

# UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA  
AGRONÒMICA I DEL MEDI NATURAL

GRADO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE LOS ALIMENTOS



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

**PUESTA A PUNTO DE SECADERO A BAJA TEMPERATURA  
ASISTIDO POR ULTRASONIDOS CON TRANSDUCTOR DE  
PLATO ESCALONADO. INFLUENCIA DE LA POTENCIA  
APLICADA EN LA CINÉTICA DE SECADO DE MANZANA.**

CURSO ACADÉMICO 2017-2018

## TRABAJO FIN DE GRADO

**Autor:** D. José Prósper Ortega

**Director:** Prof. D. Juan Andrés Cárcel Carrión  
Valencia, septiembre 2018.



## TÍTULO

Puesta a punto de secadero a baja temperatura asistido por ultrasonidos con transductor de plato escalonado. Influencia de la potencia aplicada en la cinética de secado de manzana.

## RESUMEN

Puesta a punto de secadero a baja temperatura asistido por ultrasonidos con transductor de plato escalonado. Influencia de la potencia aplicada en la cinética de secado de manzana

La aplicación de ultrasonidos de potencia ha demostrado ser un método eficaz para la intensificación de los procesos convectivos de secado. La forma de aplicación de ultrasonidos en la mayor parte de los trabajos publicados es mediante cámaras vibrantes. En el presente trabajo se abordará la puesta a punto de un nuevo secadero para baja temperatura (inferior a la ambiental) asistido por ultrasonidos, provisto de un transductor de plato escalonado. Para ello, se determinará experimentalmente la cinética de secado de manzana (Granny Smith) en diferentes condiciones. Las experiencias se realizarán con muestras en forma de lámina, de 3 mm de espesor, obtenidas con una mandolina en V. Durante todo el proceso se mantendrá una humedad relativa inferior al 5% en la cámara de secado. Todas las experiencias se realizarán con una velocidad de aire constante de 1 m/s y una temperatura  $-15 \pm 1$  °C. Se realizarán secados sin la aplicación de ultrasonidos y con ultrasonidos a 4 potencias ultrasónicas distintas. Cada condición de secado se realizará por triplicado. Una vez obtenidas las cinéticas de secado, se procederá a la modelización de éstas con lo que se obtendrán parámetros cinéticos como la difusividad. Esto permitirá la cuantificación de la influencia de la aplicación de ultrasonidos sobre el tiempo de secado y cómo afecta la potencia ultrasónica aplicada al proceso.

### Palabras clave

Intensificación, ultrasónico, difusión, deshidratación, liofilización

**Autor:** D. José Prósper Ortega

**Director:** Prof. D. Juan Andrés Cárcel Carrión

Valencia, septiembre 2018.

## **TITLE**

Tuning of a low temperature dryer assisted by ultrasound provided with a stepped plate transducer. Influence of the applied power on apple drying kinetics.

## **ABSTRACT**

Tuning of a low temperature dryer assisted by ultrasound provided with a stepped plate transducer. Influence of the applied power on apple drying kinetics.

The application of power ultrasound has proven to be an effective method for the intensification of convective drying processes. The most popular way to applicate ultrasound is using vibrating cameras. In the present work, it will address the development of a new dryer for low temperature (below room temperature) assisted by ultrasound, equipped with a stepped plate transducer. To do this, apple drying kinetics (Granny Smith) under different conditions will be experimentally determined. The experiments will be carried out with samples of slab geometry, 3 mm thickness, obtained with a V mandolin. During the whole process, a relative humidity of less than 5% will be maintained in the drying chamber. All the experiments will be carried out with a constant air velocity of 1 m / s and a temperature  $-15 \pm 1$  °C. They will be driven without the application of ultrasound and with ultrasound at 4 different ultrasonic powers. Each drying condition will be done in triplicate. Once the drying kinetics have been obtained, they will be modeled to obtain kinetic parameters such as diffusivity. This will allow the quantification of the influence of the application of ultrasound on the drying time and how it affects the ultrasonic power applied to the process.

## **Keywords**

Intensification, ultrasonic, diffusion, dehydration, freeze-drying.

**Author:** D. José Prósper Ortega  
**Director:** Prof. D. Juan Andrés Cárcel Carrión  
Valencia, September 2018.

## **TÍTOL**

Posada a punt d'un sequer a baixa temperatura assistit per ultrasons amb transductor de plat escalonat. Influència de la potència aplicada en la cinètica d'assecatge de poma

## **RESUM**

Posada a punt d'un sequer a baixa temperatura assistit per ultrasons amb transductor de plat escalonat. Influència de la potència aplicada en la cinètica d'assecatge de poma.

L'aplicació d'ultrasons de potència ha demostrat ser un mètode eficaç per a la intensificació dels processos convectius d'assecatge. La forma d'aplicació d'ultrasons en la major part dels treballs publicats és mitjançant càmeres vibrants. En el present treball s'abordarà la posada a punt d'un nou sequer per a baixa temperatura (inferior a l'ambiental) assistit per ultrasons, proveït d'un transductor de plat escalonat. Per a això, es determinarà experimentalment la cinètica d'assecatge de poma (Granny Smith) en diferents condicions. Les experiències es realitzaran amb mostres en forma de làmina, de 3 mm de gruix, obtingudes amb una mandolina en V. Durant tot el procés es mantindrà una humitat relativa inferior al 5% a la cambra d'assecatge. Totes les experiències es realitzaran amb una velocitat d'aire constant d'1 m/s i una temperatura  $-15 \pm 1$  °C. Es realitzaran assecats sense l'aplicació d'ultrasons i amb ultrasons a 4 potències ultrasòniques diferents. Cada condició d'assecatge es realitzarà per triplicat. Una vegada obtingudes les cinètiques d'assecatge, es procedirà a la modelització d'aquestes amb el que s'obtindran paràmetres cinètics com la difusivitat. Això permetrà la quantificació de la influència de l'aplicació d'ultrasons sobre el temps d'assecatge i com afecta la potència ultrasònica aplicada al procés.

### **Paraules clau**

Intensificació, ultrasons, difusió, deshidratació, liofilització.

**Autor:** D. José Prósper Ortega

**Director:** Prof. D. Juan Andrés Cárcel Carrión

València, setembre 2018.

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero dar las gracias a mi tutor, Juan Andrés Cárcel por dejarme formar parte de este proyecto el cual me ha ayudado a aprender nuevos conceptos. Darle las gracias por ayudarme y orientarme siempre que lo he necesitado. También me gustaría darle las gracias a Ramón Peña Cerveró por estar día a día en el laboratorio siempre atento ante cualquier contratiempo para solucionarlo.

# ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Manzana como materia prima.....	1
1.2 Secado de alimentos.....	2
1.3 Ultrasonidos.....	4
1.4 Equipos para la aplicación de ultrasonidos.....	5
1.5 Ultrasonidos en el secado de alimentos.....	7
<b>2 OBJETIVOS.....</b>	<b>9</b>
<b>3 MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>10</b>
3.1 Materia prima.....	10
3.2 Determinación de la humedad y actividad de agua.....	11
3.3 Equipo de secado.....	13
3.4 Experiencias de secado.....	17
3.5 Modelización de las cinéticas de secado.....	17
<b>4 RESULTADOS Y DISCURSIÓN.....</b>	<b>19</b>
4.1 Humedad inicial y actividad de agua.....	19
4.2 Resultados experimentales de secado.....	20
4.2.1 Modelización de las cinéticas de secado.....	22
<b>5 CONCLUSIONES.....</b>	<b>28</b>
<b>6 BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>29</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

## 1. INTRODUCCIÓN

**Figura 1.1.** Gráfica que representa la velocidad de degradación relativa en función de la actividad de agua.....3

**Figura 1.2.** Diagrama de un secadero convectivo asistido por ultrasonidos (Santacatalina et al., 2016). 1. Ventilador; 2. Pt-100; 3. Sensor de humedad relativa y temperatura; 4. Anemómetro; 5. Transductor ultrasónico; 6. Cilindro vibrante; 7. Portamuestras; 8. Tubo retráctil; 9. Mecanismo de desplazamiento vertical; 10. Módulo de pesada; 11. Intercambiador de calor; 12. Resistencia para control de temperatura; 13. Material desecante; 14. Detalles de la bandeja de carga de muestra.....7

## 3. MATERIALES Y MÉTODOS

**Figura 3.1.** Mandolina usada para laminar las manzanas.....10

**Figura 3.2.** Muestras envueltas en papel del film y cubiertas con un plástico para evitar pérdidas de humedad.....11

**Figura 3.3.** Estufa usada para la determinación del contenido de humedad de las muestras.....11

**Figura 3.4.** Equipo usado para la determinación de la  $a_w$  de las muestras después del secado.....12

**Figura 3.5.** Esquema del secadero convectivo asistido con ultrasonidos: 1. Ventilador; 2. Resistencia para el control de la temperatura; 3. Soplante de recirculación; 4. Sistema de evaporación de la cámara; 5. Plato de ultrasonidos; 6. Sistema de pesado y portamuestras; 7. Anemómetro; 8. Sonda de humedad; 9. Sonda de temperatura; 10. Ventana de acceso al portamuestras; 11. Desecador; 12. Puerta de entrada a la cámara.....13

**Figura 3.6.** Muestras colocadas sobre el portamuestras antes de empezar la operación de secado.....15

**Figura 3.7.** Muestras colocadas sobre el portamuestras después de la operación de secado.....16

**Figura 3.8.** Pantalla del ordenador para la selección y control de las variables de la operación de secado.....16

#### **4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

**Figura 4.1.** Representación de los kg agua/ kg m.s. en función del tiempo de las 3 experiencias llevadas a cabo sin la aplicación de ultrasonidos.....20

**Figura 4.2.** Grafica que representa los kg agua/kg materia seca en función del tiempo de las distintas potencias ultrasónicas aplicadas (US50; US100; US150) y las experiencias SUS.....21

**Figura 4.3.** Datos experimentales y modelización de cinéticas de secado de láminas de manzana (A, SinUS; B. US50; C. US100; D. US150).....24

**Figura 4.4.** Curvas obtenidas de la modelización de las cinéticas de secado SinUS y a distintas potencias ultrasónicas (50W; 100W; 150W) de láminas de manzana.....26

**Figura 4.5.** Relación entre la difusividad efectiva identificada mediante el modelo difusivo y potencia acústica aplicada para el secado de láminas de manzana a diferentes potencias (SUS, US50, US100, US150).

### **ÍNDICE DE TABLAS**

#### **1. INTRODUCCIÓN**

**Tabla 1.1.** Composición nutricional de la manzana Granny Smith por cada 100g (Eroski Consumer, 2018).....2

#### **4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

**Tabla. 4.1.** Contenido medio de humedad y desviación estándar de las muestras después del secado en las diferentes condiciones ensayadas y valores

de la actividad de agua con sus respectivas desviaciones a las distintas potencias ultrasónicas ensayadas.....19

**Tabla 4.2.** Tiempo medio que necesitaron las muestras de manzana en alcanzar una humedad de 0.5 kg agua/kg m.s. en las condiciones de secado ensayadas.....20

**Tabla 4.3.** Difusividad efectiva identificada ( $D_e$ ) a través del ajuste del modelo de las experiencias de secado de manzana realizadas sin aplicación ultrasonidos (SUS) y con aplicación a distintas potencia: 50, 10 y 150 W (US50, US 100 Y US150 respectivamente). Porcentaje de varianza explicada (%VAR) por el modelo.....23

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Manzana como materia prima.

La familia de las rosáceas incluye aproximadamente 3400 especies repartidas alrededor de todo el mundo. Esta familia es importante porque incluye muchas especies económicamente importantes como *Malus* (manzanas), *Pyrus* (peras), *Prunus* (ciruelas, cerezas, almendras, albaricoques), *Rubus* (frambuesas, moras) y *Fragaria* (fresas) (Jia et al., 2015). La manzana (Shen et al., 2017) es una de las frutas más producidas en el mundo. Se consume tanto como fruta fresca como de manera procesada. Así, se puede encontrar en productos como mermeladas, zumos o en numerosos alimentos como preparados para el desayuno, alimentos funcionales o comida instantánea para bebés, en muchos de los cuales, se utiliza como ingrediente en forma deshidratada (Santacatalina et al., 2016). Para consumo en fresco, excepto la variedad Golden Supreme, que está disponible desde agosto a noviembre, o la Golden Delicious, que se encuentra prácticamente todo el año, la mayoría de las variedades se pueden encontrar en el mercado desde septiembre hasta junio, (Fen, 2007).

La manzana es una de las frutas más completas y enriquecedoras para la dieta. Contiene más de un 85% de agua (Eroski consumer, 2018), además de cantidades apreciables de fibra, tanto soluble como insoluble, siendo esta última la más abundante. Esto convierte a esta fruta en un eficaz regulador de enfermedades del intestino grueso (estreñimiento/diarrea). La fibra soluble (pectina) tiene por su parte, actividad hipocolesterolémica. Es una importante fuente de flavonoides diversos como los flavonoles, catequinas y procianidinas. La estructura química de las catequinas difieren ligeramente de la de otros flavonoides pero comparten con ellos sus propiedades antioxidantes. Además contiene hidratos de carbono fundamentalmente en forma de azúcares como fructosa, glucosa y sacarosa (Fen, 2007). Todos estos compuestos han demostrado tener efectos interesantes para la salud como contribuir a la prevención del cáncer, asma y disfunción pulmonar, enfermedades cardiovasculares, enfermedad de Alzheimer, disminución del envejecimiento normal, control de peso y diabetes (Kyung Hyun et al., 2016).

**Tabla 1.1.** Composición nutricional de la manzana Granny Smith por cada 100g (Eroski Consumer, 2018)

Calorías	41,5
Hidratos de carbono (g)	10,5
Fibra (g)	1,5
Potasio (mg)	110
Magnesio (mg)	4
Provitamina A (mcg)	1,5
Vitamina C (mg)	4
Vitamina E (mg)	0,5

En los últimos estudios registrados sobre el consumo de manzana se puede observar que durante 2016 descendió de forma significativa la compra de manzanas en los hogares españoles (-5,3%). El consumo per cápita fue de 10,86 kilos por persona y año. El perfil de hogar consumidor de manzanas, al igual que en plátanos y naranjas, se situó principalmente en hogares adultos. Galicia, País Vasco y Asturias se sitúan como las comunidades autónomas más intensivas en consumo, mientras que La Rioja, Castilla la Mancha y la Comunidad Valenciana se situaron entre las de menor consumo (Mapama, 2016).

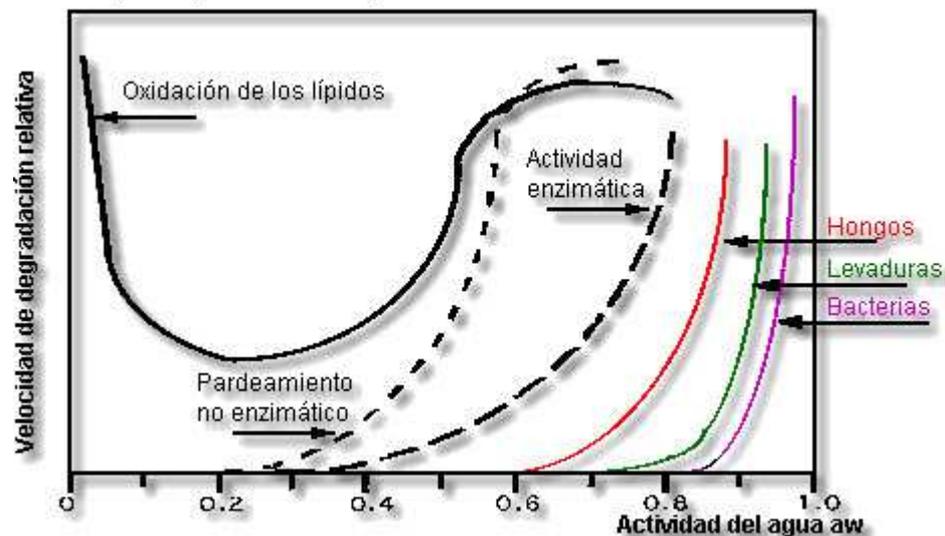
Sin embargo, el uso de manzana procesada está aumentando debido a su uso como ingrediente de numerosos productos, especialmente importante en el caso de la manzana deshidratada (Vega-Gálvez et al., 2012). Sin embargo, los procesos de deshidratación pueden inducir la degradación de ciertos compuestos. Es por ello que resulta importante el estudio de los procesos de secado que permita la optimización de los mismos con el objetivo final de desarrollar un proceso eficiente que permita obtener un producto que sea capaz de mantener unas características lo más similares posibles al producto fresco.

## 1.2 Secado de alimentos.

El secado se viene aplicando prácticamente desde tiempos prehistóricos como método de conservación de alimentos. De hecho, hay que remontarse hasta el siglo XVIII para encontrar el primer registro conocido de secado de alimentos de manera industrial (Alves-Filho et al., 2007). A día de hoy, la deshidratación de los alimentos sigue siendo una de las operaciones unitarias más importantes y desafiantes (Vega-Mercado et al., 2001). Esta operación absorbe una parte muy importante de la energía consumida a nivel industrial en países desarrollados (Mujumdar and Devahastin, 2000).

En muchos casos, el secado constituye una etapa fundamental en el procesado de muchos alimentos. Mediante la disminución del contenido en agua se consigue reducir el deterioro convirtiendo a las materias primas en productos más estables (Mulet et al., 2005). El

objetivo final es reducir la actividad de agua en el alimento y así limitar las reacciones de degradación que dependen de ella (Baudi, 2006). La actividad de agua se puede definir como la relación entre la presión de vapor de agua de un producto y la presión de vapor del agua pura a la misma temperatura (Roos, 1995). Su valor influye decisivamente en el desarrollo microbiano, en la producción de toxinas y en la resistencia de los microorganismos frente a condiciones adversas (Figura 1.1) además de tener un efecto fundamental sobre la estabilidad química y la calidad de los alimentos (Martínez Navarrete et al., 2011).



**Figura 1.1.** Gráfica que representa la velocidad de degradación relativa en función de la actividad de agua.

Además, el secado de alimentos supone la reducción del volumen de las muestras, disminuyendo los costes de transporte y almacenamiento (Mulet et al., 2005).

El método más común de deshidratación de productos alimentarios es el secado convectivo. Éste se basa en el uso de aire a elevadas temperaturas para acelerar la cinética de secado (Santacatalina et al., 2016). Sin embargo, esta característica puede causar cambios químicos y físicos que pueden afectar a la calidad final del producto (Hiranvarachat et al., 2008). La demanda, por parte de un consumidor cada vez más exigente, de productos alta calidad ha alentado la investigación de técnicas alternativas para minimizar la degradación de la misma durante el procesamiento (Santacatalina et al., 2016).

En este sentido, el secado a baja temperatura es cada vez más común en la industria alimentaria. El secado a "baja temperatura" hace referencia al uso de temperaturas del aire por debajo de las condiciones del aire ambiente y, por lo tanto, incluye, valores por debajo del punto de congelación del producto (Ozuna et al., 2014). Uno de los métodos de secado a baja temperatura más usado es la liofilización. Este método lleva aplicándose en la industria

alimentaria desde 1960 (Ma et al., 2018) y consiste en forzar la sublimación del agua en un alimento previamente congelado generando un vacío que aumente la diferencia de presión de vapor entre éste y su entorno (García-Pérez et al., 2012). La aplicación de condiciones de vacío hace que la operación se deba realizar por lotes, lo que, junto con el consumo energético de los sistemas de vacío, incrementa muchísimo su coste. Por ello, la liofilización se reserva para alimentos de alto valor añadido que requiera de una elevada calidad.

Una alternativa más barata es la liofilización a presión atmosférica (AFD). Ésta consiste en un secado por convección donde la temperatura del aire debe mantenerse por debajo del punto de congelación del material procesado. La diferencia de presiones de vapor entre el alimento y el entorno que posibilite la sublimación se consigue utilizando un aire con una humedad relativa muy baja (Santacatalina et al., 2015). Este método permite obtener alimentos deshidratados de altísima calidad, con características que incluyen buen rendimiento de rehidratación, buen color y brillo, menos pérdida de nutrientes, comodidad en transporte, conservación a largo plazo y mejores cualidades que el secado convectivo a alta temperatura (Ma et al., 2018). El hecho de no utilizar vacío permite abaratar costes y posibilita el procesado en continuo. No obstante, con esta técnica se aumenta mucho la duración de la operación. Por lo tanto, es muy importante la intensificación del proceso, por ejemplo, mediante la aplicación de otras tecnologías como fuentes adicionales de energía. En este sentido, los ultrasonidos representan una vía muy interesante (Carrión et al., 2018).

### **1.3 Ultrasonidos.**

En 1880, los hermanos Curie descubrieron que algunos materiales cristalinos eran capaces de crear un potencial eléctrico cuando se sometían a presión mecánica, e inversamente, ante un potencial eléctrico cambiante generaban cambios de forma. Este fenómeno se denominó efecto piezoeléctrico y es el que ha permitido el desarrollo de los transductores más utilizados para generar ondas de ultrasonidos (Phenix et al., 2014).

Los ultrasonidos son ondas mecánicas con una frecuencia superior a 20 kHz (Cárcel et al., 2014). Por lo tanto, no pueden transmitirse en el vacío. Como cualquier onda, se caracterizan por una serie de variables entre las que se pueden citar:

- Potencia con la que se aplica y que influye directamente en sus efectos
- Frecuencia o número de ciclos completados por una onda por unidad de tiempo.
- Atenuación, que hace referencia a la disminución de la intensidad de una onda cuando se propaga en un medio.

- Impedancia acústica, que es la resistencia del medio a la propagación de una onda acústica (Cárcel et al., 2014).

Cuando la potencia es suficientemente elevada, los ultrasonidos pueden generar una serie de efectos en los medios en los que se propagan (Cárcel et al., 2014). Esto es lo que se utiliza en las aplicaciones denominadas de “ultrasonidos de potencia”. Así, en sólidos, las sucesivas compresiones y descompresiones del material producida por la vibración acústica generan el denominado efecto esponja. Además, este estrés mecánico puede producir microfisuras en la estructura interna del producto, creando micro-canales los cuales favorecen el transporte de materia (Cárcel et al., 2017). En medio líquido, los ultrasonidos pueden generar cavitación, que es el crecimiento y colapso de burbujas que generan importantes esfuerzos cortantes, presiones y temperaturas que, aunque muy limitados en el tiempo y en el espacio, pueden afectar a la transferencia de materia y calor. En medio gas, los ultrasonidos pueden generar velocidades oscilantes y una microagitación, especialmente importante en las interfases. Todos estos efectos hacen que los ultrasonidos pueden ser interesantes para la intensificación de procesos de secado convectivo.

#### **1.4 Equipos para la aplicación de ultrasonidos.**

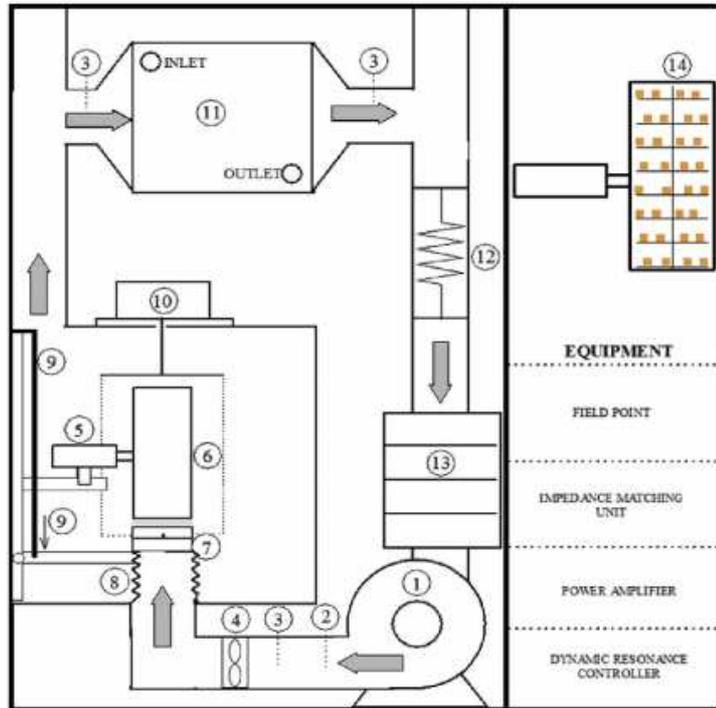
Los equipos de generación de ultrasonidos constan de una fuente de energía, normalmente electricidad, y un transductor. Éste se encarga de transformar dicha energía en energía ultrasónica. Entre los diferentes tipos de transductores destacan los de tipo piezoeléctrico ya que son los más utilizados debido a su elevado rendimiento (Cárcel et al., 2017).

La aplicación de ultrasonidos en medio líquido resulta relativamente sencilla. Es por ello, que resulta fácil encontrar diferentes equipos comerciales para aplicación en este medio, como baños de ultrasonidos o sistemas tipo sonda. Sin embargo, la aplicación en aire resulta más complicada debido al desacople de impedancias entre el transductor, sólido, y el aire, gas. A esto hay que sumar el carácter muy atenuante de los gases que limita la cantidad de energía acústica que reciben los sólidos tratados (Cárcel et al., 2014). Sin embargo, el desarrollo de transductores especiales para este tipo de aplicaciones (Riera et al., 2011) ha posibilitado el desarrollo de aplicaciones entre las que destacan las aplicaciones en el secado de alimentos. En este sentido, se pueden encontrar dos soluciones en el mercado, los transductores de tipo plato escalonado y los transductores en forma de cilindro radiante.

La mayor parte de las publicaciones sobre aplicación de ultrasonidos en secado se basan en la utilización de cilindros vibrantes. Este tipo de sistemas se basan en un transductor

piezoeléctrico que excita un cilindro (Figura 1.2). A través de la vibración de las paredes de este último, se irradia la energía ultrasónica al medio gas que contiene (Santacatalina et al., 2014). Por lo tanto, la propia cámara de secado es la que actúa como elemento radiante (García-Pérez et al., 2012). Este tipo de sistemas permite establecer unas condiciones de secado muy controladas que han posibilitado la identificación y cuantificación de los efectos de los ultrasonidos. Así, en los últimos años, son numerosas las aplicaciones que se han realizado a distintos productos y que han permitido cuantificar la influencia de la aplicación de ultrasonidos. Así, al aplicar ultrasonidos, autores como García-Pérez et al., (2012), Santacatalina et al., (2014), Santacatalina et al., (2016) han obtenido reducciones de tiempo de secado durante el secado a baja temperatura (entre -14 y 10 °C) de entre un 65% y un 75% en productos como zanahoria, berenjena o manzana. Además de frutas y hortalizas, también se ha estudiado el efecto de los ultrasonidos en el secado a baja temperatura de otro tipo de productos como el bacalao desalado (Santacatalina et al., 2016) observando también un importante efecto.

Sin embargo, el sistema de cilindro vibrante para aplicar ultrasonidos resulta difícil de escalar para su desarrollo a nivel industrial ya que resulta muy difícil hacer vibrar con eficiencia a una cámara de secado muy grande. En este sentido, los transductores de tipo placa podrían ser más interesantes.



**Figura 1.2.** Diagrama de un secadero convectivo asistido por ultrasonidos (Santacatalina et al., 2016). 1. Ventilador; 2. Pt-100; 3. Sensor de humedad relativa y temperatura; 4. Anemómetro; 5. Transductor ultrasónico; 6. Cilindro vibrante; 7. Portamuestras; 8. Tubo retráctil; 9. Mecanismo de desplazamiento vertical; 10. Módulo de pesada; 11. Intercambiador de calor; 12. Resistencia para control de temperatura; 13. Material desecante; 14. Detalles de la bandeja de carga de muestra.

### 1.5 Ultrasonidos en el secado de alimentos.

Se ha demostrado que la aplicación de los ultrasonidos tiene efecto significativo sobre la transferencia de masa. Sin embargo, esta influencia depende de las variables de proceso. Una de ellas es la temperatura. Así, se ha observado que la influencia de los ultrasonidos en la velocidad de secado es menos significativa cuando más elevada es la temperatura. Esto se puede explicar desde un punto de vista energético (Cárcel et al., 2017). Los ultrasonidos proporcionan una energía extra al sistema. En proporción, esta es muy importante a bajas temperaturas, pero no tanto a elevada temperatura. Por eso, en estas últimas condiciones, se minimizan los efectos de los ultrasonidos (Cárcel et al., 2014).

Otro parámetro importante a considerar es la velocidad de aire de secado. En un secado convencional sin predominio de la resistencia interna, el aumento de la velocidad del aire disminuye la resistencia externa y reduce el tiempo de secado. Sin embargo, si el proceso está controlado por la resistencia interna, el aumento de la velocidad no afecta al tiempo de secado y, por el contrario, puede producir encostramiento en algunos alimentos. La aplicación

de ultrasonidos puede acelerar el secado sin necesidad de aumentar la velocidad de aire. De hecho, los ultrasonidos son más efectivos cuando la velocidad de aire es baja ya que las turbulencias que provocan una velocidad de aire elevada pueden contribuir a romper el campo acústico. (Cárcel et al., 2017).

También es muy importante tener en cuenta el tipo de alimento que va a secarse y cómo interacciona con los ultrasonidos. La diferencia de impedancia entre el aire y el producto es mucho menor en alimentos porosos, como la manzana. En ese caso, la energía acústica se transmite mejor y las ondas ultrasónicas provocan compresiones y expansiones (“efecto esponja”) que facilitan la transferencia de masa. De hecho, la porosidad puede ser un parámetro clave que define el efecto de los ultrasonidos (Cárcel et al., 2014).

En cuanto a la potencia ultrasónica aplicada, es una variable muy importante, ya que la intensidad de los efectos producidos por las ondas ultrasónicas depende de ésta. Así, a medida que aumenta la intensidad de la onda aplicada, son mayores las vibraciones microscópicas producidas sobre el producto, tanto en su interior (efecto esponja y creación de microcanales) como en la interfase con el aire (creación de microcorrientes), aumentando los efectos sobre este (Cárcel et al., 2014).

En vista de lo expuesto hasta ahora, sería interesante profundizar en el estudio de la aplicación de ultrasonidos mediante sistemas más fáciles de escalar, como es el caso de los platos escalonados, y comprobar si se mantienen, se reducen o amplifican, los efectos que se han identificado y cuantificado con aplicación de transductores de tipo cilíndrico.

## 2. OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo de final de grado fue la puesta a punto de un secadero a baja temperatura asistido por ultrasonidos con transductor de plato escalonado y la cuantificación de la influencia de la aplicación de ultrasonidos en estas condiciones.

Para ello, se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Caracterizar el proceso de liofilización a presión atmosférica de manzana.
- Determinar la influencia de la aplicación de ultrasonidos con un sistema de plato escalonado en la cinética de liofilización a presión atmosférica de manzana.
- Cuantificar la influencia de la potencia acústica aplicada en la magnitud de los efectos de los ultrasonidos sobre la cinética de secado.
- Comparar los resultados obtenidos con un transductor de plato escalonado con los resultados publicados en secados asistidos con ultrasonidos generados mediante transductor cilíndrico. Cuantificar las diferencias.

## 3. MATERIALES Y MÉTODOS.

### 3.1 Materia prima.

La materia prima considerada fue manzana de la variedad Granny Smith. Las piezas se adquirieron en un supermercado local (Valencia, España) y se escogieron con un tamaño y coloración similar y se comprobó que el estado de madurez de las piezas fue similar a través de la medida del contenido de sólidos solubles ( $12,1 \pm 0,7$  % sólidos solubles). Las manzanas se trasladaron al laboratorio y se mantuvieron en refrigeración ( $4 \pm 1^\circ\text{C}$ ) hasta la realización de las diferentes experiencias de secado.

Para la realización de dichas experiencias, se obtuvieron muestras, en forma de lámina, de 3 mm de espesor usando una mandolina (Mandolina en V, Ibili, Figura 3.1). Todas las muestras se extrajeron de la pulpa, evitando la parte central de la fruta. Las láminas se envolvieron inmediatamente en film (figura 3.2) para evitar pérdidas de humedad antes del secado y se colocaron en un abatidor de temperatura (Hiber) pre-enfriado a  $-25^\circ\text{C}$ . El proceso de congelación duró 30 minutos. Este tiempo se estableció mediante experiencias previas y fue el suficiente para asegurar que el producto quedó completamente congelado. Una vez congeladas, las muestras se introdujeron en la cámara de secado.



**Figura 3.1.** Mandolina usada para laminar las manzanas.



**Figura 3.2.** Muestras envueltas en papel del film y cubiertas con un plástico para evitar pérdidas de humedad.

### **3.2 Determinación de la humedad y actividad de agua.**

La determinación de la humedad de las muestras se realizó tanto en las muestras frescas (humedad inicial), como en las obtenidas después de cada experiencia de secado. Su determinación se realizó por diferencia de peso a través del método AOAC número 934.01 (AOAC, 1997). Éste consistió en la colocación de 2 g de manzana troceada en una cápsula de aluminio que se introdujo en una estufa a vacío (Figura 3.3) a 60°C hasta alcanzar peso constante (24 h aprox.). El contenido en humedad de las muestras se determinó por diferencia de peso utilizando una balanza analítica (BEL engineering). Cada determinación se realizó por triplicado.



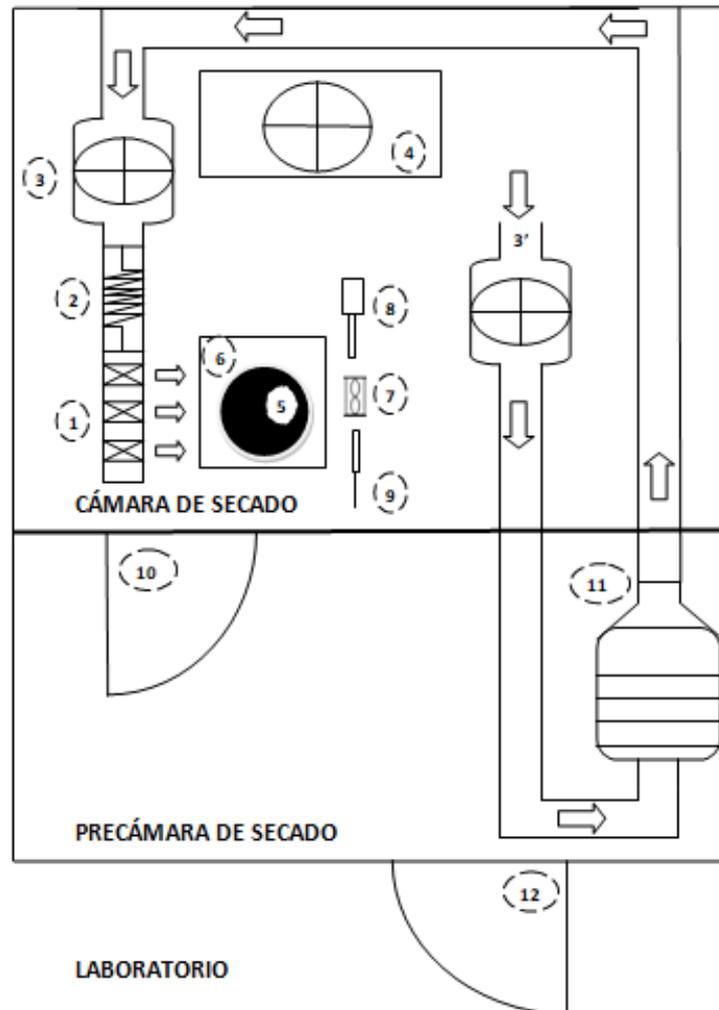
**Figura 3.3.** Estufa usada para la determinación del contenido de humedad de las muestras.

Por otro lado, se determinó la actividad de agua ( $a_w$ ) a  $25 \pm 1^\circ\text{C}$  por triplicado de las muestras después del secado, simplemente como control de las mismas y para determinar su estabilidad. Las determinaciones se realizaron en un equipo AW SPRINT TH500 (NOVASINA, Figura 3.4).



**Figura 3.4.** Equipo usado para la determinación de la  $a_w$  de las muestras después del secado.

### 3.3 Equipo de secado.



**Figura 3.5.** Esquema del secadero convectivo asistido con ultrasonidos: 1. Ventilador; 2. Resistencia para el control de la temperatura; 3. Soplante de recirculación; 4. Sistema de evaporación de la cámara; 5. Plato de ultrasonidos; 6. Sistema de pesado y portamuestras; 7. Anemómetro; 8. Sonda de humedad; 9. Sonda de temperatura; 10. Ventana de acceso al portamuestras; 11. Desecador; 12. Puerta de entrada a la cámara.

Las experiencias de secado se realizaron en un secadero a escala piloto (Figura 3.5). El secadero está montado dentro de una cámara de congelación semi-industrial con capacidad de trabajar hasta  $-20^{\circ}\text{C}$ . Dicha cámara ha sido modificada y dividida en dos zonas mediante una pared metálica: una precámara (Figura 3.5; 12) y una zona dónde se encuentra el secadero (Figura 3.5; 10). La misión de la precámara es básicamente el control de la humedad relativa. Así, al entrar un operario del exterior y cerrar la puerta, la humedad del aire exterior condensa sobre las paredes y se limita su entrada en la cámara de secado propiamente dicha. Además,

esta precámara también permite aislar las condiciones de la cámara de secado del exterior, mantener la temperatura interna y evitar turbulencias que puedan afectar a las condiciones de secado. Esta precámara se comunica con el interior de la cámara de secado a través de una ventanilla que hay en la pared metálica divisoria. Además, en la precámara también se encuentra un sistema de bandejas con material desecante (sílice de aluminio; Drying beads, Rhino Research; tamaño 6-8 mm) para el control de humedad del aire.

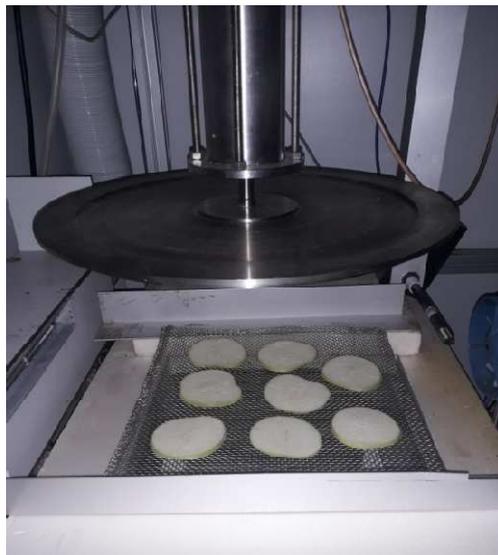
En el interior de la cámara de secado se encuentra el sistema de evaporación de la cámara que permite obtener temperaturas de hasta  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Figura 3.5; 4). Además, hay una resistencia eléctrica que posibilita el control de la temperatura del aire de secado (Figura 3.5; 2), un sistema automático de pesada (Figura 3.5; 6), un transductor de plato escalonado para aplicación de ultrasonidos (Pusonics S.A., Figura 3.5; 5), sondas de humedad y temperatura (Rotronic iroflex, modelo HYGROFLX HF520DB1XX1XX) (Figuras 3.5; 8 y 9), un soplante que genera un flujo de aire plano (Figura 3.5; 1) y un anemómetro para la medida y el control de la velocidad del aire de secado (Figura 3.5; 7).

La forma de funcionamiento del sistema es la siguiente. El aire, que realiza un circuito cerrado, se seca haciéndolo pasar por el sistemas de bandejas desecante (Figura 3.5; 11) que absorbe la humedad ambiental. El objetivo es tener dentro de la cámara de secado un aire con una humedad relativa inferior al 5%. El aire ya seco se introduce en el interior de la cámara y se le fuerza a pasar cerca del evaporador (Figura 3.5; 4) para enfriarlo lo máximo posible. Posteriormente, pasa por la resistencia eléctrica que permite el control de su temperatura (Figura 3.5; 2). Luego, el aire pasa a través del soplante (Figura 3.5; 1) y es impulsado en forma de un flujo plano incidiendo sobre el portamuestras (Figura 3.5; 6). La velocidad del aire se mide al otro lado de la muestra mediante un anemómetro (Figura 3.5; 7). Un sistema de control PID define el valor de giro del soplante en función de la velocidad medida y del valor de consigna establecido. Ese aire se recircula de nuevo para mantener así un circuito cerrado y mantener las condiciones de humedad y temperatura.

En cuanto al sistema de aplicación de ultrasonidos, consta de un transductor de plato escalonado de 40 cm de diámetro (Figura 3.5; 5). Trabaja a una frecuencia de resonancia de 25,8 kHz y tiene una capacidad de potencia máxima de 200W. Está orientado a las muestras por su cara coherente para generar un campo acústico plano lo más homogéneo posible.

Además, la cámara de secado está equipada de una entrada de aire seco para mantener una presión positiva dentro de ella y controlar que no entre aire del exterior. Para ello, el aire se inyecta en la cámara a través de un desecador de membrana (SMC IDG30LA – F02) para punto de rocío a  $-40^{\circ}\text{C}$  (Figura 3.5; 4).

Como se ha comentado, las muestras se colocan en un portamuestras formado por una rejilla (Figura 3.6). Durante el proceso de secado, dicha rejilla queda suspendida lo que asegura la circulación de aire por la mayor parte de la superficie de la muestra. En el momento de la pesada, la balanza se eleva gracias a un pistón, levanta el portamuestras, toma el valor del peso y lo envía al ordenador de control. Durante dicha operación, el soplante se para y el transductor de ultrasonidos se eleva y se desplaza hacia la derecha gracias a un sistema neumático (accionamiento mecánico SMC) para evitar la interferencia en la pesada. Una vez la balanza ha registrado el peso, vuelve a su posición inicial volviendo a dejar al portamuestras suspendido, el transductor vuelve a la posición inicial y se reinicia el flujo del aire.

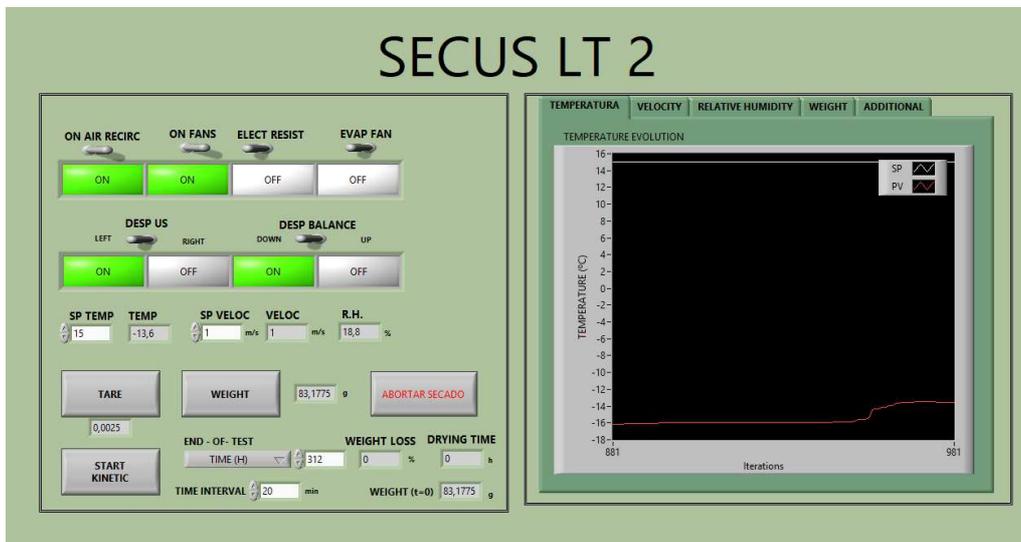


**Figura 3.6.** Muestras colocadas sobre el portamuestras antes de empezar la operación de secado.



**Figura 3.7.** Muestras colocadas sobre el portamuestras después de la operación de secado.

El sistema de control de la cámara se realiza en un PC que está en el exterior de la cámara. Un software desarrollado en Labview2016™ (National Instruments, USA) (Figura 3.8) realiza las labores de control de la cámara, recibe los datos de temperatura, humedad relativa, velocidad de aire y peso de la que permite obtener la cinética de secado.



**Figura 3.8.** Pantalla del ordenador para la selección y control de las variables de la operación de secado.

### 3.4 Experiencias de secado.

En cuanto a las experiencias de secado, todas se realizaron a una temperatura de  $-15 \pm 2$  °C, con una velocidad de aire de 2 m/s. Se realizó una serie de experiencias sin aplicación de ultrasonidos (SUS) y otras con aplicación de ultrasonidos a diferentes potencias ultrasónicas; 50, 100 y 150W (US50, US100 y US150 respectivamente). Cada condición se ensayó, al menos, por triplicado. Todas las experiencias de secado se prolongaron hasta que las muestras sufrieron una pérdida de peso del 80%. Una vez secadas las muestras (Figura 3.7), se extrajeron de la cámara, se atemperaron en un desecador y se midió el contenido de humedad final y la actividad de agua.

### 3.5 Modelización de las cinéticas de secado.

Para cuantificar la influencia de la aplicación de ultrasonidos y su potencia en la cinética de secado, se utilizó un modelo plenamente difusivo basado en la segunda ley de Fick (ecuación 3.1). Es decir, se consideró la difusión como el mecanismo dominante del transporte de humedad y se despreció la resistencia externa al mismo. Así mismo, se consideró que la difusividad permaneció constante durante todo el proceso de secado y que las láminas obtenidas de manzana se comportaron como un material isotrópico y homogéneo.

$$\frac{\partial W}{\partial t} = D_e \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \quad (\text{Ec 3.1.})$$

Donde  $D_e$  es la difusividad efectiva del agua ( $\text{m}^2/\text{s}$ );  $W$  es el contenido en humedad local (kg agua/kg materia seca);  $t$  es el tiempo (s) y  $x$  es la dirección característica de transporte (m). Para la integración de la ecuación 3.1 se consideró que el contenido de humedad en el instante inicial fue igual en cualquier punto de la muestra (Ecuación 3.2):

$$W(x, 0) = W_0 \quad (\text{Ec 3.2.})$$

Del mismo modo, se consideraron dos condiciones de contorno. En primer lugar, como ya se ha comentado, se despreció la resistencia externa al transporte de materia frente a la interna. Es decir, se consideró que la cinética de secado es controlada únicamente por el transporte de humedad interno (Ecuación 3.3).

$$W(L, t) = W_{eq} \quad (\text{Ec 3.3.})$$

Donde  $L$  es el semiespesor de la lámina de manzana (1,5 mm) y  $W_{eq}$  es el contenido de humedad en equilibrio (kg agua/kg materia seca). Dicha humedad de equilibrio ( $W_{eq}$ ) se calculó a partir de la isoterma de sorción para manzana, calculada con el modelo de GAB (Veltchev & Menkov, 2000).

En segundo lugar, que el transporte de agua es simétrico respecto al plano de simetría de las láminas obtenidas de la manzana (Ecuación 3.4).

$$\frac{\partial W(0, t)}{\partial x} = 0 \quad (\text{Ec 3.4.})$$

La solución, en forma de sumatorio, se integró para todo el volumen de la muestra. El modelo resultante se utilizó para predecir la evolución del contenido medio de humedad de las muestras durante la operación de secado (Ecuación 3.5).

$$\Psi(t) = \frac{W(t) - W_e}{W_0 - W_e} = \left[ \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2 \pi^2} e^{\left(-\frac{D_w(2n+1)^2 \pi^2 t}{4L^2}\right)} \right] \quad (\text{Ec 3.5.})$$

El ajuste del modelo a los datos experimentales se realizó mediante la identificación de la difusividad efectiva ( $D_e$ ) que minimizó el valor de la suma de los residuos cuadráticos entre los valores experimentales de contenido en humedad media y los calculados con el modelo. Para ello, se usó la herramienta Solver de Microsoft Excel TM.

Por último mediante el cálculo de la varianza explicada por el modelo (%VAR), se midió la bondad de los ajustes conseguidos (Ecuación 3.6.).

$$\%VAR = 100 * \sqrt{1 - \frac{S_{yx}}{S_y}} \quad (\text{Ec 3.6.})$$

## 4. RESULTADOS Y DISCURSIÓN.

### 4.1 Humedad inicial y actividad de agua.

La humedad inicial de la manzana fue de 6,13 kg agua/kg materia seca (85,97 % en base húmeda). Con este valor y con la variación del peso de la manzana durante los diferentes secados, se estimaron las diferentes cinéticas de secado. Como se ha comentado en el apartado de materiales y métodos, el criterio de finalización de todas las cinéticas de secado fue alcanzar una pérdida de peso de las muestras de un 80%. Además, también se midió la humedad final de las muestras para asegurar que el objetivo de secado fue similar en todas ellas. Como se puede observar en la Tabla 4.1, estas humedades finales resultaron muy similares en todos los tratamientos ensayados.

**Tabla. 4.1.** Contenido medio de humedad y desviación estándar de las muestras después del secado en las diferentes condiciones ensayadas y valores de la actividad de agua con sus respectivas desviaciones a las distintas potencias ultrasónicas ensayadas.

	SUS	US50	US100	US150
<b>Contenido de humedad (kg agua/kg m. s.)</b>	10,1 ± 0,3	9,8 ± 0,9	10,1 ± 0,8	10,6 ± 0,2
<b>a<sub>w</sub></b>	0,516±0,001	0,488±0,001	0,417±0,001	0,436±0,002

Por otro lado, también se determinó la actividad de agua de las muestras después del secado a baja temperatura. Se ha observado que con valores de a<sub>w</sub> por debajo de 0,62, no se aprecia crecimiento microbiano en frutas y hortalizas. No obstante, podrían producirse algunas modificaciones como el pardeamiento no enzimático, ya que es necesaria una a<sub>w</sub> por debajo de 0,3 para evitar este tipo de reacciones (Megías-Pérez et al., 2014). Como todos los valores obtenidos de a<sub>w</sub> estuvieron por debajo de 0,6, se puede considerar que se obtuvo un producto estable microbiológicamente.

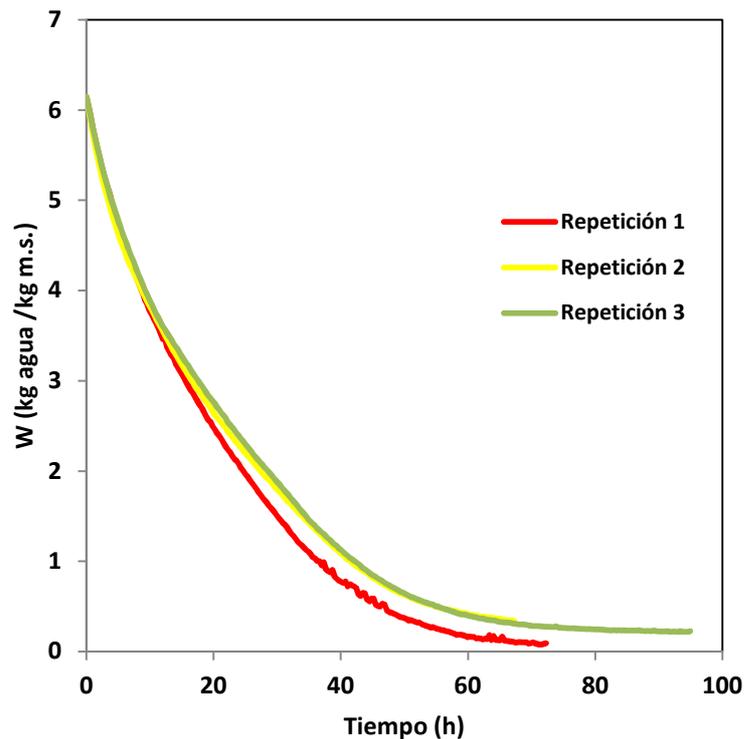
## 4.2 Resultados experimentales de secado.

Como se ha comentado, se realizaron, al menos, tres repeticiones de cada condición de secado. Esto se hizo para evitar la influencia de la variabilidad natural de la materia prima, cosas que se puede observar en la Figura 4.1.

En general, se observó que el secado a  $-15^{\circ}\text{C}$  resultó bastante lento. Así, el tiempo que necesitaron las experiencias en llegar a una humedad de  $0,5 \text{ kg agua/ kg m.s.}$  fue de más de 2 días (Tabla 4.2).

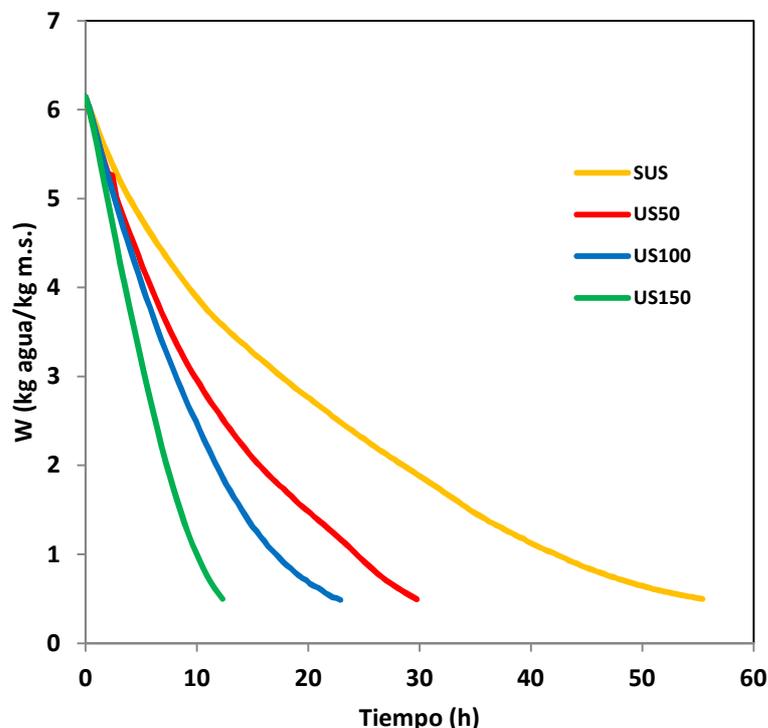
**Tabla 4.2.** Tiempo medio que necesitaron las muestras de manzana en alcanzar una humedad de  $0,5 \text{ kg agua/ kg m.s.}$  en las condiciones de secado ensayadas.

	SUS	US50	US100	US150
Tiempo (h)	$52 \pm 5$	$29 \pm 2$	$24 \pm 2$	$13 \pm 2$



**Figura 4.1.** Representación de los  $\text{kg agua/ kg m.s.}$  en función del tiempo de las 3 experiencias llevadas a cabo sin la aplicación de ultrasonidos.

La aplicación de ultrasonidos durante las experiencias de secado aceleró significativamente la cinética de la operación en comparación con las experiencias realizadas sin ultrasonidos (Figura 4.2).



**Figura 4.2.** Grafica que representa los kg agua/ kg materia seca en función del tiempo de las distintas potencias ultrasónicas aplicadas (US50; US100; US150) y las experiencias SUS.

Así, el tiempo para alcanzar 0,5 kg agua/ kg materia seca en las experiencias US50 se redujo en un 44,28% con respecto a las experiencias sin aplicación de ultrasonidos (Tabla 4.2). La influencia de los ultrasonidos fue mayor al aumentar la potencia aplicada. Así, al aplicar una potencia ultrasónica de 100W (experiencias US100) la reducción de tiempo fue de un 53,49%. Por último, la mayor reducción en el tiempo de secado se observó en las experiencias llevadas a cabo con ultrasonidos a 150W, donde el tiempo para alcanzar 0,5 kg agua/ kg materia seca se consiguió reducir en un 74,34%.

Los ultrasonidos provocan en los sólidos compresiones y expansiones que facilitan el transporte de agua hacia el exterior del alimento (De la Fuente et al., 2006). Estos movimientos crean fuerzas mayores que las que mantienen las moléculas de agua dentro de los capilares del sólido, creando canales microscópicos para facilitar el transporte de masa (Muralidhara et al., 1985). A medida que aumenta la potencia ultrasónica aplicada, son mayores los efectos producidos.

En estudios anteriores de aplicación de ultrasonidos con transductores de tipo cilíndrico durante el secado a baja temperatura, Santacatalina et al. (2016) observaron que la aplicación de ultrasonidos a  $-10^{\circ}\text{C}$  redujo el tiempo de secado entre un 70,7% y un 80,3% en comparación a las experiencias de secado realizadas sin aplicación de ultrasonidos. En estos estudios también se observó que al aumentar la potencia ultrasónica aplicada se redujo más el tiempo de secado.

Es de destacar que las potencias aplicadas con los transductores cilíndrico son inferiores que las aportadas por el transductor tipo plato. Sin embargo, el volumen de la zona de secado es mucho mayor en éste último caso. Esto, junto con una temperatura de secado ligeramente inferior ( $-15^{\circ}\text{C}$  frente a  $-10^{\circ}\text{C}$ ) explicaría las diferencias en tiempo de secado entre ambos sistemas. En el transductor cilíndrico, al aplicar 50 W, la densidad de potencia acústica es de  $20,54\text{ kW/m}^3$ . Sin embargo, en el uso del transductor de plato escalonado, en las experiencias en las que se aplicaron 50 W (US50), la densidad de potencia acústica que se obtiene es de  $1,99\text{ kW/m}^3$  y de  $3,98\text{ kW/m}^3$  en las realizadas a 100 W (US100). Por lo tanto, comparando con los datos de las experiencias obtenidas con el transductor cilíndrico, se observa que el transductor usado en el presente trabajo puede ser una alternativa interesante para la aplicación de ultrasonidos en un secadero de mayor escala e incluso su escalado a tamaño industrial.

Por otra parte, es necesario destacar, que en ambos sistemas, tanto en el caso de transductores de tipo cilindro vibrante (Santacatalina et al., 2016) como de tipo de plato escalonado, con un nivel relativamente bajo de potencia ultrasónica aplicada, se generaron efectos muy significativos en la reducción del tiempo de secado.

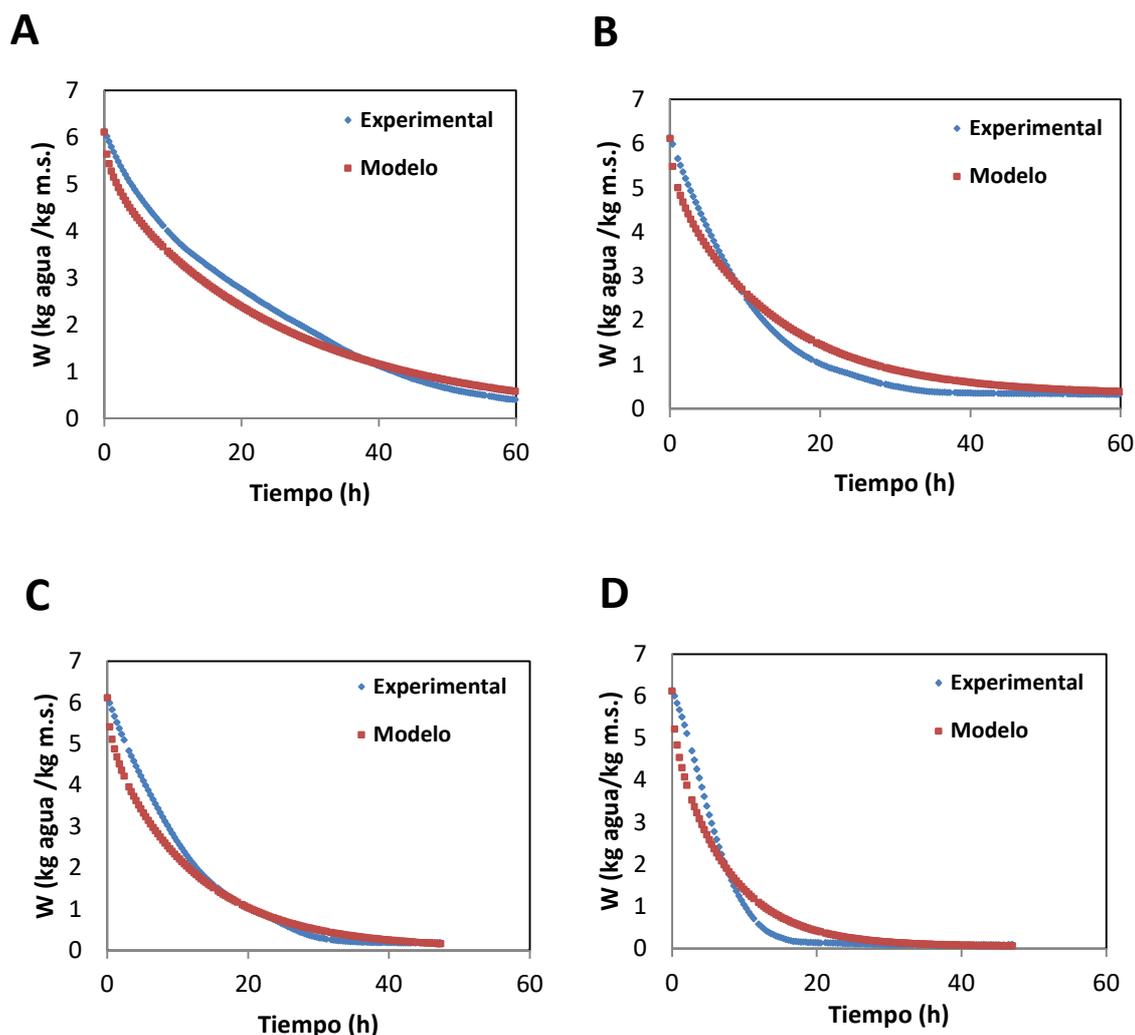
#### **4.2.1 Modelización de las cinéticas de secado.**

Las distintas cinéticas de secado experimentales se modelizaron con el modelo difusivo sin resistencia externa descrito en el apartado de Materiales y Métodos. El porcentaje de varianza explicada obtenido por el modelo indicó que el ajuste fue, en general, aceptable ya que, en todos los casos, éste se situó por encima del 96 %. Los mejores ajustes se obtuvieron en las experiencias SUS (Tabla 4.3) estando en este caso la varianza explicada entorno al 99%. Sin embargo, al aplicar ultrasonidos se observó una disminución del porcentaje de varianza explicada (Tabla 4.3). Esta disminución aumentó al incrementar la potencia ultrasónica aplicada. Este peor ajuste del modelo conforme aumenta la potencia acústica aplicada también se puede observar en las tendencias de las cinéticas experimental y calculada. Así, como se muestra en la figura 4.3, el aumento de la potencia supuso que las curvas experimental y calculada fuesen más diferentes.

Estos peores ajustes al aplicar ultrasonidos podrían indicar un cambio en los mecanismos de secado. Así, el modelo considera despreciable la resistencia externa frente a la interna. Sin embargo, la aplicación de los ultrasonidos podría afectar a la relación entre estas resistencias. Los ultrasonidos podrían intensificar otros mecanismos de transporte interno diferentes al difusivo que reducirían principalmente la resistencia interna. Así, Santacalina et al, (2014) observaron que la influencia de los ultrasonidos en la difusividad efectiva puede ser muy intensa en la resistencia interna que la externa. En esas condiciones, las diferencias entre ambas resistencias podrían reducirse, con lo que el supuesto de que la externa es despreciable frente a la interna ya no se cumpliría. Al incrementar la potencia aplicada, el efecto sería más intenso (Figura 4.3).

**Tabla 4.3.** Difusividad efectiva identificada ( $D_e$ ) a través del ajuste del modelo de las experiencias de secado de manzana realizadas sin aplicación ultrasonidos (SUS) y con aplicación a distintas potencia: 50, 10 y 150 W (US50, US 100 Y US150 respectivamente). Porcentaje de varianza explicada (%VAR) por el modelo.

	SUS	US50	US100	US150
$D_e$ ( $10^{-11}$ m <sup>2</sup> /s)	0,95 ± 0,08	1,8 ± 0,3	2,0 ± 0,2	3,3 ± 0,2
%VAR	98,6 ± 0,4	98,4 ± 0,1	96 ± 1	96,3 ± 0,6



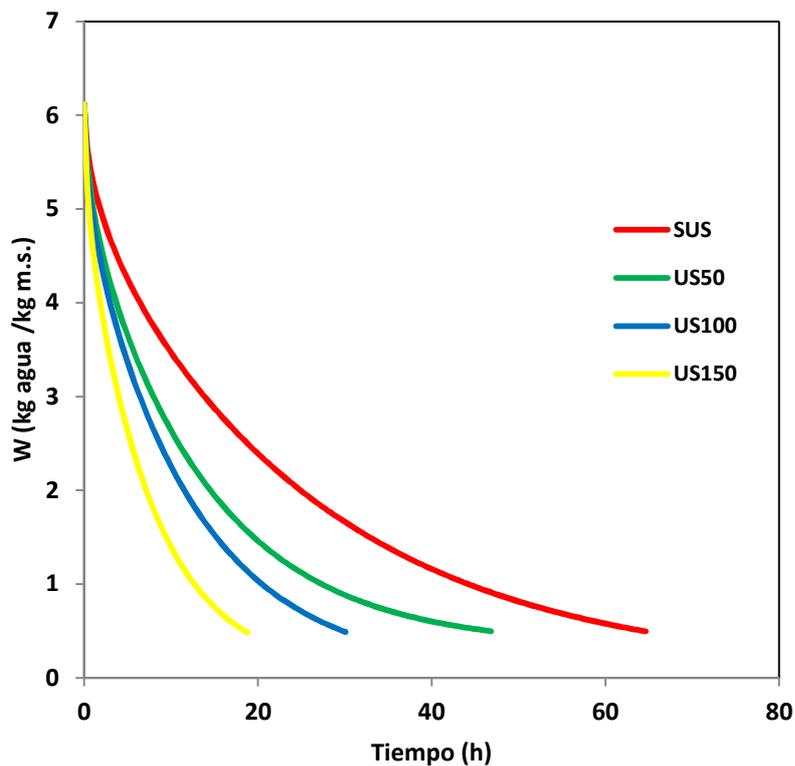
**Figura 4.3.** Datos experimentales y modelización de cinéticas de secado de láminas de manzana (A, SinUS; B. US50; C. US100; D. US150)

Sin embargo, el modelo elegido permitió comparar los diferentes tratamientos y cuantificar la influencia de la aplicación de ultrasonidos en la cinética de secado. Así, la difusividad efectiva identificada en las experiencias SUS fue de  $0,98 \pm 0,08 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$  (Tabla 4.3). Este valor es menor que el que se han encontrado otros autores durante el secado a baja temperatura de manzana. Así, Santacatalina et al. (2016), obtuvieron un valor de difusividad de  $3,6 \pm 0,3 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ , realizando experiencias de secado con una velocidad de aire constante de 2 m/s, una temperatura de  $-10^\circ\text{C}$  y una humedad relativa por debajo de  $15 \pm 5\%$  y Santacatalina et al., 2014 un valor de  $4,3 \pm 0,5 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ , aplicando una velocidad de aire de  $2 \pm 0,1 \text{ m/s}$ , una temperatura de  $-10^\circ\text{C}$  y una humedad relativa del  $7 \pm 4\%$ .

Además de estudios con manzana, existen otros productos en los que se ha llevado a cabo el secado a baja temperatura como la berenjena (Colucci et al., 2017) y el champiñón (Carrión

et al., 2018). En el primer caso, los autores aplicaron un modelo URIF (Uniform Retreatin Ice Front), que es diferente que el modelo utilizado en este trabajo para predecir las cinéticas de secado. En este caso sólo se considera la difusión en la capa deshidratada externa que se va generando durante el secado. De ahí que el valor de difusividad que obtuvieron fuera totalmente distinto,  $2 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ . En el segundo caso, el modelo fue similar al de este trabajo propuesto también se ajustó correctamente obteniéndose un valor de difusividad de  $2,7 \pm 0,5 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$  realizándose las experiencias de secado a  $-10^\circ\text{C}$  y una velocidad del aire constante de 2 m/s.

En cuanto a la aplicación de ultrasonidos, se observó un incremento significativo de la difusividad efectiva identificada ( $D_e$ ) en comparación con las experiencias SUS (Figura 4.4). Así, en las experiencias US50 la  $D_e$  aumentó en un 91,08% con respecto a las experiencias SUS. La potencia aplicada influyó significativamente en la  $D_e$ . Así al aumentar la potencia a 100W se obtuvo un aumento de  $D_e$  de 116,09% y de 248,52% en la experiencia US150W.

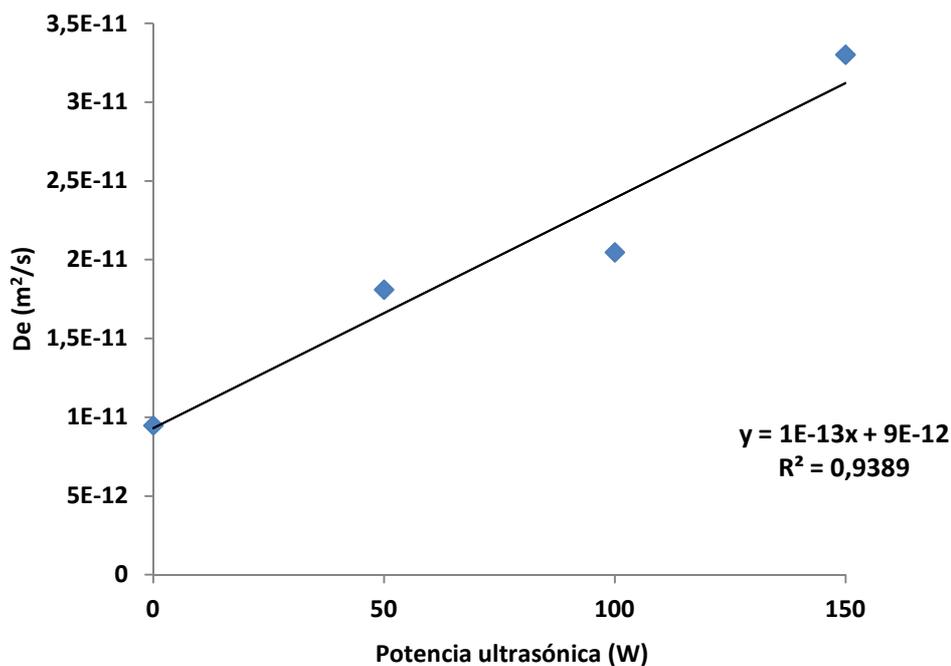


**Figura 4.4.** Curvas obtenidas de la modelización de las cinéticas de secado SinUS y a distintas potencias ultrasónicas (50W; 100W; 150W) de láminas de manzana.

Hay otros estudios en los que se llevaron a cabo experiencias de secado de láminas de manzana a baja de temperatura, en los que para la aplicación de los ultrasonidos, en vez de aplicar un transductor de plato se usó un transductor cilíndrico. En uno de estos estudios, la

difusividad efectiva del agua aumentó en todos los secados realizados a alta temperatura con US (US50) alrededor de un 140%, sin embargo, para  $-10^{\circ}\text{C}$  ( $T^a$  por debajo del punto de congelación), aumentó un 267% ya que por debajo del punto de congelación, las muestras de manzana se comportaron como una matriz de elevada porosidad (Santacatalina et al., 2014), un valor bastante mayor al obtenido en el presente trabajo donde el aumento de la difusividad efectiva a dicha potencia fue de un 91,08%.

El uso de una temperatura de  $-15^{\circ}\text{C}$ , hace que el secado tenga lugar por sublimación. Esto desarrolla una estructura muy porosa conforme se deshidratan las muestras. Ozuna et al., (2014) observaron que las estructuras porosas presentan una menor impedancia acústica lo que permite un mejor acople con el aire, que también tiene una baja impedancia, y una mejor transmisión de la energía acústica que permite aumentar los efectos inducidos sobre las muestras.



**Figura 4.5.** Relación entre la difusividad efectiva identificada mediante el modelo difusivo y potencia acústica aplicada para el secado de láminas de manzana a diferentes potencias (SUS, US50, US100, US150).

Observando la figura 4.5, para la temperatura ensayada y en el rango de potencias usadas en los diferentes ensayos (SUS, US50, US100, US150), la relación entre la difusividad efectiva obtenida y la potencia ultrasónica empleada es lineal. Del mismo modo, otros autores (García-Pérez et al., 2009; Ozuna et al., 2011; Santacatalina et al., 2016), también encontraron una relación lineal entre la difusividad efectiva y la potencia ultrasónica aplicada. Esta relación

es distinta en función del producto tratado. De hecho, estos autores establecen que la pendiente de dicha relación puede constituir una medida de lo susceptible que es el producto a los efectos de los ultrasonidos.

## 5. CONCLUSIONES.

Una vez obtenidos y analizados los resultados, se llegó a las siguientes conclusiones:

- La cinética de secado por liofilización a presión atmosférica de manzana resultó una operación muy lenta ya que se tardó más de dos días en alcanzar el objetivo deseado.
- La aplicación de ultrasonidos aceleró significativamente el proceso, reduciendo el tiempo de secado a más de la mitad respecto las experiencias en las que no hubo aplicación de ultrasonidos.
- Dicha aceleración fue más pronunciada al aumentar la potencia aplicada, siendo la cinética más rápida aquella en la que se aplicó la máxima potencia probada (US150)
- El modelo difusivo propuesto se ajustó relativamente bien a los datos experimentales, especialmente en las experiencias de liofilización a presión atmosférica sin aplicación de ultrasonidos.
- El ajuste fue ligeramente peor al aplicar ultrasonidos. Al aumentar la potencia aplicada, las tendencias de las cinéticas experimental y calculada se alejaron. Esto indicaría una influencia de los ultrasonidos en la relación entre resistencia externa e interna.
- Los valores obtenidos en la disminución del tiempo de secado fueron similares a los obtenidos en otros estudios en los que se usó un transductor cilíndrico en lugar de un transductor de plato. Sin embargo, en cuanto a las difusividad efectiva identificada, la influencia de los ultrasonidos resultó ligeramente inferior que en otros estudios realizados con un transductor de tipo cilíndrico, lo cual puede justificarse ya que la densidad de potencia acústica aplicada en las experiencias con este tipo de transductor es mayor al haber un volumen de aplicación menor respecto a las experiencias llevadas a cabo con el transductor de plato.
- La aplicación de ultrasonidos con un sistema tipo plato podría ser una alternativa interesante para el escalado de la operación a nivel industrial

## 6. BIBLIOGRAFÍA

Alves-Filho, O., Eikevik, T., Mulet, A., Garau, C., & Rossello, C. (2007). Kinetics and Mass Transfer during Atmospheric Freeze Drying of Red Pepper. *Drying Technology*, 25(7-8), 1155-1161. doi: 10.1080/07373930701438469

AOAC, Association of Official Analytical Chemist (1997). *Official methods of analysis*, Arlington, Virginia, EEUU.

Badui, S. (2006). *Química De Los Alimentos* (pp. 1-26). Pearson Educación de México, SA de CV.

Cárcel, J., García-Pérez, J., Riera, E.; Roselló, C., & Mulet, A. (2014). Drying assisted by power ultrasound. *Modern Drying Technology Volume 5: Process intensification*. 1ª Ed., WILEY-VCH. Alemania, 237-273.

Cárcel, J., García-Pérez, J., Riera, E., Roselló, C., & Mulet, A. (2017). Ultrasonically assisted drying. *Ultrasound in Food Processing*. Ed. John Wiley & Sons Ltd. Reino Unido, 371-391.

Carrión, C., Mulet, A., García-Pérez, J., & Cárcel, J. (2018). Ultrasonically assisted atmospheric freeze-drying of button mushroom. Drying kinetics and product quality. *Drying Technology*, 1-10. doi: 10.1080/07373937.2017.1417870

Colucci, D., Fissore, D., Mulet, A., & Cárcel, J. (2017). On the investigation into the kinetics of the ultrasound-assisted atmospheric freeze drying of eggplant. *Drying Technology*, 35(15), 1818-1831. doi: 10.1080/07373937.2016.1277738

De la Fuente-Blanco, S., Riera-Franco de Sarabia, E., Acosta-Aparicio, V., Blanco-Blanco, A., & Gallego-Juárez, J. (2006). Food drying process by power ultrasound. *Ultrasonics*, 44, e523-e527. doi: 10.1016/j.ultras.2006.05.181

EROSKI CONSUMER (2018). Guía Práctica CONSUMER: frutas, visto el 25 de mayo de 2018 <http://frutas.consumer.es/manzana/propiedades>

FEN, Fundación Española de la Nutrición (2011). *La alimentación española. Características nutricionales de los principales alimentos de nuestra dieta*, Madrid, visto el 27 de mayo de 2018. <http://www.fen.org.es/mercadoFen/pdfs/manzana.pdf>

García-Pérez, J., Cárcel, J., Riera, E., Rosselló, C., & Mulet, A. (2012). Intensification of Low-Temperature Drying by Using Ultrasound. *Drying Technology*, 30(11-12), 1199-1208. doi: 10.1080/07373937.2012.675533

García-Pérez, J., Cárcel, J., Riera, E., & Mulet, A. (2009). Influence of the Applied Acoustic Energy on the Drying of Carrots and Lemon Peel. *Drying Technology*, 27(2), 281-287. doi: 10.1080/07373930802606428

Hiranvarachat, B., Suvarnakuta, P., & Devahastin, S. (2008). Isomerisation kinetics and antioxidant activities of  $\beta$ -carotene in carrots undergoing different drying techniques and conditions. *Food Chemistry*, 107(4), 1538-1546. doi: 10.1016/j.foodchem.2007.10.026

Jia, Y., Yuan, Y., Zhang, Y., Yang, S., & Zhang, X. (2015). Extreme expansion of NBS-encoding genes in Rosaceae. *BMC Genetics*, 16(1). doi: 10.1186/s12863-015-0208-x

Kyung Hyun, T., & Jang, K. (2016). Apple as a source of dietary phytonutrients: an update on the potential health benefits of apple. *EXCLI J*, 15, 565-569. doi: 10.17179/excli2016-483.

Ma, Y., Wu, X., Zhang, Q., Giovanni, V., & Meng, X. (2018). Key composition optimization of meat processed protein source by vacuum freeze-drying technology. *Saudi Journal Of Biological Sciences*, 25(4), 724-732. doi: 10.1016/j.sjbs.2017.09.013.

MAPAMA, Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (2016). Informe del consumo de alimentario en España, visto el 29 de mayo de 2018. [http://www.mapama.gob.es/es/alimentacion/temas/consumo-y-comercializacion-y-distribucionalimentaria/informe\\_del\\_consumo\\_de\\_alimentos\\_en\\_espana\\_2016\\_webvf\\_tcm30-419505.pdf](http://www.mapama.gob.es/es/alimentacion/temas/consumo-y-comercializacion-y-distribucionalimentaria/informe_del_consumo_de_alimentos_en_espana_2016_webvf_tcm30-419505.pdf)

Martínez Navarrete, N., Andrés Grau, A., Chiralt Boix, A., & Fito Maupoey, P. (2011). *Termodinámica y cinética de sistemas alimento entorno*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.

Megías-Pérez, R., Gamboa-Santos, J., Soria, A., Villamiel, M., & Montilla, A. (2014). Survey of quality indicators in commercial dehydrated fruits. *Food Chemistry*, 150, 41-48. doi: 10.1016/j.foodchem.2013.10.141

Mujumdar, A. S., & Devahastin, S. (2000). *Fundamental principles of drying in Mujumdar's practical guide to industrial drying*, Exergex Ciro., Montreal, Canada, 1-22.

Mulet, A., Blasco, M., García-Reverter, J., & García-Pérez, J.V. (2005). Drying kinetics of *Curcuma longa* rhizomes. *Journal of Food Science* 7, E318-E323.

Muralidhara, H., Ensminger, D., & Putnam, A. (1985). Acoustic dewatering and drying (Low and high frequency): State of the art review. *Drying Technology*, 3(4), 529-566. doi: 10.1080/07373938508916296

Ozuna, C., Cárcel, J., García-Pérez, J., & Mulet, A. (2011). Improvement of water transport mechanisms during potato drying by applying ultrasound. *Journal Of The Science Of Food And Agriculture*, 91(14), 2511-2517. doi: 10.1002/jsfa.4344

Ozuna, C., Cárcel, J., Walde, P., & Garcia-Perez, J. (2014). Low-temperature drying of salted cod (*Gadus morhua*) assisted by high power ultrasound: Kinetics and physical properties. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 23, 146-155. doi: 10.1016/j.ifset.2014.03.008

Ozuna, C., Gómez Álvarez-Arenas, T., Riera, E., Cárcel, J., & Garcia-Perez, J. (2014). Influence of material structure on air-borne ultrasonic application in drying. *Ultrasonics Sonochemistry*, 21(3), 1235-1243. doi: 10.1016/j.ultsonch.2013.12.015

Phenix, C., Togtema, M., Pichardo, S., Zehbe, I., & Curiel, L. (2014). High Intensity Focused Ultrasound Technology, its Scope and Applications in Therapy and Drug Delivery. *Journal Of Pharmacy & Pharmaceutical Sciences*, 17(1), 136-153. doi: 10.18433/j3zp5f

Riera, E., Garcia-Perez, J.V., Acosta, V.M., Cárcel, J.A., & Gallego-Juárez, J.A. (2011). Computational study of ultrasound-assisted drying of food materials, in innovative food processing technologies: Advances in multiphysics simulation, (eds, K. Knoerzer, P. Juliano, P. Roupas, C. Versteeg), Wiley-Blackwell, West Sussex, UK, 265-302.

Roos, Y. (1995). *Phase Transitions in Foods* (Food science and technology international series). Academic Press.

Santacatalina, J., Contreras, M., Simal, S., Cárcel, J., & Garcia-Perez, J. (2016). Impact of applied ultrasonic power on the low temperature drying of apple. *Ultrasonics Sonochemistry*, 28, 100-109. doi: 10.1016/j.ultsonch.2015.06.027.

Santacatalina, J., Fissore, D., Cárcel, J., Mulet, A., & García-Pérez, J. (2015). Model-based investigation into atmospheric freeze drying assisted by power ultrasound. *Journal Of Food Engineering*, 151, 7-15. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2014.11.013

Santacatalina, J., Guerrero, M., Garcia-Perez, J., Mulet, A., & Cárcel, J. (2016). Ultrasonically assisted low-temperature drying of desalted codfish. *LWT - Food Science And Technology*, 65, 444-450. doi: 10.1016/j.lwt.2015.08.023

Santacatalina, J., Rodríguez, O., Simal, S., Cárcel, J., Mulet, A., & García-Pérez, J. (2014). Ultrasonically enhanced low-temperature drying of apple: Influence on drying kinetics and antioxidant potential. *Journal Of Food Engineering*, 138, 35-44. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2014.04.003

Santacatalina, J., Soriano, J., Cárcel, J., & Garcia-Perez, J. (2016). Influence of air velocity and temperature on ultrasonically assisted low temperature drying of eggplant. *Food And Bioproducts Processing*, 100, 282-291. doi: 10.1016/j.fbp.2016.07.010

Shen, P., Tian, X., Zhang, S., Ren, F., Li, P., & Yu, Y. et al. (2017). Molecular characterization of a novel luteovirus infecting apple by next-generation sequencing. *Archives Of Virology*, 163(3), 761-765. doi: 10.1007/s00705-017-3633-5

Vega-Gálvez, A., Ah-Hen, K., Chacana, M., Vergara, J., Martínez-Monzó, J., García-Segovia, P., Lemus-Mondaca, R., & Di Scala, k., (2012). Effect of temperature and air velocity on drying kinetics, antioxidant capacity, total phenolic content, colour, texture and microstructure of apple (var. Granny Smith) slices. *Food Chemistry*, 132(1), 51-59. doi: 10.1016/j.foodchem.2011.10.029

Vega-Mercado, H., Marcela Góngora-Nieto, M., & Barbosa-Cánovas, G. (2001). Advances in dehydration of foods. *Journal Of Food Engineering*, 49(4), 271-289. doi: 10.1016/s0260-8774(00)00224-7

Veltchev, Z., & Menkov, N. (2000). Desorption isotherms of apples at several temperatures. *Drying Technology*, 18(4-5), 1127-1137. doi: 10.1080/07373930008917759