



Dirigido por Andrés  
Roldán Aranda



TRABAJO  
FIN DE  
MASTER

Estudio experimental de  
aislamiento acústico

Arturo Aguirre Pina

Máster de Ingeniería  
Acústica



Realizado por Arturo Aguirre Pina

# ESTUDIO EXPERIMENTAL DE AISLAMIENTO ACÚSTICO



# **“ESTUDIO EXPERIMENTAL DE ASILAMIENTO ACÚSTICO”**



# **“ESTUDIO EXPERIMENTAL DE ASILAMIENTO ACÚSTICO”**





MASTER EN  
INGENIERÍA ACÚSTICA

Trabajo fin de master

***“ESTUDIO EXPERIMENTAL DE ASILAMIENTO  
ACÚSTICO”***

CURSO ACADÉMICO: 2019/2020

Arturo Aguirre Pina





MASTER EN INGENIERÍA ACÚSTICA

# ***“ESTUDIO EXPERIMENTAL DE ASILAMIENTO ACÚSTICO”***

AUTOR:

**Arturo Aguirre Pina**

SUPERVISADO POR:

**Andrés María Roldán Aranda**

DEPARTAMENTO:

**Electrónica y Tecnología de los Computadores**



. D. Andrés María Roldán Aranda, Profesor del departamento de Electrónica y Tecnología de los Computadores de la Universidad de Granada, como director del Trabajo Fin de Máster de D. Arturo Aguirre Pina,

Informa:

Que el presente trabajo, titulado:

***“ESTUDIO EXPERIMENTAL DE ASILAMIENTO ACÚSTICO”***

ha sido realizado y redactado por el mencionado alumno bajo mi dirección, y con esta fecha autorizo a su presentación.

Granada, a 2 de Diciembre de 2020

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Andrés Roldán', with a long horizontal stroke extending to the right.

Fdo. Andrés María Roldán Aranda



Los abajo firmantes autorizan a que la presente copia de Trabajo Fin de Máster se ubique en la Biblioteca del Centro y/o departamento para ser libremente consultada por las personas que lo deseen.

Granada, a 2 de Diciembre de 2020

A stylized handwritten signature consisting of two overlapping 'A' shapes, with a long horizontal stroke extending to the right.

Fdo. Arturo Aguirre Pina

A handwritten signature in cursive script that reads 'Andrés Roldán', with a long horizontal stroke extending to the right.

Fdo. Andrés María Roldán Aranda

**ESTUDIO ACÚSTICO EXPERIMENTAL DE ASILAMIENTO**

**Arturo Aguirre Pina**

# ESTUDIO EXPERIMENTAL DE ASILAMIENTO ACÚSTICO

Arturo Aguirre Pina

## RESUMEN:

El objetivo principal del presente proyecto es desarrollar un estudio de aislamiento comparando los resultados obtenidos mediante instrumental profesional y semiprofesional. Según establece la normativa para la realización de dichos estudios se debe de disponer de un sonómetro Clase 1 con un banco de filtros que permita el estudio de la distribución frecuencial de energía por bandas de tercio de octava. El equipo de medida profesional utilizado es un sonómetro Clase 1 Rion NA-28 que dispone del correspondiente banco de filtros de tercio de octava. Por otro lado, como equipo semiprofesional se ha utilizado un sonómetro clase 1 Brüel & Kjaer 2238 Mediator, que no dispone de un banco de filtros por lo que la parte de distribución espectral de la energía se ha obtenido con la ayuda de un micrófono Tbone ECM 8000 y la implementación de una rutina desarrollada en MATLAB.

## *Agradecimientos:*

Este trabajo no ha estado exento de dificultades, no solo por su contenido, sino por las condiciones adversas que se han presentado durante la realización. Las circunstancias derivadas del COVID-19 cambiaron todos los esquemas y planes que tenía cuando este trabajo empezó, teniendo que readaptar todo en un tiempo record.

En este camino lleno de dificultades ha habido gente que me ha sido de gran ayuda y a los que me gustaría dar las gracias: En primer lugar agradecer toda la hospitalidad de mi tios Sergio y Helena, que me abrieron las puertas de su casa para que pudiera realizar los ensayos indispensables. A Sufra, alumno de la universidad de Almería y gran amigo, que me facilitó una licencia de Matlab 2020 (licencia de la que no dispuse mediante la UGR) para poder hacer gran parte de mi trabajo. También a todos los compañeros del laboratorio de Granasat (en especial a Luis y Ginés), que estuvieron para echarme una mano.

Por ultimo y no por ello menos importante a mis padres, que nunca se han cansado de apoyarme por difícil que se presente la situación, dandome los consejos más adecuados en cada momento y las fuerzas que siempre flaquean a mitad de camino.

A todos ellos, mi mas sincero agradecimiento.



# Indice

<b>Autorización de defensa</b>	<b>vii</b>
<b>Autorización para depositado en biblioteca</b>	<b>ix</b>
<b>Resumen</b>	<b>x</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>xii</b>
<b>Indice</b>	<b>xiii</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>xv</b>
<b>Lista de Tablas</b>	<b>xvii</b>
<b>1 Requisitos</b>	<b>1</b>
1.1 Motivación . . . . .	1
1.2 Justificación de requisitos . . . . .	1
<b>2 Análisis</b>	<b>3</b>
2.1 Campo de aplicación . . . . .	3
2.2 Términos y definiciones . . . . .	3
2.3 Requisitos de instrumentación . . . . .	4
2.4 Procedimiento de medida . . . . .	13
<b>3 Diseño</b>	<b>15</b>

---

<b>4</b>	<b>Implementación</b>	<b>17</b>
4.1	Instrumentación utilizada . . . . .	17
4.1.1	Cableado generado . . . . .	23
4.2	Descripción del Software utilizado . . . . .	25
4.3	Descripción de los experimentos . . . . .	26
4.3.1	Calibración de equipos . . . . .	26
4.3.2	Idoneidad de la señal utilizada . . . . .	31
4.3.3	Medidas de aislamiento . . . . .	33
<b>5</b>	<b>Testing</b>	<b>35</b>
<b>6</b>	<b>Conclusiones y posibles mejoras</b>	<b>41</b>
6.0.1	Conocimientos previos y experiencia adquirida: . . . . .	41
6.0.2	Conclusiones: . . . . .	42
6.0.3	Futuras mejoras: . . . . .	42
	<b>Referencia</b>	<b>45</b>
<b>A</b>	<b>Presupuesto</b>	<b>47</b>
A.1	Factura de materiales . . . . .	47
A.2	Coste de los recursos humanos . . . . .	48

# Lista de figuras

1.1	Antigua facultad de Ciencias de la Salud . . . . .	2
1.2	Despacho D.10 . . . . .	2
2.1	Sonometro sauter sw 1000 . . . . .	5
2.2	Sonometro Rion NA-28 . . . . .	6
2.3	Bruel & Kjaer Mediator 2238 . . . . .	7
2.4	NTi DS3 Dodecahedron Speaker . . . . .	9
2.5	IAG DD5 . . . . .	10
2.6	Brüel & Kjaer Omnipower 4296 . . . . .	11
3.1	Plano de posciones de puntos de medida y fuentes . . . . .	16
4.1	Brüel & Kjaer Omnipower 4296 . . . . .	17
4.2	Brüel & Kjaer 2238 Mediator . . . . .	18
4.3	RION . . . . .	19
4.4	Amplificador y Equalizador . . . . .	20
4.5	Tarjeta de sonido . . . . .	20
4.6	Microfono ECM 8000 . . . . .	21
4.7	Analizador de audio . . . . .	21
4.8	Osciloscopio . . . . .	22
4.9	Configuración de conexiones . . . . .	22
4.10	XLR - Jack . . . . .	23

4.11	XLR - Jack . . . . .	23
4.12	Cable RS232 . . . . .	24
4.13	Cable RS232 . . . . .	24
4.14	Esquema de utilización de software . . . . .	25
4.15	Calibración del osciloscopio . . . . .	26
4.16	Sonda del osciloscopio . . . . .	27
4.17	Paso 1 de la calibración: selección de entrada . . . . .	27
4.18	Paso 2 de la calibración: Ajuste de parametros . . . . .	28
4.19	Paso 3 de la calibración: Ajuste de nivel . . . . .	29
4.20	Sonda del osciloscopio . . . . .	30
4.21	Superlux pink stick . . . . .	31
4.22	SINAD . . . . .	32
5.1	Niveles de presión en el recinto emisor . . . . .	35
5.2	Niveles de presión en el recinto receptor . . . . .	36
5.3	Medidas de tiempo de reverberación en el recinto receptor . . . . .	36
5.4	Curva de aislamiento medida con sonometro Rion NA - 28 . . . . .	37
5.5	Medida de nivel con Spectralissime . . . . .	38
5.6	Nivel depresión sonora de la grabación realizada en M1 con Microfono TBone ECM8000 . . . . .	38
5.7	Nivel de presión sonora de grabación realizada en M1 con Microfono promediado por bandas de tercio de octava . . . . .	39
5.8	Nivel de presión en el recinto emisor grabado con el micrfono . . . . .	39
5.9	Nivel de presión en el recinto receptor grabado con el micrfono . . . . .	40
5.10	Nivel de presión en el recinto receptor grabado con el micrfono . . . . .	40

# Lista de Tablas

2.1	Comparativa de sonómetros . . . . .	8
2.2	Desviación máxima de una fuente omnidireccional . . . . .	8
2.3	Comparativa de fuentes . . . . .	12
3.1	Distancias entre posiciones . . . . .	15
3.2	Distancias entre posiciones . . . . .	15
4.1	Medidas recinto emisor . . . . .	33
4.2	Medidas recinto receptor . . . . .	33
A.1	Factura de equipo utilizado . . . . .	47
A.2	Costes humanos . . . . .	48



# Capítulo 1

## Requisitos

### 1.1 Motivación

A pocos meses para terminar el máster de Ingeniería acústica, se plantea un problema que parece insalvable para casi cualquier joven ingeniero de esta rama de la física: El coste económico de todo el instrumental necesario para la realización de estudios de aislamiento es tan elevado que hace prácticamente imposible ejercer en el campo que te especializas si no es para una empresa ya experimentada en el sector. Este trabajo nace con la intención de hallar procedimientos de medida de aislamiento con la misma fiabilidad pero con un coste inferior al que se deriva de la instrumentación descrita en la norma actual.

### 1.2 Justificación de requisitos

Para la realización de este trabajo se solicita un estudio de aislamiento entre recintos pertenecientes a la antigua facultad de ciencias de la salud de la Universidad de Granada, con una comparativa de los resultados obtenidos cuando se hacen las medidas con el equipamiento profesional y con un equipo de medida alternativo.



**Figura 1.1** – Antigua facultad de Ciencias de la Salud

Para la realización de dichas medidas habrá que tomar decisiones sobre las fuentes de ruido seleccionadas, la disposición de los puntos de medida y emisión, o la interconexión de equipos. Para todo ello habrá que ajustarse a la normativa vigente UNE-EN ISO 16283-1:2015/A1:2018, en la cual se define como han de hacerse las mediciones de aislamiento a ruido aéreo y de impacto.

Este estudio se centrará en el aislamiento entre recintos adyacentes horizontalmente, concretamente el aislamiento a ruido aéreo entre los despacho D.10 y D.9 de la segunda planta del edificio.



**Figura 1.2** – Despacho D.10

El grupo de investigación Granast y la empresa Ruido de Fondo facilitarán todo el equipamiento necesario para las medidas, tanto el equipo profesional como aquel con el que se hará la comparativa.

# Capítulo 2

## Análisis

En la norma UNE-EN ISO 16283-1:2015/A1:2018 [1] se definen las características básicas de un estudio de aislamiento a ruido aéreo, que se analizarán en este capítulo.

### 2.1 Campo de aplicación

Esta norma especifica el procedimiento de medida de aislamiento a ruido aéreo en las siguientes condiciones:

- **Volumen:** La norma será de aplicación cuando los recintos emisor y receptor tengan un volumen comprendido entre  $10 \text{ m}^3$  y  $250 \text{ m}^3$
- **Frecuencias:** El rango de frecuencias de interés en el estudio de aislamiento es de 50 Hz a 5000 Hz
- **Recintos:** Los recintos de medida podrán estar vacíos o amueblados. Esta circunstancia puede afectar al tiempo de reverberación, por lo que en una misma sala el estudio puede resultar favorable al estar amueblada y desfavorable al estar vacía.

### 2.2 Términos y definiciones

En la norma se definen algunos de los parámetros imprescindibles para un estudio de aislamiento. En esta sección se explican los parámetros más importantes y que proceden para este estudio.

- **Nivel de presión acústica, L (dB):** Se define como diez veces el logaritmo del

cociente del promediado de la presión acústica al cuadrado partido la presión de referencia al cuadrado.

- **Tiempo de reverberación, T(s):** Tiempo requerido para que el nivel de presión acústica en un recinto disminuya 60 dB una vez que la fuente se apaga.
- **Diferencia de niveles, D (dB):** Diferencia de niveles de presión entre el recinto emisor y el receptor. Esta diferencia de niveles no tiene en cuenta el tiempo de reverberación del recinto receptor.
- **Diferencia de niveles estandarizada, D (dB):** Diferencia de niveles normalizada a un tiempo de reverberación en el receptor. Este tiempo de reverberación es de 0.5 segundos

$$D_nT = D + \log\left(\frac{T}{T_0}\right)$$

- **Nivel de ruido de fondo** Nivel de presión acústica medido en el recinto receptor producido por todas las fuentes cuando la fuente de emisión utilizada para el estudio se encuentra apagada.

### 2.3 Requisitos de instrumentación

Se estudian las características del equipo necesario para la realización del estudio de aislamiento. Ajustandose a estas características se decidirá cual es el equipamiento seleccionado.

- **Sonometro:** Es el instrumento utilizado para medir niveles de presión sonora. Puede variar sustancialmente de precio en función de sus características: influye principalmente el tipo de micrófono, precisión, banco de filtros y la calidad de los amplificadores. En función de la precisión del sonómetro, se dividen en tres grupos:
  - **Clase 0:** Son los más caros pero también los más precisos, con una precisión de +/- 0.4 dB. Suelen utilizarse en el laboratorio para calibrar los sonómetros de clase 1 y 2.
  - **Clase 1:** Son sonómetros algo más económicos que los de tipo 0 y son los que se suelen utilizar en las medidas de aislamiento con una precisión de +/- 1 dB, desviación máxima permitida por la norma UNE-EN ISO 16283-1:2015/A1:2018.
  - **Clase 2:** Son los sonómetros más económicos y se caracterizan por una precisión de +/- 2 dB, insuficiente para un estudio de aislamiento según dicta la norma UNE-EN ISO 16283-1:2015/A1:2018.

Hay pocos equipos en el mercado para los que el fabricante facilite el precio directamente y a continuación se analizan algunos ellos. En primer lugar se estudiarán los sonómetros de Clase 1 y sus características:

El sonómetro sauter sw 1000 es un Clase 1, con un rango de medida de 22 a 136 dB entre 3 Hz y 20 kHz. Presenta una sensibilidad de 50 m V/Pa, posee filtros de tercios de octava además de ponderaciones en frecuencia y tiempo. En [sauter](#), distribuidor oficial del producto, encontramos el sonómetro Sauter SW 1000 [9] a un precio de 1750€ (IVA no incluido)



**Figura 2.1** – Sonómetro sauter sw 1000

Otros de los sonómetros que se han analizado es el [Rion NA-28](#) [8], el cual la empresa Ruido de Fondo nos ha facilitado para validar nuestras medidas. Este equipo se trata de un sonómetro de alta gama que presenta una sensibilidad superior a la del sonómetro Sauter, de  $-27$  dB(ref 1V/Pa), que son  $44.6$  mV/Pa. De igual manera que el anterior modelo también posee filtros de tercio de octava y todas las ponderaciones en frecuencia y en tiempo. Según la empresa Ruido de Fondo, su precio es de unos 7000€.

2



Figura 2.2 – Sonómetro Rion NA-28

Finalmente, se analiza el modelo Mediator 2238 [3] de Brüel & Kjaer. Si bien este equipo presenta unas buenas prestaciones, el modelo al que tenemos acceso no tiene implementado el banco de filtros de tercio de octava, por lo que las medidas que hagamos con el no serían aprobadas por la norma. Este sonómetro tan solo nos sirve para hacer medidas globales sin un análisis espectral completo. Tiene una sensibilidad de 31.6 mV/Pa y un rango de medida de 25 dB a 140 dB. Este modelo actualmente está descatalogado, pero según la empresa Ruido de Fondo, el precio con todas sus funcionalidades incluyendo el banco de filtros de tercio de octavas ronda los 5000€.



Figura 2.3 – Bruel & Kjaer Mediator 2238

En la siguiente tabla 2.1 se comparan las características principales de los sonómetros descritos anteriormente.

Modelo de sonómetro	Sensibilidad	Filtros de tercio de octava	Rango de medida	Precio
Sauter sw 1000	50 m V/Pa	Si	22 - 136 dB	1827€
Rion NA-28	44.6 mV/Pa	Si	100 dB (Variable)	7000€
Brüel & Kjaer Mediator 2238	31.6 mV/Pa	No	25 - 140 dB	5000€

**Tabla 2.1** – Comparativa de características de sonómetros

- **Fuente dodecaédrica:** Esta tipo de fuente será la utilizada para producir el campo sonoro difuso que se necesita para hacer las mediciones de aislamiento acústico. Las características deben ajustarse a lo definido en la norma UNE-EN ISO 16283-1:2015/A1:2018.
  - Omnidireccional: Según la norma la fuente debe de ser lo más omnidireccional posible. La variación máxima permitida por banda de frecuencia viene especificado en la tabla 2.2, que muestra la desviación de directividad máxima aceptable cuando se promedia en arcos de círculos deslizantes de 30° en campo libre. El valor de referencia se debe determinar a partir de una medida energética de 360° en el plano de medición.

Frecuencia, hercios	100 - 630	630-1000	1000-5000
Desviación máxima, decibelios	+/- 2	+/- 5	+/- 8

**Tabla 2.2** – Desviación máximas de directividad

- Nivel: Para garantizar la correcta medida del aislamiento es necesario que el nivel generado por la fuente sea al menos 10 dB superior al ruido de fondo en todas las bandas. En el caso de mediciones de tiempo de reverberación este nivel tiene que ser aun mayor, y estar 45 dB por encima del ruido de fondo.

A continuación, siguiendo las especificaciones descritas se estudiarán algunas fuentes dodecaédricas para comparar sus precios y características.

La fuente omnidireccional DS<sub>3</sub> de Nti[7], presenta unas características adecuadas en cuanto a la generación de grandes niveles de presión, alcanzando hasta los 120.5 dB, pero tiene un comportamiento insuficientemente omnidireccional en altas frecuencias, desviándose hasta 10 dB a frecuencias de 2 kHz. Esta fuente se puede encontrar por 3830€ en el [catálogo](#) de Nti.



**Figura 2.4** – N*Ti* DS<sub>3</sub> Dodecahedron Speaker

La fuente DD5 de IAG [6] presenta unas características realmente sorprendentes para el tamaño y diametro de la misma. Pesa 5 Kg y tiene un diametro de 31 cm pero es capaz de generar una potencia acústica de 120.5 emitiendo ruido rosa. Así mismo, esta fuente sí se ajusta plenamente a la norma, presentando desviaciones de directividad inferiores a 2 dB en alta frecuencia (en torno a 2 kHz). Este modelo se puede adquirir por 2590€ en la pagina de [IAG](#).

2



Figura 2.5 – IAG DD5

Por último, se estudian las características de la fuente Omnipower 4296 de Brüel & Kjaer [2]. Presenta unas características óptimas para la realización de medidas de aislamiento. Con una desviación máxima de la directividad en la banda de 2 kHz de menos de 4 dB, es capaz de generar hasta de 122 dB de potencia acústica. Aunque actualmente se encuentra descatalogada, según la empresa Ruido de Fondo cuando estaba en stock tenía un precio de unos 4000€.



**Figura 2.6** – Brüel & Kjaer Omnipower 4296

En la tabla 2.3 se comparan las principales características de las fuentes estudiadas anteriormente.

Modelo de fuente	Potencia máxima admisible	Rango de frecuencias	Tipo de conector	Precio
NTi DS3 Dodecahedron Speaker	120.5 dB	50 Hz - 10 kHz	Speakon	3830€
IAG DD5	120.5 dBC	100 Hz - 10 kHz	Speakon	2590€
Brüel & Kjaer Omnipower 4296	122 dB	Speakon	100 Hz - 3150 kHz	4000€

**Tabla 2.3** – Comparativa de características de fuentes dodecaédricas

## 2.4 Procedimiento de medida

En este apartado se estudian algunas de las directrices que según la norma UNE-EN ISO 16283-1:2015/A1:2018 habrá que seguir para la correcta realización de las medidas de aislamiento.

- **Generación del campo sonoro.** Se utilizará un único altavoz o si se usan más de uno, estos han de ser iguales y excitados con el mismo nivel de señal. El sonido generado en el recinto emisor ha de ser estable y el nivel de presión acústica promediado energéticamente no debe presentar diferencias de nivel de más de 8 dB entre bandas adyacentes en el rango de 100 Hz a 5 kHz.

Las posiciones de los altavoces en el recinto emisor han de cumplir las siguientes consideraciones:

- La distancia entre los límites del recinto y la posición del altavoz debe de ser de al menos 0,5 m. En el caso de ser la superficie de separación con el recinto receptor dicha distancia debe de ser de al menos 1 m.
  - Las distintas posiciones de altavoz han de estar distanciadas entre sí al menos 1,4 metros.
  - La altura mínima a la que han de estar situados los altavoces es de 1 m sobre el suelo.
- **Posiciones de medida.** Para las medidas se utilizarán posiciones fijas del sonómetro. Según la norma se definen al menos 5 posiciones de medida por cada posición de altavoz. Las posiciones de microfono pueden ser distintas en cada posición de altavoz o las mismas si cumplen las distancias establecidas por la norma, que son las siguientes:
    - Debe de haber al menos 0,7 m entre cada posición de sonómetro fija.
    - Debe de haber al menos 0,5 m entre la posición de cada uno de los sonómetros y cualquier superficie límite del recinto.
    - Debe de haber al menos 1 m de separación entre cada posición de altavoz y sonómetro.
  - **Duración de las mediciones.** Según establece la norma el tiempo mínimo de promediado de cada posición de sonómetro ha de ser de al menos 6 segundos en el rango de 100 Hz a 400 Hz. Este es el límite más restrictivo en tiempo ya que entre 500 Hz y 5000 Hz el promediado mínimo es de 4 segundos, se realizarán promediados de 6 segundos en todas las frecuencias. En procedimientos de baja frecuencia (entre 50 Hz y 80 Hz) el tiempo de promediado sube hasta 15 segundos, pero este procedimiento se sale de nuestro campo de aplicación.

**2**

# Capítulo 3

## Diseño

Siguiendo lo explicado en la sección 2.4 se han seleccionado de 10 puntos de medida, 5 de ellos (M1-M5) en el recinto emisor y otros 5 (M6-M10) en el recinto receptor. En las tablas 3.1 y 3.2 se muestran las distancias existentes entre cada uno de los puntos de medida y las distancias a la fuente más cercana, al punto de medida mas cercano y la pared mas cercana.

Posición de medida	Distancia a fuente	Distancia a posición	Distancia a pared
M1	100 cm	141 cm	110 cm
M2	100 cm	141 cm	190 cm
M3	110 cm	155 cm	65 cm
M4	129 cm	117 cm	130 cm
M5	236 cm	117 cm	83 cm

**Tabla 3.1** – Sala emisora. Distancia entre cada posición de microfono, fuente y superficie de separación.

Posición de medida	Distancia a posición	Distancia a pared
M6	143 cm	104 cm
M7	143 cm	203 cm
M8	140 cm	141 cm
M9	176 cm	52 cm
M10	176 cm	77 cm

**Tabla 3.2** – Sala receptora. Distancia entre cada posición de microfono y superficie de separación. Ya que en esta sala no hay fuentes estas distancias no se incluyen.

La figura 3.1 muestra en un plano acotado la distribución final de las posiciones de medida y fuentes (F1 y F2). Se incluyen las posiciones para el ensayo de aislamiento horizontal y vertical, aunque finalmente el ensayo vertical no se ha incluido en los resultados debido a que el nivel captado en el recinto superior no superaba los 10 dB de diferencia con el ruido fondo.



Figura 3.1 – Plano de posiciones de puntos de medida y fuentes

Estos puntos no fueron los seleccionados en primera opción, se modificaron algunos de ellos por las siguientes razones:

- Algunos de los puntos de medida se encontraban alineados, si bien esto no lo prohíbe la norma, no lo aconseja ya que al estar estas posiciones alineadas podrían coincidir donde se produce uno de los modos propios del recinto y se pretende tener un muestreo de posiciones lo más completo posible.
- Al realizar unas medidas preliminares con el sonómetro Rion, se observa que debido a la geometría de la fuente y las características de la sala hay una caída de más de 8 dB en la banda colindante a la de 160 Hz en todos los puntos, lo cual no está permitido en la norma. En un principio se trató de solucionar con el ecualizador gráfico ajustando el nivel de la banda de 160 Hz lo que solucionó el problema en todos los puntos excepto en uno de ellos, por lo que se optó por cambiar su posición.

# Capítulo 4

## Implementación

### 4.1 Instrumentación utilizada

Tras el estudio de las distintas características de los equipos descritos en el apartado 2.3, se han seleccionado los siguientes:

- **Fuente dodecaedrica Omnipower 4296 de Brüel & Kjaer.** Con ella se generan los distintos tonos y el ruido rosa para realizar el estudio de aislamiento.



Figura 4.1 – Brüel & Kjaer Omnipower 4296

- **Sonometro 2238 de Brüel & Kjaer.** Sonometro Clase 1 con el que realizamos las medidas de nivel global en cada uno de los recintos.



Figura 4.2 – Brüel & Kjaer 2238 Mediator

- **Sonometro Rion NA-28.** Sonometro Clase 1 con banco de filtros de tercio de octava que se utiliza de patrón para comparar las medidas realizadas con el sonometro Brüel y el micrófono.



Figura 4.3 – RION

- **Power Amplifier 2716 de Brüel & Kjaer y Equalizador EQ131 de LTO.** Ecualizador de 33 bandas que se conecta al amplificador y al que a su vez se conecta la fuente de generación de señal, que como se verá en 4.3.2 en este caso es un teléfono móvil.



Figura 4.4 – Amplificador y Equalizador

- **Tarjeta de sonido Behringer FCA610.** Se utilizará para conectar el micrófono Tbone.

4



Figura 4.5 – Tarjeta de sonido

- **Microfono Tbone ECM 8000.** Es un microfono de condensador que se utilizará para complementar las medidas realizadas con el sonometro Brüel y poder así estudiar la distribución en frecuencia de la señal recibida.



Figura 4.6 – Microfono ECM 8000

- **Analizador de audio.** Se utiliza para medir la SINAD (*signal-to-noise and distortion*) de los equipos generadores de señal con el fin de seleccionar el equipo con mejores prestaciones.



Figura 4.7 – Analizador de audio

- **Osciloscopio.** Se medirá la forma de onda de salida de cada una de las señales producidas para ver que todos los parámetros son correctos y no existe saturación.



Figura 4.8 – Osciloscopio

A continuación en la figura ?? se muestra la configuración de conexión de los equipos.



Figura 4.9 – Configuración de conexiones

#### 4.1.1 Cableado generado

- **Cable Jack - XLR.** Cable que conecta el móvil al analizador de audio. En la figura 4.11 se muestra el esquema seguido.



Figura 4.10 – XLR - Jack

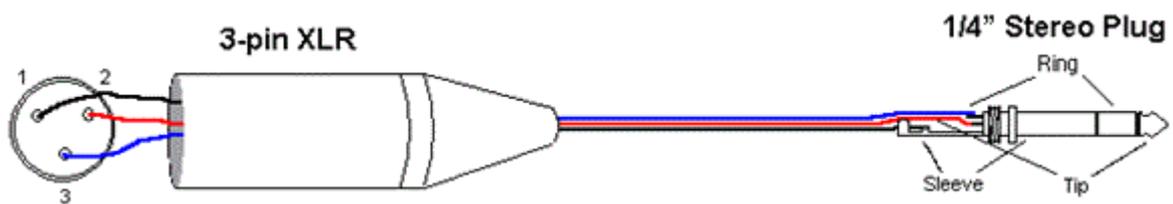


Figura 4.11 – XLR - Jack

- **Cable RS232.** Utilizado para descargar al ordenador los datos recogidos con el sonometro brüel. En la figura 4.13 se muestra el esquema seguido.



Figura 4.12 – Cable RS232

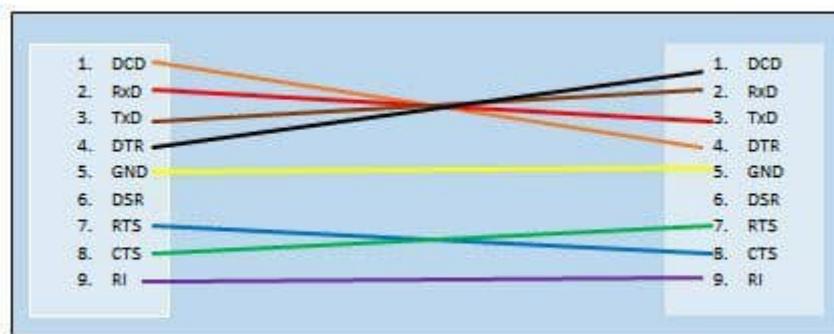


Figura 4.13 – Cable RS232

## 4.2 Descripción del Software utilizado

En la figura 4.14 se muestra de forma esquemática el software utilizado en la realización de medidas.

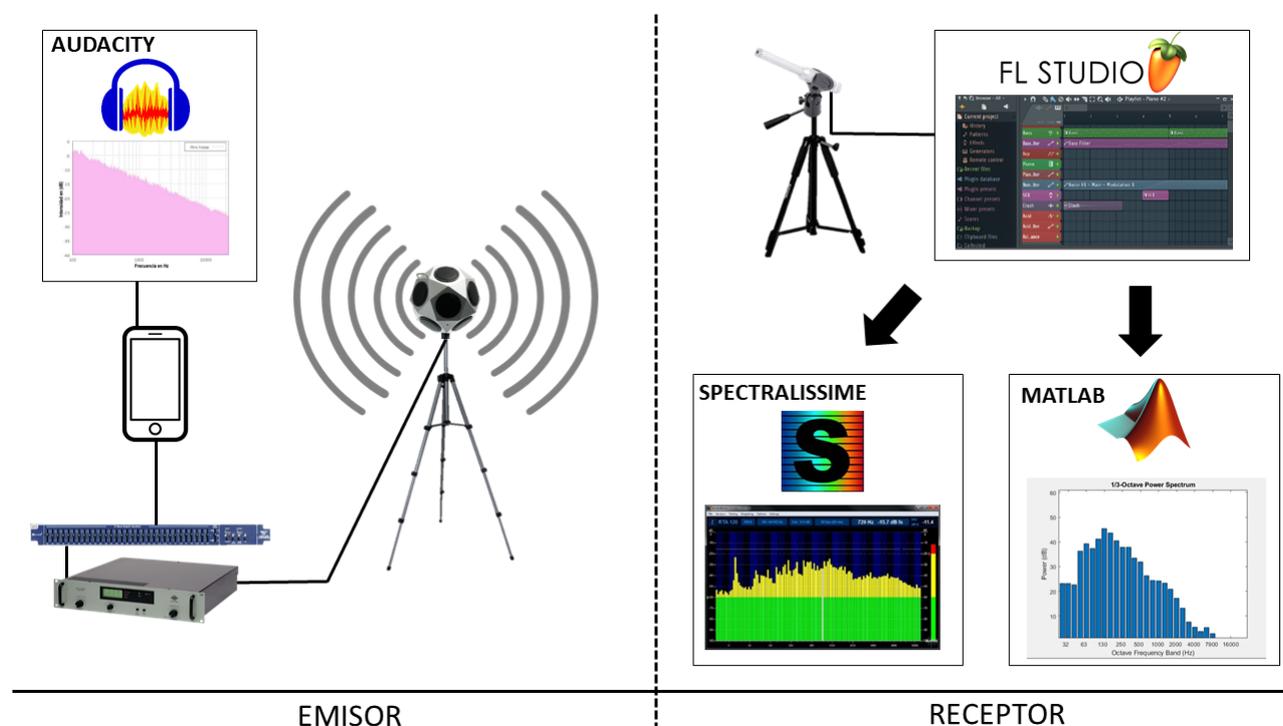


Figura 4.14 – Esquema de utilización de software

Con cada uno de los programas se realizan las siguientes tareas:

- **Audacity.** Este software gratuito ha sido la principal herramienta para la generación de señal. Tal y como se destaca en la sección 4.3.2 la señal generada es apta para la realización del estudio de aislamiento.
- **FL Studio.** Este popular software de producción musical se ha utilizado para la grabación de audio con el micrófono Tbone ECM 8000.
- **Matlab.** Las versiones modernas de Matlab (2020) disponen de herramientas realmente potentes para la implementación de filtros. Se ha utilizado para estudiar el espectro de las señales grabadas así como otros parámetros de interés de la señal como la SINAD.
- **Spectralissime.** Spectralissime es un software gratuito con el que se puede estudiar la respuesta en frecuencia de cualquier señal. Esta herramienta se ha utilizado de manera complementaria para verificar los resultados obtenidos con Matlab.

## 4.3 Descripción de los experimentos

### 4.3.1 Calibración de equipos

Para poder hacer uso de determinados equipos hay que realizar un proceso de calibración.

# 4

- **Calibración del Osciloscopio.** Para una correcta medida tendremos que calibrar las sondas de medida del osciloscopio que se muestran en la figura 4.16. Estas disponen de un condensador interno que hay que variar para conseguir que la señal de calibración mostrada en la figura 4.15.

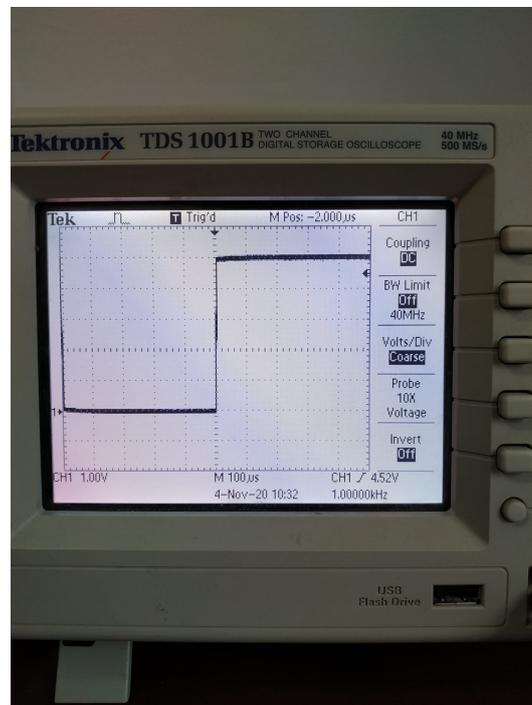


Figura 4.15 – Calibración del osciloscopio



Figura 4.16 – Sonda del osciloscopio

- **Calibración del Micrófono.** Para poder comparar las medidas realizadas con el micrófono y las realizadas con el sonómetro se necesita calibrar el micrófono con ayuda de un calibrador como el que se muestra en la figura 4.20. A continuación se explica el procedimiento a seguir para realizar dicha calibración con el software Spectralissime [10]:
  - **Paso 1:** Seleccionar en Spectralissime el dispositivo de entrada tal y como se muestra en la figura 4.17.

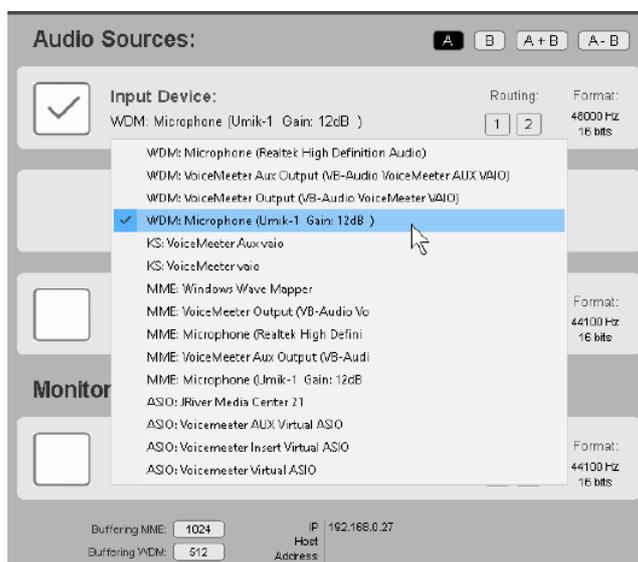


Figura 4.17 – Paso 1 de la calibración: selección de entrada

- Paso 2: A continuación, habrá que seleccionar la escala "Isophonic Scale" como se muestra en la figura 4.18.



Figura 4.18 – Paso 2 de la calibración: Ajuste de parámetros

4

Una vez seleccionado esta escala se ajustará en opciones: Spectral RMS, Meter RMS, FPS(integration time) = 20 fps (50ms) y Release rate (fps factor) = fast (x0.7).

- Paso 3: Con ayuda de un calibrador como el de la figura 4.20 se ajustará el nivel SPL como se muestra en la figura 4.19 hasta que marque en la esquina superior derecha el nivel generado por el calibrador.



Figura 4.19 – Paso 3 de la calibración: Ajuste de nivel



Figura 4.20 – Sonda del osciloscopio

Una vez hecho esto, Spectralissime ajustará las medidas teniendo en cuenta el parámetro "CAL".

### 4.3.2 Idoneidad de la señal utilizada

Para realizar un estudio de aislamiento será necesario emitir un ruido rosa que se medirá en las salas emisora y receptora. Existen diversas formas de generar este ruido rosa: aplicaciones móvil, softwares como Audacity e incluso dispositivos físicos como el generador de señal que se muestra en la figura 4.21.



Figura 4.21 – Superlux pink stick

Para decidir cual de las posibles fuentes utilizar se ha realizado un estudio detallado de la SINAD que ofrece cada una de estas opciones. Por desgracia el generador de señal no se ha podido utilizar al no encontrarse en buen estado para su uso. Las otras opciones, aplicaciones moviles y Audacity dan unos resultados similares. Solo se aprecian diferencias significativas de la SINAD cuando se varia la frecuencia de muestreo con la que se generan dichos ruidos o tonos.

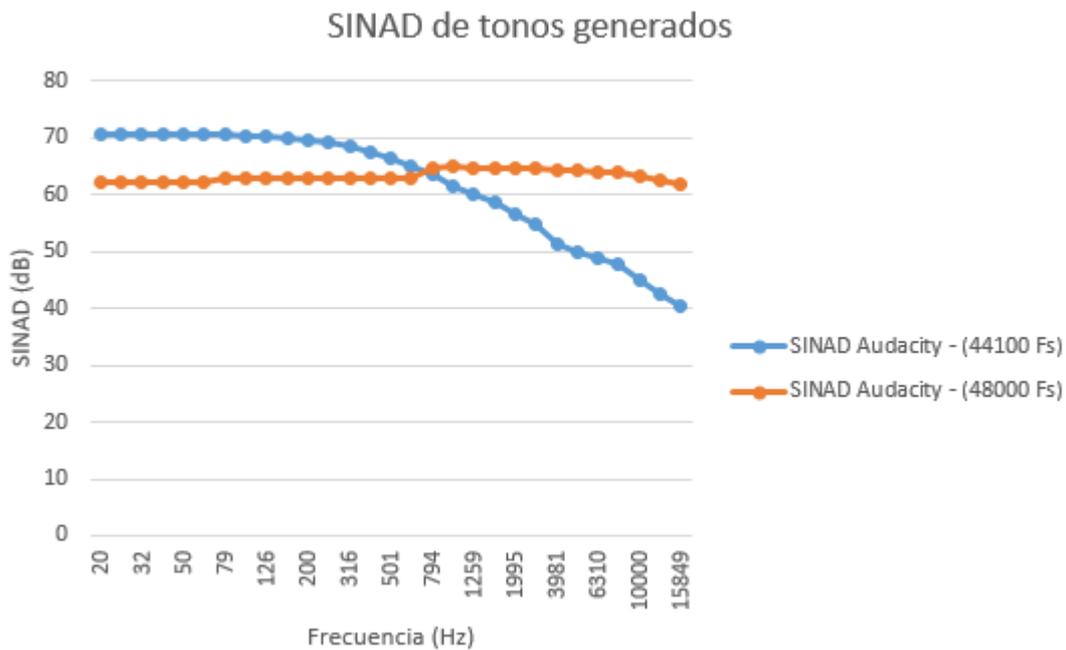


Figura 4.22 – SINAD

Como se puede observar en la figura 4.22, a mayor frecuencia de muestreo la SINAD se mantiene en valores aceptables en todo el espectro. Esto tiene sentido, ya que según el teorema de Nyquist, la frecuencia de muestreo debe de ser como minimo el doble de la frecuencia máxima, en nuestro caso 20000 Hz. Utilizando la frecuencia de muestreo de 44100 Hz se cumple el teorema con poca holgura, obteniendo peores resultados que si se utiliza un muestreo de 48000 Hz. Por lo que finalmente **se ha utilizado un ruido rosa generado con Audacity a 48000 Hz.**

### 4.3.3 Medidas de aislamiento

En este apartado se describen los aspectos básicos de las medidas realizadas para un estudio de aislamiento [5]. Se pueden dividir en las medidas realizadas en el recinto emisor y recinto receptor.

- **Medidas en el recinto emisor.** En la sala emisora solo se tendrán que hacer medidas de nivel de presión. Estas se realizan con el sonómetro Rion NA-28, el Brüel & Kjaer Mediator 2238 y el micrófono tbone ECM 8000.

Tipo de medida	Número de medidas	Duración
Nivel de presión	10	6 s

**Tabla 4.1** – Tipo de medidas y duración en sala emisora

- **Medidas en el recinto receptor.** Para la sala receptora se utiliza el mismo equipo que en la sala emisora, pero además de medir el nivel de presión se harán medidas de tiempo de reverberación. Estas medidas se hacen también con el sonómetro Rion NA-28. Para ello el sonómetro se coloca en 3 posiciones distintas del recinto receptor y se da una palmada para simular un ruido impulsivo. La duración de esta medida puede variar en función de la sala receptora, durará el tiempo necesario para que el nivel descienda 60 dB. Esta técnica se puede hacer también explotando globos si se dispone de ellos [4].

Tipo de medida	Número de medidas	Duración
Nivel de presión	10	6 s
Tiempo de Reverberación	6	6 - 10 s

**Tabla 4.2** – Tipo de medidas y duración en sala receptora

Estas medidas se han repetido en el recinto situado en la parte superior del emisor para el estudio de aislamiento vertical. No obstante como se explico anteriormente la señal recibida en esta sala fue insuficiente por lo que fue descartado su estudio.

4

# Capítulo 5

## Testing

En este capítulo se analizarán los resultados de las medidas de aislamiento descritas en el apartado 4.3.3. En primer lugar se presentarán los resultados de las medidas realizadas con el sonómetro Rion NA - 28 y posteriormente las realizadas con el sonómetro Mediator 2238 de Brüel & Kjaer y el micrófono Tbone EMC8000.

- **Medidas realizadas con sonómetro Rion NA - 28.** A continuación se muestran las medidas de nivel de presión en dBz (sin ponderación en frecuencia) y con ponderación en tiempo "Fast".

Source Room levels

Measurement	NA-28 location	Time	Meas. time (s)	Freq. weighting	Third octave band (Hz)																				
					50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k	4k	5k
1	SP1-S1-SG	16:37:27	6	Z	58.4	67.2	65.9	83.9	84.0	80.8	87.6	87.2	86.2	83.3	83.0	81.6	80.7	81.2	77.6	79.9	79.7	77.6	75.8	74.2	71.7
2	SP1-S2-SG	16:37:58	6	Z	57.6	66.5	71.2	87.0	81.2	85.1	85.6	85.5	89.1	84.0	83.4	81.2	80.2	78.5	77.4	79.4	80.5	78.5	76.7	74.5	71.9
3	SP1-S3-SG	16:38:18	6	Z	62.5	68.0	71.9	78.1	86.3	84.9	87.1	88.3	85.9	84.9	83.2	81.6	80.9	79.5	77.1	79.0	80.1	78.4	76.0	73.9	72.2
4	SP1-S4-SG	16:39:29	6	Z	54.3	67.2	64.5	80.8	87.0	80.1	84.6	87.4	86.3	82.0	82.5	80.2	79.6	78.8	76.4	78.8	78.6	77.2	76.0	73.5	71.3
5	SP1-S5-SG	16:39:54	6	Z	57.2	60.0	65.7	79.6	85.1	85.0	84.7	89.1	85.9	84.1	82.5	79.5	79.2	77.9	76.8	79.1	78.4	76.1	75.2	73.7	71.5
6	SP1-S6-SG	16:42:08	6	Z	57.2	68.7	67.8	78.9	78.2	79.1	84.5	87.0	85.9	84.9	82.2	80.9	79.3	79.0	77.8	79.3	79.1	77.1	75.6	73.1	70.9
7	SP1-S7-SG	16:43:10	6	Z	58.4	69.5	71.9	82.2	81.2	83.5	90.0	87.0	87.2	83.0	81.6	81.3	79.9	79.8	77.8	79.4	79.2	77.1	76.7	74.4	72.5
8	SP1-S8-SG	16:43:37	6	Z	61.6	67.7	73.2	85.7	80.1	84.1	84.2	85.1	83.7	82.4	83.2	81.2	79.5	78.5	77.0	79.1	78.9	76.9	75.6	73.8	71.5
9	SP1-S9-SG	16:44:25	6	Z	60.5	68.0	62.9	80.3	83.8	84.1	85.3	87.3	85.2	83.0	82.4	80.9	80.7	79.1	77.0	78.7	79.5	77.3	75.6	74.1	72.0
10	SP1-S10-SG	16:45:29	6	Z	59.8	65.8	70.1	84.4	77.1	84.1	84.8	86.6	86.8	82.2	83.9	81.8	80.6	80.2	77.8	78.6	79.1	77.3	75.8	73.4	71.5
Average source level (dB)					59.3	67.4	68.1	83.0	83.5	83.5	86.3	87.2	86.4	83.5	82.8	81.1	80.1	79.3	77.3	79.2	79.4	77.4	75.9	73.9	71.7

Figura 5.1 – Niveles de presión en el recinto emisor

En la figura [?] se muestran 10 medidas realizadas en el recinto emisor. De la medida 1 a la 5 corresponden a la posición de fuente F1 y de la 6 a la 10 corresponden a la posición de fuente F2 (ver el figura 3.1)

En el recinto receptor se han realizado dos tipos de medida en cada posición; En primer lugar una medida de ruido de fondo con la fuente apagada y a continuación una de nivel con la fuente funcionando. Este procedimiento se ha repetido también para las dos posiciones de fuente como en el recinto emisor. En las casillas de la fila "error code" de la tabla 5.2 aparece un "1" cuando la diferencia de niveles entre el ruido de fondo y el nivel recibido es inferior a 10 dBz, y un "0" cuando la diferencia es superior a 10 dBz.

Receiving Room levels

Meas.	NA-28 location	Time	Meas time (s)	Freq weighting	Third octave band (Hz)																					
					50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k	4k	5k	
1	Receiving level	SP1-R1-SG	16:52:32	6	Z	45.6	41.0	41.3	56.9	60.7	61.3	62.0	64.2	62.3	61.1	58.8	58.3	54.6	50.3	45.4	45.9	45.6	43.8	41.5	36.5	31.9
	Background level	SP1-R1-BG	16:56:34	6	Z	38.0	37.8	25.4	21.2	26.7	23.6	25.9	26.8	23.5	24.2	24.8	23.6	24.2	24.1	21.2	21.4	20.0	17.3	15.4	14.1	13.0
	Error code					44.8	39.7	41.3	56.9	60.7	61.3	62.0	64.2	62.3	61.1	58.8	58.3	54.6	50.3	45.4	45.9	45.6	43.8	41.5	36.5	31.9
2	Receiving level	SP1-R2-SG	16:52:59	6	Z	37.8	44.7	52.0	68.7	62.6	61.6	60.9	64.1	61.1	59.8	58.3	57.1	53.7	49.9	45.8	46.0	45.0	43.6	42.0	36.8	31.9
	Background level	SP1-R2-BG	16:57:05	6	Z	34.0	34.3	24.8	30.3	29.5	28.3	25.4	24.3	24.0	25.4	23.2	22.3	22.6	22.3	20.8	21.0	20.7	18.8	17.2	15.0	13.3
	Error code					38.5	44.7	52.0	68.7	62.6	61.6	60.9	64.1	61.1	59.8	58.3	57.1	53.7	49.9	45.8	46.0	45.0	43.6	42.0	36.8	31.9
3	Receiving level	SP1-R3-SG	16:53:52	6	Z	33.3	45.6	48.3	66.9	61.2	62.2	62.1	64.5	61.2	59.2	58.3	57.9	54.2	50.6	45.9	46.1	45.3	43.5	41.8	37.0	32.4
	Background level	SP1-R3-BG	16:57:29	6	Z	31.4	40.5	30.1	34.8	32.8	32.2	29.2	28.0	24.5	23.7	23.4	22.9	23.6	25.1	22.6	22.2	19.6	16.0	12.5	10.6	10.0
	Error code					32.0	44.3	48.3	66.9	61.2	62.2	62.1	64.5	61.2	59.2	58.3	57.9	54.2	50.6	45.9	46.1	45.3	43.5	41.8	37.0	32.4
4	Receiving level	SP1-R4-SG	16:55:14	6	Z	45.9	48.1	47.3	63.5	63.2	58.7	62.3	63.3	61.4	59.2	56.9	56.8	53.6	50.2	45.6	45.9	44.9	43.7	41.3	37.0	31.8
	Background level	SP1-R4-BG	16:58:02	6	Z	38.2	41.4	31.1	33.3	35.4	26.1	27.5	27.8	25.9	25.4	25.8	26.2	27.1	27.5	26.4	26.6	23.8	21.2	19.1	15.1	15.1
	Error code					45.1	47.1	47.3	63.5	63.2	58.7	62.3	63.3	61.4	59.2	56.9	56.8	53.6	50.2	45.6	45.9	44.9	43.7	41.3	37.0	31.8
5	Receiving level	SP1-R5-SG	16:55:33	6	Z	41.6	45.5	43.2	59.7	59.8	63.6	63.8	65.8	62.5	60.7	58.5	57.3	54.0	49.8	45.2	45.3	44.9	43.8	41.5	36.9	32.2
	Background level	SP1-R5-BG	16:58:27	6	Z	34.6	33.8	22.3	23.8	29.3	24.1	26.6	24.6	21.9	22.5	23.5	23.0	22.9	23.7	20.3	20.3	18.5	16.4	15.0	12.5	11.8
	Error code					40.8	45.5	43.2	59.7	59.8	63.6	63.8	65.8	62.5	60.7	58.5	57.3	54.0	49.8	45.2	45.3	44.9	43.8	41.5	36.9	32.2
6	Receiving level	SP1-R6-SG	17:04:13	6	Z	45.3	43.4	43.8	58.3	58.4	60.4	62.0	65.1	61.3	60.7	57.9	54.9	51.4	45.8	45.5	44.8	43.4	41.1	36.7	31.8	
	Background level	SP1-R6-BG	16:59:09	6	Z	50.6	41.7	31.0	30.1	35.1	30.6	31.1	30.2	27.1	25.7	26.8	29.9	27.7	26.0	25.0	24.5	21.1	17.8	14.2	11.9	10.6
	Error code					44.0	42.1	43.8	58.3	58.4	60.4	62.0	65.1	61.3	60.7	57.9	54.9	51.4	45.8	45.5	44.8	43.4	41.1	36.7	31.8	
7	Receiving level	SP1-R7-SG	17:04:36	6	Z	33.7	43.8	53.2	70.1	61.2	59.6	62.6	63.5	61.5	59.4	58.9	57.6	54.7	51.1	45.3	45.5	44.5	43.6	41.4	37.0	31.8
	Background level	SP1-R7-BG	16:59:28	6	Z	30.7	36.3	27.8	31.9	28.8	29.3	26.6	26.3	24.6	24.3	25.6	25.1	23.3	23.2	20.5	16.8	14.0	12.3	11.2		
	Error code					32.4	42.9	53.2	70.1	61.2	59.6	62.6	63.5	61.5	59.4	58.9	57.6	54.7	51.1	45.3	45.5	44.5	43.6	41.4	37.0	31.8
8	Receiving level	SP1-R8-SG	17:04:58	6	Z	37.5	46.0	53.5	69.0	58.8	60.9	63.5	64.5	60.7	59.7	56.8	53.8	50.3	45.5	45.1	44.5	43.6	41.6	37.3	32.4	
	Background level	SP1-R8-BG	16:59:49	6	Z	31.7	36.2	25.3	34.2	32.0	26.9	27.7	27.2	23.8	23.9	25.8	24.3	23.6	25.0	20.1	19.1	16.9	15.1	13.4	11.7	10.4
	Error code					36.2	46.0	53.5	69.0	58.8	60.9	63.5	64.5	60.7	59.7	56.8	53.8	50.3	45.5	45.1	44.5	43.6	41.6	37.3	32.4	
9	Receiving level	SP1-R9-SG	17:05:21	6	Z	44.6	50.0	51.1	63.3	59.2	54.9	60.3	63.2	61.7	59.7	56.9	57.5	53.6	50.5	45.7	45.0	44.9	43.4	41.5	36.8	31.8
	Background level	SP1-R9-BG	17:00:44	6	Z	45.8	41.1	31.7	31.4	34.4	29.6	28.1	29.4	29.8	28.3	29.5	26.8	26.4	28.4	26.3	26.4	25.2	24.1	20.5	17.8	14.0
	Error code					43.3	49.4	51.1	63.3	59.2	54.9	60.3	63.2	61.7	59.7	56.9	57.5	53.6	50.5	45.7	45.0	44.9	43.4	41.5	36.8	31.8
10	Receiving level	SP1-R10-SG	17:05:40	6	Z	38.3	45.5	46.8	59.5	57.9	60.4	62.3	64.6	60.6	59.3	57.4	56.1	54.0	51.1	45.7	45.3	45.1	43.6	41.6	36.9	32.0
	Background level	SP1-R10-BG	17:02:27	6	Z	35.6	37.0	26.8	27.6	34.1	27.8	31.4	30.8	28.4	31.1	30.8	28.4	30.2	30.0	28.5	31.0	31.9	34.5	34.6	31.4	25.2
	Error code					37.0	44.8	46.8	59.5	57.9	60.4	62.3	64.6	60.6	59.3	57.4	56.1	54.0	51.1	45.7	45.3	45.1	43.6	41.6	36.9	32.0

Figura 5.2 – Niveles de presión en el recinto receptor

Podemos observar que la mayoría de los casos las medidas superan en más de 10 dBz el ruido de fondo y pudiendose calcular de manera fiable el aislamiento. Para finalizar, en la figura 5.3 se muestran las medidas de tiempo de reverberación en el recinto receptor tal y como se describen en el apartado 4.3.3

5

Meas.	Freq.	Time	Reverberation time (s) for third octave bands (Hz)																					
			50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k	4k	5k	
1	Z	t	2.04	1.30	2.97	2.45	3.61	4.99	5.64	3.86	2.42	3.46	3.86	2.81	2.83	2.61	2.49	2.27	2.19	1.92	1.83	1.50		
2	Z	t	6.56	2.21	1.56	2.58	3.46	3.74	5.53	3.45	4.59	3.70	3.22	2.78	3.05	2.92	2.49	2.60	2.50	2.11	1.96	1.69	1.41	
3	Z	t	8.09	1.11	2.06	2.77	3.12	4.04	4.30	2.98	3.52	2.70	2.87	2.49	2.43	2.75	2.70	2.60	2.58	2.14	2.03	1.75	1.59	
4	Z	t	3.95	2.93	1.55	1.93	2.09	3.34	2.41	4.44	3.74	3.35	2.90	2.56	2.68	3.16	2.83	2.47	2.40	2.23	1.93	1.80	1.51	
5	Z	t	4.94	6.32	0.31	3.19	4.78	1.32	3.39	3.48	3.32	3.28	3.09	2.52	2.62	2.95	2.79	2.56	2.43	2.31	1.93	1.82	1.51	
6	Z	t	7.41	3.83	1.12	5.09	0.22	2.64	4.35	3.87	3.30	3.23	3.26	2.78	2.97	2.90	2.75	2.72	2.37	2.07	1.98	1.77	1.53	

Figura 5.3 – Medidas de tiempo de reverberación en el recinto receptor

Con los datos mostrados anterioreme y aplicando la norma UNE-EN ISO 16283-1:2015/A1:2018 se calcula el indice de el aislamiento por bandas de tercios de octava (DnT) que se muestra en la figura 5.4

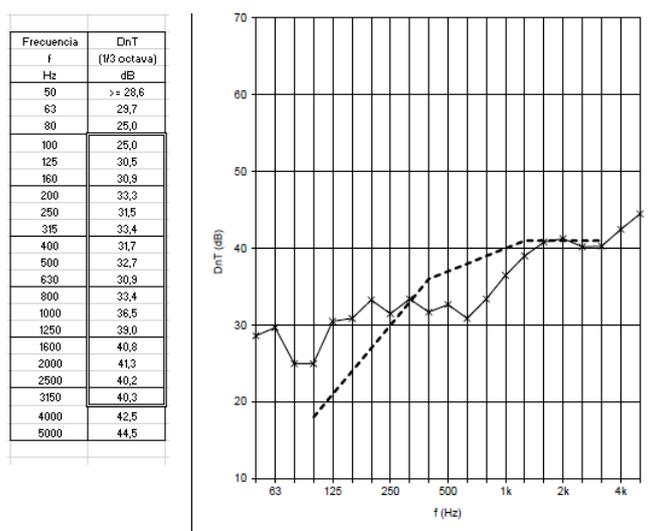


Figura 5.4 – Curva de aislamiento medida con sonómetro Rion NA - 28

Finalmente aplicando lo descrito en la norma se obtiene un índice de aislamiento global o DnTA de **36 dB**.

- **Medidas realizadas con micrófono Tbone ECM 8000 y sonómetro Brüel & Kjaer.** Se han realizado mediciones con el sonómetro Brüel y grabaciones con el micrófono Tbone en cada uno de los puntos indicados en la figura 3.1 (M1-M10). Para obtener los nivel de presión por bandas de tercio de octava, hay dos opciones de procesado de la señal grabada con el micrófono que se describen a continuación.

– Spectralissime: Se reprodujeron las grabaciones hecha con el micrófono y mediante el software Spectralissime se realizó un análisis en tiempo real como se muestra en la figura 5.5



Figura 5.5 – Medida de nivel con Spectralissime

- Matlab: La operativa con Matlab es algo más compleja; hubo que leer el audio y guardarlo en un vector. Seguidamente con las funciones que ofrece Matlab2020 para implementación de filtros se analizó este vector. Tal como se muestra en la figura 5.6 en la que se representan los valores de presión correspondientes a la frecuencia central de cada banda de tercio de octava. Para encontrar un valor promedio de toda la banda y no solo de la frecuencia central se utilizó otra función de Matlab llamada *octaveFilterBank* obteniendo los resultados mostrados en la figura 5.7.

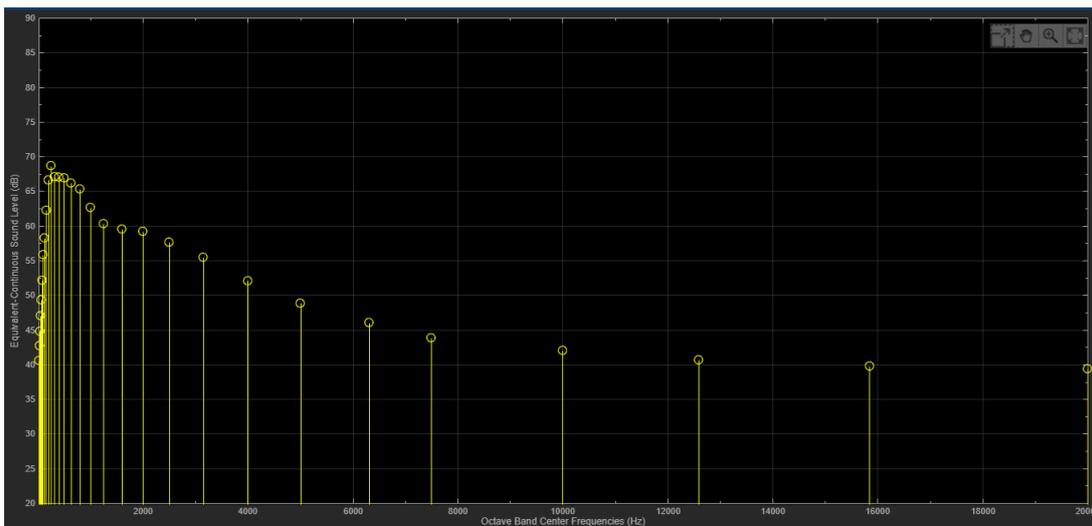


Figura 5.6 – Nivel depresión sonora de la grabación realizada en M1 con Microfono TBone ECM8000

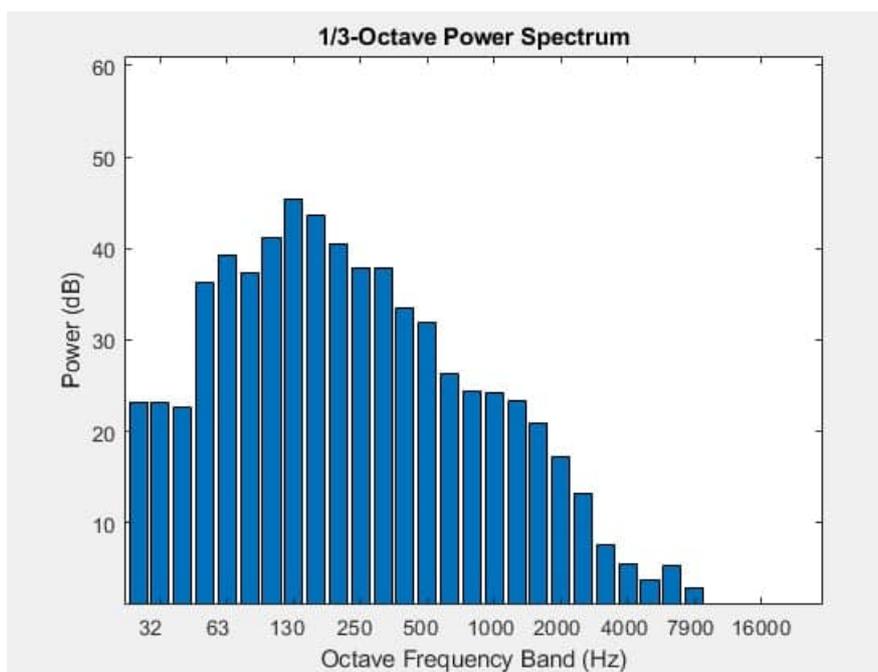


Figura 5.7 – Nivel de presión sonora de grabación realizada en M1 con Microfono promediado por bandas de tercio de octava



Finalmente se obtubieron los valores de presión sonora en el recinto emisor y receptor que se muestran respectivamente en las figuras 5.8 y ??

Source Room levels

Measurement	NA-28 location	Time	Meas. time (s)	Freq. weighting	Third octave band (Hz)																				
					50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k	4k	5k
1	SP1-S1-SG	16:37:27	6	Z	42.0	44.4	47.2	51.5	53.2	56.4	60.0	63.2	64.7	63.7	63.5	63.0	63.1	63.2	62.1	63.1	63.6	63.0	61.2	59.1	56.6
2	SP1-S2-SG	16:37:58	6	Z	41.5	43.9	46.9	51.1	52.6	55.7	58.7	61.7	65.6	63.3	62.2	62.3	62.5	63.1	62.6	64.2	64.0	62.7	62.3	60.5	58.4
3	SP1-S3-SG	16:38:18	6	Z	41.2	43.8	46.3	50.0	54.0	56.9	59.3	61.5	62.5	62.6	62.4	62.6	62.9	62.9	62.1	63.3	63.4	61.8	60.8	58.5	56.5
4	SP1-S4-SG	16:39:29	6	Z	40.8	43.2	45.6	49.8	53.4	54.7	59.0	63.2	62.6	61.5	61.5	61.3	61.9	61.9	61.3	62.9	63.2	61.9	59.8	58.1	56.0
5	SP1-S5-SG	16:39:54	6	Z	41.1	43.4	46.1	49.8	52.8	55.6	59.5	63.5	63.2	61.9	62.5	62.1	62.5	62.3	61.9	62.7	63.2	61.9	60.1	58.2	56.0
6	SP1-S6-SG	16:42:08	6	Z	40.9	43.2	45.6	48.4	51.2	54.8	59.6	63.1	63.8	63.6	62.9	62.6	62.8	62.4	62.1	63.5	63.0	61.2	59.9	57.9	55.8
7	SP1-S7-SG	16:43:10	6	Z	41.8	44.1	46.8	50.1	53.0	57.0	60.7	63.0	64.5	62.3	62.1	62.9	62.9	63.7	62.4	63.2	62.9	61.7	60.5	58.5	56.0
8	SP1-S8-SG	16:43:37	6	Z	40.0	42.4	45.4	48.2	50.6	55.0	57.5	60.4	62.3	62.3	63.2	62.8	62.6	62.3	61.4	63.1	63.9	62.3	60.0	58.2	55.8
9	SP1-S9-SG	16:44:25	6	Z	40.2	42.5	45.2	48.8	52.0	56.5	59.0	61.2	62.4	61.2	61.9	62.7	63.9	63.3	62.1	63.0	63.2	62.0	60.6	58.9	56.4
10	SP1-S10-SG	16:45:29	6	Z	40.7	43.1	46.0	50.2	51.5	55.4	58.5	61.4	63.1	62.3	62.4	63.4	64.1	63.0	61.6	63.0	62.9	61.1	59.9	57.7	55.4
Average source level (dB)					41.1	43.4	46.2	50.0	52.6	56.8	59.2	62.3	63.6	62.5	62.6	63.0	62.8	62.0	63.2	63.3	62.0	60.6	58.8	56.3	

Figura 5.8 – Nivel de presión en el recinto emisor grabado con el micrfono

Receiving Room levels

Meas.	NA-28 location	Time	Meas. time (s)	Freq. weighting	Third octave band (Hz)																					
					50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k	4k	5k	
1	Receiving level	SPI-R1-SG	16:52:32	6	Z	36,9	39,2	42,0	45,7	48,1	52,1	56,5	59,6	57,0	56,9	56,6	56,1	55,2	52,5	50,2	49,4	49,1	47,5	45,3	41,9	38,6
	Background level	SPI-R1-BG	16:56:34	6	Z	38,0	37,8	25,4	21,2	26,7	23,6	25,9	26,8	23,5	24,2	24,8	23,6	24,2	24,1	21,2	21,4	20,0	17,3	15,4	14,1	13,0
	Corrected level					33,6	37,9	42,0	45,7	48,1	52,1	56,5	59,6	57,0	56,9	56,6	56,1	55,2	52,5	50,2	49,4	49,1	47,5	45,3	41,9	38,6
	Error code					1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2	Receiving level	SPI-R2-SG	16:52:59	6	Z	36,9	39,2	42,0	45,7	48,1	52,1	56,5	59,6	57,0	56,9	56,9	56,1	55,2	52,5	50,2	49,4	49,1	47,5	45,3	41,9	38,6
	Background level	SPI-R2-BG	16:57:05	6	Z	34,0	34,3	24,8	30,3	29,5	26,3	25,4	24,3	24,0	25,4	23,2	22,3	22,6	22,3	20,8	21,0	20,7	18,8	17,2	15,0	13,3
	Corrected level					35,6	37,9	42,0	45,7	48,1	52,1	56,5	59,6	57,0	56,9	56,9	56,1	55,2	52,5	50,2	49,4	49,1	47,5	45,3	41,9	38,6
	Error code					1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3	Receiving level	SPI-R3-SG	16:53:52	6	Z	35,9	38,8	42,8	48,0	47,2	50,1	52,7	55,4	56,7	55,9	55,4	56,4	54,4	52,4	49,8	49,1	48,7	47,2	45,1	41,9	38,6
	Background level	SPI-R3-BG	16:57:29	6	Z	31,4	40,5	30,1	34,8	32,8	32,2	29,2	29,0	24,5	23,7	23,4	22,9	23,6	25,1	22,6	22,2	19,6	16,0	12,5	10,6	10,0
	Corrected level					34,6	37,5	42,8	48,0	47,2	50,1	52,7	55,4	56,7	55,9	55,4	56,4	54,4	52,4	49,8	49,1	48,7	47,2	45,1	41,9	38,6
	Error code					1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4	Receiving level	SPI-R4-SG	16:55:14	6	Z	35,1	37,2	40,3	45,1	46,9	47,8	51,5	55,2	56,6	56,3	56,6	56,3	54,6	52,8	49,9	49,5	49,1	47,3	45,2	41,8	38,5
	Background level	SPI-R4-BG	16:58:02	6	Z	38,2	41,4	31,1	33,3	35,4	26,1	27,5	27,8	25,9	25,4	25,8	26,2	27,1	27,5	26,4	25,6	23,8	21,2	19,1	15,1	15,1
	Corrected level					33,6	35,9	39,1	45,1	46,9	47,8	51,5	55,2	56,6	56,3	56,6	56,3	54,3	52,9	49,9	49,5	49,1	47,3	45,2	41,8	38,5
	Error code					1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5	Receiving level	SPI-R5-SG	16:55:33	6	Z	35,8	38,2	41,0	45,1	47,7	50,1	53,4	57,6	57,8	57,2	56,6	55,5	54,4	52,6	49,8	49,4	48,7	47,5	45,1	41,9	38,6
	Background level	SPI-R5-BG	16:59:05	6	Z	34,6	33,8	22,3	23,8	29,3	24,1	26,6	24,6	21,9	22,5	23,5	23,0	22,9	23,7	20,3	20,3	18,5	16,4	15,0	12,5	11,8
	Corrected level					34,5	36,9	41,0	45,1	47,7	50,1	53,4	57,6	57,9	57,2	56,6	55,5	54,4	52,6	49,8	49,4	48,7	47,5	45,1	41,9	38,6
	Error code					1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
6	Receiving level	SPI-R6-SG	17:04:13	6	Z	36,4	38,9	41,8	46,1	48,5	51,1	55,6	57,6	56,9	56,7	57,1	57,3	55,0	53,0	50,0	49,1	48,1	46,6	44,7	41,5	38,3
	Background level	SPI-R6-BG	16:59:09	6	Z	50,6	41,7	31,0	30,1	35,1	30,6	31,1	30,2	27,1	25,7	26,8	29,9	27,7	26,0	25,0	24,5	21,1	17,8	14,2	11,9	10,6
	Corrected level					35,1	37,6	41,8	46,1	48,5	51,1	55,6	57,6	56,9	56,7	57,1	57,3	55,0	53,0	50,0	49,1	48,1	46,6	44,7	41,5	38,3
	Error code					1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
7	Receiving level	SPI-R7-SG	17:04:36	6	Z	36,8	39,5	43,4	48,7	47,9	50,3	54,7	56,1	56,5	56,2	56,8	56,2	55,4	53,1	49,9	49,3	48,4	46,7	44,6	41,6	38,3
	Background level	SPI-R7-BG	16:59:29	6	Z	30,7	36,3	27,8	31,9	28,8	29,3	26,6	28,3	24,6	24,3	25,6	25,1	25,3	26,7	23,3	23,2	20,5	18,8	14,0	12,3	11,2
	Corrected level					35,3	38,2	43,4	48,7	47,9	50,3	54,7	56,1	56,5	56,2	56,8	56,2	55,4	53,1	49,9	49,3	48,4	46,7	44,6	41,6	38,3
	Error code					1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
8	Receiving level	SPI-R8-SG	17:04:58	6	Z	37,4	40,3	44,4	49,5	48,3	51,2	55,2	56,8	57,6	57,0	56,8	56,1	54,8	52,4	50,0	49,0	48,1	46,6	44,6	41,5	38,3
	Background level	SPI-R8-BG	16:59:49	6	Z	31,7	36,2	28,3	34,2	32,0	26,9	27,7	27,2	23,8	23,9	25,8	24,3	23,6	25,0	20,1	19,1	16,9	15,1	13,4	11,7	10,4
	Corrected level					36,1	39,0	44,4	49,5	48,3	51,2	55,2	56,8	57,6	57,0	56,8	56,1	54,8	52,4	50,0	49,0	48,1	46,6	44,6	41,5	38,3
	Error code					1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
9	Receiving level	SPI-R9-SG	17:05:21	6	Z	36,8	39,6	43,5	49,0	48,2	49,3	54,5	57,0	56,5	57,8	56,8	56,2	54,6	53,2	50,0	48,7	47,8	46,5	44,4	41,6	38,2
	Background level	SPI-R9-BG	17:00:44	6	Z	45,8	41,1	31,7	31,4	34,4	29,6	28,1	29,4	29,8	28,3	29,5	26,8	26,4	28,4	26,3	26,4	25,2	24,1	20,5	17,8	14,0
	Corrected level					35,5	38,3	43,5	49,0	48,2	49,3	54,5	57,0	56,5	57,8	56,8	56,2	54,6	53,2	50,0	48,7	47,8	46,5	44,4	41,6	38,2
	Error code					1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
10	Receiving level	SPI-R10-SG	17:05:40	6	Z	35,0	38,5	41,8	46,3	48,1	51,3	54,3	57,1	56,5	56,3	56,0	56,7	54,0	53,3	50,0	48,8	48,0	46,6	44,7	41,5	38,4
	Background level	SPI-R10-BG	17:02:27	6	Z	35,6	37,0	26,8	27,6	34,1	27,8	31,4	30,8	28,4	31,1	30,8	28,4	30,2	30,0	28,5	31,0	31,9	34,5	34,6	31,4	25,2
	Corrected level					34,7	37,3	41,6	46,3	48,1	51,3	54,3	57,1	56,5	56,3	56,0	56,7	54,0	53,3	50,0	48,8	48,0	46,6	44,7	41,5	38,4
	Error code					1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Average corrected receiving level (dB)					35,1	37,7	42,4	47,2	47,9	50,7	54,7	57,1	56,8	56,8	56,5	56,2	54,8	52,3	50,0	49,2	48,5	47,0	44,9	41,7	38,4	
Background noise error code					1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Figura 5.9 – Nivel de presión sonora en el recinto receptor grabado con el micrófono

Las tablas anteriores son similares a las descritas para las medidas realizadas con el sonómetro Rion NA-28. Y análogamente a partir de los datos de estas medidas se ha obtenido la curva de aislamiento que se muestra en la figura ?? y el índice de aislamiento acústico normalizado DnTA, que según los cálculos realizados es de **18 dB**.

Frecuencia f Hz	DnT (1/3 octava) dB
50	>= 16,3
63	>= 13,4
80	8,8
100	10,8
125	12,2
160	13,3
200	13,7
250	13,9
315	15,2
400	14,0
500	14,0
630	13,6
800	15,7
1000	17,7
1250	19,3
1600	21,2
2000	21,7
2500	21,4
3150	21,6
4000	22,4
5000	22,7

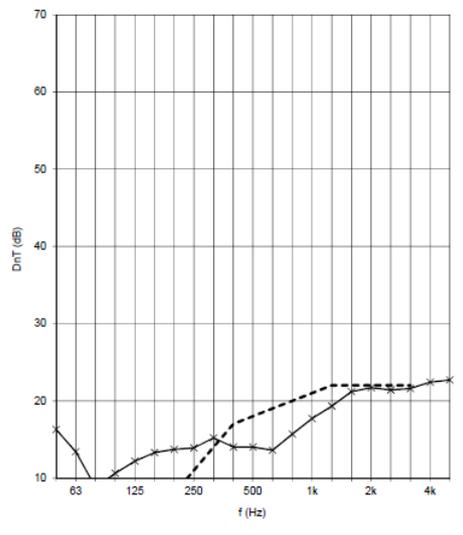


Figura 5.10 – Curva de aislamiento calculada a partir de grabaciones

## Capítulo 6

# Conclusiones y posibles mejoras

En el presente capítulo se tratará de explicar algunos aspectos más personales como todo lo aprendido durante la realización del TFM y conocimientos previos, y para finalizar se expondrá las conclusiones y las mejoras posibles a aplicar.

### 6.0.1 Conocimientos previos y experiencia adquirida:

Durante la realización de este trabajo se han puesto en práctica algunos de los conocimientos adquiridos en el master como todo lo relacionado con el procedimiento de medida: Número de posiciones de medida y de fuente, tiempo de promediado, cálculo de índices de aislamiento, etc... Otros de los conocimientos puestos en práctica de los que adquirí durante la realización del máster son los relacionados con la asignatura de sistemas electroacústicos. En la realización de las medidas se han manejado distintos equipos de medida donde el interconexionado de los mismo debía precederse de un estudio de las características para la correcta utilización.

En este trabajo considero que he aprendido sobre aspectos muy diversos de la ingeniería pero quizás destacaría dos que considero de vital importancia: Utilización de equipo de medida e implementación de cableado. Durante el máster todo se estudia desde un punto estrictamente teórico y nos encontramos con una situación tan dramática como la siguiente: cualquier ingeniero acústico que termine hoy el máster en la universidad de granada no ha aprendido a manejar ni un sonometro, ni una fuente dodecaédrica, ni un limitador y ni mucho menos una máquina de impactos. La falta de fondos para la distribución de material en jornadas prácticas conlleva que las principales atribuciones de nuestro máster no sean estudiadas desde un punto de vista práctico. Es por ello, que me siento mucho más formado después de la realización de dicho trabajo, puesto que por primera vez en un año he manejado algunos de los equipos imprescindibles para la realización de un estudio de aislamiento acústico.

Además de manejar distintos sonómetros y una fuente dodecaédrica, he tenido que implementar cableado para la interconexión de equipos y extracción de datos. Este aspecto está más relacionado con la electrónica que con el máster de ingeniería acústica pero es otro conocimiento práctico que considero importante ya que me ha servido para solventar algunos de los problemas encontrados durante la realización del trabajo fin de máster.

No menos importante que lo anteriormente expuesto, me gustaría destacar la gran cantidad de softwares distintos utilizados y de los que he tenido que aprender durante estos meses. Desde Audacity para la generación de señal y captación de la misma, hasta Spectralissime para el estudio de las características de esta. También he ampliado mis conocimientos en otros software que ya conocía como MATLAB o FL Studio.

### 6.0.2 Conclusiones:

A la vista de los resultados expuestos en el capítulo anterior las mediciones de aislamiento realizadas con el micrófono se alejan mucho de los resultados esperados. Mientras que con el sonómetro obteníamos un nivel de aislamiento a ruido aéreo de 36 dB, con el micrófono este nivel cae hasta los 18 dB. Esta diferencia de niveles se encuentra muy lejos del error asumible de medida ya que es de casi 20 dB, por lo que queda claro que el error se cometió en el procedimiento de medida.

Debido a la pandemia del COVID-19 todas las medidas de aislamiento se han tenido que realizar en un tiempo extremadamente reducido y es por ello que algunas de estas no se han podido completar con la fiabilidad esperada. Estudiando las características de las medidas realizadas, podemos concluir que esta diferencia de niveles se debe a la incorrecta realización del procedimiento de calibración del micrófono para las medidas. Dicho procedimiento se describe en [4.3.1](#)

## 6

### 6.0.3 Futuras mejoras:

Esta medida experimental de aislamiento de una sala podría estar mucho más cerca del resultado esperado si se hubiesen llevado a cabo una caracterización de la fuente en campo libre y un procedimiento de calibración adecuado.

- **Caracterización de fuente en campo libre:** Este procedimiento puede ser determinante para estudiar la influencia de la sala en las medidas que estamos realizando. Si bien es cierto que no es indispensable para el cálculo del aislamiento, nos permite conocer de manera más precisa la directividad de la fuente a altos niveles de presión y con ello poder contrastar toda la documentación técnica que el fabricante nos proporciona.

- **Calibración del micrófono:** Si bien el anterior procedimiento no es determinante para el aislamiento, este sí lo ha sido. Las medidas realizadas son correctas pero al no poder realizar la calibración en el principio de cada una de ellas, estas son imposibles de comparar y aplicar las correcciones necesarias para el correcto cálculo del aislamiento a ruido aéreo.

**6**

# Referencia

- [1] AENOR. Une-en iso 16283- 1:2015/a1:2018:acústica. medición in situ del aislamiento acústico en los edificios y en los elementos de construcción. parte 1: Aislamiento a ruido aéreo, 2018. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0061273>.
- [2] BRÜEL, AND KJAER. Catálogo y características de la fuente omnidireccional omnipower 4296 de brüel and kjaer. [https://www.atecorp.com/atecorp/media/pdfs/data-sheets/bruel-kjaer-4296\\_datasheet.pdf](https://www.atecorp.com/atecorp/media/pdfs/data-sheets/bruel-kjaer-4296_datasheet.pdf).
- [3] BRUEL. Catálogo y características del sonómetro mediator 2238 de brüel and kjaer. <https://www.bksv.com/media/doc/bp1776.pdf>.
- [4] EVEREST, F. A., AND POLHMANN, K. C. Master handbook of acoustic.
- [5] GARCÍA, S. L. Análisis y valoración de la medida de aislamiento a ruido aéreo mediante une-en iso 16289-1, 2017. <https://repositorio.upct.es/handle/10317/6497?show=full>.
- [6] IAG. Catálogo y características de la fuente omnidireccional dd5 de iag. <https://15f8034cdff6595cbfa1-1dd67c28d3aade9d3442ee99310d18bd.ssl.cf3.rackcdn.com/d469d8af8cdf833de5c1d6056704106c/PDOMNIDIRECTIONALSOUNDSOURCEDD-5v2ES.pdf>.
- [7] NTI. Catálogo y características de la fuente omnidireccional ds3 de nti. <https://www.nti-audio.com/Portals/0/data/en/NTi-Audio-Dodecahedron-Speaker-Set-Product-Data.pdf>.
- [8] RION. Catálogo y características del sonómetro rion na-28. <https://rion-sv.com/download/catalog/NA-28>.
- [9] SAUTER. Características del sonómetro sauter sw 1000. <https://www.sauter-spain.es/SONOMETRO-SAUTER-SW-1000>.

- [10] SPECTRALISSIME. User manual - high definition frequency analyzer for any acoustic measures., 2017. [https://vb-audio.com/Spectralissime/Spectralissime\\_UserManual.pdf](https://vb-audio.com/Spectralissime/Spectralissime_UserManual.pdf).

# Apendice A

## Presupuesto

### A.1 Factura de materiales

Item	Cost (€)
Micrófono	36
Sonómetro Brüel	5000
Sonómetro Rion	7000
Fuente Dodecaédrica	4000
Tarjeta de sonido	148.98
Ecualizador gráfico	115
Amplificador	1700
Analizador de Audio	700
Osciloscopio	750
<b>Subtotal (antes de IVA):</b>	<b>19.449,98</b>
<b>Total (IVA incluido):</b>	<b>23.145,47</b>

**Tabla A.1** – *Factura de equipo utilizado*

## A.2 Coste de los recursos humanos

Además de los equipos, existe un coste humano asociado al sueldo de los desarrolladores del proyecto. Un ingeniero Junior (10 €/h), con una jornada completa durante 5 meses y un Ingeniero senior como supervisor del proyecto (50 €/h), computando 5 horas por semana.

Puesto	Tiempo (Horas)	Coste (€)
Junior Engineer	800	8000
Senior Engineer	240	1250
<b>TOTAL</b>		<b>9250 €</b>

**Tabla A.2** – *Costes humanos*

Tarea	Fecha Inicio	Fecha Final	Asignado	Estado
<b>Proyecto íntegro</b>	01.07.2020	05.11.2020	Arturo	Done
Elaboración de documentación	01.07.2020	15.08.2020	Arturo	Done
Elaboración de propuestas de medida	15.08.2020	31.08.2020	Arturo	Done
Estudio de idoneidad de la señal generada	31.08.2020	15.09.2020	Arturo	Done
Medidas de aislamiento	15.09.2020	01.10.2020	Arturo	Done
Informe de aislamiento	01.10.2020	15.10.2020	Arturo	Done
Redacción de Trabajo Fin de Máster	15.10.2020	05.11.2020	Arturo	Done

	03.08.2020	10.08.2020	17.08.2020	24.08.2020	31.08.2020	07.09.2020	14.09.2020	21.09.2020	28.09.2020	06.10.2020	13.10.2020	20.10.2020	27.10.2020	03.11.2020
Proyecto íntegro	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
Elaboración de documentación														
Elaboración de propuestas de medida			█	█	█									
Estudio de idoneidad de la señal generada					█	█								
Medidas de aislamiento							█	█						
Informe de aislamiento										█	█			
Redacción de Trabajo Fin de Máster												█	█	█

Figura 1 – Diagrama de Gantt