

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCOLA POLITÈCNICA SUPERIOR DE GANDIA

Grado en Ing. Sist. de Telecom., Sonido e Imagen

---



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCOLA POLITÈCNICA  
SUPERIOR DE GANDIA

# “Diseño, construcción y validación de una fuente sonora para ensayos en fachada con cobertura mejorada”

**TRABAJO FINAL DE GRADO**

Autor/a:

**Ignacio García Marcos**

Tutor/a:

**Jesús Alba Fernández**

**Juan Carlos Rodríguez Vercher**

**GANDIA, 2021**

# Índice

<b>1. Resumen</b>	<b>3</b>
<b>2. Palabras clave</b>	<b>3</b>
<b>3. Abstract</b>	<b>3</b>
<b>4. Keywords</b>	<b>3</b>
<b>5. Introducció</b>	<b>4</b>
<b>6. Normativa a cumplir</b>	<b>4</b>
<b>6.1. ISO16283-3:2016: Aislamiento a ruido de fachada</b>	<b>4</b>
<b>6.1.1. Mediciones en el exterior utilizando un altavoz como fuente sonora (procedimiento por defecto y de baja frecuencia)</b>	<b>5</b>
<b>6.1.2. Requisitos de los altavoces</b>	<b>6</b>
<b>6.1.3. Posiciones del altavoz</b>	<b>6</b>
<b>7. Medición de la fuente para fachada Brüel&amp;Kjaer</b>	<b>7</b>
<b>8. Simulación numérica</b>	<b>16</b>
<b>8.1. Modelo básico de pistón en pantalla infinita</b>	<b>16</b>
<b>8.2. Creación de una malla</b>	<b>17</b>
<b>8.3. Cálculo de la distancia <math>r</math></b>	<b>18</b>
<b>8.4. Cálculo del ángulo <math>\theta</math></b>	<b>20</b>
<b>9. Interfaz Matlab</b>	<b>21</b>
<b>9.1. Funciones</b>	<b>21</b>
<b>9.2. Interfaz gráfica</b>	<b>21</b>
<b>9.3. Resultados</b>	<b>22</b>
<b>10. Construcción del prototipo</b>	<b>25</b>
<b>11. Medición en cámara</b>	<b>28</b>
<b>11.1. Resultados fuente central</b>	<b>29</b>
<b>11.2. Resultados fuente completa</b>	<b>33</b>
<b>11.3. Comparativa</b>	<b>37</b>
<b>12. Conclusiones</b>	<b>42</b>
<b>13. Referencias</b>	<b>43</b>
<b>14. Bibliografía</b>	<b>43</b>

## Agradecimientos

Me gustaría dar las gracias a los tutores Jesús Alba Fernández y Juan Carlos Rodríguez, ya que sin su tiempo y dedicación este proyecto no podría haberse llevado a cabo, a Francisco López Cifuentes por facilitarme siempre el material y las herramientas necesarias y a Carmen Palacios Rubio por su apoyo y ayuda incondicional.

## 1. Resumen

En este TFG se pretende estudiar el comportamiento de las fuentes sonoras directivas utilizadas en mediciones de ruido en fachada con el principal objetivo de obtener una fuente que permita realizar mediciones *in situ* del aislamiento acústico a ruido aéreo en fachadas con una cobertura ampliada, pudiendo incluso modificarla en función del tamaño de cada superficie a medir.

El proyecto parte de la caracterización de una fuente sonora directiva comercial en la cámara anecoica para comprender la naturaleza de estas medidas y verificar el cumplimiento de la norma UNE ISO 16283-3:2016. Tras ello se intentará emular el mismo escenario mediante simulación numérica en Matlab y buscar configuraciones de altavoces que mejoren la cobertura de este tipo de fuentes. Sobre esta base teórica se diseñará y construirá un prototipo al que se le realizarán posteriormente las verificaciones correspondientes en cámara anecoica.

## 2. Palabras clave

Electroacústica, transductor, diseño, caja acústica, aislamiento, ruido, fachada, fuente de ruido, cámara anecoica, Matlab.

## 3. Abstract

This TFG aims to study the behavior of directive sound sources used in noise measurements on fronts with the main objective of obtaining a source that allows in situ measurements of acoustic insulation to airborne noise in facades with an extended coverage, being able to even modify it. depending on the size of each surface to be measured.

The project starts from the characterization of a commercial directive sound source in the anechoic chamber to understand the nature of these measures and verify compliance with the UNE ISO 16283-3:2016 standard. After that, we will try to emulate the same scenario by means of numerical simulation in Matlab and look for speaker configurations that improve the coverage of this type of sources. anechoic.

## 4. Keywords

Electroacoustics, transducer, design, acoustic box, isolation, noise, facade, noise source, anechoic chamber, Matlab.

## 5. Introducción

El trabajo descrito a continuación pretende estudiar la directividad de las fuentes de ruido utilizadas para mediciones del aislamiento acústico en fachadas y tiene como principal objetivo el desarrollo de una fuente con una mayor cobertura que las disponibles actualmente en el mercado. Se caracterizará una fuente comercial en cámara anecoica para posteriormente intentar emularla mediante simulado numérico. Por último, se construirá un prototipo en función de los resultados de la simulación.

## 6. Normativa a cumplir

La normativa actual que regula este tipo de mediciones es la norma ISO16283:2016: *Medición in situ del aislamiento acústico en los edificios y en los elementos de construcción*.

Las Normas ISO 16283 describen los procedimientos a seguir para las mediciones *in situ* del aislamiento acústico en edificaciones y consta de las siguientes partes:

- *Parte 1: Aislamiento a ruido aéreo.*
- *Parte 2: Aislamiento a ruido de impactos.*
- *Parte 3: Aislamiento a ruido de fachada.*

El texto fue elaborado en 2016 por el Comité Técnico ISO/TC 43 *Acústica* en colaboración con el Comité Técnico CEN/TC 126 *Propiedades acústicas de los edificios y sus elementos de construcción* y anula y sustituye a las Normas EN ISO 140-14:2004 y EN ISO 140-5:1998. Estas Normas tenían como finalidad principal la realización de mediciones donde el campo acústico se pudiese considerar difuso y no explicitaban si el operario podía o no estar presente en el recinto durante la medición. La Norma ISO 16283 difiere en que aplica a recintos donde el campo acústico puede o no aproximarse a campo difuso y clasifica el modo en que los operarios pueden medir el campo acústico utilizando un micrófono de mano o un sonómetro.

En este proyecto se profundizará en la parte 3 *Aislamiento a ruido de fachada*.

### 6.1. ISO16283-3:2016: Aislamiento a ruido de fachada

Esta parte de la Norma especifica los procedimientos para determinar el aislamiento acústico al ruido aéreo de los elementos de fachadas (método por elementos) y de fachadas enteras (métodos globales) haciendo uso de mediciones de la presión acústica. Estos procedimientos se aplican a recintos con volúmenes que van desde 10 m<sup>3</sup> hasta 250 m<sup>3</sup> en el rango de frecuencias comprendido entre 50 Hz y 5000 Hz.

Los resultados de estas medidas se pueden utilizar para evaluar el aislamiento acústico al ruido aéreo en recintos amueblados o vacíos donde el campo acústico puede o no aproximarse a un campo difuso.

Los métodos por elementos permiten estimar el índice de reducción acústica de un elemento de fachada determinado. El más preciso es el método con altavoz, en el que utilizando una fuente de ruido artificial se obtiene un índice de reducción acústica aparente comparable en determinadas circunstancias con el índice de reducción acústica medido en laboratorios de conformidad según la Norma ISO 10140.

Otro método por elementos consiste en utilizar el ruido de tráfico rodado como fuente de ruido. Los resultados son ligeramente distintos y es útil para las situaciones en que no es posible utilizar el método con altavoz.

Los métodos globales tienen como objetivo estimar la diferencia de nivel de presión acústica entre el interior y el exterior de edificaciones en condiciones de tráfico reales. Los más precisos se valen de este tráfico como fuente de ruido, pudiéndose utilizar un altavoz si el nivel de ruido fuera insuficiente dentro del recinto.

En el punto 9 de la Norma se pueden encontrar los requisitos a cumplir para emplear el método global de medición en exterior utilizando un altavoz como fuente sonora.

### 6.1.1. Mediciones en el exterior utilizando un altavoz como fuente sonora (procedimiento por defecto y de baja frecuencia)

El altavoz se coloca en una o más posiciones fuera del edificio a una distancia  $D$  de la fachada, con un ángulo de incidencia del sonido de  $45^\circ \pm 5^\circ$ .

El nivel de presión acústica medio se determina a 2 metros de la fachada, así como en el recinto receptor para poder calcular el índice de reducción acústica aparente o la diferencia de nivel.

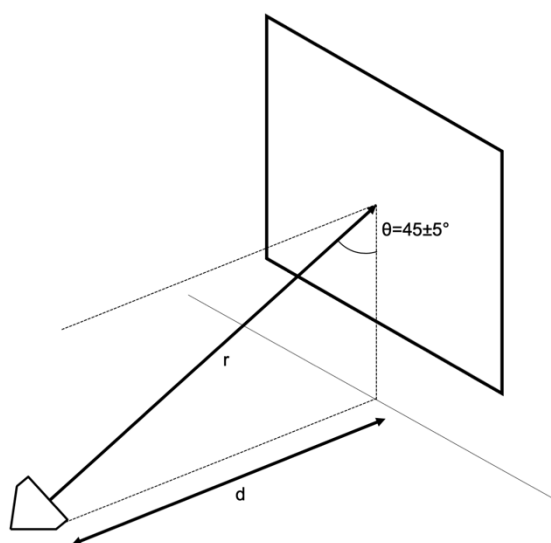


Ilustración 1: Situación de la fuente frente a la fachada

### **6.1.2. Requisitos de los altavoces**

ISO 16283-3:2016 establece que la directividad del altavoz en campo libre debe ser tal, que las diferencias locales en el nivel de presión acústica de cada banda de frecuencia de interés sean menores de 5 dB, medidas sobre una superficie imaginaria con el mismo tamaño y orientación que la fachada. Para superficies mayores de 5 metros se pueden aceptar diferencias de hasta 10 dB.

El altavoz debe ser capaz de mantener un campo acústico estable y con un espectro continuo en el rango de frecuencias de interés para el ensayo. El nivel de potencia acústica en todas las bandas de frecuencia de la fuente ha de ser lo suficientemente elevado para obtener un nivel de presión acústica en el recinto receptor que supere al menos en 6 dB al ruido de fondo.

### **6.1.3. Posiciones del altavoz**

Se escoge la posición del altavoz y la distancia,  $D$ , hasta la fachada, de manera que la variación del nivel de presión acústica sobre la muestra de ensayo sea mínima. Para ello, se debería colocar el altavoz preferiblemente sobre el suelo, o lo más alto del suelo como sea posible en la práctica. La distancia,  $r$ , desde el altavoz hasta el centro de la muestra de ensayo, debe ser de al menos 5 m ( $D > 3,5$  m) para el método por elementos con altavoz, y de al menos 7 m ( $D > 5$  m) para el método global con altavoz. El ángulo de la incidencia sonora debe ser de  $45^\circ \pm 5^\circ$  (véase la ilustración 1).

## 7. Medición de la fuente para fachada Brüel&Kjaer

A modo de introducción práctica y como ejercicio para comprender el funcionamiento de las fuentes de ruido para fachada y su caracterización, se procede a medir en la cámara anecoica un modelo comercial como es la propia de Brüel&Kjaer®. Se trata de un altavoz coaxial de 12" con un motor de compresión de 2" con imán de neodimio y en sus especificaciones asegura que cumple la norma UNE-EN 140-5 (anterior a ISO 16283:2016) para mediciones en fachadas de 4x3m.



*Ilustración 2: Fuente sonora direccional Brüel&Kjaer.*

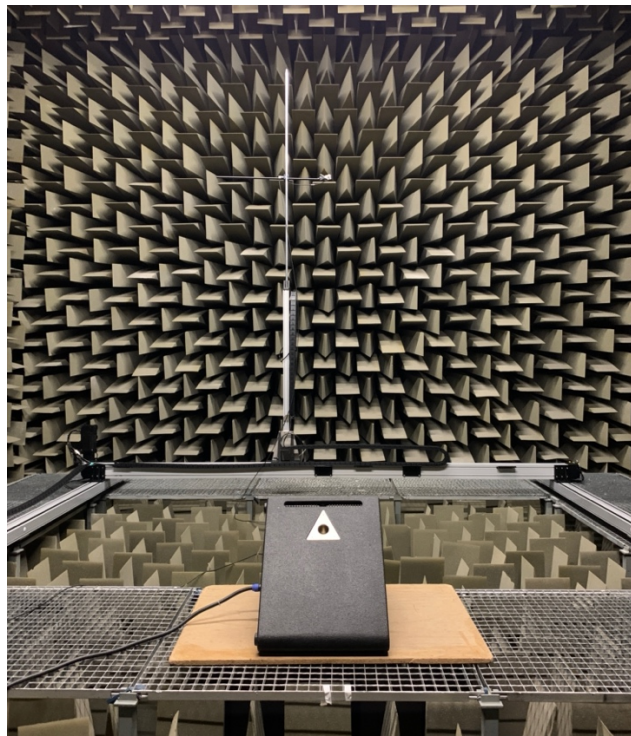
La instrumentación utilizada en el ensayo es la siguiente:

- Sonómetro Brüel&Kjaer®.2270.
- Micrófono Brüel&Kjaer® 4189.
- Etapa de potencia Brüel&Kjaer® 2716.
- Calibrador Brüel&Kjaer® 4231.

Las medidas se realizan en la cámara anecoica del Campus de Gandía, la cuál dispone de un sistema robotizado de 3 ejes desarrollado en la propia UPV que permite situar el micrófono de medición en las coordenadas precisas sin necesidad de que un técnico acceda a la cámara. Estos procedimientos de medida son muy repetitivos y con este robot se automatizan casi en su totalidad.

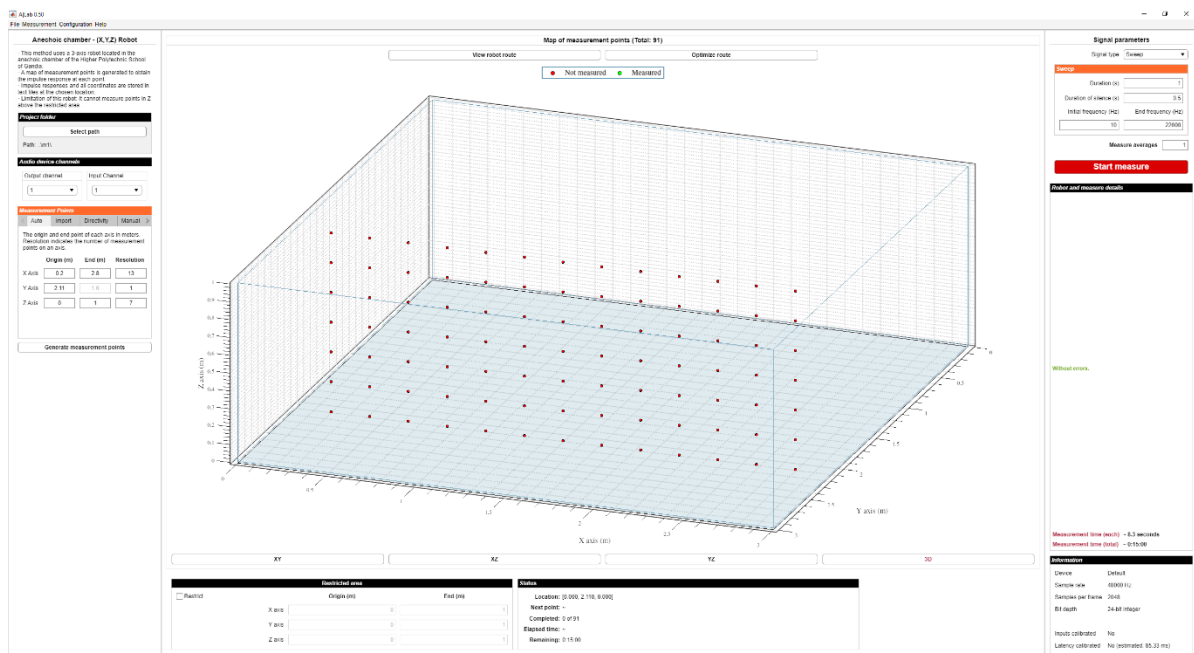


El robot es controlado desde la aplicación propia *ALab* creada en Matlab. Esta aplicación permite introducir la situación de los puntos de medida, los parámetros de la medición e incluso almacena y procesa los resultados.



*Ilustración 3: Medida robotizada en cámara anecoica*

Debido a las dimensiones interiores de la cámara no es posible medir una fachada del tamaño establecido en ISO 16283:2016, por lo que se mide una superficie de 2.6mx1.4m que será después ajustada para coincidir con las medidas estándar. Se introduce esta malla en la aplicación *ALab* con una distancia entre puntos de 20cm.



*Ilustración 4: Aplicación de control y medida ALab 0.50.*

Es posible visualizar la ruta que seguirá el robot para poder identificar y organizar así las muestras obtenidas posteriormente:

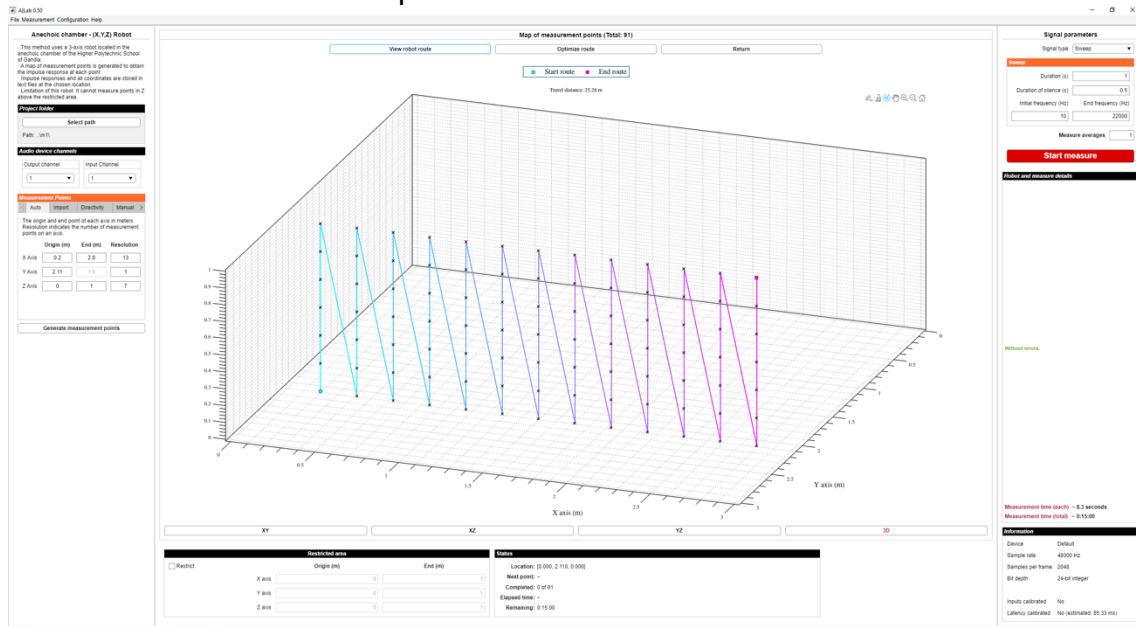


Ilustración 5: Ruta del robot en ALab 0.50.

Tras la configuración inicial, se realiza la medición obteniendo el nivel de presión sonora en los 91 puntos indicados. Estas medidas se adaptan con la ayuda de una hoja de cálculo preparada para corregir la distancia y ajustar a una fachada de 4x3m. Estos son los resultados detallados para cada banda de frecuencia:

100 Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	58.9	59.3	59.5	59.3	59.4	59.1	59.7	59.0	59.3
-1.0m	59.0	59.0	59.4	58.9	59.3	59.0	59.0	59.4	58.9
-0.5m	59.1	58.7	58.8	59.1	59.3	58.9	58.9	58.9	59.3
0m	58.9	58.8	59.0	59.2	58.9	58.8	58.8	59.1	59.1
0.5m	58.8	59.1	58.7	58.5	58.8	58.9	58.6	59.0	59.1
1m	58.3	58.6	58.7	58.6	58.7	58.4	58.7	58.5	58.7
1.5m	57.9	58.3	57.8	57.9	58.2	58.1	58.2	58.4	57.8

Tabla 1: Niveles de presión sonora medidos a 100Hz.

125 Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	60.4	60.9	60.8	60.8	61.2	60.7	61.1	60.7	60.2
-1.0m	59.7	60.2	60.2	60.4	60.7	60.7	60.0	60.1	60.0
-0.5m	59.3	59.2	59.7	60.1	60.1	59.7	59.9	60.0	59.7
0m	59.2	59.2	59.4	59.5	59.9	59.2	59.5	59.5	59.5
0.5m	59.2	59.4	59.6	59.3	59.3	59.3	59.3	59.6	59.4
1m	59.5	59.0	59.1	59.2	59.1	59.2	59.1	58.9	59.0
1.5m	59.4	59.3	58.6	59.0	58.9	58.9	59.1	59.1	59.1

Tabla 2: Niveles de presión sonora medidos a 125Hz.

160 Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	62.4	62.9	63.2	63.1	63.1	63.2	63.0	62.7	62.7
-1.0m	62.5	62.6	63.1	62.9	62.8	62.6	62.5	62.3	62.2
-0.5m	61.9	61.9	62.3	62.2	62.5	62.3	62.3	62.2	61.7
0m	61.4	61.7	62.0	62.0	62.0	62.0	61.9	61.4	61.3
0.5m	60.8	61.2	61.4	61.5	61.5	61.3	61.6	61.4	60.9
1m	60.8	60.9	60.9	61.3	61.2	61.1	61.3	60.9	60.5
1.5m	60.4	60.4	60.5	60.8	60.5	61.1	60.6	60.4	60.4

Tabla 3: Niveles de presión sonora medidos a 160Hz.

200 Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	63.3	63.8	63.9	63.6	63.9	64.2	63.9	63.4	63.4
-1.0m	62.8	63.1	63.5	63.3	63.5	63.4	63.5	63.3	62.8
-0.5m	62.5	63.0	63.4	63.3	63.5	63.1	63.2	63.0	62.5
0m	62.1	62.4	62.7	62.7	62.9	62.8	62.5	62.4	62.2
0.5m	61.6	61.9	62.1	62.5	62.3	62.5	62.2	62.1	61.8
1m	61.4	61.5	61.8	61.7	62.1	62.0	62.0	61.3	61.4
1.5m	61.0	61.3	61.6	62.1	61.8	61.7	61.3	61.6	60.9

Tabla 4: Niveles de presión sonora medidos a 200Hz.

250 Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	64.1	64.5	64.4	64.9	64.8	64.7	64.7	64.3	63.8
-1.0m	63.6	63.9	63.9	64.2	64.2	64.1	64.0	63.6	63.3
-0.5m	63.3	63.4	63.5	63.7	63.7	63.6	63.3	63.1	63.0
0m	62.7	63.0	63.1	63.5	63.2	63.0	62.8	62.7	62.6
0.5m	62.3	62.3	62.7	62.7	62.7	62.3	62.4	62.3	62.2
1m	61.8	62.1	61.8	62.2	62.1	62.2	61.7	61.7	61.6
1.5m	61.3	61.4	61.5	61.4	61.5	61.3	61.3	61.1	61.1

Tabla 5: Niveles de presión sonora medidos a 250Hz.

315Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	65.7	65.9	65.8	65.6	65.9	65.8	65.8	65.7	65.2
-1.0m	65.1	65.2	65.4	65.4	65.4	65.3	65.2	65.2	64.8
-0.5m	64.5	64.7	65.0	64.9	65.1	65.0	64.9	64.6	64.6
0m	64.1	64.4	64.7	64.9	64.5	64.5	64.2	64.2	64.1
0.5m	63.8	64.0	64.1	64.3	64.1	63.7	63.9	63.6	63.5
1m	63.4	63.3	63.4	63.4	63.7	63.5	63.3	63.0	63.0
1.5m	63.0	63.1	63.0	63.2	63.0	63.1	62.9	63.0	62.7

Tabla 6: Niveles de presión sonora medidos a 315Hz.

400 Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	69.0	69.3	69.6	69.9	70.0	69.6	69.4	69.0	68.4
-1.0m	68.4	68.8	68.9	69.5	69.4	69.2	68.8	68.5	68.2
-0.5m	68.1	68.2	68.7	69.1	69.1	68.9	68.5	68.3	67.8
0m	67.8	68.0	68.2	68.5	68.6	68.5	68.1	68.0	67.7
0.5m	67.5	67.9	68.0	68.2	68.4	68.3	67.8	67.5	67.1
1m	67.2	67.2	67.6	67.7	67.8	67.8	67.5	67.3	66.8
1.5m	66.8	66.8	66.9	67.3	67.3	67.1	67.2	66.8	66.7

Tabla 7: Niveles de presión sonora medidos a 400Hz.

500 Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	69.2	69.8	70.1	70.3	70.1	69.9	69.8	69.5	69.0
-1.0m	68.9	69.3	69.4	69.7	69.6	69.6	69.4	68.9	68.7
-0.5m	68.5	68.9	68.9	69.0	69.0	69.1	69.1	68.6	68.4
0m	68.1	68.4	68.6	68.5	68.5	68.6	68.5	68.3	68.0
0.5m	67.6	67.8	68.0	68.1	67.9	68.2	67.9	67.7	67.6
1m	67.1	67.4	67.5	67.6	67.6	67.5	67.4	67.2	67.0
1.5m	66.7	67.1	67.1	66.9	67.0	67.1	67.0	66.7	66.6

Tabla 8: Niveles de presión sonora medidos a 500Hz.

630 Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	68.1	68.9	69.2	69.7	69.7	69.7	69.5	68.9	68.4
-1.0m	68.2	68.5	69.0	69.5	69.6	69.5	69.2	68.5	68.1
-0.5m	68.1	68.4	68.9	69.3	69.4	69.0	68.9	68.3	67.9
0m	67.9	68.3	68.8	69.0	69.2	68.8	68.5	68.1	67.7
0.5m	67.6	67.9	68.6	68.6	68.8	68.6	68.4	67.8	67.6
1m	67.5	67.9	68.2	68.5	68.7	68.3	68.1	67.6	67.4
1.5m	67.1	67.6	67.8	68.0	68.2	68.1	67.7	67.2	67.0

Tabla 9: Niveles de presión sonora medidos a 630Hz.

800Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	67.0	67.7	68.3	68.6	68.8	68.7	68.6	67.8	67.1
-1.0m	67.5	68.0	68.7	68.9	69.1	69.0	68.5	68.2	67.3
-0.5m	67.5	68.0	68.6	68.9	68.9	68.8	68.6	68.2	67.6
0m	67.4	67.9	68.1	68.7	68.5	68.5	68.3	68.1	67.4
0.5m	67.2	67.6	68.0	68.1	68.2	68.1	68.0	67.8	67.3
1m	66.8	67.3	67.4	67.8	67.7	67.6	67.6	67.2	66.9
1.5m	66.5	66.9	67.1	67.3	67.3	67.4	67.1	66.8	66.4

Tabla 10: Niveles de presión sonora medidos a 800Hz.

1000 Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	69.2	69.8	70.1	70.3	70.1	69.9	69.8	69.5	69.0
-1.0m	68.9	69.3	69.4	69.7	69.6	69.6	69.4	68.9	68.7
-0.5m	68.5	68.9	68.9	69.0	69.0	69.1	69.1	68.6	68.4
0m	68.1	68.4	68.6	68.5	68.5	68.6	68.5	68.3	68.0
0.5m	67.6	67.8	68.0	68.1	67.9	68.2	67.9	67.7	67.6
1m	67.1	67.4	67.5	67.6	67.6	67.5	67.4	67.2	67.0
1.5m	66.7	67.1	67.1	66.9	67.0	67.1	67.0	66.7	66.6

Tabla 11: Niveles de presión sonora medidos a 1000Hz.

1250 Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	64.7	65.4	65.8	66.2	66.0	65.8	65.4	64.8	64.2
-1.0m	64.6	65.1	65.4	65.5	65.4	65.2	65.0	64.6	64.1
-0.5m	64.6	64.8	65.2	65.2	65.2	65.0	64.7	64.1	63.9
0m	64.2	64.5	65.0	64.9	64.8	64.6	64.3	63.7	63.4
0.5m	63.6	64.0	64.4	64.4	64.3	64.2	63.8	63.3	63.0
1m	63.4	63.7	63.8	64.0	64.1	63.7	63.5	63.2	62.7
1.5m	63.1	63.3	63.4	63.5	63.6	63.3	63.0	62.9	62.3

Tabla 12: Niveles de presión sonora medidos a 1250Hz.

1600 Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	69.8	70.7	71.3	71.7	71.8	71.6	71.3	70.5	69.6
-1.0m	70.3	71.2	72.1	72.3	72.2	71.8	71.1	70.5	69.4
-0.5m	70.1	70.9	71.7	72.2	72.2	71.8	71.1	70.3	69.5
0m	70.1	70.9	71.3	71.9	71.8	71.6	71.1	70.4	69.4
0.5m	70.1	70.7	71.1	71.4	71.4	71.2	70.9	70.2	69.4
1m	69.8	70.4	70.8	71.0	70.8	70.6	70.3	69.7	69.0
1.5m	69.3	69.9	70.3	70.3	70.4	70.2	69.8	69.4	68.6

Tabla 13: Niveles de presión sonora medidos a 1600Hz.

2000 Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	68.2	68.6	69.0	69.2	69.3	69.0	68.5	67.8	67.2
-1.0m	67.9	68.2	68.4	68.8	69.1	69.1	68.6	67.9	67.0
-0.5m	67.8	68.1	68.3	68.4	68.6	68.8	68.4	67.7	67.0
0m	67.5	67.9	68.1	68.2	68.3	68.3	67.9	67.4	67.0
0.5m	66.9	67.4	67.8	68.0	68.0	67.8	67.5	67.0	66.5
1m	66.6	67.0	67.2	67.4	67.5	67.4	67.0	66.6	66.2
1.5m	66.1	66.5	66.9	66.9	66.9	66.8	66.6	66.4	65.8

Tabla 14: Niveles de presión sonora medidos a 2000Hz.

2500 Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	63.5	64.4	65.3	65.9	66.1	65.9	65.3	64.3	63.3
-1.0m	63.9	65.1	66.0	66.2	66.2	66.1	65.8	65.0	63.9
-0.5m	64.0	65.3	66.4	66.8	66.7	66.1	65.8	65.0	64.0
0m	64.1	65.1	66.2	66.7	66.8	66.3	65.7	64.8	64.0
0.5m	64.1	65.2	65.9	66.4	66.4	66.4	65.7	64.8	63.7
1m	63.8	64.8	65.5	65.8	66.2	65.9	65.4	64.5	63.6
1.5m	63.5	64.3	65.0	65.5	65.7	65.5	64.8	64.1	62.9

Tabla 15: Niveles de presión sonora medidos a 2500Hz.

3150 Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	62.7	63.4	64.0	64.3	64.6	64.0	63.1	62.5	62.0
-1.0m	62.8	63.2	63.3	63.5	63.6	63.5	63.2	62.6	62.0
-0.5m	62.8	63.4	63.1	62.6	62.8	63.2	63.2	62.9	62.4
0m	62.9	62.9	62.6	62.3	62.3	62.5	62.8	63.1	62.9
0.5m	62.4	62.1	61.7	61.7	61.8	61.8	62.0	62.5	62.8
1m	61.9	61.5	61.3	61.4	61.6	61.7	61.9	62.3	62.6
1.5m	61.2	60.7	60.9	61.2	61.1	61.0	61.2	61.6	62.0

Tabla 16: Niveles de presión sonora medidos a 3150Hz.

4000 Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	65.7	66.0	65.2	65.1	65.5	64.8	64.7	65.1	64.2
-1.0m	64.8	64.7	64.5	64.2	63.7	63.6	63.4	63.2	63.4
-0.5m	64.2	64.4	64.0	63.7	64.1	63.5	62.7	62.7	62.5
0m	63.8	63.6	63.7	64.2	64.3	63.3	62.5	62.1	61.7
0.5m	63.2	63.0	63.3	64.2	64.2	63.0	62.0	61.6	61.3
1m	62.5	62.2	62.9	63.6	63.5	62.5	61.7	61.2	60.9
1.5m	61.9	61.6	62.3	62.8	62.5	61.8	61.1	60.6	60.4

Tabla 17: Niveles de presión sonora medidos a 4000Hz.

5000 Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	64.4	64.8	65.4	65.7	65.9	65.9	66.4	65.3	65.1
-1.0m	64.3	64.6	65.0	65.2	65.4	65.5	65.3	65.5	64.9
-0.5m	63.9	64.0	64.5	64.5	64.5	64.8	65.0	65.0	64.3
0m	63.6	63.8	64.0	63.8	63.9	64.0	64.3	64.2	63.8
0.5m	63.4	63.7	63.5	63.4	63.5	63.6	63.7	63.6	63.3
1m	63.3	63.4	63.1	63.0	63.1	63.1	63.1	63.0	62.9
1.5m	63.0	63.0	62.8	62.6	62.7	62.7	62.6	62.7	62.5

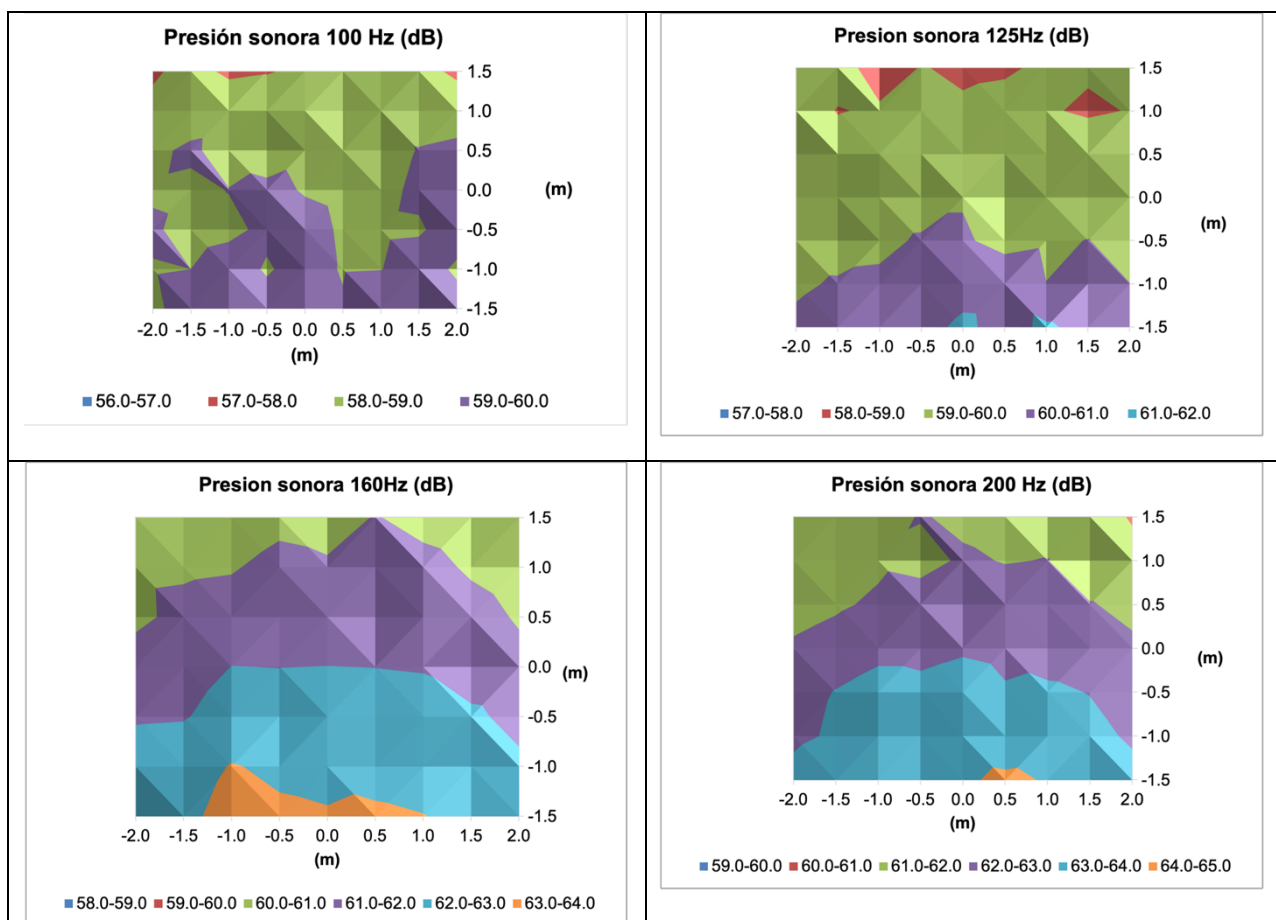
Tabla 18: Niveles de presión sonora medidos a 5000Hz.

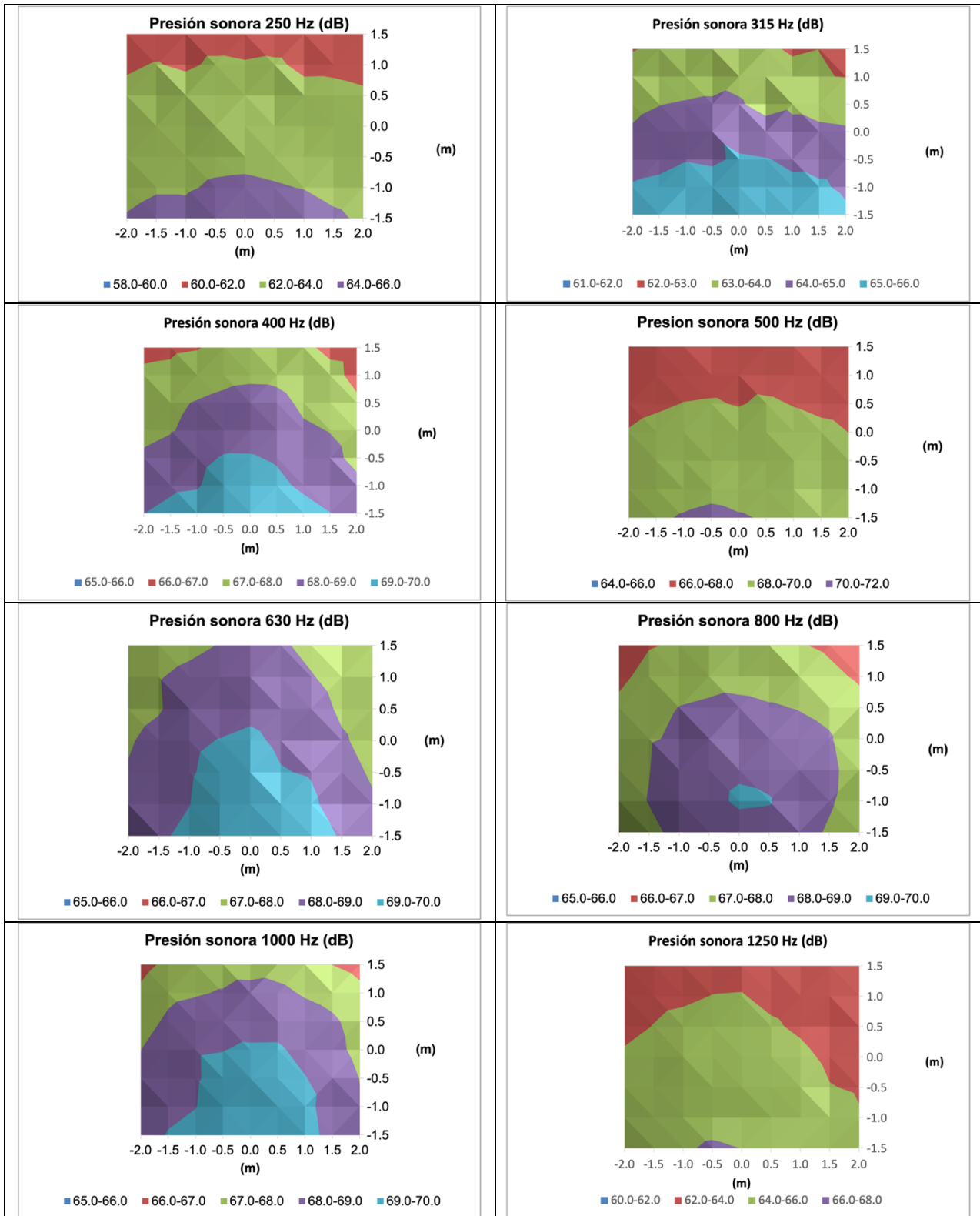
Ya es posible comprobar que la fuente cumple la norma ISO 16283-3:2016 al ser la diferencia de nivel dentro de cada banda de frecuencia menor de 5dB. En la banda de 4kHz la diferencia es de 5.6dB pero se entiende que está en un margen asumible:

Freq. (Hz)	MAXIMO	MINIMO	DIFERENCIA
100	59.7	57.8	1.9
125	61.2	58.6	2.5
160	63.2	60.4	2.8
200	64.2	60.9	3.3
250	64.9	61.1	3.8
315	65.9	62.7	3.2
400	70.0	66.7	3.2
500	70.3	66.6	3.6
630	69.7	67.0	2.7
800	69.1	66.4	2.7
1000	69.7	66.7	3.0
1250	66.2	62.3	3.8
1600	72.3	68.6	3.7
2000	69.3	65.8	3.5
2500	66.8	62.9	3.8
3150	64.6	60.7	3.9
4000	66.0	60.4	5.6
5000	66.4	62.5	3.9

Tabla 19: Máximas diferencias de nivel de presión sonora para cada banda de frecuencias.

Es interesante representar las medidas de forma gráfica para entender la proyección sonora según la frecuencia:





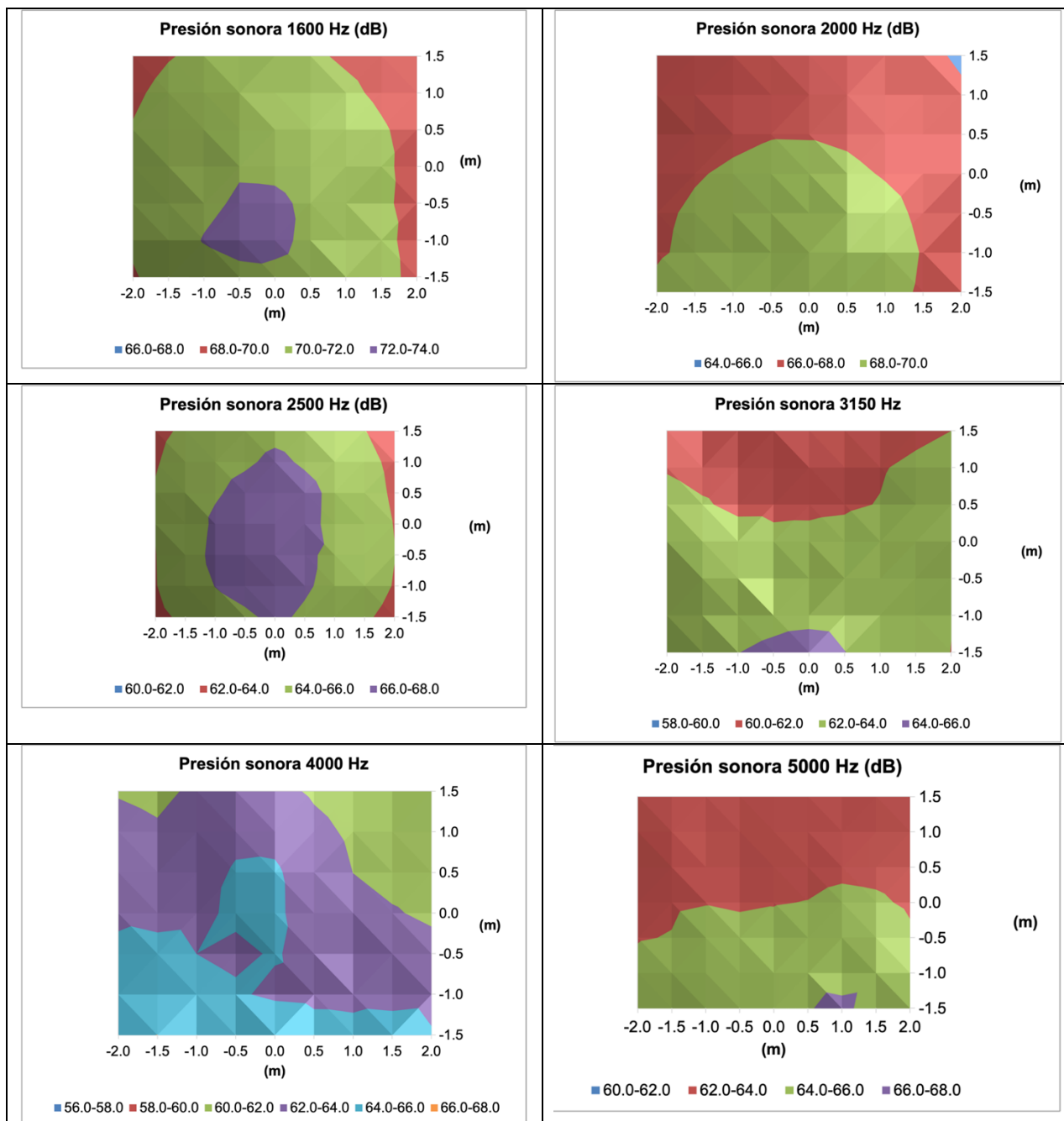


Tabla 20: Resumen de medidas de niveles de presión según la frecuencia.

La directividad de la fuente aumenta con la frecuencia y es en las bandas superiores donde se compromete el requisito de diferencia de nivel. Si la fachada fuera de mayor tamaño esta fuente no cumpliría con la norma.



## 8. Simulación numérica

Se buscará un modelo teórico que simule el escenario de fuente direccional unidireccional frente a una fachada. Se desea estimar si una fuente con varios altavoces tendría una radiación más homogénea en toda la superficie de la fachada.

### 8.1. Modelo básico de pistón en pantalla infinita

Se va a tratar la fuente como un pistón montado en pantalla infinita<sup>[1][2]</sup>. Para estudiar la directividad de este modelo se asumen dos aproximaciones; la superficie del altavoz es rígida con todos sus puntos en igual estado de vibración y las desviaciones de la superficie plana del pistón deben ser menores de  $\lambda/10$ . Este modelo se basa en la superposición de fuentes puntuales radiando a un semiespacio y sabemos que la directividad es dependiente de la frecuencia y del diámetro del pistón:

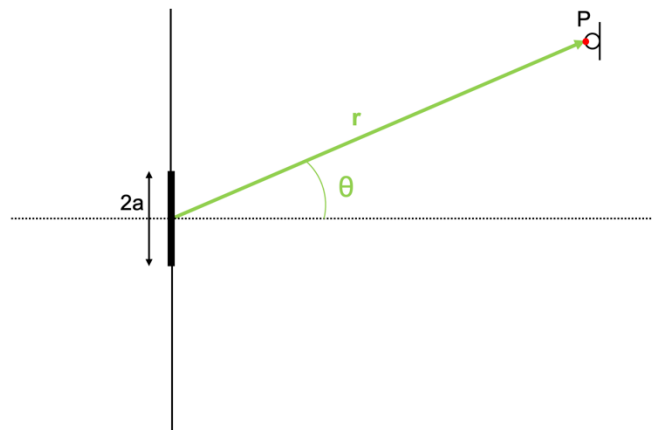


Ilustración 6: Esquemático del modelo de pistón montado en pantalla infinita.

$$P(r, t) = j \frac{U_o \max ck \rho_o}{2\pi r} e^{j(\omega - kr)} \frac{2J_1(ka \text{ sen}(\theta))}{ka \text{ sen}(\theta)}$$

Donde  $J_1$  es la función de Bessel de orden 1. De la expresión anterior se puede extraer la directividad de una fuente puntual:

$$D(\theta) = \left| \frac{2J_1(ka \text{ sen}(\theta))}{ka \text{ sen}(\theta)} \right|^2$$

$$Q_{\max} = \frac{2}{\int_0^\pi D(\theta) \text{ sen}(\theta) d\theta} = \frac{2}{\int_0^\pi \left| \frac{2J_1(ka \text{ sen}(\theta))}{ka \text{ sen}(\theta)} \right|^2 \text{ sen}(\theta) d\theta} = \frac{(ka)^2}{1 - \frac{2J_1(2ka)}{2ka}}$$

$$DI_{\max} = 10 \cdot \log Q_{\max}$$

$$DI(\theta) = DI_{\max} + D_{dB}(\theta)$$

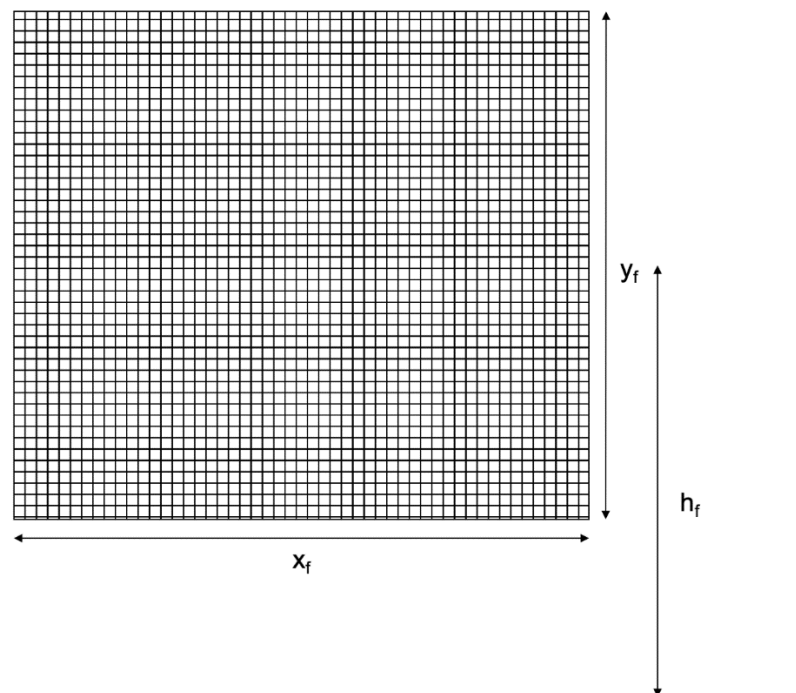
$$D_{dB}(\theta) = 10 \cdot \log \left| \frac{2J_1(ka \cdot \sin(\theta))}{ka \cdot \sin(\theta)} \right|^2$$

A partir de estos parámetros se puede calcular el nivel de presión sonora LP que produciría un pistón montado en pantalla infinita en función de la frecuencia, distancia y ángulo de incidencia:

$$LP(f, \theta, r) \equiv LI(f, \theta, r) = LW(f) - 11 - 20 \log r + DI(f, \theta)$$

## 8.2. Creación de una malla

Con el fin de almacenar los valores calculados de presión acústica se genera una malla de un tamaño determinado:



*Ilustración 7: Malla que emula la fachada que se desea medir.*

Esta malla en Matlab consiste en una matriz creada a partir de los vectores  $x_f$  e  $y_f$ , columna y fila respectivamente. La distancia entre puntos de medida  $\Delta x_f$  y  $\Delta y_f$  pueden variarse para modificar la cantidad de muestras y la precisión final del cálculo. También se tiene en cuenta la distancia desde el suelo hasta el punto medio de la fachada  $h_f$ , variable que nos permitirá simular fachadas de pisos a distintas alturas.

### 8.3. Cálculo de la distancia $r$

El siguiente paso es calcular la distancia desde el centro del altavoz hasta cada punto de medida, que variará en función de la ubicación de éste en la malla.

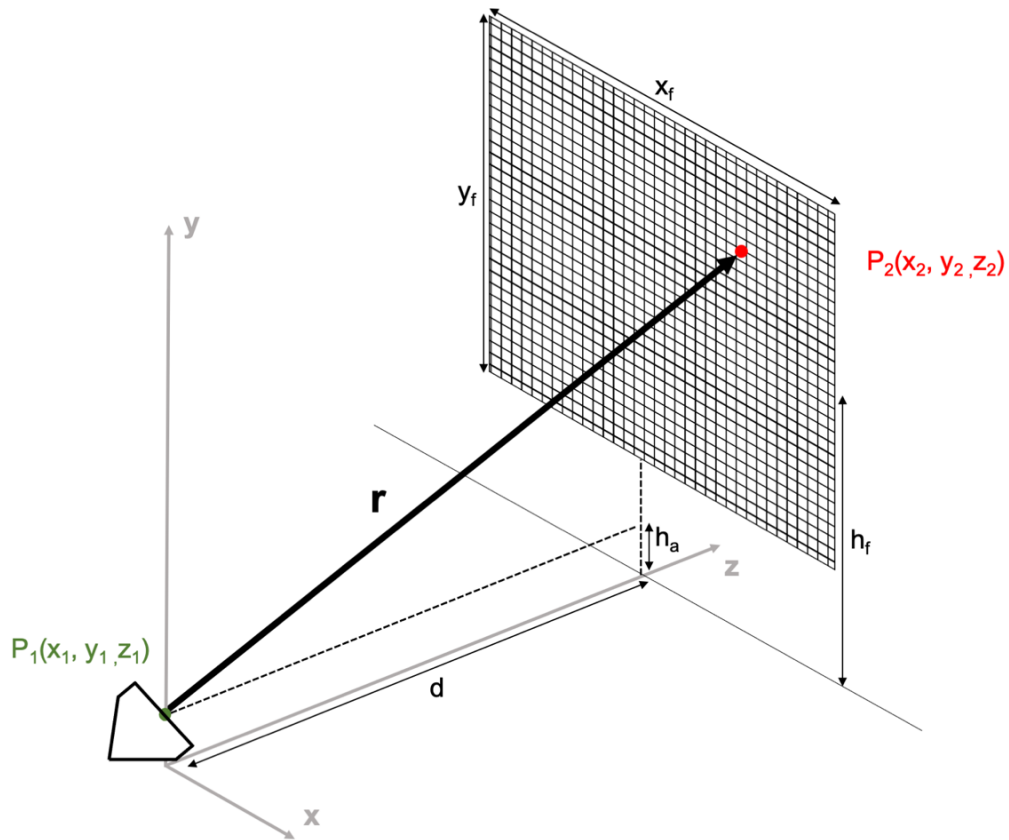


Ilustración 8: Distancia del centro del altavoz al punto de medida correspondiente al vector  $r$ .

Esta distancia puede ser calculada como el módulo del vector  $\vec{r}$ , resta de los vectores que van desde el origen de coordenadas al punto central del altavoz y al punto de medida.

$$\vec{r} = \overrightarrow{OP_2} - \overrightarrow{OP_1} = (r_x, r_y, r_z)$$

$$\vec{r} = (x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1)$$

$$|\vec{r}| = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$$

Para este caso en particular, se tomará como origen de coordenadas del eje Z el punto central del altavoz, por lo que:

$$r_z = z_2 - z_1 = d$$

La componente vertical depende de la altura a la que se encuentra el centro del altavoz  $h_a$ , la altura del centro de la fachada  $h$  y la ubicación del punto de medida dentro de la fachada:

$$y_2 = h_f + n \cdot \Delta y_f$$

$$y_1 = h_a$$

$$r_y = y_2 - y_1 = h_f + n \cdot \Delta y_f - h_a$$

Por último, la componente horizontal depende del desplazamiento lateral del altavoz  $x_1$  respecto al eje y de la ubicación del punto de medida en la malla:

$$r_x = x_2 - x_1 = n \cdot \Delta x_f - x_1$$

Por lo tanto:

$$\vec{r} = ((n \cdot \Delta x_f - x_1), (h_f + n \cdot \Delta y_f - h_a), d)$$

$$|\vec{r}| = \sqrt{(n \cdot \Delta x_f - x_1)^2 + (h_f + n \cdot \Delta y_f - h_a)^2 + d^2}$$

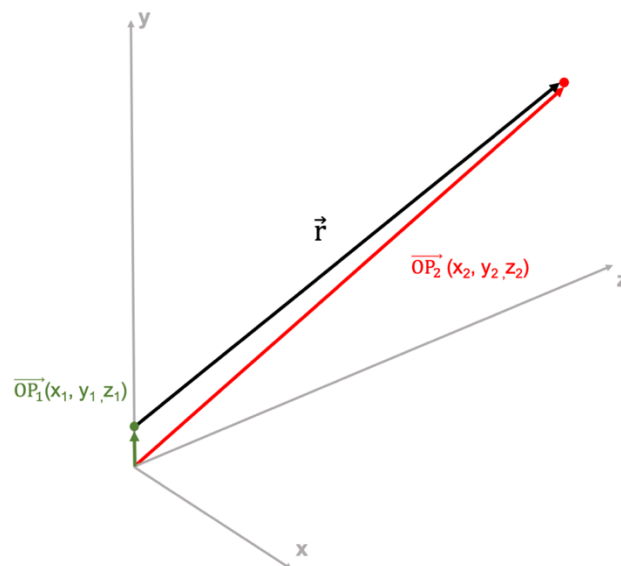


Ilustración 9: Vector  $r$  como resta de los vectores de origen a cada punto.

## 8.4. Cálculo del ángulo $\theta$

Para cada punto de la malla el ángulo de incidencia sonora es diferente, por lo que debe ser calculado por separado.

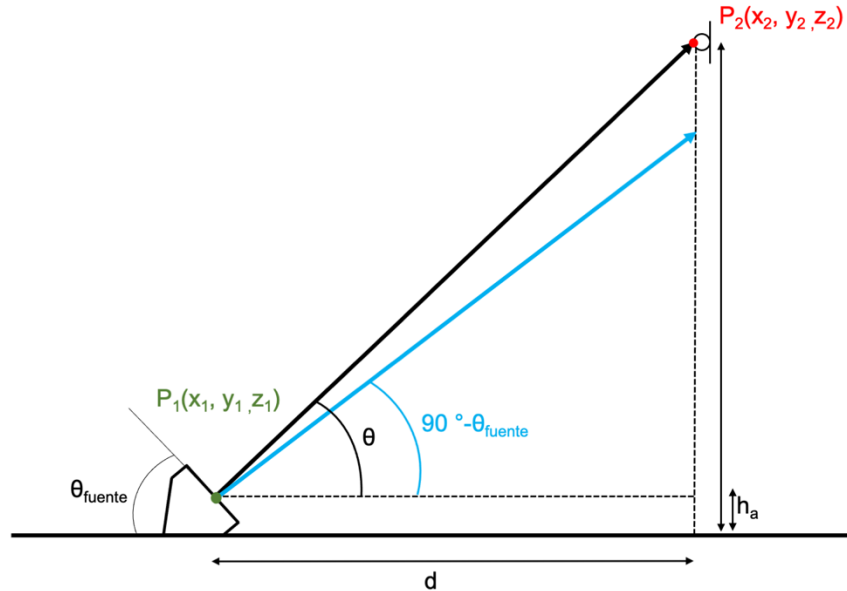


Ilustración 10: Ángulo  $\theta$ .

Se obtiene el vector de dirección de la fuente ( $\theta=0$ ):

$$\overrightarrow{r_{fuente}} = (x_2 - x_1, (z_2 - z_1) \cdot \tan(90^\circ - \theta_{fuente}) - y_1, z_2 - z_1)$$

$$\overrightarrow{r_{fuente}} = (x_2 - n \cdot \Delta x_f, d \cdot \tan(90^\circ - \theta_{fuente}) - h_a, d)$$

$$|\overrightarrow{r_{fuente}}| = \sqrt{((x_2 - n \cdot \Delta x_f)^2 + (d \cdot \tan(90^\circ - \theta_{fuente}) - h_a)^2 + d^2)}$$

El producto escalar de este vector y el vector  $\vec{r}$  implica al ángulo  $\theta$

$$\overrightarrow{r_{fuente}} \cdot \vec{r} = |\overrightarrow{r_{fuente}}| |\vec{r}| \cos\theta$$

$$\cos\theta = \frac{\overrightarrow{r_{fuente}} \cdot \vec{r}}{|\overrightarrow{r_{fuente}}| |\vec{r}|}$$

De donde podemos extraer:

$$\theta = \arccos\left(\frac{\overrightarrow{r_{fuente}} \cdot \vec{r}}{|\overrightarrow{r_{fuente}}| |\vec{r}|}\right)$$

## 9. Interfaz Matlab

Se ha decidido crear una interfaz gráfica en Matlab que permita al usuario introducir las distintas variables implicadas en la simulación y visualizar de una forma sencilla los resultados.

### 9.1. Funciones

Estas son las principales funciones del simulador:

- **Malla:** creación de una matriz con las coordenadas de los puntos a simular en la fachada y cálculo de la distancia  $r$  y el ángulo  $\theta$ .
- **Directividad:** cálculo del factor de directividad en función de la frecuencia y del ángulo  $\theta$  calculado en la función Malla.
- **Main:** función que recibe variables de entrada como el tamaño de la fachada, la distancia de la fuente a la fachada, el radio del altavoz, su altura e inclinación respecto al suelo y la frecuencia que se desea calcular. Esta función incluye las anteriores y devuelve una matriz con todos los valores de presión sonora calculados.
- **Funciones auxiliares:** se utilizan distintas funciones menores como por ejemplo la suma de nivel de presión en el caso de que existan varias fuentes o una función para corregir la distancia a la fachada dependiente de la inclinación de fuentes satélites.

### 9.2. Interfaz gráfica

Como se ha mencionado anteriormente se pretende simular una fuente con varios altavoces por lo que en la interfaz gráfica se han incluido un altavoz principal y otros cuatro adicionales, pudiendo alternar entre el resultado de la simulación de un único altavoz y de la suma total de ellos:

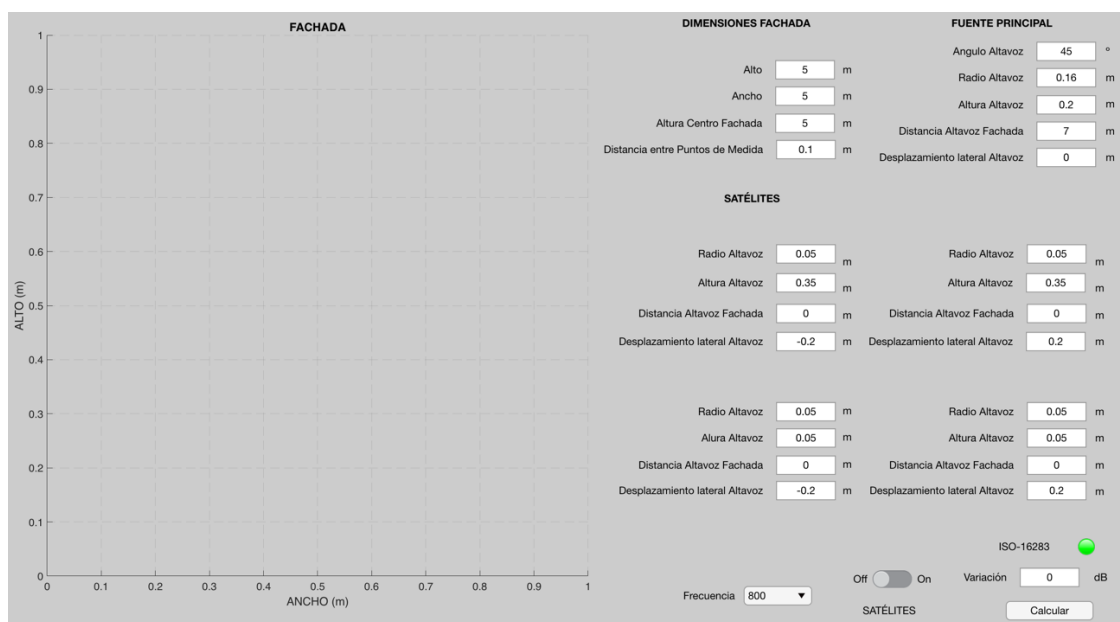


Ilustración 11: Interfaz gráfica para la simulación de fuentes para fachada.

### 9.3. Resultados

Se simulan distintas configuraciones y en todas ellas aparecen mejoras al incluir en el cálculo las fuentes satélites. Se ha valorado que podría ser viable una fuente con un altavoz de mayor tamaño como un 12" para poder tener un nivel de presión sonora suficiente en baja frecuencia y unos altavoces de menor tamaño (3-4") para crear la suma interferente buscada sin comprometer el tamaño final de la caja. Si se introducen los datos correspondientes a un diseño de estas características se pueden contrastar con el funcionamiento de un único driver:

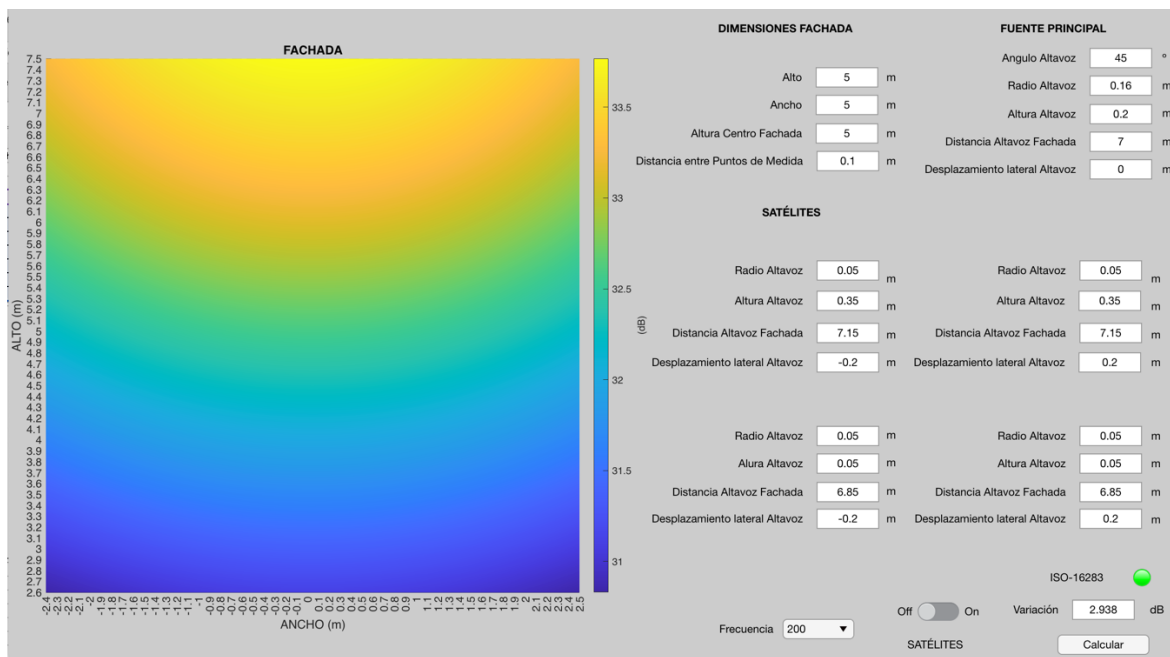


Ilustración 12: Una única fuente radiando 200Hz.

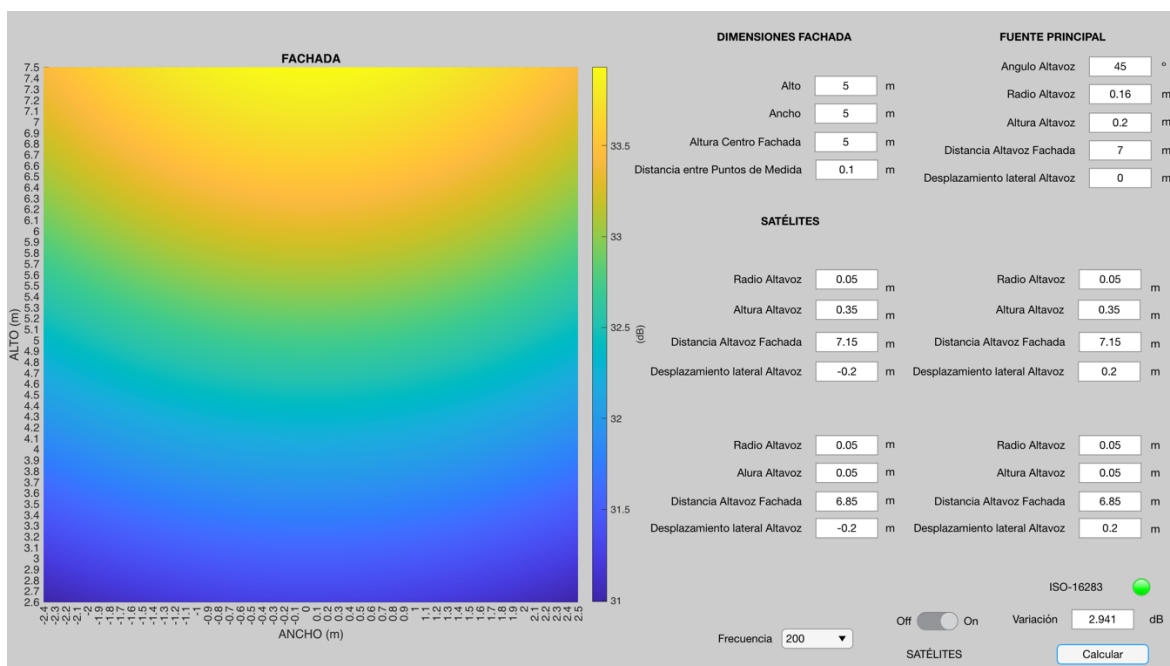


Ilustración 13: 5 fuentes radiando simultáneamente 200Hz.

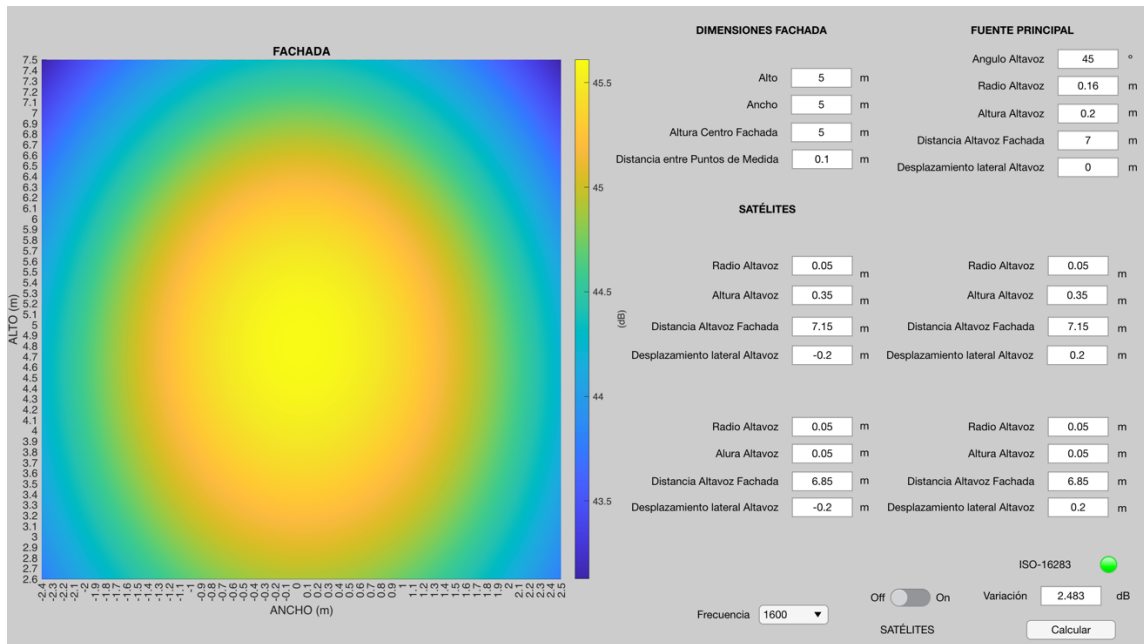


Ilustración 14: Una única fuente radiando 1.6kHz.

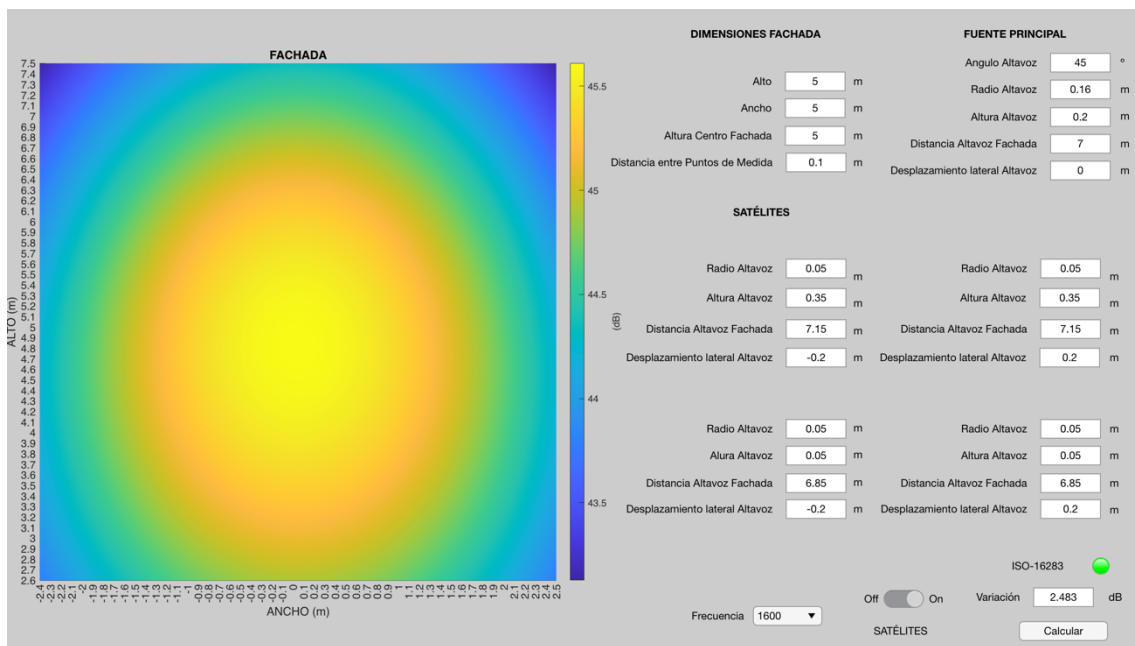


Ilustración 15: 5 fuentes radiando simultáneamente 1.6kHz.

En frecuencias bajas y medias no hay diferencias reseñables.



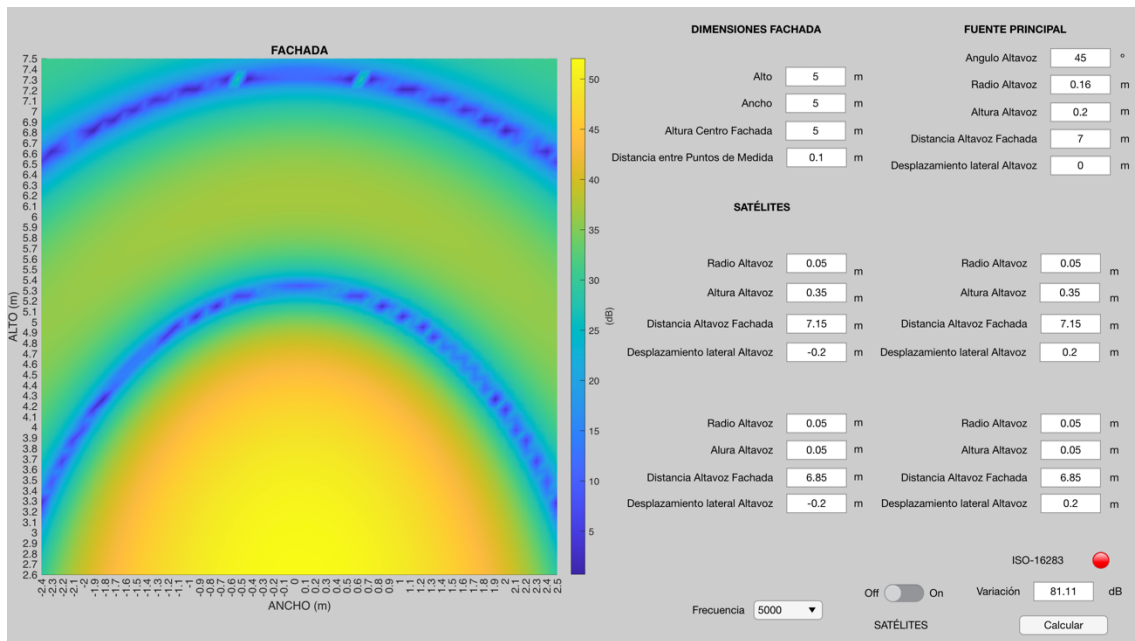


Ilustración 16: Una única fuente radiando 5kHz.

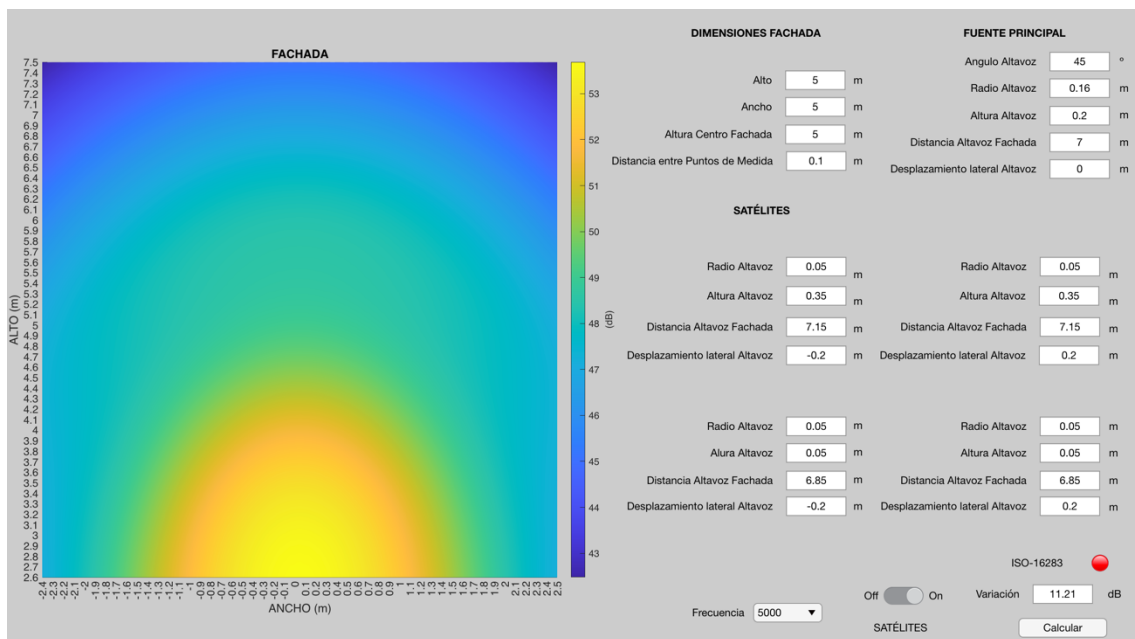


Ilustración 17: 5 fuentes radiando simultáneamente 5kHz.

Es en alta frecuencia donde la suma interferente crea un patrón de directividad que evita las grandes diferencias de nivel de un pistón sencillo. Se puede afirmar en este punto que la configuración de fuente central y satélites mejora la cobertura de una fuente puntual convencional.

## 10. Construcción del prototipo

A partir de los resultados de las simulaciones se diseña un primer prototipo para poder realizar mediciones en cámara anecoica y comprobar si se cumple la teoría utilizada. Para esta fuente se han escogido los siguientes componentes:

- **Beyma SM112/N:** altavoz de baja y media frecuencia de 12" con bobina de 3" e imán de ferrita. Tiene una potencia admisible de 400W RMS y una sensibilidad de 97dB 1W/1m. Su rango de frecuencias va desde 35 hasta 4000Hz.
- **Beyma 4FR40:** altavoz fullrange de 4" con bobina de 0.8" e imán de ferrita. Su potencia admisible es de 40W RMS, tiene una sensibilidad de 87dB 1W/1m y su rango de frecuencias es 100-20000Hz.



Ilustración 18: Beyma 12SM-112N.



Ilustración 19: Beyma 4FR40.

Se considera que la influencia de los altavoces satélites en el cálculo del volumen del recinto es despreciable por lo que solo se tiene en cuenta el driver SM-112N. En futuras versiones sería recomendable contemplar recintos independientes para ambas vías. Este cálculo se realiza con la ayuda del software abierto *WinISD 0.50* de la compañía *Linearteam*. Debido a que las medidas se realizan a partir de 100Hz y no es necesario reproducir rangos muy bajos de frecuencia el diseño de la caja no es restrictivo y se puede utilizar un recinto sellado.

En primer lugar, se introducen los parámetros Thiele/Small<sup>[3][4][5]</sup> del altavoz en WinISD:

General		Parameters		Advanced parameters		Dimensions	
Thiele/Small parameters							
Qes	0,310	Qms	8,000	Qts	0,300	Fs	40,00 Hz
Vas	117,00						
Electro-Mechanical parameters							
Mms	0,05800 kg	Cms	273,0 um/N	Rms	1,82000 kg/s	Re	6,200 ohm
BL	17,00000 N/A	Dd	300,0 mm	Le	1,20 mH	Sd	0,0500 m <sup>2</sup>
fLe	0,00 Hz	KLe	0,000 mH*sqrt(Hz)				
Large-Signal parameters							
Xmax	7,3 mm peak	Hc	0,0 mm	Hg	0,0 mm	Vd	398 cm <sup>3</sup>
Xlim	0,0 mm	Pe	400,0 W				
Miscellaneous parameters							
no	2,1000 %	Znom	8,000 ohm	USPL	97,00 dB	SPL	95,38 dB
Voicecoils	1						
Connection	Parallel						

Ilustración 20: Pantalla de introducción de datos WinISD

Tras ello se crea un nuevo proyecto y se escoge el tipo de recinto a simular. Se va a diseñar una caja sellada para simplificar el cálculo y se elige la siguiente disposición de componentes para que el tamaño final sea contenido y se asemeje al tamaño de las fuentes sonoras directivas convencionales a pesar de contar con más altavoces.

Se indica que es un recinto sellado y se determina que con un volumen de 55 l la respuesta final es suficiente para las medidas a realizar y no compromete el tamaño de la caja.

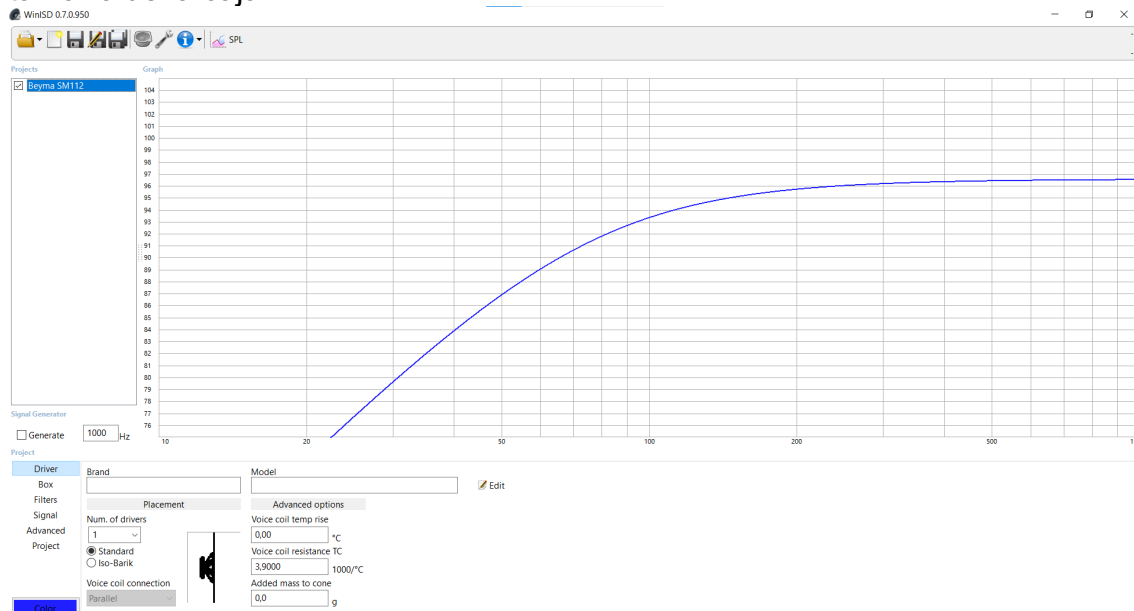
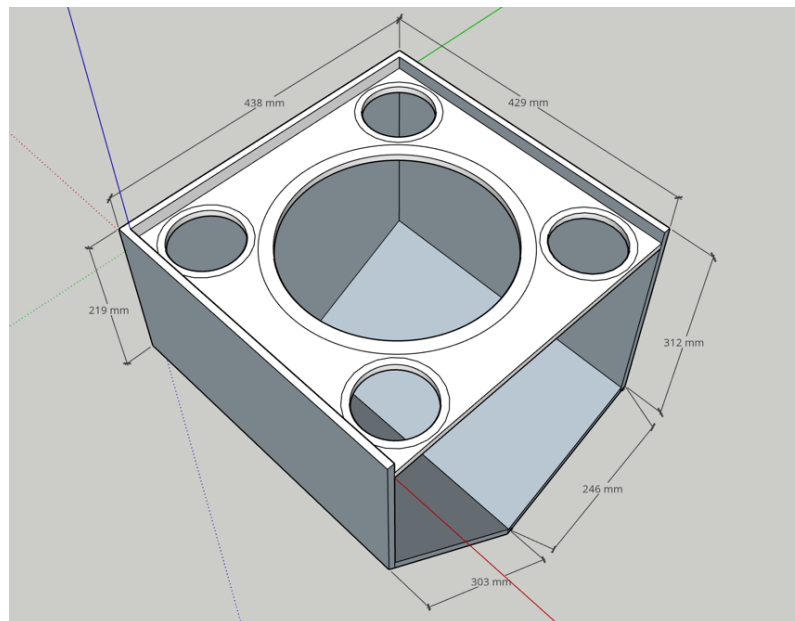


Ilustración 21: Respuesta en frecuencia de Beyma SM112/N en un recinto sellado de 55L.

Para la caja se utilizará madera contrachapada fenólica de 9mm de espesor por su ligereza y facilidad de manejo. Para futuras versiones finales sería recomendable utilizar espesores mayores.



*Ilustración 22: Diseño 3D del recinto para la fuente sonora direcciva.*

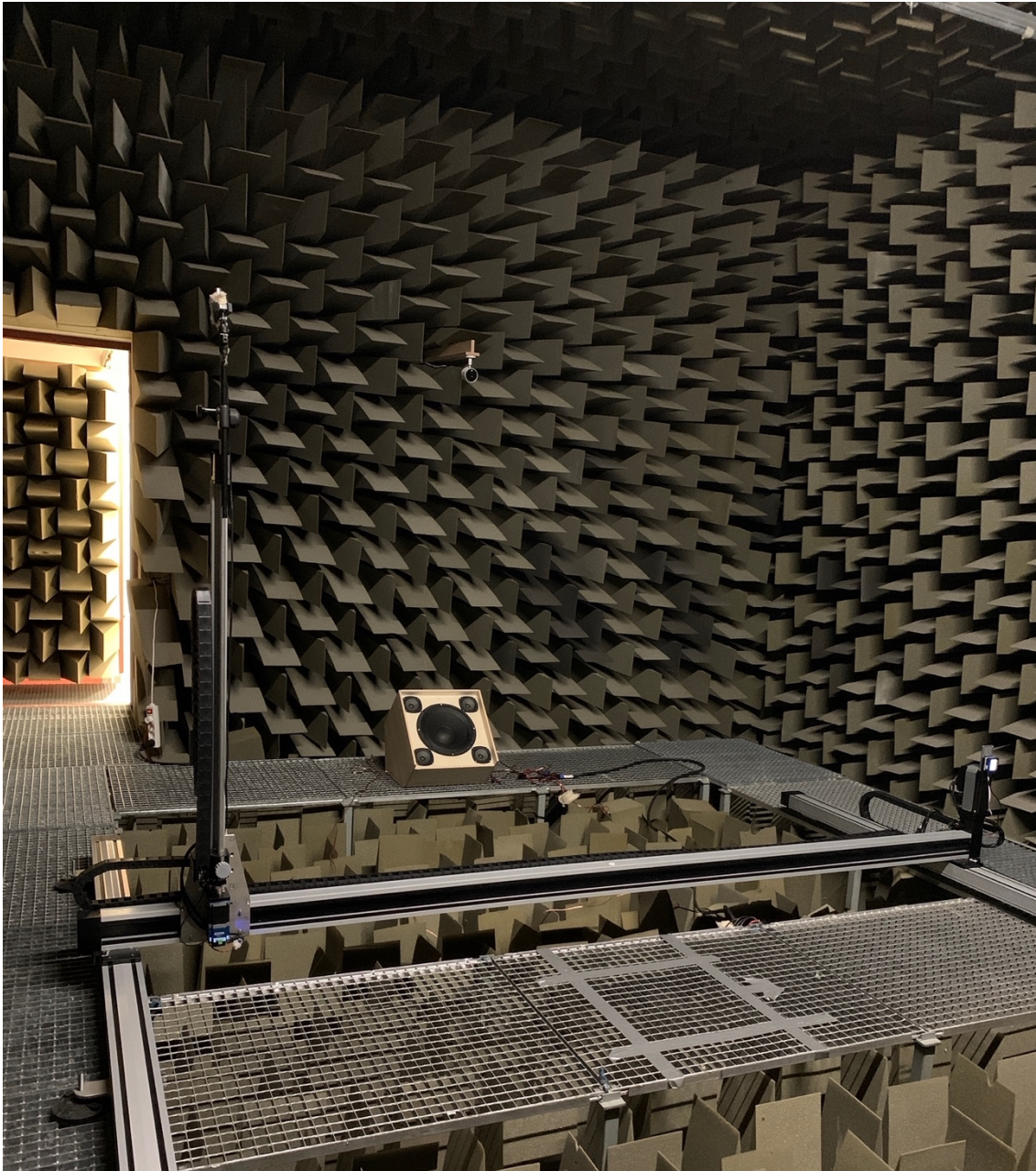
La parte trasera de la caja tiene una inclinación doble escogida para poder orientarla a  $45^\circ$  y  $30^\circ$  respecto al suelo, lo cuál permitirá apuntar su centro a fachadas de distintas alturas. Este diseño permite que también sea colocada a  $0^\circ$  para realizar mediciones en planta baja.



*Ilustración 23: Prototipo de fuente puntual unidireccional.*

## 11. Medición en cámara

Construido el prototipo se procede a medirlo en la cámara anecoica. El método es el mismo que utilizado en la medición de la fuente Brüel&Kjaer®. La única diferencia es que en este caso el sistema de medición robotizado se encuentra totalmente instalado y depurado y ahora la emisión y captación de la señal se realiza con una tarjeta de sonido Focusrite® Scarlett 18i20 conectada al ordenador que corre la aplicación ALab. El micrófono de medición es el mismo Brüel&Kjaer® 4189.



*Ilustración 24: Prototipo en cámara anecoica.*

Se realizan dos medidas, la primera únicamente con la fuente central y la segunda con todos los altavoces reproduciendo simultáneamente con el fin de poder compararlas y comprobar si de verdad se producen mejoras.

## 11.1. Resultados fuente central

Estos son los niveles de presión sonora dependiente de la frecuencia en todos los puntos de una fachada de 3x4m:

100 Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	86.7	86.8	86.8	86.7	86.8	86.8	86.7	86.8	86.7
-1.0m	87.2	86.8	86.8	86.8	86.8	86.8	86.8	86.8	86.7
-0.5m	86.8	86.8	86.8	86.9	86.8	86.8	86.8	86.7	86.8
0m	86.8	86.8	86.9	87.1	86.8	86.8	86.7	86.9	86.8
0.5m	86.9	87.2	86.9	87.0	86.9	86.9	86.9	87.0	86.9
1m	86.9	87.0	87.0	87.1	87.0	87.1	87.0	86.9	86.8
1.5m	86.9	87.0	87.2	86.9	87.1	86.9	86.9	87.1	86.9

Tabla 21: Niveles de presión sonora medidos a 100Hz.

125 Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	86.5	86.6	86.7	86.8	86.9	86.9	86.8	86.8	86.6
-1.0m	86.7	86.7	86.8	86.9	86.9	86.9	86.9	86.9	86.7
-0.5m	86.6	86.7	86.8	86.9	87.0	87.0	86.9	86.8	86.7
0m	86.6	86.7	86.8	86.9	86.9	86.8	86.8	86.8	86.7
0.5m	86.8	86.9	86.9	87.0	86.9	86.9	86.9	86.9	86.7
1m	86.7	86.8	87.0	87.1	87.0	87.0	87.0	86.9	86.7
1.5m	86.9	86.9	87.0	87.0	87.0	86.9	86.9	86.9	86.7

Tabla 22: Niveles de presión sonora medidos a 125Hz.

160 Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	84.8	84.8	84.8	84.8	84.9	85.0	84.9	85.0	84.9
-1.0m	84.9	84.9	84.9	85.0	85.0	85.0	85.0	85.0	85.0
-0.5m	84.9	84.9	84.9	85.0	85.0	85.0	85.0	85.0	85.0
0m	84.8	84.9	84.9	85.0	85.0	84.9	84.9	84.9	84.9
0.5m	84.9	84.9	84.9	85.0	84.9	84.9	84.9	85.0	84.9
1m	84.9	84.9	85.0	85.0	84.9	84.9	84.9	84.9	84.9
1.5m	85.0	84.9	85.0	85.0	85.0	84.9	84.9	85.0	85.0

Tabla 23: Niveles de presión sonora medidos a 160Hz.

200 Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	84.0	84.1	84.1	84.1	84.2	84.2	84.1	84.2	84.1
-1.0m	84.1	84.2	84.2	84.2	84.3	84.3	84.2	84.2	84.2
-0.5m	84.3	84.3	84.2	84.3	84.2	84.3	84.2	84.2	84.2
0m	84.2	84.2	84.3	84.3	84.3	84.3	84.3	84.3	84.2
0.5m	84.4	84.3	84.3	84.4	84.4	84.3	84.3	84.4	84.3
1m	84.2	84.3	84.4	84.4	84.4	84.3	84.3	84.3	84.2
1.5m	84.2	84.3	84.3	84.3	84.3	84.3	84.3	84.3	84.2

Tabla 24: Niveles de presión sonora medidos a 200Hz.

250 Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	83.4	83.4	83.4	83.4	83.5	83.5	83.4	83.5	83.4
-1.0m	83.5	83.5	83.6	83.6	83.6	83.6	83.5	83.6	83.5
-0.5m	83.6	83.6	83.6	83.6	83.5	83.6	83.5	83.5	83.5
0m	83.5	83.5	83.6	83.6	83.6	83.6	83.6	83.6	83.6
0.5m	83.6	83.6	83.6	83.6	83.6	83.6	83.6	83.6	83.6
1m	83.6	83.6	83.7	83.7	83.6	83.6	83.6	83.6	83.5
1.5m	83.6	83.6	83.6	83.7	83.7	83.6	83.6	83.6	83.6

Tabla 25: Niveles de presión sonora medidos a 250Hz.

315Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	83.2	83.2	83.2	83.2	83.3	83.4	83.2	83.3	83.2
-1.0m	83.2	83.3	83.4	83.3	83.4	83.4	83.3	83.3	83.3
-0.5m	83.3	83.3	83.3	83.3	83.3	83.3	83.3	83.3	83.3
0m	83.3	83.3	83.4	83.3	83.3	83.3	83.3	83.4	83.3
0.5m	83.5	83.3	83.3	83.4	83.4	83.3	83.3	83.3	83.3
1m	83.3	83.3	83.4	83.4	83.4	83.3	83.3	83.4	83.3
1.5m	83.4	83.4	83.4	83.4	83.4	83.3	83.4	83.3	83.3

Tabla 26: Niveles de presión sonora medidos a 315Hz.

400 Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	83.0	83.0	83.0	83.0	83.0	83.1	83.0	83.0	83.0
-1.0m	83.0	83.0	83.1	83.1	83.1	83.2	83.1	83.1	83.1
-0.5m	83.1	83.0	83.0	83.0	83.0	83.1	83.0	83.0	83.0
0m	83.0	83.0	83.1	83.1	83.1	83.1	83.1	83.1	83.1
0.5m	83.1	83.1	83.0	83.1	83.1	83.1	83.0	83.1	83.1
1m	83.0	83.0	83.2	83.2	83.1	83.1	83.0	83.1	83.1
1.5m	83.1	83.1	83.1	83.1	83.1	83.1	83.1	83.1	83.1

Tabla 27: Niveles de presión sonora medidos a 400Hz.

500 Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	82.9	82.8	82.8	82.8	82.8	82.9	82.8	82.9	82.8
-1.0m	82.8	82.8	82.9	82.8	82.8	82.9	82.8	82.9	82.9
-0.5m	82.8	82.8	82.8	82.8	82.7	82.9	82.8	82.8	82.8
0m	82.7	82.7	82.8	82.8	82.8	82.8	82.8	82.9	82.8
0.5m	82.9	82.8	82.7	82.8	82.8	82.8	82.8	82.8	82.8
1m	82.7	82.7	82.9	82.8	82.8	82.8	82.7	82.8	82.8
1.5m	82.8	82.8	82.8	82.8	82.8	82.7	82.8	82.8	82.8

Tabla 28: Niveles de presión sonora medidos a 500Hz.

630 Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	82.8	82.8	82.8	82.9	82.9	82.9	82.9	82.9	82.8
-1.0m	82.8	82.8	82.9	82.9	82.9	82.9	82.9	82.9	82.9
-0.5m	82.8	82.8	82.8	82.8	82.8	82.9	82.8	82.8	82.9
0m	82.8	82.8	82.9	82.8	82.9	82.8	82.8	83.0	82.9
0.5m	83.0	82.8	82.8	82.9	82.9	82.9	82.8	82.9	82.9
1m	82.8	82.7	83.0	83.0	82.9	82.8	82.8	82.9	82.8
1.5m	82.9	82.8	82.9	82.8	82.8	82.8	82.8	82.8	82.9

Tabla 29: Niveles de presión sonora medidos a 630Hz.

800Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	82.9	83.0	82.9	83.0	83.0	82.9	83.0	82.9	83.0
-1.0m	82.9	82.9	82.9	82.9	82.9	83.0	83.0	82.9	82.9
-0.5m	82.8	82.8	82.9	82.9	83.0	83.0	82.9	82.8	83.0
0m	82.9	83.0	82.9	82.9	83.0	82.9	82.8	83.0	82.9
0.5m	83.0	82.9	82.9	83.0	83.0	82.9	82.9	82.9	83.0
1m	82.9	82.8	83.1	83.0	82.9	82.9	82.9	83.0	82.9
1.5m	83.0	82.9	83.0	82.9	82.9	82.9	82.9	82.9	82.9

Tabla 30: Niveles de presión sonora medidos a 800Hz.

1000 Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	84.4	85.0	82.6	82.6	86.3	85.5	84.5	83.0	87.3
-1.0m	82.6	85.7	82.6	82.6	85.2	85.0	82.7	82.6	82.6
-0.5m	83.3	85.2	83.9	82.5	88.0	88.7	82.5	83.4	85.0
0m	85.5	87.9	83.1	82.5	89.0	84.1	82.9	83.4	82.6
0.5m	82.7	83.1	86.3	83.8	90.4	82.6	82.5	82.7	83.9
1m	85.9	82.7	82.8	86.0	84.0	83.9	82.6	89.5	82.6
1.5m	89.2	82.6	83.0	83.8	83.0	82.5	82.5	82.6	84.9

Tabla 31: Niveles de presión sonora medidos a 1000Hz.

1250 Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	82.6	82.8	82.6	82.6	82.9	82.8	82.8	82.7	83.0
-1.0m	82.5	82.9	82.6	82.6	82.9	82.8	82.7	82.6	82.6
-0.5m	82.6	82.7	82.6	82.5	82.8	83.0	82.5	82.5	82.9
0m	82.8	82.9	82.7	82.5	83.2	82.7	82.6	82.8	82.5
0.5m	82.7	82.7	82.7	82.6	82.9	82.5	82.5	82.5	82.8
1m	83.5	82.5	82.7	82.8	82.7	82.7	82.5	83.3	82.5
1.5m	82.8	82.5	82.7	82.6	82.6	82.4	82.4	82.5	82.6

Tabla 32: Niveles de presión sonora medidos a 1250Hz.

1600 Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	82.6	82.6	82.6	82.6	82.6	82.8	82.8	82.7	82.6
-1.0m	82.6	82.6	82.6	82.7	82.8	82.7	82.8	82.7	82.7
-0.5m	82.6	82.6	82.6	82.6	82.6	82.7	82.6	82.5	82.6
0m	82.6	82.6	82.7	82.6	82.8	82.6	82.5	82.7	82.6
0.5m	82.9	82.6	82.6	82.7	82.7	82.5	82.5	82.5	82.6
1m	82.6	82.6	82.8	82.8	82.6	82.6	82.5	82.7	82.6
1.5m	82.6	82.6	82.6	82.6	82.6	82.5	82.5	82.5	82.6

Tabla 33: Niveles de presión sonora medidos a 1600Hz.

2000 Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	82.6	82.7	85.8	83.2	82.8	82.9	82.8	82.7	83.0
-1.0m	82.5	82.8	86.9	87.5	82.9	82.8	86.2	87.3	88.9
-0.5m	82.6	82.7	82.6	86.2	83.0	83.5	86.0	82.5	82.7
0m	82.7	83.0	82.8	82.7	83.5	82.6	82.5	82.8	84.1
0.5m	87.5	82.6	82.8	82.7	83.4	82.7	82.7	82.5	82.7
1m	83.5	82.6	87.6	83.0	82.7	82.7	83.2	83.3	82.7
1.5m	83.2	83.0	82.7	82.7	82.6	83.2	83.4	83.5	82.7

Tabla 34: Niveles de presión sonora medidos a 2000Hz.

2500 Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	82.5	82.5	82.9	82.7	82.5	82.8	82.7	82.6	82.6
-1.0m	82.5	82.5	83.0	83.1	82.7	82.8	83.1	83.1	83.3
-0.5m	82.6	82.6	82.6	82.8	82.7	82.8	82.8	82.5	82.5
0m	82.5	82.7	82.7	82.6	82.9	82.6	82.5	82.8	82.6
0.5m	83.2	82.6	82.5	82.7	82.7	82.7	82.6	82.5	82.6
1m	82.7	82.6	83.1	82.9	82.6	82.6	82.7	82.9	82.6
1.5m	82.8	82.7	82.6	82.6	82.6	82.7	82.6	82.7	82.5

Tabla 35: Niveles de presión sonora medidos a 2500Hz.



3150 Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	82.6	82.6	82.7	82.8	82.6	82.9	82.9	82.8	82.6
-1.0m	82.5	82.6	82.8	82.9	82.8	82.9	83.0	82.8	82.7
-0.5m	82.6	82.6	82.6	82.7	82.8	83.1	82.6	82.5	82.5
0m	82.5	82.7	82.8	82.7	83.1	82.6	82.5	82.9	82.5
0.5m	83.1	82.6	82.6	82.8	82.9	82.8	82.6	82.5	82.6
1m	82.8	82.6	82.9	82.9	82.6	82.6	82.6	82.9	82.6
1.5m	82.9	82.7	82.7	82.6	82.6	82.7	82.6	82.7	82.5

Tabla 36: Niveles de presión sonora medidos a 3150Hz.

4000 Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	82.7	82.6	83.2	83.1	82.7	83.0	83.0	82.9	82.6
-1.0m	82.6	82.6	83.2	83.4	83.0	83.1	83.4	83.3	84.1
-0.5m	82.7	82.7	82.8	83.1	82.9	83.1	83.1	82.6	82.6
0m	82.5	82.8	83.0	83.0	83.2	82.7	82.6	83.0	82.7
0.5m	83.6	82.7	82.6	83.0	83.0	83.1	82.9	82.6	82.7
1m	82.8	82.6	83.5	83.2	82.7	82.7	82.9	82.9	82.7
1.5m	82.9	83.0	82.8	82.8	82.7	83.0	82.8	82.9	82.6

Tabla 37: Niveles de presión sonora medidos a 4000Hz.

5000 Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	82.9	82.9	83.1	83.2	82.9	83.4	83.3	83.2	82.8
-1.0m	82.8	82.8	83.2	83.3	83.4	83.4	83.5	83.3	83.1
-0.5m	83.0	82.9	83.0	83.0	83.2	83.3	83.0	82.8	82.8
0m	82.8	83.1	83.4	83.1	83.5	82.9	82.9	83.4	82.8
0.5m	83.6	82.9	82.8	83.3	83.2	83.3	83.0	82.8	83.0
1m	83.1	82.9	83.4	83.6	82.9	82.9	83.0	83.3	83.1
1.5m	83.2	83.2	83.1	83.0	83.0	83.1	83.0	83.2	82.9

Tabla 38: Niveles de presión sonora medidos a 5000Hz.

Las diferencias máximas de nivel en cada banda quedan recogidas en la siguiente tabla, contrastadas con las medidas de la fuente comercial:

Freq. (Hz)	MAXIMO	MINIMO	DIFERENCIA	F. COMERCIAL
100	87.2	86.7	0.5	1.9
125	87.1	86.5	0.6	2.5
160	85.0	84.8	0.2	2.8
200	84.4	84.0	0.4	3.3
250	83.7	83.4	0.3	3.8
315	83.5	83.2	0.3	3.2
400	83.2	83.0	0.2	3.2
500	82.9	82.7	0.2	3.6
630	83.0	82.7	0.3	2.7
800	83.1	82.8	0.2	2.7
1000	90.4	82.5	7.9	3.0
1250	83.5	82.4	1.1	3.8
1600	82.9	82.5	0.4	3.7
2000	88.9	82.5	6.4	3.5
2500	83.3	82.5	0.8	3.8
3150	83.1	82.5	0.6	3.9
4000	84.1	82.5	1.5	5.6
5000	83.6	82.8	0.9	3.9

Tabla 39: Diferencias máximas de nivel de presión para cada banda de frecuencia.

## 11.2. Resultados fuente completa

A continuación, se exponen los resultados de la medición de niveles de presión de todos los altavoces de la fuente sonando simultáneamente:

100 Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	86.9	86.7	86.7	86.7	86.7	86.7	86.7	86.6	86.6
-1.0m	87.1	86.7	86.7	86.7	86.8	86.7	86.7	86.7	86.6
-0.5m	86.7	86.8	86.8	86.8	86.8	86.7	86.8	86.7	86.7
0m	86.8	86.8	87.0	86.8	86.8	86.7	86.9	86.7	86.9
0.5m	86.8	86.9	86.9	86.9	86.8	86.8	86.8	86.8	86.7
1m	86.9	87.0	86.9	86.9	86.8	87.0	86.8	86.8	86.8
1.5m	86.9	86.9	87.1	86.9	86.9	87.0	86.8	86.8	86.9

Tabla 40: Niveles de presión sonora medidos a 100Hz.

125 Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	86.6	86.7	86.7	86.8	86.9	86.9	86.8	86.7	86.7
-1.0m	86.8	86.6	86.7	86.8	87.0	86.9	86.8	86.8	86.7
-0.5m	86.6	86.7	86.8	86.9	86.9	86.9	86.9	86.8	86.7
0m	86.6	86.7	87.0	86.9	86.9	86.8	87.0	86.8	86.7
0.5m	86.6	86.8	86.9	86.9	86.9	86.9	86.9	86.8	86.7
1m	86.7	86.8	86.9	87.0	86.9	87.1	86.9	86.8	86.7
1.5m	86.8	86.8	87.0	86.9	86.9	87.1	86.8	86.9	86.7

Tabla 41: Niveles de presión sonora medidos a 125Hz.

160 Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	84.8	84.9	84.9	84.8	84.9	84.9	84.9	84.9	85.0
-1.0m	85.0	84.8	84.9	84.8	85.0	85.0	84.9	84.9	84.9
-0.5m	84.8	85.0	84.9	85.0	84.9	84.9	84.9	85.0	85.0
0m	84.8	84.9	85.0	84.9	84.9	84.9	85.1	84.9	84.9
0.5m	84.8	84.9	84.9	84.9	84.9	84.9	84.9	84.9	84.9
1m	84.9	84.9	84.9	84.9	84.9	85.0	84.9	84.9	84.9
1.5m	85.0	84.9	84.9	84.9	84.9	85.1	84.9	85.0	85.0

Tabla 42: Niveles de presión sonora medidos a 160Hz.

200 Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	84.1	84.2	84.2	84.1	84.2	84.2	84.2	84.1	84.2
-1.0m	84.3	84.1	84.2	84.1	84.2	84.2	84.2	84.2	84.1
-0.5m	84.2	84.2	84.2	84.3	84.2	84.2	84.2	84.2	84.2
0m	84.2	84.2	84.3	84.2	84.3	84.2	84.3	84.2	84.2
0.5m	84.2	84.2	84.3	84.3	84.3	84.3	84.3	84.3	84.2
1m	84.2	84.3	84.3	84.4	84.3	84.4	84.3	84.3	84.2
1.5m	84.2	84.2	84.3	84.3	84.3	84.4	84.3	84.3	84.2

Tabla 43: Niveles de presión sonora medidos a 200Hz.

250 Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	83.5	83.5	83.5	83.5	83.5	83.5	83.5	83.4	83.5
-1.0m	83.6	83.5	83.5	83.5	83.6	83.6	83.5	83.5	83.5
-0.5m	83.5	83.6	83.6	83.6	83.5	83.5	83.6	83.5	83.5
0m	83.6	83.6	83.6	83.6	83.6	83.6	83.7	83.5	83.5
0.5m	83.5	83.6	83.6	83.6	83.6	83.6	83.6	83.6	83.5
1m	83.6	83.6	83.6	83.6	83.6	83.7	83.6	83.6	83.6
1.5m	83.6	83.6	83.6	83.6	83.6	83.8	83.6	83.6	83.6

Tabla 44: Niveles de presión sonora medidos a 250Hz.

315Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	83.2	83.3	83.3	83.3	83.3	83.3	83.3	83.2	83.3
-1.0m	83.3	83.2	83.3	83.3	83.4	83.3	83.3	83.3	83.3
-0.5m	83.2	83.3	83.3	83.3	83.2	83.3	83.3	83.3	83.3
0m	83.3	83.3	83.4	83.3	83.3	83.3	83.5	83.3	83.3
0.5m	83.3	83.3	83.3	83.3	83.3	83.3	83.3	83.3	83.3
1m	83.3	83.3	83.3	83.3	83.3	83.4	83.3	83.3	83.3
1.5m	83.3	83.3	83.3	83.3	83.4	83.5	83.3	83.3	83.3

Tabla 45: Niveles de presión sonora medidos a 315Hz.

400 Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	83.0	83.1	83.1	83.0	83.0	83.1	83.1	83.0	83.1
-1.0m	83.1	83.0	83.1	83.0	83.1	83.1	83.0	83.0	83.0
-0.5m	83.0	83.1	83.1	83.1	83.0	83.0	83.1	83.0	83.0
0m	83.0	83.0	83.3	83.1	83.0	83.1	83.3	83.0	83.0
0.5m	83.0	83.1	83.0	83.0	83.0	83.1	83.0	83.1	83.0
1m	83.1	83.1	83.0	83.1	83.1	83.3	83.1	83.1	83.1
1.5m	83.1	83.0	83.1	83.1	83.1	83.3	83.1	83.1	83.1

Tabla 46: Niveles de presión sonora medidos a 400Hz.

500 Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	82.8	82.9	82.9	82.8	82.8	82.9	82.8	82.8	82.9
-1.0m	83.0	82.8	82.8	82.8	82.8	82.8	82.8	82.8	82.8
-0.5m	82.8	82.8	82.8	82.8	82.8	82.8	82.8	82.8	82.8
0m	82.8	82.8	82.9	82.8	82.8	82.8	82.9	82.8	82.8
0.5m	82.8	82.8	82.8	82.7	82.8	82.8	82.8	82.8	82.8
1m	82.8	82.8	82.8	82.8	82.8	82.9	82.8	82.8	82.8
1.5m	82.8	82.7	82.8	82.7	82.8	82.9	82.8	82.8	82.8

Tabla 47: Niveles de presión sonora medidos a 500Hz.

630 Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	82.8	82.9	82.9	82.8	82.8	82.9	82.8	82.8	82.9
-1.0m	83.0	82.8	82.9	82.8	82.9	82.9	82.8	82.8	82.9
-0.5m	82.9	82.9	82.9	82.9	82.9	82.9	82.9	82.9	82.9
0m	82.9	82.8	83.2	82.9	82.9	82.9	83.2	82.9	82.9
0.5m	82.9	82.9	82.8	82.8	82.8	82.9	82.8	82.9	82.8
1m	82.9	82.8	82.8	82.8	82.8	83.0	82.8	82.9	82.8
1.5m	82.9	82.7	82.8	82.8	82.8	83.1	82.8	82.8	82.8

Tabla 48: Niveles de presión sonora medidos a 630Hz.

800Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	82.9	82.9	82.9	82.9	82.9	82.9	82.9	82.9	83.0
-1.0m	83.0	82.8	83.0	82.8	83.0	83.0	82.8	82.8	82.9
-0.5m	82.9	83.0	83.0	83.0	82.9	83.0	83.0	82.9	82.9
0m	83.0	83.0	83.2	83.0	83.0	83.0	83.1	82.9	82.9
0.5m	82.9	82.9	83.0	82.9	82.9	82.9	82.9	83.0	82.9
1m	83.0	82.9	82.9	82.8	82.9	83.1	82.9	82.9	82.9
1.5m	83.0	82.8	82.9	82.8	82.9	83.2	82.9	82.9	83.0

Tabla 49: Niveles de presión sonora medidos a 800Hz.

1000 Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	82.9	85.1	85.8	87.4	84.7	85.6	84.4	82.6	88.4
-1.0m	83.7	85.9	85.9	83.5	85.0	83.8	83.5	82.6	87.5
-0.5m	86.0	84.8	83.8	84.8	84.5	85.8	85.9	82.6	88.5
0m	84.4	83.1	82.8	82.8	85.0	86.2	82.8	82.7	82.6
0.5m	85.4	86.2	83.3	83.0	86.7	82.6	86.0	82.6	83.4
1m	85.7	83.0	82.6	83.1	83.2	82.8	83.5	82.6	85.2
1.5m	84.7	82.6	82.8	83.3	82.7	83.2	82.5	83.5	86.0

Tabla 50: Niveles de presión sonora medidos a 1000Hz.

1250 Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	82.7	82.9	82.9	82.7	82.7	83.1	82.9	82.5	83.1
-1.0m	83.0	82.7	83.6	82.6	83.1	83.2	82.6	82.5	82.8
-0.5m	82.7	83.0	83.1	82.8	82.9	82.8	82.9	82.6	83.1
0m	82.8	83.0	82.8	82.7	82.8	83.0	82.9	82.6	82.6
0.5m	83.0	83.0	83.6	82.5	82.7	82.5	82.7	82.6	82.6
1m	83.4	82.5	82.5	82.6	82.6	82.8	82.7	82.5	82.6
1.5m	82.9	82.5	82.6	82.6	82.6	82.9	82.4	82.6	82.8

Tabla 51: Niveles de presión sonora medidos a 1250Hz.

1600 Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	82.6	82.8	82.8	82.6	82.7	82.8	82.6	82.6	82.7
-1.0m	82.9	82.6	82.7	82.6	82.7	82.8	82.6	82.6	82.6
-0.5m	82.6	82.8	82.7	82.7	82.7	82.6	82.7	82.6	82.7
0m	82.7	82.7	82.9	82.8	82.7	82.8	83.0	82.6	82.6
0.5m	82.7	82.8	82.6	82.6	82.6	82.6	82.6	82.7	82.6
1m	82.7	82.6	82.6	82.6	82.6	82.9	82.6	82.6	82.6
1.5m	82.7	82.6	82.6	82.5	82.7	82.9	82.5	82.7	82.6

Tabla 52: Niveles de presión sonora medidos a 1600Hz.

2000 Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	82.6	83.0	83.0	83.0	82.7	83.5	83.2	86.9	83.9
-1.0m	83.0	82.7	84.0	82.8	83.2	83.5	82.6	85.2	82.9
-0.5m	82.8	82.9	83.7	82.9	82.8	83.3	83.4	85.1	83.2
0m	82.8	83.6	83.1	82.9	83.4	83.5	83.1	82.6	82.7
0.5m	82.8	82.9	84.0	82.6	82.9	83.0	83.1	84.4	82.6
1m	83.6	82.6	82.6	82.6	82.7	83.0	82.7	86.8	82.7
1.5m	83.2	82.6	82.7	82.6	82.8	83.1	82.9	82.8	82.8

Tabla 53: Niveles de presión sonora medidos a 2000Hz.

2500 Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	82.6	82.8	82.8	82.6	82.7	82.9	82.7	82.8	82.8
-1.0m	83.1	82.5	82.8	82.6	82.9	82.9	82.6	82.8	82.6
-0.5m	82.6	82.9	82.8	82.8	82.8	82.7	82.8	82.9	82.7
0m	82.7	82.8	83.1	82.8	82.8	82.9	83.1	82.6	82.7
0.5m	82.7	82.8	82.8	82.5	82.6	82.9	82.6	82.8	82.6
1m	82.9	82.6	82.6	82.6	82.7	83.1	82.7	83.0	82.5
1.5m	82.7	82.5	82.6	82.5	82.7	83.1	82.5	82.7	82.6

Tabla 54: Niveles de presión sonora medidos a 2500Hz.

3150 Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	82.7	82.9	83.1	82.7	82.7	83.1	82.8	82.6	83.1
-1.0m	83.3	82.5	83.1	85.8	83.0	83.1	82.6	82.7	82.7
-0.5m	82.7	83.0	83.1	82.9	82.9	82.9	83.0	82.8	82.8
0m	82.8	83.0	83.3	83.0	83.0	83.0	83.3	82.6	82.8
0.5m	82.7	82.9	83.0	82.6	82.7	83.0	82.8	82.8	82.6
1m	83.0	82.6	82.6	82.6	82.8	83.2	82.7	82.8	82.6
1.5m	82.8	82.5	82.7	82.5	82.9	83.3	82.5	82.8	82.7

Tabla 55: Niveles de presión sonora medidos a 3150Hz.

4000 Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	82.7	83.1	83.2	82.8	82.8	83.1	82.9	83.1	83.0
-1.0m	83.5	82.6	83.0	82.7	83.1	83.1	82.7	82.9	82.8
-0.5m	82.8	83.1	83.1	83.1	83.0	82.9	83.1	83.1	82.9
0m	82.9	83.1	83.5	83.2	83.1	83.2	83.5	82.8	82.9
0.5m	83.0	83.1	83.0	82.7	82.9	83.3	82.8	82.9	82.8
1m	83.0	82.8	82.7	82.8	82.9	83.5	82.8	83.2	82.7
1.5m	82.9	82.6	82.8	82.6	83.0	83.4	82.7	82.9	82.8

Tabla 56: Niveles de presión sonora medidos a 4000Hz.

5000 Hz									
[dB]	-2.0m	-1.5m	-1.0m	-0.5m	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m
-1.5m	83.0	83.3	83.3	83.0	83.0	83.2	83.1	83.0	83.2
-1.0m	83.9	82.7	83.1	82.8	83.4	83.4	82.9	83.1	83.1
-0.5m	83.1	83.5	83.3	83.2	83.3	83.1	83.3	83.2	83.2
0m	83.2	83.3	83.8	83.6	83.4	83.5	83.8	83.1	83.2
0.5m	83.2	83.3	83.1	83.0	83.1	83.4	83.0	83.1	83.1
1m	83.2	83.1	83.1	83.1	83.3	83.8	83.2	83.2	83.0
1.5m	83.2	82.9	83.1	82.9	83.4	83.8	82.8	83.3	83.1

Tabla 57: Niveles de presión sonora medidos a 5000Hz.

Estas son las máximas diferencias de nivel recogidas en cada banda de frecuencia:

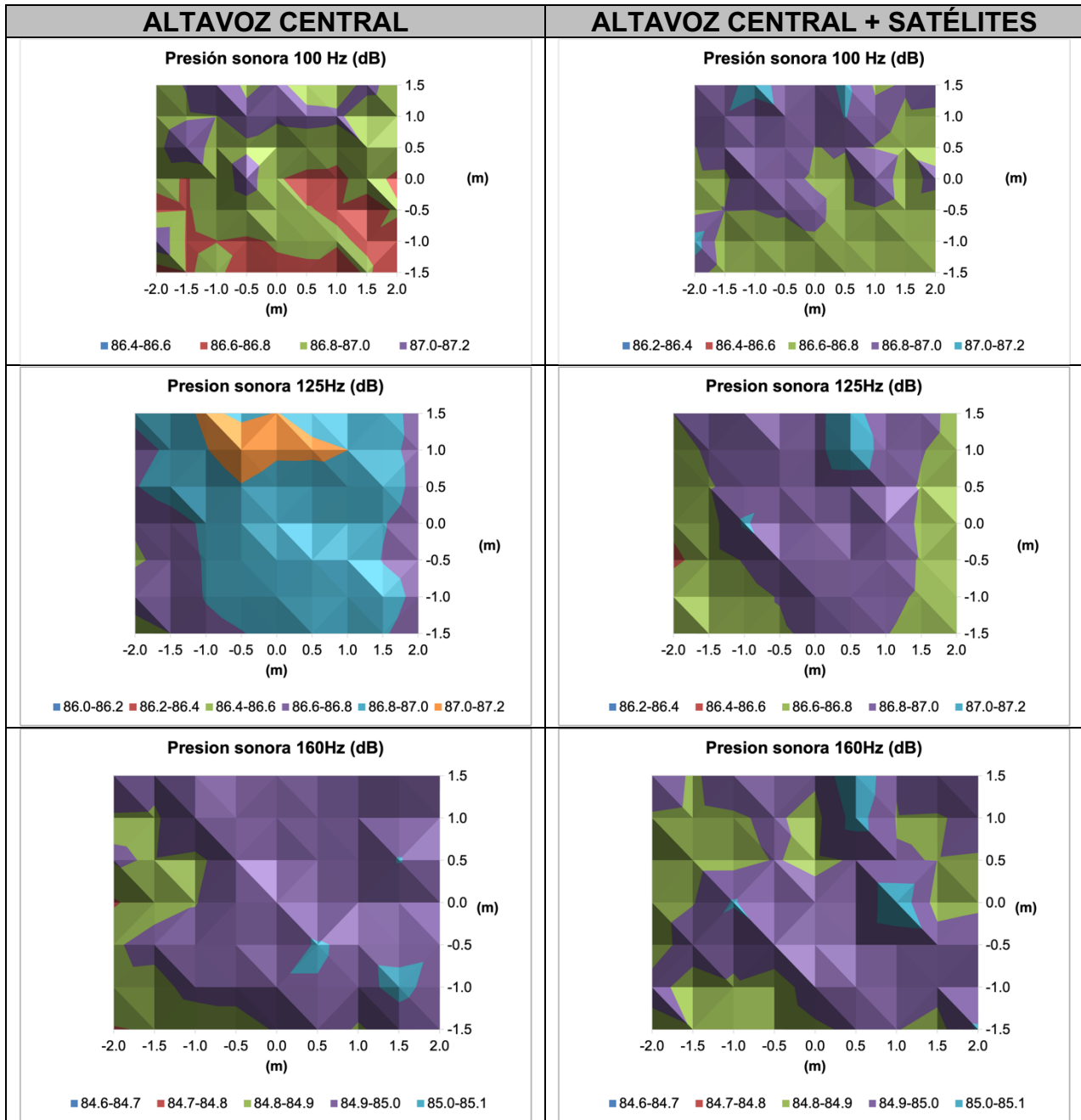
Freq. (Hz)	MAXIMO	MINIMO	F.PRINCIPAL+SATÉLITES	F.PRINCIPAL	F. COMERCIAL
100	87.1	86.6	0.5	0.5	1.9
125	87.1	86.6	0.6	0.6	2.5
160	85.1	84.8	0.3	0.2	2.8
200	84.4	84.1	0.3	0.4	3.3
250	83.8	83.4	0.3	0.3	3.8
315	83.5	83.2	0.3	0.3	3.2
400	83.3	83.0	0.3	0.2	3.2
500	83.0	82.7	0.2	0.2	3.6
630	83.2	82.7	0.5	0.3	2.7
800	83.2	82.8	0.3	0.2	2.7
1000	88.5	82.5	6.0	7.9	3.0
1250	83.6	82.4	1.2	1.1	3.8
1600	83.0	82.5	0.5	0.4	3.7
2000	86.9	82.6	4.4	6.4	3.5
2500	83.1	82.5	0.6	0.8	3.8
3150	85.8	82.5	3.3	0.6	3.9
4000	83.5	82.6	1.0	1.5	5.6
5000	83.9	82.7	1.2	0.9	3.9

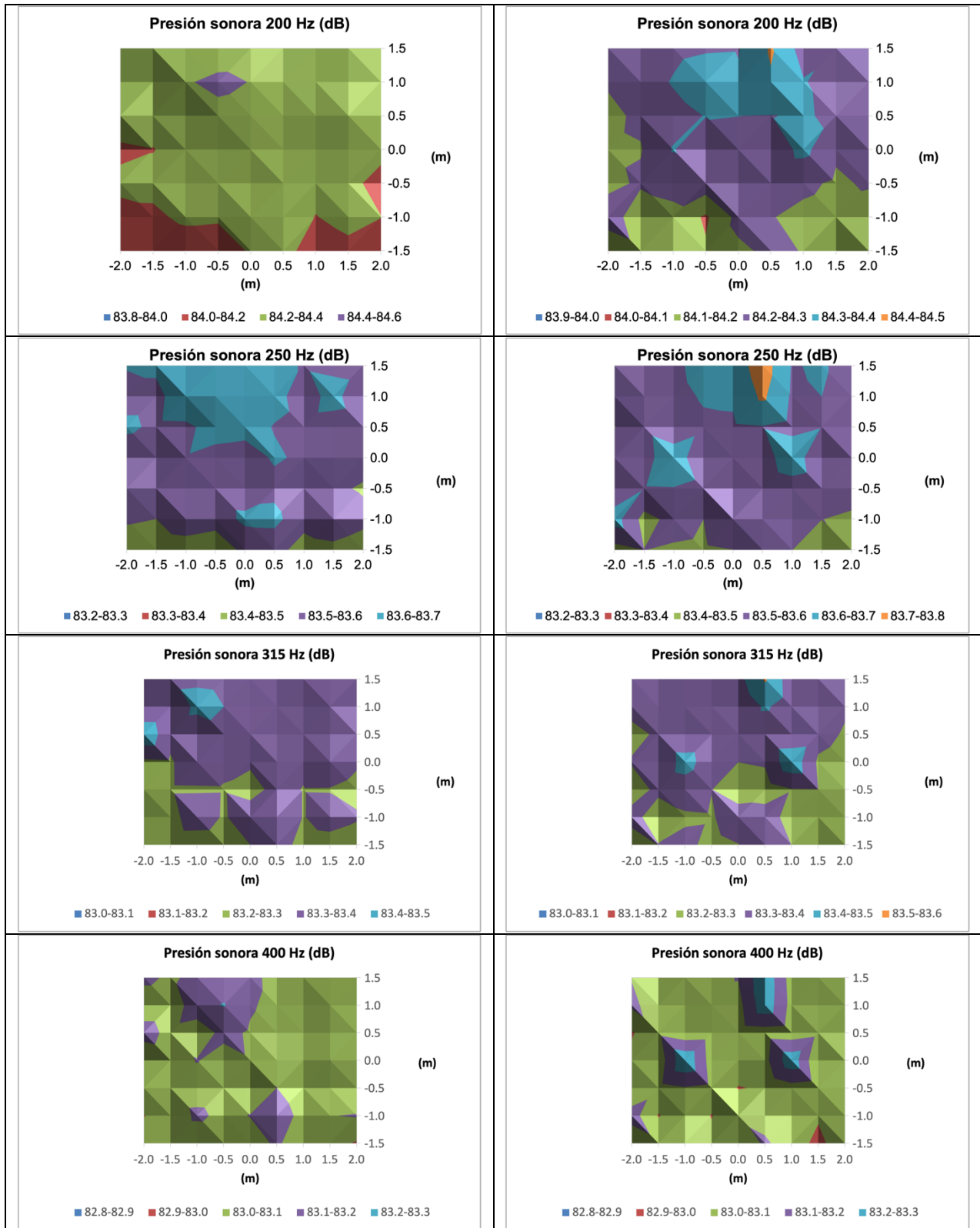
Tabla 58: Relación de diferencias de nivel máximas según fuentes y bandas de frecuencia.

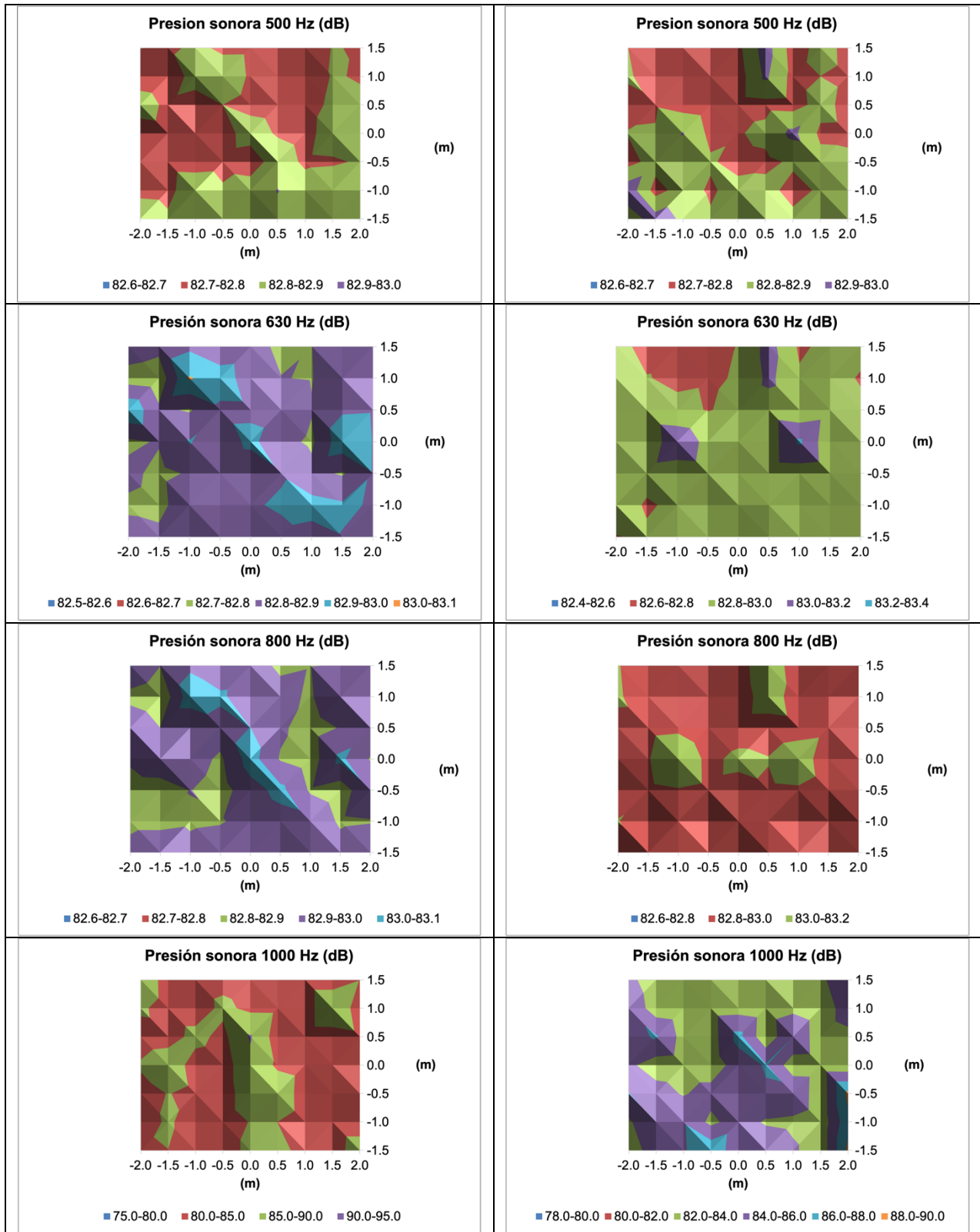
Esta configuración disminuye las diferencias de nivel en toda la fachada. Es de reseñar la disparidad de los resultados en 1kHz y 2kHz. Se estima que son debidos a la situación de la fuente en la cámara, distinta a la utilizada en la medición de la fuente comercial.

### 11.3. Comparativa

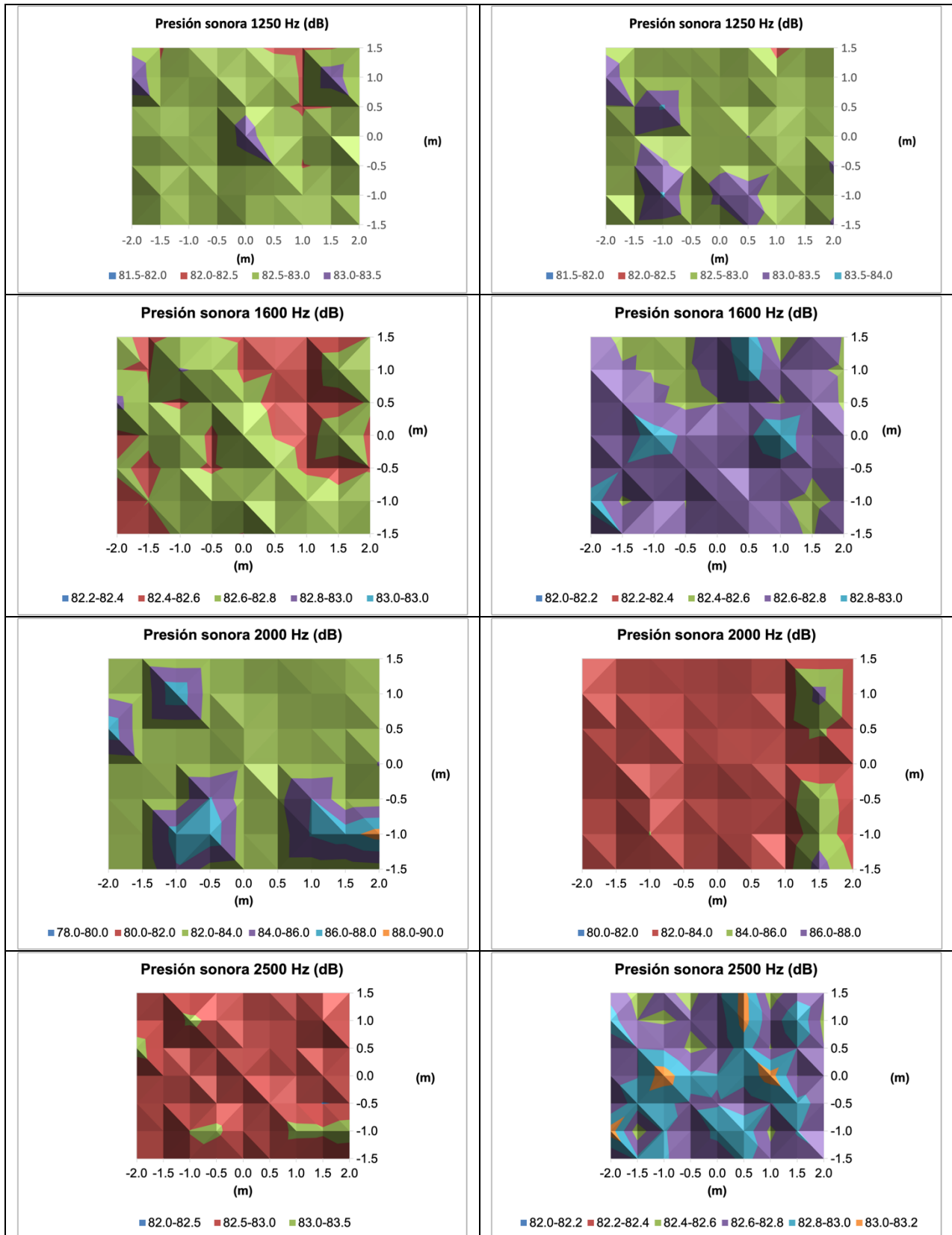
Como se puede comprobar, en las bandas de frecuencias bajas y medias las diferencias tanto de la fuente central como de todas las fuentes en conjunto son mínimas, menores de 1dB. A partir de 1kHz comienzan a aparecer diferencias. Se representan gráficamente ambos resultados para su fácil comprensión.











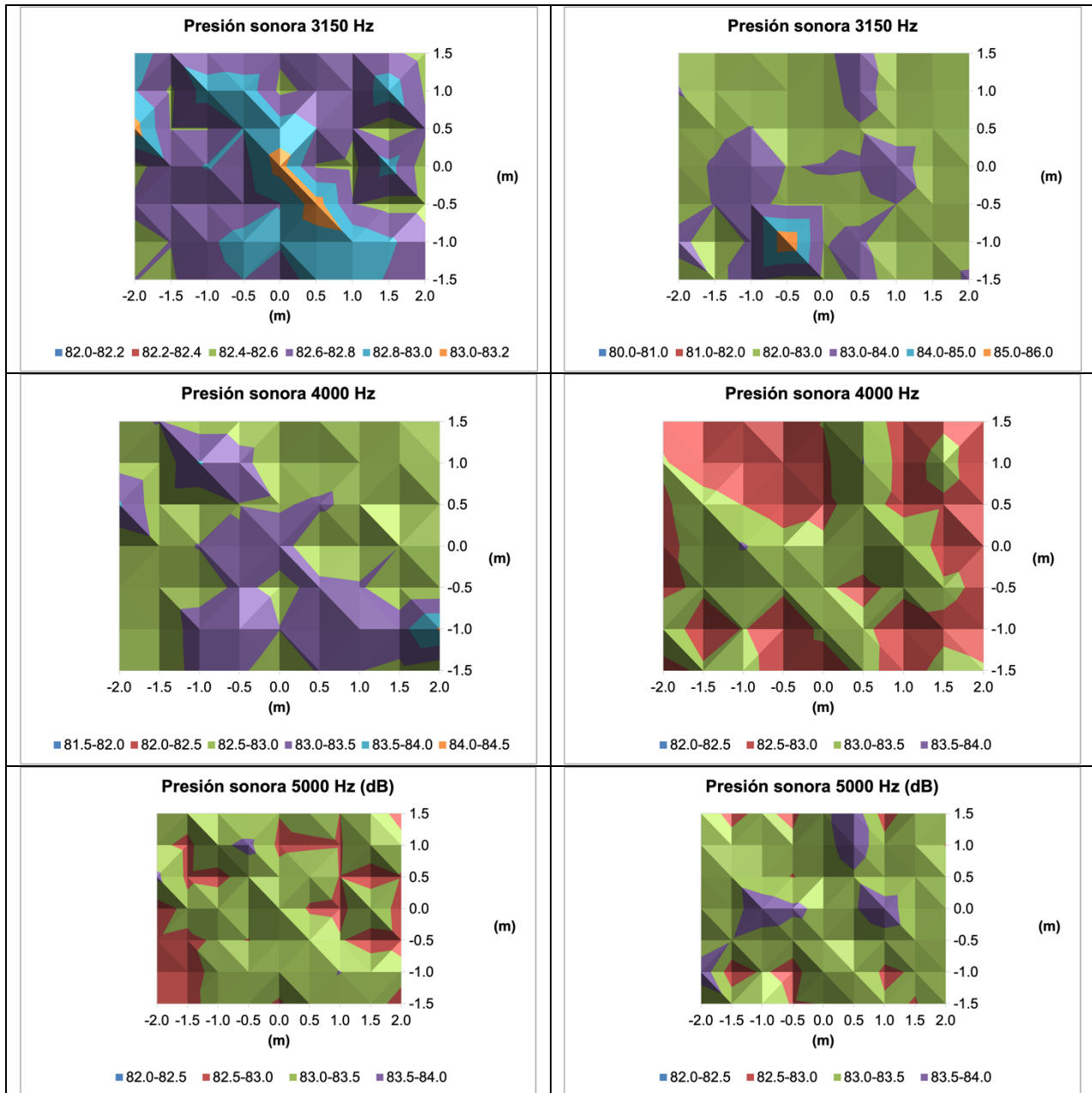


Tabla 59: Comparativa de distribución de niveles de presión según fuentes.

Se puede comprobar como al utilizar altavoces satélites junto a la fuente principal los puntos de alta presión acústica que se generan en el centro de la fachada debido a la directividad de éstos se suaviza, apareciendo más puntos de presión pero con menores diferencias entre máximos y mínimos.

## 12. Conclusiones

En conclusión, se ha construido un prototipo que a falta de algunas verificaciones mejora la cobertura de las fuentes directivas para medición de ruido en fachada existentes. Se considera que abre diversas líneas futuras de desarrollo y estudio en el tema, como pueden ser:

- Optimización de las medidas realizadas en la cámara anecoica mediante el sistema robotizado.
- Estudio de distintas configuraciones de altavoces para fuente directiva utilizando el software generado.
- Mejora del prototipo creado, con una madera de mayor espesor y materiales absorbentes en su interior para evitar resonancias no deseadas.
- Investigación de las posibles causas de la alteración de las medidas: si se revisan las tablas de resultados obtenidas con el prototipo se pueden ver grandes diferencias de nivel en las bandas de 1kHz y 2kHz que destacan sobre los resultados del resto de frecuencias, posiblemente debido a rebotes por la situación de la fuente en la cámara.

Como proyecto se ha considerado un trabajo muy interesante, en el que se han intentando aplicar los conocimientos adquiridos en la titulación. Ha sido una suerte poder utilizar el sistema robotizado para realizar las mediciones en la cámara anecoica y se considera una herramienta muy potente para procesos de medida tan repetitivos. De igual manera es muy interesante la programación de funciones de simulación en Matlab, que ayuda a comprender a fondo la propagación del sonido y a poder investigar de una manera sencilla como se comportan las fuentes en distintos escenarios. Por último, es de valorar poder construir un prototipo para llevar a la práctica las medidas teóricas y comprobar los resultados.

## 13. Referencias

- [1] Ramis Soriano, J., Martínez Mora, J.A., Uris Martínez, A., Alba Fernández, J., *Características generales de los transductores*, Universidad Politécnica de Valencia - Departamento de Física Aplicada, 1998-1999.
- [2] Ramis Soriano, J., Martínez Mora, J.A., Alba Fernández, J., Espinosa Roselló, V. *Transductores dinámicos*, Universidad Politécnica de Valencia - Departamento de Física Aplicada, 2002.
- [3] Olson H., *Acoustical engineering*, D. Van Nostrand Co., New York 1967.
- [4] Eargle J., *Handbook of sound Design*, Elar Publishing Co., New York 1989.
- [5] Thiele, A.N., *Loudspeakers in vented boxes*.
- [6] Small, R.H., *Simplified loudspeakers measurements at low frecuencies*.

## 14. Bibliografía

- Olson H. *Acoustical engineering*, D. Van Nostrand Co., New York 1967
- Sánchez Bote, José Luis/Gómez Alfageme, Juan José: *Procedimiento para la medición y verificación de la directividad y cobertura de una fuente sobre un elemento de fachada de acuerdo a la norma ISO 140-5*.
- Dickason, Vance: *Loudspeaker Design Cookbook*, Old Colony Sound Laborator, 1991.
- Joseph D´Apolito: *Testing loudspeakers*, Audio Amateur Press.
- AES: *Loudspeakers, An Anthology*, Vol 1 & 2.
- Brusi, José: *Directividad de altavoces. Terminología y Representaciones*.
- Alba Fernández, Jesús: *Temario de Transductores e Instrumentación Acústica*.
- NORMAS UNE: *Norma UNE-EN ISO 16283-3:2016: Medición in situ del aislamiento acústico en los edificios y en los elementos de construcción*.