

Atenuación del sonido mediante una distribución periódica de capas de agua pulverizada



I. Herrero-Durá¹, J. Zaragoza¹, R. Picó², V. Sánchez-Morcillo², LL. Garcia-Raffi³

¹ Universidad Politécnica de Valencia, UPV

² Instituto de Investigación para la Gestión Integrada de zonas Costeras, UPV

³ Instituto Universitario de Matemática Pura y Aplicada, UPV

ivanherreroadura@gmail.com

Premio Andrés Lara para jóvenes investigadores 2014

PACS: 43.50.Ki

Resumen

En este trabajo se presenta un estudio experimental en el que se analizan las propiedades de atenuación del sonido transmitido a través de una estructura multicapa, en la que cada uno de los elementos consiste en una lámina formada por gotas de agua con una distribución de tamaños alrededor de un valor medio. Para ello, se ha diseñado un sistema de inyección de agua que permite estudiar la propagación del sonido a través de tres capas de suspensión saturada de gas y gotas. Para comprender este fenómeno se analizará la dependencia del mismo con los parámetros más significativos del problema como son el tamaño de gota, la separación entre dispersores, la presión y el caudal de agua en el sistema de inyección.

Resumo

Este trabalho apresenta um estudo experimental onde são analisadas as propriedades de atenuação do som, quando transmitido através de uma estrutura multicamada. As camadas consistem numa suspensão saturada de gás-vapor-gotas, com uma distribuição de dimensões conhecida. Para este efeito, foi concebido um sistema de injeção de água destinado a estudar a propagação do som através do sistema. Para interpretar este fenómeno, foi analisada a dependência da propagação do som com os parâmetros mais significativos do problema, como sejam as dimensões das gotas, o afastamento entre os dispersores, e a pressão e o caudal de água no sistema.

Abstract

In this experimental study the attenuation properties of the sound transmitted through a multilayer structure is analyzed. The layers consist of a saturated gas-vapor-droplet suspension with a known size distribution. For this purpose, a water injection system has been designed to study the sound propagation through the system. To understand this phenomenon, the dependence of the sound propagation with the most significant parameters such as the droplet size, the spacing between nozzles and the pressure and flow of water in the system, is discussed.

1 Introducción

La propagación del sonido al aire libre se ve influenciada por las superficies geométricas, atenuación del aire, interacción con el suelo, barreras, vegetación y refracción asociada a los gradientes de viento y temperatura [1]. Estos factores influyen en las características del sonido, tales como la velocidad de propagación, la atenuación, la dispersión y la difracción de la onda sonora, entre otras.

Asimismo, es necesario destacar que el sistema empleado en el lanzamiento de cohetes espaciales para reducir el impacto sobre el medio de esta actividad es la inundación, mediante un depósito de agua, de la zona de lanzamiento, permitiendo así una mejor refrigeración térmica del cohete, pero haciendo un uso irracional del agua.

En el presente trabajo se ha querido seguir en la misma línea de utilización del agua como medio de atenuación

sonora, si bien es cierto que pretende hacer un uso racional de dicho recurso al mismo tiempo que se mantienen las propiedades de refrigeración del mismo. Por ello, se ha procedido a diseñar y fabricar un prototipo de sistema de inyección de agua que, mediante el uso de difusores de agua, crea una cortina de agua pulverizada que atenúa el ruido generado por la fuente de emisión sonora, permitiendo el estudio de la absorción del sonido a través de tres capas de suspensión de gas y gotas, en función de los parámetros característicos del sistema de inyección, como son la presión, caudal y difusión del de agua.

2 Material y métodos

Para el correcto funcionamiento del sistema de inyección de agua, es necesario obtener una fuente de alimentación que permita un flujo de agua con una presión y caudal constante, pudiéndose modificar posteriormente con los elementos que se han incorporado en el sistema para tales efectos. Dado que las medidas realizadas pueden verse afectadas por el ruido generado por las bombas de agua, ha sido necesario situarlas a una distancia lo suficientemente grande como para que esto no ocurra.

Una vez incorporada el agua en el sistema, ésta es conducida por la tubería hacia unos difusores intercambiables, que crean una cortina de agua nebulizada cuyas características dependen de variables como el tamaño de gota (controlable según el tipo de difusor utilizado), presión de agua en el sistema y caudal introducido en éste.

Con el propósito de controlar la presión del agua, se ha incorporado un manómetro en el centro de la tubería principal y una válvula de desagüe que permite desviar o reconducir el agua excedente.

A continuación se detallan los elementos que componen el sistema diseñado (Figura 1), así como la función que desempeñan en el mismo:

- **Bombas de agua:** captación de agua del pozo subterráneo, impulsión hacia el sistema y aporte de la presión necesaria para la realización de las mediciones.
- **Difusores intercambiables del fabricante Teejet Technologies de distintos modelos:** control del tamaño de gota en la cortina de agua.
- **Filtro de malla:** eliminación de posibles elementos existentes en el agua que puedan provocar obstrucciones del sistema y pérdidas de carga.
- **Manómetro:** control la presión en el centro del sistema.
- **Válvula de desagüe:** control de la presión y el caudal en el interior del sistema.
- **Sistema de tuberías y otros elementos de conducción:** conducción de agua, elaboradas con polietileno y PVC.

El recinto en el cual se han realizado las mediciones ha sido el vivero del Campus de Gandia de la Universidad Politécnica de Valencia, ya que cumple con los requisitos necesarios. Por un lado, es un recinto cerrado que ofrece cierta protección frente a las condiciones climatológicas (especialmente la influencia que puede presentar el viento en las medidas realizadas) y, por otro, está delimitado por una malla permeable, evitándose de este modo posibles reflexiones y demás interferencias que puedan dar lugar a errores de medida.

Los parámetros de configuración de la señal utilizados se detallan a continuación:

- **Tipo de señal:** LogChirp.
- **Tamaño:** 65 k.
- **Tipo de eventanado:** rectangular.

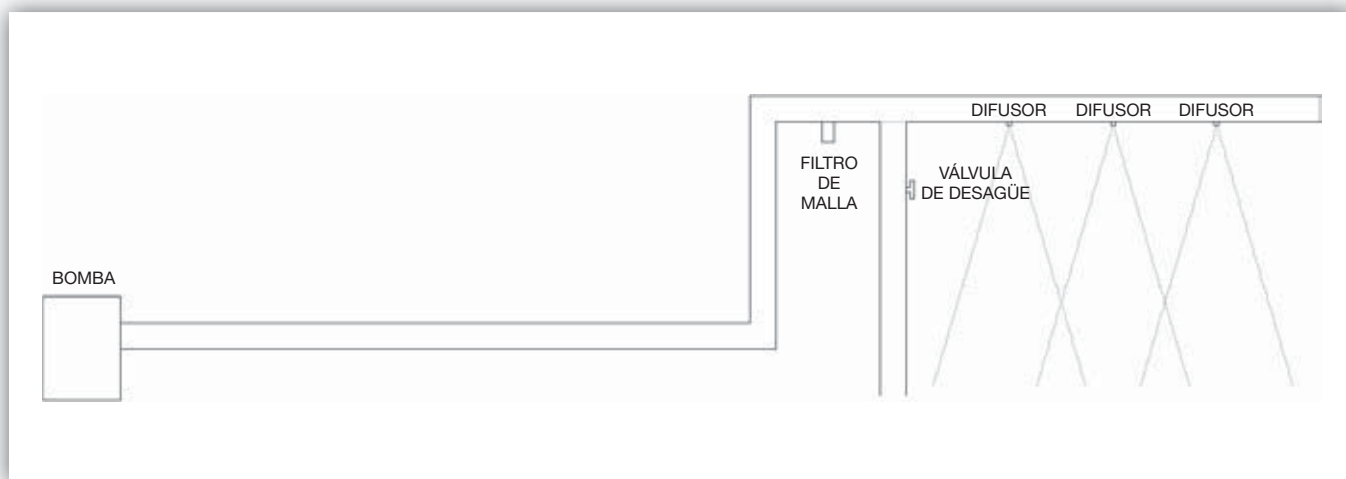


Figura 1. Esquema del sistema de inyección de agua.

- **Número de medias por muestra:** 10.
- **Intensidad de la señal generada:** 1,585 V.
- **Duración total de la señal:** 1365,31 ms.

Asimismo, es necesario destacar que la altura de la fuente sonora y el dispositivo receptor ha sido una altura fija de 1,50 metros durante todos los ensayos la distancia entre ambos elementos ha sido de 4 metros, y la distancia entre los difusores de agua empleados ha sido de 1,30 metros.

Si bien los parámetros enumerados anteriormente han permanecido inalterados durante la realización de la totalidad de los ensayos, hay otros que han sido modificados en cada una de las mediciones:

- **Presión:** el control de esta variable se ha realizado mediante la incorporación en el sistema de una válvula de desagüe que permite la expulsión y/o recirculación del agua excedente en el sistema. Han sido realizados ensayos utilizando presiones, medidas en el centro del sistema de inyección de agua, de 1,5 bar, 2,0 bar, 2,5 bar, 3,0 bar, 3,5 bar y 4,0 bar.
- **Tamaño de gota:** el control de esta variable ha sido posible, como se ha indicado anteriormente, mediante la utilización de difusores intercambiables del fabricante Teejet Technologies. Los modelos de difusor empleados han sido los siguientes, realizando además combinaciones en base a distintas configuraciones de éstos:
 - **TP11002, TP11003, TP11004:** difusores simples de chorro plano, de bordes decrecientes y con ángulo de pulverización de 110°.
 - **TTJ60-11004:** difusores dobles con dos orificios que producen dos chorros de abanico plano con un ángulo de pulverización de 110°.
 - **AI11002, AI11004:** difusores por aire inducido que producen un chorro plano de bordes decrecientes y con ángulo de pulverización de 110°.

Para la realización de los ensayos, se genera una señal con las características indicadas anteriormente utilizando la tarjeta de sonido CLIO (controlada mediante un ordenador portátil), a cuyo puerto de salida se ha conectado la fuente sonora. Tras su emisión, el nivel de presión sonora de la señal es captado por el dispositivo receptor y redirigido de nuevo a la tarjeta de sonido y al ordenador portátil para proceder al almacenamiento de los datos correspondientes, que, en este caso, han sido relativos al dominio frecuencial y al dominio temporal, y su posterior procesado, estudio y análisis.

Para el análisis de los resultados obtenidos en el dominio frecuencial se ha realizado un suavizado de los mismos en 1/6 de octava, permitiendo de este modo facilitar su estudio y la obtención de conclusiones. Para esta fase del análisis se ha realizado la representación gráfica de los niveles de atenuación, obtenidos a partir de los niveles de presión sonora registrados por el dispositivo receptor en función de la frecuencia (incluyendo en cada caso las variables utilizadas en el ensayo).

Con carácter previo al procesado de los datos, es necesario realizar una corrección de los mismos. Esto se debe a que los niveles registrados durante la realización de los diferentes ensayos se ven influenciados por la totalidad de los sonidos existentes en el medio, incluido el ruido de fondo, el de la señal emitida por la fuente y el de los difusores en funcionamiento, motivo por el cual es necesario realizar una normalización de los mismos en función de los niveles descritos anteriormente.

El nivel captado por el dispositivo receptor durante la realización de las mediciones se ve influenciado por la totalidad de los sonidos presentes en el medio. Para obtener la absorción acústica del sistema, es necesario obtener la diferencia entre los niveles de presión sonora relativos a la fuente y los difusores en funcionamiento (ambos corregidos por el ruido de fondo registrado previamente) y el nivel de presión sonora captado por el dispositivo receptor durante la realización del ensayo. De este modo, la atenuación debida a la acción del sistema de inyección de agua se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Atenuación (dB)} = \text{SPL}_{\text{fuente sonora}} + \text{SPL}_{\text{difusores}} - \text{SPL}_{\text{ambiente}} - \text{SPL}_{\text{total}} \quad (1)$$

Tras la aplicación de esta normalización, han sido obtenidos los niveles de atenuación absoluta y, por tanto, es posible establecer comparaciones entre los valores obtenidos en los diversos ensayos realizados.

3 Resultados y discusión

En el presente trabajo se han llevado a cabo 73 mediciones. Se ha organizado la presentación de los resultados atendiendo a la influencia en la atenuación sonora de los parámetros significativos del sistema de inyección:

- Mediciones realizadas empleando únicamente difusores simples.
- Mediciones comparativas de los niveles de atenuación sonora de difusores simples, dobles y de aire inducido.

- Mediciones empleando diversas configuraciones entre difusores simples y difusores de aire inducido.

Dado que en cada uno de ellos se pretende estudiar diferentes parámetros, se hará un análisis detallado e independiente de los resultados obtenidos en cada uno de ellos.

Mediciones realizadas con difusores simples

Para el desarrollo de este ensayo, han sido empleados únicamente difusores de tipo simple de los tipos TP11002, TP11003 y TP11004. Con éstos, se pretende estudiar la influencia de la presión en la atenuación sonora del agua, por lo que se han realizado medidas empleando presiones de 1,5 bar, 2,0 bar, 2,5 bar, 3,0 bar, 3,5 bar y 4,0 bar.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos empleando el difusor simple de tipo TP11004:

En la Figura 2 se puede observar cómo este tipo de difusores presentan una elevada atenuación de la onda sonora en frecuencias bajas, decreciendo el poder de atenuación de las gotas de agua generadas mediante estos difusores a medida que aumenta la frecuencia.

Este incremento de la atenuación sonora en bajas frecuencias puede ser debido a la existencia de resonancias en el sistema causadas por el espesor de la cortina de agua nebulizada, que es de 10 centímetros a una altura de 1,50 metros (a la cual se encuentran los dispositivos emisor y receptor).

La frecuencia teórica de resonancia para un medio con el espesor indicado, está relacionada con la velocidad y el espesor entre capas tal y como muestra la siguiente ecuación:

$$f = \frac{c}{2L} = \frac{343}{2 \cdot 0.1} = 1715 \text{ Hz} \quad (2)$$

Siendo,

- c, velocidad del aire (m/s)
- L, espesor del medio (m)

El máximo de atenuación, se encuentra en torno a frecuencias situadas entre 1700 Hz y 1800 Hz. Por este motivo, es posible establecer, como hipótesis plausible, que el máximo de atenuación sonora a las frecuencias indicadas se debe al motivo expuesto.

Este hecho puede deberse a que un incremento en la presión del agua y, por consiguiente, un mayor caudal de agua suministrada al sistema, da lugar a un aumento en el factor de llenado. Este concepto es empleado en física de medios periódicos e indica el porcentaje del volumen total que está ocupado por gotas de agua, si bien es cierto que el tamaño de gota se mantiene constante.

Comparación de los difusores simples, dobles y de aire inducido

En el ensayo que se va a describir a continuación se estudiará la influencia, sobre el nivel de atenuación sonora, del tipo de difusor empleado para la creación de la

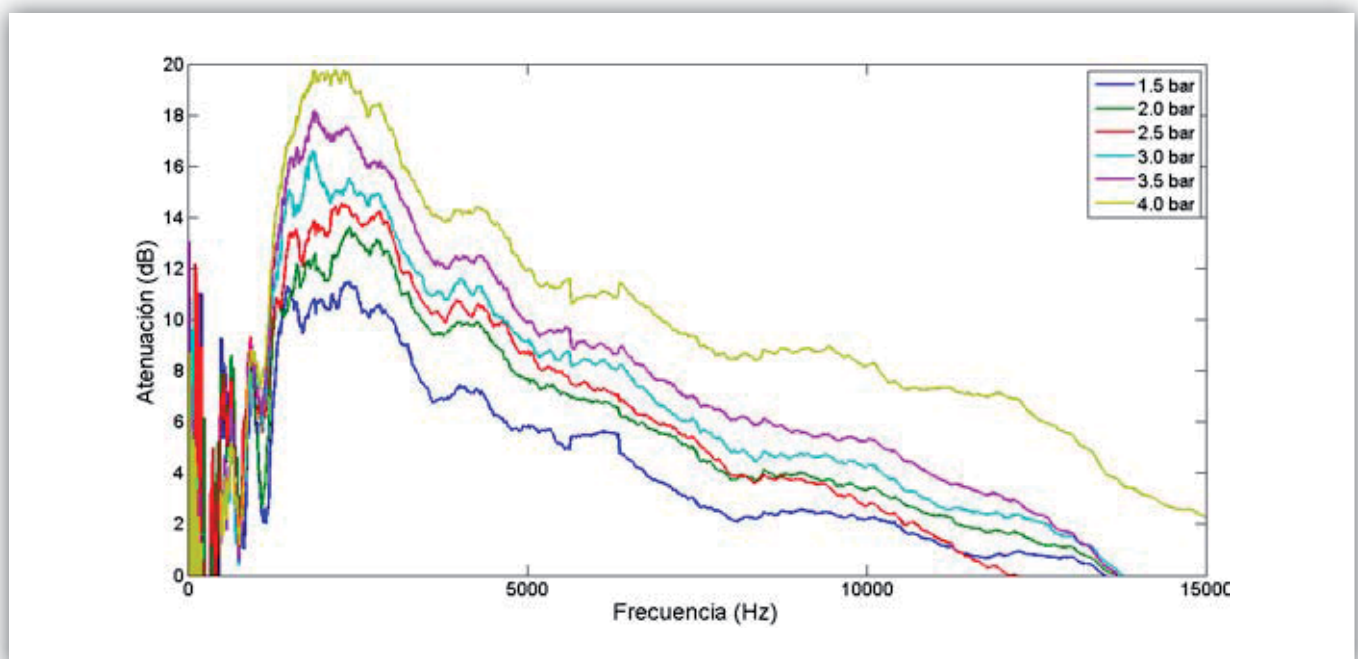


Figura 2. Atenuación sonora de los difusores simples de tipo TP11004 a distintas presiones.

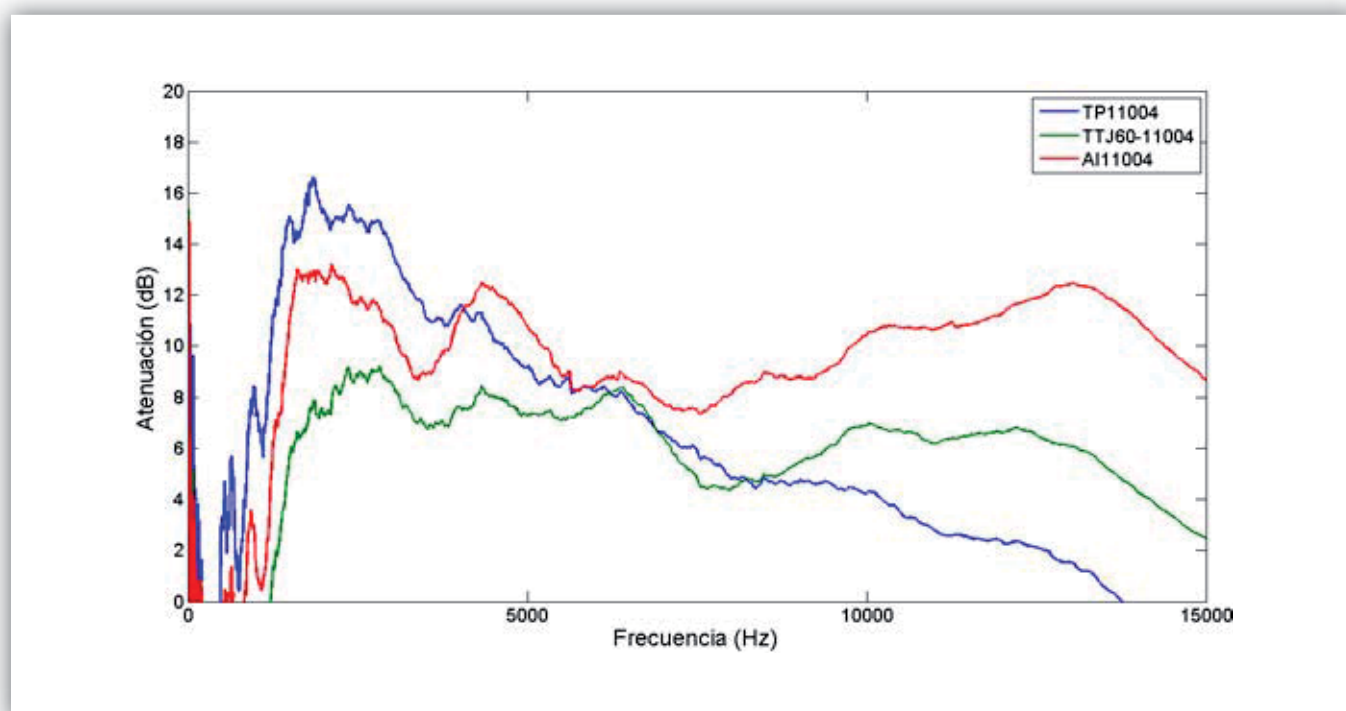


Figura 3. Comparación de la atenuación sonora de los difusores simples, dobles y de aire inducido a la presión de 3,0 bar.

cortina de agua nebulizada. Para ello, han sido empleados tres clases de difusores: difusores simples (TP11004), difusores dobles (TTJ60-11004) y difusores de aire inducido (AI11004).

Dado que la influencia de la presión ha sido estudiada en el apartado anterior, para este ensayo se ha tomado como referencia la presión de 3,0 bar, habiéndose representado en la Figura 3 únicamente los resultados obtenidos a dicha presión.

El motivo de la similitud en la atenuación sonora a frecuencias medias se debe a que, como se ha indicado anteriormente, el espesor de la capa de agua pulverizada en ambos difusores es muy similar, lo cual da lugar a resonancias debidas al espesor. Por el contrario, si se analizan los resultados a frecuencias altas, es posible ver que, a frecuencias superiores a 6300 Hz, la tendencia descrita anteriormente se invierte, observándose una diferencia cada vez mayor en favor de los difusores de aire inducido.

Tras varias medidas y el análisis de los resultados obtenidos, se plantea la hipótesis de que la mayor atenuación sonora presentada a frecuencias altas por los difusores de aire inducido con respecto a los otros tipos de difusores puede deberse a una mayor dispersión existente en los tamaños de gota suministrados por dichos difusores, lo cual, a falta de un estudio más exhaustivo y asumiendo que la atenuación sonora está relacionada con los tamaños de gota, daría lugar a un ensancha-

miento del espectro de atenuación y, por tanto, al incremento de la atenuación sonora observable. El tamaño de gota obtenido por los difusores a la presión de 3 Pa es de 177-218 μm para difusores simples y de 428-622 μm para difusores de aire inducido.

Asimismo, es posible que el flujo másico de agua pueda haber sufrido ligeras modificaciones con el cambio de difusor, lo cual puede haber dado lugar a un cambio de la impedancia del medio y de las propiedades de transmisión del mismo.

Mediciones realizadas con combinación de difusores

Con el propósito de estudiar el efecto derivado de la utilización, de forma conjunta de dos tipos de difusores, sobre la atenuación sonora, han sido utilizadas dos configuraciones distintas:

- AI11004 + TP11004 + AI11004: utilización de dos difusores de aire inducido a ambos extremos y un difusor simple, situando en el centro del sistema.
- TP11004 + AI11004 + TP11004: utilización de dos difusores simples a ambos extremos y un difusor de aire inducido, situado en el centro del sistema (configuración opuesta a la descrita anteriormente).

Asimismo, y con el objetivo de poder establecer comparaciones entre las configuraciones en las que han sido empleados dos tipos de difusores y aquéllas en las que

únicamente se ha utilizado un tipo, a la representación de los resultados obtenidos en este ensayo se han incorporado la de los obtenidos en las mediciones realizadas empleando los difusores de tipo TP11004 y AI11004 de forma independiente.

Si se realiza un análisis de la atenuación sonora obtenida a frecuencias altas, es posible apreciar que, a partir de la frecuencia de 6000 Hz, existe una elevada atenuación al utilizar la configuración de difusores AI11004 + TP11004 + AI11004, presentando ésta una atenuación global superior a la del resto de configuraciones en el rango de frecuencias estudiado.

Mediante este método se obtiene una sinergia entre los niveles de atenuación sonora obtenidos empleando difusores simples de tipo TP11004 y difusores de aire inducido de tipo AI11004. A modo de hipótesis, se plantea que dicha sinergia puede ser ocasionada debido a la combinación de los diversos fenómenos que intervienen en la atenuación sonora de los dos tipos de difusores empleados en el análisis que se ha realizado empleándolos de forma independiente, es decir, resonancias internas debidas al espesor de la cortina de agua a la altura a la que se encuentra el dispositivo receptor, dispersión en el tamaño de las gotas de agua generadas por los difusores y posibles cambios en el flujo másico de los distintos difusores debido a los cambios de caudal que son capaces de suministrar cada uno de ellos y sus posiciones en el sistema de inyección de agua.

4 Conclusiones

Tras el análisis y discusión realizados de los ensayos efectuados, ha sido posible extraer algunas conclusiones sobre la influencia de los parámetros estudiados, los niveles de atenuación sonora y los difusores más adecuados para la optimización de este factor:

- La configuración de tipo AI11004 + TP11004 + AI11004 (combinación de dos difusores de aire inducido a los extremos y un difusor simple entre éstos), es la que ofrece mayores niveles de atenuación en el global de frecuencias estudiadas. Es una configuración óptima si la fuente sonora que se pretende atenuar emite en un rango muy elevado de frecuencias.
- A frecuencias bajas o medias (1500-3500 Hz), es conveniente la utilización de difusores de tipo simple (serie TP).
- La presión es uno de los factores más influyentes sobre la atenuación sonora del sistema de inyección de agua diseñado, viéndose incrementado el nivel de atenuación con la presión (y, por ende, el caudal) suministrada al sistema.
- El espesor de la columna de agua es una variable cuya influencia puede resultar determinante en los niveles de atenuación del sistema de inyección de agua. Aunque en las hipótesis previas a la realización del trabajo no ha sido tomada en cuenta como variable controlable, puede determinar a qué fre-

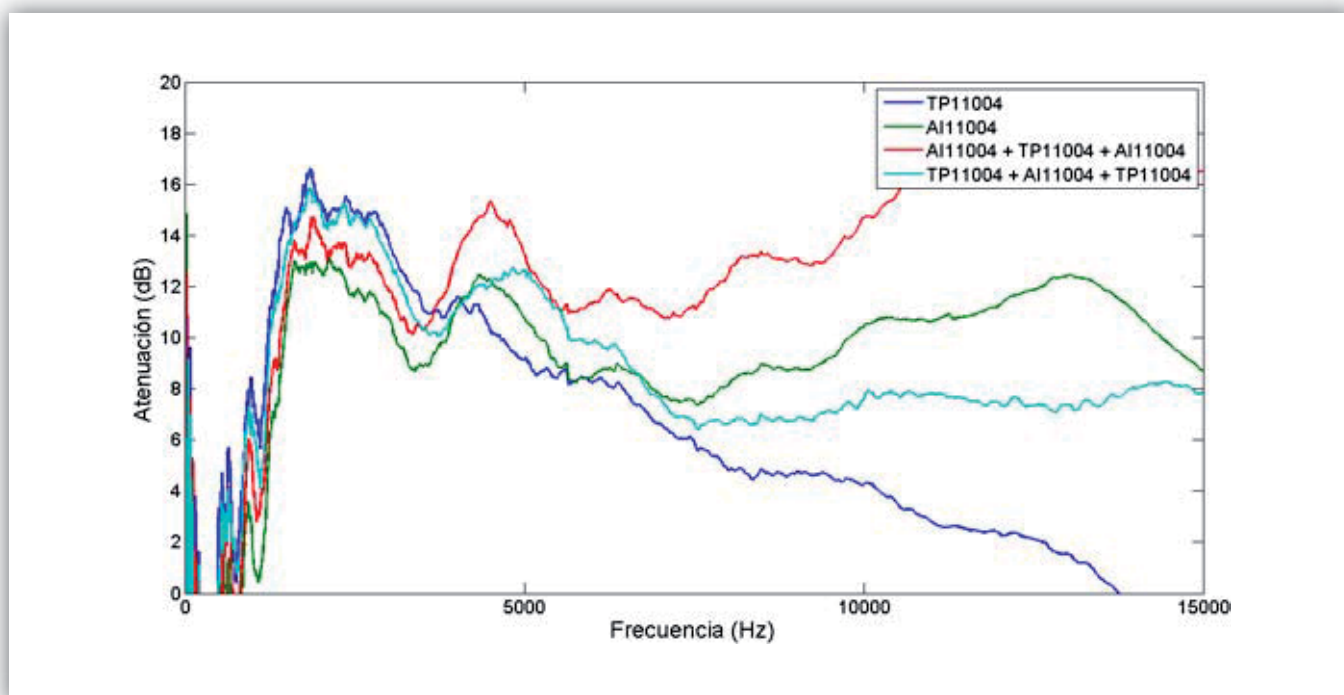


Figura 4. Comparación de la atenuación sonora de distintas combinaciones de difusores a la presión de 3,0 bar.

cuencia tendrá lugar el máximo de atenuación sonora del sistema.

- Si bien el tamaño de gota se encuentra íntimamente ligado con el tipo de difusor empleado, es posible afirmar que una combinación de tamaños de gota o, en su defecto, un tamaño de gota ligeramente superior al empleado por los difusores simples ofrece mejores resultados de atenuación sonora en el rango de frecuencias analizadas.

En base a los resultados obtenidos y las conclusiones presentadas anteriormente, se puede concluir que es necesaria una investigación más profunda, construyendo prototipos que permitan un mayor control de las variables así como el estudio de otras nuevas como el espesor de la columna de agua, la combinación de tamaños de gota, etc. Consideramos que este tipo de sistemas pueden representar una buena solución para la atenuación de fuentes que emitan elevados niveles de presión sonora.

Agradecimientos

Los autores agradecen el asesoramiento en el diseño del sistema de inyección a Montano Pérez Pascual, Lluís Val Manterola y Enrique Ortí García, del Departamento de Ingeniería Rural y Agroalimentaria de la UPV.

Bibliografía

- [1] VVAA. *Springer Handbook of Acoustics*. Springer Science+Business Media, LLC New York. 2007.
- [2] KINSLER, L. *et al. Fundamentals of Acoustics*. John Mayer & Sons, Inc. 2000.
- [3] BLACKSTOCK, D.T. *Fundamentals of physical acoustics*. John Wiley & Sons, Inc. 2000.
- [4] PIERCE, A.D. *Acoustics: An introduction to its physical principles and applications*. Acoustical Society of America. McGraw-Hill, Inc. 1981.
- [5] CHOW, J. *The attenuation of acoustic waves in a two-phase medium*. Division of Engineering of the Brown University. Providence, Rhode Island. 1963.
- [6] KANDULA, M. Sound propagation in saturated gas-vapor-droplet suspensions with droplet evaporation and nonlinear relaxation. *J. Acoust. Soc. Am.* **131**(6). 2012.
- [7] DAVIDSON, G.A. Sound propagation in fogs. *J. Atmos. Sci.* **32**(11), 2201-2205. 1975.
- [8] RAGALLER, P.A. The Reduction of Supersonic Jet Noise Using Pulsed Microjet Injection. Directora: Anuradha Annaswamy. Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 2007.
- [9] IGNATIUS, J. *et al.* Supersonic Jet Noise and Suppression Characteristics During Launch Vehicle Liftoff. *Proceedings of the 13th Asian Congress of Fluid Mechanics*. 2010.
- [10] KANDULA, M., LONERGAN, M. Spectral attenuation of sound dilute suspensions with nonlinear particle relaxation. *Acoustics 08 Paris*. 2008.

Índice de anunciantes	
	Pág.
AAC Acústica+Lumínica	2
Saint-Gobain Isover	12
Ursa	22
Vibcon	36
Datakustik	42
Brüel & Kjaer	54-55
Rockwool	68
Cesva Instruments	69-70
Audiotec	74
Álava Ingenieros	77
Decustik	80