc., en fluidos. Una característica de las ondas ultrasónicas de elevada intensidad es su capacidad para trabajar de manera que actúan en sinergia con otras formas de energía estimulando, acelerando, o mejorando muchos procesos. Esta es la razón por la que varias aplicaciones prácticas de los UdP no son exclusivamente procesos ultrasónicos sino procesos asistidos ultrasónicamente. Tal situación es particularmente importante en aquellos procesos relacionados con la industria alimentaria donde la aplicación de las ondas ultrasónicas impone la utilización de una energía limpia, no contaminante.

Un importante proceso dentro de la industria alimentaria para conservar los alimentos es el secado convectivo con aire caliente. Sin embargo y a pesar de ser un método tradicional de deshidratación ampliamente estudiado, presenta algunas limitaciones que dificulta su aplicación en algunos casos [1]. Así, la cinética de secado es lenta, principalmente durante el periodo de velocidad decreciente y/o en procesos realizados a bajas temperaturas. Para acelerar la velocidad de secado se han aplicado fuentes complementarias como las microondas o la radiación infrarroja. Sin embargo, estas aplicaciones llegan a producir calentamientos no deseados del producto. Por el contrario, el uso de los UdP no genera un incremento importante de la temperatura del producto [2]. Es por ello que esta tecnología resulta de interés en el secado de materiales sensibles al calor o en procesos de secado a bajas temperaturas. La radiación de ondas ultrasónicas de elevada intensidad a través del aire introduce variaciones de presión en las interfases gas-sólido y por tanto incrementa la velocidad de evaporación de la humedad. Más aún, en sistemas de secado por aire forzado, el efecto de la velocidad del aire influye en la transferencia de materia y de calor. La energía acústica introduce un efecto de variaciones de presión, el cual puede incrementar la velocidad de secado a una velocidad del aire constante. Además, las ondas ultrasónicas de elevada intensidad causan microcorrientes en las interfases que pueden reducir el espesor de la capa límite de difusión. Por tanto, la aplicación de la energía acústica por vía aérea puede contribuir positivamente al proceso de secado. Sin embargo la aplicación de los ultrasonidos ha sido muy limitada, probablemente debido a que la mejora obtenida en la velocidad de secado ha sido insuficiente y/o a las dificultades prácticas a la hora de obtener una generación eficiente de ondas ultrasónicas de elevada intensidad a través del aire. En este sentido conviene indicar la gran diferencia de impedancias entre el medio aéreo y el sólido a secar, lo que dificulta la penetración de la energía ultrasónica. Una solución alternativa son los sistemas de generación

de vibraciones ultrasónicas de gran amplitud en placas vibrantes con superficie extensa con contacto directo con las muestras a tratar desarrollados por el Grupo de Ultrasonidos de Potencia del CSIC en Madrid [3-4]. Sin embargo, a pesar de su eficacia, su adaptabilidad a los secaderos convectivos convencionales resulta muy difícil. Es por ello que también se han desarrollado sistemas para aplicar ultrasonidos sin contacto con las muestras [5].

El objetivo de este trabajo es mostrar la influencia de la aplicación de ultrasonidos de elevada intensidad a través del aire en el secado convectivo de tres tipos de productos: zanahoria, piel de naranja y piel de limón.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sistema de secado convectivo asistido con ultrasonidos de elevada intensidad

El sistema utilizado para realizar los secados asistidos por ultrasonidos de elevada intensidad se ha descrito en trabajos anteriores [5]. En la Figura 1 se muestra el esquema del sistema experimental de secado por ultrasonidos. Básicamente consiste en una modificación de un secadero convencional por aire caliente en el que se sustituyó la cámara de secado por un elemento vibrante que es el encargado de generar y transmitir la energía ultrasónica al aire y de este a las muestras alojadas en su interior. La nueva cámara es un cilindro hueco de aluminio (diámetro interno 100 mm; altura 310 mm; grosor 10 mm) que es excitado por un vibrador ultrasónico de potencia constituido por un transductor piezoeléctrico tipo sandwich y un amplificador mecánico a una frecuencia de 21.7 kHz. A dicha frecuencia el tubo tiene un modo propio de resonancia con doce líneas nodales a lo largo de su eje de simetría axial.

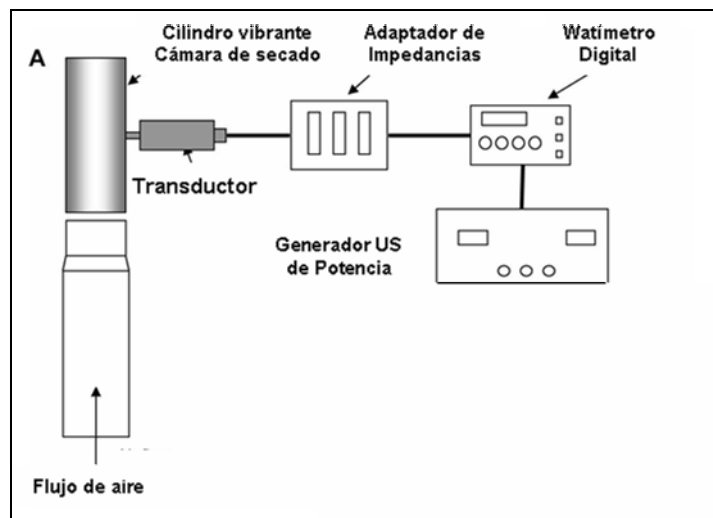


Figura 1. Esquema del sistema de secado convectivo asistido por ultrasonidos

El transductor se excita con un generador de ultrasonidos de potencia y un sistema adaptador de impedancias a su frecuencia de resonancia permite optimizar la energía eléctrica transmitida desde el generador. Los principales parámetros eléctricos de la señal de excitación del transductor en las condiciones de trabajo en el secadero fueron medidos utilizando un watímetro digital. Así los parámetros registrados al aplicar una potencia eléctrica de 90 W fueron: frecuencia de 21.7 kHz, un voltaje de 180 V, un desfase entre el voltaje y la corriente de 4º y una intensidad de 0.497 A. Para monitorizar y adquirir las medidas del watímetro durante las pruebas de secado, se desarrolló una aplicación utilizando el código LabView™ de National Instruments. Por otra parte, el campo acústico generado en el interior de la cámara de secado se midió con un micrófono (1/8", sensibilidad de 1.06 mV/Pa, GRAS). De este modo se determinó el nivel de presión sonora medio al aplicar una potencia eléctrica al transductor de 75 W que en ausencia de flujo de aire fue de 154.3 dB.

Durante las experiencias de secado, se pesaron las muestras automáticamente a intervalos de tiempo preestablecidos gracias a dos sistemas neumáticos controlados con un PLC. La temperatura y la velocidad del aire de secado se controlaron utilizando un algoritmo PID. La temperatura y la humedad relativa del ambiente se registraron mediante un dispositivo FG120 provisto de una Pt100 y un sensor de humedad.

Experiencias de secado

Las experiencias de secado se planificaron con diferentes condiciones de proceso y materias primas. Cada grupo de experiencias se realizaron con (+US) y sin (-US) la aplicación de ultrasonidos.

Se prepararon muestras de zanahoria, piel de limón y piel de naranja siguiendo el siguiente procedimiento: se cortaron, lavaron, secaron, almacenaron y conservaron a 4 °C hasta cortarlas en forma siguiente: la zanahoria en cubos de 8.5 mm de lado, la piel del limón en láminas de 7 mm de espesor y la piel de la naranja en láminas de 6 mm de espesor. Posteriormente se colocaron en el interior de la cámara de secado utilizando dos sistemas portamuestras, el primero en forma de árbol y el segundo en bandejas con malla muy fina para evitar al máximo la perturbación del campo acústico. Las pruebas experimentales de secado consistieron en el seguimiento del peso de las muestras para evaluar los cambios en el contenido de humedad durante el proceso de secado. El contenido de humedad se midió siguiendo procedimientos estándar establecidos en la industria agroalimentaria [6].

Modelización de las cinéticas de secado

Se consideraron diferentes modelos difusionales para las diferentes geometrías utilizadas y considerando la resistencia externa a la transferencia de materia.

La resolución de los modelos se realizó a con un método implícito de diferencias finitas que fue programado en Matlab. Los parámetros cinéticos de los modelos se identificaron utilizando métodos de optimización. En todos los casos, el objetivo fue encontrar los valores de los parámetros cinéticos que minimizan la suma de las diferencias al cuadrado entre las humedades de las muestras determinadas experimentalmente y las predichas por el modelo. Los parámetros cinéticos identificados fueron la difusividad efectiva (D_e , m^2/s) y el coeficiente de transferencia de materia (k_e , $kg\ agua/m^2/s$).

A modo de ejemplo presentamos a continuación la ecuación que describe la transferencia de humedad para el caso de muestras de geometría laminar al considerar que la difusividad efectiva D_e es constante y que el material es isotrópico y homogéneo está dada por:

$$\frac{\partial W_p(x,t)}{\partial t} = D_e \left(\frac{\partial^2 W_p(x,t)}{\partial x^2} \right) \quad (1)$$

Donde W_p es el contenido de humedad local en base seca (d.b., $kg\ agua/kg\ materia\ seca$), x es la dirección del transporte y t el tiempo (s).

Para resolver la ec. (1) inicial se necesitan la condición inicial (ec. (2)) y las condiciones de contorno (ec. (3) y ec. (4)). De acuerdo a resultados anteriores [7-8], para la velocidad del aire usada en estos experimentos, 1m/s, la resistencia externa a la transferencia de materia es significativa y por tanto las condiciones de contorno deben ser consideradas.

$$W_p(x,0) = W_o \quad (2)$$

$$\frac{\partial W_p(x,t)}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

$$-D_e \rho_{ds} \frac{\partial W_p(x,t)}{\partial x} = k(\varphi_e(L,t) - \varphi_{air}) \quad (4)$$

Donde W_0 es el contenido inicial de humedad (base seca), ρ_{ds} es la densidad del sólido seco (kg/m^3), k es el coeficiente de transferencia de materia ($\text{kg agua/m}^2/\text{s}$) el cual determina la transferencia de agua desde la superficie del sólido al aire, ϕ_e es la humedad relativa de equilibrio en la capa de aire en contacto con la superficie del sólido (puntos caracterizados por la coordenada x igual a L) y ϕ_{air} la humedad relativa en el seno de la corriente e aire.

RESULTADOS Y DISCUSION

En todas las pruebas experimentales que se presentan a continuación, la velocidad del aire en el interior del secadero convectivo y su temperatura se mantuvieron fijas, a 1 m/s y 40 °C respectivamente. En primer lugar se estudió la influencia de la densidad de carga másica (materia total de las muestras empleadas por unidad de volumen) en los experimentos de secado. Para ello se emplearon cubos de zanahoria de 8.5 mm de lado. La densidad se dividió en 11 niveles, desde 12 hasta 120 kg/m^3 (12, 24, 36, 48, 60, 72, 84, 96, 108, 120). En todas estas pruebas la potencia aplicada al transductor se mantuvo fija en 75 W.

Las cinéticas fueron modelizadas usando el modelo de difusión para cubos de 8.5 mm de lado teniendo en cuenta la resistencia externa a la transferencia de materia. Los valores calculados de la difusividad efectiva D_e y del coeficiente de transferencia de materia k aparecen en la Tabla 1.

La densidad de carga másica no proporcionó una influencia significativa sobre la difusividad efectiva (D_e) de las muestras en los experimentos sin (-US) y con ultrasonidos (+US). La resistencia interna puede no estar afectada por esta variable ya que el movimiento del agua interna no depende del número de muestras colocadas en el interior del secador. Por ello, la influencia de la densidad de carga en el secado convectivo puede ser debida a la resistencia externa a la transferencia de materia como fue observado a partir de los datos obtenidos de la modelización del coeficiente de transferencia de materia (k) [9]. En la Figura 2 y en la Tabla 1 se aprecia un comportamiento similar en ambos experimentos sin (-US) y con aplicación de ultrasonidos. Igualmente se observa que la aplicación de la energía ultrasónica produce una mejora notable en el proceso de transferencia de materia durante el secado convectivo de las muestras de zanahoria. Los valores mas altos de k se corresponden a las densidades de carga másica más bajas.

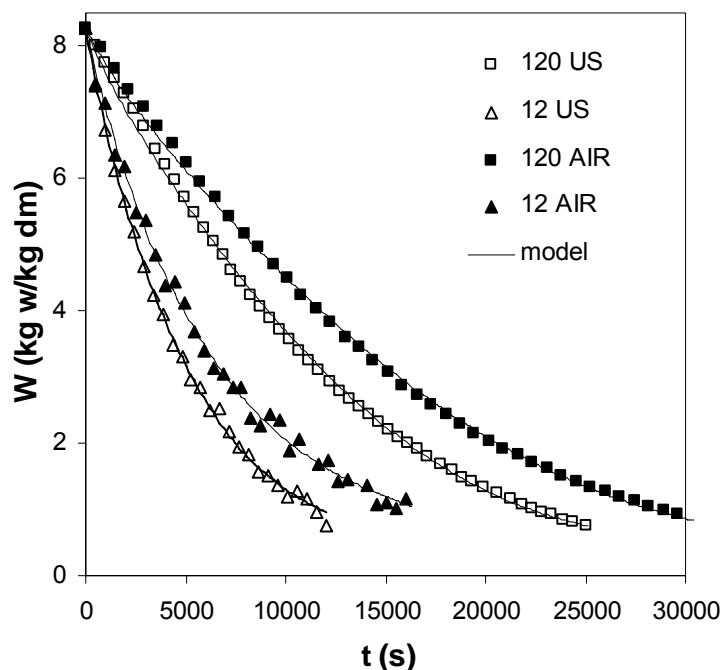


Figura 2. Cinéticas de secado de cubos de zanahoria (8.5 mm de lado) sin ultrasonidos (-US) y con aplicación de ultrasonidos (+US, 75W) a 40 °C, 1 m/s y diferentes densidad de carga másica: (12 kg/m^3 y 120 kg/m^3)

Tabla 1. Modelización de las cinéticas de secado de cubos de zanahoria.

Densidad de carga másica (kg/m ³)	-US		+US	
	D_e (10 ⁻¹⁰ m ² /s)	k (10 ⁻⁴ kg agua/m ² /s)	D_e (10 ⁻¹⁰ m ² /s)	k (10 ⁻⁴ kg agua/m ² /s)
12	1.84 ± 0.28	5.28 ± 1.46	2.51 ± 0.50	6.24 ± 0.99
24	2.11 ± 0.80	4.37 ± 1.07	2.76 ± 0.37	5.33 ± 0.54
36	2.20 ± 0.28	3.80 ± 0.80	3.06 ± 0.27	4.94 ± 0.83
42	2.32 ± 0.50	3.51 ± 0.20	2.82 ± 0.66	4.82 ± 0.69
48	1.97 ± 0.24	3.58 ± 0.71	2.54 ± 0.08	4.71 ± 0.91
60	1.87 ± 0.38	2.92 ± 0.51	2.53 ± 0.26	4.39 ± 0.28
72	1.78 ± 0.22	2.90 ± 0.46	2.69 ± 0.03	3.93 ± 0.22
84	1.66 ± 0.34	2.59 ± 0.20	3.20 ± 0.21	3.42 ± 0.55
96	2.37 ± 0.17	2.81 ± 0.36	3.46 ± 0.37	3.11 ± 0.60
108	2.31 ± 0.65	2.38 ± 0.18	3.27 ± 0.37	2.77 ± 0.21

Las cinéticas de secado de las láminas de piel de limón obtenidas al aplicar diferentes potencias ultrasónicas (10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 y 90 W) que se muestran en la Figura 3, sirvieron para estudiar el efecto de la potencia ultrasónica en el proceso.

Las cinéticas fueron modelizadas usando el modelo de difusión para láminas de 7 mm y teniendo en cuenta la resistencia externa a la transferencia de materia. Los valores calculados de la difusividad efectiva D_e que aparecen en la Tabla 2 son similares a otros encontrados en la literatura para este producto [7], análogamente los valores encontrados del coeficiente de transferencia de materia k son parecidos a los reportados en procesos de secado convectivo controlados por la resistencia externa [6].

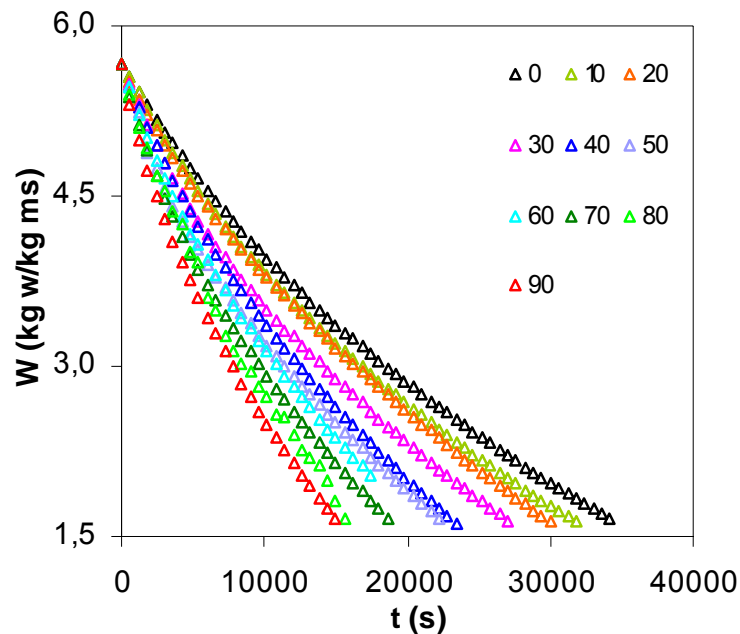


Figura 3. Cinéticas de secado de láminas de piel de limón (L = 7 mm) sin la aplicación de ultrasonidos (-US, 0 W) y aplicando diferentes potencias (+US, W), 40 °C y 1 m/s

Tabla 2. Modelización de las cinéticas de secado de láminas de piel de limón.

P (W)	D_e (10^{-10} m ² /s)	k (10^{-4} kg agua/m ² /s)
0	6.39 ± 0.23	18.50 ± 1.34
10	7.54 ± 0.58	18.97 ± 0.91
20	7.70 ± 0.58	20.43 ± 3.25
30	9.14 ± 0.45	24.40 ± 7.50
40	10.33 ± 0.35	24.73 ± 0.93
50	10.93 ± 0.88	29.93 ± 0.42
60	11.89 ± 0.92	34.67 ± 2.83
70	11.65 ± 0.37	39.13 ± 0.78
80	13.05 ± 0.67	37.10 ± 1.77
90	14.25 ± 0.43	42.70 ± 1.61

Finalmente presentamos en la Figura 4 las cinéticas de secado de láminas de piel de naranja de 6 mm de espesor. En los experimentos asistidos con ultrasonidos se aplicó la máxima potencia eléctrica al transductor, 90 W, lo que generó un campo acústico estacionario en el interior de la cámara de secado con un NPS medio de 154.3 dB. Las pruebas de secado con y sin la aplicación de los ultrasonidos se repitieron tres veces. Los experimentos se extendieron hasta que el peso de la muestra cayó un 70%.

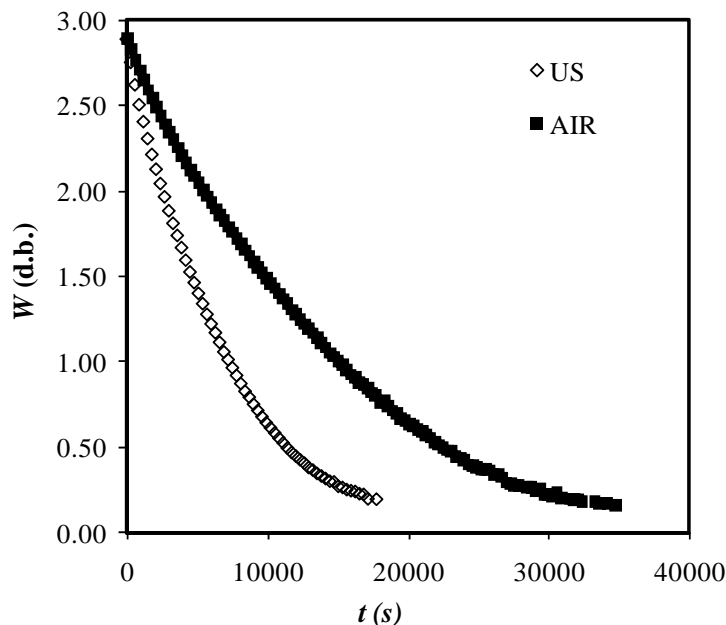


Figura 4. Cinéticas de secado de láminas de piel de naranja (L = 6 mm) sin la aplicación de ultrasonidos (-US) y aplicando una potencia eléctrica al transductor de 90 W (+US), 40 °C y 1m/s

Tabla 3. Modelado de las cinéticas de secado de láminas de piel de naranja

P (W)	D_e (10^{-9} m ² /s)	k (10^{-3} kg agua/m ² /s)	Tiempo de secado (s)	Energía (kWh)
0	4.04 ± 0.44	1.17 ± 0.05	35000	1.65
90	6.13 ± 0.94	2.43 ± 0.19	18000	1.20

Las cinéticas de secado con ultrasonidos fueron más rápidas que con aire solo. La aplicación de los ultrasonidos proporciona una reducción en el tiempo de secado superior al 45%. Este valor fue mayor que el que se obtuvo con otros productos, tales como la zanahoria [7], y muy similar a los experimentos con la piel del limón. Desde un punto de vista industrial, la reducción

en el tiempo de secado no solamente supone una mayor velocidad de producción sino también un importante ahorro energético. De acuerdo con los resultados encontrados en este trabajo y al dispositivo experimental empleado, el ahorro de energía fue del orden del 30% debido a la aplicación de los ultrasonidos tal y como se muestra en la Tabla 3. Por otra parte el modelo difusional proporciona una buena descripción de las cinéticas de secado, siendo los porcentajes de variancia en todos los casos superiores al 99%.

CONCLUSIONES

Se ha diseñado, construido y validado un sistema de secado convectivo por aire caliente asistido por ultrasonidos de potencia. El sistema ha permitido confirmar el efecto positivo de los ultrasonidos de potencia al mejorar los procesos de transferencia de materia en el secado de diferentes productos.

Se ha estudiado el efecto de la densidad de carga másica en las cinéticas de secado de cubos de zanahoria comprobando que esta no afecta a la resistencia interna del producto como se constata a través de los valores obtenidos de la difusividad relativa (D_e), pero si que afecta a la resistencia externa a través de los valores del coeficiente de transferencia de materia k .

Se ha obtenido una mejora en los procesos de transferencia de materia en muestras de piel de limón y de piel de naranja en torno al 45% mediante la aplicación de ultrasonidos y se ha estimado en el dispositivo experimental utilizado que los ultrasonidos producen además un ahorro energético en el proceso de secado en torno a un 30%. Desde un punto de vista industrial ambos efectos de los ultrasonidos avalan el potencial de los UdP en la industria agroalimentaria.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al MICINN la financiación del proyecto coordinado DPI2009-14549-C04-00 USTRAMAS, así como la de los subproyectos USAFDRY “Estudio del efecto de los ultrasonidos de potencia en procesos de transferencia de materia. Mejora de la liofilización a presión atmosférica” (DPI2009-14549-C04-04), y PUSO “Estudio de los efectos de los ultrasonidos de potencia en procesos de transferencia de masa. Diseño, desarrollo y validación de sistemas ultrasónicos de potencia” (DPI2009-14549-C04-01). Al proyecto PROMETEO/2010/62 de la Generalitat Valenciana.

REFERENCIAS

1. J.S. Cohen, y T.C.S. Yang. 1995. Progress in food dehydration. Trends in Food Science & Technology, 6, 20-25
2. J.A Gallego-Juárez, G. Rodríguez-Corral, J.C. Gálvez-Moraleda y T.S. Yang. 1999. A new high-intensity ultrasonic technology for food dehydration. Drying Technology, 17, 597-608
3. J.A. Gallego-Juárez, E. Riera, S. de la Fuente-Blanco, G. Rodríguez-Corral, V. M. Acosta-Aparicio y A. Blanco. 2007. Application of high-power ultrasound for dehydration of vegetables. Processes and Devices, 25, 1893-1901
4. J.A. Gallego, G. Rodríguez, V.M. Acosta y E. Riera. 2010. Power ultrasonic transducers with extensive radiators for industrial processing. Ultrasonic Sonochemistry, 17, 953-964
5. J.V. García-Pérez, J.A. Cárcel, S. de la Fuente y E. Riera. 2006. Ultrasonic drying of foodstuff in a fluidized bed. Parametric study. Ultrasonics, e539-e543
6. AOAC (1997). Official methods of analysis. Association of Official Analytical Chemists, Arlington, Virginia, USA
7. J.A. Cárcel, J.V. García-Pérez, E. Riera y A. Mulet. 2007. Influence of high intensity ultrasound on drying kinetics of persimmon. Drying Technology, 25, 185-193
8. J.V. García-Pérez, J.A. Cárcel, J. Benedito y A. Mulet. 2007. Power ultrasound mass transfer enhancement in food drying. Food and Bioproducts Processing, 85, 247-254

9. J.A. Cárcel, J.V. García-Pérez, E. Riera y A Mulet. 2010. Improvement of convective drying of carrot by applying power ultrasound. Influence of mass load density. Drying Technology (en prensa)