

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCOLA POLITÈCNICA SUPERIOR DE GANDIA

Master en Ingeniería Acústica



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCOLA POLITÈCNICA
SUPERIOR DE GANDIA

“Comparativa de métodos de cuantificación de difusores”

TRABAJO FINAL DE MASTER

Autor/a:
Salvador Martín Oviedo

Tutor/a:
Redondo, Javier

GANDIA, 2020

Resumen:

Este trabajo pretende realizar un análisis sistemático comparativo de diferentes métodos y parámetros de cuantificación de la eficiencia de los difusores de sonido. Para ello se realizará una serie de simulaciones mediante métodos de elementos de contorno (conocido como BEM por sus siglas en inglés) para poder conseguir los valores de los cuatro parámetros más representativos. Asimismo, se podrá estimar cual de estos parámetros tiene una mayor correlación con la reducción del sonido reflejado en una dirección particular.

Palabras clave: Panel difusor, coeficiente de dispersión, coeficiente de difusión, campo libre.

Abstract:

This work aims to carry out a systematic comparative analysis of different methods and parameters of quantifying the efficiency of sound diffusers. For this, a series of simulations will be carried out using Boundary Element Methods (BEM) in order to obtain the values of the four most representative parameters. Likewise, it will be possible to estimate which of these parameters has a higher correlation with the reduction of reflected sound in a particular direction.

Key words: Diffuser panel, scattering coefficient, diffusion coefficient, free field.

Índice:

Resumen:	1
Abstract:	2
1. Introducción	1
1.1. <i>Objetivos</i>	1
1.2. <i>Metodología</i>	2
1.3. <i>Plan de trabajo</i>	3
2. Principios básicos	4
2.1. <i>Reflexión acústica</i>	4
2.2. <i>Absorción acústica</i>	4
2.3. <i>Difusión acústica</i>	4
3. Tipos de difusores	5
3.1. <i>Difusores policilíndricos:</i>	5
3.2. <i>Difusores de fase o de Schroeder:</i>	6
3.2.1. <i>Difusores MLS:</i>	6
3.2.2. <i>Difusores QRD:</i>	7
3.2.3. <i>Difusores PRD:</i>	12
4. Métodos de caracterización de difusores	13
4.1. <i>Método 1: ISO 17497-2</i>	13
4.1.1. <i>Proceso Medición</i>	14
4.1.2. <i>Cálculos (expresión de resultados)</i>	18
4.2. <i>Método 2: Método de Mommertz y Vorländer (campo libre)</i>	19
4.2.1. <i>Proceso Medición</i>	21
5. Simulación BEM	23
5.1. <i>Simulación método 1: ISO 17497-2</i>	25
5.2. <i>Simulación método 2: Método de E. Mommertz y M. Vorländer (campo libre)</i>	27
5.3. <i>Otros coeficientes</i>	29
5.3.1. <i>Coficiente de difusión energético</i>	29
5.3.2. <i>Coficiente de difusión de autocorrelación</i>	30
5.3.3. <i>Coficiente de difusión equivalente (d_{SPL})</i>	31
6. Análisis de resultados	32
6.1. <i>Método de análisis</i>	32
6.2. <i>Análisis coeficiente d_{SPL}</i>	33
6.3. <i>Análisis coeficiente de difusión direccional ($d_{ISO1749-2}$)</i>	38
6.4. <i>Análisis de los coeficientes $d_{energético}$, $d_{autocorrelación}$ y d_{MV}</i>	41

7. Conclusiones	43
8. Bibliografía.....	44

1. Introducción

1.1. Objetivos

Lo que se pretende conseguir con este Trabajo Final de Máster (TFM) es estudiar y comparar los diferentes métodos de caracterización del coeficiente de scattering (dispersión). Mediante una función desarrollada con el software Matlab basada en el método de elementos de contorno o BEM (Boundary Element Methods) se realizan una serie de simulaciones a partir de dos métodos de medida.

El primer método se basa en la norma ISO-17497-2¹, que consiste en la colocación de una fuente y una serie de micros situados en forma de arco con dirección a la muestra realizando medidas discretas del sonido directo y el reflejado.

El segundo método, creado por Eckard Mommertz² y Michael Vorländer³, se basa en que el sonido reflejado de manera difusa es incoherente respecto a la señal incidente, que es justamente lo contrario a un sonido reflejado de forma coherente. A partir de aquí utilizan una base rotatoria donde se coloca la muestra, un micro y una fuente, consiguiendo así, que se evalúe de forma continua el elemento difusor.

Ambos métodos están diseñados para realizarlos en un ambiente anecoico o campo libre, algo imprescindible para poder utilizar la herramienta de simulación. Con estos métodos obtendremos parámetros como el coeficiente de dispersión direccional (scattering uniformity coefficient), el coeficiente de dispersión de incidencia aleatoria, el coeficiente de dispersión de autocorrelación (autocorrelation scattering coefficient), el coeficiente de difusión energético y un parámetro que se desarrolla en este trabajo al que denotamos como d_{SPL} . Finalmente, se realizarán una serie de comparaciones y análisis de estos parámetros para tener un amplio estudio de las diferencias que existen entre ellos y qué ventajas pueden aportar cada uno de ellos.

¹ N. del A.: ISO-17497-2 (2012), especifica un método para medir el coeficiente de difusión direccional de superficies.

² N. del A.: Eckard Mommertz, autor del libro Acoustics and Sound Insulation.

³ N. del A.: Michael Vorländer, jefe del departamento en el Institute of Technical Acoustics de RWTH Aachen University.

1.2. Metodología

Tomando como punto de referencia los objetivos anteriormente citados, hemos establecido una metodología de trabajo que nos permite dividir las tareas en las siguientes secciones:

- I. Estudio y documentación de los diferentes métodos de cuantificación del coeficiente de dispersión que existen en la actualidad.
- II. Conocer los parámetros más significantes que se pueden obtener partiendo de los métodos estudiados anteriormente.
- III. Elegir e implementar los métodos de medida que se van a simular con la aplicación desarrollada a partir del software Matlab.
- IV. Analizar los métodos de medida elegidos con el objetivo de obtener los parámetros fundamentales para la caracterización de difusores.
- V. Obtención de los resultados simulados con la finalidad de llegar a una conclusión a través de la comparación de los parámetros obtenidos en los métodos de medida.

1.3. Plan de trabajo

Para llevar a cabo este proyecto hemos realizado un Plan de Trabajo que nos facilita la comprensión y nos permite organizar el tiempo empleado en el desarrollo del proyecto:

Actividad realizada	Tiempo empleado
Estado del arte	60 horas
Adaptación del código de simulación en BEM	90 horas
Simulaciones y análisis de resultados	100 horas
Redacción	50 horas

Tabla 1 - Plan de trabajo.

- **Estado del arte:** Consiste en la investigación documental que existe sobre el área de caracterización de difusores y, de este modo, se logra enfocar el proyecto de una forma específica.
- **Adaptación del código de simulación en BEM:** Se adapta el código de la función utilizada en Matlab para lograr simular los métodos de medida.
- **Simulaciones y análisis de resultados:** Una vez adaptado el código, se almacenan todos los datos de la simulación para realizar los cálculos pertinentes para la obtención de los parámetros y su posterior análisis.
- **Redacción:** Se redacta la memoria con sus diferentes puntos para plasmar de forma documental el trabajo realizado.

2. Principios básicos

2.1. Reflexión acústica

Llamamos reflexión sonora a un fenómeno que ocurre en las ondas sonoras. Este fenómeno consiste en que una onda, al encontrarse con una superficie, parte de su energía se transmite por el material de la superficie y la otra parte rebota en otra dirección. Como parte de la onda incidente se pierde al entrar en contacto con la superficie, la onda reflejada siempre tendrá menor presión que la onda incidente. En un caso ideal, donde la superficie es perfectamente lisa y con unas dimensiones mayores a la longitud de onda emitida, las ondas sonoras se basan en la hipótesis de las reflexiones especulares, donde el ángulo de la onda emitida sobre la superficie es igual al ángulo de la onda reflejada sobre la superficie.

2.2. Absorción acústica

La absorción sonora consiste en la disipación en forma de calor de una parte de la energía de una onda sonora cuando ésta entra en contacto con algún tipo de materia.

Esta variación de energía depende de la intensidad de la onda, la distancia recorrida y las características del medio por la que es transmitida. El parámetro utilizado para cuantificar este fenómeno es el coeficiente de absorción (α). Este coeficiente define el grado de absorción de un material cualquiera, definiendo la relación entre la energía absorbida por dicho material y la energía incidente en el material.

$$\alpha = \frac{\text{Energía absorbida}}{\text{Energía incidente}} \quad (1)$$

2.3. Difusión acústica

La difusión del sonido hace referencia al fenómeno acústico que sucede cuando una onda incide sobre una superficie irregular y ésta es reflejada en diferentes direcciones. Esto se produce cuando las dimensiones del objeto son comparables a la longitud de onda del sonido incidente. En la *figura 1* se muestra una comparación entre comportamientos de ondas sonoras reflejadas según el tipo de material.

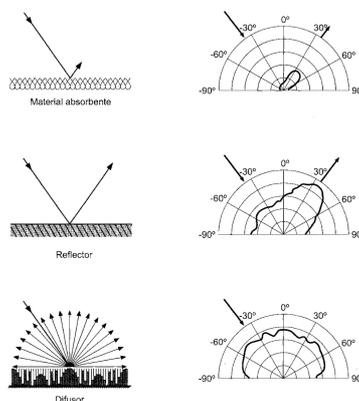


Fig. 1 - Comportamiento de las ondas sonoras según material.

3. Tipos de difusores

Los difusores son elementos diseñados para dispersar en múltiples direcciones y de forma uniforme la energía sonora incidente. Son utilizados frecuentemente en salas de concierto y estudios de grabación.

El uso de este tipo de material consigue elevar el grado de espacialidad del sonido mejorando la valoración subjetiva de la sala. También consigue mitigar anomalías indeseables como coloraciones, desplazamiento de fuente sonora, ecos o focalizaciones del sonido.

Cuando hablamos de salas de conciertos, los difusores proporcionan unas características bastante importantes, ya que consiguen dispersar la energía del campo reverberante de forma que a la audiencia le llega desde todas las direcciones, creando un efecto envolvente en el sonido y una sensación espacial más agradable.

En estudios de grabación también es interesante utilizar este tipo de material, ya que se necesita una reverberación muy controlada, debido a que será captada por micros donde ésta es más notoria. Hay que tener en cuenta que el tamaño de la sala influye en su efecto, puesto que el oyente debe estar a una distancia determinada para conseguir buenos resultados. Esta distancia está relacionada con la longitud de onda de la frecuencia mínima de trabajo (entendiendo que tienen un rango frecuencial útil limitado), de forma que, debe ser el triple de esta longitud de onda; por ejemplo: si la frecuencia mínima de trabajo del difusor es de 300Hz, entonces la longitud entre nosotros y el difusor ha de ser, como mínimo, de 3,4 metros, para conseguir efectos positivos.

Existen diferentes tipos de difusores según su construcción, a continuación, se muestran los diferentes tipos que podemos encontrar:

3.1. *Difusores policilíndricos:*

Los difusores policilíndricos consisten en una superficie lisa, normalmente de madera, de una curvatura convexa y un radio de curvatura de 5 metros o inferior, normalmente dispuestas secuencialmente. Como explicamos en el apartado anterior, un reflector curvo convexo ya no consigue focalizar las reflexiones en una zona determinada con un radio de curvatura menor de 5 metros. Puesto que dispersa tanto las reflexiones que el nivel de éstas se ve reducido en un grado que ya no podemos considerar *refuerzo*. Por tanto, el *reflector* se considera *difusor*.



Fig. 2 - Difusor policilíndrico.

3.2. Difusores de fase o de Schroeder:

Estos difusores tienen su origen en la teoría de los números desarrollada por el investigador Manfred R. Schroeder⁴, basadas en distintas secuencias matemáticas previamente fijadas. Son principalmente construidos en madera y, generalmente, reciben el nombre de RPG (“Reflection Phase Grating”). Existen varios tipos de difusores RPG, los más utilizados son los difusores MLS, los QRD y los PRD.

3.2.1. Difusores MLS:

Los difusores MLS (“Maximum Length Sequence”) están basados en unas secuencias pseudoaleatorias periódicas, denominadas *de longitud máxima* o *de Galois*, las cuales solo pueden tener dos valores: +1 o -1.

Este difusor está formado por una base lisa y reflectante, normalmente de madera, y se divide en espacios de la misma anchura, creando ranuras de igual profundidad. En cada tramo se asigna un valor de secuencia pseudoaleatoria en consecuencia al siguiente procedimiento:

Si el valor es -1, el espacio de la superficie no es alterado.

Si el valor es +1, se crea una ranura en este espacio.

La anchura y la profundidad de cada tramo son fijos con relación a la longitud de onda de la frecuencia, correspondiente al diseño del difusor. Así pues, se obtiene a partir de:

$$W = \frac{\lambda}{2} \quad (2)$$

$$d = \lambda/4 \quad (3)$$

donde:

W = anchura de cada tramo.

d = profundidad de cada ranura.

λ = longitud de onda correspondiente a la frecuencia de diseño.

El margen de difusión óptima de este tipo de difusores es de tan solo una octava. Esto se puede comprobar en la *figura 3*, donde se observa que en la frecuencia correcta se consigue una difusión adecuada. Sin embargo, si incrementamos la frecuencia al doble, aumentando una octava, se observa que la reflexión especular es claramente dominante, incluso llegando a ser idéntica a la reflexión en una superficie lisa (*figura 4*).

⁴ N. del A.: Manfred R. Schroeder, físico alemán conocido por sus aportaciones en el campo de la acústica.

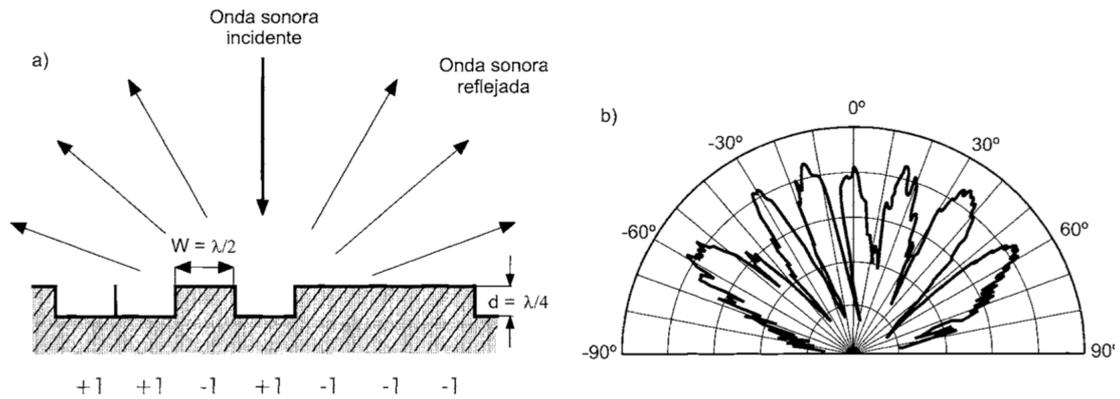


Fig. 3 - a) Difusor MLS; b) Diagrama de difusión.

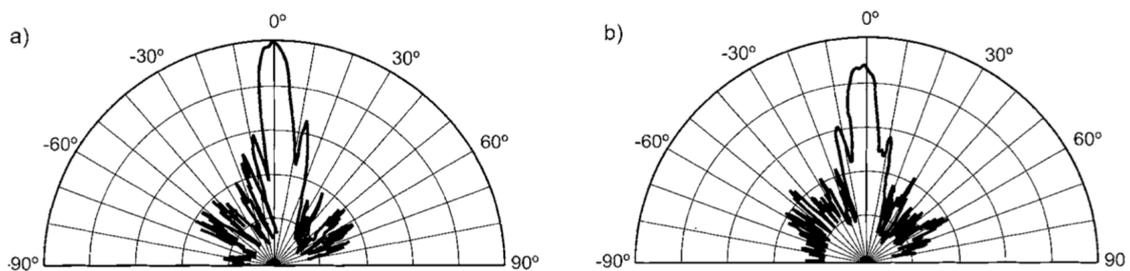


Fig. 4 - a) Difusión de una onda con el doble de frecuencia para la cual fué diseñado; b) reflexion de superficie plana.

Este tipo de difusores no tienen ninguna repercusión en las bajas frecuencias, en lo que a absorción se refiere y, por tanto, se puede utilizar en mayores porcentajes de superficie sin que ello suponga una disminución del tiempo de reverberación, algo que puede ocurrir con los difusores tipo QRD y PRD.

3.2.2. Difusores QRD:

Existen dos tipos de difusores QRD ("Quadratic-Residue Diffusor"), los unidimensionales y los bidimensionales:

Los difusores unidimensionales QRD:

Estos difusores consisten en una serie de ranuras en paralelo de formas rectangulares y equidistantes; sin embargo, tienen diferente profundidad. Estas ranuras están separadas por divisores delgados y rígidos. Para conocer la profundidad de cada ranura debemos tener en cuenta una secuencia matemática prefijada que da lugar a patrones periódicos. Esto produce una dispersión en un margen de frecuencias, en planos perpendiculares a dichas ranuras.

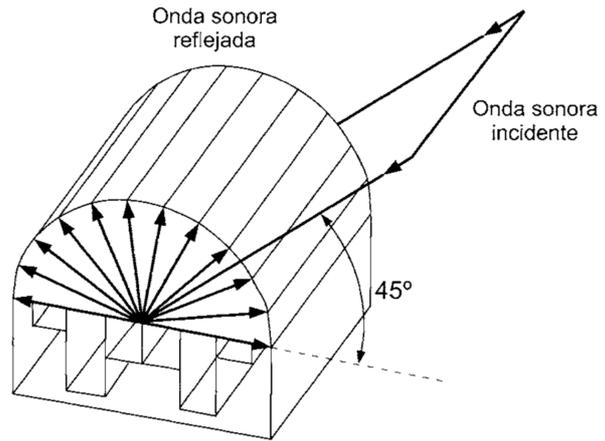


Fig. 5 - Difusor QRD.

La secuencia se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$S_n = n^2 \text{ mod } p \quad (4)$$

donde:

p = número primo.

n = número entero que va desde 0 hasta $p-1$.

mod = operación matemática de módulo, cada valor de s_n se obtiene como el residuo del cociente entre n^2 y p (de ahí el nombre de difusor de residuo cuadrático).

A continuación, se muestra un ejemplo de secuencia para $p=7$:

n	0	1	2	3	4	5	6
n^2	0	1	4	9	16	25	36
S_n	0	1	4	2	2	4	1

Tabla 2 - Secuencia para difusor QRD con $p=7$.

Si comparamos los perfiles de patrones con diferente número de ranuras, podemos observar una similitud en el diseño, además de simetría en cada una de éstas. En la figura 6 se observa claramente lo mencionado anteriormente:

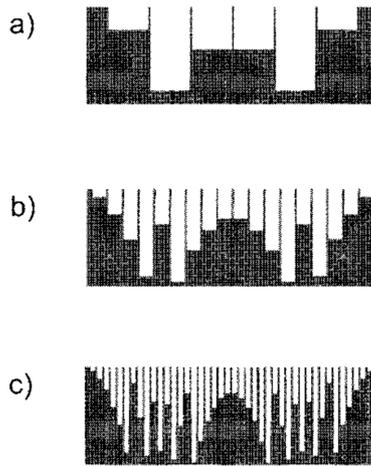


Fig. 6 - Perfiles de difusores unidimensionales QRD: a) $p=7$; b) $p=19$; c) $p=43$.

Podemos determinar la anchura de las ranuras a partir de:

$$W = \frac{c}{2f_{max}} - T \quad (5)$$

donde:

W = anchura de las ranuras (en mm).

c = velocidad de propagación del sonido (en mm/s).

T = espesor de los divisores.

f_{max} = frecuencia máxima para la cual se desea una óptima difusión.

El número de ranuras por periodo se obtiene a partir de:

$$p = \frac{2 m_{max} f_{max}}{f_0} \quad (6)$$

Donde:

p = número de ranuras por periodo

m_{max} = grado de difusión a la frecuencia f_0 (habitualmente $m_{max}=2$).

f_0 = frecuencia de diseño (frecuencia mínima para la cual la difusión es óptima).

f_{max} = frecuencia máxima para la cual se desea una óptima difusión.

La profundidad de las ranuras las obtenemos a partir de:

$$d_n = \frac{S_n c}{2p f_0} \quad (7)$$

Donde:

d_n = es la profundidad de cada ranura.

S_n = es el resto del cociente entre n^2 y p .

c = velocidad de propagación del sonido (en mm/s).

f_0 = frecuencia de diseño (frecuencia mínima para la cual la difusión es óptima).

Deducimos de todo lo anterior que este tipo de difusor se centra en la elección de cierto rango de frecuencias que dependen de la profundidad, el número de ranuras y la anchura de éstas. Existe un límite en la relación entre la máxima profundidad de las ranuras y su anchura, ya que se ha demostrado que las ranuras con mucha profundidad y estrechas producen un efecto excesivo de absorción acústica; de forma que el margen de difusión óptima queda restringido en unas 3 octavas.

Los difusores bidimensionales QRD:

A diferencia de los difusores QRD unidimensionales, los difusores QRD bidimensionales consiguen una óptima difusión del sonido incidente hacia todas las dimensiones del espacio. En este tipo de difusor se sustituyen las ranuras por pozos con profundidades variables y están dispuestos en paralelo, formando normalmente un cuadrado.



Fig. 7 - Difusor QRD bidimensional.

En vez de tener una dispersión en planos perpendiculares a las ranuras de los difusores QRD unidimensionales, indica las direcciones de máxima energía localizadas sobre una superficie semiesférica.

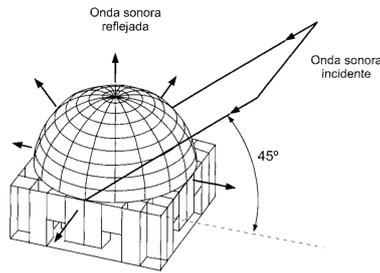


Fig. 8 - Difusión producida por difusor bidimensional QRD.

La expresión para obtener la secuencia de los difusores bidireccionales es muy similar a la de los unidimensionales, con la única salvedad de que hay que considerar las dos dimensiones para obtener las profundidades de las cavidades:

$$s_{m,n} = (m^2 + n^2) \text{ mod } p \quad (8)$$

Donde:

p = número primo.

m y n = número entero que va desde 0 hasta $p-1$.

A modo de ejemplo podemos observar una tabla correspondiente a las profundidades de cada pozo con un número $p=7$:

m/n	0	1	2	3	4	5	6
0	0	1	4	2	2	4	1
1	1	2	5	3	3	5	2
2	4	5	1	6	6	1	5
3	2	3	6	4	4	6	3
4	2	3	6	4	4	6	3
5	4	5	1	6	6	1	5
6	1	2	5	3	3	5	2

Tabla 3 - Secuencia para difusor QRD bidimensional con $p=7$.

Igual que en el caso de los difusores unidimensionales, la profundidad real de los pozos se obtiene multiplicando los valores de la secuencia adimensional por el mismo factor que en los difusores unidimensionales.

En salas de grandes volúmenes no se suelen utilizar este tipo de difusores, pero son bastante frecuentes en estudios de grabación.

3.2.3. Difusores PRD:

Este tipo de difusores son muy similares a los difusores QRD unidimensionales, con la única diferencia de que la profundidad de las ranuras se alcanza mediante una secuencia distinta. Dicha secuencia se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$s_n = g^n \text{ mod } p \quad (9)$$

Donde:

p = número primo.

n = número entero que va desde 1 hasta $p-1$.

g = raíz primitiva de p .

mod = "modulo" operación matemática.

A modo de ejemplo, en la *tabla 4* se muestra la secuencia que se obtiene con $g=3$ y $p=7$.

n	1	2	3	4	5	6
g^n	3	9	27	81	243	729
$S_n=g^n \text{ mod } 7$	3	2	6	4	5	1

Tabla 4 - Secuencia para difusor PRD con $g=3$ y $p=7$.

En la *figura 9* se ve una imagen correspondiente a un perfil de un difusor PRD con $g=2$ y $p=11$, como se observa en la imagen, ya no existe simetría en cada periodo.

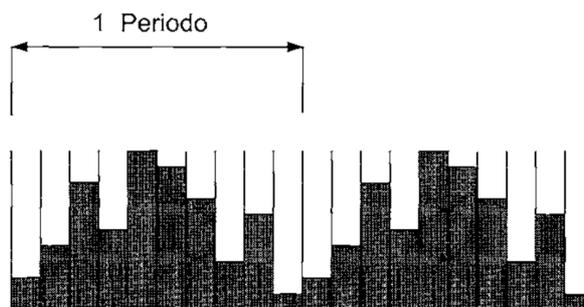


Fig. 9 - Perfil difusor PRD con $g=2$ y $p=11$.

Las propiedades de difusión entre los difusores unidimensionales QRD y los PRD son muy parecidas, salvo que en los difusores PRD la energía asociada a la reflexión especular, reflexión que toma el mismo camino que la onda incidente, es realmente baja. Se puede observar en el siguiente diagrama que representa la respuesta de un difusor PRD.

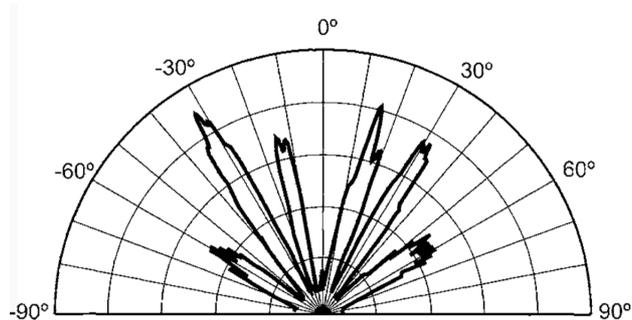


Fig. 10 - Diagrama de difusión de difusor PRD.

4. Métodos de caracterización de difusores

En general existen muchos problemas acústicos que necesitan de conocimientos sobre la difusión del sonido en superficies irregulares, no solo en acústica de salas, sino también en otros campos, como pueden ser, la caracterización del fondo marino o las barreras acústicas en carreteras. En este trabajo vamos a analizar dos métodos de medida, el método desarrollado por Mommertz y Vorländer, en campo libre y el método descrito en la norma ISO17497-2. Estos métodos están desarrollados para obtener dos parámetros relacionados con la dispersión del sonido, el coeficiente de difusión de incidencia aleatoria (δ) y el coeficiente de difusión direccional (d). Mientras que el coeficiente de difusión δ define el grado de sonido disperso, el coeficiente de difusión d describe la uniformidad direccional de la dispersión.

4.1. Método 1: ISO 17497-2

Este método, incluido en la ISO 17497, aborda la medición y caracterización de superficies con propiedades difusoras para finalmente obtener el coeficiente de difusión direccional (directional diffusion coefficient). El coeficiente de difusión direccional caracteriza el sonido reflejado en una superficie con propiedades difusoras en términos de uniformidad direccional, es decir, cuantifica como se distribuye espacialmente la energía acústica reflejada en la superficie. Esta parte de la ISO 17497 consiste en un método de medida que requiere un ambiente anecoico o campo libre.

4.1.1. Proceso Medición

Como se ha explicado anteriormente, el coeficiente de difusión representa cómo se distribuye espacialmente la energía reflejada. Esto se consigue mediante respuestas polares de niveles de presión acústica. Utilizando una fuente sonora para irradiar la muestra y un número finito de micrófonos, colocados en forma de semicírculo hacia la muestra, podemos obtener el coeficiente de difusión a partir de las señales captadas por los transductores (*figura 11*).



Fig. 11 - Medición según ISO 17497-2.

Según dictan las normas *ISO 266*⁵ y la *IEC 61260*⁶, las mediciones se realizan en bandas de tercios de octavas que cubran de 100 a 5000 Hz para escala completa. Si las mediciones se realizan con una muestra con factor de escala N, el rango de frecuencias a cubrir será de 100xN Hz a 5000xN Hz.

⁵ N. del A.: ISO 266 (1998). *Acústica, frecuencias preferentes.*

⁶ N. del A.: IEC 61260 (2017). *Electroacústica. Filtros de banda de octava y de bandas de una fracción de octava.*

Este método de medida está diseñado para realizarse en un ambiente anecoico. Se puede utilizar una cámara anecoica calificada para este tipo de estudios (coeficiente de absorción superior a 0,997) o, en su lugar, un espacio no anecoico pero lo suficientemente grande para simular un ambiente de campo libre. De esta forma las reflexiones ajenas a la muestra no interactúan con la señal que se está evaluando. Otra manera de realizar esta medición en un ambiente no anecoico es mediante las mediciones de contorno bidimensional (*figura 12*).

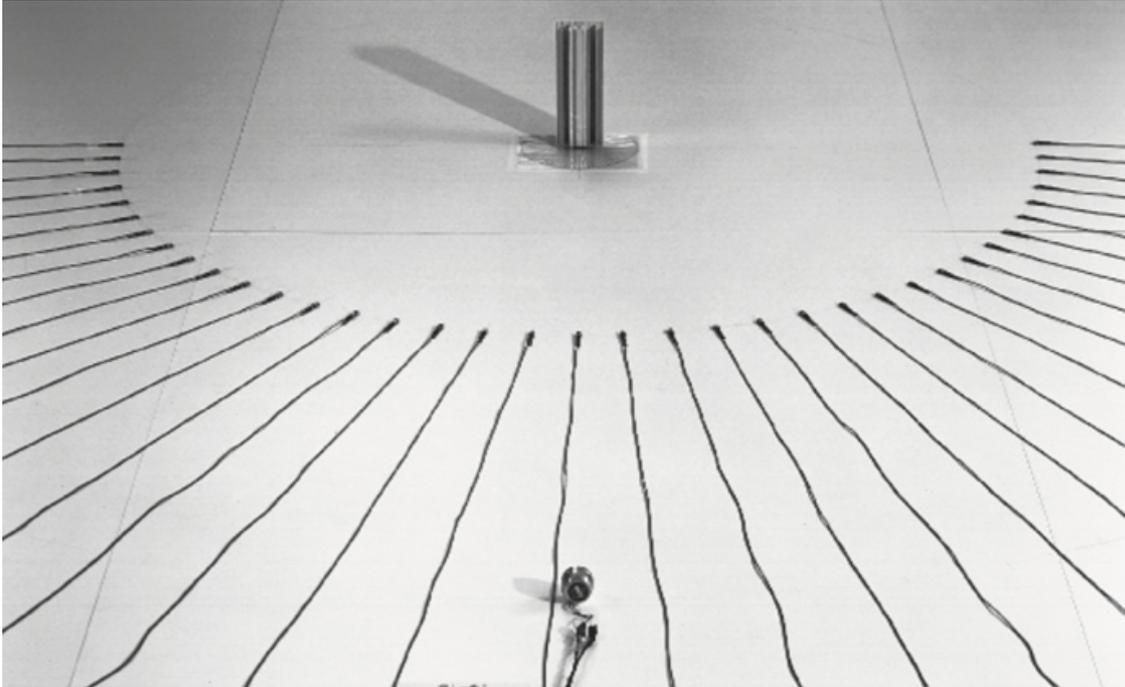


Fig. 12 – Medición de contorno bidimensional.

Para lograr unas condiciones aproximadas de campo lejano debe haber al menos el 80% de los receptores fuera de la zona especular. La resolución angular de los receptores ($\Delta\varphi$) no puede superar los 5 grados, ya sea mediante un sistema discreto de posiciones de micro o un sistema de movimiento continuo.

Para poder obtener el coeficiente de difusión de incidencia aleatoria, se aconseja hacer las mediciones para los ángulos de las posiciones de fuente (θ) en $0, \pm 30^\circ$ y $\pm 60^\circ$, en el caso de usar la técnica de contorno bidimensional.

Finalmente, para poder asegurar que la difracción, debida a la rugosidad de la superficie y los efectos de bordes, se caracterice correctamente, se debe probar la estructura completa de la muestra. Para superficies de estructura periódica se deben incluir, al menos, tres secuencias completas; de esta forma, aseguramos que los efectos lobulares de la muestra se acerquen en mayor medida a la realidad.

El procedimiento que se sigue para realizar la medición reside en lo siguiente:

Para medir la respuesta polar de magnitud se utilizan técnicas de función de transferencia a partir de mediciones de respuesta al impulso, FFT, barrido frecuencial o MLS. La fuente que produce la señal debe tener una cobertura lo suficientemente ancha como para que le permita cubrir toda la superficie de prueba, de forma que simule una fuente omnidireccional. A esta fuente se le permite una tolerancia de $\pm 2\text{dB}$ de magnitud

y $\pm 20^\circ$ de fase y a los receptores, aparte de tener la misma sensibilidad, se les permite una tolerancia de ± 1 dB de magnitud y $\pm 10^\circ$ en fase.

Para cada par de fuente-receptor se realizan las siguientes mediciones:

$h_1(t)$: Respuesta al impulso con la superficie difusora.

$h_2(t)$: Respuesta al impulso con una superficie plana.

Se mide la respuesta al impulso de forma que las reflexiones procedentes de la muestra puedan aislarse de todas las demás interacciones. Para ello, se resta h_2 de h_1 , logrando así eliminar las reflexiones ajenas a la muestra.

El aislamiento de las reflexiones de las muestras se consigue enventanando la respuesta al impulso con una ventana rectangular, donde tiene ganancia unidad en la zona que se encuentran las reflexiones de la muestra y ceros en el resto. Esto elimina las reflexiones residuales con una cierta separación temporal de las reflexiones a evaluar. El método más recomendado para determinar la ubicación y el tamaño de la ventana consiste en la inspección visual de la respuesta al impulso.

Dentro de la ventana de la respuesta al impulso se debe obtener, al menos, una relación señal/ruido de 40 dB con la superficie plana de referencia. Esta relación se puede obtener a partir de la siguiente ecuación:

$$10 \log \left\{ \frac{\int_T [h_1(t) - h_2(t)]^2 dt}{\int_T [h_2^2(t)] dt} \right\} dB \quad (20)$$

Donde T es el tamaño de la ventana rectangular.

En la siguiente imagen se muestra una figura donde se realiza una transformación de Fourier a cada señal que se ha enventanado, obteniendo así el nivel en decibelios de cada tercio de octava, denotado como L_i , donde i hace referencia a la i -ésima posición de receptor.

Para entender mejor los pasos del método, podemos estudiar de forma visual el proceso de captación y procesado de las señales para finalmente obtener el coeficiente de difusión direccional d_θ .

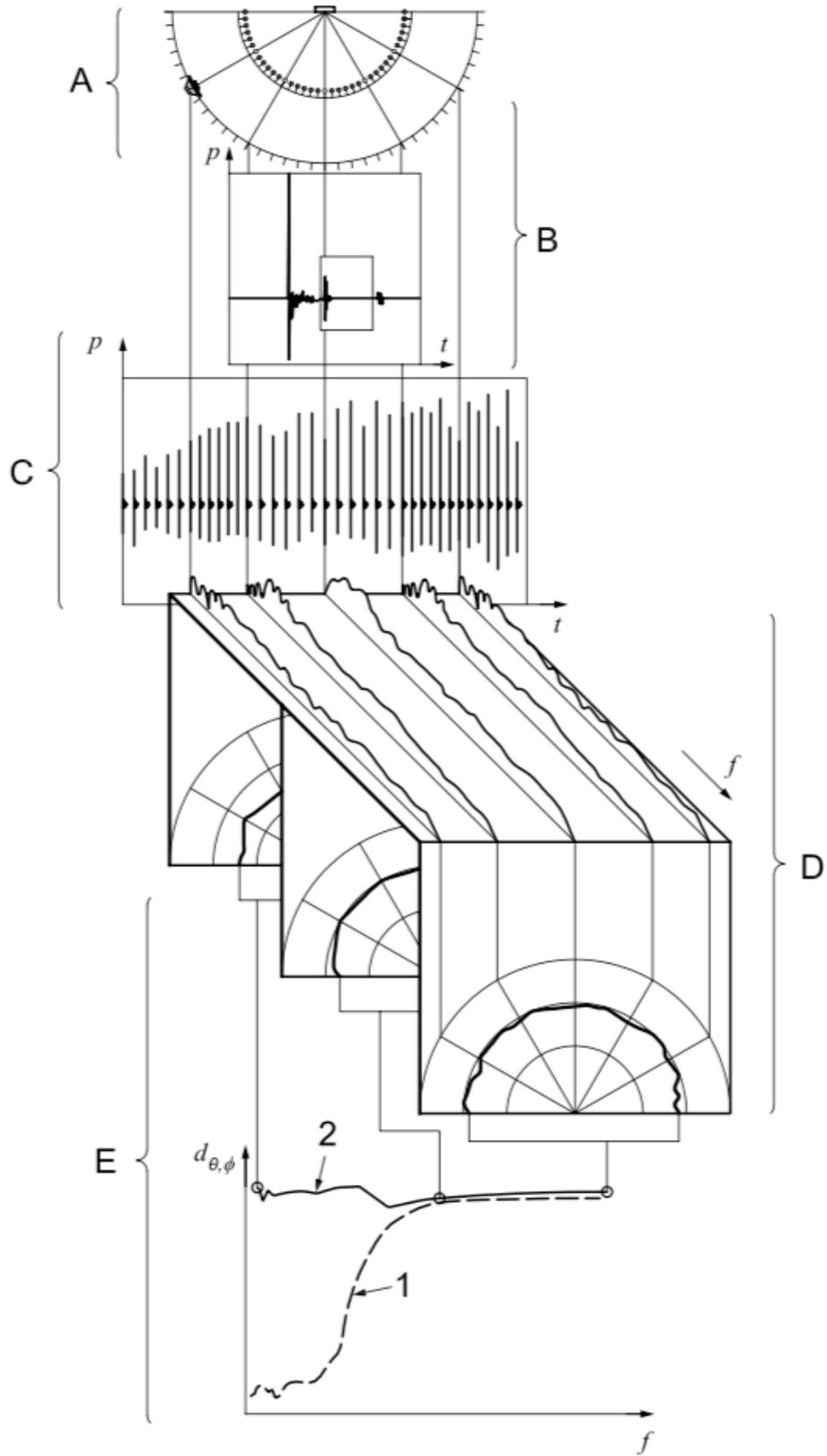


Fig. 13 – Proceso de extracción del coeficiente de difusión a partir de la respuesta al impulso.

4.1.2. Cálculos (expresión de resultados)

Una vez se tienen los niveles de presión L_i , se calcula el coeficiente de difusión direccional (d_θ) para una sola posición de fuente, utilizando la *ecuación 11*:

$$d_\theta = \frac{(\sum_{i=1}^n 10^{L_i/10})^2 - \sum_{i=1}^n (10^{L_i/10})^2}{(n-1) \sum_{i=1}^n (10^{L_i/10})^2} \quad (31)$$

Donde n es el número de receptores y L_i el nivel de presión sonora recibido por el receptor.

Para normalizar el coeficiente de difusión direccional a una superficie plana de referencia se usa la *ecuación 12*:

$$d_{\theta,n} = \frac{d_\theta - d_{\theta,r}}{1 - d_{\theta,r}} \quad (42)$$

Donde $d_{\theta,r}$ es el coeficiente de difusión direccional de una superficie plana de referencia.

Finalmente, para obtener el coeficiente de difusión de incidencia aleatoria (d) se promedian cada coeficiente de difusión direccional, normalizado o no, sobre todas las fuentes medidas.

Para las mediciones bidimensionales, la ponderación varía en cada fuente según su ángulo, de forma que para la fuente a 0° tendrá un peso de 1, y las otras cuatro posiciones ($\pm 30^\circ$ y $\pm 60^\circ$) tienen un peso de 3.

$$d = \frac{d_{\theta,0^\circ} \cdot 1 + d_{\theta,-30^\circ} \cdot 3 + d_{\theta,30^\circ} \cdot 3 + d_{\theta,-60^\circ} \cdot 3 + d_{\theta,60^\circ} \cdot 3}{13} \quad (53)$$

4.2. Método 2: Método de Mommertz y Vorländer (campo libre)

A diferencia del coeficiente de difusión direccional descrito anteriormente, el coeficiente de dispersión (*scattering*) se define como la relación entre la energía del sonido reflejado no especular y la energía total. Es decir, no incluye ninguna información relacionada con la directividad del sonido disperso. Sin embargo, con este dato, mediante la ley de coseno de Lambert se puede expresar la distribución de la energía direccional para métodos de predicción de acústica de salas.

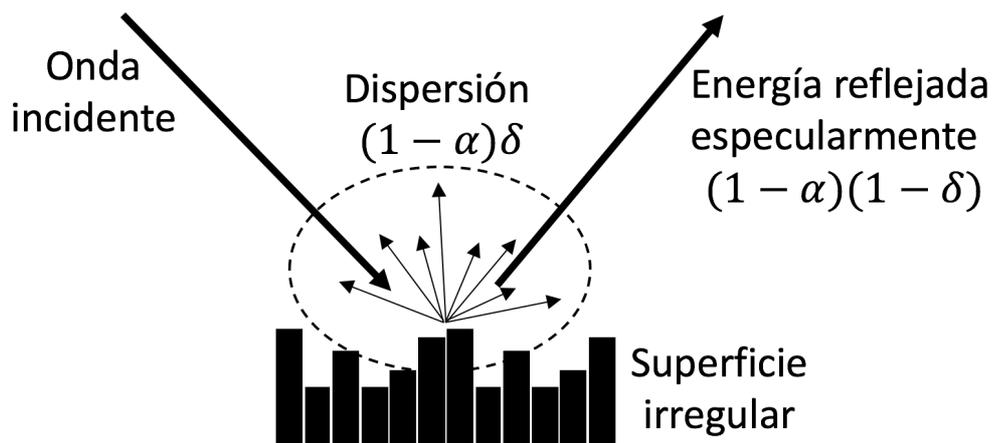


Fig. 14 – Dispersión producida por una superficie corrugada.

El principio de este método se puede estudiar mejor si se analiza el efecto de reflexión y dispersión en el dominio del tiempo. Como ejemplo, en la *figura 15* se observan tres pulsos que se reflejaron en una superficie difusora para diferentes orientaciones de la muestra. Vemos que la parte inicial tiene muy buena correlación y, sin embargo, al acercarnos a la parte posterior se va perdiendo la fase como consecuencia, principalmente, de la orientación específica.

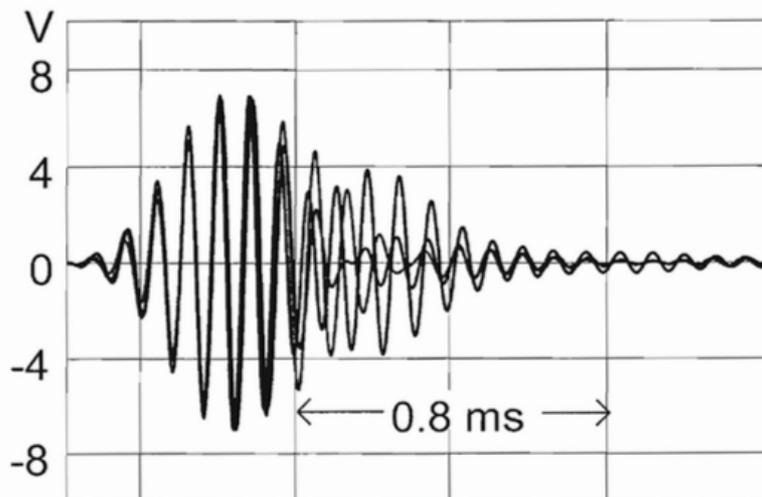


Fig. 15 – Pulso reflejado obtenido con diferentes orientaciones de la muestra.

Esto es debido a que la primera parte de la reflexión toma el camino con menos retraso, como explica el principio de Fermat. En la *figura 16* se observa que la parte coherente es idéntica a la componente especular y la parte de la cola contiene energía dispersa de los pulsos reflejados.

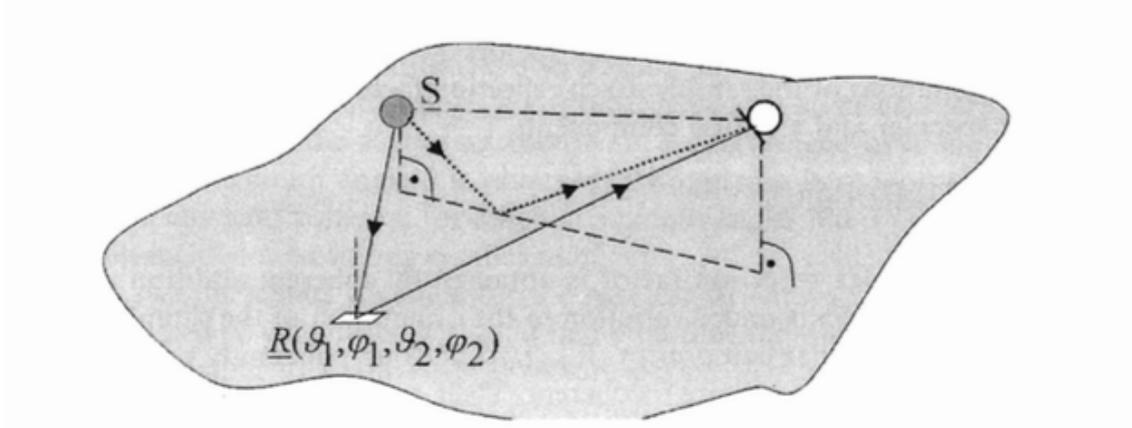


Fig. 16 – Principio de Fermat.

Las energías de los pulsos, normalizadas respecto a una reflexión de un plano rígido de referencia, se expresan de la siguiente forma:

$$E_{spec} = (1 - \alpha)(1 - \delta) = (1 - a) \quad (64)$$

$$E_{total} = (1 - \alpha) \quad (75)$$

El coeficiente a hace referencia al coeficiente de absorción especular.

A partir de las ecuaciones anteriores, podemos obtener el coeficiente de dispersión δ .

$$\delta = \frac{a - \alpha}{1 - \alpha} = 1 - \frac{E_{spec}}{E_{total}} \quad (86)$$

Si observamos detenidamente la ecuación anterior, podemos deducir que el coeficiente de absorción especular es igual al de dispersión si α es aproximadamente cero.

Para lograr extraer la componente especular E_{spec} de los pulsos, se promedia con bloqueo de fase los pulsos a diferentes orientaciones de la muestra. Al promediar estos pulsos, la parte especular se suma coherentemente, mientras que la parte dispersa se va cancelando parcialmente hasta que, finalmente, con un suficiente número de pulsos, logra que la parte dispersa sea despreciable y así, aísla la componente especular de la parte difusa.

4.2.1. Proceso Medición

Para realizar este método de medida se utiliza un método de excitación MLS de banda ancha mediante un sistema de captación basado en ordenador, aunque también se puede realizar con otros tipos de función de transferencia, como los basados en pulsos de banda limitada.

El primer paso consiste en determinar los factores de reflexión complejos $R_i(f)$ para diferentes orientaciones de la muestra. Esta componente está formada por la componente especular $R_{spec}(f)$ y la difusa $S_i(f)$.

$$R_i = R_{spec}(f) + S_i(f) \quad (97)$$

Como se ha explicado en el apartado anterior, el factor de reflexión complejo especular R_{spec} se obtiene ponderando los n coeficientes de reflexión complejos bajo la orientación de φ_i , donde n es el número de muestras que se toman en la medición. Mientras que la componente especular se suma coherentemente, la parte dispersa se va cancelando, ya que son componentes incoherentes entre sí. De esta forma, si el número de promedios es suficientemente grande, la parte incoherente será lo suficientemente pequeña para poder despreciarla.

$$R_{spec}(f) \cong \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i(f), \quad \text{para } n \gg 1 \quad (108)$$

Cuando se puedan despreciar las pérdidas de energía, algo poco habitual en la realidad, la ecuación del coeficiente de absorción especular será idéntico al coeficiente de dispersión.

$$a(f) = 1 - |R_{spec}|^2 \quad (119)$$

Si esto no es posible, se obtiene el coeficiente de absorción a partir de la siguiente ecuación.

$$\alpha(f) \approx 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |R_i(f)|^2 \quad (20)$$

En principio, el método de promediar los diferentes coeficientes de dispersión de cada ángulo de φ para obtener el coeficiente de dispersión aleatoria, ya es válido, pero para aumentar el estudio de la muestra y obtener un valor lo más cercano a la realidad, se puede realizar un estudio con diferentes ángulos de acimut θ , para, finalmente, promediarlos y obtener el coeficiente de incidencia aleatoria $S(\theta)$ y, así, evaluar con más exactitud todo el comportamiento de la muestra.

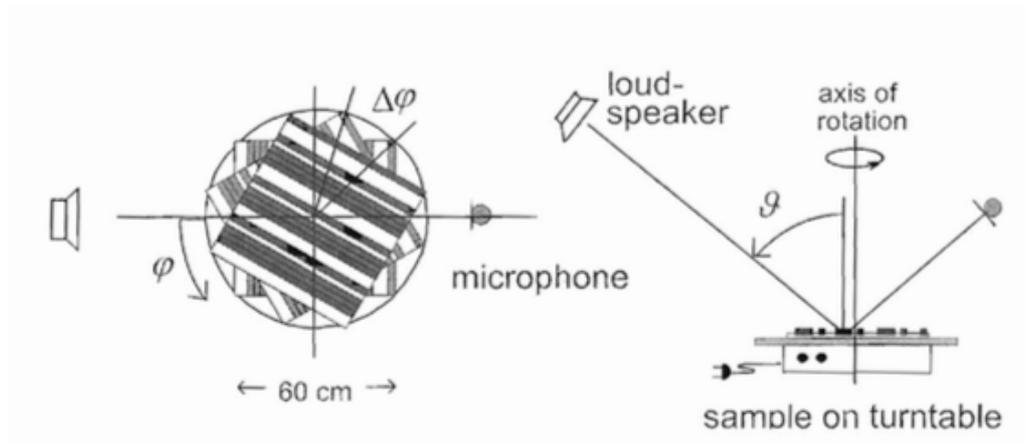


Fig. 17 – Procedimiento de medida del método de Mommertz y Vorländer campo libre.

5. Simulación BEM

Para estudiar los métodos de medida descritos anteriormente sin necesidad de tener acceso a una sala anecoica y a un equipo altamente sofisticado, utilizaremos una función desarrollada con Matlab por Luis Godinho⁷ de la Universidad de Coimbra que utiliza el método de elementos de contorno o BEM, por sus siglas en inglés (*boundary element method*). BEM es un método numérico para resolver ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, utiliza las condiciones de contorno para resolver una ecuación integral en el borde, sin tener que tomar valores en todo el espacio definido en la ecuación diferencial parcial. Finalmente, en el post-procesamiento se puede volver a utilizar la ecuación integral para calcular la solución en cualquier punto del interior del dominio.

La función utilizada, funciona de forma que, al introducirle los datos de entrada, ésta realiza unos cálculos internos y nos devuelve las presiones complejas reflejadas en la muestra de estudio, recogidas en cada uno de los receptores introducidos en la simulación, calculando de forma separada las presiones recogidas por los receptores para cada posición de fuente.

La función que utilizamos está limitada para estudio de muestras con patrones periódicos, como pueden ser los QRD, PRD o los MLS descritos anteriormente. Este código necesita como datos de entrada:

- Profundidades de las hendiduras
- Anchos de las hendiduras
- Frecuencias de estudio
- Número de módulos de difusores
- Posiciones de fuentes
- Posiciones de receptores
- Número mínimo de elementos por longitud de onda
- Tamaño mínimo de elemento

Para probar el funcionamiento de esta aplicación y observar si los resultados de la simulación concuerdan con el análisis teórico descrito anteriormente, elegimos una superficie QRD (difusor de residuo cuadrático) con una secuencia de siete hendiduras, además de una superficie plana de referencia para poder realizar los cálculos pertinentes. Esta superficie consiste en un panel QRD con una secuencia de siete ranuras de un ancho de 14,3 cm y cuyas profundidades de las secuencias están normalizadas a

⁷ N. del A.: Luis Godinho, especialista en el uso de métodos de solución numérica “sin mallas”.

34 cm. Esto nos da la información de que el difusor está diseñado para funcionar en el rango de frecuencias de entre 288 Hz a 1200 Hz aproximadamente.

Partiendo de las ecuaciones descritas en el apartado 3.2.2, podemos demostrar de forma teórica la eficiencia del difusor:

$$S_n = n^2 \bmod p \quad (21)$$

n	0	1	2	3	4	5	6
n ²	0	1	4	9	16	25	36
S _n	0	1	4	2	2	4	1

$$f_{max} = \frac{c}{w \cdot 2} = \frac{343}{0.14 \cdot 2} = \mathbf{1200 \text{ Hz}} \quad (22)$$

$$f_0 = \frac{s_{max}c}{2pd_{max}} = \frac{4 \cdot 343}{2 \cdot 7 \cdot 0.34} = \mathbf{288 \text{ Hz}} \quad (23)$$

De esta manera obtenemos una secuencia con las siguientes profundidades (en metros):

$$([0, 1, 4, 2, 2, 4, 1]/4) \cdot 0.34$$

d_n = es la profundidad de cada ranura.

S_n = es el resto del cociente entre n^2 y p .

c = velocidad de propagación del sonido (en m/s).

f_0 = frecuencia de diseño (frecuencia mínima para la cual la difusión es óptima).

W = anchura de las ranuras (en metros).

p = número de ranuras por periodo.

5.1. Simulación método 1: ISO 17497-2

Según la norma, debemos evaluar la muestra en un rango frecuencial de entre 100Hz a 5000Hz, con una resolución de 1/3 de octava. Con el fin de que los resultados tengan una mejor aproximación, se decide subdividir los tercios de octava en tres frecuencias para, posteriormente, calcular las presiones complejas de cada una de ellas.

La siguiente fase para llevar a cabo esta simulación consiste en crear un Array de micros en forma de semicírculo, con una separación entre ellos de 5 grados y un radio de 10 metros hasta el punto central de la muestra. Para las fuentes, se produce del mismo modo que en los receptores, pero situándolas con un radio de 30 metros respecto a la muestra y con ángulos, respecto al eje perpendicular de la muestra, de -60, -30, 0, 30 y 60 grados, tal y como recomienda la norma.

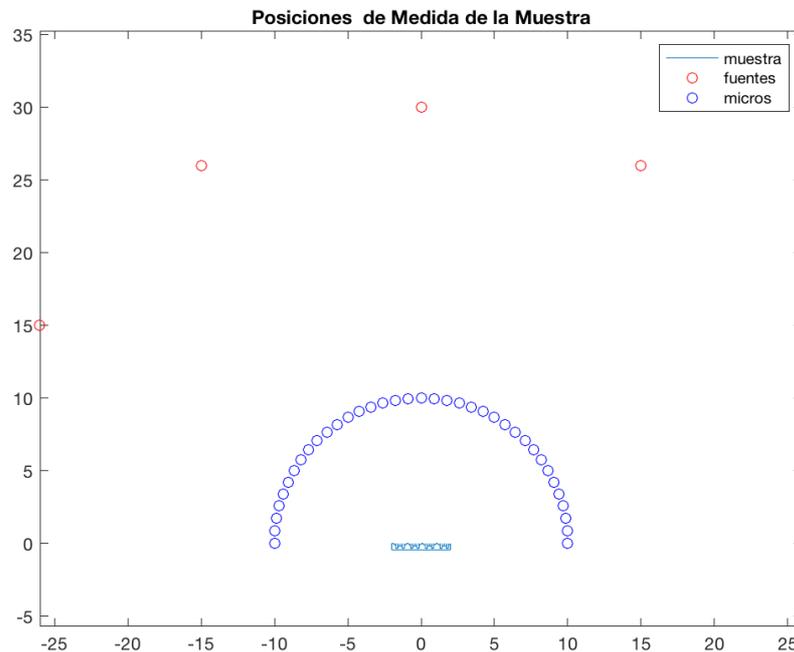


Fig. 18 – Posiciones de fuentes y receptores frente a la muestra.

A partir de los datos anteriores, procedemos a realizar las dos simulaciones necesarias. La primera simulación realiza el cálculo de presiones complejo para cada una de las fuentes con una superficie plana de referencia con la finalidad de, posteriormente, obtener los coeficientes de difusión normalizados. Con la simulación restante se calculan las presiones con los mismos datos que la anterior, pero, esta vez, evaluamos la superficie difusora. En el siguiente gráfico, *figura 19*, se muestra un ejemplo de coeficiente de difusión direccional de la muestra y otra con una superficie plana. Una vez normalizados los datos de difusión, eliminamos las componentes en baja frecuencia no deseadas que aparecen por causas ajenas al panel difusor; en la *figura 20* se pueden ver los coeficientes normalizados sin estas componentes a bajas frecuencias.

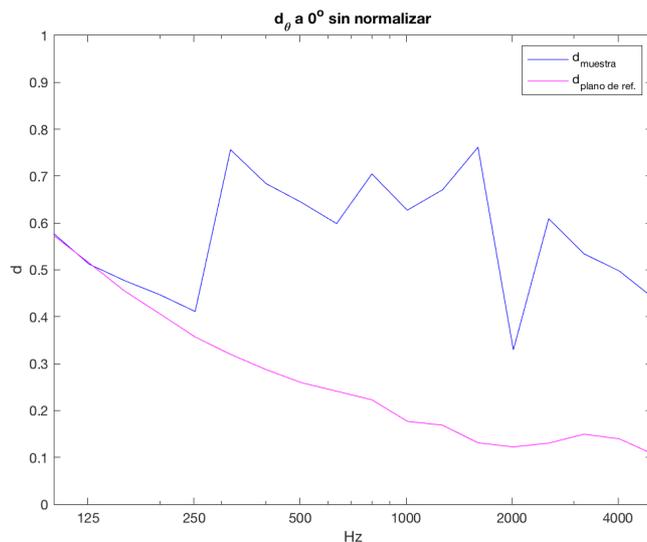


Fig. 19 – En color magenta, el coeficiente de difusión de una superficie plana, en azul, el coeficiente de difusión de la muestra sin normalizar.

La función nos devuelve el contorno de las muestras evaluadas, además de las presiones complejas de cada receptor. Estos datos de presión se almacenan en una matriz tridimensional, en la cual, en un eje tenemos las frecuencias, en el otro los receptores y en el último, las fuentes. De esta forma, se obtienen todos los datos necesarios con los que realizar los cálculos pertinentes en la parte de postprocesado para, finalmente, obtener los coeficientes.

La siguiente fase consiste en realizar los cálculos explicados en la norma ISO 17497-2, teniendo en cuenta que se trabaja con el módulo de las presiones complejas calculadas con la función BEM. Este proceso de cálculo se repite por cada posición de fuente, donde obtenemos su correspondiente coeficiente de difusión direccional. Seguidamente, se muestran diferentes gráficos por cada ángulo de fuente, representado en tercios de octava y normalizado con una superficie plana de referencia:

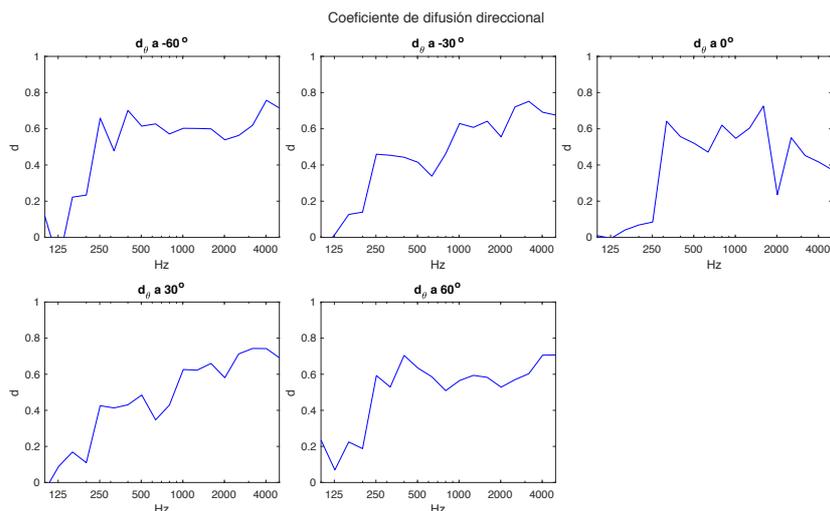


Fig. 20 – Coeficientes normalizados a distintos ángulos de incidencia.

Como se puede observar en la *figura 20*, el coeficiente de difusión direccional varía en función de la posición de fuente. Para homogenizar estos datos en un solo coeficiente,

se calcula un promedio con diferentes ponderaciones según el ángulo de incidencia de cada fuente, obteniendo así, el coeficiente de difusión direccional de incidencia aleatoria (figura 21).

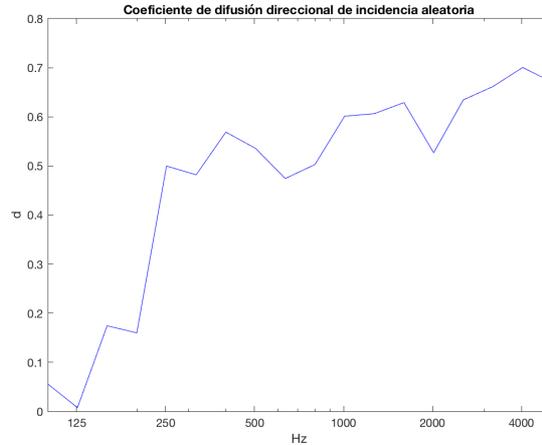


Fig. 21 – coeficiente de difusión direccional de incidencia aleatoria.

5.2. Simulación método 2: Método de E. Mommertz y M. Vorländer (campo libre)

Como en el método anterior, el primer paso es definir la superficie a evaluar, además de una superficie plana de referencia. La gran diferencia de este método frente al de la norma ISO 1749-2 insta, principalmente, del proceso de medición. Como se ha explicado anteriormente, en el apartado 4.2.1, con una sola posición de fuente y micro se evalúa toda la muestra mediante una base giratoria donde, partiendo de una función de transferencia definida por una señal MLS, obtenemos la respuesta al impulso de toda la muestra. Para poder simular este método, realizaremos una especie de barrido discreto de la muestra, de forma que obtenemos los mismos resultados que el método de medida real. En la figura 22 exponemos de forma gráfica y más clara el procedimiento de simulación.

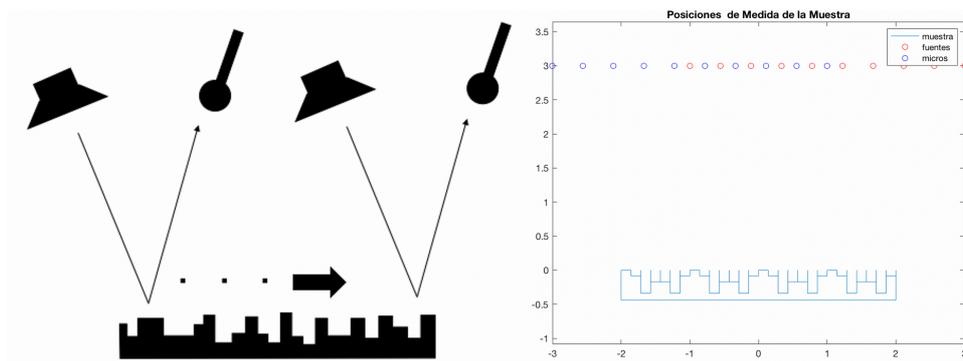


Fig. 22 – A la derecha, representación del proceso de medición, a la derecha, las diferentes posiciones de fuente y micro de nuestra simulación.

Para analizar la muestra, discretizamos el muestreo en diez puntos de fuente y micro. Con esto tendremos suficiente resolución para obtener unos resultados cercanos a la realidad.

Una vez obtenidas todas las presiones complejas de cada pareja de fuente y receptor, por cada superficie evaluada, la superficie plana y la muestra a estudiar, procedemos a realizar los cálculos pertinentes para, finalmente, alcanzar el coeficiente de dispersión.

La información fundamental que hay que abstraer de este método de medición es el coeficiente de reflexión complejo. Este coeficiente se obtiene a partir del cociente entre las presiones complejas obtenidas en la simulación de la superficie difusora y las de la superficie plana de referencia. A partir de este coeficiente ya podemos seguir los pasos descritos en el *apartado 4.2.*, donde se puede calcular la componente especular, el coeficiente de absorción especular, el coeficiente de absorción y, finalmente, el coeficiente de dispersión de incidencia aleatoria.

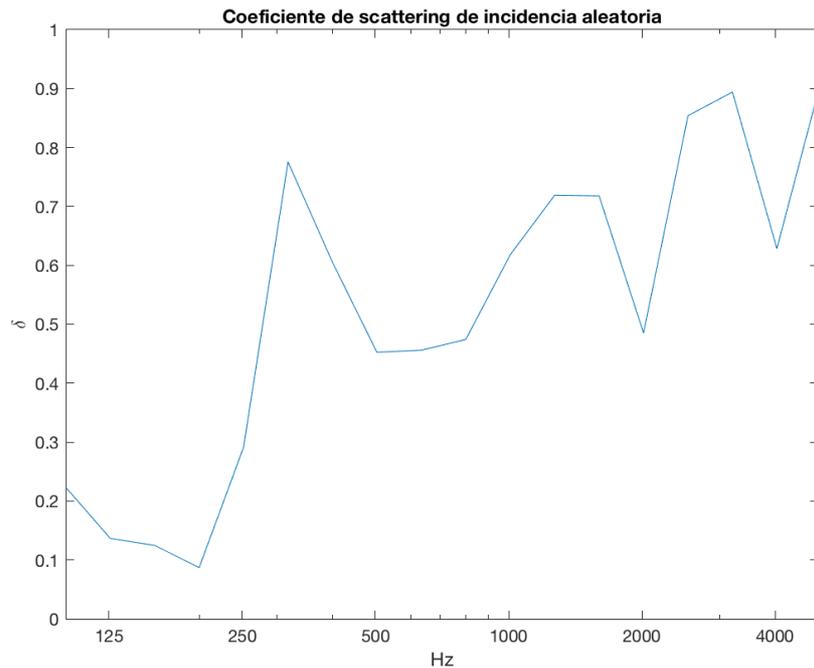


Fig. 23 – Coeficiente de difusión de incidencia aleatoria obtenido con el método de medida de Mommertz y Vorländer.

Como podemos comprobar, este método es mucho más rápido de implementar que el método tradicional anterior, en el que hay que colocar una gran cantidad de fuentes y receptores y hacer un gran número de procesados y cálculos por cada posición de fuente.

5.3. Otros coeficientes

Para ampliar el estudio del proyecto, aprovechamos el método de medida que nos proporciona la norma ISO1749-2 para calcular una serie de coeficientes.

Con el mismo procedimiento de simulación, podemos postprocesar los datos de la simulación para, finalmente, obtener los coeficientes descritos a continuación.

5.3.1. Coeficiente de difusión energético

Este coeficiente se podría considerar el parámetro más simple de definir, ya que consiste en una medida que forma una relación entre la energía reflejada fuera de la zona especular y la energía total reflejada. Esta definición tiene varias cualidades para recomendarla. La definición es de concepto simple, fácil de explicar y está vinculada a algunos de los estilos de modelado de difusión utilizados en los modelos de predicción por ordenador. Para obtener este coeficiente basta con realizar el siguiente cálculo:

$$\delta_{energético} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n p_{especular}^2}{\sum_{i=1}^m p_{total}^2} \quad (24)$$

donde:

p = presión sonora reflejada en la muestra.

n = número de receptores dentro de la zona especular.

m = número total de receptores.

Para poder desarrollar este cálculo es importante definir bien la zona especular para cada ángulo de incidencia. Así, con unos sencillos cálculos de trigonometría, se obtienen los ejes anterior y posterior de la zona especular, tal y como se muestra en la *figura 24*.

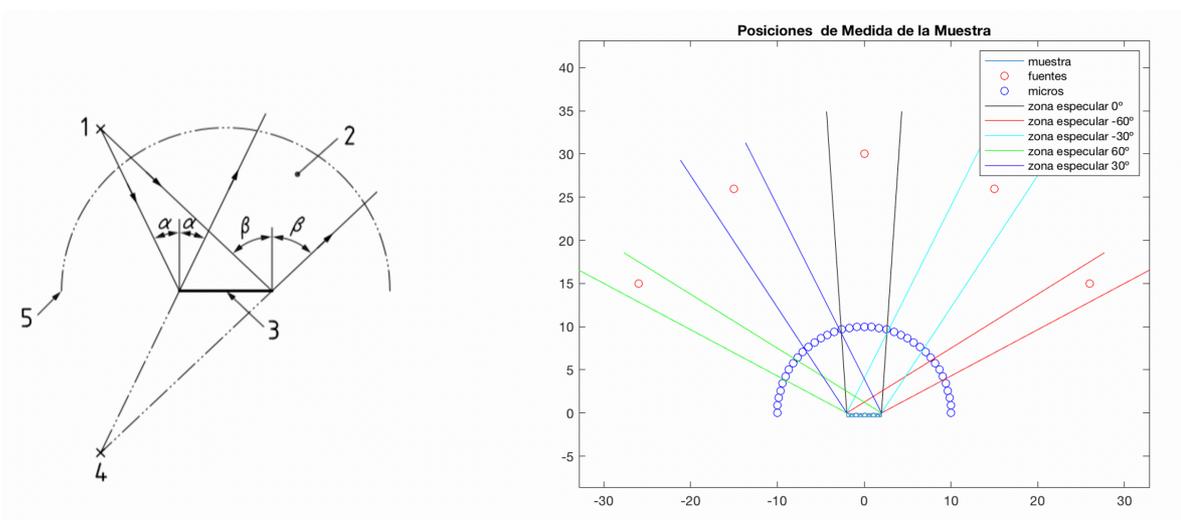


Fig. 24 – A la derecha, representación de la zona especular y sus ángulos respecto a la posición de la fuente, a la derecha, las diferentes zonas especulares de nuestro modelo de simulación.

Para normalizar el coeficiente de difusión energético a una superficie plana de referencia, se usa la fórmula descrita en el apartado 4.1.2., donde el coeficiente de difusión direccional también queda normalizado frente a un plano de referencia. En este caso, solo debemos sustituir de la ecuación el d_θ por el $\delta_{energético}$:

$$\delta_{energético,n} = \frac{\delta_{energético} - \delta_{\theta,r}}{1 - \delta_{\theta,r}} \quad (25)$$

Donde $\delta_{\theta,r}$ es el coeficiente de difusión de una superficie plana de referencia.

Para que este parámetro defina correctamente una incidencia aleatoria, se promedia con los valores de difusión obtenidos para cada ángulo de incidencia.

5.3.2. Coeficiente de difusión de autocorrelación

A diferencia del coeficiente de difusión energético, que debe definirse el ancho angular de la reflexión especular, el coeficiente de difusión de autocorrelación puede determinarse a partir de la distribución de presión direccional.

Si consideramos la distribución compleja de presión direccional $p_1(\theta)$ de una superficie irregular, donde θ hace referencia al ángulo discreto de cada receptor, la distribución de presión direccional $p_1(\theta)$ puede separarse en dos partes, una parte que está dispersa a causa de las irregularidades de la superficie $p_s(\theta)$ y la otra, que está correlacionada con la distribución de presión angular $p_0(\theta)$, que se obtiene cuando la muestra se reemplaza por una superficie plana de referencia de las mismas dimensiones.

$$p_1(\theta_i) = r_{espec} \cdot p_0(\theta_i) + p_s(\theta_i) \quad (26)$$

En la ecuación anterior, r_{espec} es el factor de reflexión complejo especular de la muestra, que siempre es menor que 1 cuando las superficies son difusoras.

Para poder obtener el coeficiente de difusión, debemos determinar el factor de reflexión complejo, que se puede expresar como:

$$r_{espec} = \frac{\sum_{i=1}^n p_1(\theta_i) \cdot p_0^*(\theta_i)}{\sum_{i=1}^n |p_0(\theta_i)|^2} \quad (27)$$

Así pues, el coeficiente de difusión δ_{ac} , para una frecuencia y ángulo de incidencia concreta se puede definir como:

$$\delta_{ac} = 1 - \frac{|\sum_{i=1}^n p_1(\theta_i) \cdot p_0^*(\theta_i)|^2}{\sum_{i=1}^n |p_1(\theta_i)|^2 \cdot \sum_{i=1}^n |p_0(\theta_i)|^2} \quad (28)$$

donde:

p_1 = presión captada por el receptor con muestra.

p_0 = presión captada por el receptor con panel plano de referencia.

θ_i = ángulo del receptor respecto a la muestra.

5.3.3. Coeficiente de difusión equivalente (d_{SPL})

Este parámetro se desarrolló en este trabajo para compararlo con el resto de los coeficientes. Este coeficiente expresa la cantidad de energía que es reflejada de forma no especular, a incidencia normal. Es decir, a partir de una fuente con un ángulo hacia la muestra de cero grados y con un receptor en la trayectoria especular, obtenemos la cantidad de energía reflejada de forma no especular, teniendo en cuenta que la muestra no es absorbente.

Así, podemos estudiar la relación que tienen los demás coeficientes en este tipo de parámetro. La información que nos brinda puede ser útil para casos como, por ejemplo, los estudios que se están realizando sobre el efecto que provoca el sonido reflejado de un cohete al despegar, causando una gran vibración en la cofia, causando daños en la instrumentación almacenada en su interior o, de manera análoga, cuando se usan superficies difusoras en pantallas acústicas para reducir el sonido reflejado especularmente, evitando así el efecto tambor entre la pantalla y un vehículo próximo.

Este coeficiente es muy simple de obtener, como solo se va a tener en cuenta un ángulo de incidencia y recepción, la ecuación que nos queda es la siguiente:

$$\delta_{SPL} = 1 - \frac{p_1^2}{p_0^2} \quad (29)$$

donde:

p_1 = presión sonora reflejada por la muestra con incidencia normal captada en el receptor central.

p_0 = presión sonora reflejada por una superficie plana de referencia con incidencia normal captada en el receptor central.

6. Análisis de resultados

Para obtener un buen análisis de los coeficientes explicados en el apartado anterior, generamos un código donde se simulan 1000 muestras, cada una con su correspondiente secuencia de profundidades generadas de forma aleatoria. De esta forma podremos analizar una gran cantidad de datos, para lograr estudiar los distintos fenómenos que ocurren al reflejar el sonido en cada una de las muestras y cómo se representan en cada uno de los coeficientes descritos anteriormente.

6.1. Método de análisis

Una vez calculados cada uno de los coeficientes correspondientes a cada muestra, generaremos una serie de gráficas donde, en un eje se representan todos los valores obtenidos al calcular uno de los coeficientes y, en el otro eje representamos los valores obtenidos por otro coeficiente, de esta forma podemos analizar las relaciones que hay entre ellos. Generamos una gráfica como esta para cada combinación posible.

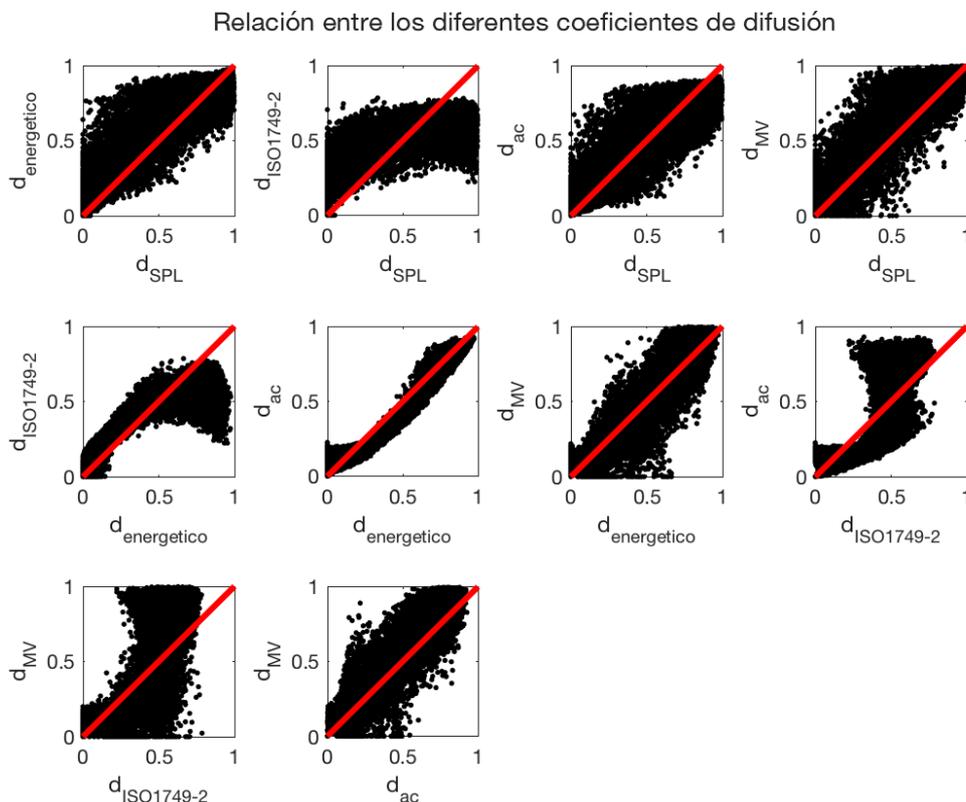


Fig. 25 – Representación de todas las combinaciones de parámetros posibles.

Con esta representación, a simple vista ya podemos deducir gran cantidad de información como, por ejemplo, que los coeficientes de dispersión energético y el de autocorrelación representan la dispersión del sonido de una forma bastante similar, o que al comparar el coeficiente de difusión direccional ($d_{\text{ISO1749-2}}$) con los demás coeficientes, repite una cierta tendencia a desestabilizarse cuando el coeficiente con el que se comprara empieza a tener valores de difusión altos. Para realizar un análisis en profundidad vamos a estudiar cada caso por separado.

6.2. Análisis coeficiente d_{SPL}

En este apartado, analizamos las diferencias entre el coeficiente d_{SPL} frente a los demás coeficientes, para así lograr entender cómo representa cada parámetro los diferentes fenómenos que ocurren al simular cada muestra.

El primer ejemplo que analizamos será el coeficiente d_{SPL} frente al coeficiente $d_{energético}$. Elegimos algún punto alejado de la recta donde están representados los coeficientes $d_{energético}$ y d_{SPL} , uno en cada eje. También se agrupan los puntos por rango de frecuencia, el color rojo representa el rango de frecuencias de 100 a 317 Hz, el color verde de 400 a 1300 Hz y el color azul abarca el rango de frecuencias de 2000 Hz hasta los 5000 Hz.

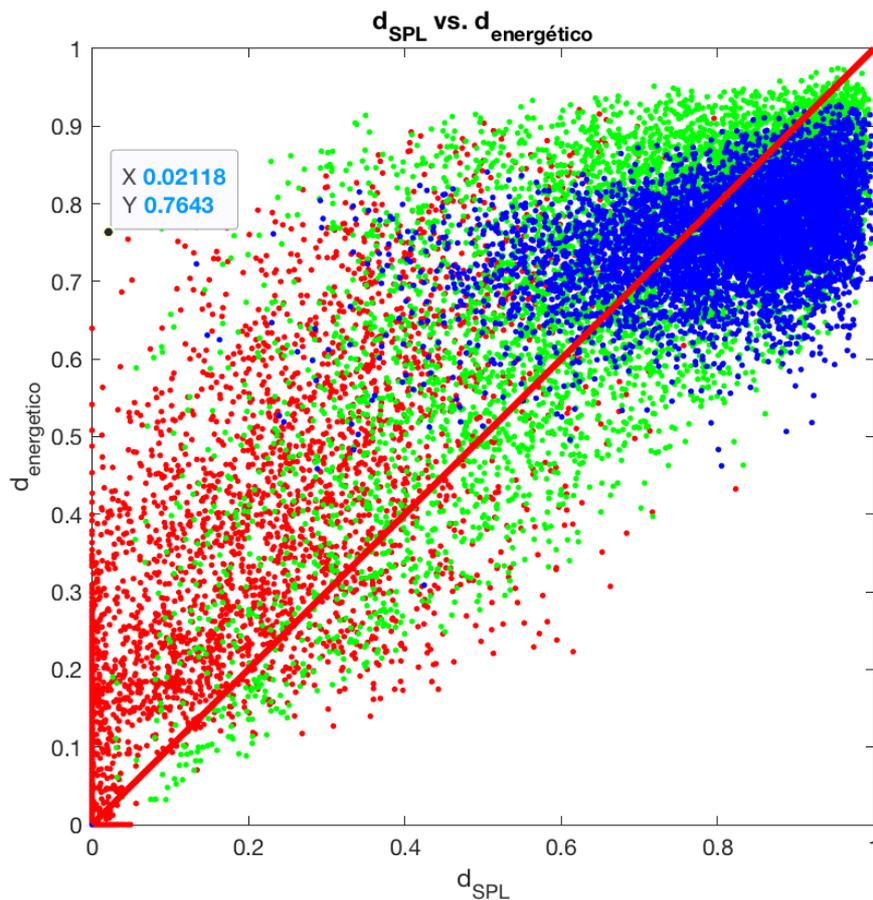


Fig. 26 – Relación entre coeficiente d_{SPL} y $d_{energético}$.

Al elegir un punto apartado de la recta, tendremos una diferencia de valor importante entre los dos coeficientes representados, a una frecuencia determinada. A partir de este valor, podemos localizar la muestra simulada donde ocurre esta relación entre los coeficientes y observar qué fenómenos acústicos ocurren al reflejar el sonido en esta muestra en concreto.

Representando los dos coeficientes obtenidos al simular la muestra, observamos que, efectivamente, hay una gran diferencia entre el valor del coeficiente d_{SPL} y el $d_{energético}$ 252 Hz.

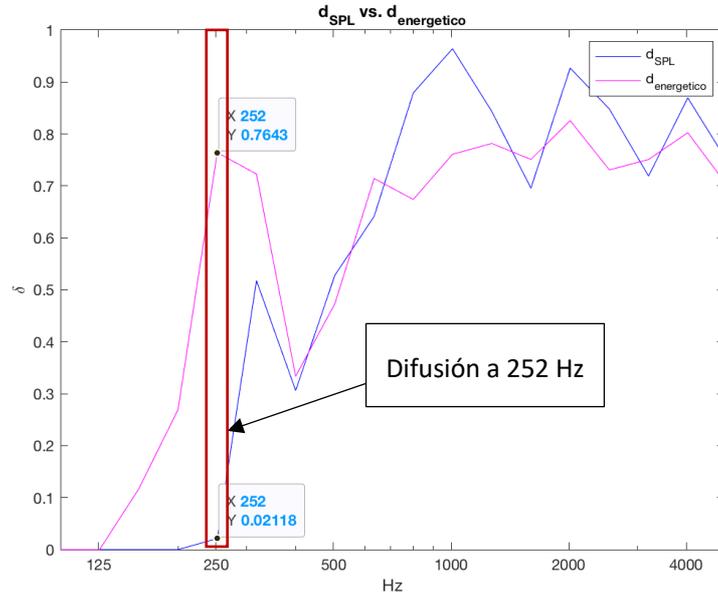


Fig. 27 – Valores de difusión muy dispares a la frecuencia de 252 Hz.

Para lograr entender porqué ocurre esto, analizamos en profundidad los datos relacionados con los cálculos de los coeficientes. Si observamos qué ocurre con la presión acústica al ser reflejada en la muestra, vemos que con un ángulo de incidencia (θ) a cero grados, la presión reflejada se concentra en la dirección especular. Esto causa que, al hacer el cálculo del coeficiente d_{SPL} , obtengamos un valor muy bajo, ya que, si analizamos la ecuación del apartado 5.3.3., vemos que el coeficiente emplea estos ángulos de incidencia y de recepción, siendo en este caso, una reflexión puramente especular.

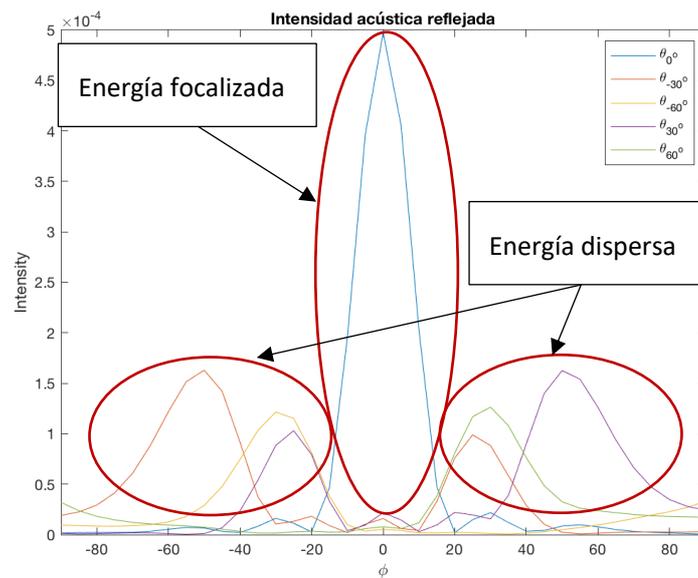


Fig. 28 – Intensidades sonoras captadas a diferentes ángulos de incidencia y reflexión a la frecuencia de 252 Hz.

Por otro lado, el coeficiente $d_{\text{energético}}$, a parte de tener en cuenta cómo es de especular la reflexión con un ángulo de incidencia a 0° , también tiene en cuenta otros cuatro ángulos de incidencia más, a 30° , a 60° , a -30° y a -60° , promediando de forma ponderada, los valores obtenidos en cada ángulo. Al hacer este promedio, la reflexión que se concentra en la zona especular a 0° queda enmascarada con los valores obtenidos de lo demás ángulos, ya que, en esta muestra en concreto, con los ángulos de incidencia distintos a 0° , la energía reflejada tiene una dispersión muy elevada.

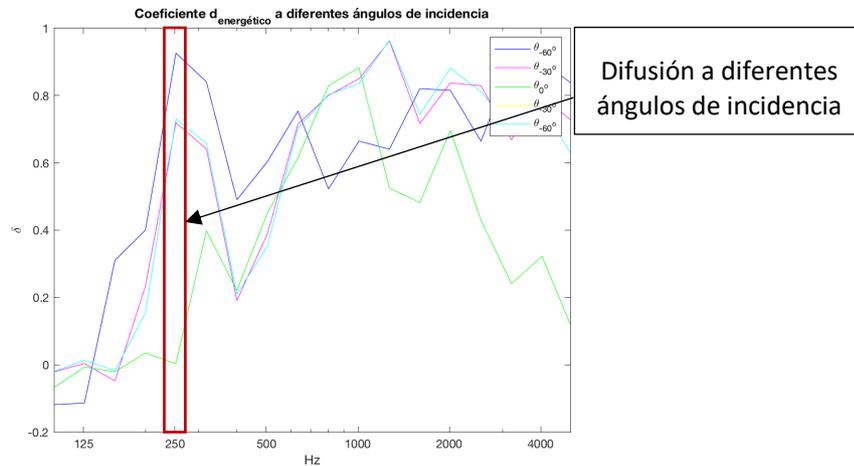


Fig. 29 – Coeficiente de difusión energético a diferentes ángulos de incidencia.

Otro de los experimentos que se lleva a cabo, consiste en simular un difusor QRD e ir cambiando el factor de profundidades para analizar el comportamiento acústico y cómo lo representan estos dos coeficientes de difusión. Como explicamos en el apartado 3.2.2., la frecuencia inferior de funcionamiento (f_0) de un difusor QRD es inversamente proporcional a las profundidades de la muestra, de modo que, al reducir estas profundidades, el rango de funcionamiento del difusor se desplazará a frecuencias superiores.

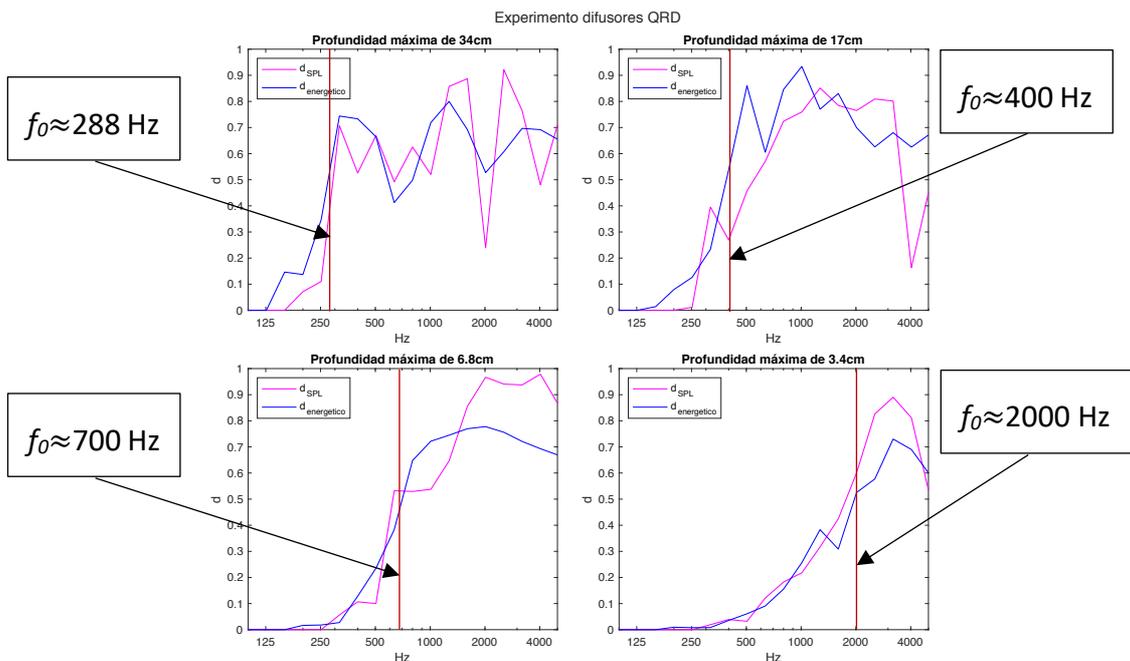


Fig. 30 – Coeficientes de difusión obtenidos al simular un difusor QRD con diferentes profundidades.

Otro fenómeno que podemos apreciar con este experimento es que, con el coeficiente d_{SPL} , se muestran frecuencias concretas con un valor de difusión muy bajo y que, al ir reduciendo las profundidades del difusor, este 'nulo' también va aumentando de frecuencia. Esto nos dice que, al reducir las profundidades, la energía reflejada en el punto central, y con incidencia a cero grados (reflexión especular), siempre hay un máximo de presión en una frecuencia en concreto, y que, dicho máximo aumenta de frecuencia según disminuyen las profundidades de las hendiduras del difusor.

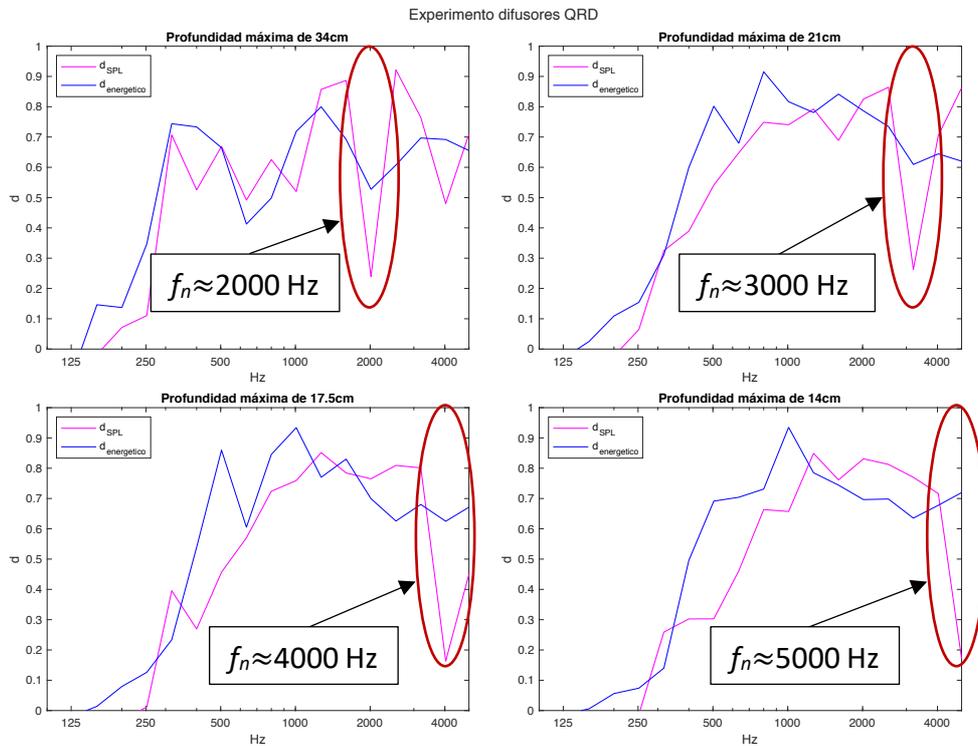


Fig. 31 – Coeficientes de difusión obtenidos al simular un difusor QRD con diferentes profundidades.

Como vemos, el coeficiente de difusión energético no representa estos picos de presión debido a que es enmascarado al promediar los diferentes ángulos de incidencia.

Se repiten estos experimentos con los demás coeficientes, pero con todos llegamos a la misma conclusión.

Para estudiar las diferencias entre el coeficiente d_{SPL} y los demás coeficientes, hacemos una conversión logarítmica de los valores obtenidos en la simulación, de modo que podemos observar el nivel de difusión que nos representa cada coeficiente.

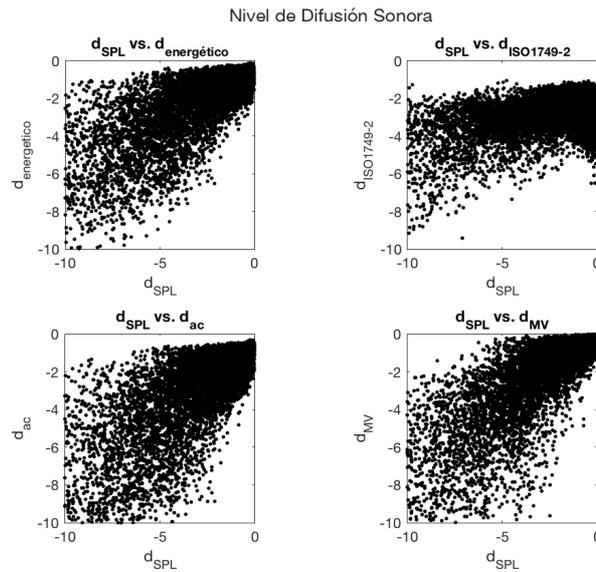


Fig. 32 – Relación entre el coeficiente d_{SPL} frente los demás parámetros.

Otro dato interesante que podemos obtener mediante la siguiente ecuación es la reducción de nivel de presión sonora que es reflejada en la muestra.

$$R_{SPL} = 10 \cdot \log_{10}(1 - d_{SPL}) \quad (30)$$

Realizando este cálculo para cada coeficiente, obtendremos sus correspondientes niveles de reducción que expresa cada parámetro. Así pues, podemos observar que al comparar la reducción de nivel que representa el coeficiente d_{SPL} frente a los demás coeficientes, tiene una tendencia similar, a excepción del coeficiente de difusión direccional ($d_{ISO1749-2}$), que, a partir de un punto, presenta una reducción de nivel de entre 2 y 6 dB, en cuanto al coeficiente d_{SPL} , muestra reducciones de hasta 10dB.

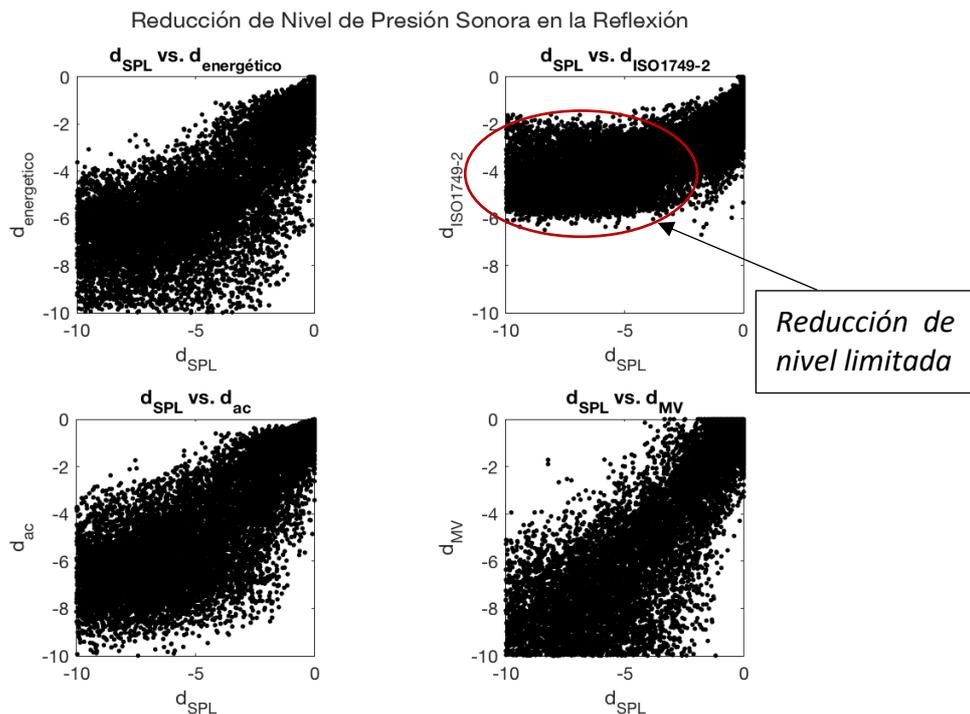


Fig. 33 – Relación entre el coeficiente d_{SPL} frente los demás parámetros en logarítmico.

6.3. Análisis coeficiente de difusión direccional ($d_{ISO1749-2}$)

Para analizar el coeficiente d_{SPL} realizaremos el mismo método de análisis que en el apartado anterior. Nos centraremos en examinar un punto de la gráfica que esté más alejado de la recta para así comparar diferencias más evidentes.

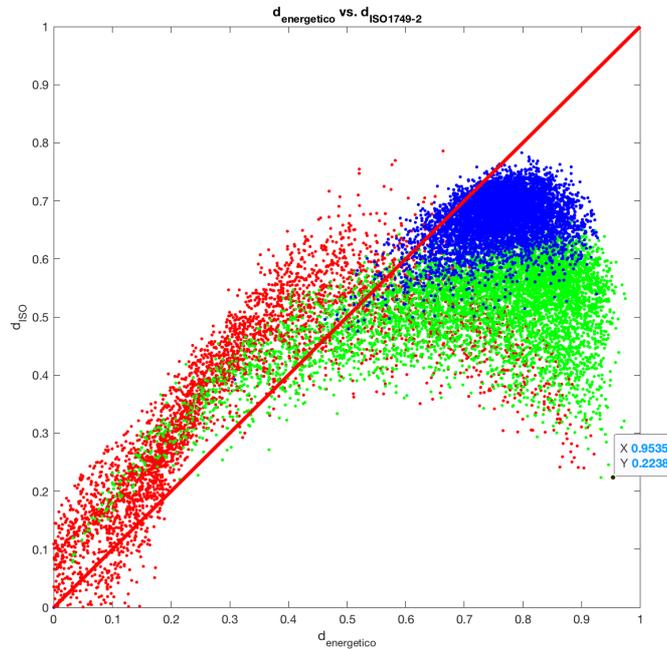


Fig. 34 – Relación entre el coeficiente $d_{ISO1749-2}$ y el coeficiente de difusión energético.

El punto elegido para analizar los coeficientes $d_{energetico}$ y $d_{ISO1749-2}$ tienen un valor de 0.95 y 0.22 respectivamente.

Representando la gráfica con los dos coeficientes obtenidos de la muestra donde ocurre este fenómeno en concreto, vemos que, efectivamente, a la frecuencia de 400Hz tenemos una gran diferencia de nivel entre estos dos parámetros.

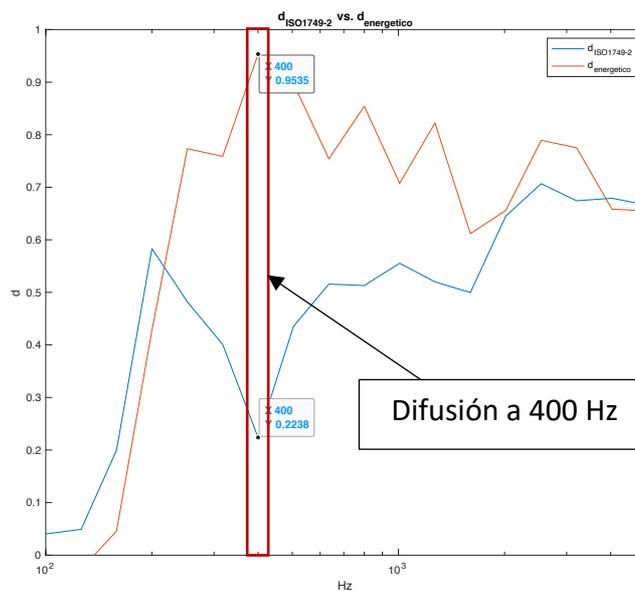


Fig. 35 – Diferencia entre el coeficiente $d_{ISO1749-2}$ y el coeficiente de difusión energético a una frecuencia de 400 Hz.

Si estudiamos qué ocurre con la presión reflejada en esta muestra de difusor a 400 Hz, donde ocurre este fenómeno, se puede deducir que con la fuente radiando a cero grados, la energía reflejada se concentra en una dirección no especular, de forma que, en el receptor central ($\phi=0^\circ$) no le llega prácticamente nada de energía y así, con todos los ángulos de incidencia. Debido a eso, el coeficiente $d_{\text{energético}}$ tiene un máximo de difusión a 400 Hz.

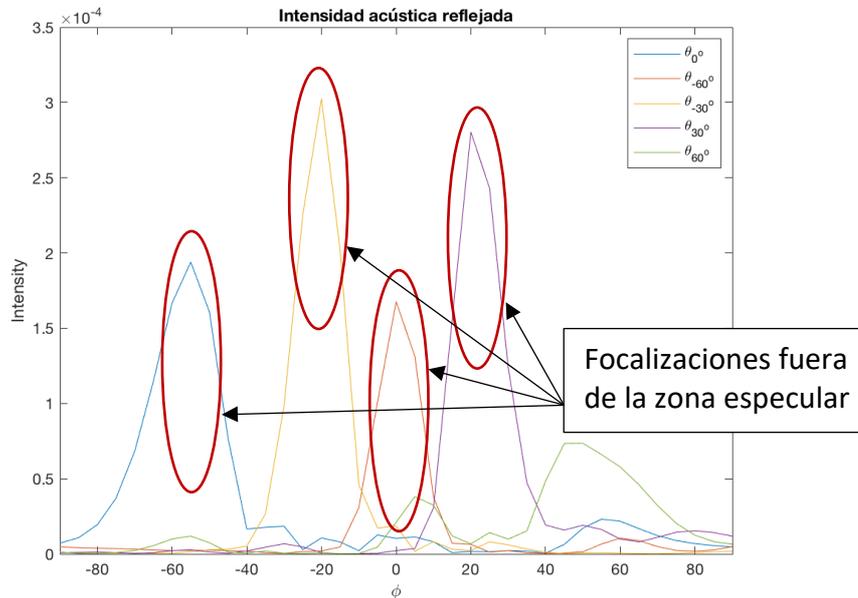


Fig. 36 – Intensidades sonoras captadas a diferentes ángulos de incidencia y reflexión.

Para comprender el porqué del mínimo del coeficiente de difusión direccional, tenemos que observar qué pasa con todos los ángulos de incidencia. Como vemos en la gráfica anterior, las reflexiones no son para nada especulares, ya que se concentran en una dirección completamente distinta a la especular, pero, si prestamos atención a lo que representa el coeficiente $d_{\text{ISO1749-2}}$ vemos que no es relevante que la energía se concentre fuera de la zona especular, sino, la cantidad de energía que se concentra en un punto en concreto, aunque cambie la trayectoria de la energía reflejada fuera de la zona especular, sigue concentrando la energía en un solo punto, causando que este coeficiente a 400Hz sea bajo.

Para obtener otro punto de vista sobre este coeficiente, vamos a compararlo con el coeficiente d_{SPL} . Si por lo contrario, analizamos un punto donde el coeficiente $d_{ISO1749-2}$ sea alto y el d_{SPL} bajo, lo que ocurre es parecido a lo que ocurre al comparar el d_{SPL} con el coeficiente $d_{energético}$.

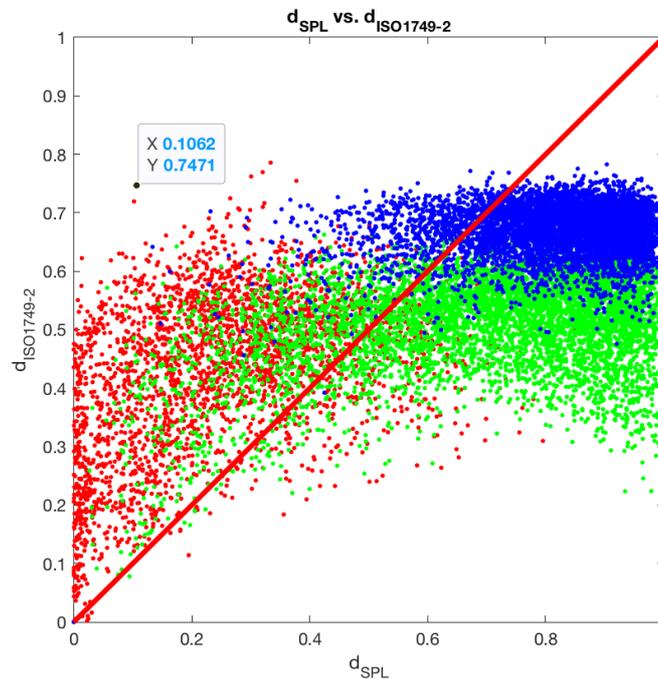


Fig. 37 – Relación entre el coeficiente $d_{ISO1749-2}$ y el coeficiente de difusión d_{SPL} .

La energía reflejada con la fuente a cero grados se concentra en la dirección especular ($\phi=0^\circ$). Por tanto, nos queda un coeficiente d_{SPL} bajo. La causa de que el coeficiente $d_{ISO1749-2}$ sea alto, es porque también se promedia con los diferentes ángulos de incidencia, y justo con esta muestra, con los demás ángulos de incidencia, la energía se dispersa en gran medida. Quedando en promedio con un coeficiente muy superior al que nos proporciona el coeficiente d_{SPL} .

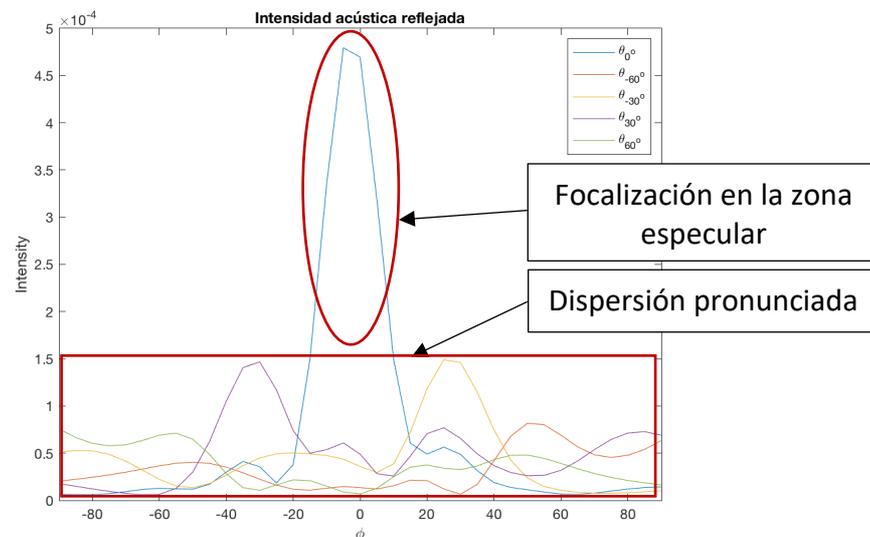


Fig. 38 – Intensidades sonoras captadas a diferentes ángulos de incidencia y reflexión.

Este estudio nos da a entender que, en general, las frecuencias medias y altas suelen tener un nivel inferior en el coeficiente $d_{ISO1749-2}$ frente al nivel del d_{SPL} porque la energía se sigue concentrando en un punto en concreto, pero fuera de la dirección especular con la fuente a 0 grados, es muy difícil que no existan puntos de focalización en todo el espectro que abarca el rango frecuencial medio y alto, siempre habrá al menos una frecuencia que tenga este tipo de focalización, por eso, a partir de cierto punto el coeficiente de difusión direccional no alcanza mayores niveles de difusión.

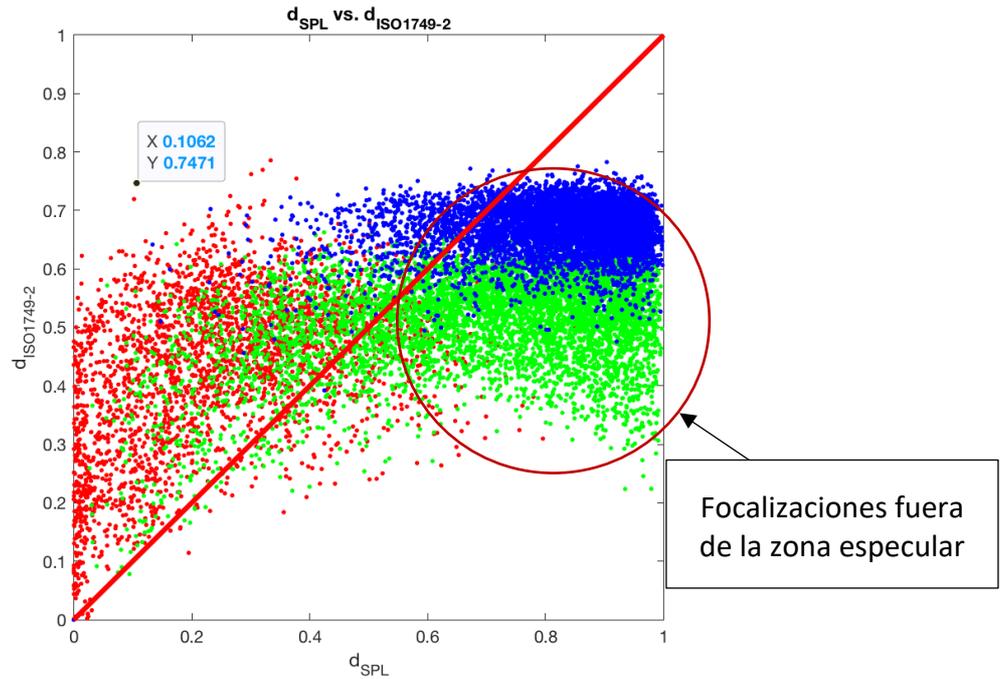


Fig. 39 – Relación entre el coeficiente $d_{ISO1749-2}$ y el coeficiente de difusión d_{SPL} .

6.4. Análisis de los coeficientes $d_{energético}$, $d_{autocorrelación}$ y d_{MV}

El motivo de englobar en este apartado estos tres parámetros es debido a que su objetivo consiste en cuantificar el mismo tipo de fenómeno acústico. De forma que, al comparar estos coeficientes con los otros dos coeficientes aparecen las mismas disimilitudes. Por otro lado, comparamos estos coeficientes entre sí para analizar qué diferencias existen entre ellos.

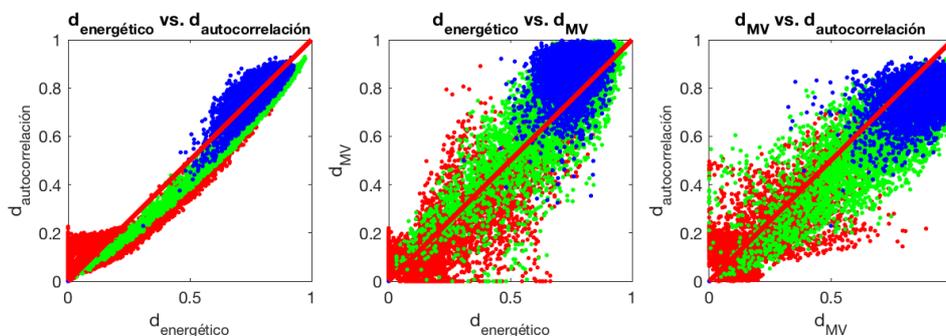


Fig. 40 – Relación entre los coeficientes energético, de autocorrelación y el coeficiente de difusión aleatoria obtenido mediante el método de Mommertz y Vorländer.

Si analizamos las gráficas anteriores, a simple vista podemos deducir que los coeficientes de difusión energético y de autocorrelación son prácticamente iguales. Las pequeñas diferencias que aparecen entre estos dos coeficientes es debido a las diferencias de cálculo en el postprocesado. Por un lado, para obtener el coeficiente de difusión energético, debemos parametrizar de forma manual el ancho angular de la reflexión especular, mientras que, el coeficiente de correlación toma como referencia la energía reflejada en una superficie plana. Con esto deducimos que el coeficiente de autocorrelación puede ser más preciso al describir este fenómeno acústico, ya que al tomar como referencia la reflexión causada por una superficie plana, tiene más optimizado el rango de la zona especular para cada caso. Por otro lado, el coeficiente energético tiene la posibilidad de parametrizar estas zonas, pudiendo modificarlas a nuestro antojo y captar información que nos pueda ser útil.

Al comparar el coeficiente de difusión obtenido mediante el método de Mommertz y Vorländer (d_{MV}) con los coeficientes energético o de autocorrelación se observa una desviación considerable. Esto se debe a que el método empleado para obtener estos parámetros es diferente. Mientras que los coeficientes de difusión energético y de autocorrelación utilizan el método de medida descrito en la norma ISO1749-2, donde se obtienen coeficientes de difusión derivados de respuestas polares de campo libre, el coeficiente d_{MV} utiliza el método de medida desarrollado por Mommertz y Vorländer, que obtiene los coeficientes de difusión a partir de las variaciones de fases de diferentes respuestas impulsivas.

7. Conclusiones

En este trabajo final de máster se ha realizado un análisis teórico de los diferentes coeficientes de difusión desarrollados a lo largo de los años en el campo de la investigación de fenómenos acústicos.

A partir de una herramienta creada en el programa informático *Matlab* por Luis Godinho, profesor en la Universidad de Coímbra, hemos tenido la posibilidad de realizar simulaciones mediante el método de elementos de contorno (BEM). Este método nos ha proporcionado una información específica que hemos utilizado para el estudio de los parámetros de forma individual y que, posteriormente, nos ha permitido compararlos para poder observar sus diferencias.

Este análisis, nos ha brindado conocimientos interesantes sobre los coeficientes de difusión direccional, energético, de autocorrelación, equivalente y también, del coeficiente de difusión de incidencia aleatoria a partir del método de medida en campo libre desarrollado por Michael Vorländer y Eckard Mommertz, el cual nos ha simplificado la realización de ensayos experimentales de este tipo de fenómeno acústico.

Así pues, tras realizar la investigación, el análisis y la producción del proyecto, y teniendo en cuenta los objetivos de los cuales partimos, destacamos una serie de afirmaciones que enumeraremos como resultados finales:

- I. El coeficiente d_{SPL} tiene la capacidad de mostrarnos la dispersión de la energía acústica, con incidencia normal, ya que esta información suele ser enmascarada debido a promediados que se realizan en el postprocesado con los demás coeficientes, puesto que están diseñados para incidencia aleatoria y, por tanto, tienen en cuenta diferentes ángulos de incidencia.
- II. El coeficiente de difusión equivalente representa que, al simular un difusor de tipo QRD siempre aparece una reflexión especular muy pronunciada a una frecuencia determinada, creando una muesca en el espectro. Dicha muesca, aumenta de frecuencia a medida que se reducen las profundidades del difusor.
- III. La información que nos proporciona el coeficiente de difusión direccional consiste en el grado de homogeneidad de la dispersión de la energía reflejada, de forma que, si la energía se focaliza en algún ángulo en concreto, sea o no especular, su valor será bajo.
- IV. La capacidad que nos brinda el coeficiente energético de parametrizar el ancho angular de la reflexión especular. De esta forma, podemos personalizar este coeficiente para estudios más concretos donde nos interese poder modificar este tipo de parámetro.
- V. El parámetro más exacto en lo que se refiere a dispersión del sonido como a la cantidad de energía que se refleja de forma no especular, es el coeficiente de difusión de autocorrelación. Al servirse de una superficie plana de referencia para identificar la orientación de la reflexión especular, nos brinda datos más precisos.

8. Bibliografía

- [1] BASTIÁN, N. y CAMPOS, A. (2014). “Caracterización acústica de superficies a través de coeficientes de absorción, difusión y dispersión” en *IX Congreso Iberoamericano de Acústica*. Valdivia. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/269395435_Caraterizacion_acustica_de_superficies_a_traves_de_coeficientes_de_absorcion_difusion_y_dispersion [Consulta: 3 de agosto de 2020]
- [2] BSI (2012). *Acoustics — Sound-scattering properties of surfaces. Part 2: Measurement of the directional diffusion coefficient in a free field*. Nº ISO 17497-2:2012. Switzerland: ISO.
- [3] CARRIÓN, A. (1998). *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Barcelona: UPC.
- [4] COX, T. J., DALENBACK, B.-I. L., B. D’ANTONIO, P., EMBRECHTS, J. J., JEON, J. Y., MOMMERTZ, E. y VORLANDER, M. (2006). “A Tutorial on Scattering and Diffusion Coefficients for Room Acoustic Surfaces” en *Acta Acustica United With Acustica*. Vol. 92, 1–15.
- [5] FARINA, A. (2000). *Measurement of the surface scattering coefficient: comparison of the Mommertz/Vorlander approach with the new Wave Field Synthesis method*. Italy: University of Parma. <https://pdfs.semanticscholar.org/7424/2939957bcb019c834d84c6fc5224977ac752.pdf> [Consulta:20 de septiembre 2020]
- [6] HARGREAVES, T. J., COX, T. J. y LAM, Y. W. (2000). “Surface diffusion coefficients for room acoustics: Free-field measures” en *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 108, No. 4, Disponible en <https://asa.scitation.org/doi/abs/10.1121/1.1310192> [Consulta: 15 de septiembre de 2020]
- [7] KUTTRUFF, H. (2000). *Room Acoustics*. London: Spon Press.
- [8] PATRAQUIM, R., GODINHO, L. y AMADO, P. (2019). “Influence of the material in the acoustic performance of optimized RBF-based shape diffusers” en *InterNoise19, INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*. Madrid: Institute of Noise Control Engineering. 4999-5997.
- [9] REDONDO, J. PICÓ, R., AVIS, M. R. y COX, T. J. (2009). “Predicción del coeficiente de scattering mediante un esquema FDTD” en *Tecnicística*, Cádiz. Disponible en <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4686085>

- [10] REDONDO, J.; PICÓ, R. y COX, T. (2009). "Prediction of the Random-Incidence Scattering Coefficient Using a FDTD Scheme" en *Acta acústica united with acústica*, Vol. 95. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/233612295_Prediction_of_the_Random-Incidence_Scattering_Coefficient_Using_a_FDTD_Scheme [Consulta: 9 de agosto de 2020]
- [11] REDONDO, J. PICÓ, R. y ROIG, B. (2005). "Estudio del Scattering producido por difusores acústicos mediante el método de las diferencias finitas en el dominio de tiempos" en *36ª TecniAcústica*, Terrasa. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/228961557_Estudio_del_scattering_producido_por_difusores_acusticos_mediante_el_metodo_de_las_diferencias_finitas_en_el_dominio_de_tiempos [Consulta: 2 de agosto de 2020]
- [12] REDONDO, J.; PICÓ, R. y Roig, B. (2007). "Time domain simulation of sound diffusers using finite-difference schemes" en *Acta acústica united with acústica*, Vol. 93, pp. 611-622. https://www.researchgate.net/publication/28578742_Time_domain_simulation_of_sound_diffusers_using_finite-difference_schemes [Consulta: 3 de agosto de 2020]
- [13] REDONDO, J., RAMIS, J. y ALBA, J. (2001). "Caracterización de difusores en cámara anecoica" en *Tecniacústica*, La Rioja. Disponible en http://www.sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/publicaciones_4355jz005.pdf [Consulta: 3 de agosto de 2020]
- [14] VORLÄNDER, M. y MOMMERTZ, E. (2000). "Definition and measurement of random-incidence scattering coefficients" en *Applied Acoustics*, Volume 60, Issue 2, pp. 187-199. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003682X99000560?via%3Dihub> [Consulta: 2 de agosto de 2020]