

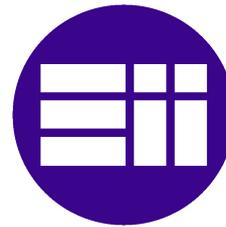


*Diseño de un banco
de silenciadores
para la empresa Audiotec*



UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES



GRADO EN INGENIERIA DE TECNOLOGIAS INDUSTRIALES

**DISEÑO DE UN BANCO DE PRUEBAS
PARA SILENCIADORES ACÚSTICOS DE
APLICACIÓN INDUSTRIAL**

AUTOR: MERINO FIGUEREDO,EROS

TUTOR: TARRERO FERNANDEZ, ANA ISABEL
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

VALLADOLID, SEPTIEMBRE 2016



*Diseño de un banco
de silenciadores
para la empresa Audiotec*





Resumen

En este Trabajo de Fin de Grado (TFG) se expone el diseño de un banco pruebas de silenciadores. En el trabajo se estudia la exposición de los distintos tipos de silenciadores que se pueden encontrar en el mundo de la ingeniería acústica y que se han tomado como base para el diseño del banco de pruebas para un determinado tipo de silenciador para el laboratorio de la empresa Audiotec.

Además de la exposición teórica de los silenciadores también se presentan resultados experimentales realizados en varios ensayos que permiten orientar sobre la cuantificación de la atenuación sonora que se obtiene con ellos.

Palabras clave : Silenciador , ingeniería acústica , ensayos, atenuación.

Agradecimientos

Se agradece a la empresa AudioTec su ayuda inestimable en este proyecto por su colaboración al haberme facilitado las herramientas para poder llevar haber llevado a cabo los distintos ensayos y planteamientos del trabajo.



*Diseño de un banco
de silenciadores
para la empresa Audiotec*





Indice

	Página
0. Justificación y objetivos.....	9
1. Introducción.....	11
2. Tipos de silenciadores en función de las propiedades de atenuación.....	13
2.1. Silenciadores disipativos o resistivos.....	13
2.1.1. Silenciadores disipativos tipo S.....	14
2.1.2. Silenciadores disipativos tipo DSR.....	15
2.2. Silenciadores reactivos.....	15
2.2.1. Silenciadores de área discontinua.....	16
2.2.2. Silenciadores de cámaras de expansión.....	16
2.2.3. Silenciadores de ramas laterales.....	17
2.2.4. Silenciadores de Helmholtz.....	17
2.2.5. Silenciadores tipo R.....	18
3. Tipos de silenciadores en función de la forma geométrica.....	19
3.1. Rectangulares.....	19
3.2. Circulares.....	20
3.3. Rejillas acústicas.....	20
4. Tipos de silenciadores comerciales.....	21
4.1. Silenciadores resistivos.....	21
4.2. Silenciadores reactivos.....	23



5. Otras alternativas	25
5.1. Cámaras de expansión.....	25
5.2. Silenciadores espiral.....	25
5.3. Silenciador híbrido.....	26
5.4. Silenciador realimentado.....	26
6. Caracterización acústica de los silenciadores.....	27
6.1. Pérdidas de transmisión.....	27
6.2. Pérdidas de inserción.....	27
6.3. Pérdidas de transmisión del silenciador de área discontinua.....	28
6.4. Pérdidas de transmisión del silenciador de cámara de expansión...	28
6.5. Pérdidas de carga.....	28
6.6. Pérdidas de transmisión del silenciador de ramas laterales.....	29
6.7. Pérdidas de transmisión en el silenciador de Helmholtz.....	29
7. Normativa de referencia.....	31
8. Términos y definiciones.....	33
9. Instalaciones de ensayo y requisitos de la instrumentación.....	39
9.1. Objetivo y tipos de instalaciones de ensayo	39
9.2. Equipo para el ensayo acústico de los silenciadores.....	40
9.3. Mediciones de la intensidad acústica.....	43
10. Diseño de un sistema de ensayo para silenciadores.....	45
10.1. Pautas para el diseño del sistema de ensayo de silenciadores.....	45



10.2. Diseño del sistema de ensayo de silenciadores.....	45
10.2.1. Sistema vertical.....	47
10.2.2. Silenciadores.....	51
10.2.3. Conducto de sustitución.....	52
10.2.4. Transición.....	52
10.2.5. Caja para alojamiento de fuente sonora.....	53
10.2.6 Filtro modal.....	56
11. Ensayo y calculo de parámetros (mediciones “in situ”).....	57
11.1. Procedimiento de ensayo y normas empleadas.....	57
11.2. Metodología y parámetros de ensayo.....	57
11.3. Instrumentación empleada.....	59
11.4. Características de los recintos y condiciones ambientales.....	59
11.5. Cálculo “in situ” de pérdidas de inserción.....	60
11.6. Información gráfica del silenciador y de la zona de ensayo.....	64
12. Banco de silenciadores con ventilador.....	70
12.1. Concepto de pérdida de carga y tipos.....	70
12.2. Razones por las que analizar pérdidas de carga.....	71
12.3. Cálculo de pérdidas de carga.....	72
12.4. Características del ventilador.....	73
12.5 Procedimiento empleado.....	74
13. Conclusiones.....	75



14. Bibliografía..... 77



0. Justificación y objetivos

En la sociedad actual es necesario reducir la contaminación acústica que nos rodea, vivimos en una sociedad ruidosa debido fundamentalmente al entorno tecnológico en el que nos desarrollamos, por lo que se hace necesario el estudio de los problemas acústicos de los edificios a nivel de proyecto, con el objetivo de garantizar el confort de los usuarios.

Una de las formas de reducir el ruido es mediante los silenciadores acústicos y el uso de estos productos en el ámbito de la sociedad tanto en el ambiente empresarial/industrial como en el doméstico es fundamental.

En cuanto a los objetivos, el objetivo principal de este proyecto es el diseño de un banco de silenciadores que sea modular, versátil, adaptable a distintos tipos de silenciadores y adaptable al entorno de medida disponible con el fin de cuantificar los niveles sonoros medidos en decibelios (dB), transmitido por una fuente sonora.

Dado que estamos realizando un experimento a la hora de diseñar un silenciador , primero se hará un repaso de todos los tipos de silenciadores que existen con sus diferentes clasificaciones según su forma , su capacidad de atenuar etc., así como las fórmulas que expresan las pérdidas de carga, de inserción...



*Diseño de un banco
de silenciadores
para la empresa Audiotec*





1. Introducción

Un silenciador acústico se define como un filtro que se intercala en un conducto a través del cual circula aire o un gas, con objeto de atenuar la emisión sonora transmitida a través del conducto hacia otras zonas del circuito o hacia el ambiente exterior.

Los silenciadores se clasifican en función de su forma de operar, pudiendo ser disipativos o reactivos.

Su funcionamiento se basa en la acción transformadora, reflectora etc.. en calor del material absorbente con el que se fabrican las lamas interiores, formando cámaras, conductos o laberintos, según diseño y construcción, por donde el aire es canalizado.

Algunos tipos de silenciadores son los siguientes:

- Silenciador acústico de laminas paralelas sin transiciones
- Silenciador acústico desalineado
- Silenciador acústico circular con nucleo
- Silenciador acustico flexible
- Silenciador acústico con aprehensor de chispas
- Silenciadores acústicos en codo

Para elegir el silenciador acústico más apropiado en cada caso es necesario conocer las condiciones de funcionamiento a las que estará sometido el silenciador acústico. Tales como:

- Caudal de aire
- Pérdida de carga
- Aislamiento acústico necesario
- Dimensiones de las que disponemos para su instalación



Son algunos de los parámetros que se necesitan para la elección de los silenciadores acústicos. La atenuación de los silenciadores acústicos depende de la separación entre celdillas y de la longitud del mismo, que equivale al recorrido que debe realizar el aire al pasar a través del silenciador acústico.

Pongamos el ejemplo de una instalación de climatización, en la que el ruido y las vibraciones producidas y las turbulencias causadas por el flujo del aire que circula a través de la red de distribución de aire pueden generar ruidos que se transmitan a los espacios habitables. Si la superficie interior de los conductos está constituida por un material que refleje con facilidad el sonido (como por ejemplo, el acero), estas turbulencias pueden provocar que las paredes de los conductos entren en vibración, transmitiendo así el ruido por el resto del recinto.

Colocando dichos silenciadores se puede evitar o reducir este problema.

Los silenciadores proporcionan un importante medio de reducción del sonido en el camino de propagación del ruido. Los silenciadores tienen numerosas aplicaciones y diferentes diseños basados en varias combinaciones de absorción y reflexión del sonido.

Los silenciadores acústicos son aplicables, principalmente entre otros aspectos para:

- Atenuar el ruido del sistema y evitar las interferencias con los equipos de calefacción, ventilación y aire acondicionado
- Evitar o reducir la transmisión del ruido a través de aberturas de ventilación de las salas con altos niveles interiores de sonido
- Atenuar el ruido de escape generado por líneas de alta presión
- Atenuar el ruido generado en la entrada y salida de los motores de combustión interna
- Atenuar el ruido de entrada y salida de ventiladores, compresores y turbinas

Podemos realizar varias clasificaciones atendiendo a diferentes aspectos y se expone en el los siguientes apartados.



2. Tipos de silenciadores en función de las propiedades de atenuación

La clasificación mas general que podemos hacer es distinguir entre los silenciadores disipativos y los reactivos en función del principio físico que utiliza para reducir el ruido.

2.1 Silenciadores disipativos o resistivos

Los silenciadores resistivos o disipativos tienen la tarea de disipar la energía de las ondas y lo hacen mediante la conversión de energía acústica en calor. Las paredes del conducto están cubiertas con absorbentes porosos, normalmente están hechos de lana mineral o fibra de vidrio. La amortiguación se consigue normalmente por las fuerzas viscosas por lo que el objetivo es maximizar las velocidades de las partículas en el material poroso. Esto se favorece si se mantiene una pequeña distancia entre el absorbente y la pared. Podemos ver algunos ejemplos de ellos en la figura 1 (a la derecha un silenciador cilíndrico y a la izquierda uno de rejillas).

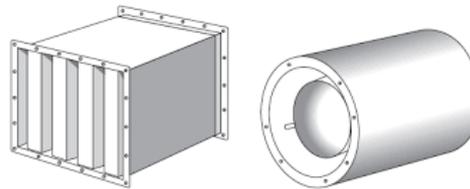


figura 1

Encontramos dos tipos de silenciadores disipativos:

- Silenciadores disipativos tipo S
- Silenciadores disipativos tipo DSR



2.1.1 Silenciadores disipativos tipo S

Este tipo de silenciadores presenta las siguientes características:

- Las formas y las longitudes de los conductos de entrada y salida se fabrican según las necesidades del cliente, posibilidad de entradas y salidas con combinaciones axial, radial, con ángulos especiales, etc..
- Los conectores son bridas de tipo “brida loca” o “Lap-Joint”, junto con un extremo con resalte (valona)
- Para asegurar la estanqueidad de las uniones entre conductos, se suministran juntas Klinger libres de amianto
- Estos silenciadores atenúan por absorción con cámara de expansión
- Se observa una mejor atenuación a frecuencias medias y altas
- Hay bajas pérdidas de carga
- Los diámetros de conducto pueden ir de 1” hasta 6”
- Los diámetros de cámara se pueden ajustar a las necesidades del cliente
- El silenciador puede ir colocado en vertical u horizontal
- Se les puede implementar un apagachispas. Diferentes opciones de fabricación en acero galvanizado, negro lacado, inoxidable o aluminio

Estos silenciadores son adecuados para el escape de motores de combustión interna, grupos electrógenos etc..

A consecuencia de las turbulencias que se producen en el flujo de gases a su paso a través de los silenciadores, se genera un ruido denominado “self noise”, que ha de ser considerado por su efecto residual sobre la atenuación global conseguida.



2.1.2 Silenciadores disipativos tipo DSR

Las atenuaciones conseguidas y los caudales soportados por estos sistemas van a depender de las dimensiones de los baffles acústicos instalados. Estos silenciadores atenúan por absorción.

Este tipo de silenciadores presentan las siguientes características:

- Están compuestos por una carcasa envolvente de acero galvanizado de 1.5 mm que da forma al conjunto, delimitando las dimensiones interiores y exteriores, en cuyo interior se instalan los baffles acústicos
- Los baffles acústicos conformados por un bastidor de chapa de acero galvanizado, con una disposición interior multicapa de lana de roca mineral con un grosor de 200 mm
- Un fácil montaje gracias a la robustez del conjunto y a su diseño modular por piezas, solventando posibles dificultades de acceso a cuartos técnicos de instalaciones
- Este modelo atenúa por absorción en su sección de paso
- Mejor atenuación a frecuencias medias. Las dimensiones de los baffles y las secciones de paso se pueden modificar para ajustarlas al espacio disponible y conseguir la máxima reducción acústica con unas pérdidas de carga mínimas

Estos silenciadores son adecuados para la disminución de ruido en la entrada/salida de aire en las canalizaciones en los sistemas de ventilación y climatización.

2.2 Silenciadores reactivos

Los Silenciadores reactivos se componen de tubos acoplados, sin material absorbente. El principio físico que utilizan para atenuar el sonido es la reflexión, parte de la energía incidente es devuelta a la fuente debido a la reflexión de ondas, resultado de la existencia de cambios de sección y otras particularidades geométricas.

Suelen acabar con el sonido caracterizado por tonos discretos, especialmente en regiones de baja frecuencia.



Estos silenciadores juegan con los cambios en la geometría sin introducir materiales absorbentes. Encontramos distintos tipos de silenciadores según su geometría :

2.2.1 Silenciadores de area discontinua

La discontinuidad en el área es la manera más simple de producir la reflexión. El silenciador se puede diseñar de distintas maneras, la mas común es la que se muestra en la figura 2.



figura 2

2.2.2 Silenciadores de cámara de expansión

Las cámaras de expansión difieren de los silenciadores de área discontinua, ya que en este tipo de silenciadores se produce un aumento de superficie y posteriormente una disminución del mismo valor creando una cámara como se muestra en la figura 3. En este caso, los conductos de entrada y salida tienen el mismo área transversal.

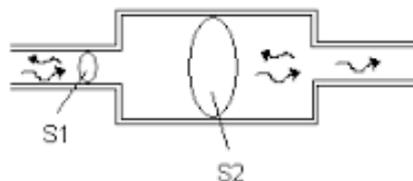


figura 3



2.2.3 Silenciadores de ramas laterales

En este caso se aumenta el volumen añadiendo una cámara en paralelo a la principal y comunicada con ésta, es allí donde se produce la reflexión. Podemos ver un ejemplo clásico de este tipo de silenciador en la figura 4.

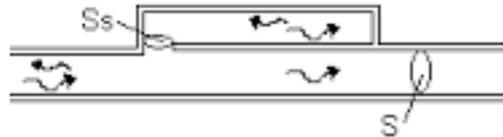


figura 4

2.2.4 Silenciadores de helmholtz

Un silenciador de Helmholtz es el equivalente acústico del sistema mecánico masa-muelle, y se muestra en la figura 5.

Consta de un volumen cerrado, que actúa como el muelle, que está conectado al sistema de conductos a través de un conducto de menor tamaño, en cuyo interior el fluido actúa como la masa. El volumen es análogo al muelle, y el aire en el cuello es similar a una masa.

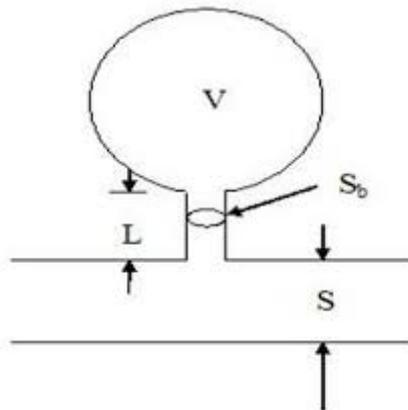


figura 5



2.2.5 Silenciadores tipo R

Este tipo de silenciadores presentan las siguientes características:

- Las formas y las longitudes de los conductos de entrada y salida se fabrican con diferentes posibilidades de entradas y salidas así como con diferentes combinaciones: axial, radial, con ángulos especiales, etc..
- Los conectores son bridas de tipo “brida loca” o “Lap-Joint”, junto con un extremo con resalte (valona)
- Para asegurar la estanqueidad de las uniones entre conductos, se suministran juntas Klinger libres de amianto
- Este modelo atenúa de manera reactiva por resonancia y reflexión de ondas
- Se observa una mejor atenuación a frecuencias medias y bajas
- Hay pérdidas de carga moderadas
- Los diámetros de conducto pueden ir de 1” hasta 6”
- Los diámetros de cámara se pueden ajustar a las necesidades del cliente
- El silenciador puede ir colocado en vertical u horizontal
- Se les puede implementar un apagachispas
- Diferentes opciones de fabricación en acero galvanizado, negro lacado, inoxidable o aluminio



3. Tipos de silenciadores en función de la forma geométrica

La siguiente clasificación que realizaremos será según la forma geométrica de los silenciadores.

3.1 Rectangulares

Los silenciadores rectangulares permiten el paso del flujo de aire, eliminando o atenuando, la transmisión de ruido, en las entradas de elementos tales como salas de máquinas, instalaciones de ventilación, salidas de humos, cerramientos acústicos de maquinaria etc, fabricado por materiales de primera calidad. Véase en la figura 6.

La atenuación del ruido se produce por una absorción lateral del sonido dada por las colisas, es importante el cálculo de cada unidad, en función de la pérdida de carga de la máquina, si esto no se calcula correctamente, se puede dar el caso de que la máquina se quemase o bien de insuficiente absorción, por lo que no conseguiríamos el aislamiento deseado.



figura 6

Son un elemento imprescindible para atenuar el ruido a través de conductos o aberturas de ventilación, cualquiera que sea la fuente sonora que lo produce.



3.2 Circulares

Los Silenciadores acústicos circulares se adaptan con suma facilidad a las instalaciones de conductos circulares de aire. Intercalados entre tramos de conducto permiten la atenuación del ruido de ventiladores y turbinas. Véase en la figura 7.



figura 7

3.3 Rejillas acústicas

Las rejillas acústicas son tomas o salidas de aire acústicas de profundidad reducida. El principio de funcionamiento es parecido al de un silenciador disipativo de celdilla paralela. En este tipo de silenciador, las celdillas están fabricadas con chapa perforada y se disponen inclinadas dentro de la misma. Véase en la figura 8.



figura 8



4. Tipos de silenciadores comerciales

La mayoría de los silenciadores comerciales están diseñados para eliminar el ruido del aire en los conductos de aire acondicionado. Hay dos grandes categorías generales :

- Silenciadores utilizados en viviendas, es decir, para uso domestico
- Silenciadores para uso industrial

Además de los silenciadores que acabamos de presentar, que podemos decir que son las soluciones más clásicas al problema del ruido, hoy en día se investiga en nuevas opciones de silenciar y hay muchos silenciadores comercializados disponibles para un uso diario.

4.1 Silenciadores resistivos

Encontramos dos modelos : (figura 9)

- El primero (derecha) cuenta con material de absorción sólo en la carcasa, su pérdida de inserción es moderada cuando el diámetro es grande
- El segundo modelo (izquierda) además de recubrir la carcasa con material absorbente, cuenta con un núcleo en su interior, también recubierto de éste material, por lo que mejora las pérdidas de inserción del primer modelo



figura 9



Los silenciadores circulares se fabrican en dos versiones: sin núcleo interior (modelo SN) y con núcleo interior (modelo CN), siendo su utilización principal la reducción de ruidos en instalaciones de aire acondicionado o ventilación.

La construcción se realiza con una envolvente exterior de chapa galvanizada, separadores intermedios del mismo material, envolvente interior en chapa galvanizada perforada y material acústico aislante de lana mineral con velo de protección exterior, para evitar el desprendimiento de partículas.

El núcleo de los silenciadores modelo SC-CN, se realiza con un envolvente de chapa galvanizada perforada y material acústico de las mismas características señaladas con anterioridad, llevando casquetes esféricos a la entrada y salida del silenciador, a fin de conseguir la menor pérdida de carga posible.

El siguiente silenciador tiene refuerzos de la pared y material de absorción en ellas, mejorando así la absorción y el aislamiento acústico. Tiene buenas propiedades de atenuación de sonido y además presenta una construcción compacta. Las superficies de absorción no están perforadas con lo que reduce costes. La transmisión del sonido a través de la carcasa se reduce al mínimo. Véase en la figura 10.



figura 10

En las rejillas acústicas, las lamas absorbentes están fabricadas con chapa perforada y se disponen inclinadas en el interior de la misma, adicionalmente, las rejillas acústicas por tener los elementos absorbentes recubiertos de chapa galvanizada, ofrecen una muy buena resistencia a la intemperie.



También se han desarrollado silenciadores para los casos en que los requisitos de nivel de ruido son muy estrictos. Se han diseñado para obtener una buena atenuación tanto a altas como a bajas frecuencias. Cuando el flujo de aire o el sonido entran al silenciador, primero pasan a través de una sección baffle normal. A continuación, entran en una zona con forma parecida a un laberinto, y luego pasan a través de los baffles dispuestos transversalmente.

La ventaja de usar los silenciadores comerciales es que se manipulan mejor, se pueden abrir fácilmente para la limpieza, o para cambiar los materiales de absorción en el sitio sin tener que desmontar el silenciador.

4.2 Silenciadores reactivos



figura 11

Estos silenciadores están contruidos con varios silenciadores de tubos y silenciadores de membrana, y no contienen material absorbente poroso. Podemos observar en la figura 11 los diferentes tipos de silenciadores reactivos tales son :

- El silenciador de tubo (PRV), (arriba a la izquierda) está compuesto por dos cámaras, en el cual el sonido se refleja hacia atrás en los cambios de sección transversal



- El silenciador de tubo MPRV multi-puerto (arriba a la derecha y abajo a la izquierda), se ha desarrollado principalmente para bombas de vacío y para la atenuación de sonido en un turbo ventilador. Para atenuar a alta frecuencia sería necesario además un silenciador de absorción
- El silenciador de placa o membrana, el tipo MBV (abajo a la derecha), consiste en una placa delgada en frente de un espacio de aire. La membrana actúa como una masa y el espacio de aire como un resorte. Los deflectores de membrana se han desarrollado para la atenuación de bajas frecuencias. Gracias a su construcción modular, se pueden disponer tal como el silenciador BVN cuando se requiere atenuación a baja frecuencia



5. Otras alternativas

A continuación se presentan cuatro alternativas mas novedosas a las descritas anteriormente.

5.1 Cámaras de expansión.

Atenuación del sonido en un conducto circular usando pequeñas rendijas excéntricas de expansión en serie.

En este caso se estudia el comportamiento de pequeñas cámaras de expansión circulares al funcionar como silenciador/resonador en el conducto. De ahora en adelante los llamaremos discos de expansión o discos directamente. La frecuencia de resonancia de cada disco depende de su profundidad, por lo que se prueban varias configuraciones con tamaños variados para ampliar el rango de frecuencia de actuación.

En primer lugar se estudia el cilindro con varios discos colocados en serie, y de manera concéntrica al conducto, de diámetros distintos. Aunque esta configuración prácticamente muestra un comportamiento que equivale a la suma de comportamientos de cada disco, existe una cierta interacción cuando las frecuencias de resonancias de los discos se acercan entre ellas.

En segundo lugar se examina la configuración con un único disco excéntrico al conducto. Se estudian varios casos, con discos de distintos diámetros. En cada caso estudiado se obtienen dos frecuencias naturales. Mientras que la frecuencia más baja parece corresponderse al primer modo del disco, la más alta, parece representar a la frecuencia natural del correspondiente disco concéntrico.

Finalmente se estudia la composición de varios discos en serie, excéntricos al conducto, cuyo comportamiento es bastante complicado en comparación con los casos anteriores, aunque es en alguna de estas configuraciones, en la que se obtiene mejor comportamiento frente a la atenuación del sonido.

5.2 Silenciador espiral

En este apartado se estudia la propagación del sonido a través de un conducto en cuyo interior hay un elemento en forma de espiral. Se considera que no hay flujo de aire a través del conducto.



Este modelo se puede aplicar a sistemas de conductos como sistemas de ventilación, aire acondicionado y sistemas de calefacción, mejorando la atenuación del sonido en una banda de frecuencia determinada.

5.3 Silenciador híbrido

En este caso se estudia la reducción del ruido en un conducto de flujo. Se desea conseguir la implementación de una solución híbrida pasiva/activa.

Este silenciador se lleva a cabo con el propósito de diseñar un tratamiento acústico híbrido combinando las propiedades pasivas del material poroso y las técnicas de control activo, se presta especial atención a la selección de la capa pasiva.

El objetivo principal es encontrar la impedancia adecuada en la cara superficial del absorbente, aquella que permite alcanzar las máximas atenuaciones en una banda ancha de frecuencias.

Se estudian distintas capas a fin de encontrar la impedancia óptima en la superficie del revestimiento híbrido. Los resultados muestran la dificultad de conseguir simultáneamente una resistencia (se corresponde con la parte real de la impedancia) y reactancia (se corresponde con la parte imaginaria de la impedancia) óptima, por lo que se tiene que llegar a un compromiso para conseguir la máxima atenuación.

5.4 Silenciador realimentado

La realimentación combinada de control activo del sonido y control de frente de velocidad basado en un novedoso modelo de sistema conducto-altavoz.

Como ya se comentó al principio de este capítulo los sistemas basados en el control activo del sonido proporcionan buena atenuación de éste a bajas frecuencias, mediante interferencia destructiva entre una señal secundaria del atenuador acústico y la fuente acústica primaria del ruido.

En este estudio se desarrolla un novedoso modelo de vía secundaria que se describe por dos funciones de transferencia en cascada y dos perturbaciones de sistemas conducto-altavoz. Una perturbación se impone en fase con la velocidad del altavoz, que normalmente es ignorado por el sistema ANC, mientras que la otra perturbación es la presión del sonido en un lugar determinado del conducto.



6. Caracterización acústica de los silenciadores

A continuación vamos a describir los principales parámetros acústicos que definen a los silenciadores. Existen distintas formas de calcular las pérdidas de transmisión de acuerdo a la geometría del silenciador.

6.1 Pérdidas de transmisión (Dtl)

Se define como el ratio entre la presión sonora incidente ($P_{incidente}$) y transmitida ($P_{transmitida}$), cuando el silenciador tiene una terminación anecoica, libre de reflexión.

$$Dtl = 10 \cdot \log \left(\frac{P_{incidente}}{P_{transmitida}} \right)$$

En la práctica este tipo de terminación es difícil de conseguir, especialmente a frecuencias bajas.

En esas situaciones esta medida puede ser engañosa, por lo que se utilizan otros parámetros más adecuados que dan medidas más fiables.

6.2 Pérdidas de inserción (Dil)

Se compara la presión sonora en un punto constante para dos configuraciones diferentes de silenciador. Podemos medir en sistemas acoplados los cambios en el nivel de presión debido a la modificación del sistema. La pérdida de inserción podría tener un valor negativo, mientras que la pérdida de transmisión es siempre positiva.

$$Dil = 20 \log \left(\frac{P_b}{P_a} \right)$$

P_b : Presión sonora en un punto constante para una determinada configuración.

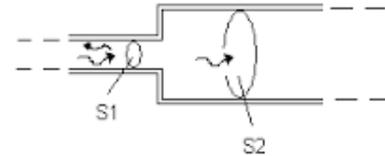
P_a : Presión sonora en un punto constante para otra determinada configuración.



6.3 Pérdidas de transmisión del silenciador de área discontinua (Dtl)

Vienen definidas por la siguiente ecuación:

$$Dtl = 10 \log \left(\frac{(S1+S2)^2}{4S1+S2} \right)$$



Debemos observar la figura 2 para poder comprender los términos de la fórmula.

S1: Área pequeña

S2: Área grande

6.4 Pérdidas de transmisión del silenciador de cámara de expansión (Dtl).

Vienen definidas por la siguiente ecuación:

$$Dtl = 10 \log \left(1 + \left(\frac{S1}{2S2} - \frac{S2}{2S1} \right)^2 \cdot \sin^2(kl) \right)$$



Observamos la figura 3 para poder entender los términos de la fórmula.

S1: Área pequeña

S2: Área grande

k: constante de presión

l: longitud total del silenciador

6.5 Pérdidas de carga

Calculadas a través de un ventilador proporcionando un flujo de aire y vienen definidas por la siguiente ecuación:

$$\Delta p = \zeta \left(\frac{\rho V^2}{2} \right)$$



Siendo los términos de la fórmula :

ρ : densidad del aire

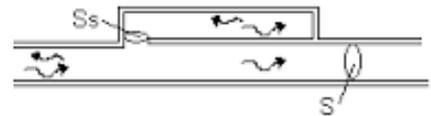
V : velocidad media del flujo de aire

ζ : coeficiente de resistencia al flujo

6.6 Pérdidas de transmisión del silenciador de ramas laterales (Dtl).

Vienen definidas por la siguiente ecuación:

$$Dtl = 10 \log \left(\frac{S_s + S}{4} \cdot S_s + S \right)$$



Debemos observar la figura 4 para comprender los términos de la fórmula.

S_s : Área pequeña

S : Área grande

6.7 Pérdidas de transmisión en el silenciador de Helmholtz

En la gráfica (figura 12) podemos observar las pérdidas de transmisión para un silenciador de Helmholtz con ($M=0.2$), es decir , con relleno absorbente y con ($M=0$), es decir, sin relleno absorbente, y se observa claramente como quedan atenuadas las pérdidas con relleno absorbente en comparación a la otra situación (sin relleno absorbente).

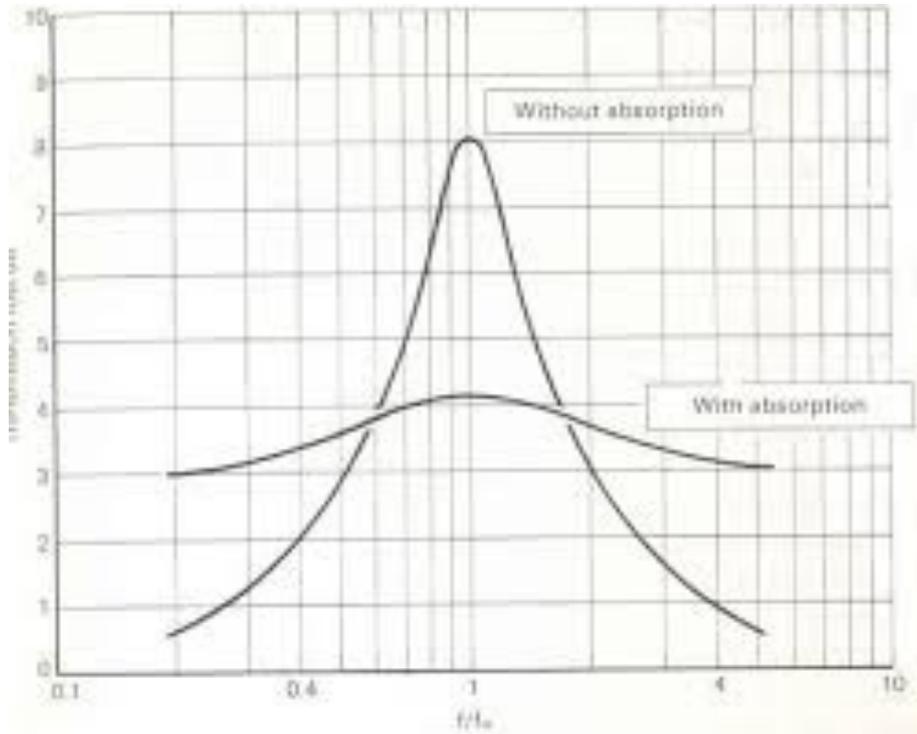


figura 12



7. Normativa de referencia

Las normas empleadas en el diseño del banco de silenciadores son las siguientes:

- UNE-EN ISO 7235 Acústica. Procedimiento de medición en laboratorio para silenciadores en conducto y unidades terminales de aire. Pérdida por inserción, ruido de flujo y pérdida de presión total
- UNE-EN ISO 11691 Acústica. Medición de la pérdida de inserción de silenciadores en conducto sin flujo. Método de medición en laboratorio
- UNE-EN ISO 11820 Acústica. Mediciones *in situ* de silenciadores
- IEC61260 Electroacústica. Filtros de banda de octava y de una fracción de banda de octava
- UNE-EN ISO 140-4 Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 4: Medición "In-Situ" del aislamiento acústico a ruido aéreo entre locales
- Ley 5/2009 del Ruido de Castilla y León
- Norma ISO 3741. [ISO 3741:1999] Acústica. Determinación de los niveles de potencia acústica de las fuentes de ruido a partir de la presión acústica. Métodos de precisión en cámaras reverberantes



*Diseño de un banco
de silenciadores
para la empresa Audiotec*





8. Términos y definiciones

En este apartado se indicarán los términos y definiciones de referencia para el desarrollo del proyecto y sus aspectos más importantes.

8.1 Pérdida por inserción (D_i)

Ya hemos definido estas pérdidas anteriormente, exponemos otra forma de calcularlas según la norma.

Se define como la reducción en el nivel de la potencia acústica en el conducto detrás del objeto de ensayo debido a la inserción del objeto de ensayo en el conducto en lugar de un conducto de sustitución, y viene dada por la ecuación:

$$D_i = L_{WII} - L_{WI}$$

- I. L_{WI} es el nivel de la potencia acústica en la banda de frecuencia considerada, que se propaga a lo largo del conducto de donde ensayo o que radia dentro de la cámara reverberante conectada, cuando el objeto de ensayo está instalado
- II. L_{WII} es el nivel de la potencia acústica en la banda de frecuencia considerada, que se propaga a lo largo del conducto de ensayo o que radia dentro de la cámara reverberante conectada, cuando el conducto de sustitución sustituye al objeto de ensayo

8.2 Pérdida por transmisión (D_t)

Diferencia entre los niveles de las potencias acústicas incidentes (W_{inc}) y transmitidos (W_{trans}) a través del objeto de ensayo.

$$D_t = W_{inc} - W_{trans}$$



8.3 Velocidad frontal (V_f)

Velocidad frente al objeto de ensayo.

$$V_f = \frac{Q_v}{S_1}$$

donde:

Q_v es la tasa de flujo de volumen, en metros cúbicos por segundo (m^3/s)

S_1 es el área de la sección recta de la entrada del objeto de ensayo, en metros cuadrados (m^2).

8.4 Pérdida de presión total (Δp_t)

Diferencia entre las presiones totales flujo arriba (P_1) y flujo abajo (P_2) del objeto de ensayo.

$$\Delta P_t = P_1 - P_2$$

8.5 Coeficiente de pérdida de presión total (ζ)

$$\zeta = \frac{\Delta p_t}{\frac{1}{2} \rho_1 v_f^2}$$

donde:

Δp_t es la pérdida de presión total, en pascales (Pa)

ρ_1 es la densidad del aire flujo arriba del silenciador, en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3)

v_f es la velocidad frontal, en metros por segundo (m/s)



8.6 Delantera

Posición relativa a la dirección de la propagación del sonido de la señal acústica que se debe medir, correspondiente al "lado de la fuente".

8.7 Trasera

Posición relativa a la dirección de la propagación del sonido de la señal acústica que se debe medir, correspondiente al "lado del receptor".

8.9 Conducto de ensayo

Conducto recto, rígido de sección recta constante delante y detrás del objeto de ensayo.

8.10 Transición

Elemento del conducto que conecta entre sí dos secciones del conducto con diferentes secciones rectas.

8.11 Terminación anecoica

Dispositivo que sirve para reducir las reflexiones sonoras en el extremo del lado receptor del conducto de ensayo.

8.12 Elemento de transmisión

Conexión desde el conducto de ensayo detrás del objeto de ensayo hasta una cámara reverberante, que transmite una fracción determinada de la energía acústica desde el conducto a la cámara.



8.13 Conducto de sustitución:

Elemento del conducto rígido, no absorbente, con la misma longitud y las mismas secciones rectas de conexión que el objeto de ensayo.

8.14 Cámara reverberante:

Cámara de ensayo que cumple con los requisitos de la Norma ISO 3741. [ISO 3741:1999]

8.15 Sonido regenerado, ruido de flujo:

Ruido producido por las condiciones del flujo en el objeto de ensayo.

8.16 Nivel del ruido de fondo:

Nivel de presión acústica cuando se realizan las mediciones con el conducto de sustitución en su sitio y el altavoz está apagado.

El nivel del ruido de fondo se expresa en decibelios (dB).

8.17 coeficiente de reflexión, r :

Cociente de la amplitud de la presión sonora reflectada y la amplitud de la presión sonora de la onda acústica incidente en el objeto reflectante.

8.18 Rango de frecuencias de interés:

Bandas de un tercio de octava con frecuencias centrales desde 50 Hz a 10.000 Hz.



8.19 Pérdida por inserción limitadora:

Pérdida por inserción máxima que se puede determinar en una instalación de ensayo determinada sin flujo.

8.20 Objeto de ensayo:

El objeto que se va a ensayar será un silenciador completo, tal y como lo suministra el fabricante/proveedor, una o varias láminas paralelas instaladas en un conducto de sustitución, o una unidad terminal de aire, listas para su montaje en la instalación de ensayo, incluyendo su carcasa y sus aberturas de entrada y salida para conectar a los conductos.



*Diseño de un banco
de silenciadores
para la empresa Audiotec*





9. Instalaciones de ensayo y requisitos de la instrumentación

Podemos distinguir diferentes instalaciones y requisitos de instrumentación.

9.1 Objetivo y tipos de instalaciones de ensayo

Se especifican diferentes instalaciones de ensayo, en función de la tarea a realizar.

- Se utiliza el ensayo acústico sin flujo de aire para determinar la pérdida por inserción de un silenciador completo listo para su montaje en la instalación de ensayo, que se puede sustituir por un conducto de sustitución (o un conjunto de láminas en el conducto de sustitución que tiene que tener una altura mínima del espesor de una lámina) cuando el efecto del flujo de aire en el resultado de ensayo es inapreciable (por ejemplo, para silenciadores absorbentes con una velocidad de flujo de aire menor a 20 m/s)
- También se utiliza el ensayo acústico sin flujo de aire para determinar la pérdida por transmisión de una unidad terminal de aire, que se puede montar dentro o fuera de una cámara reverberante y puede contener un controlador de tasa de flujo (un amortiguador estimulado aerodinámicamente, eléctricamente o neumáticamente) y una caja de distribución con espitas y amortiguadores
- Se aplica el ensayo de flujo para determinar la pérdida de presión total del objeto de ensayo y el nivel de potencia acústica del ruido de flujo (o sonido regenerado)
- Se aplica el ensayo dinámico con flujo de aire para determinar la pérdida por inserción de un silenciador completo o de un conjunto de láminas cuando el efecto del flujo de aire en el resultado de ensayo no es despreciable (por ejemplo, para ciertos tipos de silenciadores reactivos y para velocidades de flujo elevadas)



El ensayo acústico sin flujo (en comparación con el dinámico) permite una conexión más fácil de la fuente sonora al objeto de ensayo y no requiere de grandes niveles de potencia sonora para superar al nivel del ruido de flujo (o sonido regenerado). Debido a la necesidad de un flujo de entrada silencioso, son necesarios unos requisitos más estrictos en el caso de ensayos de flujo y dinámicos.

9.2 Equipo para el ensayo acústico de los silenciadores

La disposición para el ensayo acústico comprende:

- el equipo de la fuente sonora
- el objeto de ensayo
- el equipo del lado receptor

9.2.1 Equipo de la fuente sonora

El equipo de la fuente sonora se utiliza para excitar un campo sonoro con, predominantemente, ondas planas delante del objeto de ensayo, y debe comprender.

- equipo electrónico y un altavoz
- un filtro modal
- un elemento de transición entre el altavoz y el objeto de ensayo

Se deben evitar las resonancias en el conducto delante del objeto de ensayo.

A continuación se describe cada elemento de la fuente sonora:



9.2.1.1 Equipo electrónico y altavoz

Un generador de ruido aleatorio y un amplificador deben excitar a uno o más altavoces en un caja acústicamente sellada. Las resonancias de la caja se deben suprimir por medio de un revestimiento absorbente del sonido interior. Se debe prestar atención en garantizar que el altavoz no transmita sonido estructural no deseado al conducto al que está conectado y que la transmisión del sonido aéreo a través de las paredes de la caja sea suficientemente baja.

9.2.1.2 Filtro modal

El filtro modal es un conducto con elementos absorbentes o reactivos que proporciona una pequeña atenuación del modo fundamental y una atenuación sustancial de los modos de orden superior de la propagación sonora axial. Además, el filtro modal se utiliza para desacoplar la fuente sonora del objeto de ensayo/ conducto de sustitución. Para dicho fin, debe proporcionar una atenuación longitudinal mínima del modo fundamental de 3 dB en el extremo de baja frecuencia y de 5 dB por encima de la frecuencia de corte de los modos de orden superior en los conductos conectados.

9.2.1.3 Elemento de transición

Pueden ser objetos de ensayo curvos o rectos que conectan la caja de alojamiento de la fuente sonora con el silenciador.



9.2.2 Conducto de sustitución

Las paredes del conducto de sustitución deben ser no absorbentes y diseñadas para evitar las fugas del sonido aéreo y la transmisión del sonido estructural.

Se debe registrar e indicar la geometría del conducto de sustitución.

En el caso de un silenciador completo listo para su instalación, debe usarse la carcasa vacía del objeto de ensayo como el conducto de sustitución, si es posible, y si cumple con los requisitos. Si no es posible utilizar la carcasa vacía del objeto de ensayo, se debe ajustar el conducto de sustitución en tamaño y forma a su entrada y salida. Se permiten diferencias en dimensiones lineales menores al 5%.

Las paredes del conducto de sustitución para un objeto de ensayo deben ser rectas y lisas.

9.2.3 Equipo del lado receptor

El equipo del lado receptor debe permitir las mediciones de la presión acústica para determinar la pérdida por inserción del objeto de ensayo. Para este fin, se deben evitar las interferencias pronunciadas en las posiciones de micrófono y las transmisiones por flancos del sonido. Se pueden aplicar tres configuraciones alternativas:

- a) Una cámara reverberante y un elemento de transición que la conecte al objeto de ensayo
- b) Un conducto de ensayo con una terminación anecoica
- c) Condiciones esencialmente de campo libre próximas al extremo abierto del objeto de ensayo/conducto de sustitución



9.3 Mediciones de la intensidad acústica

Las mediciones de la intensidad acústica pueden servir para distinguir entre el sonido radiado desde el extremo abierto al objeto de ensayo (o del conducto conectado) y el sonido debido a fugas, o para la supresión del sonido transmitido a través de la estructura. El nivel efectivo del ruido de fondo se puede reducir hasta 15 dB.

La instrumentación para las mediciones sonoras debe consistir, al menos, en los siguientes elementos:

- a) un micrófono
- b) un filtro de banda de un tercio de octava que cumpla con la Norma IEC61260
- c) un sonómetro o un medidor de intensidad sonora



*Diseño de un banco
de silenciadores
para la empresa Audiotec*





10. Diseño de un sistema de ensayo para silenciadores

El sistema que se va a diseñar en este proyecto pretende simular las condiciones que se dan en un recinto en el que se ha de instalar un silenciador para la atenuación de los niveles de ruido.

10.1 Pautas para el diseño del sistema de ensayo de silenciadores

- Su diseño se realiza a base de material metálico y absorbente empleados ambos en la industria para la insonorización
- Será necesario asegurar que el sonido generado por la fuente de ruido pasa única y exclusivamente a través de los silenciadores para obtener su atenuación real y afirmar que no existe otro camino o medio de transmisión que influya en los resultados obtenidos
- También se evitará mediante junta elástica la posible transmisión de vibraciones entre los distintos elementos que componen el sistema de ensayo

10.2 Diseño del sistema de ensayo de silenciadores

Las mediciones de los niveles sonoros se efectuarán dentro de la cámara reverberante del laboratorio de la empresa AudioTec, por lo que se determina que el espacio más recomendable para colocar el sistema de ensayo es el hueco de la puerta sencilla que tiene como acceso la cámara reverberante.

El sistema pues deberá tener un elemento de la cámara resistente al ruido que posea las dimensiones del hueco de la puerta y en el cual puedan alojarse los distintos silenciadores que deseen ensayarse y además debe de asegurar que la trayectoria de propagación del sonido atraviese el silenciador. Se diseña un sistema mecano compuesto de varios elementos que cumplan las premisas anteriormente definidas. Los elementos son: Un sistema vertical compuesto de dos bastidores, paneles y tubos complementarios, caja para el alojamiento de la fuente, transición, conducto, bancada de apoyo móvil y tres tipos de silenciadores.



Estos elementos los podemos observar en la figura 13.1 (vista de alzado) y en la figura 13.2 (vista de planta): (unidades en mm)



figura 13.1

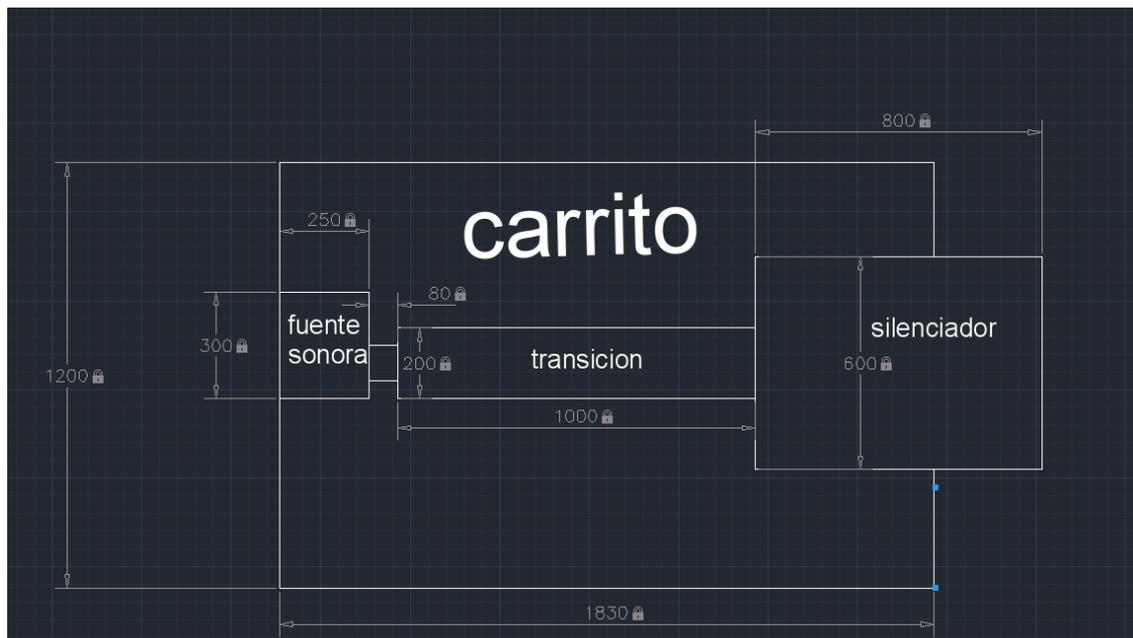


figura 13.2



Este sistema se colocará, a través de un bastidor que instalaremos en la puerta de la cámara reverberante en el laboratorio de Audiotec, donde se establecerá dicho banco de silenciadores, el cual no podrá medir mas de 6 metros de largo debido a las posibilidades del lugar. En la figura 14 podemos observar la puerta donde ira colocado el sistema:



figura 14

10.2.1 Sistema vertical (Bastidor)

El elemento principal del mecano está compuesto por un cuerpo de dos bastidores metálicos colocados simétricamente, con las dimensiones del hueco de la puerta, como el que podemos observar en la figura 15:



figura 15



Cada bastidor estará realizado con las medidas que podemos ver en la figura 16 y 80 mm de espesor. Están realizados ambos a partir de dos largueros o montantes verticales de tubo de acero conformado galvanizado 80.40.2 y cuatro travesaños horizontales también en tubo de 80.40.2. En los huecos que se forman en la parte superior e inferior de cada bastidor se han insertando paneles acústicos. En la parte intermedia del bastidor se deja el hueco para la inserción de los silenciadores, de manera que el hueco que deja en el medio del mismo será por donde introduciremos el silenciador, aunque el silenciador tiene de altura 400 mm se ha dejado un hueco de 430 mm por posibles errores de fabricación, así como los 850 mm hasta dicho hueco son los que tendrá el carrito que permitirá desplazar dicho banco hacia donde queramos posicionarse.

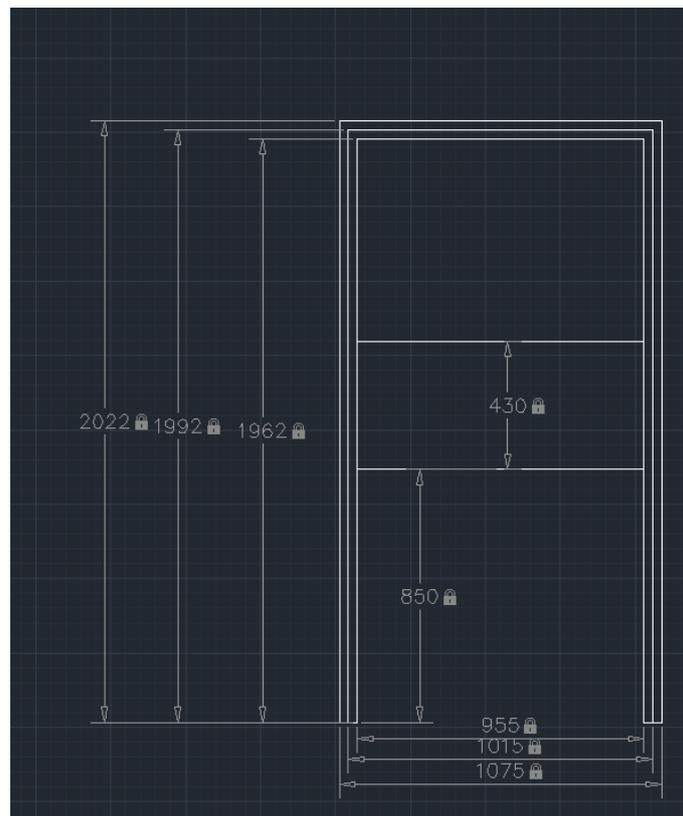


figura 16



Los paneles están fabricados por una chapa galvanizada en uno de sus lados de 1,2 mm de espesor, dos mantas de lana mineral de distinta densidad con velo negro de protección en la cara exterior y terminación en chapa galvanizada perforada con el 43 % de perforaciones y 0,8 mm de espesor. Apoyan, sobre los travesaños y se fijan al bastidor con unos tapajuntas de chapa metálica.

Al bastidor que queda por el lado de la cámara reverberante, se le ha provisto de un perfil perimetral en forma de “Z” con pletinas soldadas que permita su fijación a las jambas del hueco de la puerta. En este bastidor, se ha previsto también un perfil en forma de “U” colocado en el perímetro del hueco central, de tal manera, que permita, al superponer los bastidores, la existencia de una cámara de aire entre ambos como el que podemos ver en las figuras 17 y 18.



figura 17



figura 18



Para asegurar la imposibilidad de vuelco del bastidor durante el montaje se le ha dotado de una especie de pinzas en los laterales del mismo que mediante su giro permiten fijar el bastidor de la puerta acústica existente, estos elementos son desmontables.

La estanqueidad del sistema al sonido se consigue mediante paneles de cierre que tiene los tamaños adecuados para completar el ancho del hueco con la medida de cada uno de los silenciadores previstos para ensayar. Podemos observar en las figuras 19 y 20 dicho tubo de cierre lateral derecho:

- Tubo de cierre lateral derecho con cajeadado para su perfecto acoplamiento bastidor de puerta. (figura 19)
- Vista frontal de tubo de cierre lateral derecho con cajeadado. (figura 20)



figura 19



figura 20

Los paneles de remate consisten en un conjunto de dos paneles acústicos con las dimensiones adecuadas para realizar el cierre del hueco que queda en el bastidor una vez instalado el silenciador a ensayar. Se han fabricado tres conjuntos de paneles de cierre, uno para cada dimensión de silenciador.



10.2.2 Silenciadores

Como ya hemos dicho anteriormente, los silenciadores son un dispositivo que, permitiendo el paso de aire, actúan convirtiendo parte de la energía acústica en energía térmica por medio de materiales absorbentes, produciendo así una atenuación del nivel sonoro.

Los silenciadores que van a ser llevados a ensayo en el banco diseñado son de tipo rectangular, más concretamente, de celdillas de absorción. Se componen de una envolvente exterior fabricada con chapa galvanizada de 1 mm, celdillas de absorción de lana mineral de densidad 70 K/m³ y velo de protección contra el desprendimiento de partículas, insertadas en una envolvente de chapa galvanizada de 1 mm de espesor.

Los componentes del silenciador se especifican en la figura 21.

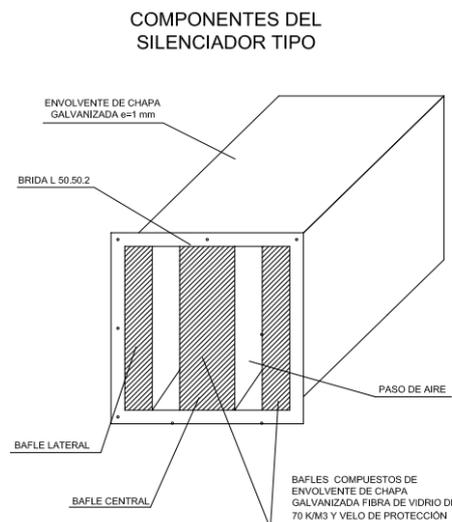


figura 21

Las celdillas de absorción o bafles tendrán un espesor de 100 mm en los extremos y de 200 mm en el interior. El silenciador lleva una brida de chapa galvanizada con tuercas remachables y tornillos en el lado de la fuente para su acoplamiento a la transición, que le confiere rigidez para su traslado, y unos angulares en el lado trasero que se instalarán una vez insertado en el hueco, que aseguran la estanqueidad con los paneles superiores, inferiores y laterales del bastidor vertical exterior.



Las dimensiones del silenciador a ensayar serán de : 800x400x600

Los silenciadores previstos para ensayar son de celdilla tipo 100-200, 150-200 y 200-200, la primera cifra especifica el ancho de paso de aire y la segunda cifra el espesor de la celdilla o baffle.

Todos los silenciadores llevan una junta elástica que impide la posible transmisión de vibraciones y asegura la continuidad del sonido a través del conjunto.

10.2.3 Conducto de sustitución

El conducto de sustitución es un elemento horizontal del conjunto, fabricado con chapa galvanizada, sin material absorbente, y con las mismas secciones rectas de conexión que el objeto de ensayo, la función de éste será la de simular un ensayo de ruido sin silenciador, de manera que al quitar el silenciador colocamos este conducto que actuará como sustituto del mismo.

10.2.4 Transición

La transición es otro de los elementos horizontales del sistema diseñado cuya función es la de conectar la caja de alojamiento de la fuente con el silenciador. Éste se coloca antes del silenciador o después del mismo, consiguiendo la dirección deseada de propagación del sonido emitido por la fuente.

El elemento de transición está formado por cuatro paneles acústicos de 50 mm de espesor con forma trapezoidal, unidos mediante soldadura. Los paneles acústicos se fabrican con una chapa galvanizada en el lado exterior de 1,2 mm de espesor, una manta de lana mineral con velo negro de protección en la cara exterior y terminación en chapa galvanizada perforada con el 43 % de perforaciones y 0,8 mm de espesor.

Se colocan dos bridas, una en cada una de sus caras abiertas, delantera y trasera. A la delantera se le ha dotado de tuercas remachables y tornillos para poder facilitar el montaje y desmontaje y a la trasera de taladros para los tornillos de fijación.



En nuestro caso la transición estará entre el filtro modal y el silenciador.

Podemos observar dos ejemplos de nuestro elemento de transición en la figura 22 tenemos la vista lateral y en la figura 23 tenemos la vista frontal.



figura 22



figura 23

10.2.5 Caja para alojamiento de fuente sonora.

La caja de alojamiento de la fuente consiste en un cubo donde cinco de los laterales están fabricados a base de paneles acústicos quedando el sexto libre. Los componentes de la caja de alojamiento se muestran en la figura 24.

COMPOSICIÓN CAJA ALOJAMIENTO FUENTE

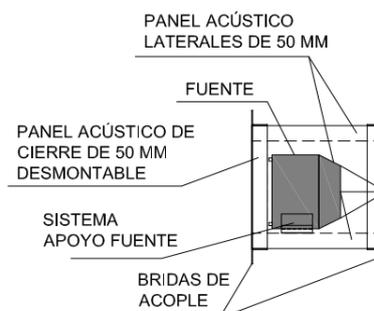


figura 24



Esta fuente consta de un generador de ruido aleatorio y un amplificador, los cuales deben excitar a uno o más altavoces en una caja acústicamente sellada. Las resonancias de la caja se deben suprimir por medio de un revestimiento absorbente del sonido interior. Se debe prestar atención en garantizar que el altavoz no transmita sonido estructural no deseado al conducto al que está conectado y que la transmisión del sonido aéreo a través de las paredes de la caja sea suficientemente baja.

Para evitar daños al altavoz durante los ensayos de flujo, se deben prever aberturas para la equalización de la presión.

La potencia acústica producida por este equipo debe ser suficiente para garantizar que, en el rango de frecuencias de interés y en cada punto de medición, el nivel de presión sonora sea de al menos 6 dB, y preferiblemente de 10 dB, por encima del nivel del ruido de fondo.

Los paneles acústicos son de 50 mm de espesor y de la misma composición que los definidos para la transición, de chapa lisa al exterior y chapa perforada al interior. Esto lo podemos comprobar en la figura 24, la cual es la vista frontal de la caja de alojamiento.



figura 24



El panel trasero (vista posterior y frontal respectivamente), como podemos ver en las figuras 25 y 26, es desmontable para poder facilitar la colocación de la fuente sin necesidad de desmontar el mecano. También lleva una brida con taladros en la parte posterior para poder fijarlo a la transición. Se le coloca en el interior un dispositivo para el correcto apoyo para la fuente.



figura 25

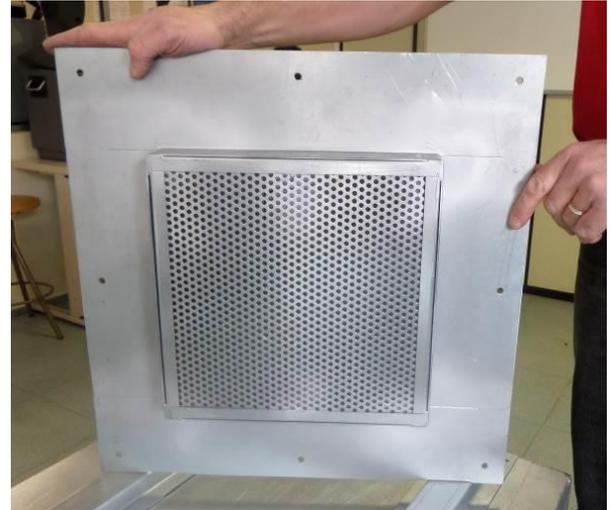


figura 26

En cuanto a nuestra fuente sonora de emisión será de Bruel & kjaer fabricante experto en fuentes sonoras (cuyas dimensiones serán: 100x100x170), genera una señal de voz con un nivel estándar de 60 dB. Podemos observarla en la figura 27:



figura 27



10.2.6 Filtro modal

El filtro modal es un conducto con elementos absorbentes o reactivos que proporciona una pequeña atenuación del modo fundamental y una atenuación sustancial de los modos de orden superior de la propagación sonora axial. Además, el filtro modal se utiliza para desacoplar la fuente sonora del objeto de ensayo/conducto de sustitución. Para dicho fin, debe proporcionar una atenuación longitudinal mínima del modo fundamental de 3 dB en el extremo de baja frecuencia y de 5 dB por encima de la frecuencia de corte de los modos de orden superior en los conductos conectados.



11. Ensayo y calculo de parámetros (mediciones “in situ”)

Una vez diseñado el banco se expresaran tanto el procedimiento llevado a cabo para el ensayo como su metodología e instrumentación.

Dicho banco de silenciadores vamos a implantarlo en el laboratorio de ingeniería acústica de la empresa AudioTec.

11.1 Normas empleadas

El ensayo se ha llevado a cabo teniendo en cuenta las siguientes normas del laboratorio:

- El aislamiento acústico a ruido aéreo de las fachadas medido entre el recinto emisor y el exterior ha sido la diferencia de niveles, DA
- Estos aislamientos se han obtenido siguiendo el procedimiento PE-01 del Laboratorio de Acústica de AUDIOTEC S.A., basado en algunas disposiciones establecidas en la Norma UNE-EN ISO 140-4, Abril 1999, Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 4: Medición “In-Situ” del aislamiento acústico a ruido aéreo entre locales. Se ha seguido así mismo, lo establecido en la Ley 5/2009 del Ruido de Castilla y León, en concreto lo indicado en el Anexo V.3 en lo referente a las fachadas de actividades

11.2 Metodología, parámetros de ensayo y procedimiento

Se presenta para cada ensayo bajo estudio el siguiente resultado:

Entre el recinto emisor y el exterior:

- Diferencia de niveles, D: (pérdidas por inserción)

$$D = L_{1prom} - L_{2corr_prom}$$



donde los términos de la fórmula son los siguientes:

L_{1prom} : es el nivel promedio de presión acústica en la zona de emisión con la fuente en funcionamiento.

L_{2corr_prom} es el nivel promedio de presión acústica en la zona de recepción calculado a partir del nivel promedio con la fuente en funcionamiento, L_{2prom} , y su corrección por el ruido de fondo, L_{RFprom} .

Para cada ensayo se procedió de la siguiente manera:

- Se generó ruido rosa al menos con 1 posición de fuente en la zona emisora, colocada sobre un trípode, y a más de 0,7 m de las paredes existentes, y 1 m sobre el suelo
- Para cada posición de fuente se emplearon al menos 3 posiciones de micrófono distribuidas uniformemente en la zona emisora, alejadas más de 0,5 m de las paredes laterales, 0,7 m entre ellas, 1 m de la fuente sonora, 1 m del cerramiento de separación entre el interior y el exterior del local, y a una altura entre 1,2 y 1,5 m, sobre el suelo. Se ha procurado que estas posiciones se encontrasen entre la fuente y la fachada que se estaba evaluando
- Para cada posición de fuente se emplearon al menos 3 posiciones de micrófono en el exterior del recinto emisor, a 1,5 m. de la fachada, 0,7 m entre ellas, 1 m del cerramiento de separación entre los dos recintos, y a una altura entre 1,2 y 1,5 m sobre el suelo
- En cada posición se ha medido durante el tiempo suficiente para que se estabilizara la señal (al menos durante 6 segundos)
- Las medidas se realizaron en cada una de las bandas de tercio de octava comprendidas entre 100 y 5000 Hz
- Se rechazaron todas las medidas en las que se detectaron niveles sonoros elevados procedentes de otros focos sonoros ajenos a la fuente sonora



11.3 Instrumentación empleada.

La instrumentación empleada en el ensayo ha sido la siguiente:

- Analizador de espectros clase 1 Brüel & Kjaer tipo 2260, con no de serie 2131659, previamente verificado
- Calibrador-verificador B&K tipo 4231, de clase 1, con no de serie 2272197
- Fuente de ruido Brüel & Kjaer tipo 4296, con no de serie 2364350
- Termoanemómetro Flytec Windwhatch Pro
- Trípodes y equipos auxiliares para la toma de medidas
- Flexómetro

11.4 Características de los recintos y condiciones ambientales

Las características de los recintos son las siguientes:

- Interior en cuarto del grupo electrógeno:
 - Descripción: Durante la realización del ensayo, el recinto estaba vacío únicamente conteniendo maquinaria. Disponía de suelo de hormigón pulido, paredes de paneles sándwich y techo de bloques de hormigón.
 - Superficie aproximada: 32,5 m²
 - Volumen aproximado: 81 m³
- Exterior en patio:
 - Descripción: El suelo en la zona de medición es de terrazo y las paredes del edificio donde se encuentra el despacho son de ladrillo visto y piedra. El patio está abierto en la parte superior, es decir no se encuentra cubierto, y no existe tráfico ni circulación de vehículos por el mismo.



Las condiciones ambientales durante los ensayos se encontraban dentro de los requisitos normativos y de los márgenes de utilización de la instrumentación de medida (Véase en la tabla 1):

Recinto de medida	T(°C)	HR(%)
cuarto del grupo electrógeno	17.3	44.7
exterior al patio	13.2	46.9

tabla 1

11.5 Cálculo “in situ” de pérdidas de inserción

Las *pérdidas por inserción*, representan la reducción que sufre la señal, en dB, cuando entre emisor y receptor se inserta un material; los efectos de difracción y refracción habrán sido tomados en cuenta y eliminados. Las pérdidas por inserción se deben a una combinación del sonido reflejado por el material y el sonido absorbido por el mismo.

En la medida de las pérdidas por inserción, las interferencias causadas por las reflexiones en el fondo, superficie y paredes del receptáculo en que se experimenta, así como de la estructura de la que se soporta el panel, unidas a las señales difractadas alrededor de la muestra, son fuentes de error. Este error se puede minimizar:

- * Manteniendo la distancia emisor-material lo más corta posible
- * En el caso de la difracción, la coherencia de las señales difractadas disminuye empleando una muestra tan grande como sea factible, y ensayando una geometría no simétrica, o sea empleando muestras cuadradas o rectangulares y montajes en los que la línea imaginaria emisor-material sea asimétrica con relación a la muestra. La intensidad del campo de ondas difractadas es proporcional al desacoplo de impedancias entre el fluido exterior y el material del panel



En nuestro ensayo la emisión del ruido rosa por parte de la fuente se producirá en la zona de emisión a 85 dB y según atraviese nuestro silenciador dicho ruido se atenuará ciertos dB, dependiendo de la frecuencia a la que le exponamos, como después podremos observar en la figura 29.

En nuestro ensayo para el silenciador SILENTEC TSA 125/200, estos fueron los resultados que se muestran en la tabla 2:

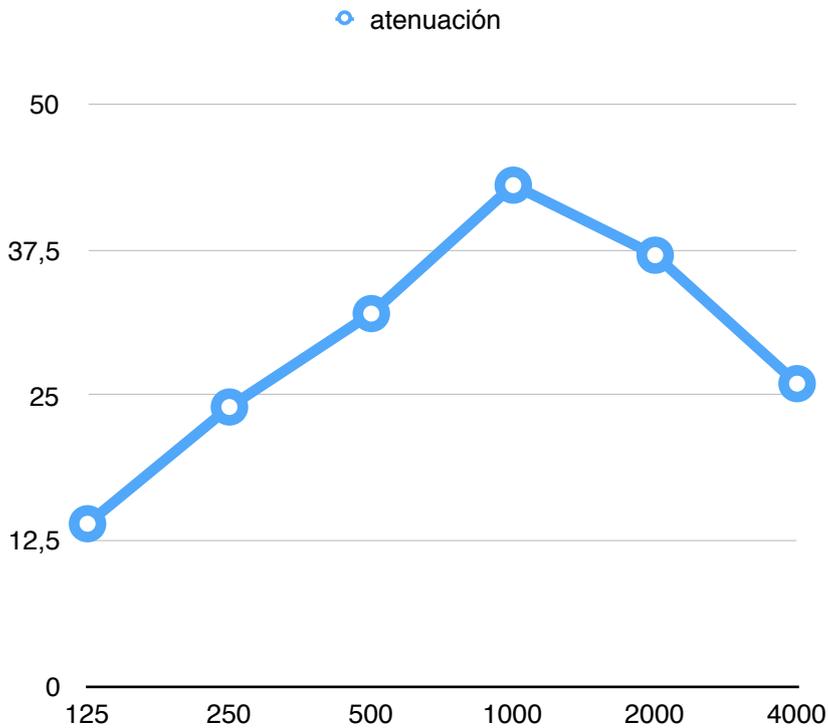
frecuencia (Hz)	dB
125	14
250	24
500	32
1000	43
2000	37
4000	26

tabla 2

Teniendo una atenuación mínima de 14 dB a 125 Hz y una atenuación máxima de 43 dB a 1000 Hz, así como una atenuación global de 29 dB la cual será la media de todas ellas.



Podemos tener una vista mas intuitiva en la gráfica 1 en la que se representa la atenuación en dB frente a la frecuencia en Hz:



gráfica 1

En cuanto al silenciador SILENTEC TSA 100/200 ,estos fueron los resultados (Véase en la tabla 3).

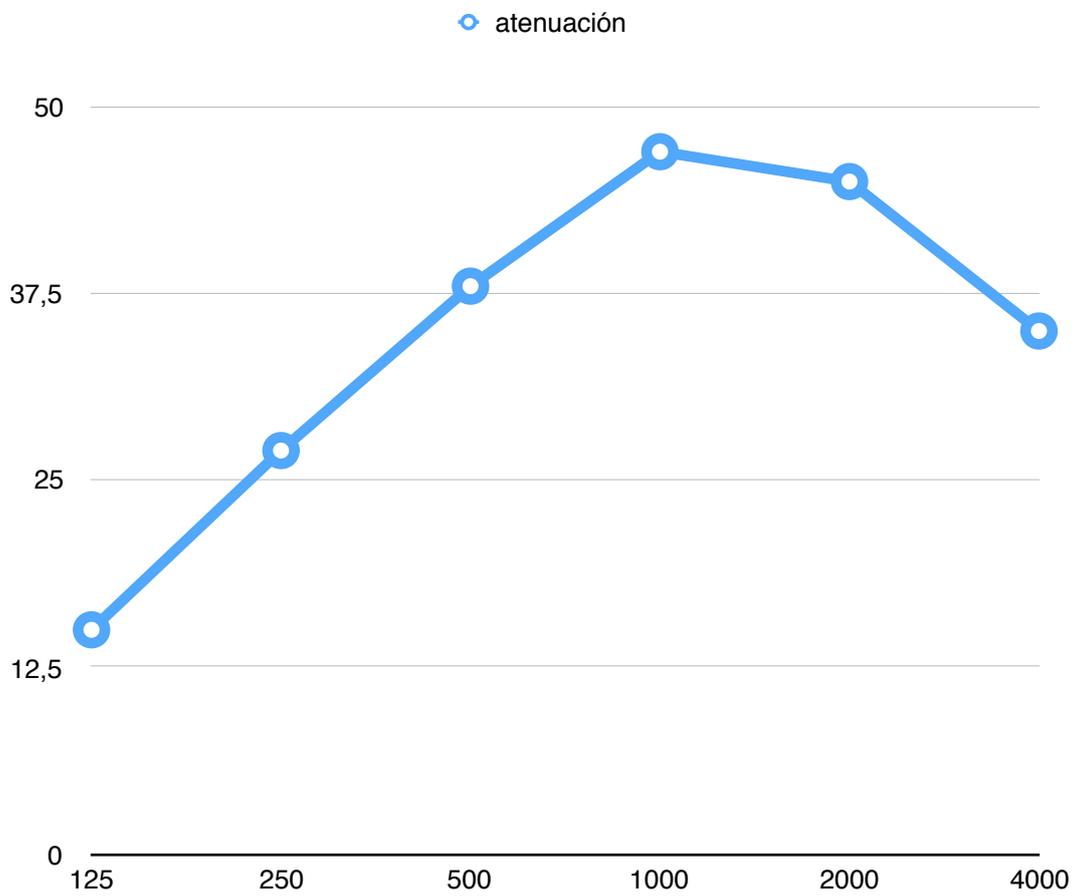
frecuencia (Hz)	dB
125	15
250	27
500	38
1000	47
2000	45
4000	35

tabla 3

Obteniendo una atenuación mínima de 15 dB a 125 Hz y una máxima de 47 a 1000 Hz, así como una atenuación global de 34.5 dB.



Así dando lugar a la gráfica 2 en la que se representa la atenuación en dB frente a la frecuencia en Hz:



gráfica 2



De manera que fijándonos en la atenuación global del silenciador SILENTEC TSA 125/200, tras pasar dicho ruido rosa por el silenciador obtendremos en nuestra zona de inmisión 56 dB, que serán los 85 emitidos menos los 29 atenuados (Véase en la figura 29):



figura 29

11.6 Información gráfica del silenciador y de la zona de ensayo

En primer lugar expondremos nuestro silenciador SILENTEC TSA 125/200 de dimensiones 2.850 x 1.780 x 1.400 mm. (Ancho x Alto x Fondo), junto con el silenciador SILENTEC TSA 100/200 de dimensiones 2.000 x 1.780 x 1.400 mm. (Ancho x Alto x Fondo). Como se muestra en la figura 30:

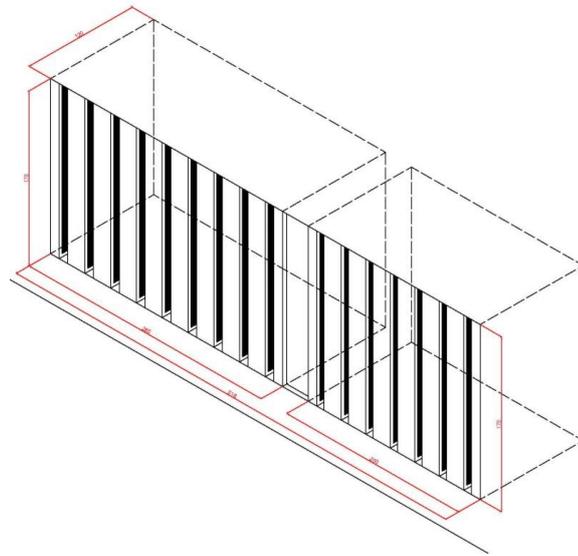


figura 30

A continuación mostraremos la zona de trabajo y de como se realizó el ensayo:

1. Primero se realizo un ensayo de intensimetría, podemos comprobar la fuente sonora conectada al ordenador para medir la intensidad, así como el silenciador (Véase en la figura 31):



figura 31



2. Ahora mostraremos una vista mas cercana del silenciador y del hueco en donde se instaló dicho silenciador (Véase en la figura 32 y 33):



figura 32



figura 33



3. Ahora mostraremos una vista desde la parte interior de dicho silenciador (Véase en la figura 34):



figura 34

4. Por ultimo se muestra como se preparan para realizar el ensayo (figura 35) y las gráficas de intensimetría (figura 36):



figura 35

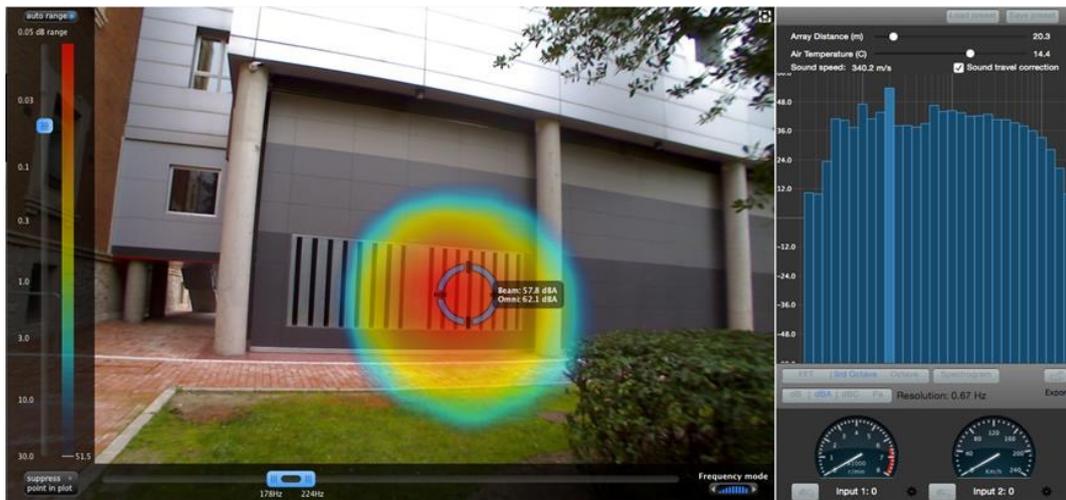


figura 36

Se procedió en primer lugar a proyectar un sonido con la fuente sonora para ver como reaccionaba en nuestro silenciador y los resultados que daba, y dió lugar a las atenuaciones mencionadas anteriormente, y comprobamos también las zonas de mayor intensidad sonora como se puede apreciar en la figura 36.



*Diseño de un banco
de silenciadores
para la empresa Audiotec*





12. Banco de silenciadores con ventilador

Procedemos a meterle un ventilador centrífugo a nuestro banco de silenciadores como el que podemos observar en la figura 37 (faltaría incluir el silenciador que iría a continuación de dicho conducto de transición):

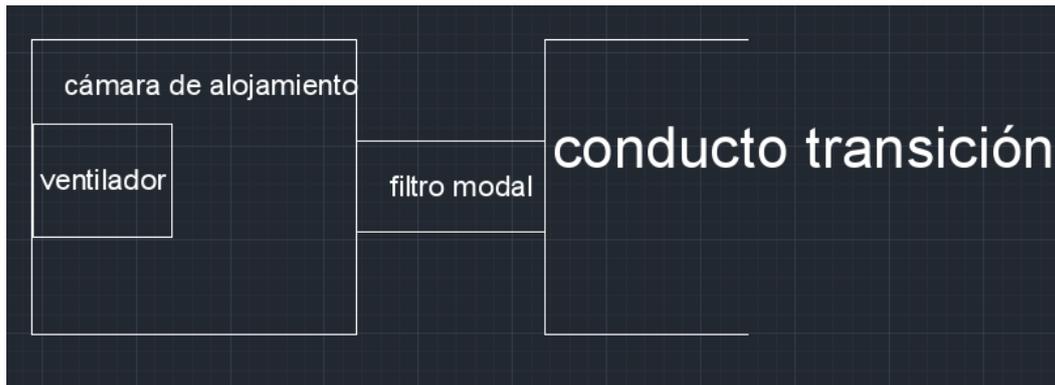


figura 37

De manera que el ventilador generará un flujo de aire y de esta manera podremos calcular las pérdidas de carga.

12.1 Concepto de pérdida de carga y tipos

El concepto de pérdida de carga es un factor no acústico y está íntimamente relacionado con la pérdida de energía presente en un sistema que transporta fluidos, ya que los efectos de fricción, aceleración y gravedad, producen variaciones de velocidad que se traducen en un gradiente de presión entre la entrada y salida del sistema. Visto desde otro modo, si no existe gradiente de presión en el sistema descrito, no existe velocidad de partículas, ni movimiento y la pérdida de carga no puede ser calculada.

De manera que debemos introducir un flujo de aire producido por nuestro ventilador para poder calcularlas.

- La pérdida de carga total de un sistema que transporta fluidos, ya sea líquidos o gases, se compone de pérdidas friccionales o estáticas y pérdidas por choque o dinámicas.



- La pérdida de carga por fricción o estática, es el resultado de la resistencia que encuentra el fluido circulante cuando entra en contacto con una superficie sólida, como la pared interna de un conducto, y simultáneamente con las propias partículas que componen el fluido (viscosidad), depende de la geometría, rugosidad interna del conducto y del régimen de movimiento. Constituyen entre el 70 % y 90 % del total de las pérdidas de carga en un sistema.

La pérdida de carga por choque o dinámica es producto de la disipación de energía debido a: Cambios de dirección del flujo, entradas y salidas del aire del sistema, bifurcaciones o uniones de dos o más flujos, obstrucción en los conductos, poca hermeticidad de las juntas y uniones, cambios de sección de los conductos, etc. Estas pérdidas constituyen entre el 10 % y el 30 % del total de las pérdidas de carga en un sistema.

12.2 Razones por las que analizar las pérdidas de carga

En locales donde el ruido ambiental o ruido de fondo es de bajo nivel, como por ejemplo en los cines, salas de concierto, auditorios, hospitales, etc..., este ruido puede llegar a ser significativo.

El flujo de aire afecta a la atenuación de sonido en silenciadores de tres formas:

- Cambia ligeramente la velocidad efectiva de propagación del sonido
- Crea un gradiente de velocidad cerca de los bordes del canal de paso, refractando el sonido, si éste se propaga en la dirección del flujo, hacia los bordes, y si éste se propaga en dirección contraria al flujo, hacia el centro
- Aumenta la resistencia eficaz de flujo de las celdas absorbentes o baffles

Cuando el sonido se propaga en la dirección del flujo la atenuación disminuye en frecuencias bajas y aumenta en frecuencias altas; si por el contrario el sonido se propaga en dirección opuesta al flujo, la atenuación en frecuencias bajas aumenta, debido a que el sonido se demora un poco más de tiempo en recorrer el silenciador, y en frecuencias altas disminuye, debido a que el gradiente de velocidad en el canal de paso produce que el sonido se dirija hacia el centro de éste, perdiéndose fricción.



Hay que tener presente, que los niveles de atenuación alcanzados al diseñar un silenciador, deben ser corregidos debido a este nivel de potencia sonora no considerado en los cálculos, producto de la circulación de aire, y que realmente interfiere, disminuyendo la atenuación lograda.

Por tanto para el diseño de un buen silenciador hay que tener en cuenta que va a incidir un flujo de aire normalmente.

12.3 Cálculo de pérdidas de carga

El concepto de pérdida de energía o pérdida de carga en silenciadores pasivos disipativos del tipo splitter, es abarcado y tratado mediante la caída de presión que se genera a lo largo del silenciador. Esto se debe exclusivamente a la proporcionalidad existente entre la pérdida de carga y la caída de presión en sistemas que transportan o trabajan con fluidos.

Para silenciadores pasivos disipativos tipo splitter, la variación total de presión es representada a partir de la siguiente expresión:

$$\Delta p = \zeta \left(\frac{\rho V^2}{2} \right)$$

Siendo los términos de la fórmula :

ρ : densidad del aire

V : velocidad media del flujo de aire

ζ : coeficiente de resistencia al flujo.

Este último coeficiente adimensional representa sin duda, a la variable más compleja de calcular, ya que depende de la geometría del silenciador en todos los ámbitos (entrada, salida, diámetro, etc.), de las condiciones de fricción y del largo de este, presentándose un sin número de casos probables, los cuales son imposibles de tratar en su totalidad, por lo cual algunos autores presentan algunas expresiones para la realización de este cálculo simplificado.



12.4 Características del ventilador

Procedemos a describir el ventilador centrífugo que utilizaremos, el cual podemos observar en la figura 38:

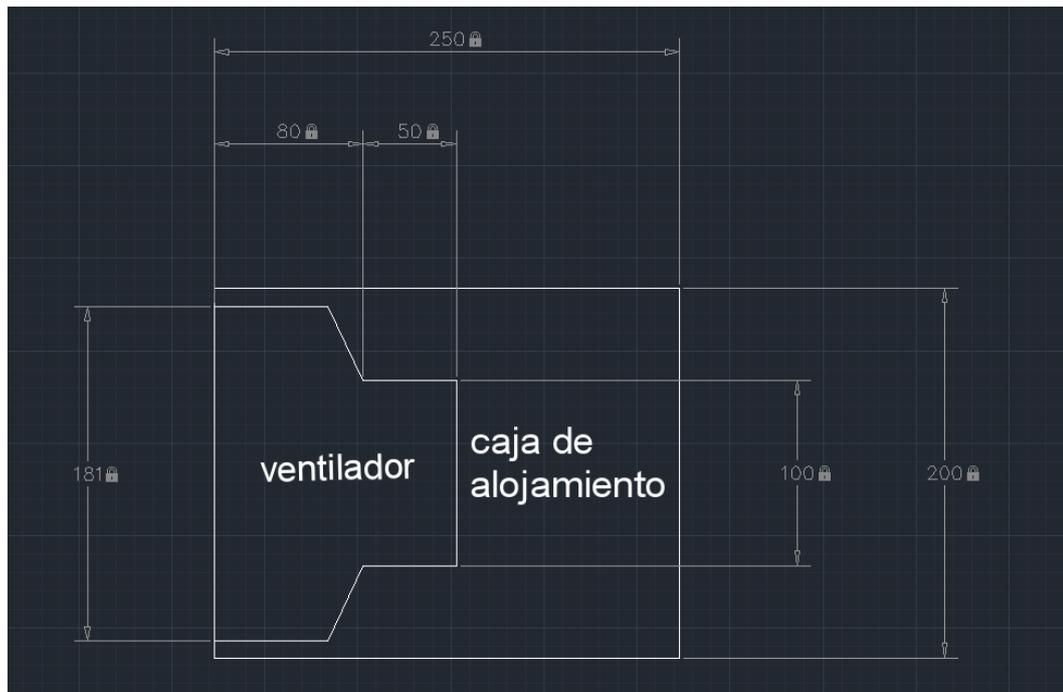


figura 38

El ventilador será el modelo CBM/2-133/046 TIPO 1 de la S&P, el cual puede ofrecernos hasta una potencia de 90 W, una frecuencia de giro 2100 rpm, un caudal máximo de 260 m³/h y 58 dB, entre los parámetros más importantes que podemos encontrar.

El ventilador irá dentro de una caja de alojamiento similar a las dimensiones de la caja de alojamiento de la fuente sonora.



12.5 Procedimiento empleado

La velocidad del flujo de aire entregada por el ventilador centrífugo utilizado es del orden de los 4 (m/s). Se ha utilizado esta única velocidad de trabajo debido a que el ventilador utilizado no presenta un variador de frecuencia para modificar la velocidad de flujo.

Al trabajar con una velocidad de flujo y una sección transversal fija, la variación de la caída de presión con la longitud se convierte en el principal fenómeno abarcado por este estudio.

La generación de flujo es realizada mediante el ventilador en la cámara de alojamiento, la presión manométrica con el silenciador instalado, es determinada por un manómetro convencional, el cual estará conectado un extremo del manómetro delante del silenciador y el otro extremo del manómetro detrás del silenciador.

También realizamos esta medición sustituyendo el silenciador por el conducto de sustitución para comprobar cuales serán las pérdidas de carga cuando no tenemos silenciador.



13. Conclusiones

En primer lugar, se ha realizado un estudio teórico de los distintos tipos de silenciadores del mercado que ha permitido realizar una clasificación en función de su geometría, propiedades de atenuación etc., con el fin de familiarizarse con el entorno de los silenciadores y sus características.

Después se ha diseñado un banco de ensayos para silenciadores disipativos para el laboratorio de la empresa Audiotec, que puede extrapolarse a otros ambientes industriales o empresariales. Por lo que se puede concluir que el banco diseñado es útil para cuantificar la reducción de los niveles de ruido que aporta un silenciador. Además hay que destacar que el hecho de ser modulable, versátil y manejable facilita mucho su desplazamiento.

Finalmente, se puede concluir que este trabajo puede servir como un inicio para la realización de nuevas investigaciones en el campo de la ingeniería acústica, concretamente en el tema de silenciadores.



*Diseño de un banco
de silenciadores
para la empresa Audiotec*





14. Bibliografía

- Iberacústica. *Silenciadores*. Podemos encontrarlo en: <http://www.iberacustica.com/silenciadores>. Última fecha de consulta: 10 de Enero de 2016.
- *Silenciadores Acústicos para el control del ruido*. Podemos encontrarlo en :<http://silenciadoracustico.net/>. Última fecha de consulta : 15 de Enero de 2016
- *Silenciadores Acústicos*. Podemos encontrarlo en: <http://www.acusticaambiental aplicada.eu/silenciadores.html>. Última fecha de consulta: 3 de Febrero de 2016.
- *Silenciadores*. Podemos encontrarlo en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4950/fichero/4.pdf> . Última fecha de consulta: 10 de Febrero de 2016.
- IR Acústica. *Silenciadores rectangulares*. Podemos encontrarlo en: <http://www.iracustica.com/silenciadores-rectangulares.html>. Última fecha de consulta: 20 de Febrero de 2016.
- *Acustic.Ingeniería acústica e insonorizaciones*. Podemos encontrarla en: <http://acusmatic.com/servicios/insonorizacion/silenciadores-acusticos/>. Última fecha de consulta: 17 de Marzo de 2016.
- *Silenciadores rectangulares y circulares*. Podemos encontrarlo en: http://www.mixflow.es/wp-content/uploads/2009/01/ACUSTICA_2009.pdf. Última fecha de consulta: 17 de Marzo de 2016.
- *Air handling. Climate*. Podemos encontrarlo en: <http://air-handling.com/en/node/1407>. Última fecha de consulta: 20 de Marzo de 2016.
- *SINTEC Medidas de insonorización para la industria y medio ambiente*. Podemos encontrarlo en: http://www.sintecinsonorizacion.com/es/productos/silenciadores-acusticos/rejillas_acusticas.htm?cookies=1. Última fecha de consulta: 20 de Junio de 2016.
- Elena Holgado Palacios (Julio 2014). Trabajo fin de Máster “*Diseño de laboratorio para la evaluación de silenciadores “in situ”*”. Podemos encontrarlo en: <http://oa.upm.es/35222/>



- *Brüel & Kjær*. Podemos encontrarlo en: <http://www.bksv.es/Products/transducers/acoustic/sound-sources/echo-speech-source-type-4720#C2E272378A4D401BBD11622454AB78D2>. Última fecha de consulta : 15 de Abril de 2016.
- (2012). *Filtros y silenciadores LFU*. Podemos encontrarlo en : https://www.festo.com/cat/en-gb_gb/data/doc_ES/PDF/ES/LFU_ES.PDF
- Carlos Ranz Guerra Y Pedro Cobo Parra (1999). *Medida De Las Pérdidas Por Inserción Y Estimación De Parámetros Físicos Representativos En Paneles Sumergidos En Agua Y Utilizados Como "Ventanas Acústicas"*. Instituto De Acústica. Csic. Podemos encontrarlo en: <Http://Digital.Csic.Es/Bitstream/10261/7819/1/Asb01.Pdf>
- Cristian Felipe Rivas Villaroel (Abril 2010). Tesis doctoral " *Pérdida de Carga en Silenciadores Pasivos Disipativos tipo Splitter* ". Podemos encontrarlo en: <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2010/bmfcir618p/doc/bmfcir618p.pdf>
- SYP. *Ventiladores centrífugos de baja presión. Catalogo de ventiladores*. Podemos encontrarlo en: http://www.solerpalau.es/media/catalogos/series/es_cbm-pequena.pdf
- *UNE-EN ISO 7235* Acústica. Procedimiento de medición en laboratorio para silenciadores en conducto y unidades terminales de aire. Pérdida por inserción, ruido de flujo y pérdida de presión total.
- *UNE-EN ISO 11691* Acústica. Medición de la pérdida de inserción de silenciadores en conducto sin flujo. Método de medición en laboratorio
- *UNE-EN ISO 11820* Acústica. Mediciones *in situ* de silenciadores
- *IEC61260 Electroacústica*. Filtros de banda de octava y de una fracción de banda de octava
- *UNE-EN ISO 140-4* Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 4: Medición "In-Situ" del aislamiento acústico a ruido aéreo entre locales
- *Ley 5/2009* del Ruido de Castilla y León
- *Norma ISO 3741*. [ISO 3741:1999] Acústica. Determinación de los niveles de potencia acústica de las fuentes de ruido a partir de la presión acústica. Métodos de precisión en cámaras reverberantes