

## Desarrollo de un Sistema de Secado mediante Lecho Fluido Asistido por Ultrasonidos de Potencia

S. de la Fuente<sup>a</sup>, G. Rodríguez<sup>a</sup>, E. Riera<sup>a</sup>, J.A. Gallego<sup>a</sup>, A. Mulet<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Instituto de Acústica, CSIC, Serrano 144, 28006 Madrid, Spain [susana@ia.cetef.csic.es](mailto:susana@ia.cetef.csic.es)

<sup>b</sup> Departamento de Tecnología de Alimentos, Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera s/n

**RESUMEN:** La aplicación de los ultrasonidos de potencia en la deshidratación de materiales porosos puede ser muy efectiva en aquellos procesos en los que se tratan materiales altamente sensibles al calor, como es el caso de los productos alimenticios. De hecho, las vibraciones ultrasónicas de elevada intensidad son capaces de incrementar los procesos de transferencia de masa y calor en los materiales. La energía ultrasónica puede ser aplicada sola o combinada con algún otro tipo de energía, tal como el aire caliente. En este caso los ultrasonidos ayudan en la reducción de la temperatura y del tiempo de tratamiento.

El objetivo de este trabajo es estudiar la aplicación de los ultrasonidos de alta potencia a los sistemas de secado por lecho fluido, donde las muestras son mantenidas en movimiento dentro de una cámara cilíndrica debido al arrastre causado por la aplicación de un flujo ascendente de aire caliente. Con el fin de aplicar un intenso campo acústico, se utiliza un radiador ultrasónico como cámara de tratamiento que permita aumentar la velocidad de secado, sin afectar a la expansión del lecho fluido/partícula. Para ello, se ha diseñado, desarrollado y caracterizado un transductor ultrasónico, con el que se han obtenido campos acústicos de elevada intensidad dentro de la cámara para rangos medios de potencia aplicada, confirmando de este modo la utilización de este sistema combinado.

**ABSTRACT:** The application of high power ultrasound for dehydration of porous materials may be very effective in processes in which heat-sensitive materials such as foodstuffs have to be treated. In fact, high-intensity ultrasonic vibrations are capable of increasing heat and mass transfer processes in materials. The application of ultrasonic energy can be made alone or in combination with other kind of energies such as hot-air. In this case, ultrasound helps in reducing temperature or treatment time.

This work investigates the fluidized-bed drier process assisted by a power ultrasonic system. In a fluidized-bed drier, the samples are kept in motion inside a cylindrical chamber due to drag by the upwards hot-air flow. To apply an intense ultrasonic field into the treatment chamber, we use such a chamber as an ultrasonic radiator that may enhance the drying rate without affecting to the expansion of the fluid/particle bed. Following this objective, an ultrasonic transducer has been designed, developed and tested. High-intensity acoustic fields inside the chamber has been obtained with a relatively medium power applied, confirming the use of this combined system.

### 1. INTRODUCCIÓN

Una de las técnicas convencionales de secado por aire caliente, normalmente utilizada en la industria alimentaria, son los sistemas por lecho fluido. Estos sistemas mantienen en suspensión un producto troceado dentro de una cámara de tratamiento mediante una corriente de aire caliente ascendente. De este modo se consigue secar de forma rápida, homogénea y controlada el producto alimenticio. El incremento de la velocidad del aire induce el aumento a

su vez de las fuerzas de resistencia ejercidas sobre las partículas, originando que estas últimas se expandan y se reordenen de tal forma que ofrezcan una mínima resistencia al paso del fluido. Con sucesivos incrementos de la velocidad, se alcanza una etapa en la que las fuerzas de resistencia ejercidas sobre las partículas son suficientes para soportar el peso de las mismas. Este es el punto de fluidización incipiente, en el que el sistema fluido/partícula empieza a comportarse como un líquido. Al principio de la fluidización el lecho está expandido de forma uniforme, pero para crecientes velocidades del fluido, el sistema llega a ser inestable, formándose cavidades que contienen pocas partículas sólidas. Esta situación es similar a las burbujas de vapor que se forman en un líquido hirviendo. Estas cavidades o burbujas son las responsables de la recirculación de las partículas dentro del lecho fluido, estando relacionada esta circulación con los procesos de transferencia de masa y de calor en este tipo de sistemas [1].

Entre las principales ventajas que presenta esta técnica de secado, destacar una elevada área superficial de contacto entre el sólido y el fluido. Se obtienen así altas tasas de transferencia de masa y de calor entre ambos, y como consecuencia elevadas intensidades de secado en el producto. Otras ventajas destacadas son la comparativa facilidad con la que los sólidos fluidizados pueden ser manejados, la capacidad de separación de las partículas ya secas y la elevada conductividad térmica interna efectiva en el interior de la cámara de tratamiento.

A su vez, como limitaciones intrínsecas a estos sistemas destacar la elevada tendencia al desgaste y a la aglomeración de las partículas fluidizadas. El primer caso es provocado por la degradación de las mismas, dando lugar a una pérdida de partículas que abandonan el lecho. El segundo caso induce la aglomeración de partículas, de tamaño excesivo para que puedan fluidizar, provocando de este modo su asentamiento o deposición. Resaltar también las limitaciones operativas existentes tanto en el intervalo de velocidades del aire como en el tamaño de las partículas exigido para que estas puedan estar suspendidas en el lecho fluido.

### **1.1. Aplicación de ultrasonidos de potencia en los sistemas de secado por lecho fluido**

La deshidratación ultrasónica representa un medio potencial muy importante en aquellas aplicaciones en las que se precise evitar los efectos de la temperatura para preservar la calidad del producto, como es el caso de los alimentos. Una de las principales ventajas que presenta la tecnología ultrasónica es la posibilidad de producir una separación entre la fase líquida y la matriz sólida del alimento sin necesidad de forzar un cambio de fase del líquido ni producir calentamiento [2]. De hecho, las vibraciones ultrasónicas de alta intensidad afectan a los procesos de transferencia de masa, incrementando la tasa de secado de los alimentos. En esta línea, los procesos de secado por aire caliente asistidos por los ultrasonidos de potencia permiten aplicar temperaturas más bajas, acortar los tiempos de tratamiento, y reducir el consumo energético.

Por todo ello, hay un especial interés en la investigación de la aplicación de ultrasonidos de potencia en los sistemas de secado por lecho fluido. Además de las ventajas ya citadas que se esperan obtener de este sistema combinado, es necesario destacar que la energía ultrasónica puede incrementar la habilidad de las partículas para fluidizar, evitando tanto el asentamiento como la aglomeración de las mismas, y mejorando por tanto, la estructura del lecho. Además debido al incremento en la tasa de secado de los materiales, el aire caliente puede fluir a

velocidades menores, consiguiendo disminuir la velocidad mínima necesaria para el inicio de la fluidización.

En este trabajo se presenta el diseño, desarrollo y caracterización de un transductor ultrasónico, así como su posterior adaptación a un sistema de secado por lecho fluido, con el objetivo de incrementar la tasa de secado sin afectar a la estructura del lecho aire/partícula.

En la Figura 1 se presenta un esquema de un sistema de deshidratación por lecho fluido.

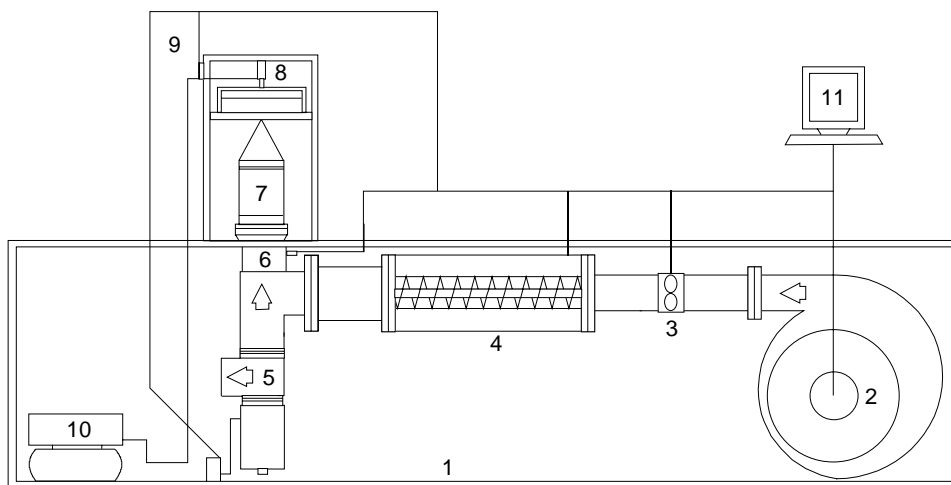


Figura 1. *Esquema de un sistema de deshidratación por lecho fluido: 1 armazón; 2 ventilador; 3 anemómetro; 4 elementos calefactores; 5 válvula neumática; 6 control y medida de la temperatura, 7 recipiente de las muestras; 8 balanza; 9 elevador; 10 aire comprimido, 11 PC.*

El recipiente del lecho fluido donde se suspende el material generalmente es de forma cilíndrica o cilíndrica-cónica. El objetivo a desarrollar es agregar un campo ultrasónico de alta intensidad al lecho fluido que acelere el proceso de secado. De este modo, se ha rediseñado la cámara que tiene forma cilíndrica para que vibre en un modo de resonancia de tal forma que permita obtener, por la propia vibración, un campo acústico de alta intensidad en su interior.

## 2. SISTEMA GENERADOR DE ULTRASONIDOS DE POTENCIA

### 2.1. Criterios de diseño

Basándose en los objetivos fijados, se ha seleccionado un transductor consistente en un cilindro vibrando a flexión, en cuyo interior circulara el lecho fluido, excitado por un vibrador compuesto por un transductor sándwich y un amplificador mecánico.

El vibrador descrito es similar a los utilizados en diversos proyectos de investigación por el Grupo de Ultrasonidos de Potencia del Instituto de Acústica, constituyendo el diseño del transductor cilíndrico, que radia energía al lecho fluido, una de las aportaciones nuevas de este trabajo. Su construcción se ha llevado a cabo en base a los cálculos de diseño realizados

en 2D por métodos numéricos con el código ANSYS, y en su diseño se han tenido en cuenta los siguientes criterios:

- Material: Se ha seleccionado el aluminio debido a sus óptimas propiedades elásticas, presentando a su vez menos problemas térmicos que otros materiales con propiedades similares.
- Geometría: El objetivo buscado es maximizar la energía radiada al lecho fluido mediante un sistema altamente resonante. Para ello, es necesario hacer resonar tanto el cilindro metálico como el volumen de aire contenido en su interior. De esta forma se han tenido en cuenta las siguientes consideraciones:

- Longitud, espesor y radio externo del cilindro → Resonancia cilindro metálico  
Con el fin de obtener un modo propio a la frecuencia de trabajo con un cierto número de líneas nodales en la dirección axial y ninguno en la dirección radial. Así se produce un efecto homogéneo en el lecho fluido, ya que todas las partículas atraviesan el mismo número de zonas con máxima intensidad acústica. Por tanto, el radiador ultrasónico desarrollado consiste en una cámara cilíndrica en aluminio de diámetro externo 110mm, diámetro interno 100mm y longitud 310mm. Para la frecuencia prevista de trabajo, 22.268kHz, el modo de vibración teórico contiene 12 líneas nodales paralelas (ver Figura 2).

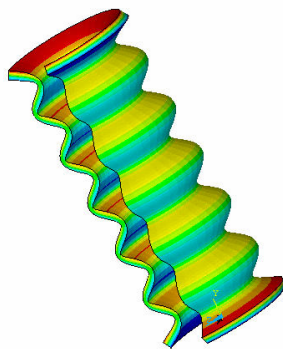


Figura 2. Simulación con elementos finitos del modo de vibración de la cámara cilíndrica.



Figura 3. Disposición del lecho fluido en el interior del cilindro cuando se aplica potencia al transductor.

- Radio Interno del cilindro → Resonancia volumen de aire  
Con el fin de maximizar la energía radiada al medio, se busca un modo del volumen de aire que coincida con la frecuencia de trabajo del cilindro metálico. Así, se calculó mediante ANSYS el campo acústico teórico generado en su interior para una excitación de 5 micras aplicada en uno de sus extremos. El resultado fue la obtención de un valor promedio del nivel de presión sonora (NPS) de 156.35dB. En la Figura 3 se muestra la distribución de las partículas en el interior del cilindro cuando se aplica potencia al transductor. El aspecto final del dispositivo ultrasónico se presenta en la Figura 4.

## 2.2. Descripción del sistema generador de ultrasonidos de potencia

El sistema de transducción electroacústico se completa con una unidad de generación electrónica, cuya función es seguir en frecuencia las variaciones de la resonancia del transductor, manteniendo un desfase mínimo entre la tensión eléctrica y la corriente de excitación. Se utiliza un sistema de transformación de impedancias y una bobina de compensación para transferir la máxima energía eléctrica desde la unidad de generación electrónica al transductor. Para controlar los parámetros de la señal de excitación (voltaje, corriente, fase, potencia aplicada) se utilizó un medidor de potencia digital. El sistema ultrasónico descrito se muestra esquemáticamente en la Figura 5.

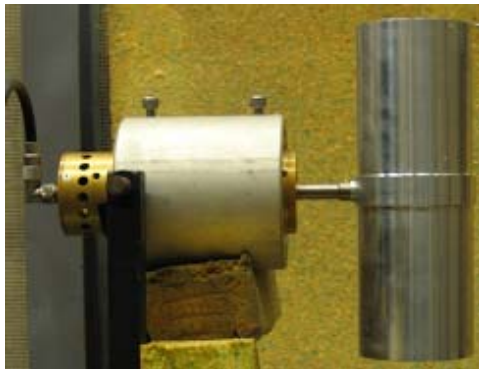


Figura 4. *Dispositivo ultrasónico (transductor y vibrador) y soporte.*

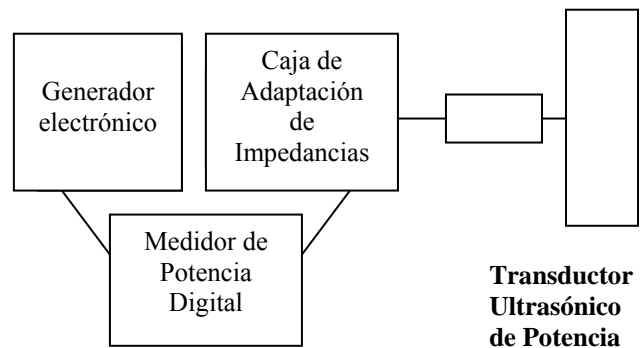


Figura 5. *Esquema del sistema ultrasónico completo utilizado.*

## 3. CARACTERIZACIÓN DEL DISPOSITIVO ULTRASÓNICO

### 3.1. Medidas eléctricas

El transductor ultrasónico es caracterizado desde un punto de vista eléctrico utilizando un Puente de Impedancias. Los parámetros más relevantes son la frecuencia ( $F_r$ ) del modo de trabajo, su conductancia ( $G$ ), que permite realizar una correcta adaptación de impedancias ( $Z$ ), la capacidad interelectrónica ( $C_o$ ) que permite calcular la bobina de compensación ( $L_o$ ) y así eliminar la parte reactiva de la impedancia del transductor. Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. *Parámetros obtenidos en el Puente de Impedancias*

Fr[kHz]	G[mS]	Z [Ω]	C <sub>o</sub> [nF]	L <sub>o</sub> [mH]
21.9	2.7	365	8	6

Estos valores fueron confirmados posteriormente en condiciones de trabajo, mediante un medidor de potencia digital. En este último caso, los resultados obtenidos son más exactos ya que muestran tanto los valores de los parámetros de la señal de excitación del transductor (Frecuencia de Resonancia ( $F_r$ ), Voltaje (V), Corriente (I), Fase, Potencia (P)) en condiciones reales de funcionamiento, así como sus variaciones. Los valores obtenidos en este caso, para un valor de la potencia dado, se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. *Parámetros obtenidos en condiciones de trabajo*

P[W]	Fr[kHz]	Fase[°]	V[V]	I[A]	Z[Ω]
90	21.82	4	60	1.55	329

A su vez, se estudió la variación de estos parámetros tanto con el tiempo como con la potencia. Se observó que al aumentar la potencia, la resistencia del modo resonante aumenta ligeramente, mientras que la frecuencia correspondiente disminuye. Por el contrario, para potencias medias (70-90W) y tras cierto tiempo transcurrido se observó una disminución de la frecuencia y de la impedancia del modo resonante, así como un calentamiento del transductor. Este es un comportamiento típicamente no lineal de los sistemas ultrasónicos de potencia.

### 3.2. Medidas Acústicas

Se ha llevado a cabo un estudio del rendimiento electroacústico del transductor desarrollado. Para ello, se ha obtenido una correlación entre la potencia eléctrica aplicada y el campo acústico generado en el interior del cilindro vibrante. El dispositivo experimental utilizado se muestra esquemáticamente en la Figura 6. Consta de los siguientes componentes: Etapa de generación, descrita anteriormente y compuesta por: (i) transductor ultrasónico de potencia, caja de adaptación de impedancias y unidad de generación electrónica. Con el fin de controlar los parámetros de la señal de excitación se utilizó también un medidor de potencia digital. Etapa de medida del campo acústico, compuesta por: (ii) micrófono GRAS de 1/8'' con sensibilidad  $S = 1.06\text{mV/Pa}$ , (iii) amplificador de medida, (iv) sistema de control y programación del movimiento del micrófono.

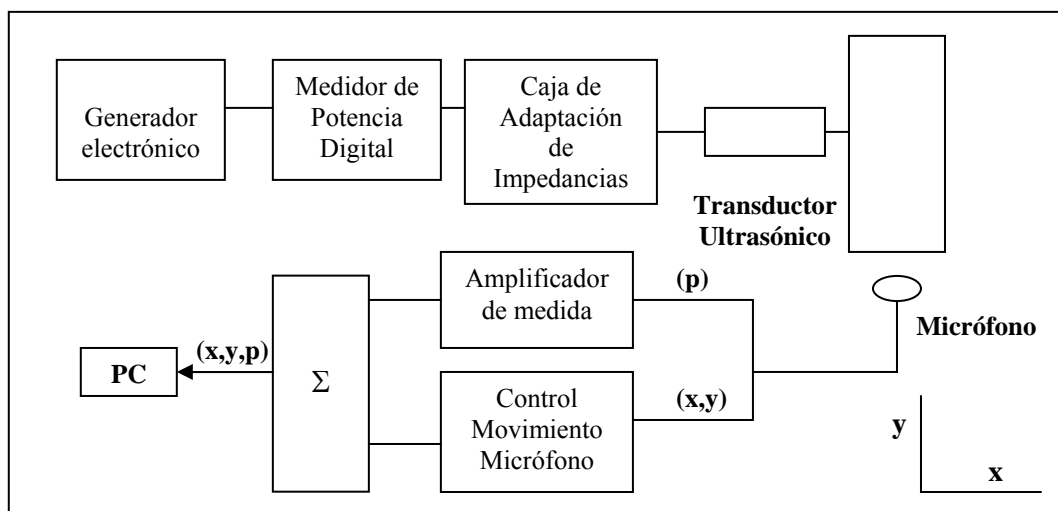


Figura 6. *Esquema del dispositivo experimental utilizado y de los sistemas de control utilizados en el proceso de medida del campo acústico.*

Debido a la simetría interior del cilindro se midieron los niveles de presión sonora (NPS) a lo largo de un plano cuyo lado corto coincide con el diámetro interior del tubo ( $L_x=90\text{mm}$ ), y cuyo lado largo es igual a la longitud del mismo ( $L_y=310\text{mm}$ ). En la Figura 7 se presenta una

imagen de la distribución del campo acústico medido en el interior del cilindro cuando se aplica al transductor una potencia de 75W, obteniéndose un valor promedio de NPS igual a 153.3dB. Este valor se ajusta bastante bien al valor predicho por ANSYS, si bien hay que tener en cuenta que la excitación no es igual, que el modelo esta desarrollado en 2D y que el espesor del cilindro no es uniforme exteriormente, característica que no es contemplada en el método numérico.

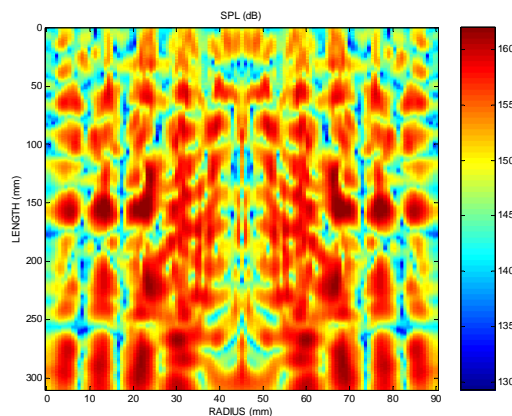


Figura 7. *Distribución del campo acústico en el interior del cilindro vibrante cuando es excitado con una potencia = 75W*

#### 4. ADAPTACIÓN AL SISTEMA DE SECADO POR LECHO FLUIDO

Una vez diseñado y caracterizado el transductor ultrasónico de potencia, es necesario su ensamblaje a un sistema de secado por lecho fluido. Para ello se sustituye la cámara de tratamiento, en donde está suspendido el material en régimen de lecho fluido, por el transductor desarrollado, de tal forma que por su propia vibración permita obtener un campo acústico de alta intensidad en su interior, que no afecte a la expansión del lecho en su interior, y que además contribuya al proceso de secado. La Figura 8 muestra el sistema combinado descrito.

Las ventajas que se esperan obtener con este sistema combinado consisten principalmente en la aceleración del proceso de secado, mediante los efectos de viento acústico, presión de radiación y presiones y depresiones acústicas periódicas, al mismo tiempo que se permite la aplicación de temperaturas más bajas. Todo ello, repercute en la preservación de la calidad del producto, en la disminución de los tiempos de tratamiento, y en la reducción del consumo energético.

En la actualidad se están llevando a cabo pruebas para acoplar el sistema ultrasónico desarrollado a un sistema de deshidratación por lecho fluido, con el que trabaja el Grupo del Departamento de Tecnología de Alimentos, en la Universidad Politécnica de Valencia, destinadas a comprobar la viabilidad de este tipo de sistema de deshidratación por lecho fluido asistido por ultrasonidos de alta intensidad. En esta línea, es necesario resaltar que las primeras pruebas desarrolladas son favorables, validando las ventajas descritas con este sistema combinado.

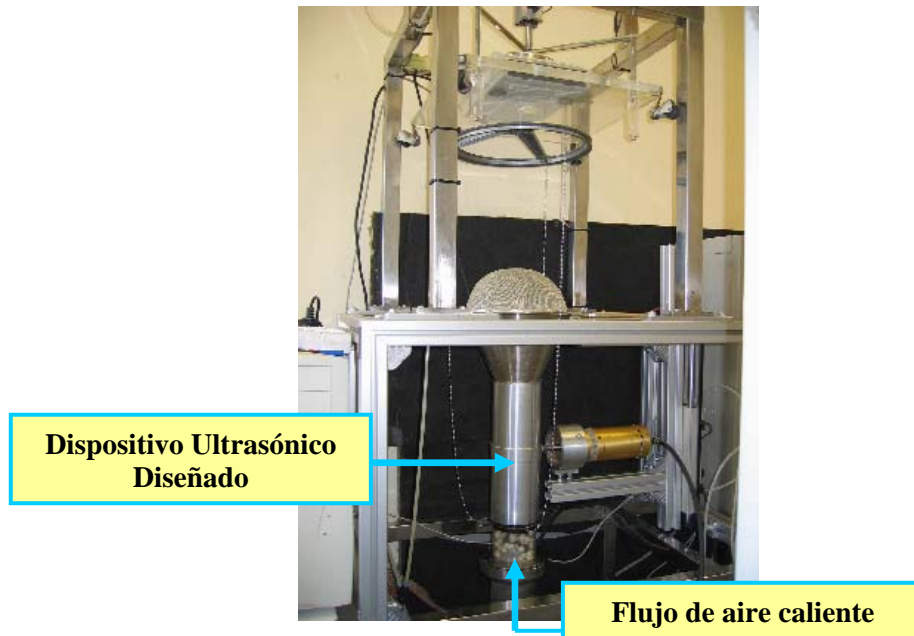


Figura 8. Sistema de secado por lecho fluido asistido por ultrasonidos de potencia.

## 5. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un sistema de secado por lecho fluido asistido por ultrasonidos de potencia. Para ello, se ha diseñado, desarrollado y caracterizado un transductor ultrasónico que sustituirá a la cámara de tratamiento utilizada en los sistemas de secado convencionales por lecho fluido. Las ventajas que se esperan obtener de la combinación de estas dos técnicas de secado están dirigidas a acelerar los procesos de transferencia de masa a temperaturas más bajas que las utilizadas en los sistemas convencionales de secado por aire caliente. En la actualidad, se está comprobando la viabilidad de este sistema combinado.

## RECONOCIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por los Proyectos de Investigación del Plan Nacional SECUS-AGL2001-2774-CO5-02 y MACROSON-DPI2002-03409.

## REFERENCIAS

- [1] J. S. M. Botterill, *Fluid-Bed Heat Transfer, Gas-Fluidized bed behaviour and its influence on bed thermal properties*. New York: Academic Press (1975).
- [2] J.A. Gallego, F. Vázquez, T.S. Yang, J.C. Gálvez, G. Rodríguez, 1996. *Procede et dispositif de déshydratation*. Patente Internacional nº PCT/EP9601935