

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Master en Ingeniería Acústica



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR DE GANDIA

“Medida de la absorción sonora de un sistema de inyección de agua”

Tipología: Trabajo de investigación

TRABAJO FINAL DE MASTER

Autor/a: **Iván Herrero Durá**

Tutor/a: **Rubén Picó Vila**

Cotutor/a: **Víctor José Sánchez Morcillo**

GANDIA, 2014

Resumen del trabajo

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.

Palabras clave: atenuación sonora; sistema de inyección de agua; suspensiones de gotas, vapor y gas, difusor, acústica

Keywords: sound attenuation; water injection system; gas-vapor-droplet suspensions; nozzle; acoustics

A Rubén Picó, Víctor Sánchez y Javier Zaragozá, por su inestimable ayuda y orientación a lo largo de todo el proyecto.

A mi madre y mi hermana, por todo el apoyo prestado a lo largo de mi vida.

Contenidos

Relación de figuras	ii
Relación de tablas	iii
1. Introducción	1
2. Justificación del proyecto	8
3. Objetivos	9
4. Material y métodos	10
Fase 1. Diseño y concepción del sistema de inyección de agua	11
Fase 2. Realización de las mediciones	15
Fase 3. Procesado y análisis de los resultados	18
5. Resultados y discusión	21
5.1. Mediciones realizadas con difusores simples	22
5.2. Comparación de los difusores simples, dobles y de aire inducido	24
5.3. Mediciones realizadas con combinación de difusores	25
6. Conclusiones	28
7. Bibliografía	30
Anexo. Script realizado con Matlab para el procesado de los datos	31

Relación de figuras

Figura 1. Curva de atenuación del sonido en el aire	5
Figura 2. Bomba de agua utilizada para impulsar el agua hacia el sistema	11
Figura 3. Sistema de tuberías	12
Figura 4. Esquema del sistema de inyección de agua	12
Figura 5. Sistema de inyección de agua	14
Figura 6. Viveros	15
Figura 7. Ángulo de apertura de 110° formado por los difusores	17
Figura 8. Disposición de los elementos del sistema de inyección de agua	17
Figura 9. Representación de la ventana temporal Adrienne	20
Figura 10. Difusores de agua	21
Figura 11. Atenuación de los difusores simples de tipo TP11002	22
Figura 12. Atenuación de los difusores simples de tipo TP11003	22
Figura 13. Atenuación de los difusores simples de tipo TP11004	23
Figura 14. Comparación de la atenuación de los difusores simples (TP11004), dobles (TTJ60-11004) y de aire inducido (AI11004) a la presión de 3,0 bar	24
Figura 15. Comparación de la atenuación de distintas combinaciones de difusores a la presión de 3,0 bar	26

Relación de tablas

Tabla 1. Dependencia del coeficiente de absorción de algunos de los mecanismos de absorción en función de la frecuencia	4
Tabla 2. Características de los difusores empleados en los ensayos	13
Tabla 3. Condiciones ambientales	16

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.

El presente trabajo se centrará en la absorción acústica, fenómeno físico consistente en la pérdida de energía de una onda sonora cuando ésta atraviesa un determinado medio, dependiendo la absorción de las propiedades de dicho medio, como la porosidad y la densidad, además de otros factores ajenos a éste, como el ángulo de incidencia de la onda sonora en el medio y las condiciones ambientales (presión atmosférica, humedad relativa, temperatura y velocidad del viento).

La absorción acústica de un determinado material o proceso es medido por una magnitud conocida como coeficiente de absorción sonora (representado mediante el símbolo α), y cuyas unidades son nepers por metro (Np/m). Esta magnitud depende de la frecuencia, variando esta dependencia en función del mecanismo de absorción que se dé (véase Tabla 1), los cuales se tratarán más adelante.

El coeficiente de absorción del sonido en aire depende de la frecuencia, la humedad, la temperatura y la presión [1], pudiendo calcularse mediante la expresión

$$\alpha = f^2 \left[\left(\frac{1.84 \cdot 10^{-11}}{\left(\frac{T_0}{T}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{p_s}{p_0}} \right) + \left(\frac{T_0}{T}\right)^{2.5} \left(\frac{0.10680 e^{-3352/T} f_{r,N}}{f^2 + f_{r,N}^2} + \frac{0.01278 e^{-2239.1/T} f_{r,O}}{f^2 + f_{r,O}^2} \right) \frac{Np}{m \cdot atm} \right]$$

Siendo,

$f_{r,N}$ y $f_{r,O}$ frecuencias de relajación asociadas con la vibración de las moléculas de nitrógeno y el oxígeno, respectivamente, dadas por

$$f_{r,N} = \frac{p_s}{p_{s0}} \left(\frac{T_0}{T}\right)^{\frac{1}{2}}$$

Por el mecanismo de absorción, una parte de la energía de la onda sonora es transformada en calor mientras ésta viaja en el aire [1]. La absorción sonora resultante es significativa a altas frecuencias, por lo que podría decirse que el aire actúa en estos casos a modo de un filtro paso-bajo [1].

La propagación de ondas planas de frecuencia constante a través de los materiales decrece habitualmente de forma exponencial con el aumento de la distancia de propagación [1], siendo este decrecimiento exponencial la consecuencia de la transferencia de energía mecánica a otras formas de energía, como la calorífica. Este fenómeno está asociado con la transferencia de energía acústica a la energía interna del material [1].

La teoría de absorción, desarrollada por primera vez por Stokes en 1851 y ampliada posteriormente por Kirchhoff, sólo es aplicable a fluidos con propiedades directamente observables como la presión, densidad, compresibilidad, calor específico y temperatura, siendo necesario adoptar un punto de vista microscópico y considerar a tales fenómenos como las energías de asociación dentro de las moléculas y entre éstas para desarrollar mecanismos adicionales de absorción conocidos como tipos moleculares o de relajación de atenuación sonora [2].

La amplitud de la presión sonora varía según la siguiente ecuación:

$$|\hat{p}(x)| = |\hat{p}(0)|e^{-\alpha x}$$

De este modo, el nivel de presión sonora (SPL) de una onda plana viene dado por la ecuación

$$SPL = 20 \log_{10} \frac{A/\sqrt{2}}{p_{ref}} e^{-\alpha x} = 20 \log_{10} \frac{A/\sqrt{2}}{p_{ref}} + 20 \log_{10} e^{-\alpha x} = SPL_0 - 8.686 \alpha x$$

Siendo,

A, amplitud de la onda sonora

p_{ref} , presión de referencia

SPL_0 , nivel sonoro en el origen ($x=0$)

Por tanto, una absorción constante de α Np/m es equivalente a una absorción constante de 8.686α dB/m.

En lo referente a las fuentes de disipación de energía acústica, éstas pueden dividirse en dos categorías generales: las debidas a pérdidas en el medio y aquellas asociadas con pérdidas en las fronteras del medio, siendo la primera importante cuando el volumen de fluido es grande, mientras que la segunda es importante con materiales porosos, ductos delgados y recintos pequeños [2]. En estos procesos, la energía se disipa en un área mayor [3].

Los principales mecanismos de absorción son las pérdidas viscosas, pérdidas por conducción térmica, pérdidas asociadas con intercambios moleculares de energía, pérdidas por relajación y pérdidas por efectos de frontera del medio, siendo conocidos los tres primeros como mecanismos clásicos de absorción.

Las pérdidas viscosas resultan siempre que hay movimientos relativos entre porciones adyacentes del medio, y se pueden considerar como pérdidas por fricción [2]. El coeficiente de absorción debido a pérdidas por viscosidad se obtiene a través de la ecuación

$$\alpha_v = \frac{[(4/3)\mu + \mu_B + (\gamma - 1)(\kappa/c_p)]\omega^2}{2\rho_0 c^3}$$

Siendo,

μ , viscosidad

μ_B , viscosidad volumétrica

γ , relación de calor específico

κ , coeficiente de conducción térmica

c_p , calor específico a presión constante

ω , frecuencia angular

ρ_0 , densidad volumétrica

c , velocidad termodinámica del sonido

Las pérdidas por transmisión de calor resultan de la conducción de energía térmica entre las condensaciones de mayor temperatura y las rarefacciones de menor temperatura [2].

Los intercambios moleculares de energía que pueden causar absorción incluyen la conversión de energía cinética de las moléculas en energía potencial almacenada, energía rotacional y vibracional (para moléculas poliatómicas) o energías de asociación y disociación entre diferentes especies iónicas y complejos en soluciones ionizadas [2].

En fluidos no relajantes la presión no depende de la velocidad a la que se modifica su densidad y temperatura. Sin embargo, esta relación sí existe en un fluido relajante [3]. Estas pérdidas, conocidas como pérdidas por relajación, se definen por la ecuación

$$\alpha_r = \frac{(\Delta c)v}{c^2} \frac{\omega^2 \tau_v}{1 + (\omega \tau_v)^2}$$

Siendo,

c , velocidad termodinámica del sonido

u , velocidad del fluido

ω , frecuencia angular

τ_u , relajación temporal asociada a un proceso u -ésimo

La absorción por efectos de frontera del medio es debida al paso de una onda sobre una superficie de frontera. A causa de la viscosidad la superficie ejerce una fuerza de cizalla, al mismo tiempo que la conducción térmica permite la transferencia de calor entre el fluido y la superficie [3].

Tabla 1. Dependencia del coeficiente de absorción de algunos de los mecanismos de absorción en función de la frecuencia.

Mecanismo de absorción	Dependencia de α con la frecuencia
Viscosidad	f^2
Conducción térmica	f^2
Relajación	$f^2 / (f^2 + f_r^2)$
Efectos de frontera del medio	\sqrt{f}

Fuente: Blackstock, D.T. (2000).

El símbolo f_r hace referencia a la relajación frecuencial, que caracteriza la transición en la curva de absorción por relajación de la región de bajas frecuencias ($\alpha \propto f^2$) a la región constante de altas frecuencias ($\alpha = \text{constante}$) [3].

Al analizar la curva de absorción del sonido en el aire (véase Figura 1), se puede observar que existen dos frecuencias de relajación, 173 Hz y 12500 Hz, coincidentes con el N_2 y el O_2 , respectivamente (los dos principales componentes del aire) [4].

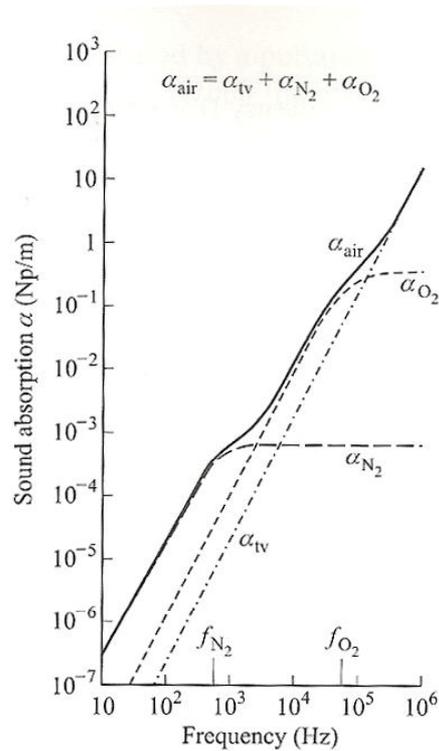


Figura 1. Curva de atenuación del sonido en el aire (T=20°C, HR=20%).

Fuente: Blackstock, D.T. (2000).

Hasta el momento se ha tratado la absorción sonora tomando como único medio absorbente el aire. Sin embargo, dadas las características de este trabajo, es necesario prestar especial atención a la absorción sonora tomando como medio absorbente el agua.

Teniendo en cuenta los mecanismos de absorción anteriormente citados, el coeficiente de absorción en el agua se puede definir mediante la expresión

$$\alpha = \frac{\omega^2}{2\rho_0 c^3} \left[\frac{4}{3}\eta + \eta_B \right]$$

Siendo,

ω , frecuencia angular

c , velocidad termodinámica del sonido

ρ_0 , densidad volumétrica

η y η_B , parámetro que depende del fluido y de su temperatura

Es necesario destacar, además, que los ensayos efectuados en el presente trabajo se desarrollan en un medio compuesto por dos fases, una fase líquida (agua) y una fase gaseosa (aire situado entre las capas de agua del sistema y en el interior de las gotas de agua). Este hecho da lugar a una serie de particularidades en el fenómeno de atenuación sonora, ya que el efecto de la tensión superficial del agua altera la disipación térmica resultante de la conducción térmica, no presentando efecto alguno sobre la disipación viscosa [5].

Según este mismo estudio, en aquellas gotas que contengan burbujas de aire en su interior (caso de los difusores del aire inducido de tipo AI11004, como se verá más adelante), la presencia de la tensión superficial incrementa la atenuación térmica en un factor de 1.5 para cada incremento de 10^{-4} cm, reduciéndose este efecto a medida que aumente al tamaño de la gota [5].

El estudio de los mecanismos de absorción sonora es un campo que puede llegar a tener grandes repercusiones, ya que la propagación del sonido en un gas que contiene pequeñas gotas suspendidas es de considerable interés en muchas aplicaciones técnicas importantes como la inestabilidad en cámaras de combustión, y la mitigación del ruido de cohetes por inyección de agua [6]. Es por ello por lo que en el presente trabajo se pretende estudiar la absorción sonora de un sistema de inyección de agua, presentando algunas de sus aplicaciones a lo largo del mismo.

A día de hoy, han sido desarrollados con anterioridad algunos trabajos en los que se ha realizado el estudio de la absorción sonora de nieblas, agua nebulizada y sistemas de inyección de agua. A continuación se citan algunos de los estudios desarrollados en el ámbito que concierne al presente proyecto, haciéndose especial hincapié en las conclusiones obtenidas en cada uno de ellos.

En el año 1975, Davidson estudió de forma teórica la propagación de ondas acústicas planas infinitesimales a través de niebla utilizando formulación continua. Con ello, mostró que la corrección de las teorías anteriormente publicadas reducía los efectos de la transferencia de masa entre el vapor y las gotas y produce una menor atenuación y dispersión en las predicciones, además de establecer una caracterización de los fenómenos de atenuación y dispersión en función de la niebla y de los parámetros frecuenciales del sonido [7].

Otro ejemplo es la tesis desarrollada por Ragaller en 2005, que versó sobre el control activo del ruido procedente aviones supersónicos utilizando inyección pulsada en el tubo de salida del sonido. El estudio permitió extraer dos conclusiones: para la inyección a un ratio de flujo másico dado, la reducción de sonido es mayor con la inyección pulsada que en el caso estacionario; y, para la inyección a una presión dada, la suma de la reducción del sonido aumenta con cada ciclo impuesto [8].

En el estudio realizado por Kandula (2012) se estudió la propagación del sonido en suspensiones de gotas aire-agua saturadas con evaporación de éstas y relajación no lineal. El resultado obtenido fue la existencia de un efecto de ensanchamiento espectral en el coeficiente de atenuación con un decrecimiento en la concentración másica de gotas [6].

Según el estudio desarrollado por Ignatius en 2010, si bien es cierto que la presión es uno de los factores que más influye en la atenuación sonora del agua (con una presión óptima de 4 bar), dicha reducción depende de la temperatura del agua, permitiendo el agua fría atenuar mejor a frecuencias altas, mientras que el agua a una temperatura

superior atenuará a frecuencias bajas. Sin embargo, la atenuación a la frecuencia de 1000 Hz es muy pequeña en cualquiera de los casos.

Si a los motivos anteriormente citados se incorpora la necesidad de la Agencia Espacial Europea (ESA, de las siglas en inglés *European Space Agency*) de incorporar un sistema de inyección de agua, contemplando también la posibilidad de combinarlo con otros sistemas de atenuación sonora como cristales de sonido, para reducir el impacto generado en el proceso de lanzamiento de las naves espaciales, es posible justificar el desarrollo de este proyecto.

Este sistema de inyección de agua permitirá el control activo del ruido generado por la nave espacial utilizando agua nebulizada, incrementando o reduciendo el nivel de la atenuación del agua en función del tamaño de las gotas o de la presión con la que éstas sean generadas.

2. Justificación del proyecto

El ser humano ha sido capaz de fabricar fuentes de ruido capaces de emitir a unos niveles de presión sonora muy elevados. El impacto generado por este tipo de fuentes es muy grande y, en muchos casos, difícilmente controlable, lo cual da lugar a la necesidad de estudiar posibles mecanismos de atenuación del sonido en estos casos con el propósito de minimizarlos y evitar posibles daños en las personas y el medio ambiente.

Es posible clasificar estas fuentes sonoras en dos tipos, móviles y fijas, siendo el control del nivel de ruido generado por las fuentes de ruido puntuales, perfectamente localizadas en el espacio, relativamente más sencillo que el de aquéllas que se encuentran en movimiento. El caso más representativo de fuentes localizadas en este trabajo se encuentra en los cohetes espaciales en su fase de lanzamiento.

Estos motivos han dado lugar a la necesidad de diseñar un sistema que produzca una atenuación del nivel de presión sonora con el propósito, no de eliminar totalmente el ruido, sino de reducir en cierto grado el impacto generado por éste.

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.

3. Objetivos

En base a todo lo indicado en el apartado anterior, es posible indicar que el principal propósito del presente trabajo es el diseño y concepción de un sistema de inyección de agua que produzca una atenuación significativa de los niveles de presión sonora emitidos por fuentes puntuales, perfectamente localizadas en el espacio, que emitan a niveles elevados de ruido, si bien no se pretende conseguir la eliminación del mismo, sino una reducción parcial para que el ruido generado quede por debajo de umbrales que pueden resultar dolorosos para el ser humano y dañinos para el medio ambiente o las estructuras próximas a la fuente, siendo este último caso el de interés en el contexto aeroespacial antes mencionado.

Del mismo modo, se pretende estudiar las propiedades de atenuación sonora del agua en función de determinadas variables, como el tamaño de la gota de agua emitida por los difusores y la presión y el caudal de agua en el interior del sistema, tratando de establecer un patrón general que permita predecir si la atenuación aumentará o se reducirá en función de la modificación de dichos parámetros.

4. 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.

El agua necesaria para la realización de los ensayos es extraída por una bomba de un pozo subterráneo e impulsada por ésta hacia el sistema por una tubería.

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. La gran distancia que debe recorrer el agua desde que es impulsada por las bombas hasta que es introducida en el sistema, da como resultado una pérdida de presión, motivo por el cual ha sido necesario incorporar una bomba auxiliar, conectada en serie a la bomba anteriormente citada.

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.

Además, con el propósito de controlar la presión del agua en el interior del sistema, 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 y tener un mayor control sobre al agua que se incorpora al sistema.

El sistema se basa en el principio de que la cortina de agua supone un obstáculo al paso de la onda sonora emitida por la fuente. Dicha resistencia da lugar a atenuación sonora, ya que, cuando la onda sonora es emitida y propagada en el medio fluido, ésta interactúa con las gotas de agua. Tras el contacto, el agua absorbe parte de la energía de la onda sonora, transformándola en calor, y refleja otra parte, dejando pasar sólo una fracción de la energía de la onda sonora incidente y, por tanto, reduciendo de este modo el nivel de presión sonora captado por el dispositivo receptor al otro lado del sistema de inyección de agua.

El presente trabajo consta de tres fases diferenciadas, que se detallan a continuación:

- **Fase 1. Diseño y concepción del sistema de inyección de agua:** elección de los materiales, elementos y diseño óptimos para la realización de los ensayos.
- **Fase 2. Realización de los ensayos:** trabajo de campo consistente en la realización de los diferentes ensayos para estudiar las variables que influyen en el fenómeno de atenuación sonora, así como los niveles de atenuación que es posible obtener mediante el sistema diseñado (en cuyo desarrollo y metodología se profundizará más adelante).
- **Fase 3. Procesado y análisis de los resultados:** procesado y análisis en gabinete de los resultados obtenidos en la fase anterior mediante software especializado (Matlab).

Fase 1. Diseño y concepción del sistema de inyección de agua

Con el objetivo de emplear el sistema más adecuado, han sido estudiadas diversas posibilidades de diseño, comparándose modelos y materiales distintos en función de las necesidades planteadas por éste.

Tras el estudio de estas posibilidades, se ha optado por la opción de diseñar un sistema que utilice una bomba para la impulsión del agua, de forma que ésta será conducida a través de una tubería hacia tres difusores de agua, que se encargan de pulverizar el agua en los tamaños de gota adecuados (en la Figura 5 se muestra una fotografía del sistema de inyección de agua).

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

- **Programador:** determinación del tiempo de funcionamiento del sistema.
- **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.



Figura 2. Bomba de agua utilizada para impulsar el agua hacia el sistema.

- **Difusores intercambiables del fabricante Teejet Technologies de distintos modelos (véase Tabla 2):** 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.



Figura 3. Sistema de tuberías que conducen el agua hacia el sistema de inyección.

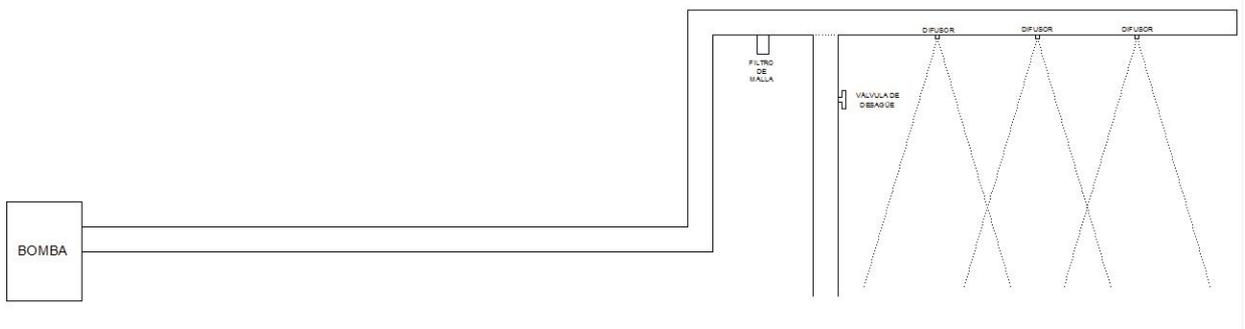


Figura 4. Esquema del sistema de inyección de agua.

Como se ha indicado anteriormente en el presente trabajo, el control del tamaño de las gotas de agua utilizadas para la atenuación sonora se ha realizado mediante la utilización de difusores intercambiables que permiten, en función de sus características y su diseño, escoger el tamaño de gota empleado (véase Tabla 2).

Tabla 2. Características de los difusores empleados en los ensayos.

	Tipo de difusor	Presión (bar)	Tamaño de gota (µm)	Capacidad de un difusor (L/min)
Difusores simples	TP11002	2.0	136-177	0.65
		2.5	136-177	0.72
		3.0	136-177	0.79
		3.5	136-177	0.85
		4.0	136-177	0.91
	TP11003	2.0	136-177	0.96
		2.5	136-177	1.08
		3.0	136-177	1.18
		3.5	136-177	1.27
		4.0	136-177	1.36
	TT11004	2.0	177-218	1.29
		2.5	177-218	1.44
		3.0	177-218	1.58
		3.5	136-177	1.71
		4.0	136-177	1.82
Difusores dobles	TTJ60-11004	1.5	349-428	1.12
		2.0	218-349	1.29
		3.0	218-349	1.58
		4.0	218-349	1.82
		5.0	218-349	2.04
		6.0	177-218	2.23
Difusores de aire inducido	AI11002	2.0	>622	0.65
		3.0	428-622	0.79
		4.0	428-622	0.91
		5.0	349-428	1.02
		6.0	349-428	1.12
		7.0	218-349	1.21
		8.0	218-349	1.29
	AI11004	2.0	>622	1.29
		3.0	428-622	1.58
		4.0	428-622	1.82
		5.0	349-428	2.04
		6.0	349-428	2.23
		7.0	218-349	2.41
		8.0	218-349	2.58

Asimismo, la relación existente entre el caudal introducido en el sistema con la presión en el interior del mismo, han permitido poner solución a la necesidad de controlar esta última variable. Para ello, se ha instalado a la entrada del sistema de inyección de agua una válvula que permita la evacuación de un volumen variable de agua en función de la presión necesaria, incrementando el volumen de agua evacuada al necesitarse un menor nivel de presión.

Del mismo modo, y con el propósito de incrementar la versatilidad del sistema, se han incorporado latiguillos flexibles (ver Figura 5) en los extremos de los difusores que permiten el desplazamiento de los mismos a través de la tubería principal del sistema, dando lugar a la posibilidad de modificar la distancia existente entre los difusores realizando una única perforación en la tubería principal y estudiar así el efecto que produce esta variable en la atenuación sonora de la cortina de agua.



Figura 5. Sistema de inyección de agua.

Tras la realización del diseño definitivo y la obtención del material necesario, se ha procedido al montaje del sistema de inyección de agua en los viveros del Campus de Gandia de la Universidad Politécnica de Valencia (ver Figura 6).

El recinto en el cual se han realizado las mediciones ha sido el vivero debido, 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.



Figura 6. Viveros del Campus de Gandia de la Universidad Politécnica de Valencia.

Fase 2. Realización de las mediciones

Una vez diseñado el sistema y realizada la instalación del mismo en el recinto destinado a ello, se ha procedido a la realización de los ensayos.

En esta fase del proyecto ha sido utilizado el material electroacústico que se detalla a continuación:

- Fuente autoamplificada COTPEL (fuente sonora).
- Micrófono de medida Brüel&Kjær y previo de micrófono (dispositivo receptor) protegido con una bola anti-viento.
- Tarjeta de audio Audiomática CLIO 10 FW (generador de señal).

Con carácter previo a la realización de las mediciones definitivas, se han realizado ensayos con el propósito de comprobar, de forma muy aproximada, la influencia de distintos parámetros sobre las medidas. Las variables consideradas para el estudio son el tipo de señal emitido por la fuente, la presión a la que se encuentra el agua en el interior del sistema y la altura de los dispositivos emisor y receptor.

En la redacción del presente proyecto no se incluirán los resultados detallados obtenidos en estas mediciones previas, ya que no se consideran relevantes por tener una finalidad meramente orientativa. Sin embargo, es necesario destacar que el tipo de señal que ofrece unos resultados más fácilmente observables y una mayor atenuación del sonido por parte del agua es la señal de tipo LogChirp, tanto para el ensayo realizado entre distintas señales como en el que se han efectuado variaciones de presión.

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

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

Igualmente, dada su influencia sobre los resultados obtenidos, se ha considerado oportuno tomar las condiciones ambientales en el momento de la realización de las mediciones:

Tabla 3. Condiciones ambientales en el momento de la realización de los ensayos.

Parámetro	Valor
Velocidad del viento (m/s)	0,4
Temperatura (°C)	32,1
Humedad Relativa (%)	60,3

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° (véase Figura 7).
 - **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°.



Figura 7. Ángulo de apertura de 110° formado por los difusores.

En la Figura 8 se muestra la disposición de los elementos del sistema para la realización de las mediciones.



Figura 8. Disposición de los elementos del sistema de inyección de agua.

Para la realización de los ensayos, es generada 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 y, por tanto, la señal generada es emitida por ésta. Tras su emisión, el nivel de presión sonora de la señal generada 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.

Es necesario destacar que 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. Por este motivo, y con el propósito de obtener como resultado la atenuación sonora del agua, se han realizado las siguientes medidas adicionales:

- Nivel de ruido de fondo existente: medición del ruido existente en el medio sin ninguno de los elementos del sistema en funcionamiento.
- Nivel de ruido debido a los difusores de agua en funcionamiento: medición del ruido debido únicamente a los difusores de agua en funcionamiento dependiendo del tipo de difusor y la presión utilizada en el sistema.
- Nivel de ruido debido a la fuente sonora: medición del ruido debido únicamente a la fuente sonora emitiendo la señal utilizada durante los ensayos sin agua en el sistema.

Fase 3. Procesado y análisis de los resultados

Dominio frecuencial:

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).

El procesado de los datos obtenidos en la fase anterior del proyecto se ha realizado principalmente utilizando el software Matlab.

Mediante este software, se ha creado un programa (*script*) que permite organizar la información registrada en la fase anterior por el dispositivo receptor en forma de matrices y realizar los cálculos y operaciones pertinentes.

Sin embargo, y 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.

Para la implementación de la citada corrección, 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:

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

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

Dominio temporal:

De forma análoga al caso anterior, para el procesado de los datos obtenidos en el dominio temporal es necesario realizar un enventanado de las señales registradas por el micrófono con el propósito de eliminar la influencia derivada del ruido de fondo y acentuar aquéllas características de la señal que resultan de mayor interés. Para ello se ha utilizado la ventana temporal Adrienne, cuyos parámetros de diseño se describen en la norma citada anteriormente.

La ventana temporal Adrienne está compuesta por las siguientes partes:

- Ventana tipo Blackman-Harris en la parte delantera de la muestra con una duración total de 0,5 ms (pre-enventanado).
- Segmento plano con una duración total de 5,18 ms (cuerpo principal).
- Ventana tipo Blackman-Harris en la parte final de la muestra con una duración total de 2,22 ms.

Por tanto, la duración total de esta ventana es de 7,9 ms, variando el número de muestras incluidas en cada una de las partes en cada ensayo con la frecuencia de muestreo tomada al realizar las mediciones.

Por tanto, para el adecuado diseño de la ventana temporal Adrienne, es necesario conocer la forma de una ventana Blackman-Harris, que se define mediante la ecuación

$$w(t) = a_0 - a_1 \cos\left(\frac{2\pi t}{T_{W,BH}}\right) - a_2 \cos\left(\frac{4\pi t}{T_{W,BH}}\right) - a_3 \cos\left(\frac{6\pi t}{T_{W,BH}}\right)$$

Siendo,

$$a_0=0,35875$$

$$a_1=0,48829$$

$$a_2=0,14128$$

$$a_3=0,01168$$

La forma obtenida al representar la ventana temporal Adrienne aplicada a una de las mediciones efectuadas se puede observar en la siguiente figura:

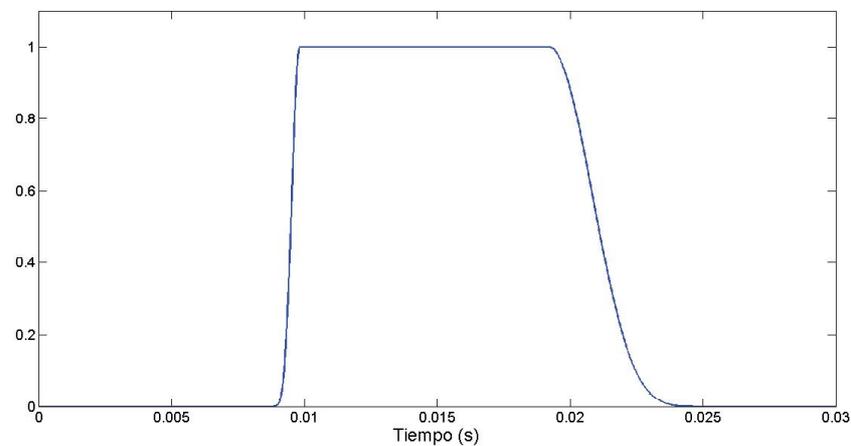


Figura 9. Representación de la ventana temporal Adrienne.

Si bien es cierto que en el presente trabajo se ha realizado el tratamiento de los datos registrados por el dispositivo receptor en el dominio temporal, éstos no se incluyen en la memoria dada la pequeña cantidad de información relativa a los niveles de atenuación sonora y, por tanto, su escasa aportación a las conclusiones del mismo.

5. Resultados y discusión

Tras la descripción de la metodología empleada para el desarrollo del trabajo, en este apartado se procede a detallar, de forma gráfica y visual, los resultados obtenidos tras la realización las diferentes mediciones y el procesado de los datos obtenidos, siempre teniendo en cuenta las variables citadas a lo largo del presente trabajo. Asimismo, se efectuará un análisis y discusión de aquellos casos que se consideren de mayor interés, ya sea por la información aportada sobre la influencia de los parámetros estudiados como por los niveles de atenuación sonora alcanzados en ellos.



Figura 10. Difusores de agua (de izquierda a derecha, difusor simple, difusor doble y difusor de aire inducido).

Como se ha indicado anteriormente en la redacción del documento, han sido desarrollados tres tipos de mediciones, cuyas particularidades se detallarán en los sucesivos puntos del presente apartado:

- 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.

5.1. 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.

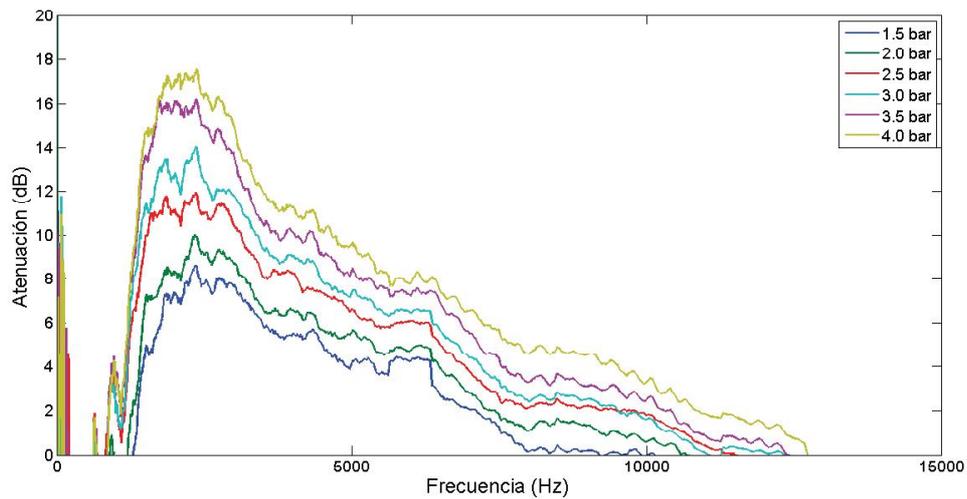


Figura 11. Atenuación de los difusores simples de tipo TP11002 a distintas presiones.

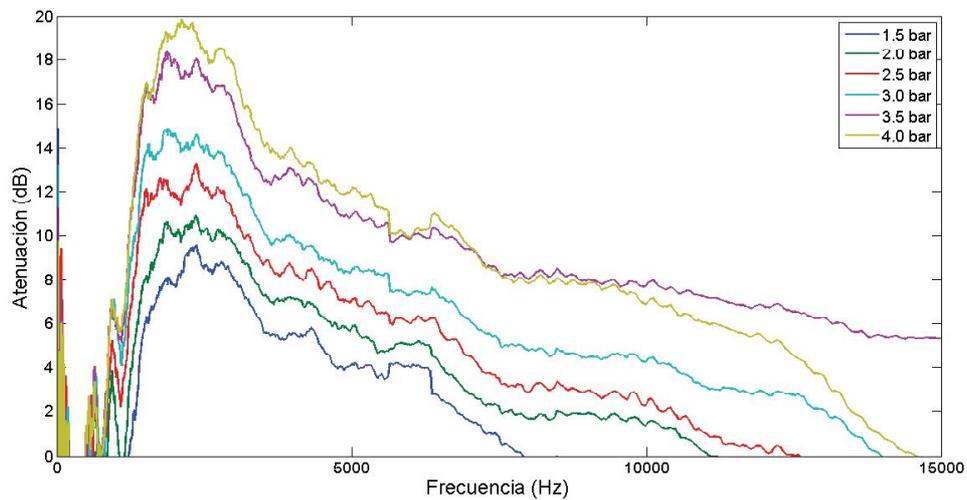


Figura 12. Atenuación de los difusores simples de tipo TP11003 a distintas presiones.

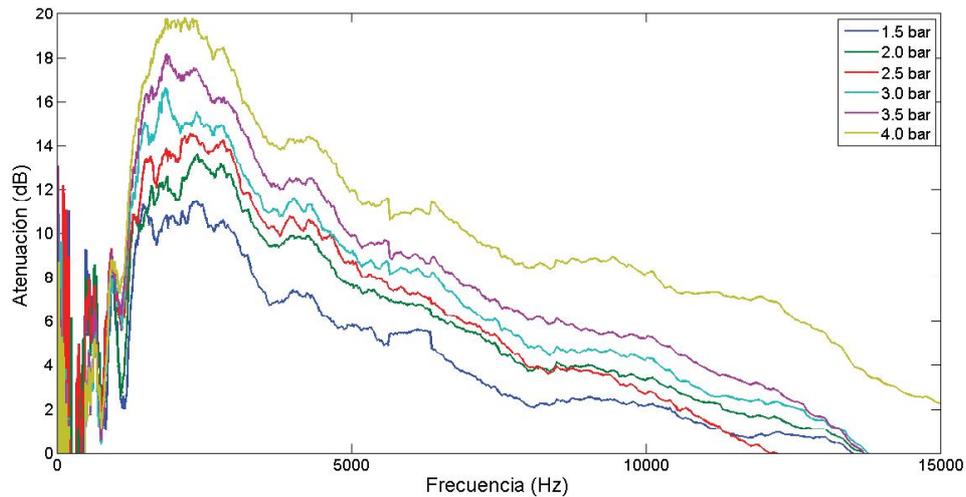


Figura 13. Atenuación de los difusores simples de tipo TP11004 a distintas presiones.

En las figuras anteriores 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 se incrementa 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).

Es posible justificar este razonamiento si se calcula la frecuencia teórica de resonancia para un medio con el espesor indicado, lo cual puede hacerse empleando la siguiente ecuación:

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

Siendo,

c, velocidad del aire (m/s)

L, espesor del medio (m)

Una vez obtenida la frecuencia teórica de resonancia debida al espesor de la capa de agua, se analiza, de forma visual, en qué punto de la Figura 8 se encuentra el máximo de atenuación, tras lo cual se puede afirmar que 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.

Además, es posible observar que la atenuación aumenta a medida que se incrementa la presión en el sistema, por lo que se puede deducir que la presión del agua en el sistema es una de las variables determinantes en el diseño del mismo.

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 (o *filling factor*). 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.

5.2. Comparación de los difusores simples, dobles y de aire inducido

Del mismo modo que en el ensayo descrito anteriormente, en el cual se pretendía estudiar la influencia de la presión en la atenuación sonora, 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 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 siguiente únicamente los resultados obtenidos a dicha presión.

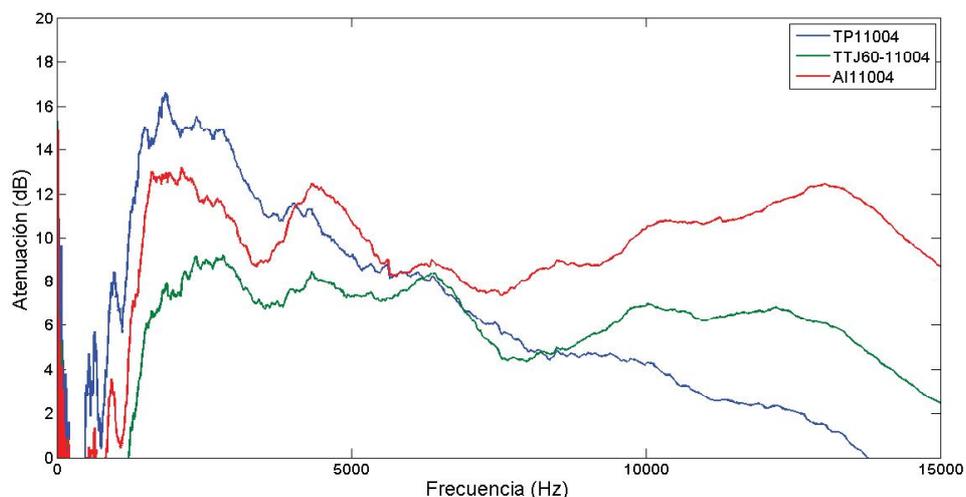


Figura 14. Comparación de la atenuación de los difusores simples, dobles y de aire inducido a la presión de 3,0 bar.

En la figura anterior se puede observar que la atenuación existente en los difusores de tipo simple y de aire inducido a bajas frecuencias es muy similar, siendo ligeramente superior la atenuación presente en los difusores simples.

El motivo de esta similitud 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 (de la misma forma que se ha descrito en el apartado 3.1).

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.

Al ver los datos introducidos en la Tabla 2, es posible apreciar que los difusores simples permiten obtener un tamaño de gota menor (entre 177 y 288 μm), mientras que los difusores de aire inducido utilizan tamaños de gota mayores (de 428 a 622 μm), además de ofrecer un mayor caudal.

Tras múltiples observaciones y 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 ensanchamiento del espectro de atenuación y, por tanto, al incremento de la atenuación sonora observable.

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.

Además, como otra posible explicación a este fenómeno, es necesario destacar que en uno de los trabajos desarrollados por Kandula se ha detectado que los procesos de relajación no-lineal de partículas son responsables, en gran medida, de la reducción en el coeficiente de absorción lineal a altas frecuencias [10].

5.3. Mediciones realizadas con combinación de difusores

En el ensayo descrito anteriormente se ha estudiado el poder de atenuación sonora de las gotas de agua generadas únicamente por un tipo de difusor, empleado de forma independiente del resto. Sin embargo, se ha considerado de especial interés estudiar el efecto derivado de la utilización, de forma simultánea, de dos tipos de difusores, interrumpiéndose de este modo la homogeneidad del sistema mediante el intercalado una capa en el centro del sistema cuyo tamaño de gota sería distinto al de los extremos del mismo.

Con este propósito, han sido utilizadas dos configuraciones distintas de difusores:

- 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.

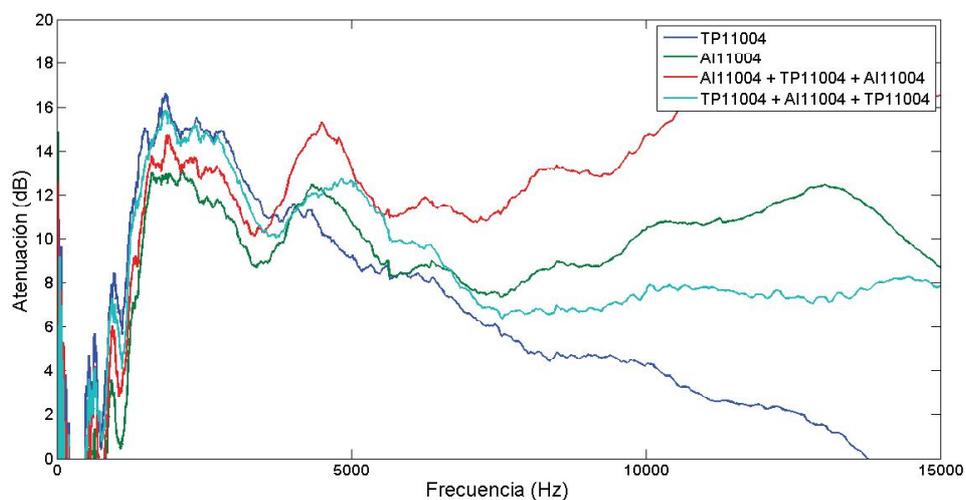


Figura 15. Comparación de la atenuación de distintas combinaciones de difusores a la presión de 3,0 bar.

Mediante las diferentes configuraciones empleadas es posible observar que, si bien es cierto que los niveles de atenuación sonora existentes a frecuencias bajas y medias (inferiores a 6000 Hz) son muy similares. El posible motivo de la similitud de la atenuación sonora entre los distintos tipos de difusores es el indicado en los dos casos anteriores, por lo que no se profundizará en la explicación.

Sin embargo, si se realiza un análisis de la atenuación sonora obtenida a frecuencias altas, es posible apreciar que, a partir de la frecuencia anteriormente citada, 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.

Esta combinación de difusores da lugar a una mayor heterogeneidad y, por consiguiente, a la existencia de mayores diferencias entre los medios que intervienen en el proceso de atenuación sonora.

Las gotas de agua obtenidas con los difusores de aire inducido contienen pequeñas burbujas de aire en su interior. Este hecho da lugar a que la tensión superficial existente

incremente la atenuación en un factor de 1.5 para cada incremento de tamaño de gota de 10^{-4} cm, reduciéndose dicho efecto a medida que aumenta el tamaño de gota [5].

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.

De este modo, la atenuación sonora frecuencias bajas y medias se vería influenciada por el espesor de la cortina de agua formada por los difusores, mientras que los demás factores citados afectarían a los niveles de atenuación a frecuencias altas.

6. Conclusiones

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

A continuación se exponen las conclusiones obtenidas tras el estudio de los resultados obtenidos en los diferentes ensayos:

Configuración de los difusores:

- La configuración de tipo AI11004+TP11004+AI11004, es decir, la 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. Por este motivo, es una configuración óptima si la fuente sonora que se pretende atenuar emite en un rango muy elevado de frecuencias.
- Si la fuente sonora emite principalmente a frecuencias bajas o medias (situadas entre 1500 y 3500 Hz), es conveniente la utilización de difusores de tipo simple (serie TP), ya que este tipo de difusores presenta un máximo de absorción en este rango de frecuencias.

Influencia de las variables:

- 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 frecuencia 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, si bien es cierto que esta línea de investigación es todavía muy joven y requiere de una gran cantidad de investigación, existe un gran potencial en ella y puede dar lugar al diseño y fabricación de dispositivos que faciliten la atenuación sonora de fuentes sonoras que emitan elevados niveles de presión sonora.

Además, es necesario destacar que el sistema de atenuación del sonido planteado en el presente trabajo no es un sistema excluyente, sino que puede ser combinado con otros sistemas como las barreras acústicas u otros elementos similares con el propósito de incrementar la reducción del ruido generado por una determinada fuente sonora, pudiendo ser considerada una nueva línea de investigación basada en el estudio del efecto derivado de la combinación de diversos elementos de atenuación sonora situados en serie.

7. Bibliografía

Referencias bibliográficas

- [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 Supression 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.

Normativa

Gran Bretaña. BS CEN/TS 1793-5:2003. Road traffic noise reducing devices – Test method for determining the acoustic performance – Part 5: Intrinsic characteristics – In situ values of sound reflection and airborne sound insulation.

Anexo. Script realizado con Matlab para el procesado de los datos

Dado que el patrón seguido por todos los *scripts* diseñados para el procesado de los datos obtenidos es el mismo, se adjunta únicamente uno de ellos, correspondiente con el procesado de los datos de los difusores de tipo simple:

```
[D1]=importdata('rf_6_spl.txt'); % Ruido de fondo
[D2]=importdata('ra_6_spl.txt'); % Ruido de la fuente sonora
[D3]=importdata('3.0_rb_am_simp_6_spl.txt'); % Ruido difusores TP11002
[D4]=importdata('3.0_am_simp_6_spl.txt'); % Registro global (TP11002)
[D5]=importdata('3.0_rb_az_simp_6_spl.txt'); % Ruido difusores TP11003
[D6]=importdata('3.0_az_simp_6_spl.txt'); % Registro global (TP11003)
[D7]=importdata('3.0_rb_rj_simp_6_spl.txt'); % Ruido difusores TP11004
[D8]=importdata('3.0_rj_simp_6_spl.txt'); % Registro global (TP11004)

C1=struct2cell(D1);
C2=struct2cell(D2);
C3=struct2cell(D3);
C4=struct2cell(D4);
C5=struct2cell(D5);
C6=struct2cell(D6);
C7=struct2cell(D7);
C8=struct2cell(D8);

C1=C1{: , 1};
C2=C2{: , 1};
C3=C3{: , 1};
C4=C4{: , 1};
C5=C5{: , 1};
C6=C6{: , 1};
C7=C7{: , 1};
C8=C8{: , 1};

f=C1(:,1); % Frecuencia (Hz)

% Nivel SPL

SPL1=[C1(1:1713,2); C1(1714:1742,2)-3; C1(1743:2048,2)];
SPL2=C2(:,2);
SPL3=C3(:,2);
SPL4=C4(:,2);
SPL5=C5(:,2);
SPL6=C6(:,2);
SPL7=C7(:,2);
SPL8=C8(:,2);

figure % Representación de la atenuación a frecuencias bajas y medias

plot(f,SPL2+SPL3-SPL1-SPL4,'y',f,SPL2+SPL5-SPL1-SPL6,'b',f,SPL2+SPL7-
SPL1-SPL8,'r')
legend('TP11002','TP11003','TP11004')
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('Atenuación (dB)')
axis([400 1000 0 10])
```

```
figure % Representación de la atenuación a todas las frecuencias

plot(f,SPL2+SPL3-SPL1-SPL4,'y',f,SPL2+SPL5-SPL1-SPL6,'b',f,SPL2+SPL7-
SPL1-SPL8,'r')
legend('TP11002','TP11003','TP11004')
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('Atenuación (dB)')
axis([0 15000 0 20])
```