

# UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA  
AGRONÒMICA I DEL MEDI NATURAL



## *CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE APLICACIÓN DE ULTRASONIDOS SIN CONTACTO DIRECTO DE UN SECADERO PILOTO DE LIOFILIZACIÓN A PRESIÓN ATMOSFÉRICA*

TRABAJO FIN DE GRADO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE LOS ALIMENTOS

**Alumno:** D. Sergio Jiménez Requena

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

**Curso Académico:** 2015/2016

VALENCIA, JULIO DE 2016



## TÍTULO DEL TRABAJO FINAL DE GRADO

Caracterización del sistema de aplicación de ultrasonidos sin contacto directo de un secadero piloto de liofilización a presión atmosférica.

## RESUMEN

La aplicación de ultrasonidos de potencia ha demostrado ser una técnica muy interesante para la intensificación de los procesos de secado, especialmente los que tienen lugar a bajas temperaturas como es el caso de la liofilización a presión atmosférica. En este sentido, resulta imprescindible conocer las condiciones en las que se aplican los ultrasonidos para poder determinar su influencia en el proceso. Por ello, el objetivo del presente Trabajo de Fin De Grado (TFG) es caracterizar el campo acústico generado por el sistema de aplicación de ultrasonidos de un secadero a baja temperatura piloto desarrollado por el grupo de investigación ASPA (Análisis y Simulación de Procesos Agroalimentarios).

**Palabras clave:** Ultrasonidos de potencia, liofilización, campo acústico, secado convectivo.

## ABSTRACT

The application of power ultrasound has been found a very interesting way for the intensification of drying processes, especially those that occur at low temperatures such as the atmospheric freeze drying. In this sense, it is essential to know the conditions in which ultrasound is applied in order to determine their influence on the process. Therefore, the objective of this research project is to characterize the acoustic field generated by the ultrasound application system of a pilot atmospheric freeze drier developed by the research group ASPA (Analysis and Simulation of Agro-food Processes).

**Keywords:** Power ultrasound, lyophilization, sound field, convective drying.

**Alumno:** D. Sergio Jiménez Requena

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

Valencia, Julio de 2016

## **AGRADECIMIENTOS**

Este es un trabajo en el cual, tanto directa, como indirectamente, han participado distintas personas, ya sea opinando, aconsejando, corrigiendo, teniendo paciencia o animando. Estos momentos me han permitido aprovechar la competencia y experiencia de las personas a las que les quiero agradecer que hayan formado parte de este trabajo.

Como la persona que ha tenido una importancia vital en este trabajo me gustaría agradecer a mi tutor D. Juan Andrés Cárcel Carrión todos los aportes que ha tenido en este proyecto. Tanto su forma de enseñar como sus consejos sobre cómo mejorar todo lo posible en aquello que me proponga, me ha brindado un gran apoyo para lograr el objetivo trazado, guiándome y aportándome su tiempo y todos los conocimientos que tenía a su disposición.

A mis compañeras de despacho, por ayudarme desde el primer día, compartiendo su experiencia y consejos mientras me animaban en los momentos difíciles.

También quiero agradecerse a mi familia y mis amigos de la carrera, ya que han sido un apoyo constante e incondicional durante todos estos años universitarios. Pero en especial quiero agradecerse a mis padres, que son las personas que más quiero y admiro en el mundo, ya que sin su ayuda y consejos me hubiera resultado imposible estar donde me encuentro ahora.

Me gustaría acabar agradeciéndoselo todo a mis amigos de la infancia, quienes me conocen tal y como soy y me han acompañado en mis logros y en mis fracasos y jamás me han juzgado por mis errores.

Gracias. Sergio.

# ÍNDICE

1	Introducción .....	1
1.1	Ultrasonidos Generalidades.....	1
1.2	Parámetros ultrasónicos.....	2
1.3	Clasificación de las ondas.....	3
1.4	Aplicaciones de los ultrasonidos de potencia en el tratamiento de alimentos.....	4
1.5	Empleo del ultrasonido de potencia en secado conectivo.....	6
1.6	Aspectos limitantes para la aplicación de ultrasonidos en procesos de secado.....	6
1.7	Sistemas de aplicación de ultrasonidos.....	7
1.8	Aplicaciones en medio líquido.....	9
1.9	Emisores en medio gaseoso.....	10
2	Objetivos .....	12
3	Materiales y Métodos .....	13
3.1	Cámara de secado.....	13
3.2	Exterior de la cámara.....	14
3.3	Zona de secado.....	15
3.4	Medidas de caracterización del campo acústico.....	16
3.5	Condiciones de trabajo ensayadas.....	17
3.5.1	Distancia del transductor a la superficie de tratamiento (cm).....	17
3.5.2	Potencia (W).....	17
3.5.3	Flujo de aire (m/s).....	17
3.5.4	Temperatura (°C).....	18
3.6	Análisis estadístico de resultados.....	18
4	Resultados y discusión .....	19
4.1	Influencia de la distancia entre transductor y superficie de tratamiento en la presión acústica media registrada.....	23
4.2	Determinación de la influencia de la potencia sobre la presión acústica media registrada.....	27
4.3	Determinación de la influencia del flujo de aire sobre la presión acústica media registrada.....	29
4.4	Determinación de la influencia de la temperatura sobre la presión acústica media registrada.....	32
4.5	Interacciones entre las variables estudiadas.....	34
4.5.1	Flujo de aire – Distancia.....	35
4.5.2	Potencia - Flujo de aire.....	35
5	Conclusiones .....	37
6	Bibliografía .....	38

## ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

### TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Algunas aplicaciones de los ultrasonidos de potencia en la industria de alimentos. ....	5
<b>Tabla 2.</b> Presión acústica (Pa) media y desviación estándar en el APT y el AMPA para cada una de las condiciones de trabajo consideradas. ....	23
<b>Tabla 3.</b> Área de máxima concentración teórica de ultrasonidos calculada para las distancias de trabajo entre transductor y superficie tratada. ....	24

### FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Esquema de la propagación de una onda ultrasónica en el tiempo.....	3
<b>Figura 2.</b> Clasificación del sonido en función de su frecuencia.....	4
<b>Figura 3.</b> Transductor piezoeléctrico de sándwich tipo Langevin. <b>1.</b> Masa frontal que actúa como cara radiante. <b>2.</b> Masa posterior que sirve como soporte. <b>3.</b> Longitud de arreglo piezoeléctrico. ....	9
<b>Figura 4.</b> Cámara de Secado <b>1.</b> Antecámara <b>2.</b> Post-cámara <b>3.</b> Soplante <b>4.</b> Secador <b>5.</b> Conductos de recirculación del aire <b>6.</b> Evaporador <b>7.</b> Resistencia eléctrica <b>8.</b> Ventilador <b>9.</b> Rail de desplazamiento del transductor y plato <b>10.</b> Transductor piezoeléctrico <b>11.</b> Plato escalonado <b>12.</b> Superficie de tratamiento. ....	13
<b>Figura 5.</b> <b>1.</b> Ordenador <b>2.</b> Generador eléctrico <b>3.</b> Amplificador Qsc -RMX 4050HD- <b>4.</b> Controlador dinámico de resonancia Pusonics <b>5.</b> Transductor piezoeléctrico <b>6.</b> Plato escalonado <b>7.</b> Superficie de tratamiento <b>8.</b> Ventilador soplante <b>9.</b> Micrófono preamplificador <b>10.</b> Osciloscopio <b>11.</b> Cámara de secado. ....	14
<b>Figura 6.</b> Interfaz del programa Dryer, desarrollado en LabVIEW para el control del sistema de generación de ultrasonidos de la cámara. ....	15
<b>Figura 7.</b> Sistema de generación y aplicación de ultrasonidos <b>1.</b> Transductor piezoeléctrico. <b>2.</b> Plato emisor escalonado. <b>3.</b> Ventilador. <b>4.</b> Anemómetro. <b>5.</b> Superficie de tratamiento. ....	16
<b>Figura 8.</b> Toma de medidas sobre la superficie de tratamiento. <b>1.</b> Cuadrícula 2x2 cm de la superficie de tratamiento. <b>2.</b> Punto de medida en cuadrícula 1x1 cm.....	17
<b>Figura 9.</b> Onda acústica registrada mediante el Osciloscopio Tektronix MDO3000.....	19
<b>Figura 10.</b> Presión acústica medida sobre la superficie de tratamiento. Distancia del transductor 25 cm, temperatura 21°C, potencia aplicada 180W y sin flujo de aire (0 m/s).....	20
<b>Figura 11.</b> Presión acústica medida sobre la superficie de tratamiento. Distancia del transductor 25 cm, temperatura 21°C, potencia aplicada 180W y sin flujo de aire (0 m/s).....	20
<b>Figura 12.</b> Presión acústica medida sobre el AMPA. Distancia del transductor 25 cm, temperatura 21°C, potencia aplicada 180W y sin flujo de aire (0 m/s).. ....	21
<b>Figura 13.</b> Esquema de la proyección focal del haz de ultrasonidos emitido por el transductor de plato. <b>1.</b> Área de proyección del transductor (APT). <b>2.</b> Área de máxima presión acústica (AMPA). ....	21
<b>Figura 14.</b> Proyecciones de la onda sobre la superficie de tratamiento <b>1.</b> superficie de tratamiento. <b>2.</b> APT. <b>3.</b> AMPA a una distancia de 25 cm <b>4.</b> AMPA a una distancia de 15 cm <b>5.</b> AMPA a una distancia de 5 cm.....	22
<b>Figura 15.</b> Esquema de proyecciones focales del haz de ultrasonidos emitido por el transductor de plato a distintas distancias <b>1.</b> Distancia de 25 cm. <b>2.</b> Distancia de 15 cm. <b>3.</b> Distancia de 5 cm. <b>4.</b> APT. <b>5.</b> AMPA. ....	24

<b>Figura 16.</b> Presión acústica media medida sobre el AMPA. <b>1.</b> Distancia del transductor a 25cm, temperatura 21°C, potencia aplicada 100W y sin flujo de aire (0 m/s). <b>2.</b> Distancia del transductor a 5cm, temperatura 21°C, potencia aplicada 100W y sin flujo de aire (0 m/s). .....	25
<b>Figura 17.</b> Presión acústica media e intervalos LSD (90%) en el APT para el factor distancia entre el transductor y la superficie de tratamiento. ....	26
<b>Figura 18.</b> Presión acústica media e intervalos LSD (90%) en el AMPA para el factor distancia entre el transductor y la superficie de tratamiento.....	26
<b>Figura 19.</b> Presión acústica medida en la zona de tratamiento a 21°C, distancia del transductor de 25 cm, 100 W y sin flujo de aire 0 m/s. Línea discontinua en rojo indica el APT, 39.5 cm <sup>2</sup> . Línea discontinua en negro indica el AMPA, 16.9 cm <sup>2</sup> . ....	27
<b>Figura 20.</b> Presión acústica medida en la zona de tratamiento a 21°C, distancia del transductor de 25 cm, 180 W y sin flujo de aire 0 m/s. Línea discontinua en rojo indica el APT, 39.5 cm <sup>2</sup> . Línea discontinua en negro indica el AMPA, 16.9 cm <sup>2</sup> . ....	28
<b>Figura 21.</b> Presión acústica media e intervalos LSD (90%) en el APT para el factor potencia. ....	29
<b>Figura 22.</b> Presión acústica media e intervalos LSD (90%) en el AMPA para el factor potencia. ....	29
<b>Figura 23.</b> Presión acústica media medida sobre el AMPA. <b>1.</b> Distancia del transductor a 5cm, temperatura 21°C, potencia aplicada 180W y sin flujo de aire (0 m/s). <b>2.</b> Distancia del transductor a 5cm, temperatura 21°C, potencia aplicada 180W y con flujo de aire (2 m/s).....	30
<b>Figura 24.</b> Presión acústica media e intervalos LSD (90%) en el APT para el factor flujo del aire. ....	31
<b>Figura 25.</b> Presión acústica media e intervalos LSD (90%) en el AMPA para el factor flujo del aire. ....	32
<b>Figura 26.</b> Presión acústica media medida sobre el AMPA. <b>1.</b> Distancia del transductor a 15cm, temperatura 21°C, potencia aplicada 180W y sin flujo de aire (0 m/s). <b>2.</b> Distancia del transductor a 15cm, temperatura -20°C, potencia aplicada 180W y con flujo de aire (0 m/s).....	33
<b>Figura 27.</b> Presión acústica media e intervalos LSD (90%) en el APT para el factor temperatura. ....	34
<b>Figura 28.</b> Presión acústica media e intervalos LSD (90%) en el AMPA para el factor temperatura. ....	34
<b>Figura 29.</b> Presión acústica media e intervalos LSD (90%) en el APT para la interacción entre flujo de aire (0 y 2m/s) y distancia (25, 15 y 5cm) del transductor.....	35
<b>Figura 30.</b> Presión acústica media e intervalos LSD (90%) en el APT para la interacción entre flujo de aire (0 y 2m/s) y potencia (100 y 180W). ....	36
<b>Figura 31.</b> Presión acústica media e intervalos LSD (90%) en el AMPA para la interacción entre flujo de aire (0 y 2m/s) y potencia (100 y 180W).....	36

# INTRODUCCIÓN

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 ULTRASONIDOS. GENERALIDADES

La energía acústica es uno de los tipos fundamentales de energía que se pueden encontrar en la naturaleza. Los sonidos son oscilaciones mecánicas en el tiempo que tienen lugar en el seno del material por el que se propagan (Cárcel, 2003). A diferencia de las ondas electromagnéticas, como las microondas, las ondas acústicas necesitan de un medio material para su propagación al tratarse de ondas elásticas. Es por ello que, las ondas electromagnéticas pueden transmitirse por el vacío mientras que el sonido no. La frecuencia de los ultrasonidos se encuentra por encima del umbral de audición del oído humano, situado en torno a 20 kHz.

La propagación de estas ondas por un medio se debe a la vibración de sus partículas de manera elástica. Así, las vibraciones elásticas son de dos tipos: compresión y descompresión (Hecht, 1996; Knorr *et al.*, 2004). Cuando se produce la compresión de las partículas del medio, se reduce la separación entre las mismas (Gallego-Juárez *et al.*, 2003; Hecht, 1996). Mientras que, durante la descompresión, las partículas del medio se alejan entre sí de manera que la densidad y la presión disminuyen (Hecht, 1996).

Un aspecto fundamental en la aplicación de ultrasonidos es su generación. Así, en 1880, el matrimonio Curie descubre el efecto piezoeléctrico, fenómeno en el que se basan la mayor parte de los sistemas generadores de ultrasonidos de la actualidad. El rastreador de ecos (eco-sounder), diseñado y construido por Langevin en 1917 constituyó la primera aplicación comercial de los ultrasonidos. Dicho sistema dio lugar posteriormente al SONAR (Sound Navigation And Ranking), utilizado para la detección de submarinos en la Segunda Guerra Mundial.

Por otro lado, la aplicación de ultrasonidos a elevada potencia y baja frecuencia puede generar efectos tanto en los procesos en los que se aplican, como en los productos tratados. Uno de estos efectos fue detectado por primera vez en las hélices de los barcos a finales del siglo XIX. Así, con movimientos de giro muy rápidos, aparecían unas burbujas de cavitación, que al implosionar producían erosiones en la hélice. Sin embargo, el desarrollo de equipos a nivel industrial para la aplicación de ultrasonidos a elevadas potencias tiene lugar a partir de la segunda mitad del siglo XX. Desde ese momento no ha parado de crecer hasta la actualidad.

Los ultrasonidos ofrecen una serie de ventajas, que facilitan su aplicabilidad en diversos campos de estudio como, por ejemplo, el que puedan ser generados y dirigidos a un punto de aplicación como un haz, cumplen las leyes de reflexión y refracción de cualquier onda y pueden ser reflejados por objetos de pequeño tamaño.

Sin embargo, también presentan una serie de limitaciones a tener en cuenta como es su dificultad de propagación a través de medios gaseosos. Esto se debe tanto a la gran capacidad de atenuación de dichos medios como a la gran diferencia de impedancia con los sistemas de generación, generalmente sólidos, que dificulta su transmisión en la interfase.

## 1.2 PARAMETROS ULTRASÓNICOS

Las ondas ultrasónicas se caracterizan por los parámetros convencionales de cualquier tipo de onda.

### Longitud de onda ( $\lambda$ , m)

La longitud de onda es la distancia entre dos planos en los que las partículas se encuentran en el mismo estado de vibración, o lo que es igual, la distancia entre dos puntos consecutivos que vibran en fase (Figura 1). Se determina a partir de la velocidad de la onda y la frecuencia (Ecuación 1).

$$\lambda = \frac{C}{f} \quad (\text{Ec. 1})$$

La relación entre la longitud de onda y el tamaño del poro del material define su interacción:

- Si la longitud de onda es mayor que el diámetro de un poro, el poro será transparente a la energía ultrasónica.
- Si la longitud de onda está en el intervalo del tamaño del poro, la onda acústica puede producir vibraciones en el interior del mismo.

### Frecuencia (f, Hz)

La frecuencia de una onda es el número de ciclos completados por la onda por unidad de tiempo. La unidad utilizada en el Sistema Internacional es el Hercio (Hz), que se define como el número de ciclos completados por una onda en un segundo. Al inverso de la frecuencia se le denomina periodo y se define como el tiempo necesario para que la onda realice un ciclo.

La frecuencia está relacionada con las sucesivas compresiones y expansiones alternativas producidas por los ultrasonidos. Por lo tanto, para aplicaciones como el secado, un aumento de la frecuencia puede ser muy interesante. Sin embargo, el aumento de la frecuencia también eleva el coeficiente de atenuación y, por lo tanto, dificulta que la onda llegue hasta donde se desea en condiciones para producir efectos significativos.

### Amplitud (A, m)

La amplitud de onda es el máximo desplazamiento de la partícula desde la posición de equilibrio (Figura 1).

### Potencia acústica (P, W)

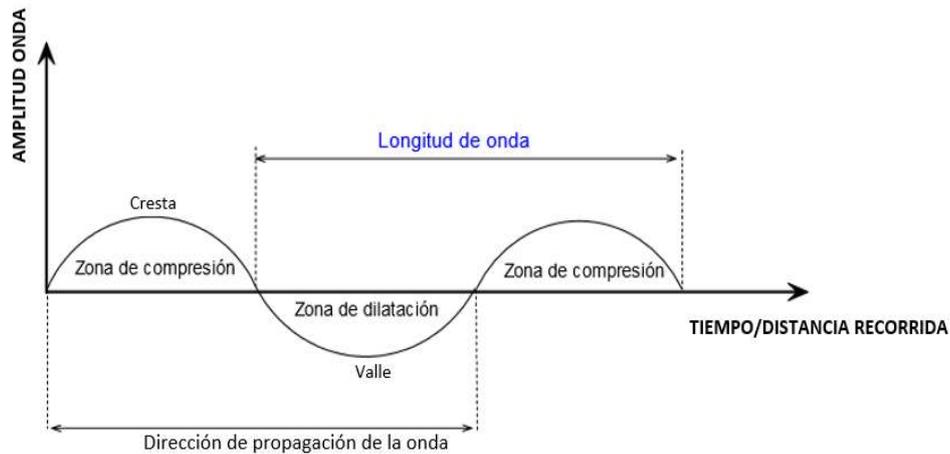
La potencia acústica es la energía total irradiada por la fuente ultrasónica por unidad de tiempo. Se puede calcular a partir de la intensidad acústica y del área de la superficie radiante (Ecuación 2).

$$P = I \cdot S \quad (\text{Ec. 2})$$

La potencia es un parámetro muy importante en las aplicaciones de ultrasonidos debido a que se relaciona directamente con la magnitud de los efectos observados.

Puede expresarse en notación decibélica a partir de la relación logarítmica entre la intensidad (o potencia) acústica existente en un medio y la intensidad (o potencia) acústica de referencia (Ecuación 2.1).

$$P_{dB} = 10 \log \cdot \frac{I}{I_0} \quad (\text{Ec. 2.1})$$



**Figura 1.** Esquema de la propagación de una onda ultrasónica en el tiempo.

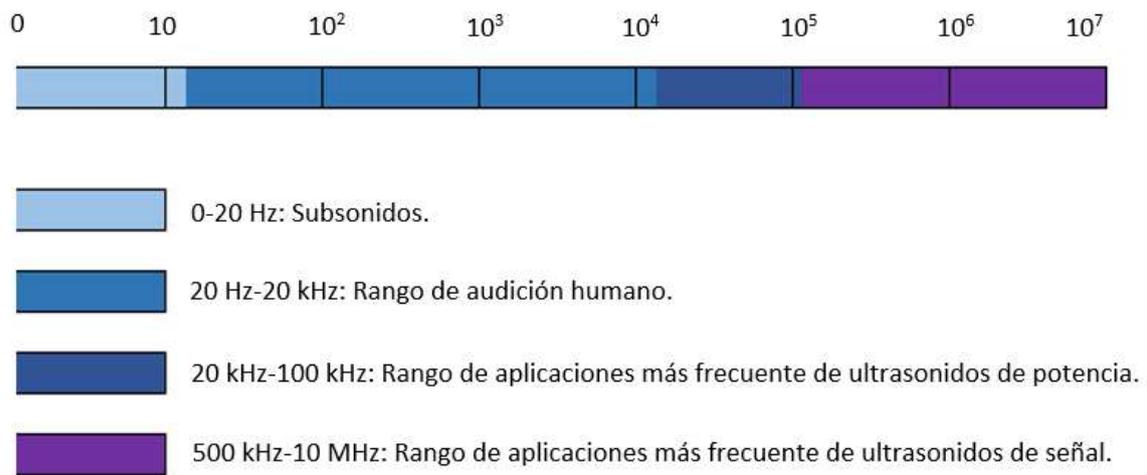
### **Presión acústica (PA, N/m<sup>2</sup>)**

La presión acústica es la presión existente en las diversas zonas del material. Dado que la presión acústica es alterna, será mayor en la fase de compresión de partículas y menor en la fase de expansión (Figura 1). La desviación máxima en relación a la normal se denomina amplitud de la presión acústica y está relacionada con la amplitud de oscilación de la onda.

Por otro lado, la densidad de energía se mide en unidades de J/m<sup>3</sup>. Si la energía se expresa en Newton por metro (Nm), las unidades de la densidad de energía se transforman en N/m<sup>2</sup>, es decir en unidades de presión. Por lo tanto, la densidad de energía es equivalente al nivel de presión acústica.

### **1.3 CLASIFICACIÓN DE LAS ONDAS**

Las ondas acústicas se clasifican de manera arbitraria en función de su frecuencia y se toma como referencia el rango de audición humano situado entre 20 Hz y 20 kHz. A las ondas de frecuencia inferior a los 20 Hz se les denomina subsonidos y por encima de los 20 kHz, ultrasonidos. Los ultrasonidos se pueden clasificar en dos grupos según sus aplicaciones industriales, que además dependen de su frecuencia y su intensidad (McClements, 1997).



**Figura 2.** Clasificación del sonido en función de su frecuencia.

**Ultrasonidos de señal (o ultrasonidos de baja intensidad)**, se caracterizan por el uso de intensidades por debajo de  $1\text{W}/\text{cm}^2$  y frecuencias entre 100 kHz y 20MHz. En estas condiciones, los ultrasonidos no afectan a los productos ni a los procesos ya que la energía involucrada es débil (Jayasooriya *et al.*, 2007). En cuanto a las frecuencias, los valores tan altos permiten garantizar una adecuada resolución. Entre las aplicaciones de los ultrasonidos de señal en Tecnología de Alimentos se pueden distinguir dos grandes grupos: aplicaciones para el control de las variables de un proceso y aplicaciones para el análisis no destructivo de los alimentos. Este principio ha sido utilizado para determinar la composición de productos tan diferentes como filetes de bacalao (Ghaedian *et al.*, 1997), mezclas de grasa y carne de cerdo (Benedito *et al.*, 2001), sobrasada (Llull *et al.*, 2002; Simal *et al.*, 2003) o alpechín (Benedito *et al.*, 2004). Una de las aplicaciones ultrasónicas que se encuentra muy extendida a nivel comercial, es la medida del espesor de grasa en canales de animales (Cross, Belk, 1994).

**Ultrasonidos de potencia (o ultrasonidos de alta intensidad)**, caracterizados por utilizar intensidades superiores a  $1\text{W}/\text{cm}^2$  y frecuencias más bajas que los ultrasonidos de señal, concretamente, en el rango de 20-100 kHz. El uso de estas frecuencias tan bajas disminuye la atenuación y permite aplicar altos niveles de potencia. Su aplicación industrial se basa en introducir suficiente energía para producir cambios en los procesos o en los productos. Así, se utilizan para intensificar procesos como la emulsificación, la extracción de compuestos de interés tanto en condiciones convencionales como en condiciones supercríticas (Cárcel *et al.*, 2012), el secado por convección tanto a altas como a bajas temperaturas la inactivación de microorganismos y enzimas o el desespumado (Cárcel *et al.*, 2014).

#### 1.4 APLICACIONES DE LOS ULTRASONIDOS DE POTENCIA EN LA INDUSTRIA DE ALIMENTOS

La creciente demanda de productos sanos y que conserven las características organolépticas y nutricionales de los productos frescos, ha promovido el empleo de métodos alternativos de procesado, que reduzcan el impacto en los componentes intrínsecos de los alimentos. Esto ha

incrementado el interés en el uso de nuevas técnicas alternativas, como es, el uso de los ultrasonidos.

En la industria alimentaria, los ultrasonidos de potencia se utilizan en aplicaciones como homogeneización de emulsiones, limpieza de materiales, dispersión de sólidos, eliminación de gases disueltos en medios líquidos, ruptura de células para promover procesos de extracción o incluso por su efecto inactivador de microorganismos o enzimas al combinarse con presión y temperatura (Álvarez *et al.*, 2006; Vercet *et al.*, 2002). En la Tabla 1 se muestra un resumen de las principales aplicaciones de los ultrasonidos de potencia en procesos agroalimentarios. Este trabajo, concretamente se centró en su aplicación en procesos de secado convectivo.

**Tabla 1.** Algunas aplicaciones de los ultrasonidos de potencia en la industria de alimentos.

<b>Aplicación</b>	<b>Descripción</b>
<u>Esterilización</u>	Destrucción microbiana, muy común tanto en limpieza de superficies de materiales como en alimentos.
<u>Transferencia de calor</u>	Incrementa la velocidad de congelación, descongelación y cocido. Secado acústico, incrementa transferencia de calor entre el sólido y el líquido evitando la oxidación y degradación del material.
<u>Transferencia de masa</u>	Incremento de la velocidad de transferencia de masa durante el secado, curado, separación por membranas, desecación y filtración por membrana (facilita separación de partículas suspendidas en líquidos).
<u>Cristalización</u>	Control de nucleación y tamaño de los cristales durante la congelación, (especialmente en vegetales), limitando el aumento de tamaño de los cristales de hielo y, por lo tanto, disminuyendo el daño estructural.
<u>Procesado cárnico</u>	Tenderización de la carne.
<u>Emulsificación, encapsulación y homogeneización</u>	Homogeneización y emulsificación de la leche y mayonesa.
<u>Estimulación celular</u>	Importante en procesos como la producción de yogurt o la germinación de semillas.
<u>Fermentación celular</u>	Incremento en velocidad de fermentación y envejecimiento del vino.
<u>Procesos de oxidación</u>	Desarrollo de aromas y sabores en la producción de vino.
<u>Corte</u>	Cortado de productos frescos y congelados, incluyendo alimentos compuestos o multicapa.
<u>Degaseado y despumación</u>	Desespumado de bebidas carbonatadas como cerveza u otros líquidos durante el enlatado; desespumado de fermentos microbiológicos; eliminación de gases disueltos en líquidos.
<u>Ruptura celular y extracción</u>	Mejora de la extracción de compuestos (enzimas, proteínas y aceites esenciales).
<u>Actividad enzimática y desnaturalización de proteínas</u>	Inactivación y mejora de la actividad enzimática; desnaturalización de proteínas.
<u>Polimerización y despolimerización</u>	Aplicación en polímeros alimentarios.

## 1.5 EMPLEO DE ULTRASONIDOS DE POTENCIA EN SECADO CONVECTIVO

El secado por convección es un método clásico ampliamente utilizado para aumentar la vida útil de alimentos. Además, presenta otras ventajas importantes como el reducir el peso de los productos, lo que facilita su transporte y disminuye las necesidades de espacio para su almacenamiento (Ertekin, Yaldiz, 2004). El incremento de la estabilidad de los alimentos es debido a que se reduce su actividad de agua, limitando así la actividad microbiológica y los cambios físicos y químicos que se producen durante el almacenamiento (Mayor *et al.*, 2004).

Sin embargo, dependiendo de las condiciones del proceso, se pueden producir cambios físicos, químicos y físico-químicos en los constituyentes de los productos deshidratados, afectando a su calidad. Entre las alteraciones indeseables que se pueden producir se encuentran las modificaciones en componentes bioactivos, nutritivos, aromas, color y textura (Chou, Chua, 2001; Mayor *et al.*, 2004).

Los ultrasonidos de potencia se han aplicado con éxito en el secado convectivo de alimentos, a altas temperaturas consiguiendo importantes reducciones del tiempo de procesado y, por tanto, del consumo energético del proceso. La energía mecánica que introducen los ultrasonidos en el medio contribuye a disminuir tanto la resistencia externa a la transferencia de materia como la interna. Sin embargo, se ha observado que a temperaturas moderadas (<40°C) la influencia de los ultrasonidos en la cinética de secado es mayor que a temperaturas más elevadas (>70°C) (García-Pérez *et al.*, 2006). Por otro lado, el secado a baja temperatura produce una menor degradación del producto y permite obtener productos deshidratados de alta calidad debido a que conserva mejor las propiedades organolépticas y nutricionales de los alimentos. Sin embargo, el secado en estas condiciones resulta muy largo. Así pues, esta técnica se podría aplicar en el secado a baja temperatura con el objetivo de acelerar el proceso. De hecho, se ha aplicado en pequeños secaderos de laboratorio utilizando transductores cilíndricos con resultados muy prometedores (García-Pérez *et al.*, 2012; Ozuna *et al.*, 2014; Santacatalina *et al.*, 2014; Santacatalina *et al.*, 2015; Santacatalina *et al.*, 2016a; Santacatalina *et al.*, 2016b).

## 1.6 ASPECTOS LIMITANTES PARA LA APLICACIÓN DE ULTRASONIDOS EN PROCESOS DE SECADO

### Atenuación

La atenuación es la disminución que experimentan tanto la amplitud de la presión, como la intensidad de una onda acústica cuando se propaga a través de un cierto medio. Esto significa que, la intensidad de la onda disminuye a medida que aumenta la distancia a la superficie del emisor. La Ecuación 4 muestra la expresión que permite el cálculo de la intensidad acústica de la onda en un punto situado a una cierta distancia (d) de la fuente productora.

$$I = I_0 \cdot \exp(-\alpha_3 \cdot d) \quad (\text{Ec. 4})$$

La atenuación puede ser producida por reflexión, dispersión o difracción de la onda durante su propagación, o como consecuencia de la conversión de parte de la energía cinética de la onda en energía calorífica. Existe una relación directa entre atenuación y frecuencia, siendo el coeficiente de atenuación mayor a mayor frecuencia. En medios gaseosos, el coeficiente de atenuación es muy elevado, lo que dificulta mucho la aplicación de ultrasonidos.

### **Impedancia acústica (Z)**

Es una propiedad que depende de la densidad del material a través del cual se propaga la onda ultrasónica de manera que una mayor densidad se corresponde con una mayor impedancia. Este valor sólo depende de las características del medio y, a menudo se define como la resistencia acústica específica de un medio. Así, en una interfase, la proporción de energía de onda transmitida depende de la diferencia de impedancia entre los dos medios que la definen. Cuanto mayor sea dicha diferencia, mayor será la proporción de energía reflejada y menor la transmitida. Si la diferencia de impedancia es pequeña, se conseguirá un buen acoplamiento, y entonces, una gran parte de la energía acústica será transmitida. En el caso de las aplicaciones en medios gaseosos, la diferencia de impedancia entre el sistema de generación de ultrasonidos, generalmente sólido, y el medio en el que se aplican, gas, es muy grande. Esto hace que la transmisión de energía acústica a través de la interfase resulte muy difícil. Por el contrario, la aplicación en medios líquidos es relativamente más sencilla.

### **Consideraciones particulares en aplicaciones en medio gas.**

El reto principal de la aplicación de ultrasonidos es alcanzar una transmisión eficiente de las ondas acústicas a altas frecuencias, desde los sistemas de generación hasta el punto de aplicación. La resistencia específica de los medios gaseosos, aunque cambia en una gama bastante amplia, es del orden de  $10^4$ - $10^7$  veces menor que la resistencia acústica de los medios sólidos. Esto constituye un problema fundamental en el área de la generación de ondas ultrasónicas en el medio gas mediante transductores electromecánicos.

De hecho, en aplicaciones de ultrasonidos en sistemas gas-sólido como es el caso del secado de muestras sólidas, existe una gran diferencia de impedancia entre la superficie sólida de emisores y el gas, pero, además, entre el gas y las muestras sólidas. Esto produce la reflexión de una alta proporción de la señal acústica generada en cada una de las interfases (García-Pérez *et al.*, 2006).

Un diseño óptimo de los sistemas de aplicación puede facilitar el acoplamiento, y debido a esto reducir las reflexiones producidas por la diferencia de impedancia.

## **1.7 SISTEMAS DE APLICACIÓN DE ULTRASONIDOS**

La producción de ultrasonidos consiste en la conversión de cualquier otro tipo de energía en energía acústica (Carlin, 1972). Los dos componentes esenciales de un sistema ultrasónico son una fuente de energía y un transductor (Cárcel, 2003). El transductor es el encargado de transformar la energía proporcionada por la fuente (eléctrica, magnética o mecánica) en energía acústica con las características de intensidad y frecuencia deseadas (Recuero, 1995).

Por lo tanto, un equipo básico de ultrasonidos incluye una fuente de energía, uno o varios transductores y un emisor (Povey, Mason, 1998).

### **Fuente de energía. Generador**

Como se ha comentado, cualquier tipo de energía es susceptible de convertirse en energía ultrasónica. Por ejemplo, la energía mecánica acumulada en los fluidos o un campo magnético variable pueden ser transformados en ondas ultrasónicas utilizando por ejemplo silbatos o sirenas. Sin embargo, las aplicaciones principales a nivel industrial incluyen sistemas que utilizan la electricidad como fuente de energía.

En estos casos, el generador es el encargado de transformar la señal eléctrica de la red en una señal con las condiciones de frecuencia deseada. Generalmente, un generador eléctrico produce una corriente eléctrica con una potencia nominal específica relativamente baja y necesita de un amplificador posterior para conseguir la potencia deseada. En algunas ocasiones, el mismo equipo también realiza funciones de amplificador de la señal.

Los generadores eléctricos que están diseñados específicamente para la aplicación de ultrasonidos de potencia, operan en rangos bajos de frecuencia (10-40 kHz).

### **Transductor**

El término transductor se refiere a cualquier dispositivo que transforme una forma de energía en otra. En el caso de los ultrasonidos, el transductor transforma cualquier tipo de energía en una vibración mecánica a frecuencias ultrasónicas (Povey, Mason, 1998).

El transductor es el elemento central de un sistema de ultrasonidos y está constituido por un elemento principal y una serie de elementos secundarios o pasivos. El elemento principal es el responsable de la producción de los ultrasonidos. La energía que proviene de la fuente provoca una serie de cambios en sus dimensiones que provocan la aparición de una onda mecánica. Los elementos pasivos se encargan de mejorar la transferencia de la energía acústica producida.

Principalmente, existen tres tipos diferentes de transductores: los transductores operados mediante fluidos, los transductores magnetostrictivos y los transductores piezoeléctricos. Los primeros, entrarían en la categoría de silbatos o sirenas. Como ya se ha comentado, utilizan la energía mecánica almacenada en fluidos para generar una vibración. No son muy utilizados a nivel industrial. Los transductores magnetostrictivos presentan la ventaja de alcanzar altos niveles de intensidad acústica manteniéndose muy estables (Peshkovsky, Peshovsky, 2010). Sin embargo, su eficiencia es relativamente baja situándose por debajo del 50%. Por último, se encuentran los sistemas basados en transductores piezoeléctricos que son los más utilizados tanto a nivel de laboratorio como en aplicaciones industriales y se pueden encontrar en la mayoría de los procesadores de ultrasonidos y reactores. Estos transductores presentan una eficiencia superior al 95%. Dada su importancia, a continuación, se van a tratar con más detalle.

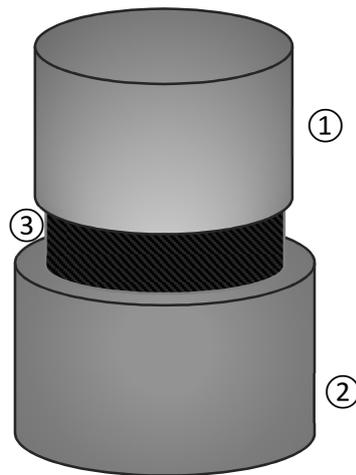
### **Transductores piezoeléctricos.**

Estos transductores están constituidos por un material cerámico cristalino que responde a la energía eléctrica con el llamado efecto piezoeléctrico. Sólo ciertos cristales naturales, como el cuarzo, la turmalina o la sal de Rochelle presentan dicho efecto piezoeléctrico, el cual requiere de una estructura cristalina sin centro de simetría (Raj *et al.*, 2004).

Si se ejerce presión sobre este tipo de cristales, se generará en cada una de sus caras una carga de igual intensidad, pero de sentido contrario. A este fenómeno se le conoce como efecto piezoeléctrico directo. Opuestamente, si al cristal se le aplica un campo eléctrico con la misma carga, pero de sentido contrario sobre las caras del cristal, la forma del cristal cambia levemente como consecuencia termodinámica del esfuerzo directo. Al aplicar una corriente alterna de elevada frecuencia al transductor, se provoca la vibración del material, lo cual conlleva a la generación de la onda ultrasónica. Debido a esto, una señal eléctrica en los sistemas piezoeléctricos es capaz de generar ondas acústicas.

Al ser el efecto muy pequeño en las cerámicas naturales, se han desarrollado materiales con propiedades mejoradas. Es el caso, por ejemplo, de materiales cerámicos ferroeléctricos policristalinos (Raj *et al.*, 2004), como el Titanato de Bario y el Zirconato Titanato de Plomo, conocidos como cerámicas piezoeléctricas. Las cerámicas constituyen el elemento principal del transductor. A éstas se le añaden elementos metálicos para protegerlas, ya que son frágiles, y para que actúen de sumideros de calor previniendo su sobrecalentamiento. Los materiales metálicos utilizados son de alta calidad destacando el titanio.

La gran mayoría de transductores piezoeléctricos existentes siguen basándose en el transductor clásico tipo sándwich (Figura 3) que fue diseñado originalmente por Langevin en 1920.



**Figura 3.** Transductor piezoeléctrico de sándwich tipo Langevin. **1.** Masa frontal que actúa como cara radiante. **2.** Masa posterior que sirve como soporte. **3.** Longitud de arreglo piezoeléctrico.

A estos transductores se le acoplan diferentes tipos de emisores dependiendo a que medio vayan a ser aplicados.

### 1.8 APLICACIONES EN MEDIO LÍQUIDO

- **Baño de ultrasonidos.**

En aplicaciones de líquidos, los sistemas más utilizados son los baños de ultrasonidos. Son simples y compactos. Se trata de una o varias cerámicas piezoeléctricas acopladas al fondo de un baño. Al vibrar todas ellas en fase generan una vibración en el fondo que se transmiten al líquido contenido en el baño.

Sus principales limitaciones son la poca potencia que suministran al medio si se comparan con otros sistemas, la variación del campo acústico dentro del baño y la dificultad en el control de la temperatura (Mulet *et al.*, 2003).

- **Sistemas tipo sonda.**

En estos sistemas, los ultrasonidos son aplicados directamente mediante una sonda vibrante. Dependiendo de la geometría de la misma, la energía ultrasónica puede ser simplemente transmitida o concentrarla en una superficie menor con el fin de amplificar la intensidad, y, por lo tanto, sus efectos. (Mason, 1998).

En aplicaciones con este tipo de sistemas, la distancia entre la punta de la sonda y la muestra tratada es un parámetro importante a ser controlado debido a la atenuación del campo ultrasónico con la distancia.

## 1.9 EMISORES EN MEDIO GASEOSO

Los transductores piezoeléctricos, incluso mejorados, mantienen muchas limitaciones en aplicaciones en medio gaseoso. Por ello, en los últimos años, se ha profundizado en el desarrollo de nuevas tecnologías en transductores específicos para ultrasonidos de potencia, que permitan su aplicación eficaz en el medio gas, y con ello conseguir mejorar aplicaciones como el secado convectivo de algunos alimentos (De la Fuente *et al.*, 2006; Gallego-Juárez *et al.*, 2007). Como resultado de estos estudios, se desarrollaron nuevos tipos de transductores de ultrasonidos de potencia de alta superficie radiante. Entre ellos destacan los transductores cilíndricos y los de placa escalonada que consiguen un mejor acople de impedancias con el aire, un incremento en la capacidad del sistema a alta potencia y una alta directividad para las aplicaciones en aire (Gallego-Juárez *et al.*, 1999; Gallego-Juárez, Rodríguez, 2010).

- **Sistemas de tubo vibrante.**

En este caso, el transductor se encuentra conectado a un emisor con forma de tubo cilíndrico metálico, con paredes delgadas y hueco. El cilindro se excita por la acción del transductor generando en su interior un campo acústico estacionario de muy alta intensidad.

- **Plato circular radiante (Emisor de placa escalonada)**

Este sistema posee un elevado rendimiento, capacidad de potencia y una muy alta directividad. El emisor está compuesto por una placa radiante extensa, de perfil escalonado, que vibra flexionalmente en uno de sus modos propios y es excitada en su centro por un vibrador piezoeléctrico constituido, a su vez, por un amplificador mecánico y un transductor tipo sándwich. La extensa superficie de la placa aumenta la impedancia de radiación y ofrece al sistema vibrante una buena adaptación de impedancias con el aire (Gallego-Juárez *et al.*, 1999).

Los sistemas ultrasónicos de placa escalonada se han utilizado para mejorar procesos de secado de alimentos y para evitar la formación de espumas en el llenado de latas y en reactores de fermentación (Gallego-Juárez, 1998).

Existen dos tipos de platos escalonados, circulares y rectangulares; Los circulares son los más utilizados, debido a que los rectangulares presentan la limitación muy importante de ser propensos a la exposición de los fenómenos no lineales cuando son utilizados a voltajes altos.

En este sentido, el grupo ASPA de la Universitat Politècnica de València, ha venido trabajando en los últimos años en la aplicación de ultrasonidos de alta intensidad en procesos de secado, tanto a alta como a baja temperatura, utilizando sistemas de tubo vibrante con resultados muy prometedores. En este sentido, se planteó la construcción de un nuevo secadero de una escala mayor, empleando en este caso un sistema de plato escalonado con vistas al escalado del proceso.

# OBJETIVOS

## 2. OBJETIVOS

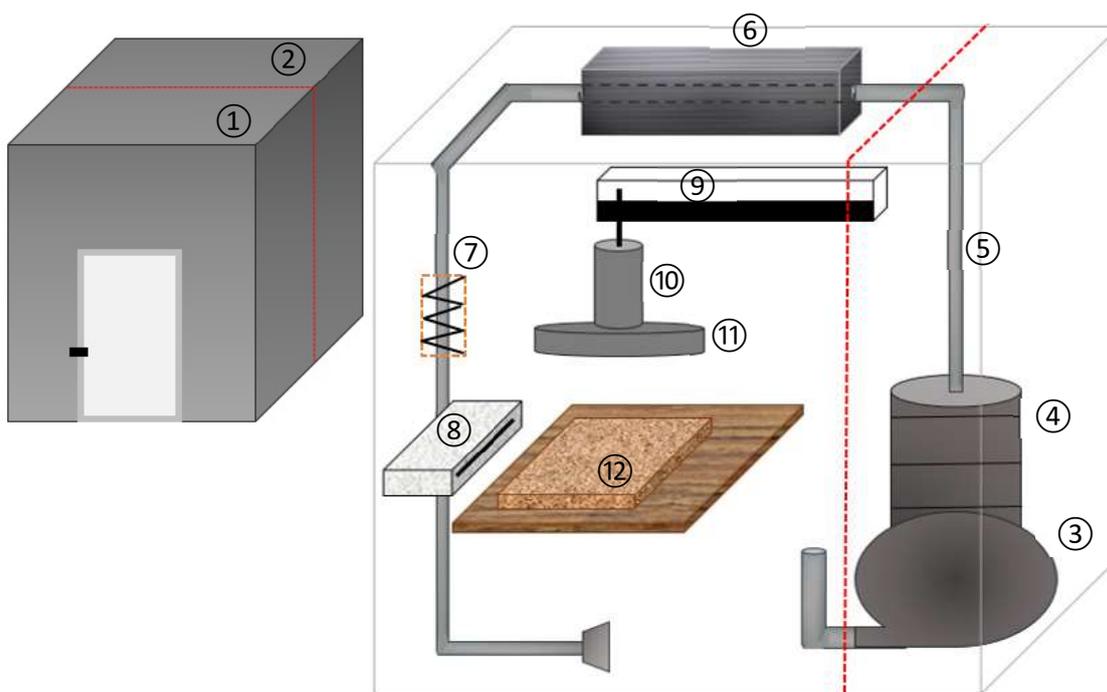
El objetivo general del presente trabajo fue caracterizar el campo acústico generado por el sistema de aplicación de ultrasonidos en medio gas de un secadero a baja temperatura piloto desarrollado por el grupo de investigación ASPA (Análisis y Simulación de Procesos Agroalimentarios) en diferentes condiciones de trabajo. Por ello, se plantearon los siguientes objetivos particulares:

- I. Determinar la influencia de la distancia entre transductor y superficie de tratamiento en la presión acústica media.
- II. Determinar la influencia del flujo de aire en la presión acústica media registrada en la zona de colocación de muestras.
- III. Determinar la influencia de la temperatura de trabajo en la presión acústica media de la superficie donde se colocan las muestras.
- IV. Determinar la zona de máxima presión en cada situación de trabajo y cuantificar el valor de dicha presión máxima media.
- V. Determinar la máxima presión acústica registrada en cada situación de trabajo.

# MATERIALES Y MÉTODOS

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

Como se ha comentado, el objetivo del trabajo fue caracterizar el campo acústico producido por el sistema de aplicación de ultrasonidos sin contacto directo de un secadero piloto a baja temperatura. A continuación, se describe brevemente la configuración de dicho secadero y de manera más detallada el sistema de aplicación de ultrasonidos (Figura 4).



**Figura 4.** Cámara de Secado 1. Antecámara 2. Post-cámara 3. Soplante 4. Secador 5. Conductos de recirculación del aire 6. Evaporador 7. Resistencia eléctrica 8. Ventilador 9. Rail de desplazamiento del transductor y plato 10. Transductor piezoeléctrico 11. Plato escalonado 12. Superficie de tratamiento.

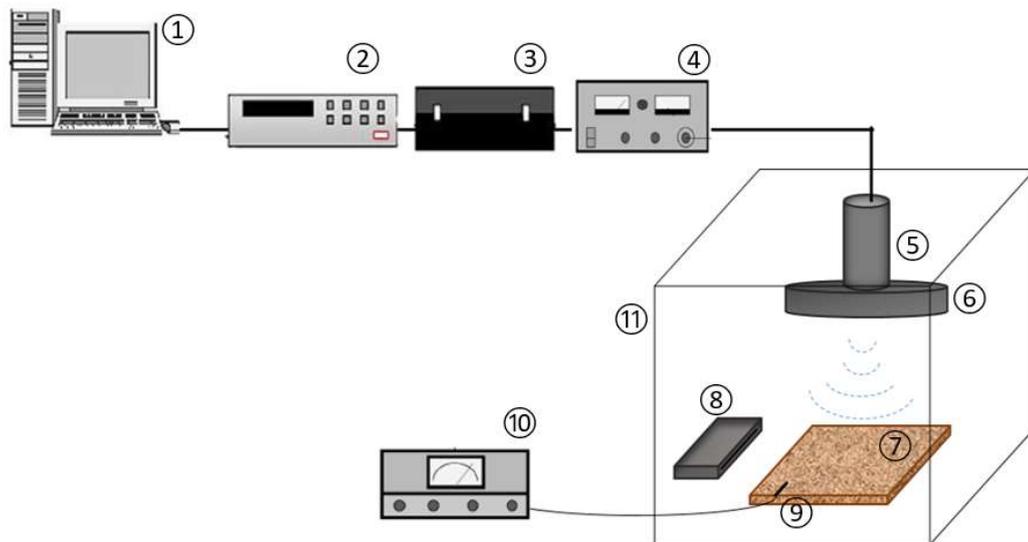
#### 3.1 CÁMARA DE SECADO

Consiste en una cámara industrial de la marca Misa, de dimensiones 2.20 x 1.20 x 2.40 m y capacidad de alcanzar una temperatura de hasta  $-20^{\circ}\text{C}$ . La cámara se encuentra dividida en su interior en dos zonas mediante una pared metálica en la que cuenta con una ventana como única apertura. De esta forma, se distingue una antecámara (Figura 4.1), que se encuentra a la entrada y cuya función básica es la de hacer de barrera a la humedad ambiental, y una post-cámara (Figura 4.2), que es dónde tienen lugar las experiencias de secado. El aire para secar es impulsado por un soplante (Figura 4.3) que se encuentra en la antecámara y pasa por un sistema de desecación (Figura 4.4) para bajar su humedad relativa. Posteriormente, el aire de secado se pasa por el evaporador de la cámara (Figura 4.6) para enfriarlo. Con objeto de fijar su temperatura final a los valores deseados, atraviesa después una resistencia eléctrica (Figura 4.7). Por último, es impulsado por un ventilador (Figura 4.8) a la velocidad de flujo de aire deseada a través de la zona en la que se sitúan las muestras. El sistema de generación de ultrasonidos

dentro de la cámara consiste básicamente en un transductor piezoeléctrico (Figura 4.10) conectado a un emisor de plato escalonado (Figura 4.11). Dicho sistema está sobre la zona de colocación de muestras (Figura 4.12) para generar un campo acústico de alta intensidad que incida sobre las mismas.

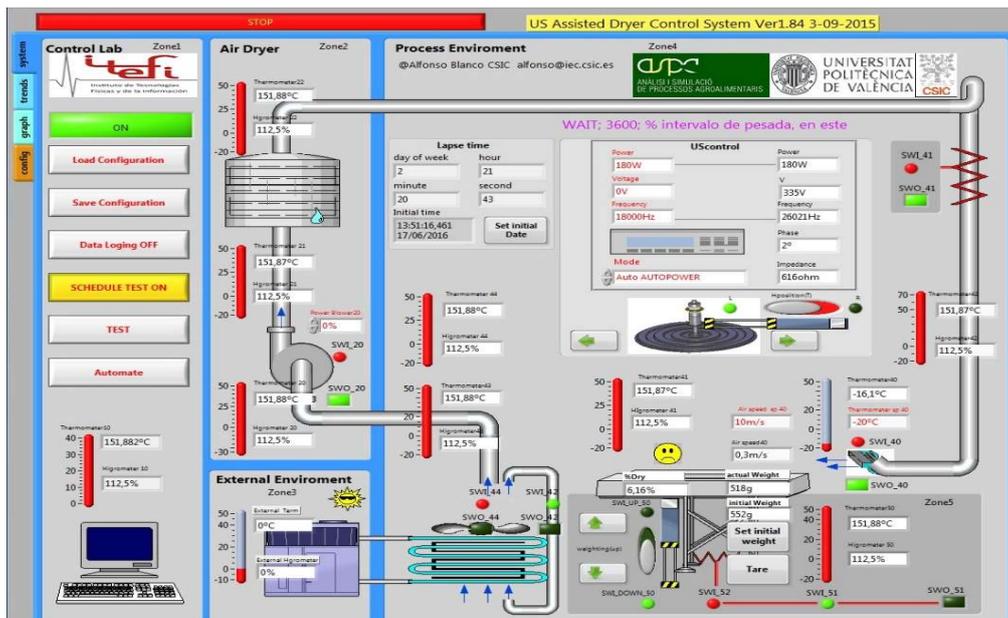
### 3.2 EXTERIOR DE LA CÁMARA

En el exterior de la cámara, y evitando las condiciones de temperatura adversas de la misma, se encuentra un generador (Figura 5.2), un amplificador (Qsc -RMX 4050HD-) (Figura 5.3) y un controlador dinámico de resonancia (Pusonics) (Figura 5.4) que se encargan de la generación y acondicionamiento de la señal eléctrica que alimenta el transductor (Figura 5.5).



**Figura 5. 1.** Ordenador 2. Generador eléctrico 3. Amplificador Qsc -RMX 4050HD- 4. Controlador dinámico de resonancia Pusonics 5. Transductor piezoeléctrico 6. Plato escalonado 7. Superficie de tratamiento 8. Ventilador soplante 9. Micrófono preamplificador 10. Osciloscopio 11. Cámara de secado.

Todos los sistemas de secadero se encuentran conectados a un ordenador (Figura 5.1). Este a través de un programa desarrollado mediante el software LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench), creado por National Instruments, permite la aplicación, seguimiento y control de todos los parámetros durante el proceso de secado. Entre los parámetros que el programa permite controlar se encuentra: la temperatura del interior de la cámara, la temperatura y la velocidad del flujo de aire de secado, la potencia de aplicación de los ultrasonidos, el control de la secuencia de pesada de las muestras incluyendo los sistemas de desplazamiento del transductor y la subida de la balanza para tomar el peso de la muestra sin interferencias.



**Figura 6.** Interfaz del programa Dryer, desarrollado en LabVIEW para el control del sistema de generación de ultrasonidos de la cámara.

### 3.3 ZONA DE SECADO

La zona de secado y tratamiento de las muestras se puede observar con más detalle en la Figura 7. El ventilador (Figura 7.3) situado a la izquierda es el encargado de generar un flujo de aire que atraviesa la superficie de tratamiento, zona donde se colocan las muestras a secar. La forma de dicho ventilador hace que dicho flujo de aire circule de forma plana de izquierda a derecha de la zona de tratamiento. A la derecha de la misma hay situado un anemómetro (Figura 7.4) cuya misión es registrar la velocidad real del aire y alimentar al sistema de control del mismo.

El transductor de ultrasonidos (Figura 7.1) está situado justo encima de la zona de tratamiento. Es excitado mediante la señal proporcionada por el generador, transmite la vibración a un emisor de tipo plato escalonado (Figura 7.2), que es el encargado de aplicarla, a través del aire, hasta la superficie de tratamiento. Dicho plato escalonado presenta un diámetro de 39,5 cm, su capacidad de potencia es de 200W con una eficiencia del 80% y es capaz de alcanzar niveles de intensidad en el aire de 175 dB. La caracterización previa del funcionamiento del transductor se realizó en una cámara anecoica por el grupo de Tecnologías y Sistemas Ultrasónicas del Instituto de Tecnologías Físicas (ITEFI) del CSIC. Tal y como está montado, el transductor genera un campo acústico focalizado. El foco de dicho campo se sitúa a una distancia igual al diámetro del transductor, es decir, a 40 cm desde el transductor y tiene un diámetro de 3 cm. Esto significa que, a esa distancia, 40 cm, el sistema concentra toda la energía acústica aplicada en una sección circular de 3 cm.

En cuanto a la superficie de tratamiento, se trata de una superficie plana de 54 x 41 cm de un material polimérico para limitar su peso. A esta superficie se le colocó un papel milimetrado y forró con un material impermeable para evitar su degradación debido a posibles condensaciones de humedad en su superficie (Figura 7.5). El papel milimetrado permitió

obtener una cuadrícula, sobre la que se procedió a realizar la toma de medidas de la presión acústica.



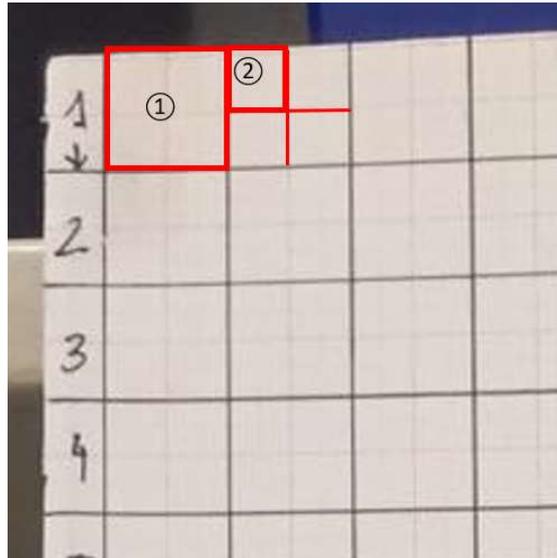
**Figura 7.** Sistema de generación y aplicación de ultrasonidos **1.** Transductor piezoeléctrico. **2.** Plato emisor escalonado. **3.** Ventilador. **4.** Anemómetro. **5.** Superficie de tratamiento.

### 3.4 MEDIDAS DE CARACTERIZACIÓN DEL CAMPO ACÚSTICO

Como se ha mencionado anteriormente, el objetivo del trabajo fue caracterizar el campo acústico generado por el sistema de aplicación de ultrasonidos bajo diferentes condiciones de trabajo.

#### **Medida de la presión acústica.**

La caracterización del campo acústico generado por el transductor de ultrasonidos se realizó a partir de medidas experimentales del mismo. Para ello, se utilizó un micrófono con preamplificador (Brüel & Kjær Type 2670) conectado a un osciloscopio (Tektronix MDO3000) (Figura 5.9). Se realizaron medidas de frecuencia y tensión pico a pico. Estas últimas, a partir de la sensibilidad de recepción del micrófono se tradujeron a medidas de presión acústica. Para realizar las medidas, el micrófono se colocó en la esquina superior de cada cuadrado (1 x 1 cm) como se representa en la Figura 8. Esto supone que, para cubrir toda la superficie de colocación de muestras, fue necesario medir en un total de 520 puntos en cada condición ensayada. Las medidas obtenidas permitieron realizar un mapeado del campo acústico generado sobre la superficie de tratamiento en las diferentes condiciones de trabajo.



**Figura 8.** Toma de medidas sobre la superficie de tratamiento. **1.** Cuadrícula 2x2 cm de la superficie de tratamiento. **2.** Punto de medida en cuadrícula 1x1 cm.

### 3.5 CONDICIONES DE TRABAJO ENSAYADAS

#### 3.5.1 Distancia del transductor a la superficie de tratamiento (cm)

La medida de la presión acústica se realizó considerando 3 distancias entre el transductor y la zona de tratamiento: 5, 15 y 25 cm. Al estar la superficie de tratamiento en posición paralela a la superficie emisora del transductor, teóricamente, se debe formar un campo acústico estacionario con sucesivas zonas de máxima y mínima presión acústica. En este sentido, las zonas de máxima presión acústica se sitúan a distancias múltiplo de un cuarto de longitud de onda ( $\lambda/4$ ). A la frecuencia de trabajo del transductor, estas zonas se encuentran a distancias múltiplo de 4 mm aproximadamente. Sin embargo, las distancias consideradas entre transductor y superficie de tratamiento a las que se ha trabajado, 25, 15 y 5 cm, no son exactamente múltiplos de 4 mm ya que se consideró también el espesor que deben tener las muestras a secar.

#### 3.5.2 Potencia (W)

A cada una de estas distancias, se realizaron medidas de campo acústico suministrando al transductor de ultrasonidos dos potencias eléctricas diferentes, una cercana a la máxima potencia de trabajo 180 W y otra utilizando una potencia intermedia, 100 W.

#### 3.5.3 Flujo de aire (m/s)

Como muestra la bibliografía, el flujo de aire es un factor que influye significativamente en la cinética de secado (García-Pérez et al., 2006). Así, una mayor velocidad de flujo de aire supone un menor tiempo de proceso. Esta influencia es mucho más importante en aplicaciones de secado a alta temperatura que a baja temperatura. De hecho, en condiciones de liofilización a presión atmosférica, en donde la resistencia interna a la transferencia de materia es muy grande, la velocidad apenas influye en la cinética de secado. Por otro lado, la velocidad de flujo del aire genera una serie de turbulencias que pueden afectar al campo acústico llegando incluso a romperlo a velocidades altas. Teniendo en cuenta todo esto, y dado que el objetivo fue caracterizar el campo acústico generado en un secadero convectivo de baja temperatura el cual

va a trabajar con bajas velocidades de flujo de aire, solo se ensayó el funcionamiento del sistema sin flujo de aire (0 m/s) y con una única velocidad de flujo de aire relativamente baja, 2 m/s.

#### **3.5.4 Temperatura (°C)**

Como se ha comentado, el transductor de ultrasonidos del secadero fue previamente caracterizado en las condiciones ideales que supone una cámara anecoica. Esta caracterización se realizó a temperatura ambiente. Sin embargo, la densidad del aire depende de la temperatura y esta podría influir en la transmisión de los ultrasonidos en su seno. Con el objetivo determinar si la temperatura de trabajo podría influir en el campo acústico generado, se realizaron medidas a dos temperaturas diferentes, temperatura ambiental  $21\pm 1^\circ\text{C}$  y baja temperatura,  $-20\pm 1^\circ\text{C}$ .

#### **3.6 ANALISIS ESTADISTICO DE RESULTADOS**

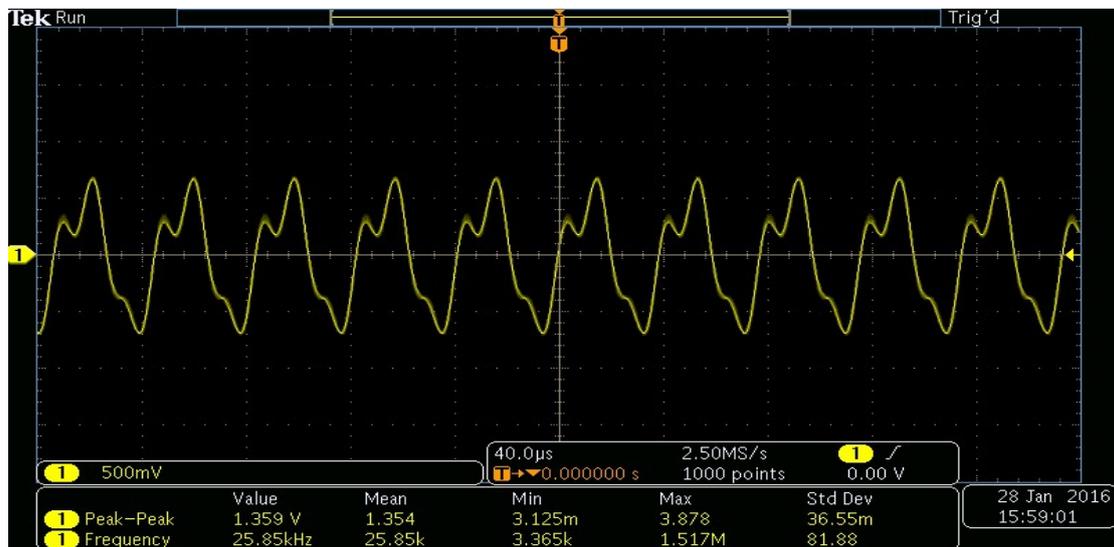
Para evaluar la significación de la influencia de los diferentes parámetros estudiados se realizó de un análisis de la varianza multifactorial mediante Statgraphics Centurion XV (Statistical Graphis Corp, Orkville, USA), para evaluar la significación de las diferencias entre los factores estudiados. Además, se determinaron los intervalos de diferencia mínima significativa (Least Significant Difference, LSD) para determinar los niveles de cada factor significativamente diferentes.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Siguiendo la planificación mostrada en el apartado anterior, se procedió a la determinación experimental del campo acústico generado por el sistema de ultrasonidos en la zona de tratamiento. Como se ha comentado, el sistema fue caracterizado previamente en condiciones ideales en un campo libre mediante medidas realizadas en una cámara anecoica. Sin embargo, su instalación en el interior de la cámara de secado hace que aparezcan reflexiones de las ondas acústicas en las superficies de la misma y en los diferentes elementos que se encuentran en su interior.

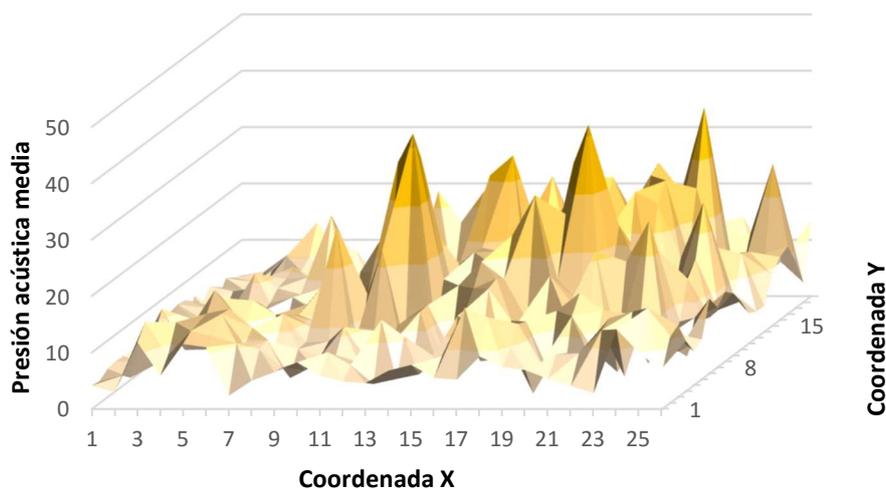
Además de esto, la superficie de tratamiento sobre la que se estudió la presión acústica generada no es totalmente lisa, lo que contribuye a aumentar los fenómenos de reflexión de la onda. Como se puede observar en la Figura 9, la onda acústica registrada no se corresponde exactamente con una onda sinusoidal, debido al efecto de reflexión de las ondas y al ruido generado en el interior de la cámara de secado.



**Figura 9.** Onda acústica registrada mediante el Osciloscopio Tektronix MDO3000.

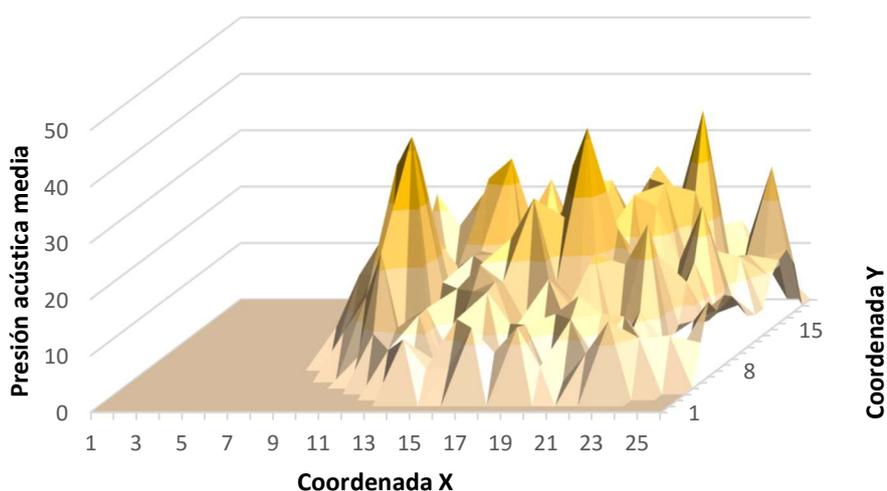
Todas estas reflexiones y superposiciones de ondas se acaban traduciendo en un campo acústico bastante variable que, sin embargo, tiene un comportamiento cercano al de un campo estacionario con zonas de máxima y mínima presión acústica. Para minimizar esta variabilidad, la medida realizada en cada punto fue el resultado de promediar con el osciloscopio 100 adquisiciones.

Como se ha comentado en el apartado de materiales y métodos, para la caracterización de la zona de tratamiento de las muestras se realizaron medidas en 520 puntos. Esto supone que teniendo en cuenta las diferentes condiciones de trabajo consideradas, se llevaron a cabo un total de 8320 mediciones. A partir de estas medidas, se obtuvieron las representaciones gráficas de la presión acústica en cada condición de trabajo (Figura 10).



**Figura 10.** Presión acústica medida sobre la superficie de tratamiento. Distancia del transductor 25 cm, temperatura 21°C, potencia aplicada 180W y sin flujo de aire (0 m/s).

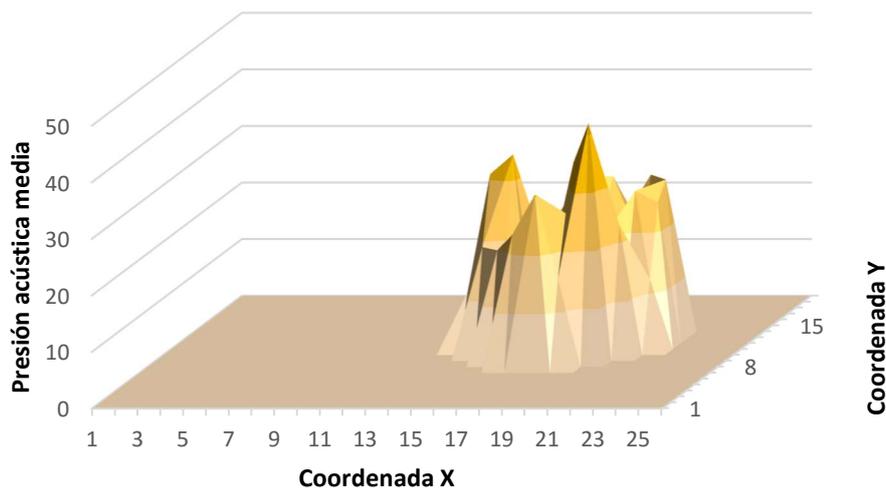
Dichas representaciones gráficas mostraron una relativa alta variabilidad del campo acústico en la zona de tratamiento de muestras. Sin embargo, se identificó la existencia de un patrón de comportamiento de la presión acústica en la superficie de tratamiento. Así, se pudo distinguir unas zonas que siempre presentaban una mayor presión acústica, independientemente de las condiciones de trabajo consideradas. Concretamente, la zona que coincide con la proyección de la superficie del transductor con la superficie de tratamiento presentó una presión significativamente superior al resto (Figura 11). A esta zona se le denominó como área de proyección directa del transductor (APT).



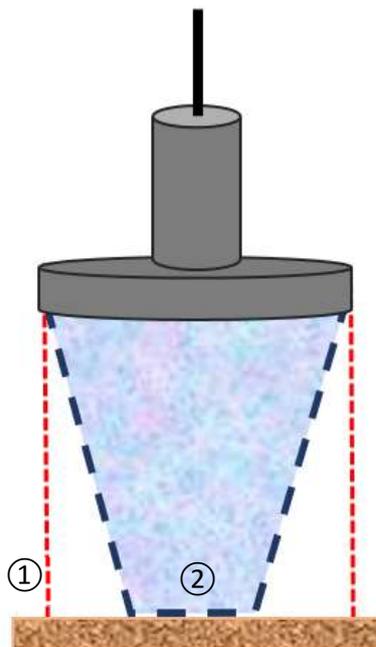
**Figura 11.** Presión acústica medida sobre el APT. Distancia del transductor 25 cm, temperatura 21°C, potencia aplicada 180W y sin flujo de aire (0 m/s).

A su vez, dentro de esta zona, se localizó otra área en la que la presión acústica obtenida siempre alcanzó valores máximos para cada condición de trabajo (Figura 12). Es necesario recordar que el patrón de emisión del transductor de plato utilizado es focal. Es decir, en condiciones de campo libre, el transductor de ultrasonidos emite un campo acústico en forma de haz cónico

cuyo foco se encuentra a la distancia que coincide con su radio. Ese foco tiene un diámetro de unos 3 cm. Por lo tanto, esa zona con una mayor presión acústica coincidiría con la proyección focal a la distancia correspondiente de la superficie del plato (Figura 13). Evidentemente, estas zonas tienen una superficie distinta según la distancia entre el transductor y la zona de tratamiento ensayadas (Figura 13). Estas nuevas zonas fueron denominadas como áreas de máxima presión acústica (AMPA).

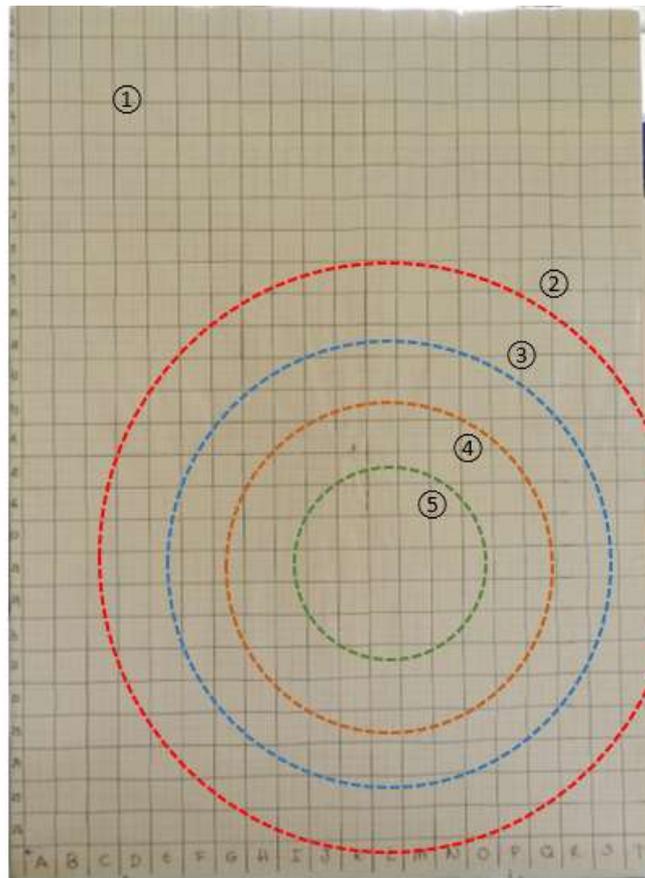


**Figura 12.** Presión acústica medida sobre el AMPA. Distancia del transductor 25 cm, temperatura 21°C, potencia aplicada 180W y sin flujo de aire (0 m/s).



**Figura 13.** Esquema de la proyección focal del haz de ultrasonidos emitido por el transductor de plato.  
**1.** Área de proyección del transductor (APT). **2.** Área de máxima presión acústica (AMPA).

Es de destacar que, tanto el APT como el AMPA, se encuentran ligeramente desplazadas hacia la derecha de la superficie de tratamiento respecto del centro de la proyección del plato (Figura 14). Esto podría ser debido a que el transductor y la superficie de tratamiento no se encuentren perfectamente paralelos. Además, en las experiencias realizadas con flujo de aire, dado que éste circula también de izquierda a derecha, podría contribuir a ese ligero desplazamiento de la onda de ultrasonidos.



**Figura 14.** Proyecciones de la onda sobre la superficie de tratamiento **1.** superficie de tratamiento. **2.** APT. **3.** AMPA a una distancia de 25 cm **4.** AMPA a una distancia de 15 cm **5.** AMPA a una distancia de 5 cm.

Una vez definidas las zonas APT y AMPA, se calculó la media de presión acústica presente en ambas zonas (Tabla 2) a partir de las medidas puntuales realizadas. Esto se realizó en cada una de las condiciones de trabajo ensayadas (distancia del transductor a la superficie de tratamiento, potencia ultrasónica aplicada, flujo del aire y temperatura) para poder determinar y cuantificar la influencia de las mismas y sus interacciones en el campo acústico generado.

**Tabla 2.** Presión acústica (Pa) media y desviación estándar en el APT y el AMPA para cada una de las condiciones de trabajo consideradas.

Temperatura (°C)	Distancia transductor (cm)	Potencia ultrasonidos (W)	Flujo de aire (m/s)	APT (Pa)	AMPA (Pa)
21	25	100	0	10,2 ± 6,3	15,8 ± 7,3
21	25	100	2	9,7 ± 6,8	15,0 ± 8,6
21	25	180	0	13,0 ± 7,7	18,5 ± 8,5
21	25	180	2	9,2 ± 6,2	16,6 ± 7,7
21	15	100	0	14,6 ± 8,0	17,8 ± 9,7
-20	15	100	0	16,7 ± 6,0	18,5 ± 6,8
21	15	100	2	10,3 ± 5,6	12,91 ± 6,13
-20	15	100	2	10,6 ± 5,0	13,9 ± 5,5
21	15	180	0	19,6 ± 11,3	25,2 ± 11,9
-20	15	180	0	22,8 ± 10,0	28,9 ± 10,2
21	15	180	2	17,8 ± 14,5	22,2 ± 16,7
-20	15	180	2	22,7 ± 11,4	27,8 ± 12,3
21	5	100	0	28,60 ± 16,2	30,1 ± 16,2
21	5	100	2	10,3 ± 7,0	11,0 ± 7,3
21	5	180	0	41,8 ± 13,0	43,1 ± 11,6
21	5	180	2	15,1 ± 8,2	15,4 ± 7,2

#### 4.1 Influencia de la distancia entre transductor y superficie de tratamiento en la presión acústica media registrada.

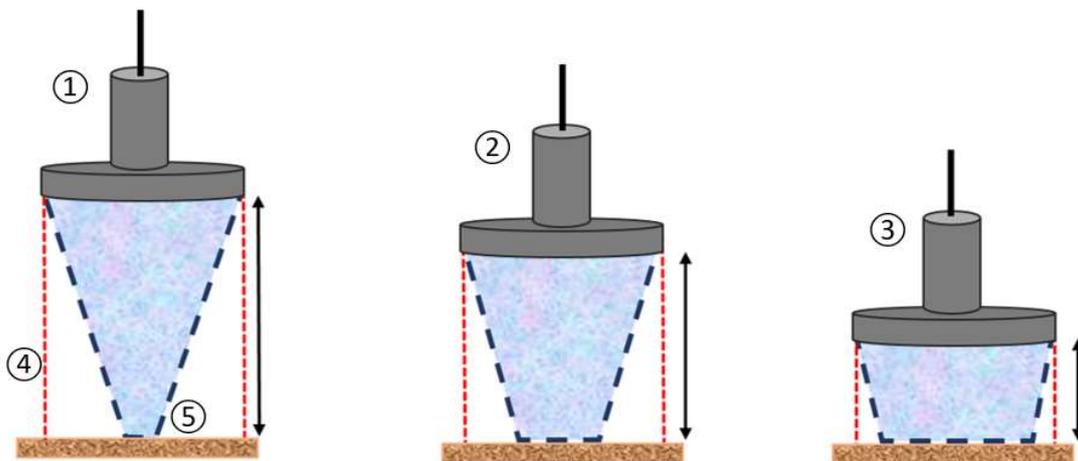
##### Datos experimentales.

Como se ha mencionado en el apartado de materiales y métodos, se ensayaron 3 distancias entre transductor y zona de tratamiento, 5, 15 y 25 cm. Para estas distancias, el AMPA fue mayor cuanto menor fue la distancia ensayada (Tabla 3) debido a que el foco de emisión se cierra con la distancia (Figura 15). Evidentemente, el APT es para todos los casos la misma.

**Tabla 3.** Área de máxima concentración teórica de ultrasonidos calculada para las distancias de trabajo entre transductor y superficie tratada.

Distancia (cm)	AMPA (cm <sup>2</sup> )
25	16,9
15	26,1
5	35,4

Esto supone, que teóricamente cabría esperar que, a pequeñas distancias, la superficie que recibe una presión acústica máxima sea mayor. Al contrario, al aumentar la distancia entre el transductor y la superficie de tratamiento, la superficie con una máxima presión acústica se reduce, pero aumenta el valor de la presión acústica ya que el foco de ultrasonidos se cierra (Figura 15).

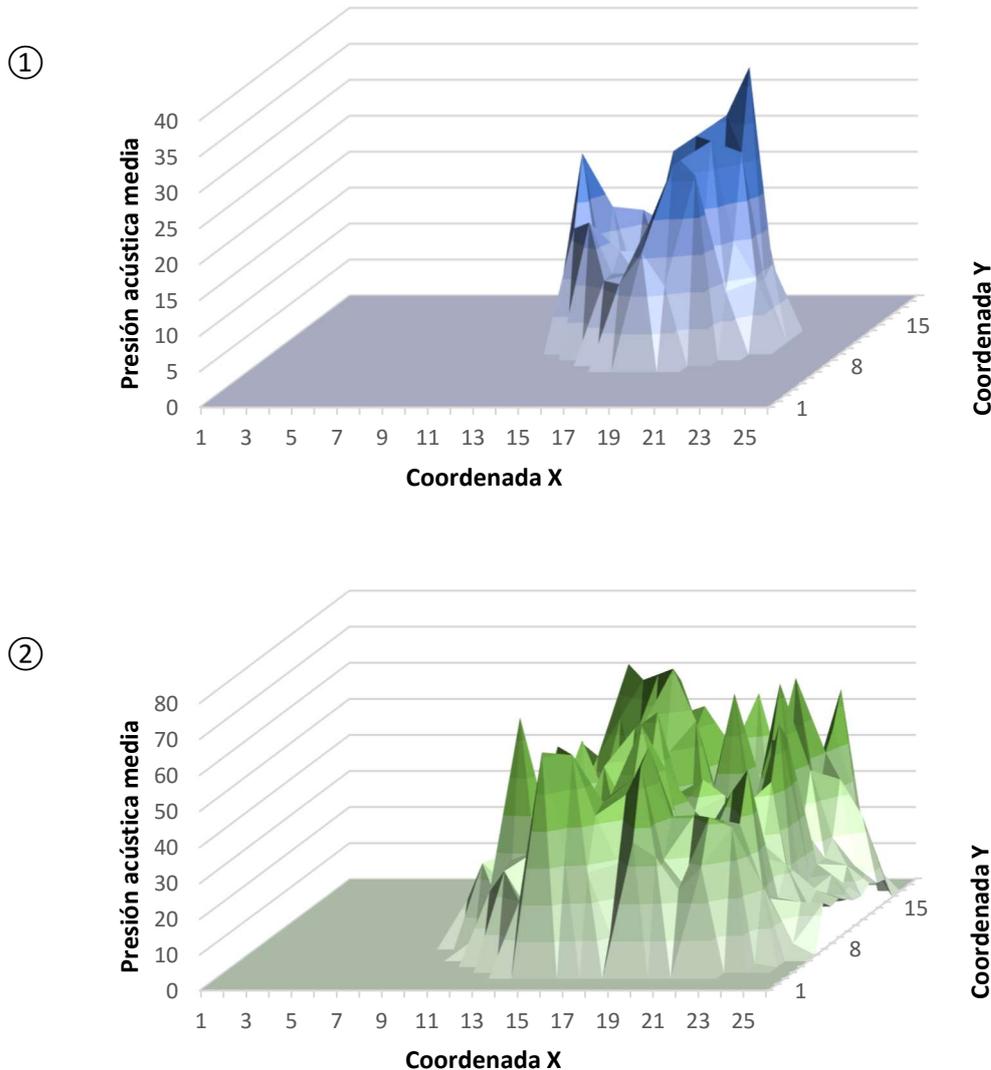


**Figura 15.** Esquema de proyecciones focales del haz de ultrasonidos emitido por el transductor de plato a distintas distancias 1. Distancia de 25 cm. 2. Distancia de 15 cm. 3. Distancia de 5 cm. 4. APT. 5. AMPA.

Los resultados experimentales obtenidos indican que la presión acústica media en el APT aumentó cuando se redujo la distancia entre transductor y la zona de tratamiento (Tabla 2). Así, la presión acústica media obtenida al aplicar una potencia de 100 W sin flujo de aire (0m/s) se incrementó en un 180% al pasar de una distancia de 25 cm ( $10,2 \pm 6,3$  Pa) a 5 cm ( $28,6 \pm 16,16$  Pa).

En cuanto a la presión acústica media en el AMPA, al contrario que lo que cabría esperar por el efecto de cierre del foco, se redujo al aumentar la dicha distancia entre transductor y zona de tratamiento (Figura 15). En este caso, por ejemplo, se pasó de una presión de  $30,06 \pm 16,15$  Pa a 5 cm, a  $15,8 \pm 7,3$  Pa a 25 cm. Esto podría deberse a una pérdida de energía acústica por anulación parcial de las ondas debido a reflexiones con las distintas superficies del interior de la

cámara. Al aumentar la distancia, podrían aumentar dichas reflexiones y podría aumentar la anulación parcial de las ondas (Figura 16).



**Figura 16.** Presión acústica media medida sobre el AMPA. **1.** Distancia del transductor a 25cm, temperatura 21°C, potencia aplicada 100W y sin flujo de aire (0 m/s). **2.** Distancia del transductor a 5cm, temperatura 21°C, potencia aplicada 100W y sin flujo de aire (0 m/s).

### Significación estadística.

El análisis de varianza ANOVA multifactorial indicó que la distancia fue un factor significativo en la presión acústica media, tanto en el APT como en el AMPA con un nivel de confianza del 90% ( $p < 0.1$ ).

La determinación de los intervalos LSD (Least Significance Difference) mostró que, en el caso de la APT, la presión acústica promedio fue significativamente mayor cuanto menor fue la distancia entre el transductor y la superficie de tratamiento en todas las distancias ensayadas (Figura 17).

Medias y 90,0% de Fisher LSD

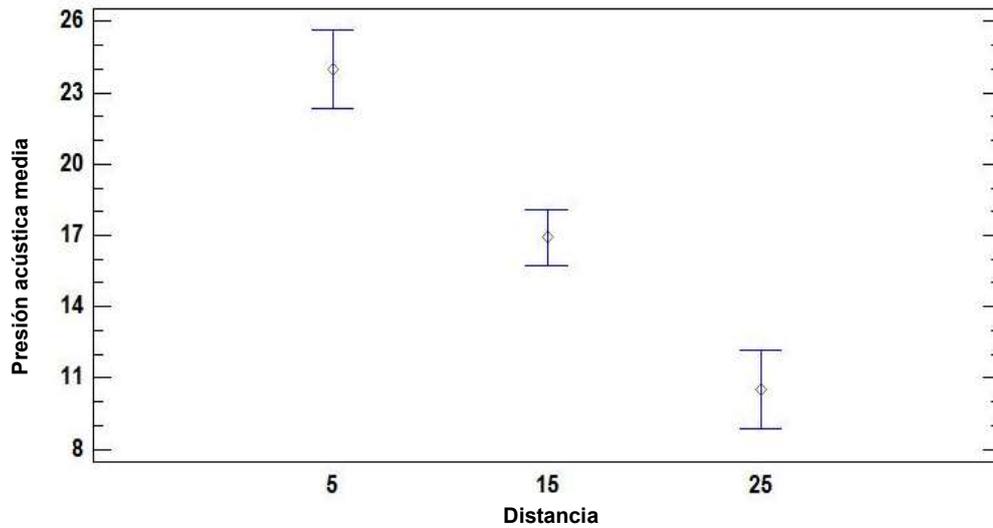


Figura 17. Presión acústica media e intervalos LSD (90%) en el APT para el factor distancia entre el transductor y la superficie de tratamiento.

En el caso de la AMPA, la diferencia de presiones acústicas fue significativamente superior ( $p < 0.1$ ) a la distancia de 5 que a la de 25 cm. A la distancia de 15 cm, la presión presentó valores intermedios que no resultaron significativamente diferentes a los obtenidos a 5 cm por un lado ni a los obtenidos a 25 cm por otro (Figura 18).

Medias y 90,0% de Fisher LSD

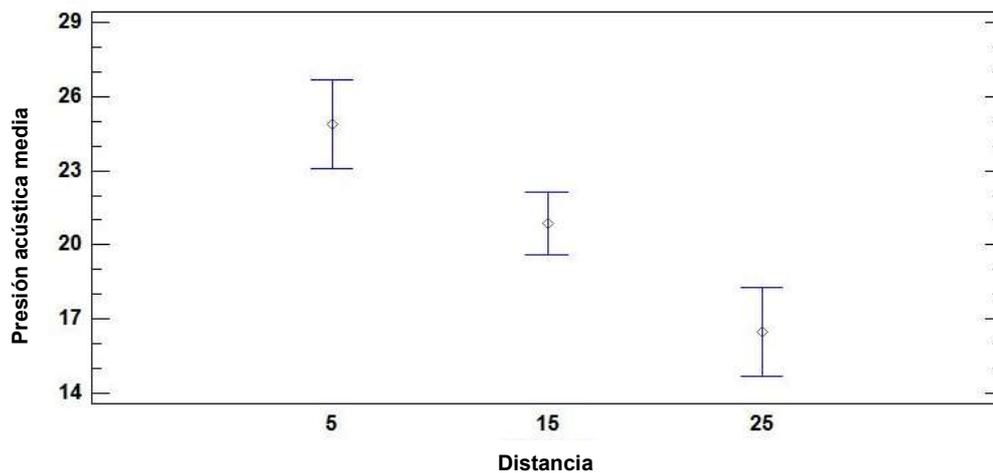


Figura 18. Presión acústica media e intervalos LSD (90%) en el AMPA para el factor distancia entre el transductor y la superficie de tratamiento.

## 4.2 Determinación de la influencia de la potencia sobre la presión acústica media registrada.

### Datos experimentales.

La caracterización del campo acústico se ha realizado considerando dos potencias eléctricas suministradas al transductor de ultrasonidos, una intermedia, 100 W, y una próxima a la máxima potencia de trabajo del transductor, 180 W.

Como cabía esperar, al suministrar una mayor potencia eléctrica al transductor se obtuvo una mayor presión acústica promedio tanto en el APT (Figura 19), como en el AMPA (Figura 20). Así, como se puede observar en las figuras 20 y 21, los valores de presión acústica obtenidos en el AMPA (5 cm, 21 °C y 0 m/s) fueron superiores a 180 W que ha 100 W. Mientras que, en el primer caso, se observan muchos puntos que se encuentran a valores de presión acústica superiores a 40 Pa (Figura 20), en el segundo caso, no se supera el umbral de 38 Pa de presión acústica (Figura 19).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	5,1	2,6	4,1	3,4	5,6	4,8	2,5	2,8	2,7	1,3	1,9	3,8	1,7	4,8	2,6	5,9	4,0	4,0	4,0	2,3
2	2,9	5,6	8,4	5,7	3,6	0,9	1,9	2,6	5,6	4,1	2,3	2,3	2,6	4,3	5,0	7,6	3,2	4,1	2,0	3,5
3	12,0	8,9	10,2	9,4	6,2	7,6	3,3	7,5	9,3	11,0	9,0	4,9	7,1	7,1	8,2	6,3	6,9	2,7	3,9	2,8
4	6,0	7,0	6,9	5,6	3,2	2,8	5,9	2,0	3,9	3,5	4,8	3,9	3,9	3,0	5,7	4,8	2,8	5,6	6,4	3,1
5	1,6	6,4	8,3	5,9	6,3	5,6	5,9	9,5	8,4	4,9	3,4	3,4	4,0	4,5	2,7	5,0	6,2	6,3	6,0	4,5
6	5,4	5,6	3,9	2,9	7,5	3,5	3,2	3,4	1,9	2,4	1,0	3,4	2,5	2,9	5,6	6,8	4,3	3,3	5,0	2,7
7	8,6	10,6	7,0	10,2	4,1	3,2	7,6	7,2	6,2	7,8	6,2	7,0	5,2	10,6	9,8	15,5	8,6	6,8	7,2	4,2
8	2,9	3,0	0,9	4,0	4,4	2,0	2,3	4,1	3,2	3,2	2,5	4,3	3,4	5,6	10,8	9,9	15,3	6,3	5,4	13,3
9	2,6	1,4	2,0	4,1	3,7	3,7	3,3	5,4	7,9	6,6	4,9	11,1	25,0	3,8	8,2	12,0	19,5	11,8	4,1	4,5
10	5,3	7,5	8,5	3,3	5,2	6,7	7,9	5,5	12,0	12,6	11,8	9,2	9,1	8,0	3,5	11,0	2,0	5,3	5,6	4,4
11	4,7	6,2	4,1	10,8	8,5	5,8	4,4	3,8	3,8	6,6	14,9	14,5	6,9	5,8	5,8	5,6	6,5	6,9	5,2	6,5
12	3,3	6,7	3,1	4,8	6,3	2,1	6,9	3,9	15,8	9,1	6,3	7,6	7,2	5,5	2,8	5,0	5,2	4,5	4,7	4,4
13	7,0	7,6	3,6	5,5	5,8	5,0	10,9	14,7	11,1	9,1	5,7	4,3	5,1	4,9	5,7	7,2	5,3	2,9	5,1	3,5
14	8,0	13,1	9,9	11,3	14,9	14,3	18,4	15,2	21,5	17,9	16,7	26,4	5,3	9,7	11,4	7,7	11,3	9,3	7,9	11,3
15	5,8	8,8	16,0	10,8	10,5	9,8	7,2	18,1	17,1	18,4	12,2	8,8	18,1	15,8	16,7	14,7	15,9	7,4	8,1	10,7
16	10,5	10,0	6,8	11,0	5,9	15,5	17,0	13,4	11,1	11,3	13,6	6,5	7,8	16,8	8,7	6,4	11,0	7,2	14,5	9,5
17	6,1	4,7	9,0	4,3	2,4	10,8	8,6	11,4	10,5	11,3	6,4	12,7	11,6	4,2	13,6	1,8	9,5	13,0	14,8	11,0
18	11,3	9,7	10,3	13,0	15,8	21,6	23,6	15,8	19,3	18,2	11,8	26,7	21,7	19,3	14,7	13,9	12,2	13,0	9,2	15,8
19	11,8	4,7	4,6	5,6	9,1	3,9	16,1	11,2	26,9	27,0	14,7	28,8	20,9	15,7	17,3	15,0	6,0	10,1	12,3	11,9
20	13,0	10,2	9,4	17,1	15,9	17,3	4,9	24,4	25,8	16,2	28,9	10,2	30,8	13,6	16,1	17,3	13,7	8,8	5,4	5,1
21	15,1	9,0	15,1	7,4	9,5	4,3	6,0	18,0	9,0	8,8	15,0	26,5	37,6	19,6	14,6	22,1	31,6	27,4	20,6	22,5
22	15,0	5,5	5,5	4,0	3,4	5,0	18,0	3,3	5,5	9,8	9,5	8,9	10,2	8,4	10,1	8,8	4,6	10,6	3,5	6,6
23	10,1	9,8	12,7	12,2	1,9	9,1	3,8	4,4	4,0	4,0	3,9	2,8	4,6	3,4	7,1	7,0	6,7	7,9	7,0	5,0
24	28,7	9,9	12,7	9,2	9,2	3,6	5,0	7,7	5,2	4,4	4,5	3,2	4,0	5,1	7,1	8,0	8,6	6,8	2,2	4,4
25	10,7	11,8	5,2	5,3	8,6	3,8	5,1	4,7	3,2	5,5	8,7	7,8	5,0	9,7	6,6	5,9	6,1	3,4	8,5	7,5
26	8,7	11,7	10,5	8,7	6,0	7,8	7,4	6,6	3,8	6,0	3,3	5,3	4,1	5,0	4,0	3,3	3,8	4,2	4,0	4,1
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T

Figura 19. Presión acústica medida a 21°C, distancia del transductor de 25 cm, 100 W y sin flujo de aire 0 m/s. Línea discontinua en rojo indica el APT, 39.5 cm<sup>2</sup>. Línea discontinua en negro indica el AMPA, 16.9 cm<sup>2</sup>.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	4,1	3,9	5,0	5,3	5,2	2,3	3,9	5,4	3,2	4,0	4,4	3,4	2,7	6,4	3,9	6,0	2,7	5,3	4,3	3,6
2	3,0	4,9	3,4	3,7	3,8	7,5	11,4	7,1	10,1	9,8	7,0	2,6	4,1	1,5	2,6	5,1	4,4	2,7	3,5	4,4
3	11,8	14,4	5,6	6,2	10,1	7,0	4,2	8,6	7,7	8,3	7,6	3,8	3,1	3,9	6,5	4,2	4,0	6,5	5,4	7,3
4	5,9	8,5	13,2	9,3	8,8	11,5	4,2	5,9	2,3	7,3	8,4	6,8	11,4	9,4	6,8	6,0	10,2	9,6	5,2	9,7
5	11,5	12,8	13,3	13,7	16,8	14,4	9,1	10,2	6,6	6,6	6,7	7,2	8,8	9,3	10,4	8,6	10,1	15,2	11,2	1,9
6	10,9	11,8	14,7	14,6	11,9	9,2	12,9	11,2	4,5	4,3	3,0	8,2	7,7	9,7	5,8	6,3	3,6	9,3	4,2	8,2
7	2,4	10,6	9,3	11,2	5,4	3,3	10,4	5,9	5,5	8,1	7,5	6,1	8,9	20,6	16,8	5,5	5,9	4,3	2,5	2,8
8	5,0	9,5	10,1	8,0	12,6	11,4	10,4	11,1	6,7	5,6	6,8	3,3	3,0	6,5	2,7	3,0	3,7	6,0	2,4	2,3
9	6,5	6,3	3,4	7,5	7,6	9,1	8,9	15,9	6,7	7,1	6,1	4,4	4,8	4,6	11,3	9,6	2,5	18,0	10,4	2,9
10	8,3	5,8	5,4	6,3	7,8	27,0	7,8	7,7	15,9	8,9	6,4	7,8	8,4	3,0	4,4	2,3	10,0	5,9	8,8	4,0
11	5,9	9,0	7,4	11,3	5,6	4,6	14,1	17,0	22,3	10,9	11,8	8,9	6,1	11,1	6,0	22,9	2,6	7,1	7,5	6,1
12	4,9	6,8	6,2	5,8	9,7	22,9	20,1	36,4	29,3	22,8	5,9	7,4	10,4	2,9	6,9	17,3	10,9	6,8	5,4	8,1
13	4,6	3,4	13,7	7,8	10,5	5,7	42,5	37,3	24,7	16,5	8,4	7,4	2,3	10,6	5,8	22,8	22,4	21,9	8,9	9,1
14	6,8	4,3	10,8	4,2	13,0	13,2	7,2	15,6	13,6	16,2	9,9	11,9	2,3	7,7	8,1	6,8	5,9	4,8	7,7	12,5
15	7,8	5,1	5,5	6,1	5,7	5,0	15,6	12,4	19,3	19,1	31,0	17,9	19,3	9,3	16,9	14,6	10,5	9,1	18,7	9,8
16	5,5	8,3	5,8	13,3	13,6	16,1	19,8	18,6	19,6	14,8	34,4	16,2	7,8	8,2	16,9	25,6	8,6	4,7	5,9	5,0
17	5,2	16,9	12,8	5,3	17,1	17,8	16,7	23,4	9,1	9,7	6,6	17,1	13,4	21,1	13,7	15,3	11,6	8,7	8,9	15,1
18	9,3	15,2	8,5	5,8	11,4	10,4	9,4	30,5	6,6	16,4	19,3	9,1	16,3	27,2	13,3	14,7	8,9	7,1	10,7	14,7
19	7,4	9,9	13,0	12,3	6,6	5,4	17,3	15,6	26,1	34,1	30,3	34,2	17,8	22,0	26,4	3,6	16,8	17,3	9,9	13,1
20	6,9	1,7	6,0	3,5	13,2	11,7	12,2	11,3	42,0	22,9	20,0	13,4	6,9	21,2	19,0	14,8	22,2	4,9	6,9	6,5
21	5,3	8,6	3,3	13,3	16,4	7,8	21,7	4,5	15,3	23,1	12,4	26,9	16,5	27,7	29,0	23,4	17,5	4,8	18,6	6,8
22	4,1	8,8	8,3	6,9	13,3	3,5	5,1	18,8	18,2	17,2	12,4	24,9	27,9	16,2	23,8	15,0	23,6	7,3	13,8	8,3
23	2,8	12,9	14,0	3,4	12,7	9,1	11,5	26,0	19,9	4,2	8,1	15,2	14,5	25,5	38,8	11,5	13,2	7,6	8,2	14,1
24	14,1	4,7	15,1	10,0	3,9	5,1	6,3	4,5	7,1	13,6	16,1	25,1	16,2	11,3	12,6	7,9	7,7	13,2	3,8	6,8
25	9,9	16,8	6,2	4,3	9,4	4,9	3,0	8,8	7,3	6,8	7,0	10,0	7,4	13,9	13,2	11,3	10,6	25,6	7,1	5,9
26	6,7	11,9	12,7	8,9	6,0	7,0	13,2	10,6	12,3	11,1	8,6	5,4	4,6	4,6	9,1	11,1	12,0	8,4	3,5	13,5
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T

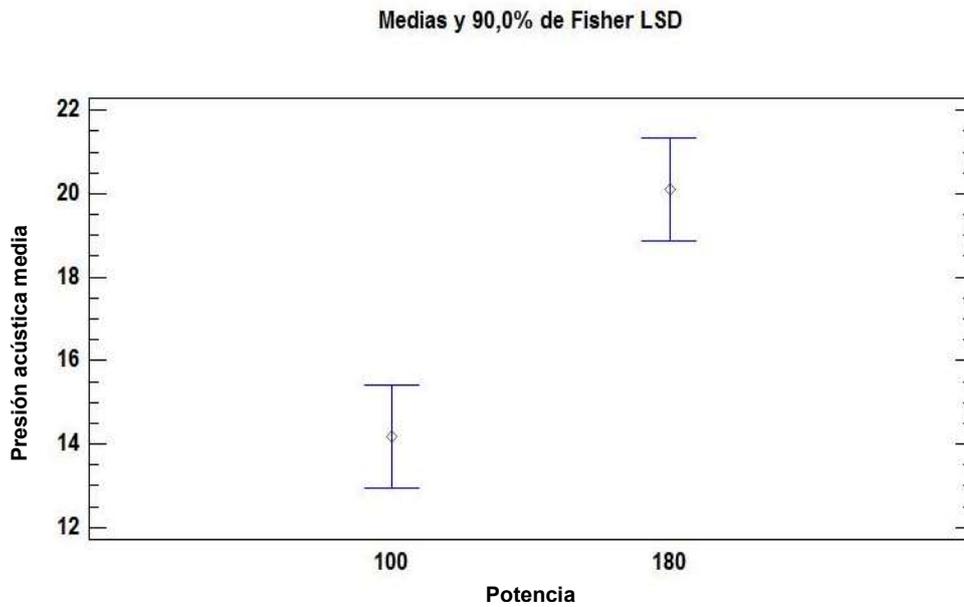
**Figura 20.** Presión acústica medida a 21°C, distancia del transductor de 25 cm, 180 W y sin flujo de aire 0 m/s. Línea discontinua en rojo indica el **APT**, 39.5 cm<sup>2</sup>. Línea discontinua en negro indica el **AMPA**, 16.9 cm<sup>2</sup>.

Las diferencias de presión acústica obtenidas según la potencia suministrada pueden ser apreciadas en la Tabla 2, donde a las mismas condiciones de trabajo (5 cm, 21°C y 0m/s), al suministrar una potencia eléctrica de 180W el promedio del APT (41,8 ± 13,0 Pa) y del AMPA (43,1 ± 11,6 Pa) fueron respectivamente un 46% y un 40% mayores que el promedio del APT (28,60 ± 16,16 Pa) y del AMPA (30,06 ± 16,15 Pa) medidos al suministrar una potencia de 100W.

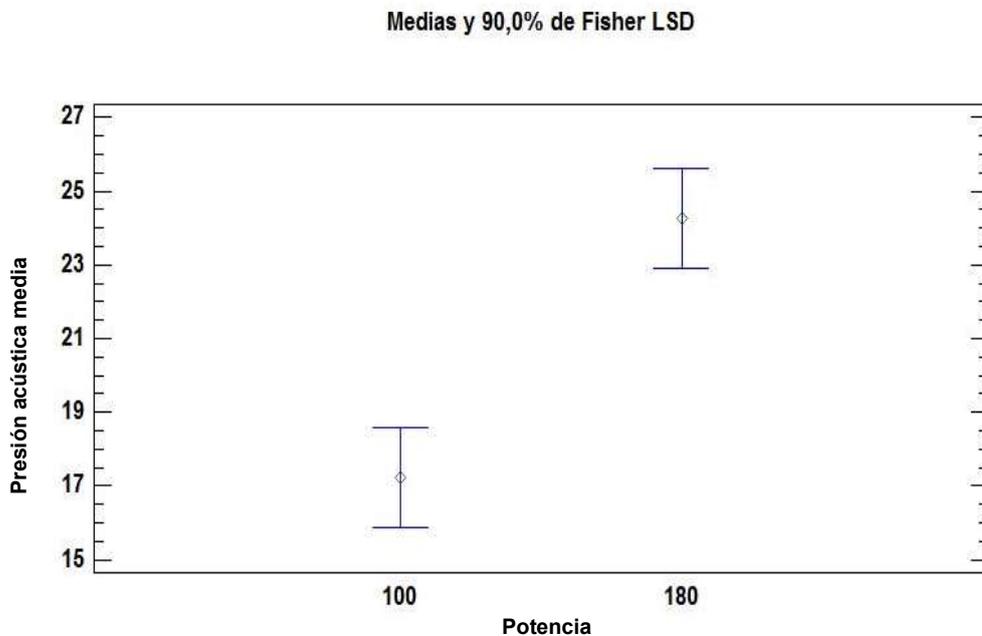
### Resultados ANOVA y LSD.

El análisis de varianza ANOVA multifactorial indicó que, tanto para el promedio del APDT como para el del AMPA, la potencia fue un factor significativo en la presión acústica con un nivel de confianza del 90% (p<0.1).

La determinación de los intervalos LSD mostró que la presión acústica promedio determinada fue mayor cuanto mayor fue la potencia eléctrica suministrada al transductor, tanto en el APT (Figura 21) como en el AMPA (Figura 22). Mediante esta determinación, se pudo observar con más detalle el aumento de potencia acústica obtenida al suministrar una mayor potencia eléctrica.



**Figura 21.** Presión acústica media e intervalos LSD (90%) en el APT para el factor potencia.



**Figura 22.** Presión acústica media e intervalos LSD (90%) en el AMPA para el factor potencia.

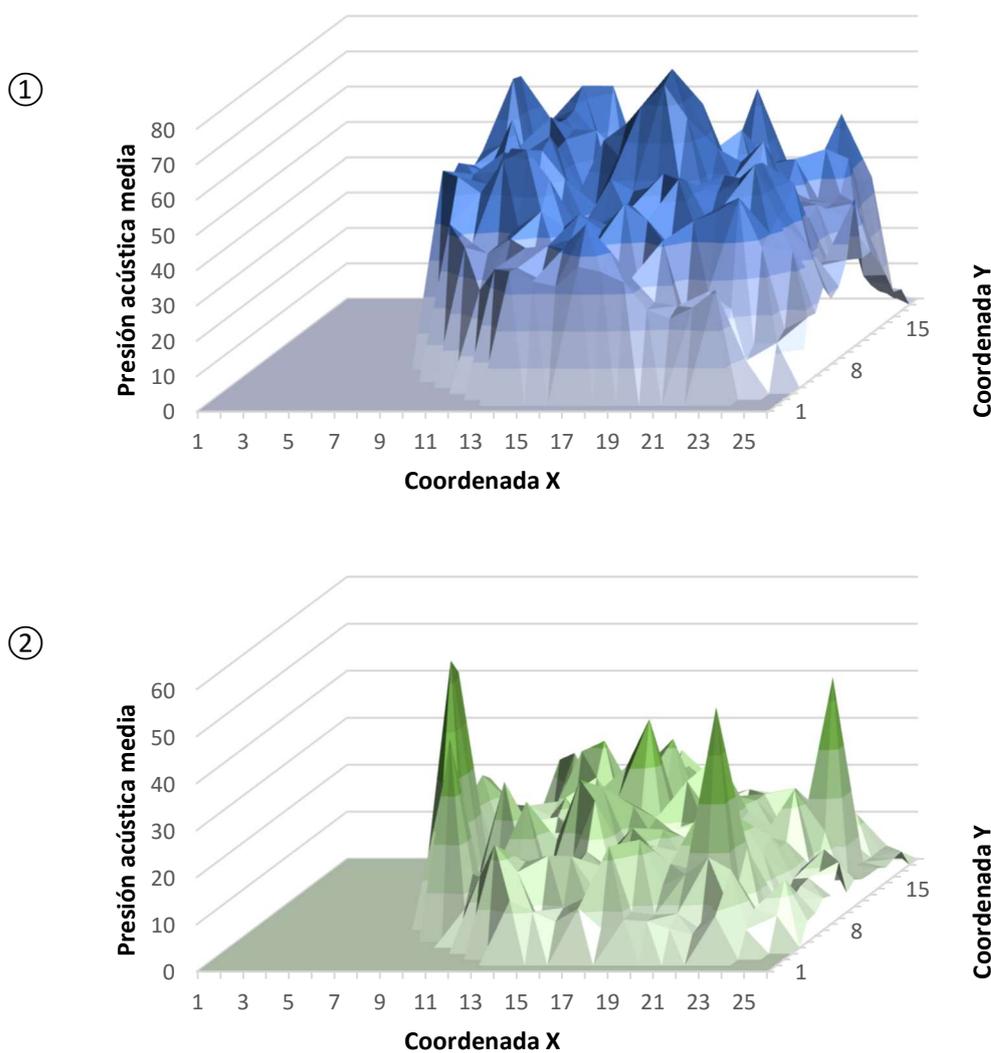
### 4.3 Determinación de la influencia del flujo de aire sobre la presión acústica media registrada.

#### Datos experimentales.

Es necesario recordar que el dispositivo en el que se integra el sistema de aplicación de ultrasonidos es un secadero convectivo a baja temperatura. Por lo tanto, el sistema utiliza aire como elemento de transporte para retirar la humedad del producto. Dicho aire, se debe renovar para mantener un mayor potencial del secado. Sin embargo, las turbulencias creadas por el flujo de aire podrían afectar al campo acústico. Por ello, la caracterización del campo acústico se

realizó sin corriente de aire (0 m/s) y con una velocidad de flujo de aire relativamente baja, concretamente 2 m/s.

Los resultados obtenidos mostraron que la aplicación de aire con una velocidad de flujo de aire de 2 m/s, redujo de manera importante la presión acústica medida en la zona de tratamiento en comparación con las medidas realizadas sin flujo de aire (0 m/s). Esta reducción se puede observar en la Figura 24, donde se representa la presión acústica registrada para una distancia del transductor de 5 cm, una temperatura de 21°C, una potencia aplicada de 180 W y sin (Figura 23.1) y con (figura 23.2) flujo de aire (2m/s). Estas medidas de presión acústica puntuales también produjeron una disminución en la presión acústica promedio observada tanto en el APT como en el AMPA.



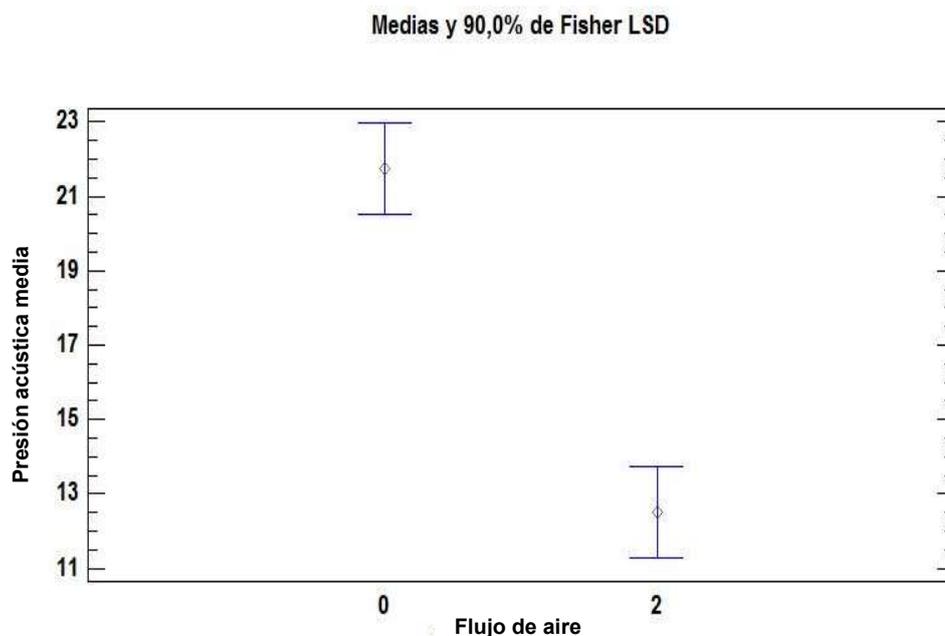
**Figura 23.** Presión acústica media medida sobre el AMPA. **1.** Distancia del transductor a 5cm, temperatura 21°C, potencia aplicada 180W y sin flujo de aire (0 m/s). **2.** Distancia del transductor a 5cm, temperatura 21°C, potencia aplicada 180W y con flujo de aire (2 m/s).

El efecto del flujo de aire sobre la presión acústica también se apreció en la presión acústica media (Tabla 2). Así, a las mismas condiciones de trabajo (5 cm, 21°C y 180W), al emplear una velocidad de flujo de aire de 2m/s el promedio del APT ( $15,09 \pm 8,15$  Pa) y del AMPA ( $15,4 \pm 7,2$  Pa) disminuyó la presión acústica registrada en un 36.1% en comparación con la presión acústica registrada en el APT ( $41,8 \pm 13$  Pa) y del AMPA ( $43,1 \pm 11,6$  Pa) sin aplicar corriente de aire (0m/s).

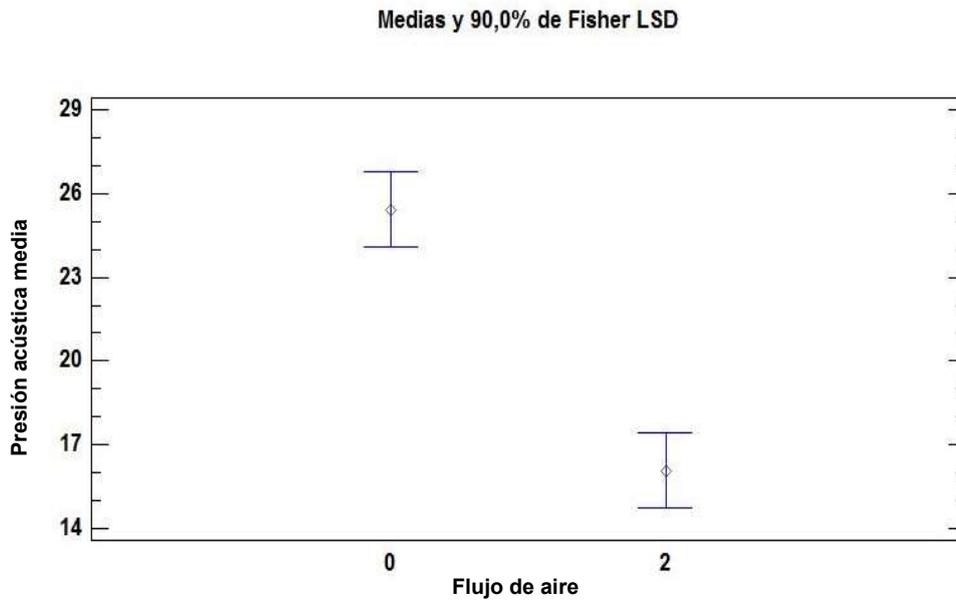
### Resultados ANOVA y LSD.

El análisis de varianza ANOVA multifactorial indicó que, tanto para el promedio de la presión acústica media determinada en el APT como en el AMPA, el flujo de aire en la cámara, constituye un factor significativo en la presión acústica con un nivel de confianza del 90% ( $p < 0.1$ ).

La determinación de los intervalos LSD permitió observar cómo, la presión acústica promedio registrada disminuyó significativamente ( $p < 0.1$ ) de forma importante al serle aplicada un flujo de aire con una velocidad de 2m/s tanto en el APT (Figura 24) como en el AMPA (Figura 25).



**Figura 24.** Presión acústica media e intervalos LSD (90%) en el APT para el factor flujo del aire.



**Figura 25.** Presión acústica media e intervalos LSD (90%) en el AMPA para el factor flujo del aire.

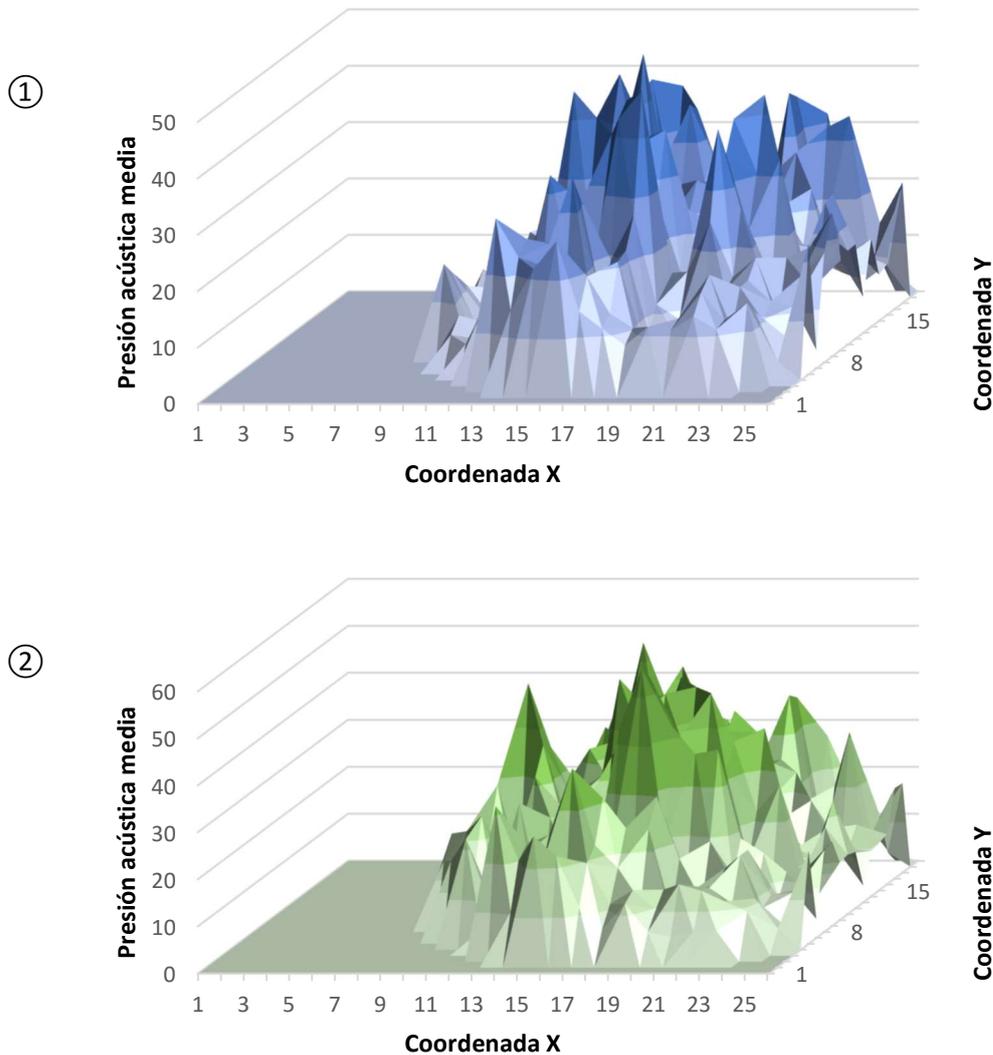
#### **4.4 Determinación de la influencia de la temperatura sobre la presión acústica media registrada.**

##### **Datos experimentales.**

El mayor problema de la aplicación de ultrasonidos de potencia en el medio gas, como se ha mencionado anteriormente, es alcanzar una transmisión eficiente de las ondas acústicas por el efecto de la diferencia de impedancias entre el transductor, que es un sólido, y el gas. La disminución de temperatura del interior de la cámara hace teóricamente que el aire se vuelva más denso y esto podría facilitar la transmisión de los ultrasonidos. Es por ello que, además de realizar medidas de campo acústico a temperatura ambiente, también se realizaron a una temperatura baja.

En este caso, sólo se ensayó una distancia entre el transductor y la zona de tratamiento, 15 cm, debido a las dificultades para realizar las medidas experimentales. Así, la baja temperatura utilizada en este caso,  $-20 \pm 1^\circ\text{C}$ , hizo que no se pudiera permanecer mucho tiempo en el interior de la cámara realizando las medidas. Así, se estableció 15 minutos como el tiempo máximo de permanencia en el interior para evitar problemas de salud. A esto se le une que el desplazamiento del transductor, necesario para posicionar el micrófono en el lugar correcto de medida en cada punto, se ralentiza bastante al trabajar a tan baja temperatura. En cuanto a las otras variables de proceso consideradas, se realizaron medidas a 2 potencias eléctricas aplicadas al transductor (100 y 180 W) y sin y con (2 m/s) flujo de aire.

En cuanto a los resultados obtenidos, se observó que, al reducir la temperatura del interior de la cámara, la presión acústica registrada, tanto en el APT como en el AMPA, se incrementó muy ligeramente (Figura 26).

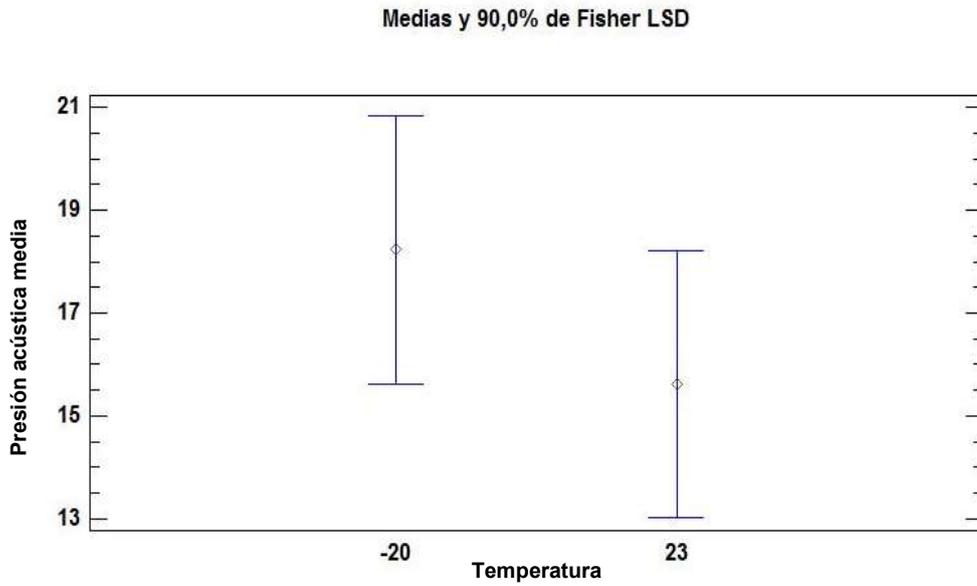


**Figura 26.** Presión acústica media medida sobre el AMPA. **1.** Distancia del transductor a 15cm, temperatura 21°C, potencia aplicada 180W y sin flujo de aire (0 m/s). **2.** Distancia del transductor a 15cm, temperatura -20°C, potencia aplicada 180W y con flujo de aire (0 m/s).

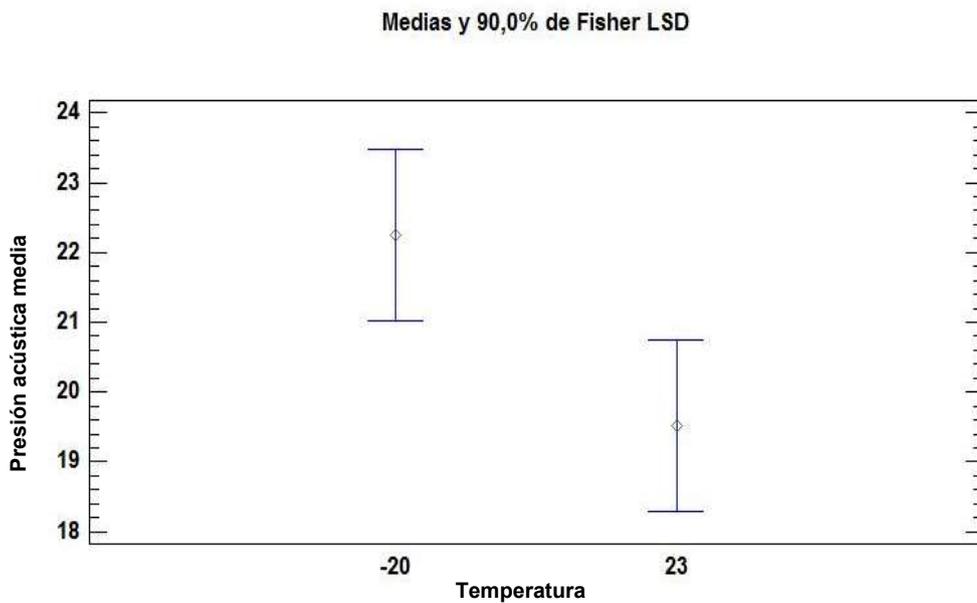
El efecto de la disminución de temperatura del interior de la cámara puede ser apreciado en la Tabla 2. Así, en las mismas condiciones de trabajo, distancia entre transductor y zona de tratamiento de 15 cm, potencia de 100W y sin flujo de aire (0 m/s) a  $-20 \pm 1^\circ\text{C}$ , el promedio de la presión acústica en el APT ( $16,76 \pm 6,04$  Pa) aumentó un 14% respecto al promedio obtenido ( $14,69 \pm 8,07$  Pa) a una temperatura de  $21 \pm 1^\circ\text{C}$ . En cuanto a la presión acústica medida en el AMPA, solo se obtuvo un incremento del 4% al pasar de una temperatura de  $21 \pm 1^\circ\text{C}$  ( $17,8 \pm 9,7$  Pa) a una de  $-20 \pm 1^\circ\text{C}$  ( $18,5 \pm 6,8$  Pa).

**Resultados ANOVA y LSD.**

Como parecían indicar las pequeñas diferencias observadas, el ANOVA multifactorial indicó que, tanto en el APT (Figura 27) como en el AMPA (Figura 28), la temperatura de la cámara no resultó un factor significativo ( $p < 0.1$ ) en la presión acústica medida.



**Figura 27.** Presión acústica media e intervalos LSD (90%) en el APT para el factor temperatura.



**Figura 28.** Presión acústica media e intervalos LSD (90%) en el AMPA para el factor temperatura.

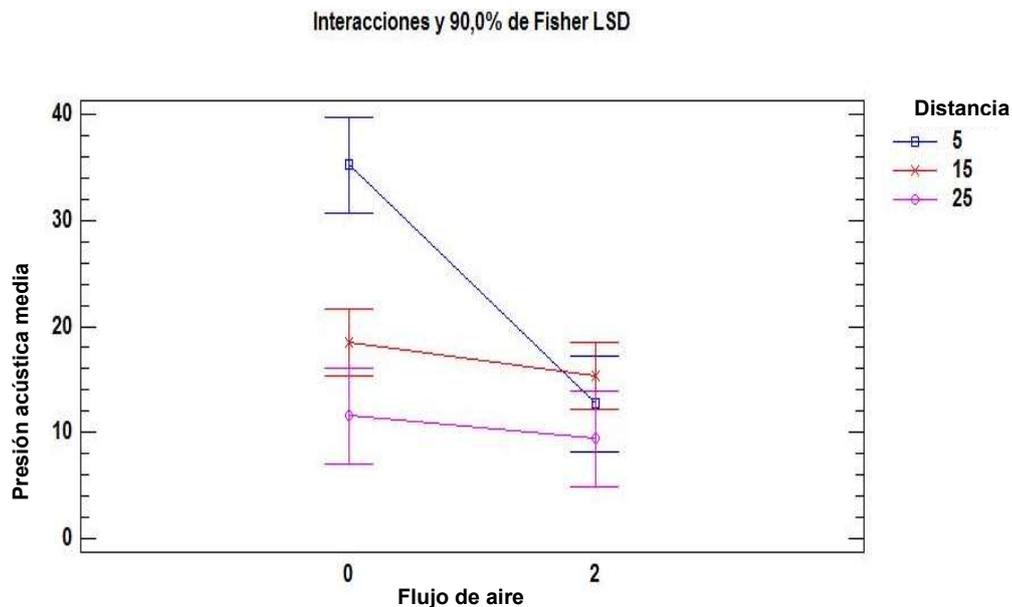
#### 4.5 Interacciones entre variables estudiadas.

No sólo resulta interesante el estudio de la influencia de variables como la distancia del transductor a la zona de tratamiento o la potencia aplicada a la presión acústica, sino también las interacciones que pudieran aparecer entre los distintos valores de ellas. A continuación, se analizan estas interacciones

#### 4.5.1 Flujo de aire – Distancia.

Como se ha visto, el flujo de aire redujo la presión acústica medida probablemente por una cierta ruptura del campo acústico debido a las turbulencias generadas. Este efecto fue mayor al disminuir la distancia entre el transductor y la superficie de tratamiento. Esto se pudo deber a que la mayor cercanía entre el transductor y la superficie de tratamiento canalizó más el flujo de aire impulsado por el ventilador. Así, en el APT aplicando 100 W a una distancia de 5 cm en presencia de un flujo de aire de 2 m/s el promedio de la presión acústica medida ( $9,7 \pm 6,8$  Pa) sufrió un descenso del 244% en comparación con la presión medida sin flujo de aire ( $28,60 \pm 16,16$  Pa) (Tabla 2). Por el contrario, a 15 cm de distancias, las diferencias entre aplicar ( $10,2 \pm 6,3$  Pa) y no aplicar ( $14,69 \pm 8,07$  Pa) flujo de aire resultaron mucho más pequeñas.

Mediante el análisis de varianza ANOVA multifactorial se determinó que, tanto para la presión acústica promedio en el APT (Figura 29), como la obtenida en el AMPA, existe una interacción entre los factores flujo de aire y distancia estadísticamente significativa en la presión acústica con un nivel de confianza del 90% ( $p < 0.1$ ). En ambos casos, la mayor presión acústica obtenida se obtuvo a 5 cm de distancia y sin flujo de aire.

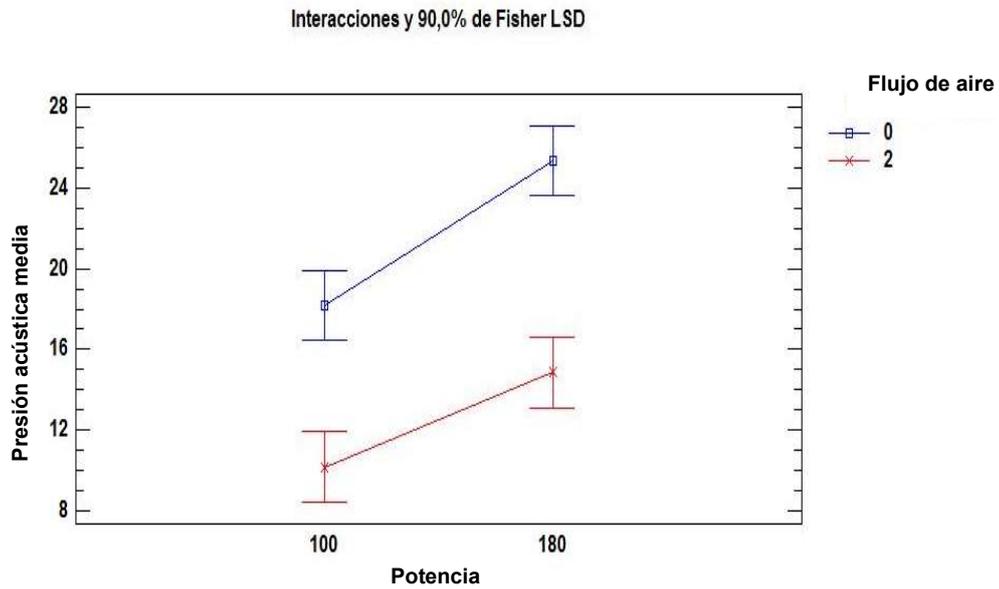


**Figura 29.** Presión acústica media e intervalos LSD (90%) en el APT para la interacción entre flujo de aire (0 y 2m/s) y distancia (25, 15 y 5cm) del transductor.

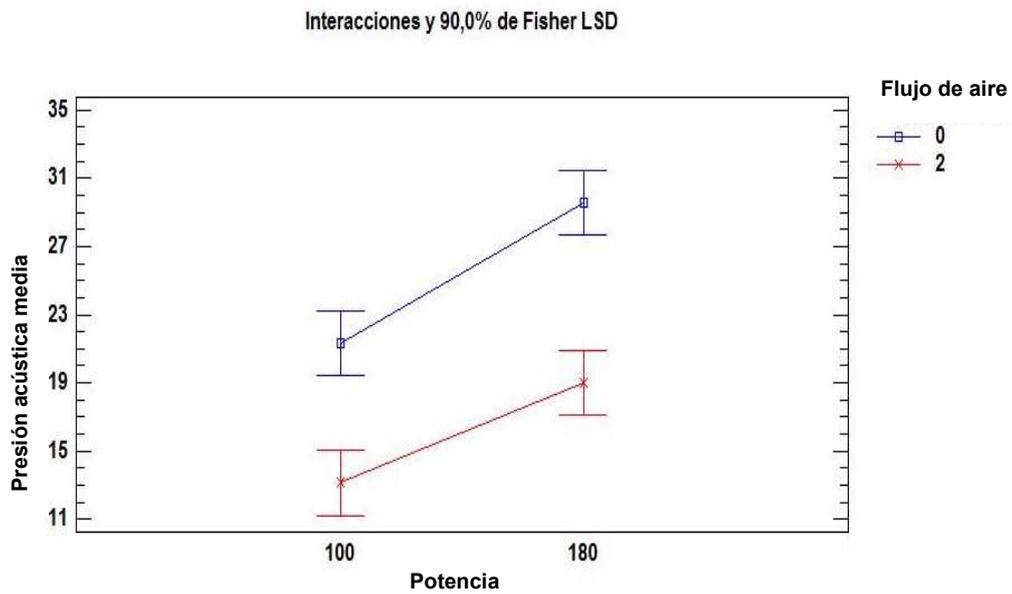
#### 4.5.2 Potencia – Flujo de aire

El aumento de la presión acústica registrada debido al suministro de una mayor potencia de generación de los ultrasonidos se vio disminuido también al aplicar un flujo de aire en la cámara, lo cual favorece la dispersión de los ultrasonidos producida por esa corriente de aire. Sin embargo, dicha reducción no dependió de la potencia aplicada. Así, la presión acústica promedio obtenida en APT al aplicar 180 W de potencia (5 cm de distancia entre transductor y zona de tratamiento) se redujo un 64% al aplicar flujo de aire ( $41,8 \pm 13,0$  Pa a 0 m/s y  $14,69 \pm 8,07$  Pa a 2 m/s), el mismo porcentaje de reducción observado a 100 W ( $28,60 \pm 16,16$  Pa a 0 m/s y  $10,397 \pm 7,008$  Pa a 2 m/s).

Mediante el análisis de varianza ANOVA multifactorial se determinó que, tanto para la presión acústica promedio en el APT (Figura 30), como para la del AMPA (Figura 31), no hubo una interacción, estadísticamente significativa en la presión acústica entre los factores flujo de aire y potencia con un nivel de confianza del 90% ( $p < 0.1$ ).



**Figura 30.** Presión acústica media e intervalos LSD (90%) en el APT para la interacción entre flujo de aire (0 y 2m/s) y potencia (100 y 180W).



**Figura 31.** Presión acústica media e intervalos LSD (90%) en el AMPA para la interacción entre flujo de aire (0 y 2m/s) y potencia (100 y 180W).

# CONCLUSIONES

## 5. CONCLUSIONES

- I. El campo acústico creado en el interior de la cámara de secado resultó muy variable, probablemente debido a las reflexiones de las ondas acústicas en las distintas superficies. Esto obliga a que para poder identificar la influencia de las variables de proceso en campo acústico sea necesario trabajar con datos promedio.
- II. En la zona de tratamiento, se identificaron dos zonas en las que la presión acústica es superior. Una primera, justo en la proyección del transductor sobre la zona de tratamiento, y una segunda concéntrica, en la que se concentra la energía acústica y que coincide con la proyección focal sobre la zona de tratamiento.
- III. La distancia entre el transductor y la zona de tratamiento resultó un factor significativo en la presión acústica media registrada. Así, al aumentar la distancia, disminuyó la presión acústica. Esto se puede atribuir a la anulación parcial de las ondas acústicas debido a las numerosas reflexiones que se producen en el interior de la cámara.
- IV. La potencia eléctrica suministrada al transductor también resultó un factor significativo. Así, a la máxima potencia ensayada (180W) se registró la mayor presión acústica.
- V. El flujo de aire (2 m/s) produjo una gran reducción de la presión acústica. Este efecto aumentó a medida que la distancia entre transductor y superficie de tratamiento fue menor. Probablemente, la reducción de distancia facilitó la canalización del flujo de aire entre el transductor y la zona de tratamiento, lo que podría producir una mayor disrupción del campo acústico. Además, se identificó un ligero desplazamiento del campo acústico en la dirección del flujo de aire.
- VI. El efecto de la temperatura de la cámara en la presión acústica medida fue muy ligero no llegando a ser significativo ( $p < 0.1$ ).

## BIBLIOGRAFIA

## 6. BIBLIOGRAFIA

- Álvarez, I., Manas, P., Virto, R., Condon, S. (2006). Inactivation of Salmonella Senftenberg by ultrasonic waves under pressure at different water activities. *International Journal of Food Microbiology*, 108, 218–225.
- Benedito, J., Cárcel, J.A., Rosselló, C., Mulet, A. (2001). Composition assessment of raw meat mixtures using ultrasonics. *Meat Science*, 57, 365–370.
- Benedito, J., Mulet, A., Clemente, G., García-Pérez, J. V. (2004). Use of ultrasonics for the composition assessment of olive mill wastewater (alpechin). *Food Research International*, 37, 595–601.
- Cárcel, J.A., García-Pérez, J.V., Riera, E., Rosselló, C., Mulet, A. (2014). Drying assisted by ultrasound (Chapter 8). *Modern Drying Technology Vol. 5, Process Intensification*, 237–278.
- Cárcel, J. A. (2003). *Influencia de los ultrasonidos de potencia en procesos de transferencia de material*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- Cárcel, J. A., García-Pérez, J. V., Benedito, J., Mulet, A. (2012). Food process innovation through new technologies: Use of ultrasound. *Journal of Food Engineering*, 110(2), 200–207.
- Carlin, B. (1972). *Ultrasonica*. Urmo, Bilbao, España.
- Chou, S. K., Chua, K. J. (2001). New hybrid drying technologies for heat sensitive foodstuffs. *Trends in Food Science and Technology*, 12, 359–369.
- Cross, H.R., Belk, K. E. (1994). Objective measurements of carcass and meat quality. *Meat Science*, 36, 191–202.
- De la Fuente, S., Riera, E., Acosta, V.M., Blanco, A., Gallego-Juárez, J. A. (2006). Food drying process by power ultrasound. *Ultrasonics*, 44, 523–527.
- Ertekin C, Y. O. (2004). Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Journal of Food Engineering*.
- Feng, H., Barbosa-Cánovas, G.V., Weiss, J. (2011). *Ultrasound Technologies for food and Bioprocessing*.
- Gallego-Juárez J.A., Elvira-Segura L. (2003). A power ultrasonic technology for deliquoring, 41 (4), 255–259.
- Gallego-Juárez, J.A., Rodríguez-Corral, G., Gálvez-Moraleda, J.C., Yang, T. S. (1999). A new high-intensity ultrasonic technology for food dehydration. *Drying Technology*, 17, 597–608.
- Gallego-Juárez, J. A. (1998). Some applications of air-borne power ultrasound to food processing. *Ultrasound in Food Processing*. (Eds. Povey, M.J.W., Mason, T.J., Chapman & Hall, Londres, Reino Unido).

- Gallego-Juárez, J. A., Riera, E., de la Fuente Blanco, S., Rodríguez-Corral, G., Acosta-Aparicio, V. M., Blanco, A. (2007). Application of High-Power Ultrasound for Dehydration of Vegetables: Processes and Devices. *Drying Technology*, 25(11), 1893–1901.
- Gallego-Juárez, J. A., Rodríguez, G. (2010). Power ultrasonic transducers with extensive radiators for industrial processing, 17(6), 953–964.
- García-Pérez, J. V., Carcel, J. A., Riera, E., Rosselló, C., Mulet, A. (2012). Intensification of Low-Temperature Drying by Using Ultrasound. *Drying Technology*, 30(11-12), 1199–1208.
- García-Pérez, J. V., Rosselló, C., Cárcel, J. A., de la Fuente, S. Mulet, A. (2006). Effect of air temperature on convective drying assisted by high power ultrasound. *Defect and Diffusion Forum*, 258–260, 563–574.
- Ghaedian, R., Decker, E.A., McClements, D. J. (1997). Use of ultrasound to determine cod fillet composition. *Journal of Food Engineering*, 62, 500–504.
- Hecht, E. (1996). Physics: Calculus. Pacific Grove, CA, Brooks, Cole, 445–450, 489–521.
- Jayasooriya, S., Torley, P., D’Arcy, B., Bhandari, B. (2007). Effect of high power ultrasound and ageing on the physical properties of bovine Semitendinosus and Longissimus muscles. *Meat Science*, 75, 628–639.
- Knorr D., Zenker M., Heinz V., Lee D. U., (2004). Applications and potential of ultrasonics in food processing. *Trends Food Sci. Techn.* 15, 261-266.
- Llull, P., Simal, S., Benedito, J., Rosselló, C. (2002). Evaluation of textural properties of a meat-based product (sobrasada) using ultrasonic techniques. *Journal of Food Engineering*, 53, 279–285.
- Mason, T. J. (1998). Power ultrasound in food processing. The way forward. *Ultrasound in Food Processing*. Eds. Povey, M.J.W., Mason, T.J., Chapman & Hall, Londres, Reino Unido.
- Mayor, L., Sereno, A. M. (2004). Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. *Journal of Food Engineering*, 61, 373–386.
- McClements, D. J. (1997). Ultrasonic characterization of food and drinks: Principles, methods and applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 37, 1–46.
- Mulet, A., Cárcel, J. A., Benedito, J., Rosselló, C., Simal, S. (2003). Ultrasonic mass transfer enhancement in food processing. *Transport Phenomena in Food Processing*, 83 (Ed. Welti-Chanes, J., Vélez-Ruiz, J., Barbosa-Canova, G., CRC Press, New York, EEUU.).
- Ozuna, C., Gomez, T., Riera, E., Cárcel, J. A. García-Pérez, J. V. (2014). Influence of material structure on air-borne ultrasonic application in drying. *Ultrasonics Sonochemistry*, 21, 1235–1243.
- Peshkovsky, A.S., Peshovsky, S. L. (2010). Acoustic Cavitation Theory and Equipment Design Principles for Industrial Applications of High-Intensity Ultrasound. Nova Science Publishers Inc., New York.

- Povey, M.J.W., Mason, T. J. (1998). Rapid determination for food material properties. In *Ultrasound in Food Processing*.
- Raj, B., Rajendran, V., Palanichamy, P. (2004). Science and technology of ultrasonics. *Alpha Science International, Oxford, Reino Unido*.
- Recuero, M. (1995). Ingeniería acústica Paraninfo, Madrid, España.
- Santacatalina, J. V., Fissore, D., Cárcel, J. A., Mulet, A., García-Pérez, J. V. (2015). Model-based investigation into atmospheric freeze drying assisted by power ultrasound. *Journal of Food Engineering, 151*, 7–15.
- Santacatalina, J. V., Contreras, M., Simal, S., Cárcel, J. A., Garcia-Perez, J. V. (2016b). Impact of applied ultrasonic power on the low temperature drying of Apple. *Ultrasonics Sonochemistry, 28*, 100–109.
- Santacatalina, J. V., Guerrero, M. E., Garcia-Perez, J. V., Mulet, A. (2016a). Ultrasonically assisted low-temperature drying of desalted codfish. *LWT - Food Science and Technology, 65*, 444–450.
- Santacatalina, J. V., Rodríguez, O., Simal, S., Cárcel, J. A., Mulet, A., García-Pérez, J. V. (2014). Ultrasonically enhanced low-temperature drying of apple: Influence on drying kinetics and antioxidant potential. *Journal of Food Engineering, 138*, 35–44.
- Simal, S., Benedito, J., Clemente, G., Femenía, A., Rosselló, C. (2003). Ultrasonic determination of the composition of a meat-based product. *Journal of Food Engineering, 58*, 253–257.
- Vercet, A., Sánchez, C., Burgos, J., Montañés, L., López, P. (2002). The effects of manothermosication on tomato pectic enzymes and tomato paste rheological properties. *Journal of Food Engineering, 53*, 273–278.