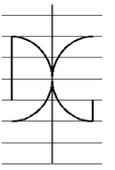




UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Ingeniería de la Construcción y de  
Proyectos de Ingeniería Civil

Diseño de una pantalla acústica basada en cristales de  
sonido para la reducción del ruido producido por  
maquinaria situada en un entorno laboral

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Prevención de Riesgos Laborales

AUTOR/A: Mirele García, Juana Adriana

Tutor/a: Castiñeira Ibáñez, Sergio

Cotutor/a: Rubio Michavila, Constanza

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

## AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a mis respetados tutores, el Dr. Sergio Castiñeira Ibáñez y la Dra. Constanza Rubio Michavila. Han sido una fuente inagotable de inspiración a lo largo de este viaje académico. Para mí fue un verdadero honor contar con su incansable esfuerzo y dedicación, así como su confianza en mí para llevar a cabo este proyecto. Ser parte de este equipo y haber tenido la oportunidad de aprender de ellos ha sido una experiencia invaluable. Sus enseñanzas perdurarán en mí para siempre.

También quiero expresar mi sincero agradecimiento a Lucas Onrubia Fontango, quien, como doctorando, generosamente compartió su valioso tiempo y conocimientos, desempeñando un papel fundamental en la realización de este proyecto. Le deseo todo el éxito que indudablemente merece en su doctorado.

Mis respetos y agradecimiento se extienden a mis profesores del máster, quienes han compartido generosamente su vasto conocimiento y experiencia, contribuyendo significativamente a mi formación profesional.

A mis amigos, en especial a Patricia Pérez, Laura Bera y Marlenis Ramírez, quiero expresar mi más sincero agradecimiento por el apoyo inquebrantable que me han brindado a lo largo de este proceso.

A Javier Marco, le agradezco por los momentos compartidos, su perspicaz mirada crítica y su honestidad, los cuales fueron de gran valor.

A mi jefe y amigo, Daniel Beltrán, le agradezco profundamente por su creer en mí y por su apoyo incondicional en este camino.

Por último, pero no menos importante, a mi madre, Ling García, le agradezco por su amor, paciencia y constante ánimo, que fueron una fuente de fortaleza y motivación durante este camino.

A todos ustedes, gracias de todo corazón por este logro que compartimos.

# ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS .....	vi
ÍNDICE DE TABLAS .....	viii
RESUMEN .....	ix
RESUM.....	x
ABSTRACT .....	xi
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Contexto y justificación .....	1
1.2 Objetivos .....	2
1.2.1 Objetivo general .....	2
1.2.2 Objetivos específicos.....	2
1.3 Cronograma.....	2
1.4 Relación del trabajo con la titulación .....	4
1.5 Glosario .....	4
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	6
2.1 Ruido Laboral y Contaminación Acústica .....	6
2.1.1 El ruido .....	6
2.1.2 Contaminación acústica.....	8
2.1.3 Definición de ruido laboral .....	9
2.1.4 Acústica y fuentes de ruido en entornos laborales .....	10
2.1.5 Legislación y normativas relacionadas con el ruido laboral .....	12
2.1.6 Riesgos laborales asociados al ruido .....	15
2.2 Control del ruido .....	17
2.2.1 Principios de propagación y transmisión del sonido.....	17
2.2.2 Tecnologías existentes para reducir el ruido en entornos laborales .....	18
2.2.3 Pantallas acústicas y su importancia en la reducción del ruido .....	19

2.3	Investigaciones y avances en el uso de pantallas acústicas .....	20
2.3.1	Investigaciones previas sobre pantallas acústicas.....	21
2.3.2	Pantallas acústicas. Concepto y particularidades .....	21
2.3.2.1	Principio de funcionamiento de las pantallas acústicas.....	22
2.3.2.2	Pérdida de intersección o <i>Insertion Loss</i> (IL).....	23
2.3.3	Difracción en pantallas acústicas clásicas.....	23
2.3.3	Tipología de pantallas acústicas tradicionales en función al tipo de material .....	24
2.3.4	Modelos numéricos propuestos para el análisis de las pantallas acústicas.....	27
2.3.5	Cristales de sonido (SC) .....	28
2.3.5.1	Propiedades de la estructura cristalina.....	29
2.3.5.2	Propagación del sonido. Ley de Bragg.....	31
2.3.5.3	Bandas prohibidas de propagación .....	33
3.	METODOLOGÍA.....	35
3.1	Caso de estudio y mediciones iniciales .....	35
3.1.1	Equipos y materiales .....	36
3.1.1.1	Fuente emisora del ruido .....	37
3.1.1.2	Elemento captador .....	37
3.1.1.3	Pulse LabShop .....	39
3.1.2	Campaña muestral .....	39
3.2	Diseño numérico de la pantalla acústica.....	40
3.2.1	Ecuaciones del modelo: Ecuación de Ondas .....	40
3.2.2	Método de elementos finitos: Comsol Multiphysics 5.5 .....	43
3.2.2.1	Matlab .....	45
3.3	Descarte y selección de pantallas en el Campus UPV .....	45
3.4	Comparativa con otras soluciones existentes .....	46
4.	ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	48

4.1	Modelo numérico .....	48
4.2	Comparativas con los demostradores .....	51
4.2.1	Demostrador RT1 .....	52
4.2.2	Demostrador RT2 .....	55
4.3	Comparativa con otras soluciones existentes .....	59
5.	CONCLUSIONES Y RELACIÓN CON LOS ODS .....	61
5.1	Relación con los ODS .....	62
6.	BIBLIOGRAFÍA .....	65
	ANEXOS .....	71

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Curvas de Fletcher y Munson (1933).....	7
Figura 2: Parámetros onda plana. ....	8
Figura 3: clasificación de diferentes fuentes de ruidos. ....	12
Figura 4: Comportamiento acústico del sonido cuando se coloca una pantalla acústica entre la fuente y el receptor.....	22
Figura 5: Pantalla acústica de hormigón.....	24
Figura 6: Pantalla acústica de madera.....	25
Figura 7: Pantalla acústica de módulos traslucida.....	25
Figura 8: Pantalla acústica metálica. ....	26
Figura 9: Pantalla acústica mixta o compuesta. ....	26
Figura 10: Pantalla acústica vegetal o paneles vegetales. ....	27
Figura 11: Diques de tierra. ....	27
Figura 12: Pantalla acústica basada en cristales de sonido. ....	29
Figura 13: 5 redes de Bravais en 2D: (a) Hexagonal, (b) Cuadrada, (c) Rectangular, (d) Rectangular centrada, donde las líneas punteadas forman un rectángulo oblicuo. ....	31
Figura 14: Direcciones principales de propagación en red cuadrada y triangular.....	32
Figura 15: Ejemplos de factor de llenado para red triangular (izquierda) y red cuadrada (derecha). .....	34
Figura 16: Audiograma donde se muestra el nivel de ruido en dB y la frecuencia de sonidos habituales.....	35
Figura 17: Generador diésel AVR.....	36
Figura 18: Denon Audio Commander. ....	37
Figura 19: Micrófono tipo 4935.....	38
Figura 20: cableado utilizado para micrófono tipo 4935.....	38
Figura 21: Interfaz del Pulse LabShop durante la medición. ....	39
Figura 22: Interfaz Comsol Multiphysics 5.5.....	43
Figura 23: Mallado utilizado en este proyecto. ....	45
Figura 24: Composición del modelo numérico de la pantalla acústica y distribución de sus elementos. .....	48
Figura 25: Especificaciones del estudio en COMSOL.....	50

Figura 26: Obtención de "a" en red triangular. ....	50
Figura 27: Demostrador RT1 campus de Vera (UPV).....	52
Figura 28: Vista lateral del Demostrador RT1 campus de Vera (UPV), donde se aprecia la disposición de los elementos en red triangular.....	52
Figura 29: Esquema de red triangular del demostrador 1 donde se muestra el valor de "a".....	53
Figura 30: Espectro de atenuación acústica en dB entre 100-800 Hz del modelo numérico (negro) y el modelo experimental del demostrador RT1 (rojo).....	54
Figura 31: Espectro de atenuación acústica en dB completo del modelo numérico (negro) y el modelo experimental del demostrador RT1 (rojo).....	55
Figura 32: Demostrador RT2 campus de Vera (UPV).....	55
Figura 33: vista lateral medición en demostrador RT2 campus de Vera (UPV).....	56
Figura 34: Esquema de red triangular del demostrador RT2 donde se muestra el valor de "a".....	56
Figura 35:Espectro de atenuación acústica en dB entre 100-800 Hz del modelo numérico (negro) y el modelo experimental del demostrador RT2 (azul). ....	57
Figura 36: Espectro de atenuación acústica en dB completo del modelo numérico (negro) y el modelo experimental del demostrador RT2 (azul).....	58
Figura 37: Espectro de atenuación acústica en dB entre 100-800 Hz del modelo numérico (negro), el modelo experimental del demostrador RT1 (rojo) y el modelo experimental del demostrador RT2 (azul).....	58
Figura 38: Espectro de atenuación acústica en dB completo del modelo numérico (negro), el modelo experimental del demostrador RT1 (rojo) y el modelo experimental del demostrador RT2 (azul)..	59
Figura 39: Objetivos de Desarrollo Sostenible u Objetivos Globales. ....	62

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Cronograma de actividades. ....	2
Tabla 2: Valores de exposición laboral al ruido según el RD 286/2006. ....	13
Tabla 3: Niveles sonoros y respuesta humana. ....	16
Tabla 4: Principales características de amplificador clase D de 200W RMS. ....	37
Tabla 5: Principales características del Micrófono tipo 4935. ....	38
Tabla 6: Principales características de los demostradores seleccionados. ....	51
Tabla 7: Comparativa entre las pantallas acústicas basadas en cristales de sonido frente a las pantallas acústicas tradicionales. ....	60
Tabla 8: Relación del trabajo de final de máster con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). ....	63

## RESUMEN

Los riesgos derivados de la exposición al ruido en el entorno laboral tienen que ser eliminados o cuando menos, ser reducidos a niveles lo más bajo posible. La reducción de estos riesgos se basa en los principios generales de prevención, donde se establece que una de las técnicas de reducción de ruido cuando no es factible actuar sobre el foco emisor del ruido consiste en limitar su transmisión, interponiendo entre el foco y las personas expuestas pantallas acústicas. Una pantalla acústica tradicional consiste básicamente en un material continuo rígido que está interpuesto entre la fuente y el receptor de ruido. En general, este tipo de pantallas demuestran una eficacia relativamente buena para frecuencias elevadas, no siendo muy efectivas a bajas frecuencias. Por otro lado, la posibilidad de manipular el sonido a través de estructuras periódicas motivó la idea de utilizar estos medios como una alternativa a las pantallas acústicas tradicionales. Este tipo de pantallas, denominadas pantallas acústicas basadas en cristales de sonido pueden diseñarse para atenuar rangos de frecuencia de manera selectiva, incluidas las bajas frecuencias. En este trabajo final de máster se presenta el diseño de una pantalla de estas características para ser utilizada en un entorno laboral afectado de ruido producido por maquinaria. Para el diseño de la pantalla acústica basada en cristales de sonido se utiliza el método de los elementos finitos mediante el software comercial COMSOL Multiphysics®. Por otro lado, se han validado los resultados numéricos obtenidos utilizando medidas realizadas en entorno real.

*Palabras clave:* prevención; ruido; pantalla acústica; cristal de sonido

## RESUM

Els riscos derivats de l'exposició al soroll a l'entorn laboral han de ser eliminats o, si més no, han de ser reduïts a nivells el més baix possible. La reducció d'aquests riscos es basa en els principis generals de prevenció, on s'estableix que una de les tècniques de reducció de soroll quan no és factible actuar sobre el focus emissor del soroll consisteix a limitar-ne la transmissió, interposant entre el focus i les persones exposades pantalles acústiques. Una pantalla acústica tradicional consisteix bàsicament en un material continu rígid que està interposat entre la font i el receptor de soroll. En general, aquest tipus de pantalles demostren una eficàcia relativament bona per a freqüències elevades, i no són gaire efectives a baixes freqüències. D'altra banda, la possibilitat de manipular el so mitjançant estructures periòdiques va motivar la idea d'utilitzar aquests mitjans com a alternativa a les pantalles acústiques tradicionals. Aquest tipus de pantalles, anomenades pantalles acústiques basades en cristalls de so poden dissenyar-se per atenuar rangs de freqüència de manera selectiva, incloses les baixes freqüències. En aquest treball final de màster es presenta el disseny d'una pantalla d'aquestes característiques per ser utilitzada en un entorn laboral afectat de soroll produït per maquinària. Per al disseny de la pantalla acústica basada en cristalls de so es fa servir el mètode dels elements finits mitjançant el programa comercial COMSOL Multiphysics®. D'altra banda, s'han validat els resultats numèrics obtinguts fent servir mesures realitzades en entorn real.

*Paraules clau:* prevenció; soroll; pantalla acústica; cristall de so

## ABSTRACT

The risks associated with workplace noise exposure should be eliminated or, at the very least, minimized to the lowest possible levels. Reducing these risks is based on general principles of prevention, where one of the techniques for reducing noise when it is impossible to act on the noise source itself is to limit its transmission by interposing acoustic screens between the source and the exposed individuals. A traditional acoustic screen consists of a rigid continuous material between the noise source and the receiver. Generally, this type of screen demonstrates relatively good effectiveness at high frequencies but could be more effective at low frequencies. On the other hand, the possibility of manipulating sound through periodic structures led to using these resources as an alternative to traditional acoustic screens. These screens, known as sonic crystals-based acoustic screens, can be designed to attenuate frequency ranges, including low frequencies selectively. In this final Master's project, the design of such a screen is presented for use in a noise-affected workplace caused by machinery. The finite element method uses the commercial software COMSOL Multiphysics® to design the acoustic screen based on sonic crystals. Additionally, the numerical results obtained have been validated using measurements taken in a natural environment.

*Keywords:* prevention; noise; acoustic screen; sonic crystal

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Contexto y justificación

El ruido es aquel sonido no deseado proveniente de cualquier fuente acústica que genera sensación de molestia. Puede provocar diferentes efectos sobre la salud en función del tiempo de exposición y de los niveles sonoros. Las afecciones pueden darse de forma fisiológica, es decir, que tanto los órganos relacionados con la audición u otros del resto del cuerpo humano queden dañados, como puede ser el caso de la exposición a muy altos niveles de ruido donde se daría el caso de la fatiga auditiva en el caso más leve hasta las alteraciones auditivas permanentes como pueden ser la hipoacusia incluso la sordera. Otro tipo de afecciones que provoca el ruido están relacionadas con enfermedades psicológicas como el estrés, el insomnio, la falta de concentración, disminución del rendimiento incluso provocar depresión o aumento de la agresividad (Aleaga Del Salto, 2017).

Este trabajo de máster analiza el problema del ruido producido por una máquina en un entorno laboral y propone una solución: diseño de una pantalla acústica basada en cristales de sonido para colocarse entre la fuente (máquina) y el receptor (trabajadores). El ruido que afecta a los trabajadores tiene unas componentes frecuenciales muy definidas y que pueden ser reducidas mediante el uso de una pantalla acústica. En concreto, las pantallas acústicas basadas en cristales de sonido tienen la posibilidad de sintonizarse para atenuar ciertos rangos de frecuencias. Aprovechando este hecho, se selecciona una de estas pantallas para conseguir reducir el nivel sonoro recibido por los trabajadores.

Con todo ello, se analizará inicialmente el problema para definir claramente el rango de frecuencias a atenuar. Seguidamente se realizará un diseño de una pantalla utilizando el método de elementos finitos, técnica habitual para estos casos, que consiga atenuar la transmisión del ruido de la máquina. Finalmente se realizarán medidas experimentales para verificar los resultados numéricos.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo general

Diseñar mediante elementos finitos una pantalla acústica basada en cristales de sonido que consiga atenuar el rango de frecuencias que produce una máquina en un entorno laboral.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Aprender y desarrollar la aplicación de COMSOL Multiphysics® para la modelización de dispositivos de control de ruido mediante el Método de Elementos Finitos.
- Conocer el uso de un sistema experimental de medida para caracterizar dispositivos acústicos en entorno controlado.
- Determinar, mediante condiciones controladas, el nivel de atenuación que presenta la pantalla diseñada numéricamente.

## 1.3 Cronograma

El desarrollo de la investigación se llevó a cabo de manera metódica y organizada, siguiendo un cronograma cuidadosamente planificado que estableció las actividades a realizar en cada etapa del proyecto. En la Tabla 1 se muestra el cronograma de actividades distribuido entre los meses de marzo a agosto donde se especifican los plazos específicos para cada tarea.

*Tabla 1: Cronograma de actividades.*

*Fuente: propia.*

CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES																								
	MARZO				ABRIL				MAYO				JUNIO				JULIO				AGOSTO			
ACTIVIDADES	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Selección del tema de investigación.																								
Elaboración y presentación de la propuesta para el Trabajo Fin de Máster (TFM).																								

	CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES																							
	MARZO				ABRIL				MAYO				JUNIO				JULIO				AGOSTO			
ACTIVIDADES	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Aprobación del tema del TFM.																								
Investigación y búsqueda de fuentes bibliográficas.																								
Definición y análisis del problema: "Ruido causado por una máquina en entorno laboral".																								
Instalación y familiarización con el programa COMSOL.																								
Aprendizaje del nuevo Software específico de simulación COMSOL Multiphysics (Elementos finitos).																								
Propuestas de modelos numéricos para el diseño pantallas acústicas utilizando COMSOL.																								
Medida en condiciones controladas o "in situ", según convenga de la pantalla diseñada.																								
Selección final de los modelos numéricos.																								
Análisis de los resultados y extracción de conclusiones.																								
Elaboración del informe final.																								

## 1.4 Relación del trabajo con la titulación

Este trabajo guarda una estrecha relación, como es de esperar, con la asignatura de "Técnicas de Evaluación y Control de Ruidos". Dentro de esta disciplina, se abordaron diversos temas, entre los que se destacan el estudio de la propagación del sonido en entornos al aire libre y la atenuación del mismo a través de distintos elementos, incluyendo las pantallas acústicas. Además, cabe mencionar que se establece una interconexión con otras asignaturas, tales como "Riesgos Higiénicos de la Comunidad Valenciana", "Riesgos Emergentes" e "Higiene Laboral", al tratarse de un estudio que viene a dar respuesta a una problemática latente en la sociedad.

En mis prácticas curriculares del Máster de Prevención de Riesgos Laborales, tuve que experimentar una situación en la que se produjo un corte temporal en el suministro eléctrico. Como respuesta a esta contingencia, fue necesario recurrir a la utilización de un generador eléctrico, lo que permitió resolver un problema, pero, a su vez, generó otra preocupación: el ruido. Esto supuso un nuevo riesgo que no había sido previamente considerado en las evaluaciones correspondientes. Esta experiencia despertó en mí una profunda curiosidad sobre cómo sería la manera más adecuada de abordar tales situaciones, lo que nos ha llevado a la concepción de este proyecto.

## 1.5 Glosario

- **Acústica:** es la disciplina que estudia el sonido en todos sus posibles aspectos: generación, radiación, propagación, confinamiento, etc., así como los recursos para mejorar la amplitud de un ambiente para la música y/o la palabra.
- **Amplitud:** en una señal periódica o cuasi-periódica, el máximo valor (o valor de pico) en un periodo.
- **Cámara anecoica:** recinto revestido en todas sus superficies con materiales acústicos de muy alta absorción en el cual se ha eliminado prácticamente toda reflexión sonora.
- **Campo libre:** sonoro en el cual no existen obstáculos para las ondas sonoras.
- **Coefficiente de absorción sonora:** cociente entre la energía sonora que es absorbida por una superficie y la que incide sobre ella.
- **Decibelio (dB):** unidad de intensidad acústica equivalente a la décima parte de un 1 belio.
- **Demostrador:** ejemplar o prototipo de pantalla acústica.
- **Difracción:** cambio producido en la dirección de propagación de una onda en presencia de un obstáculo.

- **Energía:** magnitud física asociada a un determinado sistema que indica, por ejemplo, la capacidad de este de realizar trabajo mecánico.
- **Frecuencia:** número de variaciones de presión por segundo de una función periódica en el tiempo, el número de veces que la magnitud física se repite a sí misma en un segundo. Unidad hercio (Hz).
- **Isofónico:** dicho de dos o más sonidos que tienen igual sonoridad.
- **Ley de Bragg:** ley formulada por W. L. Bragg que trata sobre la reflexión de los rayos X en sustancias cristalinas y establece que para que exista una reflexión de intensidad máxima se debe cumplir que:  $2 d \sin \theta = n \lambda$ , donde: d es la distancia entre 2 planos reticulares contiguos, a determinar;  $\theta$  el ángulo complementario del de incidencia del haz de rayos X respecto de los planos reticulares;  $\lambda$  la longitud de onda y número entero.
- **Presión acústica:** la variación de la presión atmosférica en un punto consecuencia de la propagación a través del aire de una onda sonora.
- **Presión sonora:** la diferencia instantánea entre la presión originada por la energía sonora y la presión barométrica en un punto determinado del espacio.
- **Reverberación:** persistencia del sonido en un ambiente acústico cerrado o semicerrado aún después de interrumpida la fuente, debida a la acumulación de energía sonora debido a las reflexiones.
- **Ruido:** es un sonido no deseado y molesto. Es aquel, producido por la mezcla de ondas sonoras de distintas frecuencias y distintas amplitudes.
- **Ruido blanco:** ruido aleatorio cuya densidad espectral de potencia a lo largo de toda la banda de frecuencias es la misma.
- **Sistemas de sonido PA:** son cualquier sistema electrónico que se utilice para amplificar el volumen de una fuente de sonido dirigida a un público.
- **Sonido:** la vibración de las moléculas de aire provoca una variación de la presión atmosférica, es decir, el paso de una onda sonora produce una onda de presión que se propaga por el aire.
- **Salud:** estado de absoluto bienestar físico, mental y social, según la definición de la Organización Mundial de la Salud (OMS).
- **Vibraciones:** perturbación que provoca la oscilación de los cuerpos sobre su posición de equilibrio.

## 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1 Ruido Laboral y Contaminación Acústica

El ruido laboral se refiere al sonido no deseado presente en los lugares de trabajo que puede ser perjudicial para la audición y la salud en general de los trabajadores. La OMS considera ruido a todo sonido que exceda los 65 decibelios (dB). En este apartado se busca definir la contaminación acústica en el entorno laboral, así como las posibles fuentes y consecuencias de la exposición al ruido en el trabajo (OMS, 2023).

#### 2.1.1 El ruido

Para entender el concepto de ruido, es necesario saber lo que se conoce como sonido. El sonido según la Real Academia Española (RAE) es la “sensación producida en el órgano del oído por el movimiento vibratorio de los cuerpos, transmitido por un medio elástico, como el aire” (Real Academia Española, 2023).

Por su parte, la fundación Aquae define el sonido como una forma de energía que se transmite mediante vibraciones en forma de ondas acústicas a través de un medio de transmisión, ya sea un gas, líquido o sólido (Aquae, 2023).

Solo las ondas acústicas que tienen frecuencias dentro del rango aproximado de 20 Hz a 20 kHz, conocido como el rango de frecuencia audible, son capaces de generar una percepción auditiva en los seres humanos. En el aire a una presión atmosférica normal, estas ondas sonoras tienen longitudes de onda que van desde aproximadamente 17 metros hasta 1,7 centímetros. Por encima de los 20 kHz, las ondas sonoras se denominan ultrasonido y no son audibles para los humanos mientras que, las ondas sonoras por debajo de los 20 Hz se conocen como infrasonido (Aquae, 2023).

El oído humano no tiene una sensibilidad uniforme en todas las frecuencias; algunos rangos de frecuencia pueden ser percibidos con mayor facilidad o claridad que otros. En la Figura 1 se observan las curvas Fletcher-Munson o curvas isofónicas obtenidas a través de diversos experimentos donde se contrasta la relación entre la percepción del volumen de un sonido por el oído humano a lo largo del rango audible. La curva isofónica típica muestra cómo el oído humano es más sensible a ciertas frecuencias.

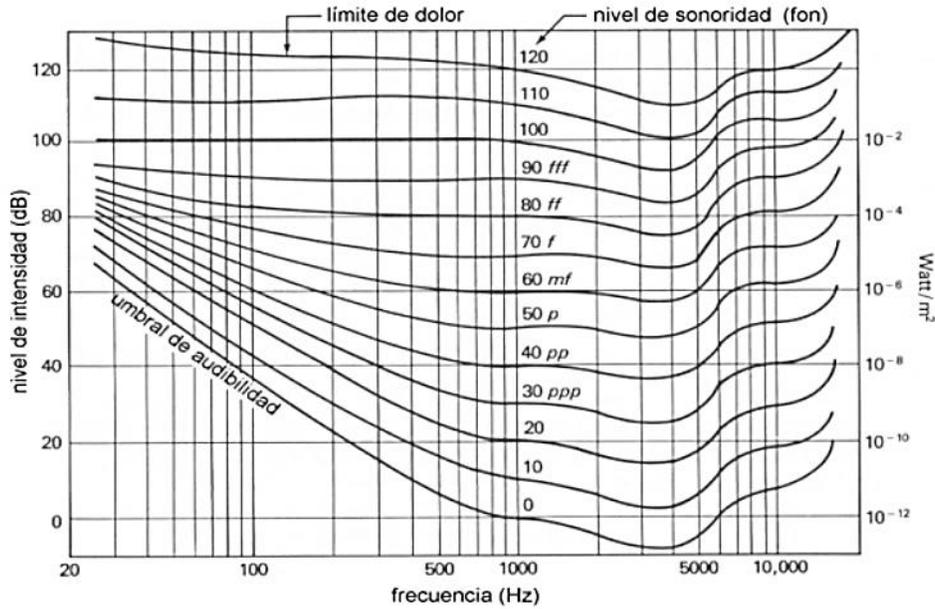


Figura 1: Curvas de Fletcher y Munson (1933).

Fuente: (Ramírez, 2014).

El Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST) define el ruido como “todo sonido peligroso, molesto, inútil o desagradable”. El ruido puede ser examinado como un conjunto de características físicas cuantificables que involucran variables objetivas, tales como la amplitud (nivel de presión sonora), la frecuencia (y su recíproco, la longitud de onda) y la fase (Gómez, 2007) (INSST, 2023). Los ruidos, en contraste con los sonidos, se caracterizan por la ausencia de periodicidad debido a que son generados por ondas que contienen una amplia gama de frecuencias, en comparación con aquellas que producen sonidos. Es precisamente esta particularidad la que conduce a una sensación desagradable o molesta en el cerebro y los sentidos (Coluccio Leskow, 2016). En la Figura 2 se muestra el principio de propagación de una onda plana y los elementos que la componen.

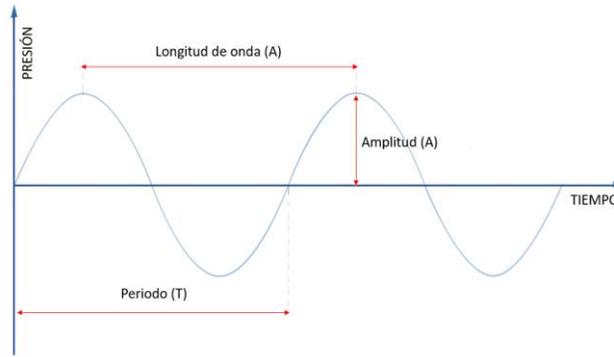


Figura 2: Parámetros onda plana.  
Fuente: propia.

Es importante remarcar que, físicamente, no hay una distinción entre el sonido y el ruido: el sonido es una percepción sensorial provocada por procesos fisiológicos en el cerebro auditivo. En consecuencia, no es posible definir el ruido exclusivamente en función de los parámetros físicos del sonido. En cambio, es práctica común definir el ruido simplemente como sonido no deseado. Sin embargo, en algunas situaciones, el ruido puede afectar negativamente la salud en forma de energía acústica (Moreno Ceja et al., 2015).

### 2.1.2 Contaminación acústica

El Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) define la contaminación acústica como la presencia de ruidos o vibraciones en el entorno, independientemente de su fuente, que causan molestia, riesgo o daño a las personas, afectan el desarrollo de sus actividades o provocan efectos negativos en bienes de cualquier tipo, así como en el medio ambiente (MITECO, 2023).

Según los informes de la OMS se establece que la exposición continua a niveles de ruido superiores a los 85 dB se clasifica como contaminación acústica y puede implicar riesgos para la salud (ver Tabla 2) (Sposob, 2018).

El sentido de la audición se lleva a cabo a través del oído, un órgano anatómico específicamente diseñado para recibir y procesar las ondas sonoras. Estas ondas se convierten en señales eléctricas dentro del oído, las cuales viajan a lo largo de la vía auditiva y otras vías complementarias que se

dirigen hacia el hipocampo y el sistema reticuloendotelial. Esta progresión múltiple explica los efectos auditivos de los sonidos, así como los efectos fisiológicos y emocionales derivados de la activación y mantenimiento de vías neurológicas adicionales a la auditiva. Sin embargo, es importante destacar que el sonido también genera un desplazamiento en el medio circundante en forma de ondas de presión sonora, es decir, vibraciones. Estas vibraciones impactan en todo el organismo, más allá del oído. Es necesario diferenciar entre el ruido y las vibraciones, ya que son conceptos distintos, aunque ambos fenómenos físicos (el movimiento ondulatorio y el movimiento oscilatorio) ocurren simultáneamente. La magnitud del efecto perjudicial dependerá principalmente de la intensidad de la presión sonora (Gómez, 2007).

### 2.1.3 Definición de ruido laboral

El ruido laboral se refiere al ruido no deseado o excesivo presente en los entornos de trabajo. Es un tipo de contaminación acústica que puede tener efectos perjudiciales para la salud y el bienestar de los trabajadores. El ruido laboral puede provenir de diversas fuentes, como maquinaria industrial, equipos de construcción, vehículos, herramientas eléctricas o actividades relacionadas con la producción y el procesamiento de materiales, que serán explorado en el siguiente apartado. La exposición continua o prolongada a niveles altos de ruido en el lugar de trabajo puede causar problemas de salud, tanto físicos como psicológicos (Espín Guerrero & Aleaga Del Salto, 2017).

El ruido se conceptualiza como toda manifestación sonora innecesaria e indeseable, por lo cual se puede deducir que constituye un riesgo laboral observado desde tiempos remotos. Sin embargo, fue a partir de la revolución industrial cuando un considerable número de individuos comenzó a verse expuesto a niveles elevados de ruido en su entorno laboral. Derivado de esto, como es lógico suponer, desde aquel entonces hasta la actualidad, se ha prestado una atención considerable al ruido como un riesgo ocupacional de gran importancia, asociado de manera significativa con la pérdida irreversible de la capacidad auditiva (Espín Guerrero & Aleaga Del Salto, 2017).

#### 2.1.4 Acústica y fuentes de ruido en entornos laborales

Según el Centro Canadiense para la Salud y Seguridad en el Trabajo, el ruido en la industria, dependiendo de cómo cambie con el tiempo, puede ser continuo, intermitente o impulsivo (CCOHS, 2023).

- **Ruido continuo:** es aquel que permanece estable y constante por un determinado período de tiempo. El ruido de calderas, bombas y ventiladores son ejemplos de este tipo de ruido. En estos casos, los valores no exceden los 6 dB (CCOHS, 2023).
- **Ruido intermitente:** es aquel en el que hay una combinación de periodos relativamente tranquilos y ruidosos. En estos, se presentan diferencias mayores a 6 dB, entre valores mínimos y máximos. La mayor parte del ruido en las fábricas es intermitente, debido a la gran cantidad de máquinas que operan en ciclos (CCOHS, 2023).
- **Ruido de impacto:** es un ruido fuerte momentáneo de muy corta duración y niveles de alta intensidad que aumentan y disminuyen en menos de 1 segundo, y presentan diferencias mayores a los 35 dB entre sus valores máximos y mínimos. En la industria, son ruidos generalmente provocados por el impacto o explosiones de troqueladoras, martillos, entre otros (CCOHS, 2023) (Royo, 2012).
- **Ruido de bajas frecuencias:** es enérgico, continuo y de frecuencia amplia, proviene comúnmente de las plantas de energía, generadores eléctricos y motores de diésel.
- **Ruido tonal:** es aquel producido por un desequilibrio que tiene un tono determinado y causa vibraciones continuas. Ejemplos de esto en la industria son los motores, cajas de cambios o ventiladores (CA&CCA, 2019).

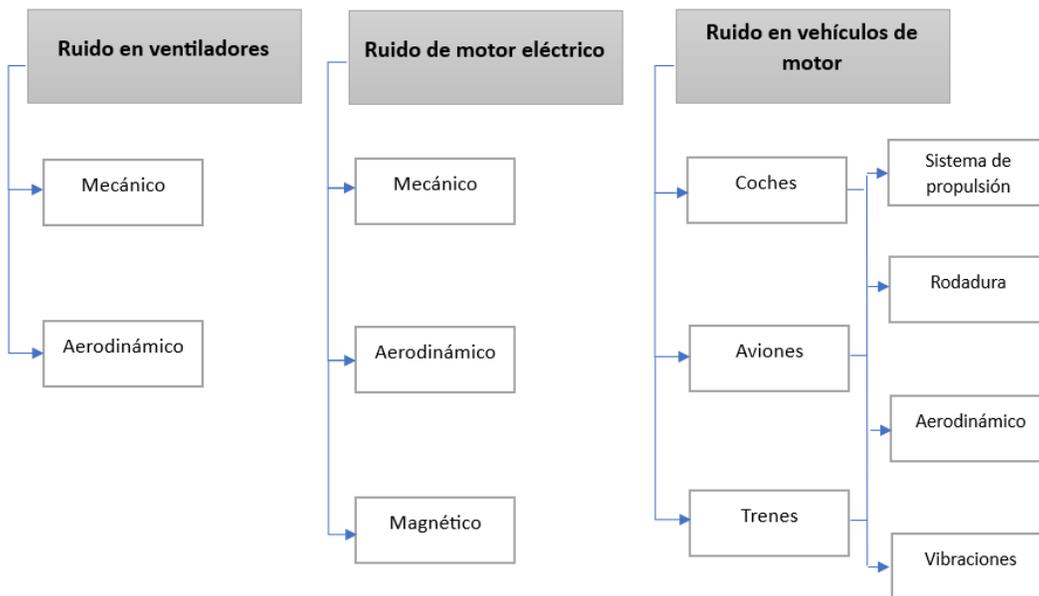
Las principales fuentes de ruido provienen de vibraciones, rozamientos, turbulencia, la rotación de piezas y máquinas. Algunos de los principales ejemplos en un entorno laboral son:

- **Ventiladores:** los ruidos que generan los ventiladores pueden tener un origen mecánico o aerodinámico. El origen mecánico es producido por los rozamientos de los álabes, las carcasas de los ventiladores o sus motores. El origen aerodinámico se refiere al ruido provocado por las fluctuaciones de presión en la superficie del álabe y también a las velocidades de las corrientes de aire generadas (GA, 2003).
- **Motores eléctricos:** el origen de los ruidos de los motores eléctricos puede ser mecánico (distorsiones, deformaciones y desalineaciones de sus piezas internas), aerodinámico (en su

mayoría se deben al movimiento del aire debido a las vibraciones del rotor) o magnético en función a las fuerzas magnéticas producidas por los rotores y demás piezas mecánicas (GA, 2003).

- **Vehículos de motor:** los ruidos generados por los vehículos de motor pueden ser ocasionados por la rodadura (cuando hacen contacto con la superficie) y por el sistema de propulsión en función al número de revoluciones del motor por minuto (GA, 2003).
- **Generadores eléctricos:** se componen de tres partes básicas que son el motor de accionamiento, el rotor (se encarga del movimiento) y el estator (que es lo que hace girar el rotor). La cantidad de ruido que puede emitir un generador eléctrico oscila entre los 70 dB y los 110 dB (Seoadmin, 2021).
- **Transformadores:** el ruido generado por transformadores puede ser de origen electroestático, por sus elementos refrigerantes, o por el paso de la corriente. Las fuerzas electroestáticas provocan que el núcleo de las bobinas vibre y los elementos refrigerantes que deben llevar los transformadores para funcionar correctamente como los ventiladores también producen ruido, aunque de menor intensidad que el núcleo. Se considera que el ruido emitido por los transformadores es de tipo continuo (Álvarez Balderrama, 2002).
- **Calderas:** se utilizan mucho en la industria de la electricidad, específicamente en plantas generadoras de electricidad. Sin importar como se produzca la combustión (gas, motores, aire, ventiladores), el ruido que producen las calderas suele ser de tipo tonal (Álvarez Balderrama, 2002).
- **Turbinas de vapor:** el ruido producido por las de gas puede ser por escapes de gas, entrada de aire al compresor o los componentes rotatorios, así como también sus componentes refrigerantes como es el caso de los transformadores. La potencia que pueden producir estos equipos puede llegar alcanzar los 160 dB. El tipo de ruido producido por las turbinas es un ruido continuo y de banda ancha (Gerges & Behar, 2001).
- **Compresores:** se utilizan en una gran variedad de industrias. Los más utilizados son los centrífugos, rotatorios y recíprocos. El ruido generado por compresores suele ser producido por la toma de aire y la tubería de salida en donde se genera turbulencia por el paso de los fluidos (Gerges & Behar, 2001).
- **Hornos:** el ruido que producen los hornos tiene dos orígenes principales, la combustión que se produce en el interior del aparato y el ruido producido al ingresar el aire y el gas los cuales producen una reacción en el interior del horno (Gerges & Behar, 2001).

Las principales fuentes de perturbación acústica incluyen los desequilibrios en piezas rotativas, vibraciones, rozamientos, fuerzas magnéticas, sistemas de propulsión, ruidos de impacto y turbulencias (aerodinámico). En la Figura 3 se muestra la clasificación de los ruidos más comunes según su origen. Debido a la complejidad de los factores que contribuyen al ruido en máquinas, resulta arduo encontrar una expresión sencilla que describa de forma exacta los espectros sonoros. Por esta razón, se recurre a expresiones empíricas basadas en experiencias y estudios bibliográficos para evaluar dichos espectros sonoros (GA, 2003).



*Figura 3: clasificación de diferentes fuentes de ruidos.  
Fuente: propia.*

### 2.1.5 Legislación y normativas relacionadas con el ruido laboral

En España, el Real Decreto 286/2006 regula la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores frente a los riesgos derivados de la exposición al ruido. Este marco legal especifica los requisitos que deben cumplirse para la evaluación de riesgos en los lugares de trabajo donde puedan existir riesgos relacionados con el ruido. Además, se indican los valores de referencia y las medidas preventivas y de control que se deben tomar cuando se superen estos valores. En la Tabla 2 se muestran los niveles de exposición laboral según dicho Real Decreto, los valores inferiores y superiores que dan lugar a una acción y los valores límite de exposición (INSST, 2023).

Tabla 2: Valores de exposición laboral al ruido según el RD 286/2006.

Fuente: (INSST, 2023).

VALORES INFERIORES DE EXPOSICIÓN QUE DAN LUGAR A UNA ACCIÓN	VALORES SUPERIORES DE EXPOSICIÓN QUE DAN LUGAR A UNA ACCIÓN	VALORES LÍMITE DE EXPOSICIÓN
L <sub>aeq,d</sub> : 80 dB(A) L <sub>pico</sub> : 135 dB(C)	L <sub>aeq,d</sub> : 85 dB(A) L <sub>pico</sub> : 137 dB(C)	L' <sub>Aeq,d</sub> : 87 dB(A) L' <sub>pico</sub> : 140 dB(C) L'=L-Atenuación protector auditivo

La Unión Europea (UE) ha establecido directrices y regulaciones específicas para abordar este tema, con el objetivo de prevenir la pérdida auditiva y otros efectos adversos en la salud de los trabajadores, algunas de estas se detallan a continuación:

- DIRECTIVA 2000/14/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 8 de mayo de 2000 relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros sobre emisiones sonoras en el entorno debidas a las máquinas de uso al aire libre.
- DIRECTIVA 2003/10/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 6 de febrero de 2003, sobre las disposiciones mínimas de seguridad y de salud relativas a la exposición de los trabajadores a los riesgos derivados de los agentes físicos (ruido) (decimosexta Directiva específica con arreglo al apartado 1 del artículo 16 de la Directiva 89/391/CEE).
- DIRECTIVA 2005/88/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 14 de diciembre de 2005, por la que se modifica la Directiva 2000/14/CE relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros sobre emisiones sonoras en el entorno debidas a las máquinas de uso al aire libre.
- DIRECTIVA 2007/30/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 20 de junio de 2007 por la que se modifica la Directiva 89/391/CEE del Consejo, sus directivas específicas y las Directivas 83/477/CEE, 91/383/CEE, 92/29/CEE y 94/33/CE del Consejo, a fin de simplificar y racionalizar los informes sobre su aplicación práctica.

Adicional a lo anterior mencionado, en España, el ruido laboral se encuentra regulado por los siguientes Reales Decretos:

- REAL DECRETO 1215/1997, de 18 de julio por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud para la utilización por los trabajadores de los equipos de trabajo.
- REAL DECRETO LEGISLATIVO 5/2000, de 4 de agosto, por el que se aprueba el Texto Refundido de la Ley sobre Infracciones y Sanciones en el Orden Social.
- REAL DECRETO 212/2002, de 22 de febrero, por el que se regulan las emisiones sonoras en el entorno debidas a determinadas máquinas de uso al aire libre.
- REAL DECRETO 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación.
- REAL DECRETO 1299/2006, de 10 de noviembre, por el que se aprueba el cuadro de enfermedades profesionales en el sistema de la Seguridad Social y se establecen criterios para su notificación y registro.
- REAL DECRETO 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas.
- REAL DECRETO 1644/2008, de 10 de octubre, del Ministerio de la Presidencia por el que se establecen las normas para la comercialización y puesta en servicio de las máquinas.
- ORDEN ICT/155/2020, de 7 de febrero, por la que se regula el control metrológico del Estado de determinados instrumentos de medida.

Aunado a esto existen diversas Notas Técnicas de Prevención (NTP) elaboradas por el INSST, que proporcionan información técnica y orientativa para regular las condiciones en los ambientes laborales entre las que destacan las siguientes:

- NTP 0205: Ultrasonidos: exposición laboral – Año 1988.
- NTP 0270: Evaluación de la exposición al ruido. Determinación de niveles representativos – Año 1991.
- NTP 0638: Estimación de la atenuación efectiva de los protectores auditivos – Año 2003.
- NTP 0950: Estrategias de medición y valoración de la exposición a ruido (I): incertidumbre de la medición – Año 2012.
- NTP 0951: Estrategias de medición y valoración de la exposición a ruido (II): tipos de estrategias – Año 2012.
- NTP 0952: Estrategias de medición y valoración de la exposición a ruido (III): ejemplos de aplicación – Año 2012.

- NTP 0960: Ruido: control de la exposición (I). Programa de medidas técnicas o de organización – Año 2012.
- NTP 0980: Protectores auditivos: orejeras dependientes del nivel – Año 2013.

#### 2.1.6 Riesgos laborales asociados al ruido

La exposición prolongada a niveles altos y constantes de ruido conlleva frecuentemente la aparición de lesiones auditivas progresivas, que incluso pueden derivar en sordera. Estas alteraciones dependen de las características del riesgo y de la exposición individual. Se reconocen problemas auditivos como el tinnitus de tono agudo, el desplazamiento temporal del umbral de audición y el desplazamiento permanente del umbral de audición, así como traumas acústicos agudos y crónicos (Gamine et al., 2010).

La hipersensibilidad auditiva es una condición en la que las personas experimentan una sensibilidad excesiva a los sonidos, lo cual puede estar asociado a otras alteraciones y condiciones patológicas. Aunque las causas exactas aún no se conocen completamente, se sabe que la exposición prolongada a niveles altos de ruido puede desencadenar esta sensibilidad. La hipersensibilidad auditiva puede afectar el trabajo y la calidad de vida social de los individuos, manifestándose como incomodidad frente a sonidos de baja o moderada intensidad (ver Tabla 3). Además, la pérdida auditiva inducida por el ruido es una afección común y permanente que se puede prevenir reduciendo la exposición al sonido (Gamine et al., 2010).

También existe la Pérdida Auditiva Inducida por el Ruido (PAIR), que solo puede prevenirse al eliminar o reducir los niveles de exposición al sonido. Esta se considera una de las enfermedades ocupacionales más comunes y la segunda lesión ocupacional más reportada. La PAIR es permanente, irreversible y no existe un tratamiento efectivo cuando se debe a una exposición excesiva (Gamine, et al., 2010).

El ruido también puede afectar al sistema circulatorio, generando taquicardia y aumento de la presión sanguínea. Asimismo, puede disminuir la actividad de los órganos digestivos, acelerar el metabolismo y el ritmo respiratorio, y provocar trastornos del sueño, irritabilidad y fatiga mental, entre otros (Gamine et al., 2010).

Tabla 3: Niveles sonoros y respuesta humana.

Fuente: (Serrano Pérez et al., 2009).

Sonidos Característicos	Nivel de presión sonora (dB)	Efecto
Zona de lanzamiento de cohetes (sin protección)	180	Pérdida auditiva irreversible
Sirena antiaérea	140	Dolor fuerte
Trueno	130	-
Despegue de jets (60m)	120	-
Martillo neumático (concierto de Rock)	110	Extremadamente fuerte
Petardos	100	Muy fuerte
Tránsito urbano	90	Muy molesto
Reloj despertador (0,5m)	80	Molesto
Restaurante ruidoso Oficina	70	Difícil uso del teléfono
Conversación normal	60	Intrusivo
Tránsito de vehículos livianos (30m)	50	Silencioso
Dormitorio	40	-
Biblioteca	30	Muy silencioso
Estudio de radio difusión	20	-
-	10	Apenas audible

El estrés y la fatiga generados por el ruido pueden llevar a una disminución de la calidad del trabajo, aumentar los errores y reducir la eficiencia en las tareas laborales. La capacidad de alerta y atención disminuida como resultado del ruido puede aumentar el riesgo de accidentes laborales. La falta de concentración y la disminución de la capacidad para percibir señales de peligro o advertencias pueden conducir a situaciones peligrosas en el entorno de trabajo (Aleaga Del Salto, 2017).

## 2.2 Control del ruido

El control del ruido mediante pantallas acústicas es una buena estrategia en la gestión del ruido no deseado en diversos entornos, incluyendo el laboral. La comprensión de los fundamentos subyacentes a este proceso es crucial para la efectividad de estas estructuras en la reducción del impacto acústico. La eficacia de las pantallas acústicas se basa en dos factores clave: el aislamiento acústico y el coeficiente de absorción acústica. El aislamiento acústico mide cuánta energía acústica pasa a través de la pantalla hacia el receptor, mientras que el coeficiente de absorción acústica evalúa cuánta energía sonora se refleja hacia la fuente. El diseño optimizado de estas estructuras busca maximizar ambos parámetros para lograr los resultados deseados. (Segura Mateu, 2013)

### 2.2.1 Principios de propagación y transmisión del sonido

Según Federico Miyara, en su libro “Control de ruido”, define el sonido como “una vibración del aire que se propaga en forma de ondas de presión. En ausencia de sonido, la presión atmosférica alcanza un estado de equilibrio y es constante en el tiempo y en el espacio. Cuando aparece una perturbación, por ejemplo, la vibración de un objeto, se producen variaciones de presión y estas variaciones no sólo se producen a lo largo del tiempo (acompañando a la perturbación) sino que se propagan también por el espacio con cierta velocidad  $c$ , de tal modo que al cabo de un tiempo  $t$  las variaciones de presión llegan a una distancia  $c \cdot t$  de donde se produjo originalmente la perturbación” (Miyara, 1999).

La velocidad del sonido  $c$  en un gas depende de su peso molecular y de su temperatura, según la ecuación 1:

$$c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (1)$$

Donde:

$\gamma = C_p/C_v = 1,4$  para gases diatómicos (como el aire),

$R = 8,31 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$ ,

$M =$  masa de 1 mol en kg/mol = 0,0288 kg/mol para el aire,

$T =$  temperatura absoluta en K.

La velocidad de propagación del sonido en el aire suele ser de alrededor de 340 metros por segundo, aunque puede variar según las condiciones ambientales como la temperatura y la humedad. El sonido se transmite a través de ondas que generan variaciones de presión en el aire, moviéndose en la misma dirección que la perturbación inicial. Cuando el sonido se origina en un entorno homogéneo, se propaga en forma de ondas esféricas que se alejan del punto de origen. Sin embargo, cuando el sonido se produce en un espacio cerrado, como una habitación, se encuentra con reflexiones y absorciones en los materiales presentes y es influenciado por la geometría del entorno. Estos factores pueden afectar la propagación del sonido, dando lugar a fenómenos como la reverberación y modificando su distribución espacial (Buitrago, 2010).

### 2.2.2 Tecnologías existentes para reducir el ruido en entornos laborales

Es importante señalar que la metodología a implementar son el conjunto de actuaciones enfocadas principalmente a incidir sobre el foco o la fuente que genera el ruido, pero cuando no existe la posibilidad de eliminación o las medidas a implementar son de elevado coste, entonces se procede a actuar sobre el medio donde se propaga o directamente sobre las personas afectadas o receptores. Las medidas a adoptar irán en función de los parámetros imperantes, siempre intentando evaluar la solución más óptima para cada caso de estudio.

En primer lugar, están las medidas enfocadas a actuar directamente sobre la fuente que genera el ruido, las cuales en términos generales son las más convenientes siempre que sea posible. Normalmente estas medidas están enfocadas al diseño de los equipos o la modificación de las características de los existentes con la finalidad de eliminar el ruido.

En función de la fuente emisora del ruido existen diferentes formas para controlar o reducir los niveles de ruido, los cuales dependerán de las necesidades de cada industria, por lo que para cada caso de estudio existe una medida más o menos eficiente, en función de los requerimientos, entre las diversas opciones existentes, se establecen las siguientes:

- **Paneles acústicos**, los cuales permiten reforzar las prestaciones acústicas de los cerramientos.

- **Barreras o pantallas acústicas**, son estructuras exteriores que permiten la amortiguación del ruido generado por equipos en campo abierto.
- **Encapsulados acústicos**, cerramiento aislante de sonido que ha de colocarse en el perímetro de equipos industriales completo destinado a atenuar el ruido generado por el foco sonoro o máquina industrial.
- **Amortiguadores**, se les conoce como aisladores acústicos, es un tipo de soporte o apoyo destinado a reducir las vibraciones evitando así su propagación a través de las estructuras.
- **Bancada de inercia antivibratoria o suelos flotantes**, son sistemas que hacen posible la disminución del ruido transmitido por vibraciones mecánicas a la estructura portante que alberga un equipo o máquina industrial.

En sectores industriales en los casos en los que no es posible actuar directamente sobre la fuente generadora del ruido, una de las posibles soluciones más usadas para disminuir el ruido en el medio es el uso de cabinas (encapsulado acústico), el cual es uno de los métodos más implementado para encapsular los ruidos generados por los equipos industriales, por ser sencillo y eficaz. Es importante tener en cuenta que en los casos en los que los equipos requieran de grandes zonas de ventilación o en los que las tareas a realizar por los trabajadores hacen necesario un trabajo de carácter manual o donde la interacción entre el equipo y el trabajador es continua, no es posible su implementación y se ve necesario la utilización de estrategias diferentes.

Este caso de estudio se centra en el uso pantallas acústicas de cristales sónicos como sistema de reducción de emisión sonora de una fuente en su transmisión, razón por la cual se desarrolla de forma más detallada en el siguiente subtema.

### 2.2.3 Pantallas acústicas y su importancia en la reducción del ruido

Una de las soluciones para el control del ruido ambiental en la fase de transmisión viene dada por la utilización de pantallas acústicas. Se utilizan comúnmente en áreas donde el ruido generado por fuentes externas, como carreteras, ferrocarriles o instalaciones industriales, afecta negativamente a la calidad de vida de las personas. El funcionamiento de una pantalla acústica convencional se basa en el paso de las ondas sonoras a través de ella. La pantalla permite que las ondas se transmitan,

absorban, reflejen y difracten, lo que resulta en una reducción del nivel de ruido. Su importancia radica en su capacidad para atenuar y bloquear el sonido no deseado.

La longitud de onda de una onda sonora está inversamente relacionada con su frecuencia ( $\lambda = c / f$ ). Por lo tanto, el objetivo principal es reducir los niveles de ruido en frecuencias bajas y medias. Sin embargo, la atenuación en estas frecuencias puede ser más compleja debido a las longitudes de onda más largas, lo que puede permitir que las ondas pasen a través de la pantalla.

La eficacia de las pantallas acústicas se basa en dos parámetros físicos: el aislamiento acústico y el coeficiente de absorción acústica. El aislamiento acústico se refiere a la cantidad de energía acústica que pasa a través de la pantalla en dirección al receptor, mientras que el coeficiente de absorción acústica es la cantidad de energía sonora que se refleja hacia la fuente. Para lograr una alta eficiencia en las pantallas acústicas, es importante diseñarlas de manera que se optimicen ambos parámetros y se obtengan los mejores resultados (Segura Mateu, 2013).

### 2.3 Investigaciones y avances en el uso de pantallas acústicas

Con el aumento del parque de vehículos de motor, y el consiguiente aumento del tráfico rodado; generado por el crecimiento de las ciudades, el desarrollo de las zonas industriales y vías férreas ha provocado el deterioro gradual del entorno acústico. Esta situación ha generado graves problemas de contaminación acústica, razón por la que, tanto ciudadanos como administraciones, han tenido que tomar conciencia de la importancia del uso de barreras antiruido para minimizar los efectos generados por el ruido ambiental; esto con la finalidad de evitar el deterioro de la calidad de vida de las personas afectadas.

Se ha considerado que en la mayoría de los casos donde existe un problema relacionado con el ruido generado debido al tráfico en vías de acceso o circunvalaciones con un alto tráfico rodado, las pantallas acústicas son una solución óptima, ya que permiten la atenuación o minimización del ruido en la zona que afecta al receptor.

Tal como se ha indicado con anterioridad, es necesario resaltar que la eficacia de este tipo de sistema está directamente relacionada con factores como la capacidad de aislamiento de la pared sónica, sus dimensiones, el tipo de material que la constituye, las distancia a la que se sitúa la fuente y el

receptor a proteger; razones por las cuales hoy en día existe un amplio desarrollo de patentes, materiales constructivos y fabricantes (Pfretzschner et al., 1997).

### 2.3.1 Investigaciones previas sobre pantallas acústicas

A mediados del siglo XX en Estados Unidos producto de evaluaciones matemáticas de prueba de eficiencia para la proximidad de una carretera específica surgen los primeros modelos de barreras o pantallas acústicas, pero el uso extensivo de este tipo de sistema no se implementó hasta después de establecidas las regulaciones de ruido a inicios de la década de los 1970. (Academic Dictionaries and Encyclopedias, 2023)

Los primeros investigadores que desarrollaron técnicas de modelado registrados en los EE.UU. son: Caltrans en Sacramento, California; el grupo ESL inc. en Palo Alto, California; Grupo Bolt, Beranek y Newman, Cambridge, Massachusetts y un equipo de investigación de la Universidad de Florida. Gran parte de los estudios fueron comisionados por el Departamento Estatal de Autopistas. (Academic Dictionaries and Encyclopedias, 2023)

Tras realizar una docena de investigaciones con la aplicación de diversas tecnologías de modelos computacionales, a finales de los años 70 se instalaron en más de 200 localidades pantallas acústicas, lo cual condujo a que en el año 2006 se estableciera este tipo de tecnología como un estándar de evaluación de la contaminación acústica (Academic Dictionaries and Encyclopedias, 2023).

### 2.3.2 Pantallas acústicas. Concepto y particularidades

Conocidas también como barreras antirruído o pantallas acústicas, son sistemas utilizados como solución acústica para el control de ruido generado en un medio de transmisión. En esencia son sistemas que constituyen un medio continuo formado por un material rígido que interfiere entre el foco emisor del ruido y el receptor creando atenuación del sonido; estos mecanismos acústicos cumplen con los principios establecidos en la Ley de Masas (Castiñeira-Ibáñez et al., 2012). Esta Ley establece que, al producirse un incremento del doble de la masa o la frecuencia, se producirá un aumento de 6 dB en el aislamiento; la reducción de la intensidad en el sistema se establece mediante el uso de cerramientos simples, donde no existe un cambio súbito de la intensidad en las diferentes capas de materiales que constituyen dicho sistema (Real Decreto 1909/1981).

### 2.3.2.1 Principio de funcionamiento de las pantallas acústicas

Como se indica anteriormente en el apartado 2.2.3 sobre pantallas acústicas y su importancia en la reducción del ruido, el funcionamiento de una pantalla acústica radica en la interacción de esta con las ondas sonoras. Cuando una fuente sonora (F) emite un sonido, este se propaga en el campo libre hasta el receptor (R), donde la componente de atenuación solo es generada por la absorción del aire o medio de propagación y por la distancia que separa a ambos elementos. Al interponer una barrera acústica entre ambos elementos, se produce una modificación en el comportamiento del sistema, tal como se muestra en la Figura 4. Se puede observar que el sonido viaja en forma lineal y su trayectoria es interrumpida por la barrera situada entre la fuente (F) y el receptor (R), haciendo que una fracción de la energía emitida refleje o se disperse hacia el frente y otra parte se transmite a través de la barrera acústica, la cual se difracta por los bordes o es absorbida por el material que conforma dicho elemento.

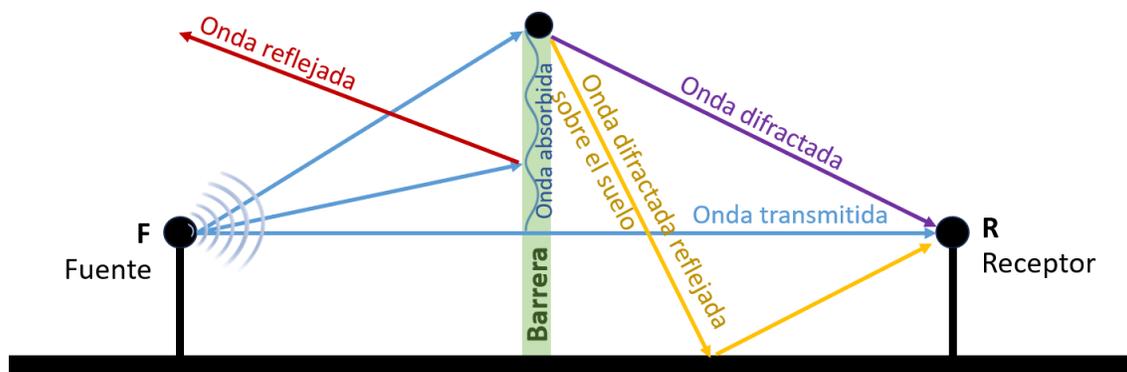


Figura 4: Comportamiento acústico del sonido cuando se coloca una pantalla acústica entre la fuente y el receptor.

Fuente: propia.

En este tipo de mecanismo se genera una zona de sombra, la cual se caracteriza por ser la parte en la que el ruido no se transmite de forma directa desde la fuente. A mayor aumento de frecuencia se produce un aumento de la zona de sombra, con lo cual se concluye que a altas frecuencias se produce una mayor atenuación.

Para el diseño adecuado de pantallas acústicas es fundamental tomar en cuenta dos factores: el aislamiento acústico (cantidad de energía que se transmite al receptor) y el coeficiente de absorción (cantidad de energía reflejada en dirección a la fuente) por lo que es imprescindible tener en cuenta

dos factores: los parámetros acústicos para el diseño (tipo de material, localización, dimensiones, geometría de la barrera, entre otros) y los no acústicos referidos a las características estéticas, configuración estructural, mantenimiento, peso, etc. (Merino Porta et al., 2010).

### 2.3.2.2 Pérdida de intersección o *Insertion Loss* (IL)

Para estimar la efectividad de las pantallas acústicas se debe estimar la atenuación generada en la zona de sombra mediante el parámetro denominado pérdida de intersección o *Insertion Loss* (IL), por sus siglas en inglés; la cual consiste en realizar una medición de niveles sonoros antes y después de la colocación de la barrera acústica (Rubio et al., 2016).

$$IL = P_a - P_f = 20 \log_{10} \left[ \frac{P_d}{P_i} \right] (dB) \quad (2)$$

donde,

$P_a$ : nivel de presión sonora previo a la instalación de la pantalla acústica.

$P_f$ : nivel de presión sonora después de la instalación de la pantalla acústica.

$P_d$ : presión sonora en el receptor previo a la colocación de la pantalla acústica (presión directa).

$P_i$ : presión sonora en el receptor tras la colocación de la pantalla acústica (presión interferida).

El IL se incorpora frente a la frecuencia para representar el espectro de atenuación, medida importante para ver la efectividad de la pantalla debido a que IL puede definirse como la reducción del nivel de presión sonora en un punto o área estimada por la interposición de una pantalla o dispersor acústico, en comparación con el nivel previo a su interacción. (Ramírez, 2014)

### 2.3.3 Difracción en pantallas acústicas clásicas

La difracción en pantallas acústicas es el fenómeno que describe el cambio de dirección que experimentan las ondas sónicas incidentes al pasar a través de un medio a una determinada velocidad de propagación y su trayectoria rectilínea tiende a curvarse en las zonas más próxima a los obstáculos, lo que hace que la onda presente anomalías acústicas en diversos puntos haciendo que

estos se conviertan en nuevas fuentes de ondas, formando así un nuevo frente de ondas acústicas. Este comportamiento es estudiado por el Principio de Huygens (Kurze, 2005).

### 2.3.3 Tipología de pantallas acústicas tradicionales en función al tipo de material

Las pantallas acústicas se pueden clasificar en absorbentes y reflectantes. Las de mayor implementación actualmente son las que se describen a continuación, (Alegre & Domínguez, 2012):

- **Pantalla acústica de hormigón:** Las de tipo reflectante están constituidas por módulos prefabricados de hormigón y permiten más maleabilidad del elemento y por ende se pueden crear sistemas más estéticos desde el punto de vista arquitectónico (ver Figura 5), mientras que las pantallas tipo absorbente son de formas placas de hormigón armado de formas más regulares (planas o curvas). La vida útil de este tipo de elementos es superior a los 20 años.



*Figura 5: Pantalla acústica de hormigón.  
Fuente: (INSAMETAL, S.A, 2022).*

- **Pantalla acústica de madera:** se constituyen por paneles modulares de madera, (ver Figura 6) normalmente con buena integración al entorno, estas en su mayoría suelen tener un tratamiento especial resistente a las condiciones de intemperie. Este tipo de pantallas pueden ser reflectantes o absorbentes en función al tipo de material adosado a la cara expuesta a la fuente que genera el ruido.



*Figura 6: Pantalla acústica de madera.*

*Fuente: (INSAMETAL, S.A, 2022).*

- **Pantalla acústica de módulos traslúcida:** barrera de tipo reflectante, constituida por planchas de materiales como el policarbonato, el polimetacrilato o vidrio (ver Figura 7). El espesor de las planchas suele ser de 15 mm, con lo cual el elemento adquiere la masa superficial requerida para lograr la atenuación para la que es diseñada, además son elemento de poca interferencia con el entorno. En este tipo de sistemas la capacidad de absorción acústica es baja.



*Figura 7: Pantalla acústica de módulos traslúcida.*

*Fuente: (INSAMETAL, S.A, 2022).*

- **Pantalla acústica metálica:** mecanismos acústicos también conocidos como “tipo sandwich”. En general se consideran elementos con un alto nivel de absorbencia acústica,

conformado por paneles modulares metálicos en cuyo interior albergan un material absorbente tales como: lana, fibra de vidrio, entre otros (ver Figura 8).



*Figura 8: Pantalla acústica metálica.  
Fuente: (INSAMETAL, S.A, 2022).*

- **Pantalla acústica mixta o compuesta:** son aquellas conformadas en su base o parte inferior por un material absorbente y en la parte superior por pantallas por un material reflectante (ver Figura 9).



*Figura 9: Pantalla acústica mixta o compuesta.  
Fuente: (Panacor Pantallas Acústicas, 2014).*

- **Pantalla acústica vegetal o paneles vegetales:** es un tipo de sistema más respetuoso con el medioambiente, son elementos por lo general muy vistosos (ver Figura 10). Se caracterizan por ser una estructura recubierta por un manto o masa vegetal, son mecanismo que se acondicionan para permitir el desarrollo de la propia vegetación, además de evitar la erosión del suelo portante.



*Figura 10: Pantalla acústica vegetal o paneles vegetales.  
Fuente: (CRC, 2014).*

- **Diques de tierra:** es un tipo de barrera acústica no modular constituido por aglomeraciones de tierra de gran espesor en su base, normalmente estos suelen recubrirse con un manto vegetal u otros elementos de que favorezcan la revegetación (ver Figura 11).



*Figura 11: Diques de tierra.  
Fuente: (Parrish, 2012).*

#### 2.3.4 Modelos numéricos propuestos para el análisis de las pantallas acústicas

Los métodos de mayor implementación para el análisis de comportamiento de pantallas acústicas son los siguientes:

- **Método de Elementos Frontera (BEM):** sistema numérico implementado para la resolución de ecuaciones diferenciales parciales. Tiene una mayor utilidad con sistemas de geometría compleja.

- **Método de Secuencia de Máxima Longitud (MLS):** este se implementa cuando se desea una caracterización con un mayor nivel de detalle del sistema acústico estudiado. Este tipo de método se basa en realizar un cruce entre una excitación de *input* o entrada y una señal de *output* o salida.
- **Método de Trazado de Rayos 3D:** su implementación se centra en determinar los ángulos de incidencia de la onda y la forma en la que esta se refleja.
- **Método de Elementos Finitos (FEM o FEA):** es el uso de cálculos, modelos y simulaciones para predecir y comprender cómo un objeto podría comportarse bajo diversas condiciones físicas. Este método es ampliamente utilizado para encontrar vulnerabilidades en los prototipos de diseños ingenieriles. En el apartado de metodología se ampliará sobre el FEM, por ser el método elegido para el desarrollo del presente estudio.

#### 2.3.5 Cristales de sonido (SC)

Se ha escrito con anterioridad que el desarrollo de las investigaciones de pantallas acústicas se produce a mediados del siglo XX producto de las evaluaciones realizadas en proximidades a vías y la generación de ruido por tránsito rodado en Estados Unidos. (Rubio et al., 2016).

El desarrollo de la teoría de los cristales sónicos en los últimos años surge como una propuesta de optimización de las barreras acústicas clásicas, aportando la posibilidad de conducir el sonido mediante estructuras periódicas formadas por una red de dispersores cilíndricos o lo que se conoce como cristales de sonido (ver Figura 12). Sin embargo, la falta de modelos numéricos prácticos y de verificaciones de pruebas de campo han restringido la promoción y aplicación de este tipo de barreras acústicas de cristal sónico (BACS).



*Figura 12: Pantalla acústica basada en cristales de sonido.*

*Fuente: propia.*

En función a la geometría y orientación de los dispersores que forman los cristales sónicos (CS) estos pueden clasificarse en:

- **Unidimensionales:** la periodicidad solo se genera en una dirección.
- **Bidimensionales:** la periodicidad se produce en dirección de dos ejes ortogonales, pero el cristal es homogéneo en la dirección del tercer eje ortogonal.
- **Tridimensionales:** la periodicidad se genera en los tres ejes ortogonales. (Miyashita, 2005)

En función a las propiedades de transmisión, relacionada a la forma de los dispersores y el medio trasmisor, se distinguen dos tipos de topologías:

- **Topología Cermet:** cada inclusión aislada del material dispersor se encuentra completamente rodeada del material huésped.
- **Topología Network:** se forma una red continua de trabajo en toda la estructura debido a la conexión del material dispersor. (Orduña Malea, 2003)

#### 2.3.5.1 Propiedades de la estructura cristalina

Se conoce como estructura cristalina a la forma sólida en la que se agrupa el conjunto de átomos, moléculas o iones. Esta ordenación puede representarse en forma de una red ligada a un punto denominado base que al repetirse conforma la estructura.

Un cristal se compone de una organización de átomos o moléculas dispuestos en una estructura con celdas unitarias, donde cada celda presenta la misma distribución de átomos dentro de ella. Estas celdas se repiten periódicamente y llenan todo el sólido.

Tomando esto en cuenta podemos definir una red cristalina como un conjunto de puntos en el espacio que se puede generar a partir del número mínimo de vectores linealmente independientes, representados por  $\mathbf{a}_i$ . Estos vectores forman una estructura periódica que se describe, para el caso bidimensional, mediante la siguiente expresión (ecuación 3):

$$R_n = \sum_i n_i a_i \quad (3)$$

Los vectores  $\mathbf{a}_i$  se llaman vectores de base, y los puntos  $\mathbf{R}_n$  conforman la estructura cristalina y definen el conjunto de vectores para los cuales la estructura es periódica. En otras palabras, una estructura cristalina está formada por puntos en el espacio que se pueden obtener desde otros puntos mediante traslaciones utilizando los vectores  $\mathbf{R}_n$ , y a estos puntos los denominamos puntos equivalentes (Barbosa Mejía, 2021).

Los Cristales de Sonido (CS) se “componen de una distribución periódica de elementos rígidos o dispersores incorporados en un medio fluido huésped. Estas estructuras permiten el control y manipulación de la propagación de ondas acústicas a frecuencias específicas.” (Herrero Durá et al., 2017). Estos cristales albergan elementos llamados dispersores acústicos, meticulosamente distribuidos de manera regular y repetitiva en el espacio. Su disposición puede manifestarse en una, dos o incluso tres dimensiones, dando origen a los cristales unidimensionales (1D), bidimensionales (2D) o tridimensionales (3D) (Romero García, 2010).

La "Red de Bravais" se refiere a una red periódica compuesta por una disposición infinita de puntos discretos con una estructura y orientación invariables, independientemente del punto de partida. Al combinar una Red de Bravais con una base, podemos obtener una descripción completa de una estructura cristalina dada (Chilet Murgui, 2012). A continuación, presentamos los 5 tipos de redes de Bravais en dos dimensiones (ver Figura 13) que será el enfoque de nuestro estudio. Considerando los ángulos ( $\alpha$ ) y las distancias entre los nodos ( $a$ ), tenemos:

- Red cuadrada  $a_3 = a = \alpha = 90^\circ$
- Red rectangular centrada  $a_3 \neq a = \alpha = 90^\circ$

- Red hexagonal  $a_3 = a = \alpha > 90^\circ$
- Red rectangular primitiva  $a_3 \neq a = \alpha = 90^\circ$
- Red oblicua  $a_3 = a = \alpha < 90^\circ$

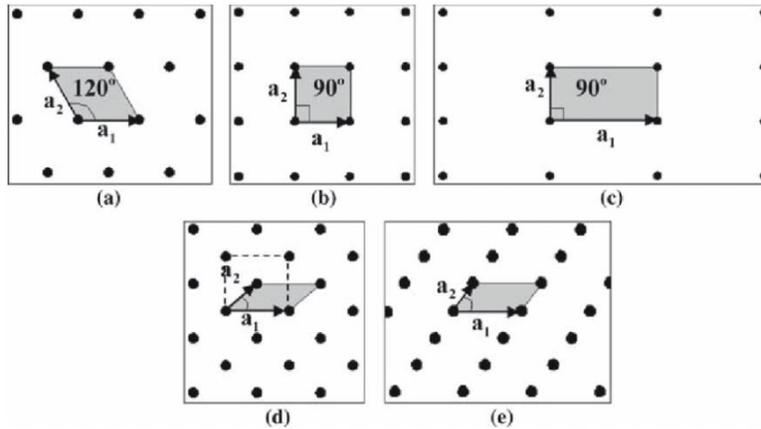


Figura 13: 5 redes de Bravais en 2D: (a) Hexagonal, (b) Cuadrada, (c) Rectangular, (d) Rectangular centrada, donde las líneas punteadas forman un rectángulo oblicuo.

Fuente: (Arie et al., 2007).

Las propiedades de los Cristales Sónicos (CS) fueron utilizadas por el D. Juan Vicente Sánchez-Pérez et al. 2015 para introducir por primera vez el concepto de la Barrera Acústica de Cristal Sónico (BACS). Esta investigación demostró que estructuras compuestas por matrices bidimensionales de cilindros rígidos huecos en el aire, con un pequeño número de elementos, generan valores de atenuación de sonido considerable. Estos valores son competitivos con las barreras acústicas tradicionales. Estas estructuras ofrecen ventajas notables sobre los diseños clásicos. No solo son más ligeras y más simples de construir, sino que también se pueden ajustar modificando las propiedades del cristal y del dispersor (Rubio et al., 2016).

### 2.3.5.2 Propagación del sonido. Ley de Bragg

Mediante la Ley de Bragg es posible el estudio de las direcciones (ángulos) en las que se difracta una onda sonora al impactar contra la superficie de un material con una estructura atómica periódica (cristal).

En el estudio de los parámetros que componen una red cristalina, se ha comprobado la existencia de direcciones, las cuales se denominan como principales; dichas direcciones marcan los límites de las frecuencias en los que aparecen las bandas de atenuación o bands gaps.

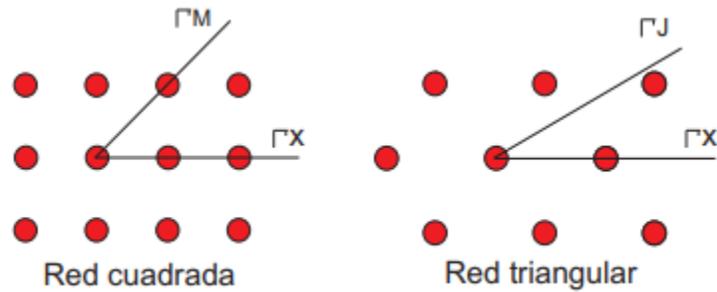


Figura 14: Direcciones principales de propagación en red cuadrada y triangular.

Fuente: (Castiñeira-Ibáñez, 2014)

Tal como se observa en la Figura 14, para redes cuadradas y triangulares las direcciones principales son  $\Gamma X$ ,  $\Gamma M$  en correspondencia con los ángulos  $0^\circ$  y  $45^\circ$ .

En los casos en los que la propagación de onda se produce en la dirección principal  $\Gamma X$ , la frecuencia atenuada es para la red cuadrada y se denomina frecuencia de Bragg, representada por la ecuación 4 que se muestra a continuación:

$$f_{Bragg} = \frac{c}{2a} \quad (4)$$

Para los casos en los que la frecuencia atenuada es para la red triangular, la expresión correspondiente está definida por la ecuación 5:

$$f_{Bragg} = \frac{c}{\sqrt{3}a} \quad (5)$$

donde,

$c$ : es la velocidad del sonido en el aire, que se calcula mediante la ecuación (1) según las condiciones termodinámicas existentes.

$a$ : parámetro de caracterización de la celda unidad de la red de cristal sónico (CS)

En la Figura 14 se muestra el parámetro de red, obtenido a partir de la repetición periódica del parámetro de red " $a$ " o celda unidad. (Castiñeira-Ibáñez, 2014)

### 2.3.5.3 Bandas prohibidas de propagación

Se conoce como bandas prohibidas o "*band gap*", al conjunto de frecuencias que no pueden propagarse a través del cristal. Algunas frecuencias se transmiten al atravesar el material, mientras otras se reflejan o se absorben, esto debido a la estructura interna del cristal. En consecuencia, al ajustar la posición de esta brecha energética y su amplitud mediante diversos procesos, es factible dirigir ondas sonoras con frecuencias específicas dentro de esta región de restricción. (Ramírez García, 2018)

Una vez que se determinan la constante de red y las dimensiones de los dispersores, es posible establecer la fracción de llenado ( $ff$ ) como un factor geométrico que, al igual que la constante de red, guarda una conexión directa con las características físicas del sistema. La fracción de llenado ( $ff$ ), también conocida como "*filling factor*", se define como la proporción entre el volumen que ocupan los dispersores y el volumen total ocupado por la celda unitaria (Romero García, 2010).

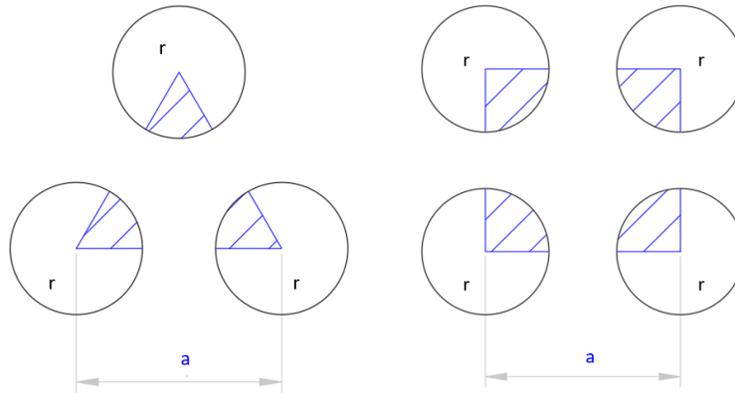
Considerando el diámetro de los dispersores cilíndricos, es fácil obtener el factor de llenado, en el caso de la red cuadrada, a través de la ecuación 6:

$$ff_{cuadrada} = \frac{\pi D^2}{4a^2} \quad (6)$$

Mientras que para nuestro caso de estudio que es de red triangular viene dada por la ecuación 7:

$$ff_{triangular} = \frac{4\pi r^2}{2\sqrt{3}a^2} \quad (7)$$

Donde “a” es la constante de red, la distancia entre centros dispersores y r el radio del dispersor cilíndrico. En la Figura 15 se representa gráficamente la relación entre “a” y dichas unidades de la red. El factor de llenado queda representado en azul frente al total del área.



*Figura 15: Ejemplos de factor de llenado para red triangular (izquierda) y red cuadrada (derecha).*

*Fuente: propia.*

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1 Caso de estudio y mediciones iniciales

Para nuestro caso de estudio se plantea un ruido proveniente de un generador eléctrico portátil. Los generadores portátiles se utilizan para proporcionar una fuente de energía eléctrica móvil y autónoma en diferentes situaciones y lugares donde no hay acceso a una red eléctrica estable o como respaldo en caso de cortes de energía. Estos generadores son altamente versátiles y se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones, entre las cuales destacan: obras de construcción, eventos al aire libre, camping y actividades recreativas, áreas remotas donde no hay infraestructura eléctrica, como en áreas rurales o de difícil acceso, en situaciones de emergencia o desastres naturales para proporcionar electricidad en áreas afectadas, trabajos móviles y servicios y respaldo de energía en hogares, oficinas o pequeños negocios. Los generadores portátiles pueden ser una solución temporal para respaldar la energía durante cortes de luz, permitiendo mantener la operatividad de equipos esenciales y dispositivos electrónicos.

Una de las limitaciones más notables de un generador eléctrico es el ruido, trayendo consigo importantes inconvenientes para los trabajadores expuestos.

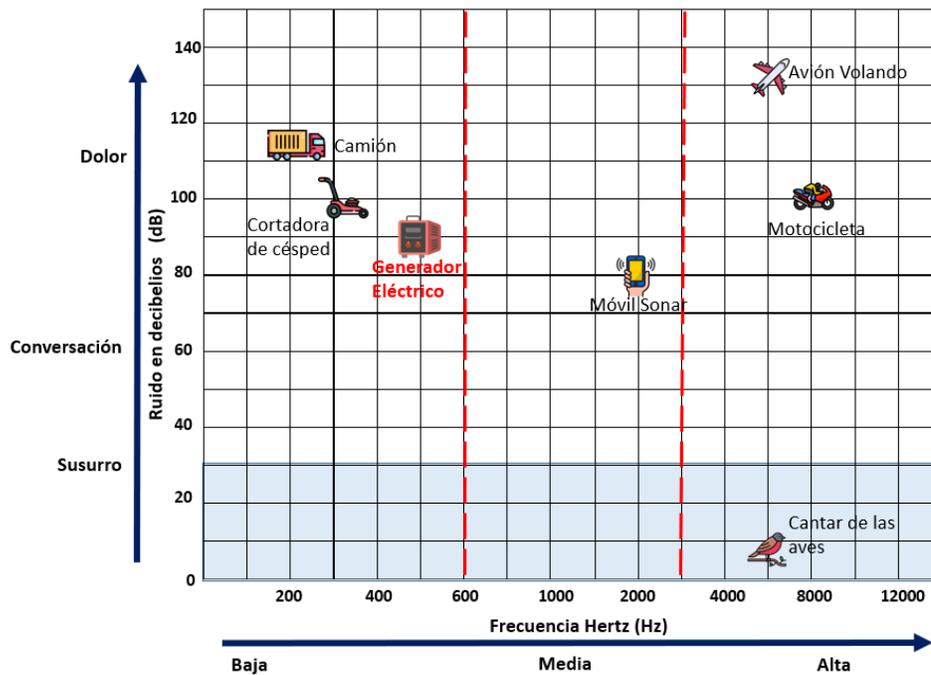


Figura 16: Audiograma donde se muestra el nivel de ruido en dB y la frecuencia de sonidos habituales.  
Fuente: propia.

En cuanto al nivel emitido por generadores, los límites máximos establecidos por la directiva varían entre 95 - 98 dB. Niveles superiores a 85 dB pueden ser dañinos para la audición, por lo que es crucial conocer cómo minimizarlos al utilizar generadores eléctricos en hogares, industrias y oficinas (Grupos Bravo, 2023) (Rocket tools, 2023).

Los generadores siguen el esquema de la mayoría de las máquinas industriales, emitiendo ruido a bajas frecuencias, en nuestro caso oscilando entre 400-500 Hz y que puede perjudicar seriamente la salud de los operarios. En la Figura 16 se muestra una comparativa del ruido emitido por un generador eléctrico como el mostrado en la Figura 17, comparado con otros ruidos habituales.



*Figura 17: Generador diésel AVR.  
Fuente: (Expondo, 2023)*

### 3.1.1 Equipos y materiales

Con el fin de llevar a cabo el desarrollo experimental de esta investigación, se utilizaron una serie de equipos y materiales, cuyas características y componentes se detallarán en el presente apartado.

### 3.1.1.1 Fuente emisora del ruido

La fuente de sonido empleada en los experimentos es el Altavoz portátil Denon Audio Commander (ver Figura 18), es un sistema de sonido PA compacto y autoamplificado sin cables que emite un nivel de presión sonora elevado y presenta una respuesta plana en el rango audible de frecuencias. En la Tabla 4 se describen las especificaciones del altavoz.



Figura 18: Denon Audio Commander.

Fuente: (Media Market, 2023).

Tabla 4: Principales características de amplificador clase D de 200W RMS.

Fuente: (Media Market, 2023).

Especificaciones amplificador clase D de 200W RMS	
Woofers	12"
Tweeter de compresión	1"
Respuesta de frecuencia	75 Hz - 20 kHz
THD	<1.0%
Relación señal / ruido (SNR)	≥ 80 dB

### 3.1.1.2 Elemento captador

Para las mediciones se ha empleado micrófono prepolarizado de ½" del tipo 4935 (ver Figura 19 y 20), el cual es utilizado en sistemas que requieren un gran número de micrófonos, por ejemplo, para mediciones STSF (Mediciones de transformación espacial de campos sonoros), especialmente

mediciones STSF no estacionarias, ya que a menudo requieren grandes arreglos para cubrir todo el objeto de medición.



Figura 19: Micrófono tipo 4935.  
Fuente: propia.



Figura 20: cableado utilizado para micrófono tipo 4935.  
Fuente: propia.

Este micrófono tiene una excelente coincidencia de fase en amplios rangos de temperatura y humedad. Está prepolarizado, lo que permite utilizar un sistema de 2 hilos (DeltaTron). El sistema tiene excelente inmunidad a la radiación EM. Una rejilla de protección resistente proporciona un escudo térmico integrado. El micrófono tiene ventilación frontal para igualar la presión, su tamaño permite medir el campo de presiones en frecuencias donde la longitud de onda  $\lambda$  es mucho mayor que el tamaño del micrófono ( $\lambda \gg d$ ). En la Tabla 5 se observan las especificaciones del micrófono de matriz tipo 4935.

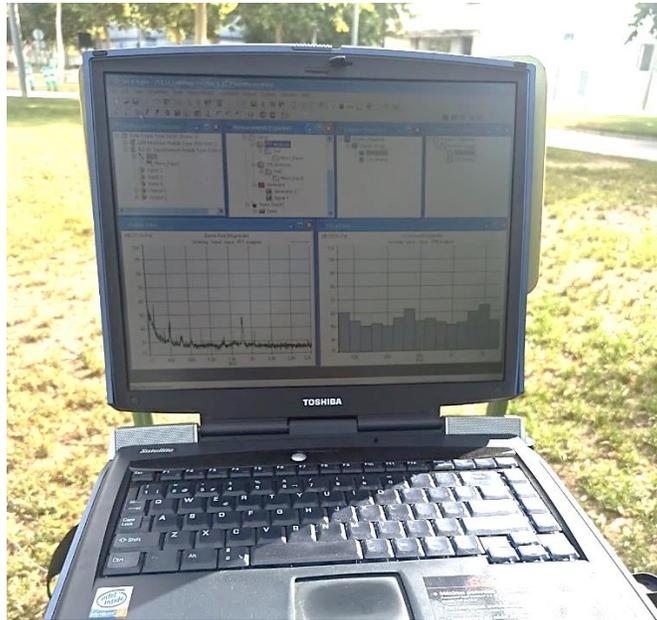
Tabla 5: Principales características del Micrófono tipo 4935.

Fuente: (Brüel & Kjær, 2018).

Especificaciones Micrófono tipo 4935	
Tamaño	7 mm (~1/4")
Coincidencia de fase	$\pm 3$ grados, 100 a 3000 Hz, $\pm 5$ grados, 3000 a 5000 Hz
Respuesta de campo de presión (re. 250 Hz)	100 a 3000 Hz: $\pm 1$ dB y 3 kHz a 5 kHz: $\pm 2$ dB
Rango dinámico	de 30 dB a 140 dB
Sensibilidad nominal	5,6 mV/Pa

### 3.1.1.3 Pulse LabShop

Para poder caracterizar el generador se utilizó un ordenador portátil con procesador Intel® Inside Pentium 4, con una frecuencia básica del procesador de 2.60 GHz y el software Pulse LabShop versión 6.1 (ver Figura 21), que es un analizador de ruido y vibraciones de 4 canales simultáneos FFT, asociado al portátil, para análisis en banda estrecha de ruido y vibraciones. Este software mide y promedia continuamente a la vez de guardar los datos al detener la medición (Brüel & Kjær, 2018).



*Figura 21: Interfaz del Pulse LabShop durante la medición.  
Fuente: propia.*

### 3.1.2 Campaña muestral

Para el estudio se realizaron 2 mediciones *in situ*, en cada pantalla y 2 mediciones control, acatando los criterios establecidos en la norma UNE-EN 1793-6:2019.

La fuente emisora se sitúa a 3,80 m del receptor para emitir ruido blanco y el punto de medida a 1 metro de la pantalla, para que coincida con el numérico (como se verá en el apartado 4.2.2). En cuanto a las condiciones ambientales, la temperatura es de 31° C y con una humedad relativa de 53%. Posteriormente se realiza una medición sin la pantalla tomando en cuenta las distancias tanto de la fuente emisora, como del captador, para comprobar la atenuación de la pantalla.

## 3.2 Diseño numérico de la pantalla acústica

La primera parte del diseño de la pantalla es crear el modelo numérico de la pantalla acústica, para el cual se ha elegido el método MEF. Esto implica subdividir un problema continuo en un conjunto limitado de unidades, cuya conducta está determinada por un conjunto reducido de variables asociadas a puntos específicos (nodos). Estos nodos representan los puntos de conexión entre las unidades (COMSOL, 2021).

- El modelo es discretizado en un conjunto finito de partes llamadas "elementos", cuyo comportamiento se describe mediante un número limitado o finito de parámetros asociados a "nodos" que son puntos que representan la conexión entre cada elemento y sus adyacentes.
- La solución del sistema completo se rige por las reglas de los problemas discretos. El sistema global se forma al ensamblar los elementos.
- El comportamiento dentro de cada elemento se define a partir del comportamiento de los nodos mediante las apropiadas funciones de interpolación o funciones de forma (Frias Valero , 2004).

Se ha elegido el MEF, debido a que proporciona una opción para resolver situaciones con geometrías complejas y permiten investigar la interacción de las ondas con los dispersores a través de representaciones numéricas, y en nuestro caso en particular será de gran utilidad (Castiñeira-Ibáñez, et al., 2018).

Elegimos la frecuencia de interés o frecuencia Bragg explicada anteriormente determinando la frecuencia a la que emite el generador eléctrico a través de la ecuación 5 vista anteriormente en el apartado: 2.2.5.2 sobre Propagación del sonido. Ley de Bragg.

### 3.2.1 Ecuaciones del modelo: Ecuación de Ondas

Se procede a modelar la propagación de ondas sonoras en el ámbito de la frecuencia (acpr), al resolver la ecuación de Helmholtz (ecuación 13). De esta manera podemos llevar a cabo simulaciones en el dominio de la frecuencia, considerando variaciones armónicas en el campo de presión. La ecuación de Helmholtz se obtiene a partir de la siguiente ecuación de ondas (ecuación 8):

$$\frac{1}{\rho_0 c_s^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \nabla \left( -\frac{1}{\rho_0} (\nabla p - \vec{q}) \right) = \vec{Q} \quad (8)$$

Donde:

$\rho_0$  es la densidad del medio (aire)  $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

$c_s$  es la velocidad del sonido  $\left(\frac{m}{s}\right)$

$\vec{q}$  es la fuente dipolar  $\left(\frac{N}{m^3}\right)$

$\vec{Q}$  es la fuente monopolar  $\left(\frac{1}{s^2}\right)$

Después, procedemos a realizar un análisis armónico temporal utilizando el software COMSOL donde obtendremos los espectros de frecuencia y los mapas de presión (Castiñeira-Ibáñez, 2014), resultando en la ecuación 9:

$$\nabla \left( -\frac{1}{\rho_0} (\nabla p - \vec{q}) \right) \frac{\omega^2}{\rho_0 c_s^2} p = \vec{Q} \quad (9)$$

Tomando en cuenta lo anterior la presión queda en función de la posición y la frecuencia como se muestra en la ecuación 10:

$$p = p(\vec{x}, \omega) \quad (10)$$

Donde:

$\omega$  es la frecuencia angular  $\left(\frac{rad}{s}\right)$

$f$  es la frecuencia lineal (Hz)

Sabiendo que la frecuencia angular ( $\omega$ ) se obtiene mediante la ecuación 11:

$$\omega = 2\pi f \quad (11)$$

En nuestro caso estamos trabajando en dos dimensiones con una onda incidente plana. Con estas condiciones la ecuación 10 pasaría a ser la ecuación 12 que se muestra a continuación:

$$p = p(\vec{x}, \omega)e^{-ik_z z} \quad (12)$$

Donde:

$k_z$  es el número de onda fuera del plano, que por defecto es nulo.

Así mismo, como no existen monopolos ni dipolos,  $\vec{q}$  y  $\vec{Q}$  serán también nulos. Con lo que obtenemos finalmente la ecuación de Helmholtz (ecuación 13), simplificando la ecuación 9, de la siguiente manera:

$$\nabla \left( -\frac{1}{\rho} \nabla p \right) = \frac{\omega^2}{\rho c^2} p \quad (13)$$

Las condiciones del contorno rígido y se basará en la condición Neumann, lo que implica que la derivada parcial de la presión en la superficie es igual a cero (ecuación 14). En consecuencia, la amplitud de la presión en la superficie alcanzará valores máximos o mínimos.

$$\frac{\partial p_t}{\partial n} = 0 \quad (14)$$

Con la condición de contorno radiación, la onda se dispersa del dominio de modelado con mínimos o nulos reflejos. Esto es conocido como condición de Sommerfeld, aplicable a ondas planas, cilíndricas y esféricas, por la cual el contorno exterior donde se aplique esta condición contendrá un campo disperso de ondas que se alejan. En este estudio trabajaremos con ondas planas, como se ha comentado anteriormente, por lo que existen dos opciones para aplicar esta condición en el contorno (Martínez Muñoz, 2022).

Para:

$p_0 = 0$ , el valor por defecto. Este valor se impone en el contorno y en la dirección señalada por un vector unitario normal a la superficie  $\vec{n}_x$ .

$p_0 = p_i$ , donde la presión en la superficie adquiere el valor definido en la opción *Physics/Scalars Variables* del menú de COMSOL.

### 3.2.2 Método de elementos finitos: Comsol Multiphysics 5.5

Los modelos numéricos han sido realizados utilizando el software comercial COMSOL Multiphysics® 5.5 el cual proporciona una interfaz para el análisis mediante elementos finitos en diversas aplicaciones de física y de ingeniería, en particular, en fenómenos acoplados o multifísicos y con ello obtener posibles soluciones.

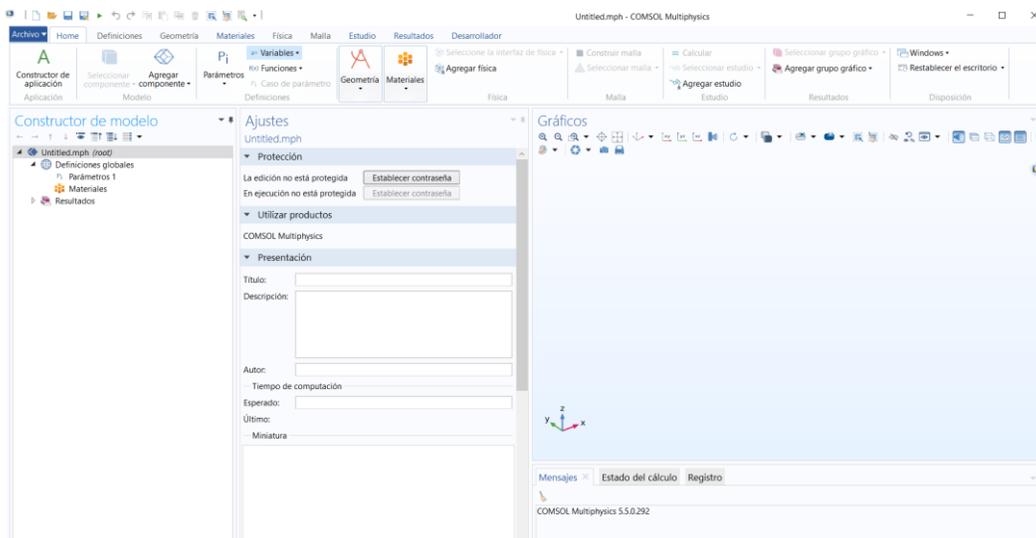


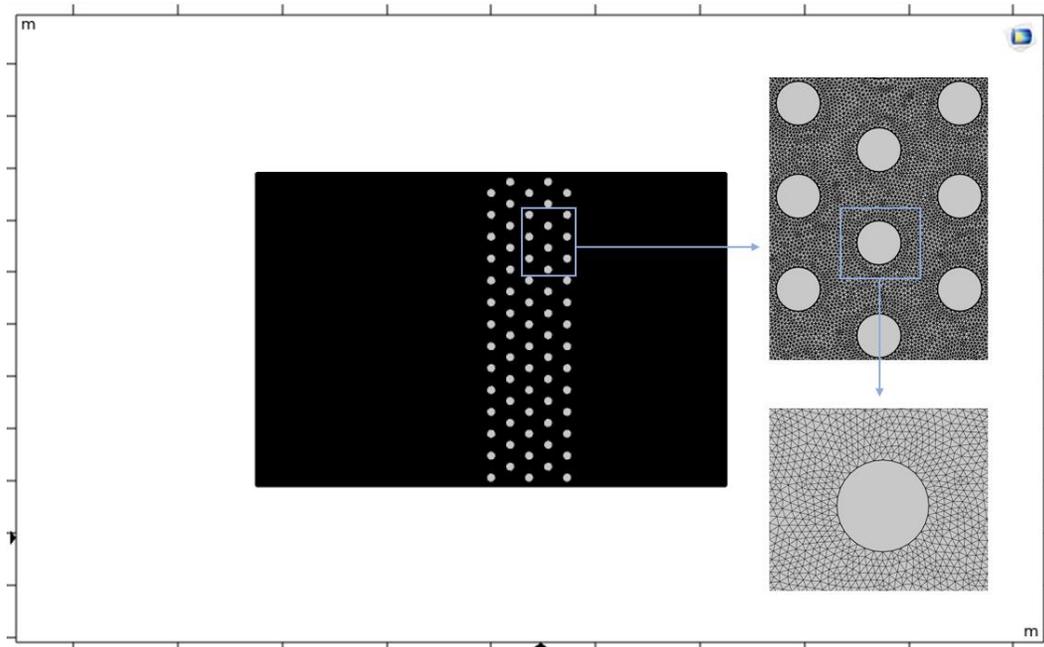
Figura 22: Interfaz Comsol Multiphysics 5.5.

Fuente: propia.

El método computacional se basa en la discretización del MEF de la analogía acústica de *Lighthill* (ecuación de onda). Esta formulación de las ecuaciones garantiza que cualquier límite sólido (fijo o vibrante) se tenga en cuenta implícitamente. Con lo cual podemos decir que el método de MEF utilizado en COMSOL Multiphysics® (ver Figura 22) brinda una solución altamente efectiva y precisa para enfrentar los desafíos acústicos que surgen en la interacción entre sólidos y ondas sonoras (5.5, COMSOL Multiphysics, 2019).

En nuestro caso de estudio hemos seguido la siguiente estructura:

- Se escoge el régimen de estudio: En este caso, el módulo de acústica de COMSOL ofrece tres opciones para el análisis: análisis en el dominio de la frecuencia, análisis armónico temporal o análisis transitorio. Para este estudio se ha utilizado el en el dominio de la frecuencia.
- Se define la geometría del modelo continuo: se debe establecer la forma y dimensiones del modelo que se va a analizar.
- Se definen las propiedades físicas y de los materiales: esto se puede realizar utilizando la base de datos del programa, donde se especifican las características de los materiales utilizados en el modelo.
- Se definen las condiciones de contorno: se deben establecer las condiciones en los bordes y límites del modelo que afectarán al análisis.
- Se colocan las cargas: en esta etapa se definen las fuentes de excitación presentes en el problema, que pueden ser fuentes de vibración, fuentes de sonido, o cualquier otra fuente relevante.
- Se elige el tipo de mallado: en esta fase, se realiza la discretización del problema dividiendo la geometría en un conjunto de elementos finitos. El mallado puede ser automático o basado en especificaciones del usuario. Un mallado más refinado suele proporcionar soluciones más precisas. Se ha seleccionado una frecuencia de 4000 Hz y, mediante la aplicación de la relación  $C=\lambda f$ , se ha calculado la longitud de onda correspondiente, tomando en consideración una velocidad de propagación de 340 m/s. En la Figura 23 se muestra el mallado utilizado en este estudio.



*Figura 23: Mallado utilizado en este proyecto.*

*Fuente: propia.*

### 3.2.2.1 Matlab

En esta etapa, una vez obtenidos los gráficos en COMSOL, se hace uso del software Matlab R2022a para obtener una mejor interpretación de los resultados exportados desde COMSOL. A través de este, se obtienen parámetros acústicos que permiten medir la eficiencia de la barrera. A continuación, nos basamos en el análisis de los resultados gráficos para observar cómo se comportaría la pantalla diseñada, además de apreciar una comparativa entre esta y los demostradores (Casanova Masjoan, 2017).

## 3.3 Descarte y selección de pantallas en el Campus UPV

Con el propósito de validar la efectividad del diseño de la pantalla acústica, se llevará a cabo un análisis de los demostradores o prototipos (pantallas) implementados en el campus de la Universitat Politècnica de València (UPV). A través de un proceso de evaluación y selección entre estos demostradores, se determinará aquel que mejor se asemeje al concepto diseñado en este estudio. Esta aproximación permitirá verificar como nuestro modelo teórico podría manifestarse en la práctica, aunque, debido a limitaciones presupuestarias en esta fase, su implementación

tangible no será factible. No obstante, se contempla la posibilidad de emprender investigaciones futuras en este sentido. El procedimiento a seguir en esta fase de la investigación se detalla a continuación:

- **Observación de pantallas en el Campus:** la metodología comienza con la visita y observación de las pantallas presentes en el campus universitario. Se identifican cuatro pantallas en total, de las cuales dos son de red cuadrada y las otras dos son de red triangular.
- **Evaluación de tipos de pantallas:** se procede a analizar las características y ventajas de los dos tipos de pantallas, es decir, las de red cuadrada y las de red triangular. Tras un análisis comparativo, basado en estudios previos, se toma la decisión de descartar las pantallas de red cuadrada debido a que las de red triangular ofrecen más ventajas en términos de rendimiento acústico.
- **Mediciones en pantallas de red triangular:** con los dos tipos de pantallas de red triangular restantes, se llevan a cabo mediciones acústicas. Estas mediciones buscan cuantificar el grado de reducción de ruido que cada tipo de pantalla proporciona en condiciones reales. Se realizan modelos y se identifica las frecuencias Bragg de cada una.
- **Comparación con el modelo numérico:** Tras obtener los datos de las mediciones, se compara el rendimiento acústico de ambas pantallas de red triangular con el modelo numérico generado previamente en COMSOL. Se busca identificar cuál de las dos pantallas se asemeja más al comportamiento predicho por el modelo.
- **Selección de la pantalla:** Basándose en la comparación entre las mediciones y el modelo numérico, se procede a seleccionar la pantalla de red triangular que mejor concuerda con las predicciones teóricas. Esta pantalla se considera la más adecuada para la reducción del ruido producido por la maquinaria escogida que en nuestro caso es un generador eléctrico.

### 3.4 Comparativa con otras soluciones existentes

Se propone realizar una comparativa entre las pantallas tradicionales y las pantallas basadas en cristales de sonido, centraría en la búsqueda, recopilación y análisis de fuentes relevantes sobre pantallas tradicionales y pantallas acústicas basadas en cristales de sonido para cual seguiremos el siguiente esquema de trabajo:

- Identificar pantallas tradicionales y pantallas acústicas basadas en cristales de sonido que sean representativas y ampliamente disponibles en el mercado. Asegurarse de que las pantallas seleccionadas tengan tamaños y especificaciones comparables.
- Utilizar una muestra representativa de pantallas tradicionales y pantallas acústicas.
- Interpretar los hallazgos obtenidos de las fuentes bibliográficas y destacar las similitudes y diferencias entre ambos tipos de pantallas, así como sus aplicaciones y limitaciones potenciales.

En este punto se plantea hacer el estudio comparativo entre los diferentes sistemas de atenuación de ruido existentes en la actualidad. Se propone establecer las relaciones entre ellos en base a una recopilación de información bibliográfica.

Este análisis comparativo estará basado en los principales aspectos a tener en cuenta al considerar cada tipo de sistema en función al caso de estudio planteado (características, parámetros de diseño, efectividad del sistema, practicidad, funcionabilidad, entre otros aspectos).

Los pasos a seguir para su consecución son los siguientes:

- Recolección y análisis de la información.
- Agrupación del conjunto de datos.
- Comparación cualitativa del conjunto de datos.

Una vez agotados estos pasos, se plasmará la información en una tabla, donde se exponen los criterios fundamentales comparando las pantallas basadas en CS y las pantallas tradicionales.

## 4. ANÁLISIS Y RESULTADOS

### 4.1 Modelo numérico

Se presenta un modelo bidimensional de campo libre denominado real debido a que cuenta con un número finito de elementos en el eje Y de la pantalla. Para el modelado de la pantalla se siguió la condición de Neumann por estar compuesta esta de cilindros sólidos rígidos.

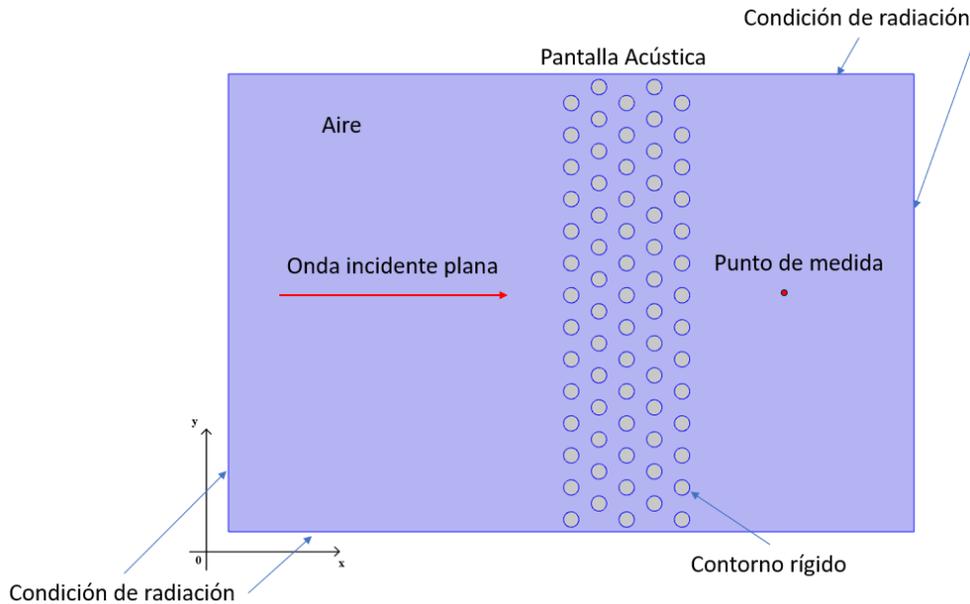


Figura 24: Composición del modelo numérico de la pantalla acústica y distribución de sus elementos.

Fuente: propia.

El modelo se compone de 5 hileras de 14 cilindros cada una (ver Figura 24). En el dominio de simulación se incorporan 70 cilindros de 20 cm de diámetro. En este dominio, se aplican condiciones de contorno de radiación para simular las condiciones de campo libre, evitando reflexiones no deseadas en las paredes. El punto de medición se sitúa en el centro del dominio de estudio y a 1 m desde el extremo de la pantalla.

Los resultados obtenidos en este estudio se basan en la utilización de dispersores cilíndricos, inmersos en aire, con una velocidad de propagación del sonido  $c$  de 340 m/s y una densidad  $\rho$  de 1,25 kg/m<sup>3</sup>. Se trabaja con una onda plana incidente (OPI) que se propaga de izquierda a derecha con una presión de 1 atm.

Las dimensiones de los modelos se determinan a partir del parámetro de red  $a$ , que se obtiene al establecer una frecuencia correspondiente al primer band gap. El análisis se enfoca en un rango de frecuencias de 350 a 550 Hz, que es el rango aproximado al que emite la maquinaria elegida, entonces para:

$$450 \text{ Hz} = \frac{c}{\sqrt{3}a} = \frac{340}{\sqrt{3} \cdot a} \quad (17)$$

Despejando la ecuación anterior obtenemos que:

$$a = \frac{c}{\sqrt{3}f} = \frac{340}{\sqrt{3} \cdot 450} = 0,436 \text{ m} \quad (18)$$

Para garantizar resultados precisos, se ha establecido una malla con un tamaño máximo de  $\lambda/4$ . Además, para asegurar una mayor precisión en los resultados, se ha definido la malla considerando una frecuencia de 4000 Hz, con una velocidad de 340 m/s, se calcula la longitud de onda. El resultado viene dado por la siguiente expresión:

$$c = \lambda f \rightarrow \lambda = \frac{c}{f} = \frac{340}{4000} = 0,085 \text{ m} \quad (19)$$

De la expresión anterior obtenemos el resultado 0.085 m. La Figura 25 muestra las especificaciones tomadas para el diseño del mallado en COMSOL.

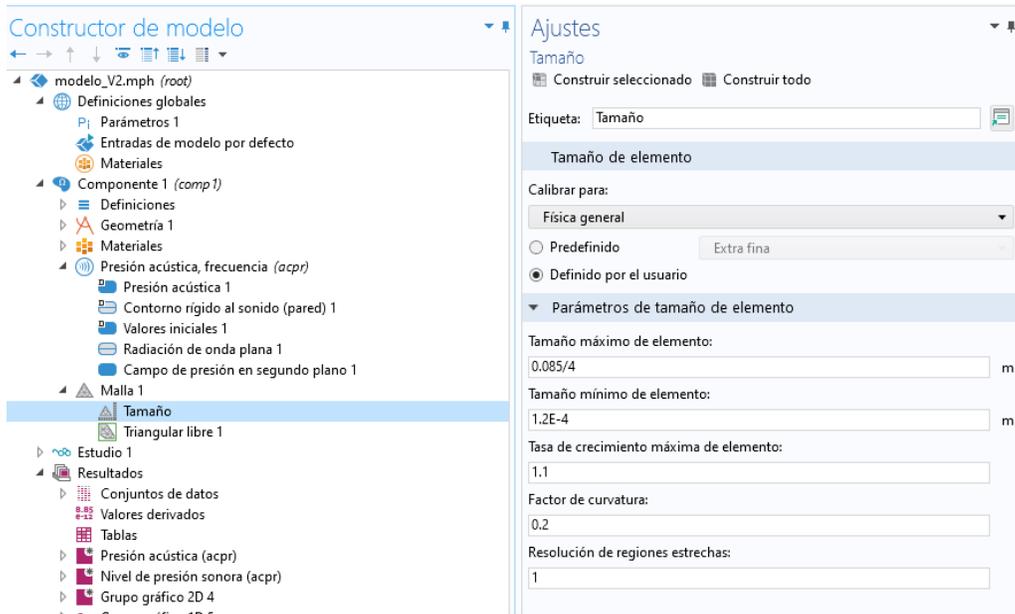


Figura 25: Especificaciones del estudio en COMSOL.

Fuente: propia.

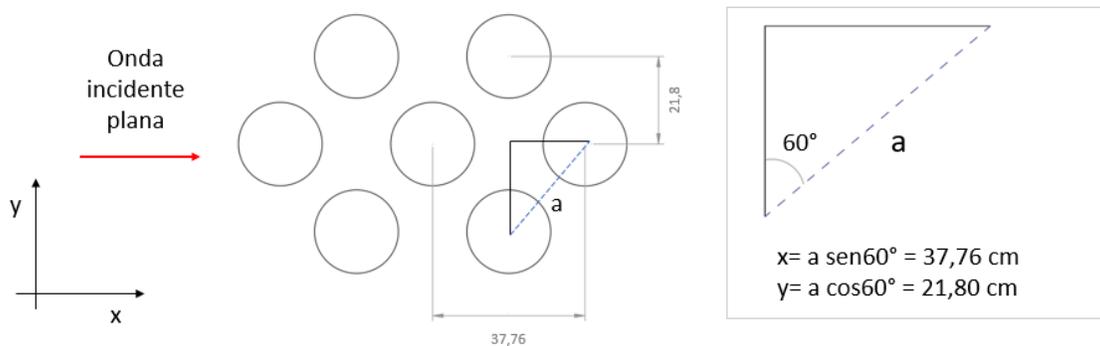


Figura 26: Obtención de "a" en red triangular.

Fuente: propia.

Una vez que se ha calculado el parámetro "a", procedemos a deducir la distancia entre los cilindros. La distancia en el eje "x", se obtiene mediante la multiplicación de "a" por el seno de 60° grados, resultando en un valor de 37,76 cm. Asimismo, al multiplicar "a" por el coseno de 60°, obtenemos la distancia en el eje "y", siendo el producto 21,8 cm (ver Figura 26).

## 4.2 Comparativas con los demostradores

En el marco de esta investigación, se llevó a cabo una evaluación exhaustiva de cuatro pantallas acústicas localizadas en el campus de la Universitat Politècnica de València (UPV). Este conjunto incluyó dos pantallas caracterizadas por una estructura de red cuadrada, así como otras dos que presentaban un diseño de red triangular (ver Tabla 6).

Tabla 6: Principales características de los demostradores seleccionados. Siendo RC1 el demostrador de red cuadrada 1, RC2 el demostrador de red cuadrada 2, RT1 el demostrador de red triangular 1 y RT2 el demostrador de red triangular 2.

Fuente: propia.

Nombre	Demostrador	Tipo de red	Parámetro de red ( $a$ )	Factor de llenado
RC1		Red cuadrada	$f_{Bragg} = \frac{c}{2 \cdot a}$	$ff = \frac{\pi D^2}{4a^2}$
RC2				
RT1		Red triangular	$f_{Bragg} = \frac{c}{\sqrt{3} \cdot a}$	$ff = \frac{4\pi r^2}{2\sqrt{3}a^2}$
RT2				

En la fase inicial del estudio, se procedió a descartar las dos pantallas con estructura de red cuadrada, basándonos en conocimientos provenientes de investigaciones anteriores. Esta decisión fue fundamentada por medio de un análisis comparativo meticuloso, respaldado por la revisión de estudios preexistentes. Se observó que las pantallas de red cuadrada no se integraban de manera

adecuada en el entorno, y se constató que perturbaban en mayor medida la armonía con el entorno circundante. Por lo tanto, se tomó la decisión de escoger las pantallas de red triangular, ya que se consideraron más acordes con el entorno y se encontraban en una posición más idónea para llevar a cabo las mediciones necesarias.

#### 4.2.1 Demostrador RT1



*Figura 27: Demostrador RT1 campus de Vera (UPV).*

*Fuente: propia.*



*Figura 28: Vista lateral del Demostrador RT1 campus de Vera (UPV), donde se aprecia la disposición de los elementos en red triangular.*

*Fuente: propia.*

El demostrador RT1 es una pantalla de primera generación, llamado así porque el único mecanismo de control de ruido utilizado es la dispersión múltiple. Como se muestra en la Figura 27 y 28, el demostrador RT1 está formado por dispersores cilíndricos de PVC de 3 metros de longitud dispuestos en red triangular, rodeado de aire, la pantalla acústica resultante está formada por un conjunto de dispersores que no constituye un paramento continuo.

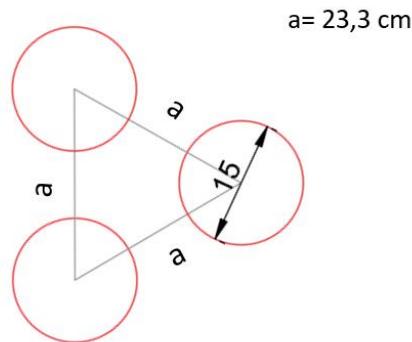


Figura 29: Esquema de red triangular del demostrador 1 donde se muestra el valor de "a".

Fuente: propia.

La red está compuesta por cilindros con diámetros de 15 cm, siendo la distancia de entre estos, de centro a centro de  $a = 23,3$  cm (ver Figura 29). Con estos datos obtenemos la frecuencia Bragg para el demostrador RT1, que viene dada a partir de la siguiente expresión (ecuación 20):

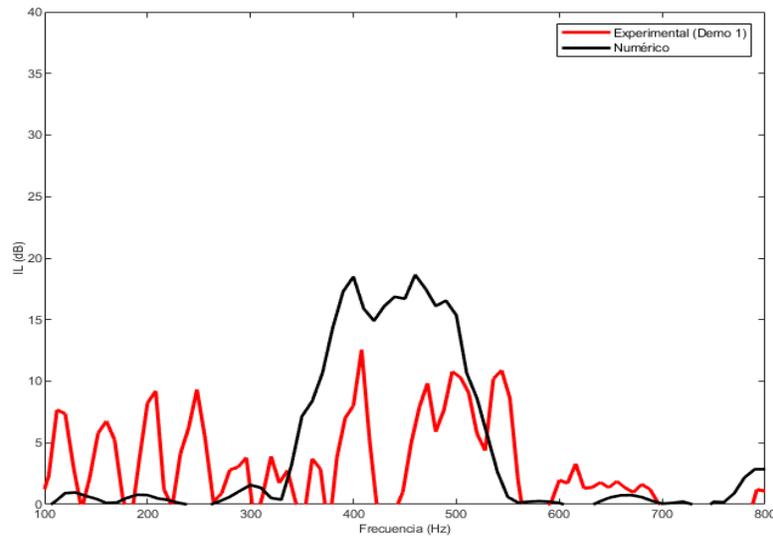
$$f_{Bragg} = \frac{c}{\sqrt{3} \cdot a} = \frac{340}{\sqrt{3} \cdot 0,233} \approx 842 \text{ Hz} \quad (20)$$

A continuación, calculamos la fracción de llenado, para obtener en porcentaje la relación entre el espacio que los dispersores ocupan y el espacio total contenido en la celda unitaria, como vimos anteriormente en el apartado 2.2.5.3 sobre bandas prohibidas de propagación, viene determinado por la siguiente expresión:

$$ff_{triangular} = \frac{4\pi r^2}{2\sqrt{3}a^2} = \frac{4\pi \cdot 0,075^2}{2\sqrt{3} \cdot 0,233^2} = 0,3759 \approx 37,59\% \quad (21)$$

Obteniendo como resultado que el ff para el demostrador RT1 es de un 37,59 %.

Al comparar el modelo numérico (negro) y el modelo experimental del demostrador RT1 (rojo), en la Figura 31, observamos que no existe coincidencia en el primer band gap, que para el modelo numérico se encuentra alrededor de los 450 Hz, debido a que responde a la frecuencia Bragg para la cual fue diseñado, en contraposición con y el modelo experimental del demostrador RT1 con una frecuencia Bragg de 842 Hz, el primer band gap no aparece en este gráfico.



*Figura 30: Espectro de atenuación acústica en dB entre 100-800 Hz del modelo numérico (negro) y el modelo experimental del demostrador RT1 (rojo).*

*Fuente: propia.*

No obstante, al analizar el espectro completo (consultar Figura 31), se aprecia la primera banda de atenuación (primer band gap) alrededor de la frecuencia Bragg estimada mediante la ecuación 20, previamente presentada. Esto corrobora la viabilidad del modelo.

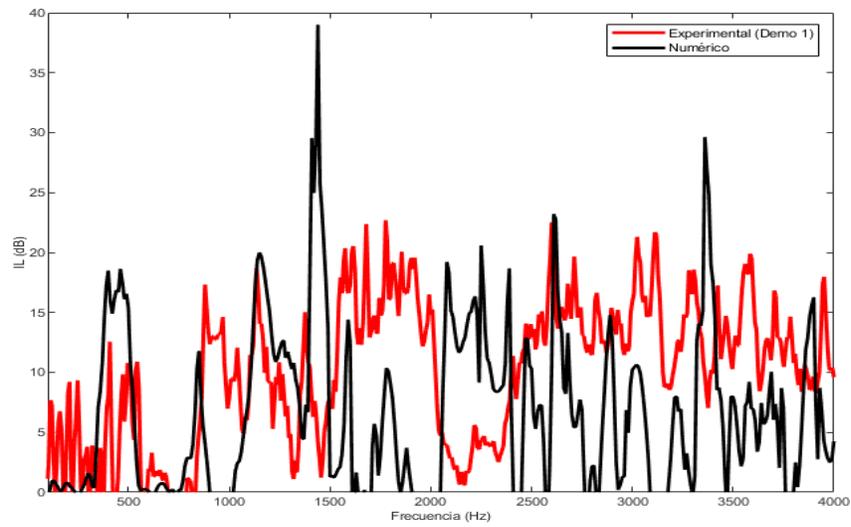


Figura 31: Espectro de atenuación acústica en dB completo del modelo numérico (negro) y el modelo experimental del demostrador RT1 (rojo).

Fuente: propia.

#### 4.2.2 Demostrador RT2



Figura 32: Demostrador RT2 campus de Vera (UPV).

Fuente: propia.



Figura 33: vista lateral medición en demostrador RT2 campus de Vera (UPV).  
Fuente: propia.

El demostrador RT2, mostrado en la Figura 32 y 33, es otro prototipo de pantalla acústica abierta de primera generación basada en cristales de sonido que está formado por dispersores cilíndricos huecos de PVC de 3m de longitud tapados por sus dos extremos, dispuestos sobre una plataforma siguiendo una red bidimensional triangular, de forma que los lados de los triángulos tienen unas dimensiones de 20 cm. El valor de "a" es de 42 cm (ver Figura 34). El tamaño externo del prototipo es de 1,11 m de anchura por 7,2 m de longitud, y está formado por seis filas de cilindros.

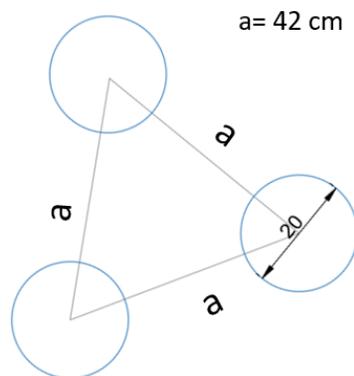


Figura 34: Esquema de red triangular del demostrador RT2 donde se muestra el valor de "a".

Fuente: propia.

En el segundo demostrador se identificó una frecuencia de Bragg de 467 Hz. Que se ha obtenido mediante la ecuación de la frecuencia Bragg que se expone a continuación:

$$f_{Bragg} = \frac{c}{\sqrt{3} \cdot a} = \frac{340}{\sqrt{3} \cdot 0,42} \approx 467 \text{ Hz} \quad (22)$$

Calculamos la fracción de llenado, expresada en la ecuación (23), la cual indica que para el demostrador RT2 el ff es de 20,56%. Esta resulta en un porcentaje menor al demostrador RT1.

$$ff_{triangular} = \frac{4\pi r^2}{2\sqrt{3}a^2} = \frac{4\pi \cdot 0,10^2}{2\sqrt{3} \cdot 0,42^2} = 0,2056 \approx 20,56\% \quad (23)$$

En contraposición con el demostrador TR1, el demostrador TR2 exhibe una mayor similitud con el modelo numérico, como se observa en las Figuras 35 y 36. Observamos que se aproxima a las características de atenuación deseadas, se podría seleccionar este modelo como el más representativo.

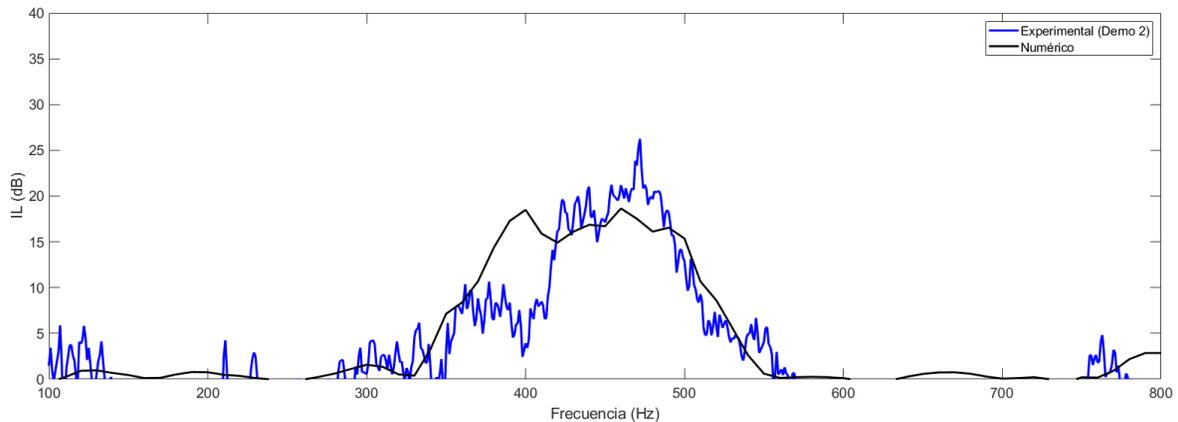


Figura 35: Espectro de atenuación acústica en dB entre 100-800 Hz del modelo numérico (negro) y el modelo experimental del demostrador RT2 (azul).

Fuente: propia.

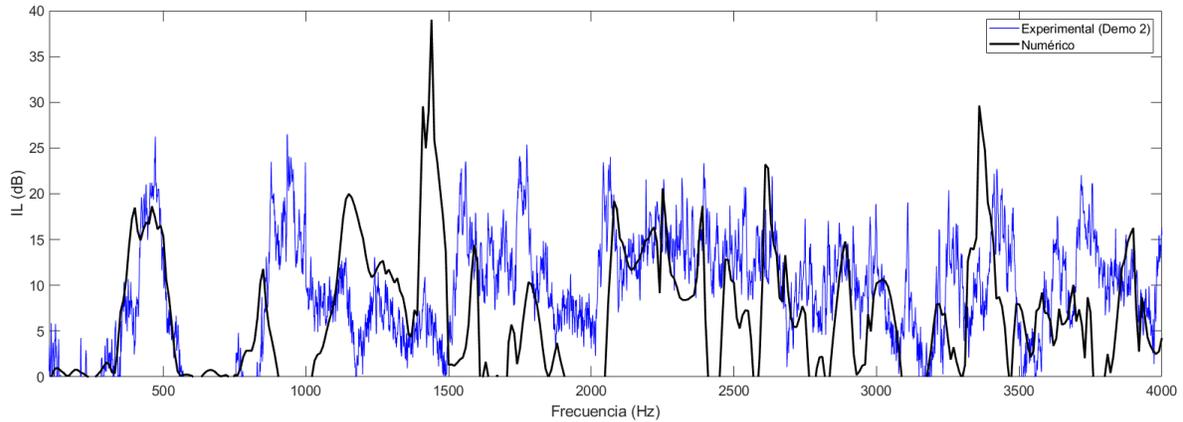


Figura 36: Espectro de atenuación acústica en dB completo del modelo numérico (negro) y el modelo experimental del demostrador RT2 (azul).

Fuente: propia.

Al comparar las tres tendencias en un mismo gráfico en las Figuras 37 y 38, vemos como el demostrador RT2 y el modelo numérico alcanzan un rango de frecuencias similar entre 350 y 550 Hz y atenuando en torno a las 20 dB en dichas frecuencias.

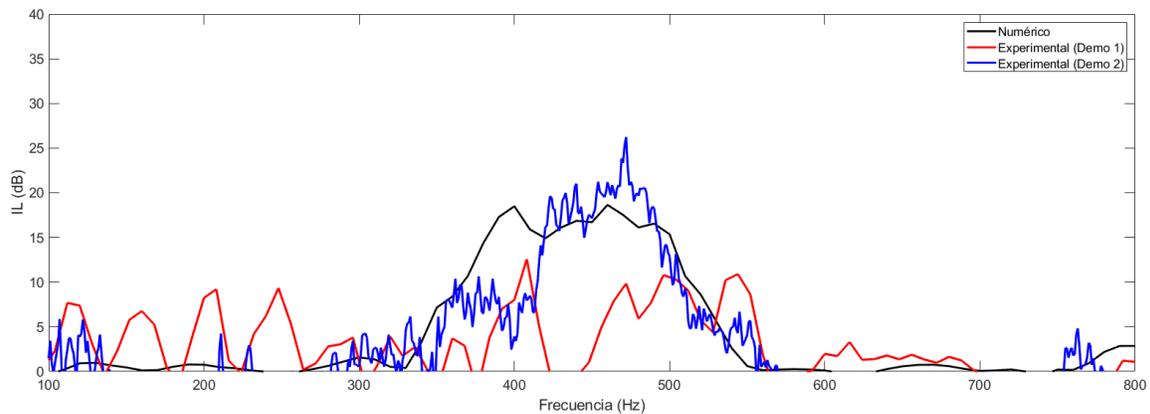


Figura 37: Espectro de atenuación acústica en dB entre 100-800 Hz del modelo numérico (negro), el modelo experimental del demostrador RT1 (rojo) y el modelo experimental del demostrador RT2 (azul).

Fuente: propia.

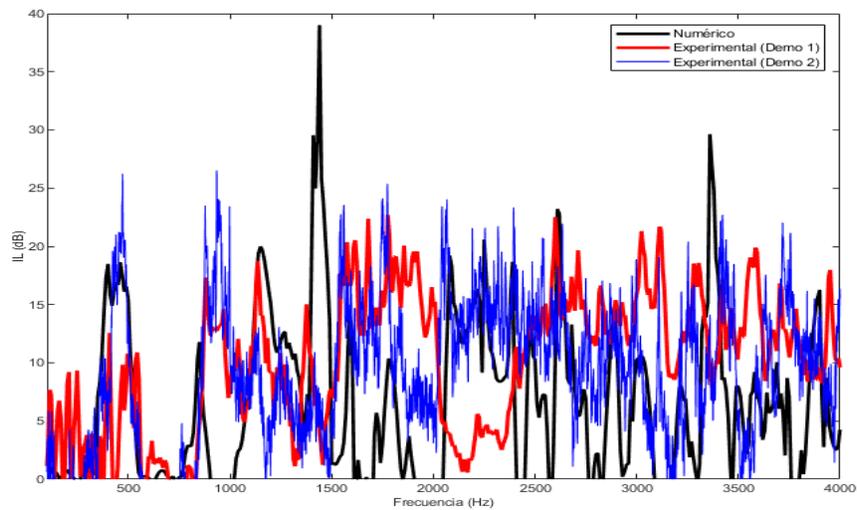


Figura 38: Espectro de atenuación acústica en dB completo del modelo numérico (negro), el modelo experimental del demostrador RT1 (rojo) y el modelo experimental del demostrador RT2 (azul).

Fuente: propia.

### 4.3 Comparativa con otras soluciones existentes

En el análisis exhaustivo de las soluciones disponibles para el control del ruido en diversos entornos, hemos evaluado las pantallas acústicas basadas en cristales de sonido y las hemos comparado con las pantallas acústicas tradicionales. Las pantallas basadas en cristales de sonido presentan ventajas únicas en términos de reducción de ruido, adaptabilidad al entorno, diseño atractivo y consideraciones medioambientales. Esta comparación nos ha brindado una visión clara de cómo estas nuevas pantallas están transformando la manera en que enfrentamos los desafíos del ruido y cómo pueden tener un impacto positivo en nuestros espacios urbanos y naturales. En la Tabla 7 se muestran los resultados de esta comparativa, resaltando las diferencias clave entre ambas soluciones y su potencial para ofrecer soluciones más efectivas y amigables con el entorno.

*Tabla 7: Comparativa entre las pantallas acústicas basadas en cristales de sonido frente a las pantallas acústicas tradicionales.*

*Fuente: propia.*

COMPARATIVA ENTRE LAS PANTALLAS ACÚSTICAS BASADAS EN CRISTALES DE SONIDO FRENTE A LAS PANTALLAS ACÚSTICAS TRADICIONALES		
Criterios	Pantallas Acústicas basadas en CS	Pantallas Acústicas Tradicionales
Reducción de sonido	Genera una atenuación acústica más efectiva.	Genera atenuación acústica.
Atenuación según frecuencia	Ofrece una mejor atenuación de ruido en frecuencias bajas.	Ofrece atenuación en un rango uniforme de frecuencias.
Adaptabilidad de diseño	Diseño Adaptable: Puede ser diseñada para adaptarse a frecuencias específicas.	Diseño Estándar: Tiene un diseño preestablecido y menos adaptable.
Integración con el entorno	Permite una integración armoniosa con el paisaje.	Puede generar impacto visual en el entorno.
Cimentación	Requiere cimentaciones de menor tamaño.	Requiere cimentaciones de mayor tamaño.
Dispersión de calor	Dispersa y concentra menos calor interno.	Puede acumular más calor interno.
Interferencia visual	Ofrece una visión óptica menos obstruida.	Puede obstruir la vista en el entorno.
Aspecto estético	Valor Artístico: Incorpora un diseño con valor artístico y estético.	Estilo Convencional: Su diseño tiende a ser convencional.
Resistencia al viento	Posee mayor permeabilidad al viento.	Tiene menor permeabilidad al viento.
Gestión del agua	Tiene una menor retención de aguas superficiales.	Puede retener más aguas superficiales.
Coste	Pueden tener un coste inicial más alto debido a la tecnología involucrada.	Pueden ser variables en función del material y la instalación requerida.

## 5. CONCLUSIONES Y RELACIÓN CON LOS ODS

En el contexto de este trabajo final de máster, se abordó el problema del ruido originado por maquinaria en entornos laborales, proponiendo una solución innovadora: el diseño de una pantalla acústica basada en cristales de sonido, que se ubica entre la fuente del ruido (la máquina) y los receptores (los trabajadores).

Mediante un análisis detallado, se determinó que las pantallas acústicas tradicionales no siempre son adecuadas para atenuar las frecuencias específicas del ruido que afecta a los trabajadores. En este sentido, se exploró la aplicación de pantallas acústicas basadas en cristales de sonido, capaces de ser diseñadas “a la carta” para reducir selectivamente ciertos rangos de frecuencia, incluyendo las frecuencias bajas. Esta innovadora aproximación se propuso como una solución efectiva para el problema identificado.

Se diseñó una pantalla acústica basada en cristales de sonido utilizando el método de elementos finitos a través del software COMSOL Multiphysics®. La eficacia de esta pantalla se evaluó tanto en condiciones controladas como en entornos reales. Los resultados numéricos fueron validados mediante mediciones experimentales.

El diseño numérico de la pantalla se enfocó en un rango de frecuencias de 350 a 550 Hz, relevante para la maquinaria seleccionada. Se determinó las dimensiones del modelo a partir del parámetro de red "a", que se calculó para una frecuencia de 450 Hz y se estableció una malla con un tamaño máximo de  $\lambda/4$  para garantizar una mayor precisión.

En la parte experimental se realizaron mediciones tanto en el demostrador RT1 como en el RT2, ambos de red triangular. Para el primero se determinó una frecuencia Bragg de 842 Hz, que no coincide con el modelo numérico, pero sí que demuestra la efectividad de la pantalla al atenuar la frecuencia para la que fue diseñada. Por su parte, el demostrador RT2, con una frecuencia Bragg de 467 Hz, muestra una mayor similitud con el modelo numérico, lo que lo hace más representativo en términos de atenuación del ruido. Por lo tanto, se ha conseguido en este trabajo cumplir los objetivos específicos y con ellos el objetivo general marcado, que era diseñar una pantalla acústica mediante elementos finitos que diera solución al ruido de un generador eléctrico situado en un entorno laboral. Así mismo, se ha validado experimentalmente los resultados utilizando un demostrador, pantalla acústica real, situada en el campus de la UPV.

Al realizar la comparativa del modelo numérico con los demostradores se evidencia la aportación del presente estudio a la reducción de los riesgos derivados de la exposición al ruido en entornos laborales. La implementación de la pantalla acústica basada en cristales de sonido demuestra ser una alternativa viable y efectiva para limitar la transmisión del ruido y, por consiguiente, para salvaguardar la salud auditiva y el bienestar psicológico de los trabajadores.

### 5.1 Relación con los ODS



*Figura 39: Objetivos de Desarrollo Sostenible u Objetivos Globales.*

*Fuente: (ONU, 2015)*

Según la Organización de las Naciones Unidas (ONU), “los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) son una llamada a la acción a todos los países para erradicar la pobreza y proteger el planeta, así como garantizar la paz y la prosperidad”.

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 relacionados con el tema "Diseño de una pantalla acústica basada en cristales de sonido para la reducción del ruido producido por maquinaria situada en un entorno laboral", se exponen en la siguiente Tabla 8.

Tabla 8: Relación del trabajo de final de máster con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Fuente: propia.

RELACIÓN DEL TRABAJO DE FINAL DE MÁSTER CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)		
Objetivos de Desarrollo Sostenibles	Relación	No relación
ODS 1. Fin de la pobreza		x
ODS 2. Hambre cero		x
ODS 3. Salud y bienestar	x	
ODS 4. Educación de calidad		x
ODS 5. Igualdad de género		x
ODS 6. Agua limpia y saneamiento		x
ODS 7. Energía asequible y no contaminante		x
ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico		x
ODS 9. Industria, innovación e infraestructuras	x	
ODS 10. Reducción de las desigualdades		x
ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles	x	
ODS 12. Producción y consumo responsables	x	
ODS 13. Acción por el clima	x	
ODS 14. Vida submarina		x
ODS 15. Vida de ecosistemas terrestres		x
ODS 16. Paz, justicia e instituciones sólidas		x
ODS 17. Alianzas para lograr objetivos	x	

De esta manera se ha encontrado relación con 6 de los ODS, inclinándose hacia la salud y bienestar de los trabajadores y la sostenibilidad. A continuación, se describe su correspondencia:

- ODS 3: Salud y bienestar: Contribuir a mejorar la salud y bienestar de los trabajadores al reducir la exposición al ruido excesivo, lo que puede prevenir problemas auditivos y otros efectos negativos en la salud.
- ODS 9: Industria, innovación e infraestructura: Impulsar la innovación en el diseño de pantallas acústicas basadas en cristales de sonido para mejorar la infraestructura y reducir el impacto negativo del ruido en los entornos laborales.
- ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles: Contribuir a crear entornos laborales más sostenibles y saludables mediante la reducción del ruido en áreas industriales y urbanas.
- ODS 12: Producción y consumo responsables: Fomentar el uso responsable de recursos en el diseño y fabricación de las pantallas acústicas, y promover su construcción a partir de la reutilización de materiales y el reciclado de los mismos.

- ODS 13: Acción por el clima: La utilización de material reciclado o reutilizado disminuye el número de residuos y por tanto contribuye a mitigar el cambio climático.
- ODS 17: Alianzas para lograr los objetivos: Fomentar la colaboración entre empresas, industrias y organizaciones para abordar de manera conjunta el problema del ruido en entornos laborales y promover soluciones innovadoras como las pantallas acústicas basadas en cristales de sonido.

El diseño de una pantalla acústica para reducir el ruido en el entorno laboral puede tener impactos positivos en varios Objetivos de Desarrollo Sostenible, ya que aborda aspectos de salud, sostenibilidad, innovación y bienestar en el lugar de trabajo.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Aleaga Del Salto, J. C. [Juan Carlos]. (2017). El Ruido Laboral y su incidencia en los trastornos del oído de los operadores del área de producción de productos plásticos de la empresa HOLVIPLAS S.A. [Tesis doctoral, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial. Dirección de Posgrado. Maestría en Seguridad e Higiene Industrial y Ambiental (director: Ing. Víctor Rodrigo Espín Guerrero, Mg)] <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/25953>
- Alegre, D. [Dámaso] y Domínguez, J. [Julián]. (2012). Materiales Para Pantallas Anti-Ruido. Soluciones tipo más usuales. ANIPAR, 1-6. <https://dokumen.tips/documents/materiales-para-pantallas-anti-ruido-uah-alcanza-coeficientes-de-absorcion.html?page=1>
- Álvarez Balderrama, J. D. [Jorge Daniel].(2002). Predicción de niveles de ruido generados por industrias. [Tesis doctoral, Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Escuela de Ingeniería Acústica (director: José Luis Barros)]. <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2002/bmficia473p/doc/bmficia473p.pdf>
- Aquae, F. (2023). Fundación Aquae. <https://www.fundacionaquae.org/sabes-que-es-el-sonido>
- Arie, A. [Ady], Habshoosh, N. [Nili], & Bahabad, A. [Alon]. (2007). Quasi phase matching in two-dimensional nonlinear, 1-16. (S. S. Media, Ed.). <https://www.eng.tau.ac.il/~ady/OQE%2039%20361%202007.pdf>
- Barbosa Mejía, Y. [Yobani]. (2021). *Notas de clase: Introducción al estado sólido*. Editorial Universidad Nacional de Colombia. <https://es.scribd.com/document/539443400/LibroOptica-FCBOG>
- Brüel & Kjær. System Data (2018). Software for PULSE™ LabShop. HBK Company. <https://www.bksv.com/media/doc/bu0229.pdf>
- Buitrago, L. F. [Luis Fernando]. (2010). Curso de sonido. Módulo 01: Principios Básicos del Sonido. Teoría del sonido 01: Frecuencia e Intensidad. <https://cursodesonido.webnode.com.co/curso/taller-de-registro-sonoro/modulo-01>
- Calero Pons, E. [Elena]. (2021). Diseño de una pantalla acústica verde abierta para la reducción del ruido. [Trabajo final de máster]. Universitat Politècnica de València. <http://hdl.handle.net/10251/175837>
- Casanova Masjoan, J. [Josep]. (2017). Estudio del efecto de la optimización multiobjetivo en un difusor acústico basado en cristales de sonido [Trabajo final de grado]. Universitat Politècnica de València. <https://riunet.upv.es/handle/10251/93007>

- Castiñeira-Ibáñez, S. [Sergio]. (2014). Análisis y modelado de la fenomenología ondulatoria asociada al diseño de barreras acústicas basadas en conjuntos de dispersores aislados. Homologación de dispositivos. [Tesis doctoral, Universitat Politècnica de València, Departamento de Física Aplicada (director: Juan Vicente Sánchez Pérez)]. <https://riunet.upv.es/handle/10251/48533>
- Castiñeira-Ibáñez, S. [Sergio], García Soro, J. M. [Juan Miguel], Loustalot, T. [Tina] y Rubio Michavila, C. [Constanza]. (2018, julio). Contaminación acústica medioambiental: proyecto de pantalla acústica verde [Congreso]. 22nd International Congress on Project Management and Engineering. [http://dSPACE.aepro.com/xmlui/bitstream/handle/123456789/1635/AT04-008\\_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://dSPACE.aepro.com/xmlui/bitstream/handle/123456789/1635/AT04-008_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Castiñeira-Ibáñez, S. [Sergio], Romero-García, V. [Vicent], Sánchez-Pérez, J. V. [Juan Vicente] y García-Raffi, L. M. [Luis Miguel]. (2015). Periodic systems as road traffic noise reducing devices: prototype and standardization. *Environmental Engineering and Management Journal*. <http://dx.doi.org/10.30638/eemj.2015.293>
- Castiñeira-Ibáñez, S. [Sergio], Rubio, C. [Constanza], Romero-García, V. [Vicent], Sánchez-Pérez, J. V. [Juan Vicente] y García Raffi, L. M. [Luis Miguel]. (2012). Design, manufacture, and characterization of an acoustic barrier made of multi-phenomena cylindrical scatterers arranged in a fractal-based geometry. *Archives of Acoustics*, 455-462. <http://hdl.handle.net/10251/77056>
- CCOHS. (2023). *Canadian Centre for Occupational Health and Safety*. [https://www.ccohs.ca/oshanswers/phys\\_agents/noise/noise\\_basic.html#section-10-hdr](https://www.ccohs.ca/oshanswers/phys_agents/noise/noise_basic.html#section-10-hdr)
- Chilet Murgui, C. [Carlos]. (2012). *Análisis de la variabilidad de la capacidad de atenuación de redes de dispersores bidimensionales en función de factores geométricos. Aplicación al diseño de pantallas acústicas*. [Trabajo final de máster]. Universidad Politécnica de Valencia. Escuela Politécnica Superior de Gandía. <http://hdl.handle.net/10251/18463>
- Coluccio Leskow, E. [Estefania]. (2016). Sonido. *Enciclopedia de humanidades*. <https://humanidades.com/sonido>
- COMSOL - Software for Multiphysics Simulation. (2021). *Acoustics Module User's Guide (Version 5.5)* [Guía de usuario]. COMSOL. <https://doc.comsol.com/5.5/doc/com.comsol.help.aco/AcousticsModuleUsersGuide.pdf>

- CRC Obras y servicios. (2014). Pantalla acústica protectora con elementos vegetales [entrada de blog]. <https://www.crcos.com/portfolio/pantalla-acustica-protectora-con-elementos-vegetales>
- Espín Guerrero, V. R. [Víctor Hugo] y Aleaga del Salto, J. C. [Juan Carlos]. (2017). *El ruido laboral y su incidencia en los trastornos del oído de los operadores del área de producción de productos plásticos de la Empresa Holviplas S.A.* [Trabajo final de máster]. Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Sistemas, Electrónica e Industrial. <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/25953>
- Expondo. (2023). Generador diésel - 1650 / 4600 W - 12,5 L - 230/400 V - portátil - AVR - Euro 5. <https://www.expondo.es/msw-generador-diesel-1650-4600-w-12-5-l-230-400-v-portatil-avr-euro-5-10062352>
- Frias Valero, E. [Eduardo]. (2004). *Aportaciones al estudio de las maquinas eléctricas de flujo axial mediante la aplicación del método de los elementos finitos.* [Tesis doctoral, Departament d'Enginyeria Elèctrica, Universitat Politècnica de Catalunya (director: Ricardo Bosch Tous)]. UPCommons. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/93606>
- Gamine, J., Almeida da Silva, L., Robazzi, M., Valenzuela Sauzo, S. V. [Sandra Veronica], y Faleiro, S.. (2010). *El ruido como Riesgo Laboral: Una revisión de la literatura.* Enfermería Global Nº 19, 1-15. [https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1695-61412010000200020](https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1695-61412010000200020)
- Gerges, S. [Samir], y Behar, A. [Alberto]. (2001). Ruido: Fundamentos y Control. *The Journal of the Acoustical Society of America.* [https://www.researchgate.net/publication/243525416\\_Ruido\\_Fundamentos\\_y\\_Control](https://www.researchgate.net/publication/243525416_Ruido_Fundamentos_y_Control)
- Gómez, S. S. [ Serafín]. (2007). *Efectos de la contaminación acústica sobre la salud* [ Ponencias y Conferencias]. Hospital Universitario Virgen Macarena. Sevilla. <https://ojs.diffundit.com/index.php/rsa/article/view/261>
- Grupo de Acústica GA. (2003). Curso de Acústica. <https://www.ehu.eus/acustica/espanol/ruido/equires/equires.html>
- Grupos Bravo Generadores Eléctricos (2023). Generador eléctrico genenergy guardian s6-sol arr/elect 2 hilos monofásico 230 V. <https://gruposbravo.com/module/psblog/module-psblog-blog?id=36>
- Herrero Durá, I. [Iván], Picó Vila, R. [Rubén], Sánchez Morcillo, V. J. [Víctor José], García Raffi, L. M. [Luis Miguel] y Romero García, V. [Vicente]. (2017). Absorción sonora en cristales de sonido:

- aplicación en el lanzamiento de cohetes espaciales. *Revista de acústica.*, 12-16.  
<http://hdl.handle.net/10251/89684>
- Ingeniería CA&CCA. (2019). Tipos de contaminación acústica más habituales en obras y actividades industriales. <https://www.caycca.com/tipos-contaminacion-acustica-habituales-obras-actividades-industriales>
- INSAMETAL, S.A. (2022). *Pantallas Acústicas* - INSAMETAL S.A. <https://insametal.es>
- Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST). (2023). *Ruido*.  
<https://www.insst.es/materias/riesgos/riesgos-fisicos/ruido>
- Kotzen, B. [Benz] y English, C. [Colin]. (1999). *Environmental Noise Barriers A Guide to Their Acoustic and Visual Design*. CRC Press.  
<https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781482272024/environmental-noise-barriers-benz-kotzen-colin-english>
- Kurze, U. J. [Ulrich J.] (2005). Noise reduction by barriers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, (55), 504-518. <https://doi.org/10.1121/1.1914528>
- Kushwaha, M. S. [Manvir Singh]. (2016). The phononic crystals: An unending quest for tailoring acoustics. *Modern Physics Letters B*, 30(19).  
<https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S0217984916300040>
- Martínez Muñoz, I. [Irene]. (2022). *Estudio de barreras acústicas de cristales de sonido y resonadores orientados*. [Trabajo de final de máster]. Universitat Politècnica de València.  
<https://hdl.handle.net/10251/188610>
- Media Market. (2023). Altavoz de gran potencia - Denon Audio Commander, Sistema Profesional de PA, 1 canal, 200 W, 8 h, Negro. <https://www.mediamarkt.es/es/product/altavoz-de-gran-potencia-denon-audio-commander-sistema-profesional-de-pa-1-canal-200-w-8-h-negro-1457190.html>
- Merino Porta, E. [Eva]. (2010). *Nuevas pantallas acústicas a partir de materiales reciclados*. [Trabajo final de máster]. Universitat Politècnica de València.  
<https://riunet.upv.es/handle/10251/10335>
- Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. *Real Decreto 1909/1981, de 24 de julio, por el que se aprueba la Norma Básica de la Edificación NBE-CA-81 sobre condiciones acústicas en los edificios*. Madrid: Boletín Oficial del Estado.  
<https://www.boe.es/eli/es/rd/1981/07/24/1909>

- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). (2023). *Contaminación acústica*. <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/contaminacion-acustica.html>
- Miyara, F. [Federico]. (1999). Terminología y nociones acústicas y psicoacústica. En F. [Federico] Miyara, *Control del Ruido* (pp. 1-54). ASOLOFAL. <https://pdfslide.tips/documents/control-de-ruidofederico-miyara.html>
- Miyashita, T. [Toyokatsu]. (2005). Sonic crystals and sonic wave-guides. *Measurement Science and Technology* (16)5. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0957-0233/16/5/R01>
- Moreno Ceja, F. [Faustino], Orozco Medina, M. G. [Martha Georgina], y Zumaya Leal, M. [María del Rocío]. (2015). Los niveles de ruido en una biblioteca universitaria, bases para su análisis y discusión. *Investigación bibliotecológica*, 29(66). [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0187-358X2015000200197](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-358X2015000200197)
- Orduña-Malea, E. [Enrique]. (2003). *Propagación de haces ultrasónicos en estructuras periódicas: verificación de la existencia de cristales de sonido en estructuras triangulares*. Artículo no publicado. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1305/1305.3910.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible. La Asamblea General adopta la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible>
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2023). *Organización Mundial de la Salud*. <https://www.who.int/es>
- Panacor - Pantallas Acústicas. (2014). *Pantallas acústicas mixtas - Pantallas Acústicas Panacor*. <https://www.panacor2000.com/es/productos/pantallas-ac%C3%Basticas-mixtas>
- Parrish, S. [Susan]. (2012, 5 de octubre). State builds a berm to block noise for autistic boy. *The Columbian*. <https://www.columbian.com/news/2012/oct/05/state-builds-a-berm-to-block-noise-autistic-boy>
- Pfretzschner, J. [Jaime] y Hidalgo, F. S. [Francisco Simón]. (1997). Barreras Acústicas y Ruido de Tráfico. *Revista de Acústica*. 28(3-4).
- Ramírez García, G. [Guillermo]. (2018). *Diseño de guías de ondas utilizando cristales fonónicos para aplicaciones de la dispersión local de energía acústica*. [Trabajo final de grado]. Universidad Autónoma del Estado de México. <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/99620>

- Ramírez, D. [David]. (2014, 1 de Diciembre). Curvas isofónicas [entrada de blog]. *Audio y producción para músicos*. <http://audioparamusicos.blogspot.com/2014/12/curvas-isofonicas.html>
- Real Academia Española. (2023). *Ruido*. <https://dle.rae.es/ruido>
- Rocket tools. (2023). *EBERTH Generador electrico gasolina 2200W, grupo electrógeno*. <https://www.rocket-tools.es/maquinaria/generador-de-energia/EBERTH-Generador-electrico-gasolina-2200W-grupo-electrogeno.html>
- Romero García, V. [Vicent] (2010). *On the control of propagating acoustic waves in sonic crystals: analytical, numerical and optimization techniques*. [Tesis doctoral, Departamento de Física Aplicada, Universitat Politècnica de València (directores: Juan Vicente Sánchez Pérez y Luis Miguel García Raffi)]. <https://riunet.upv.es/handle/10251/8982>
- Royo, J. [Juan]. (2012, 18 de agosto). Tipos de ruido [entrada de blog]. *Viviendo el sonido*. <https://www.gaes.es/viviendoelsonido/foro/tipos-de-ruido>
- Rubio, C. [Constanza], Castiñeira-Ibáñez, S. [Sergio], Sánchez-Pérez, J. V. [Juan Vicente], Candelas, P. [Pilar], Belmar, F. [Francisco], y Uris, A. [Antonio]. (2016). Open Acoustic Barriers: A New Attenuation Mechanism. N. [Noor] Ahmed, *Advances in Noise Analysis, Mitigation and Control*. IntechOpen. <https://www.intechopen.com/chapters/51555>
- Segura Mateu, F. [Francisco]. (2013). Diseño de pantallas acústicas para reducir. [Trabajo final de grado]. Universitat Politècnica de València. <http://hdl.handle.net/10251/35924>
- Seoadmin. (2021). Generadores eléctricos y el ruido que producen [entrada de blog]. *Soluciones en energía*. <https://rentadepantallas.com.mx/generadores-electricos-y-el-ruido-que-producen>
- Sposob, G. [Gustavo]. (2018). Contaminación acústica. *Enciclopedia de humanidades*. <https://humanidades.com/contaminacion-acustica>
- Serrano Pérez, M. [Marta], Abad Toribio, L. [Laura], Magro Andrade, R. [Rafael] y García Martín, T. [Tomás]. (2009). Estudio de la tipología de las pantallas acústicas. Normativa y estado del arte. *Tecnología y Desarrollo*. VII, 4-43. [https://www.researchgate.net/publication/40223878\\_Estudio\\_de\\_la\\_tipologia\\_de\\_las\\_pantallas\\_acusticas\\_Normativa\\_y\\_estado\\_del\\_arte](https://www.researchgate.net/publication/40223878_Estudio_de_la_tipologia_de_las_pantallas_acusticas_Normativa_y_estado_del_arte)

## ANEXOS

### DETALLES TECNICOS

Ruido emitido [dB]	76	Material	Aluminio	Aleación de aluminio	Salida de 12 V	Si
Funcionamiento ininterrumpido	Si	Asa de transporte	Si		Funcionamiento continuo	5,75
Perforación x carrera [mm]	88 x 75	Desplazamiento [cm <sup>3</sup> ]	456		Modelo de motor	188FA
Clase de protección IP	IP23	Consumo de líquido [l/h]	1,4		Tipo de combustible	Diésel
Frecuencia [Hz]	50	Capacidad del depósito de combustible [L]	12,5		Potencia nominal [W]	2660/4600
Protección contra sobrecarga	Si	Potencia nominal 50 Hz [kVA]	5.75		Factor de potencia	1
Potencia máx.	1650 / 4600	Modulación de ancho de pulso	Si		Tipo de aceite de motor	SAE 10W30 (con etapa CD)
Sistema de arranque	Eléctrico	Nivel de ruido [dB]	76		Nivel de presión sonora [dB]	94
Combustible específico [g/kWh]	≤280	Regulación de tensión	Si		Temperatura de trabajo [°C]	-10 - 40
Tensión [V]	230/400	Dimensiones (lar. x an. x al.)	70 x 49 x 67.5 cm		Peso	102.8 kg
Dimensiones del envío (LxWxH)	71.5 x 50.5 x 77.5 cm	Peso del envío	114.4 kg			



- a. Tapón de llenado del depósito de combustible
- b. Silenciador de escape
- c. Carcasa
- d. Agarradero de transporte
- e. Aleta para el motor y su manejo (en ambos lados)
- f. Acceso al filtro de aire (en el lateral - no visible en la imagen)
- h. Ruedas de transporte

### 3.2. Preparación para el trabajo

#### LUGAR DE USO

La temperatura ambiente no debe exceder los 40°C y la humedad relativa no debe exceder el 90%. Coloque la unidad de manera que garantice una buena circulación de aire y colóquela en un área bien ventilada.

**¡ADVERTENCIA!** Mantenga una distancia mínima de 1,5 m de cada pared de la unidad.

## Explicación de los símbolos

	El producto cumple con los requisitos de las correspondientes normas de seguridad.
	Antes de utilizar, leer atentamente el manual.
	Producto reciclable.
	¡PRECAUCIÓN! o ¡ADVERTENCIA! o ¡RECUERDA! describir una situación (señal general de advertencia).
	Utilizar protección auditiva. La exposición al ruido puede producir pérdida de la audición.
	Usar guantes de protección.
	Usar calzado especial.
	Utilizar un delantal de protección.
	¡ADVERTENCIA! ¡Advertencia de descarga eléctrica!
	¡ADVERTENCIA! Peligro de incendio: ¡materiales inflamables!
	¡Riesgo de intoxicación por sustancias o compuestos tóxicos!
	¡Parada de emergencia!
	¡advertencia! ¡Tocar la superficie caliente puede provocar quemaduras!



Uso del Pulse LabShop durante la medición, interfaz del programa (izquierda) y ordenador portátil con procesador Intel® Inside Pentium 4 (centro y derecha).



Equipos durante la medición (izquierda), altavoz Denon Audio Commander (centro) y micrófono tipo 4935 (derecha).



Equipos durante la medición, analizador de ruido Brüel & Kjaer PULSE 3560 (izquierda y centro) y micrófono tipo 4935 (derecha).



*Vista del demostrador de red triangular RT2.*



*Vista del demostrador de red triangular RT1.*



*Vista del demostrador de red cuadrada RC2.*



*Vista del demostrador de red cuadrada RC1.*