

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

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

---



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA  
SUPERIOR DE GANDIA

# “Diseño de pantallas acústicas para reducir costes de fabricación”

**TRABAJO FINAL DE GRADO**

Autor/a:

**Francisco Segura Mateu**

Tutor/a:

**Jesús Alba Fernández**

**Fernando Tomàs Ibiza**

**GANDIA, 2013**

# Diseño de pantallas acústicas para reducir costes de fabricación.

**Francisco Segura Mateu**

## **Resumen**

El ruido es uno de los problemas medioambientales que mayor preocupación ha generado en los países de la Unión Europea en los últimos años. En consonancia, se han aprobado diversas normativas y legislaciones para intentar reducirlo. Uno de los grandes activos en la reducción de la contaminación acústica son las pantallas acústicas. Su instalación ha permitido reducir el ruido proveniente de todo tipo de industrias e infraestructuras. Existen diversos tipos de pantallas acústicas dependiendo de los materiales de fabricación y de sus formas geométricas. Conocer su comportamiento y rendimiento antes de ser instaladas es clave para asegurar su eficacia. El objetivo de este trabajo ha sido el estudio teórico de pantallas acústicas mediante el método de los elementos finitos para reducir los costes asociados al proceso de fabricación.

Palabras clave: pantallas acústicas, ruido, pérdidas por inserción, reducción costes, método de los elementos finitos.

## **Abstract**

Noise is one of the environmental problems that has generated most concern in the countries of the European Union in recent years. Accordingly, various regulations and laws have been adopted in order to reduce it. One of the greatest assets in reducing noise pollution are the noise barriers. Their installation has allowed to reduce the noise coming from all types of industries and infrastructures. There are various types of noise barriers depending on the manufacturing materials and their geometries. Knowing its behavior and performance before they are installed is crucial to ensure its effectiveness. The aim of this work has been the theoretical study of noise barriers by means of the finite element method in order to reduce the costs associated to the manufacturing process.

Keywords: noise barriers, noise, insertion loss, cost reduction, finite element method.

**Tutores:** Jesús Alba Fernández y Fernando Tomàs Ibiza.

# Índice:

I.	Introducción.....	4
I.1.	Pantallas acústicas.....	5
I.2.	Objetivos de este trabajo.....	6
II.	Clasificación de las pantallas acústicas.....	7
II.1.	Según los materiales de fabricación.....	7
II.1.1.	Pantallas acústicas de vidrio.....	7
II.1.2.	Pantallas acústicas de hormigón.....	8
II.1.3.	Pantallas acústicas de madera.....	9
II.1.4.	Pantallas acústicas con relleno de lana mineral.....	10
II.2.	Según geometría.....	11
II.2.1.	Pantallas delgadas.....	12
II.2.2.	Otras.....	14
III.	Modelo de simulación.....	16
III.1.	Pantalla acústica.....	16
III.2.	Geometría del modelo.....	17
III.3.	Materiales.....	19
III.4.	Condiciones de contorno.....	20
III.5.	Mallado.....	22
IV.	Resultados.....	23
V.	Conclusiones.....	48
	Agradecimientos.....	49
	Bibliografía.....	50

# I. Introducción.

Los países de la Unión Europea han experimentado un notorio crecimiento medioambiental en las últimas décadas, viéndose éste directamente reflejado en la calidad de vida de sus ciudadanos. Estos cambios surgidos como respuesta a las demandas de la sociedad, han sido posibles gracias al esfuerzo normativo y legislativo de los países miembros, que han posibilitado los avances mediante la creación y transposición a sus respectivas jurisdicciones de distintas Directivas Europeas.

Una de las preocupaciones medioambientales existentes desde los inicios de la Unión Europea ha sido la problemática que acarrea la contaminación acústica, cuya reducción ha pasado a ser una prioridad. Las molestias generadas por el ruido pueden acarrear posibles patologías como el trastorno del sueño, la pérdida de atención y rendimiento, o cambios de conducta, pudiéndose llegar incluso a causar riesgos para la salud y problemas de stress. Esta patente preocupación por paliar los efectos del ruido se ha visto refrendada en todos los países miembros de la Unión Europea. En España, por ejemplo, en relativamente pocos años se ha pasado a lidiar directamente con el problema mediante estudios acústicos, planes de acción y concienciación aprobados en propuestas legislativas a todos los niveles -tanto estatal como autonómico e incluso municipal-.

A grandes rasgos, los planes de actuación contra el ruido han quedado fijados mediante ley en dos ámbitos generales: uno planteado sobre la acción social, donde se atenta mediante multas y mediciones contra la contaminación acústica de las calles –derivada indistintamente de todo tipo de actividades, ruido de tráfico o incluso viandantes poco cívicos–, que tiene su legislación de aplicación a nivel estatal en la Ley 37, del Ruido, desarrollada mediante el Real Decreto 1513/2005 y el Real Decreto 1367/2007; y otra de rango más íntimo, donde se atenta directamente contra el problema desde el sector de la construcción, exigiendo unos mínimos de aislamiento acústico en todas las viviendas de nueva construcción con la intención de atenuar en su interior los problemas derivados de la inmisión de los ruidos de la calle y/o vecinos adosados. La legislación de aplicación para este caso es el Documento Básico de Protección Frente al Ruido del Código Técnico de la Edificación, con el que se pretende que todas las viviendas de nueva construcción presenten un rendimiento coherente con los tiempos actuales –esto es, sean viviendas sostenibles con el medio ambiente, estén preparadas para albergar las últimas tecnologías y tengan una elevada calidad en su construcción- y sobre todo, que estén dentro de un marco económico que sea asumible por el ciudadano medio. Desde la ley, que persigue, en suma, que cualquier ciudadano pueda preservar su derecho a la intimidad partiendo de una vivienda digna, se ha tenido gran incidencia en el estudio de la acústica, ya que esta está estrechamente ligada al derecho a la intimidad.

## I.1. Pantallas acústicas

Las infraestructuras viarias, ferroviarias y aeroportuarias suponen algunas de las mayores fuentes de ruido existentes en la actualidad. Por ello, desde el marco legislativo vigente se ha tratado de atenuar su influencia intentando por una parte que los vehículos que circulan por ellas no emitan unos niveles superiores a los establecidos, y por otra, obligando a que toda infraestructura de nueva creación sea objeto de un estudio acústico previo. Con ello se persigue que los niveles de ruido provenientes de las infraestructuras no supongan para las zonas habitables existentes, niveles de inmisión superiores a los permitidos por ley.

En la elaboración de los estudios acústicos realizados para predecir el nivel de ruido producido por las distintas infraestructuras -existentes o de nueva creación- existen varios factores a tener en consideración. El tipo de tráfico previsto, el tipo de asfalto, o incluso las velocidades y el caudal de los vehículos son factores que repercuten directamente en el nivel de ruido producido en las distintas infraestructuras. No obstante, sea cual sea el nivel de ruido previsto, el mayor activo utilizado a la hora de reducirlo son las pantallas acústicas, de ahí que su estudio y correcta instalación sean de gran importancia en la lucha contra la contaminación acústica.

Las pantallas acústicas son elementos constructivos utilizados para obstaculizar la propagación de ondas acústicas. Generalmente su instalación se debe a la necesidad de disminuir la contaminación acústica en zonas habitadas, proveniente de grandes fuentes de ruido como por ejemplo las industrias, o sobre todo, las infraestructuras viarias, ferroviarias y aeroportuarias. Se sitúan entre la fuente de ruido y el área afectada por ella, de manera que tras la instalación de la pantalla, se crea detrás de ésta un área donde se ven reducidos los niveles de ruido. Esta área se conoce como sombra acústica y se puede calcular mediante el uso de métodos idénticos a los aplicados en el estudio de la óptica, con la diferencia de que las ondas acústicas ocupan mayor longitud, debido a la difracción.

## I.2. Objetivos de este trabajo.

En este trabajo se pretende, mediante el software de análisis y simulación por elementos finitos COMSOL Multiphysics, modelizar una pantalla acústica de hormigón para, a partir del estudio de los resultados obtenidos de las pérdidas por inserción, determinar si es posible utilizar esta herramienta informática para el diseño genérico de pantallas acústicas. Con ello se pretende diseñar pantallas acústicas con unos resultados satisfactorios, lo cual repercutiría favorablemente en la disminución de los costes de fabricación.

Para establecer la idoneidad de los resultados a obtener en las simulaciones se utilizará como referencia los resultados obtenidos en el estudio el estudio de la 'University of Alberta' titulado 'Geometric Models to Model Acoustic Barriers Including Atmospheric Conditions' cuyo autor es Amirmohamed Muradali. En dicho estudio se realizaban varias simulaciones de distintos tipos de pantallas acústicas utilizando el software SYSNOISE.

El trabajo se divide en cuatro partes. En primer lugar se exponen los tipos de pantallas acústicas en función de sus propiedades geométricas y de los materiales empleados en su fabricación. Seguidamente, se considerará una pantalla de hormigón y se desarrollará un modelo de simulación. A continuación se presentarán y discutirán los resultados obtenidos mediante dicho modelo. Por último se formularán las pertinentes conclusiones.

## II. Clasificación de las pantallas acústicas.

Hay distintos tipos de pantallas acústicas y en su diseño influyen varios factores: desde el coste a los niveles de ruido a atenuar, así como las frecuencias a tratar. No obstante, se pueden englobar atendiendo a dos grandes características: su geometría -ancho, alto y largo de la pantalla- y el material o materiales que la componen.

En el siguiente apartado se describen los materiales más empleados en la construcción de pantallas acústicas. Las diferentes geometrías de las pantallas acústicas más utilizadas se detallan más adelante.

### II.1. Según los materiales de fabricación

La eficacia de las pantallas acústicas viene determinada por dos parámetros acústicos: el aislamiento acústico y el coeficiente de absorción sonora. El aislamiento acústico mide la cantidad de energía acústica que atraviesa la pantalla hacia la zona protegida por ésta, mientras que el coeficiente de absorción sonora mide la cantidad de energía producida por la onda sonora que se refleja hacia la fuente del ruido. Ambos parámetros cobran especial importancia en el diseño de pantallas acústicas, puesto que para asegurar una eficacia máxima, tanto la cantidad de energía reflejada de onda acústica, como la energía que atraviesa la pantalla deben ser lo más reducida posible.

Para el diseño de pantallas acústicas se toman en consideración tanto la geometría de la pantalla -altura, longitud, anchura y ubicación en relación con la fuente emisora de ruido-, como los materiales que la componen. En este apartado se van a describir los materiales más utilizados para la fabricación de pantallas acústicas, teniendo en cuenta tanto el material interior de la pantalla como el material que conforma la superficie de la pantalla. El material que compone la pantalla repercute en el aislamiento acústico de ésta, al mismo tiempo que la estructura de la superficie de la pantalla influye en la atenuación sonora, ya que el material limita la reflexión del sonido.

A continuación se detalla un resumen de los materiales más empleados en la fabricación de pantallas acústicas y sus características:

#### II.1.1. Pantallas acústicas de vidrio.

Generalmente, las pantallas acústicas más utilizadas son aquellas ubicadas con la finalidad de atenuar el ruido producido por las carreteras, colocadas paralelas al sentido de la marcha de los vehículos. Muchas de estas pantallas acústicas se

Diseño de pantallas acústicas para reducir costes de fabricación.

componen de paneles de vidrio -también llamados paneles transparentes o translúcidos- fabricados mediante extrusión, de forma que se consiguen paneles con longitudes de hasta 5 metros. Sus espesores suelen ser de 15 o 20 mm, dependiendo de fabricantes. Los paneles de vidrio son en su mayoría de vidrio acrílico o policarbonato y normalmente la base de su funcionamiento consiste en la reflexión de las ondas acústicas. Este tipo de pantallas son bastante utilizadas porque además de su función acústica, permiten la visibilidad de las zonas que quedan detrás de las pantallas.



*Imagen 1. Pantallas acústicas de vidrio*

### II.1.2. Pantallas acústicas de hormigón.

El hormigón es un material no poroso que con un modelado especial puede conseguir propiedades absorbentes. Cuando esto sucede, el hormigón pasa a poseer una cara formada por una serie de áridos de machaqueo, de distintos tamaños, que puede ser utilizado para pantallas acústicas por sus funciones de absorbente acústico. Además, en una pantalla acústica de hormigón, no sólo cobra importancia que propio el material confiera propiedades absorbentes a la pantalla, sino que también tiene relevancia la forma que tiene la cara que queda expuesta al ruido. De esta manera, se puede colocar el hormigón en forma de difusor, haciendo que las reflexiones que se producen por el sonido directo repartan su potencia en distintas direcciones, lo cual supone una mayor atenuación.

Diseño de pantallas acústicas para reducir costes de fabricación.



**Imagen 2.** Pantallas acústicas de hormigón

### II.1.3. Pantallas acústicas de madera.

Estas pantallas se fabrican de madera nórdica. Tienen una extensa gama de acabados, dependiendo de la posición de los paneles delanteros y consiguen un buen aislamiento acústico gracias al cerramiento hermético de las juntas. Existen también pantallas acústicas fabricadas en madera, formadas por una doble pared de troncos que alberga tierra en su interior.



**Imagen 3.** Pantallas acústicas de madera

#### II.1.4. Pantallas acústicas con relleno de lana mineral.

Se basan en lo que se conoce como sistema sándwich, compuesto por dos láminas lisas o perforadas pintadas al horno, con una lámina interna de lana de roca con elevado coeficiente de absorción. Algunos ejemplos de estos tipos de pantallas acústicas son las pantallas metálicas con panel perforado, que por lo general, poseen una alta absorción y están construidas por paneles modulares metálicos con un material absorbente acústico en su interior. Por lo general, la estructura soporte suele construirse con perfiles verticales de acero, anclados al suelo mediante cimentación o hincados en el terreno, calculados y dimensionados según sea el esfuerzo a soportar. Los paneles modulares poseen la función tanto de aislamiento como de absorción acústica y están contruidos por los siguientes elementos:

- Carcasa: se realiza con chapa plegada, de acero o de aleación de aluminio de alta resistencia, con acabado pintado. Es el elemento que confiere de aislamiento acústico al modulo.

- Material absorbente: confiere de absorción acústica al módulo y conjuntamente con la carcasa, también de aislamiento acústico. Está constituida por materiales tales como la lana mineral o la fibra de vidrio.

- Rejilla de protección: se realiza con chapa perforada de acero o de aleación de aluminio de alta resistencia, con acabado pintado. No confiere de propiedades acústicas a la pantalla. Su misión es la proteger el material absorbente y aportar el acabado de la pantalla.

Este tipo de pantallas permite ofrecer elevados índices de absorción acústica, para el conjunto de la pantalla aislada.

Existen además de las nombradas las llamadas pantallas verdes, que son terraplenes con vegetación plantada en ellos.



**Imagen 4.** Pantallas acústicas con relleno de lana mineral.

## II.2. Según geometría.

La eficacia de una pantalla acústica se mide habitualmente mediante la pérdida por inserción ( $IL_{pantalla}$ ). Este parámetro se define para un punto determinado como, para una banda de octava, la diferencia entre los niveles de presión sonora de la banda medidos en ese punto, antes y después de la instalación de la pantalla:

$$IL_{pantalla} = L_p(\text{antes}) - L_p(\text{después}) [1]$$

Este parámetro es el que se suele tener en cuenta a la hora de ubicar una pantalla. Su importancia radica en que la pantalla, además de introducir la atenuación debida a la difracción, al aumentar la altura del recorrido del rayo por encima del suelo también suele reducir la atenuación debida al suelo.

La pérdida por inserción de una pantalla varía dependiendo de distintos parámetros, siendo el más restrictivo la frecuencia (las frecuencias altas son más atenuadas).

La pérdida por inserción puede determinarse mediante cálculo o mediante mediciones normalizadas. Las mediciones acústicas no entran dentro del objeto de este trabajo, por tanto sólo se indica a continuación como obtener el cálculo teórico de la pérdida por inserción de distintos tipos de pantallas, desde el caso más simple que además es también el más habitual, al los más complejos. Para ello se parte de la asunción de

Diseño de pantallas acústicas para reducir costes de fabricación.

que la pantalla es muy larga en relación a su altura y de que el sonido es emitido por una fuente puntual.

### II.2.1. Pantallas delgadas.

Las pantallas delgadas son las más sencillas de calcular y también las más habituales. Se considera pantalla delgada a aquella que atenúa el sonido mediante una única difracción, como se muestra en la Figura 1. Son ejemplos de estos tipos de pantallas acústicas las vallas sólidas o los muros.

Para el cálculo de la pérdida por inserción para un sonido de longitud de onda  $\lambda$ , se determina en primer lugar el número de Fresnel  $N$  que se define como

$$N = (2/\lambda)[d_1 + d_2 - d] \quad [2]$$

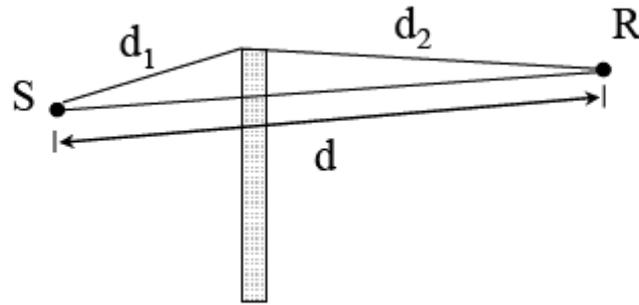
donde  $d_1, d_2$  y  $d$  son las distancias que muestra la Figura 1.

Para este valor  $N$ , se calcula la pérdida por inserción  $IL_{pantalla}$  a partir de la siguiente expresión:

$$IL_{pantalla} = 10\log[3 + 10NK] - A_{suelo} \quad [3]$$

El término  $A_{suelo}$  de la ecuación anterior es la atenuación aportada por el suelo antes de que se insertara la pantalla. El primer término de la ecuación corresponde a la atenuación que aporta la propia pantalla más cualquier otra atenuación todavía eficaz en la vía de propagación, resultado del suelo y de los efectos atmosféricos después de la instalación. En la ecuación,  $K$  es el factor de la corrección para los efectos atmosféricos. Para distancias entre la fuente y el receptor inferiores a 100 m,  $K=1$ , lo que significa que los efectos atmosféricos pueden ignorarse.

Los valores negativos en la ecuación se igualan a cero.



**Figura 1** - Distancias fundamentales del método para calcular la  $IL_{pantalla}$  de una pantalla delgada

**Efectos del viento y la temperatura.** Los rayos curvados ascendentes, como en el gradiente de temperatura característico de los días soleados, no reducen el rendimiento acústico de una pantalla. Sin embargo, los rayos curvados descendentes, como sucede en la propagación descendente o las inversiones de T habituales durante la noche, reducen la pérdida de inserción de la pantalla. Esta reducción varía con la distancia de propagación.

Para una distancia  $r$  entre la fuente y el receptor inferior a 100 m, la reducción suele ser insignificante; en este caso, el cálculo puede realizarse igualando  $K$  a 1 en la ecuación, para una precisión de 1 dB.

Por otra parte, para distancias  $r$  superiores a 300 m, la influencia de las condiciones meteorológicas habitualmente se traduce en valores muy bajos de pérdida por inserción.

Finalmente, para distancias intermedias ( $100 \text{ m} < r < 300 \text{ m}$ ), la reducción aumenta gradualmente al aumentar la distancia  $r$ . Dentro de este rango la pérdida por inserción de una pantalla delgada puede calcularse para condiciones atmosféricas favorables a la propagación (entendiéndose éstas como refracción descendente) usando la ecuación [3], con el factor  $K$  de corrección atmosférica obtenido mediante la siguiente ecuación:

$$K = e^{-0.0005 \left( \sqrt{\frac{d_1 d_2 d}{N \lambda}} \right)} \quad [4]$$

donde los parámetros  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d$  y  $N$  tienen el mismo significado que en la Figura 1 y la ecuación [2]. Este cálculo aporta el valor para el peor caso de pérdida por inserción de una pantalla delgada.

Frecuencia (Hz)	N	A <sub>suelo</sub> (dB)	IL <sub>pantalla</sub> (dB)
125	0,56	-4,8	14,1
250	1,12	-1,0	12,5
500	2,24	11,5	2,5
1000	4,48	4,8	12,0

**Tabla 1.** Muestras de cálculo de la pérdida por inserción para cuatro bandas de frecuencia. *N* es el número de Fresnel, *A<sub>suelo</sub>* es la atenuación de la pantalla e *IL<sub>pantalla</sub>* es la pérdida por inserción o eficacia de la pantalla. Véase ecuación [2].

## II.2.2. Otras.

**Pantallas gruesas.** Se considera pantalla gruesa a toda aquella que atenúa el sonido mediante una difracción doble, como muestra la Figura 2. Son ejemplos de este tipo de pantallas un edificio o un dique de tierra. Si la dimensión de la anchura de la pantalla (*t* en la Figura 2), es mayor de 3 m, se considera que la pantalla es gruesa para los componentes de sonido de todas las frecuencias. Si por el contrario la anchura es inferior a 3 m, la pantalla se considera gruesa para los componentes cuya longitud de onda sea inferior a *t*/5. Siempre que no se cumplan estas condiciones, la pantalla se considera delgada y su pérdida por inserción se calcula mediante la ecuación [3].

En el caso de una pantalla gruesa, el número de Fresnel *N* se calcula en primer lugar a partir de la siguiente expresión:

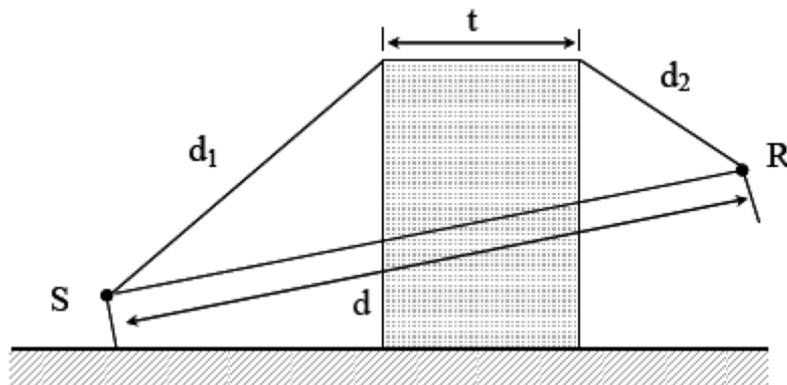
$$N = (2/\lambda)[d_1 + t + d_2 - d] \quad [5]$$

donde *d*<sub>1</sub>, *d*<sub>2</sub>, *d* y *t* son las distancias que muestra la Figura 2.

La pérdida por inserción de la pantalla puede calcularse entonces a partir de la siguiente expresión:

$$IL_{pantalla} = 10\log[3 + 30NK] - A_{suelo} \quad [6]$$

donde  $K$  es el factor de corrección atmosférica de la ecuación [4], pero con el grosor  $t$  que se añade a la menor de las dos distancias,  $d_1$  o  $d_2$ , en la ecuación. Para distancias de propagación inferiores a 100 m,  $K$  puede igualarse a 1, como ocurre con las pantallas delgadas. Los valores negativos obtenidos en la ecuación [6] para la pérdida por inserción se igualan a cero.



**Figura 2.** Distancias fundamentales del método para calcular la pérdida por inserción  $IL_{pantalla}$  de una pantalla gruesa.

**Fuente y receptor elevados.** Si en la Figura 1 se dan las siguientes condiciones:

- La distancia entre la fuente y la pantalla ( $d_1$ ) es inferior a 5 m,
- La altura de la fuente por encima del suelo es mayor que  $d_1$
- La altura del receptor es superior a  $d_2$

La pérdida por inserción de la pantalla se calcula utilizando esta sencilla fórmula:

$$IL_{pantalla} = 10\log 20N \quad [7]$$

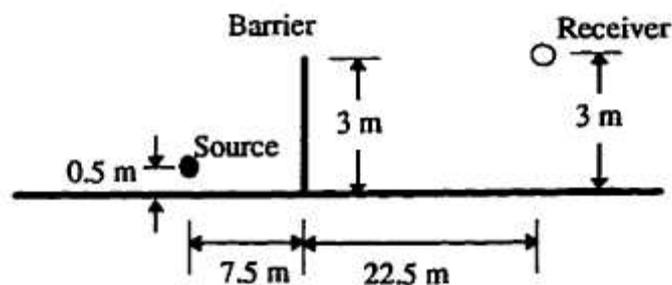
donde  $N$  se calcula a partir de la ecuación [2] en el caso de pantallas delgadas y con la ecuación [3] para las pantallas gruesas.

### III. Modelo de simulación.

En este apartado se describen las consideraciones tomadas para realizar el modelo de simulación de la pantalla acústica objeto de estudio.

#### III.1. Pantalla acústica.

Para la creación del modelo de simulación, se ha elegido una de las pantallas acústicas estudiadas en el estudio titulado 'Geometric Models to Model Acoustic Barriers Including Atmospheric Conditions' cuyo autor es Amirmohamed Muradali. En concreto se ha elegido una pantalla delgada de hormigón de 3 metros de altura y 0.15 metros de grosor. La fuente emisora es una fuente puntual situada a una altura de 0.5 metros del suelo, ubicada a una distancia de 7.5 metros respecto a la pantalla acústica. El receptor se ubica a la misma altura de la pantalla, 3 metros de altura, y a una distancia de la pantalla acústica de 22.5 metros, y a 30 metros de la fuente emisora. La Figura 2 muestra un esquemático de la pantalla acústica utilizada en dicho estudio.



**Figura 2.** Esquemático de la pantalla acústica utilizada en 'Geometric Models to Model Acoustic Barriers Including Atmospheric Conditions' de Amirmohamed Muradali.

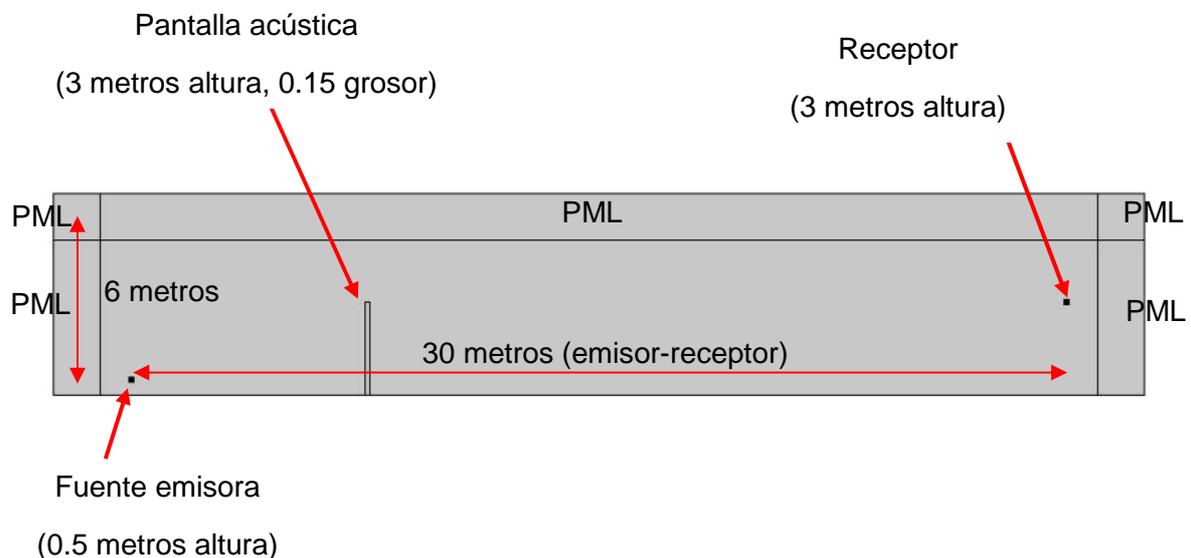
El estudio de pantallas acústicas mediante métodos analíticos y experimentales es difícil debido a los diferentes fenómenos físicos involucrados. En consecuencia, técnicas numéricas como el método de los elementos finitos (FEM – Finite Element Method) son una buena alternativa.

El módulo de acústica del software comercial COMSOL Multiphysics ha sido empleado para llevar a cabo las simulaciones objeto de este trabajo. COMSOL es un programa de ingeniería, diseño y análisis por elementos finitos para el modelado y simulación de cualquier sistema físico. Su punto fuerte radica en su capacidad para simular fenómenos multifísicos. Esto son dos o más fenómenos físicos que se afectan unos a otros sin importar cuantas o qué combinaciones.

### III.2. Geometría del modelo.

A continuación, se expondrán de forma detallada las consideraciones tomadas en cuenta para desarrollar la geometría del modelo de simulación.

Se asume que las características de la pantalla hacen posible su análisis en un plano de dos dimensiones. Un análisis en 3D sería computacionalmente mucho menos eficiente dada su mayor complejidad, y a pesar de ello, no daría mejores resultados. La geometría 2D de la pantalla acústica se muestra en la Figura 3. Con el modelo de simulación se pretende estudiar las pérdidas por inserción introducidas por la pantalla de hormigón en el rango de frecuencia que va desde los 50 Hz a los 2 KHz.



**Figura 3.** Geometría del modelo.

El modelo de simulación consta de dos estudios en el dominio de la frecuencia que van desde los 50 Hz a los 2 KHz, con intervalos de 50 Hz. En el primer estudio se obtienen los niveles de presión sonora en el receptor a las distintas frecuencias sin que exista la pantalla acústica de hormigón. Esto se lleva a cabo definiendo todos los dominios del modelo, incluido el correspondiente a la pantalla, como aire (caracterizado por su densidad y velocidad del sonido). En el segundo estudio se vuelven a calcular los niveles de presión sonora en el receptor para todas las frecuencias, pero esta vez se define el dominio de la pantalla como hormigón (caracterizado por su densidad, módulo de Young y coeficiente de Poisson).

Las pérdidas por inserción se obtendrán restando el resultado del segundo estudio al resultado del primer estudio, es decir, restando en cada una de las frecuencias calculadas, el nivel de presión sonora en el receptor con pantalla (segundo estudio) al nivel de presión sonora en el receptor sin pantalla (primer estudio).

Como se aprecia en la Figura 3, el punto definido como fuente, se ubica a una altura de 0.5 metros sobre el suelo. La pantalla se sitúa a 7.5 metros de distancia de la fuente. El receptor queda situado a 22.5 metros de la pantalla acústica. Se considera el suelo como un material 100% reflectante.

Idealmente, para que el modelo fuera lo más fidedigno posible y sus resultados pudieran considerarse equivalentes a los que se obtendrían con la realización de mediciones acústicas, la simulación del modelo debería abarcar espacialmente hasta el infinito. Obviamente esto no es posible, no obstante sí se pueden definir cálculos computacionales del modelo que den resultados equivalentes a los que daría si se simulara espacialmente hasta el infinito. Para ello, se acota el modelo utilizando para su simulación capas perfectamente adaptadas (PML - Perfectly Matched Layers). Así, los límites físicos del modelo vienen definidos a partir de estas capas perfectamente adaptadas (PML). Las capas perfectamente adaptadas son dominios encargados de absorber la radiación incidente sin producir reflexiones. De este modo, se trunca el dominio computacional, poniéndole unos límites físicos que den resultados equivalentes a un área de propagación infinita. La formulación de las PML introduce una transformación de coordenadas de valor complejo bajo el requisito adicional de que la impedancia de onda no debe verse afectada. Las PML se auto escalan para amortiguar una cierta longitud de onda existente en el sistema. Esta longitud de onda se deduce considerando la frecuencia objeto de estudio y una velocidad de onda de referencia (parámetro  $c_{ref}$  en COMSOL). En nuestro caso se establece un valor de 343 m/s para este parámetro, correspondiente a la velocidad del sonido en el aire.

### III.3. Materiales.

El material de la pantalla, hormigón, se considera isotrópico elástico lineal. Un material se considera isotrópico si sus propiedades no varían con la dirección. Los materiales isotrópicos, tienen un módulo elástico, un coeficiente de Poisson, una conductividad térmica, un coeficiente de expansión térmica, etc. idénticos en todas direcciones. Definimos el material de la pantalla acústica mediante su densidad, módulo de Young y coeficiente de Poisson. Las propiedades del material usado para definir la pantalla figuran en la Tabla 2:

	<b>Hormigón</b>
<b>Densidad, <math>\rho</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2300
<b>Módulo de Young, E (GPa)</b>	25
<b>Coefficiente de Poisson, <math>\nu</math> (-)</b>	0.33

*Tabla 2. Propiedades del material usado para definir la pantalla.*

El fluido (aire) donde está embebida la pantalla, se considera elástico lineal y se define mediante su densidad y velocidad del sonido. Las propiedades usadas para definir el fluido figuran en la Tabla 3:

	<b>Aire</b>
<b>Densidad, <math>\rho</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1.2
<b>Velocidad del sonido, c (m/s)</b>	343

*Tabla 3. Propiedades del material usado para definir el fluido.*

### III.4. Condiciones de contorno.

Las interfaces físicas del módulo de acústica permiten simular la propagación del sonido en fluidos y sólidos.

La interfaz de “Interacción acústica-sólido, Frecuencia (acsl)” combina acústica de presión en el dominio de la frecuencia, donde se resuelve la ecuación de Helmholtz, y mecánica de sólidos, acoplando la presión acústica en el dominio fluido con la deformación estructural en el dominio sólido. La propagación del sonido tiene lugar a través de oscilaciones elásticas de pequeña amplitud de su forma. Estas oscilaciones elásticas se definen como ondas elásticas. La interacción acústica-sólido se refiere a un fenómeno multifísico donde la presión del fluido provoca una carga del fluido en el dominio sólido, y la aceleración estructural afecta el dominio fluido como una aceleración normal a través del contorno fluido-sólido.

Las variables dependientes que COMSOL resuelve en esta interfaz son:

- Presión:  $p$
- Campo de desplazamiento:  $u$
- Componentes del campo de desplazamiento:  $u$   
 $v$   
 $w$

La estructura sobre la que COMSOL trabaja es un sistema de Ecuaciones Diferenciales Parciales (PDEs – Partial differential equations), una descripción matemática de varios fenómenos físicos basados en las leyes de la ciencia.

La ecuación regente para mecánica estructural es:

$$-\rho\omega^2\vec{u} + d_a j\omega\vec{u} - \nabla \cdot \vec{\sigma} = \vec{f}$$

The diagram illustrates the equation of motion for structural mechanics,  $-\rho\omega^2\vec{u} + d_a j\omega\vec{u} - \nabla \cdot \vec{\sigma} = \vec{f}$ . Arrows point from the following labels to their respective terms in the equation:

- Densidad** points to  $\rho$ .
- Coefficiente de amortiguación** points to  $d_a$ .
- Desplazamiento** points to  $\vec{u}$ .
- Estrés** points to  $\vec{\sigma}$ .
- Fuerza** points to  $\vec{f}$ .

Diseño de pantallas acústicas para reducir costes de fabricación.

La ecuación regente para presión acústica es:

$$\nabla \cdot \left( -\frac{1}{\rho_0} (\nabla p - \mathbf{q}) \right) - \frac{\omega^2 p}{\rho_0 c^2} = Q$$

The diagram shows the acoustic pressure equation with arrows pointing from labels to specific parts of the equation:

- Frecuencia angular** points to  $\omega$  in the denominator of the second term.
- Fuente monopolo** points to  $Q$ .
- Velocidad del sonido en el medio fluido** points to  $c$  in the denominator of the second term.
- Densidad del medio fluido** points to  $\rho_0$  in the denominator of the first term.
- Presión** points to  $p$  in the first term.
- Fuente dipolo** points to  $\mathbf{q}$  in the first term.

Ambas son ecuaciones de onda, linealizadas en el dominio de la frecuencia.

La fuente emisora se modela utilizando una condición de punto de potencia, que actúa como una fuente de potencia en un punto en W/m. Se define en dicho punto una potencia de referencia de 0.5 W/m. Además, cabe destacar que el contorno inferior de la pantalla se considera fijo, para lo cual se define el vector del desplazamiento como igual a cero.

### III.5. Mallado.

El conjunto de simulaciones realizadas en este trabajo son en el dominio de la frecuencia. Las frecuencias estudiadas van desde los 50 hasta los 2 KHz en intervalos de 50 Hz.

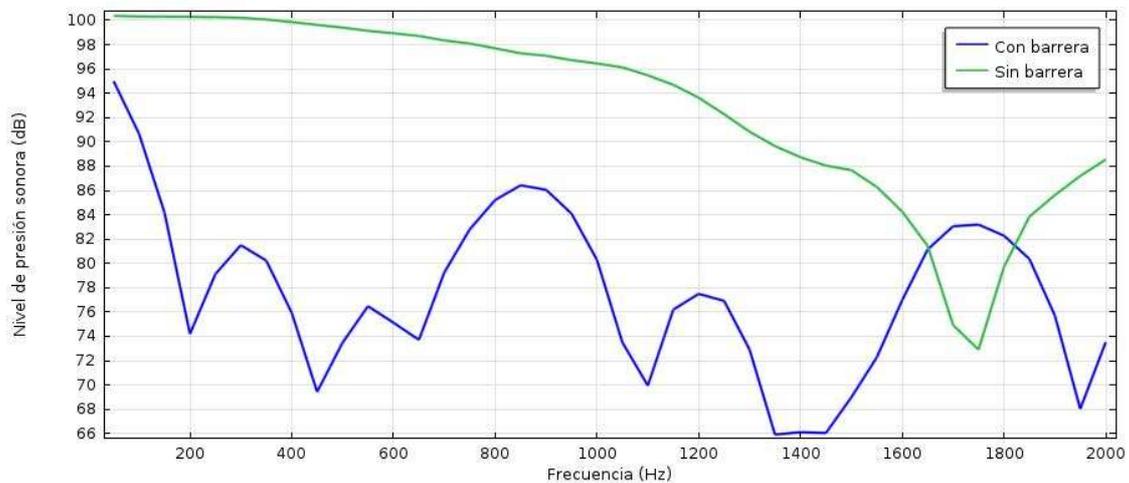
Se emplea un mallado triangular no estructurado. Cuando se emplea el método de los elementos finitos para resolver problemas de propagación de ondas, es necesario emplear un mallado que resuelva la longitud de onda más pequeña. La longitud de onda más pequeña corresponderá a la de la frecuencia más alta. Con resolver se entiende que para una simulación 2D, nuestra malla debe tener al menos 8 elementos por longitud de onda. Esta consideración permitirá que nuestra malla posea la suficiente densidad para describir con precisión la propagación de las ondas.

En nuestro caso la frecuencia más alta es 2 KHz, por lo tanto la longitud de onda más pequeña será  $343[\text{m/s}] / 2000[\text{Hz}]$ . Dado que cada longitud de onda debe contener al menos 8 elementos de malla, el tamaño máximo de elemento de malla corresponderá por tanto a  $343[\text{m/s}] / 2000[\text{Hz}] / 8$ .

## IV. Resultados.

En este capítulo se exponen los resultados de las simulaciones de la pantalla acústica delgada de hormigón objeto de este trabajo. En el apartado III se han explicado con detalle las características de la pantalla, y en los apartados posteriores las características del modelo de simulación.

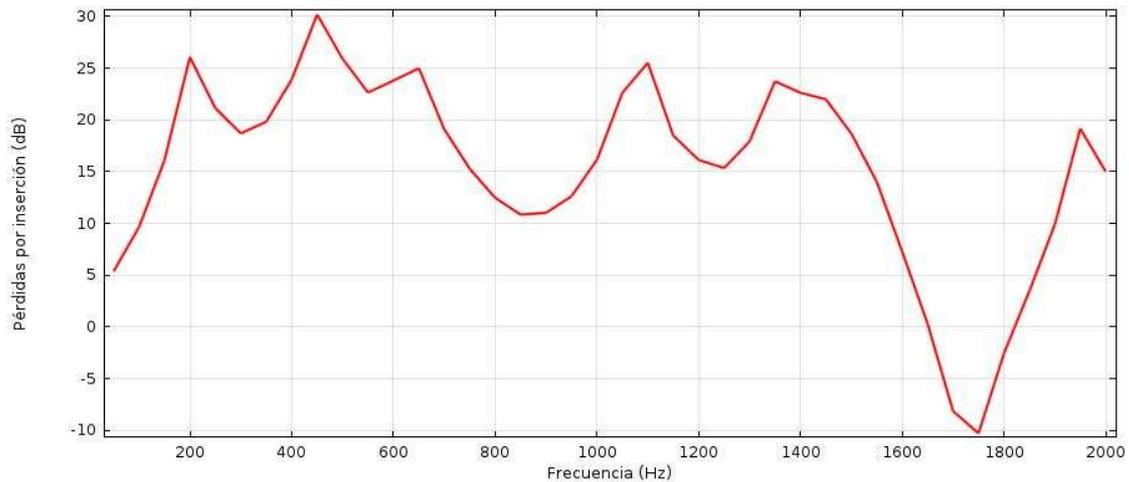
A continuación se muestran los distintos post-procesados de los resultados. En primer lugar se muestran los realizados para la obtención de las pérdidas por inserción. La Figura 4 muestra dos curvas que corresponden a los niveles de presión sonora (SPL) obtenidos en el punto definido como receptor, para el rango de frecuencias entre los 50 Hz y los 2 KHz con la pantalla acústica y sin la pantalla acústica.



**Figura 4.** Nivel de presión sonora al receptor con y sin pantalla

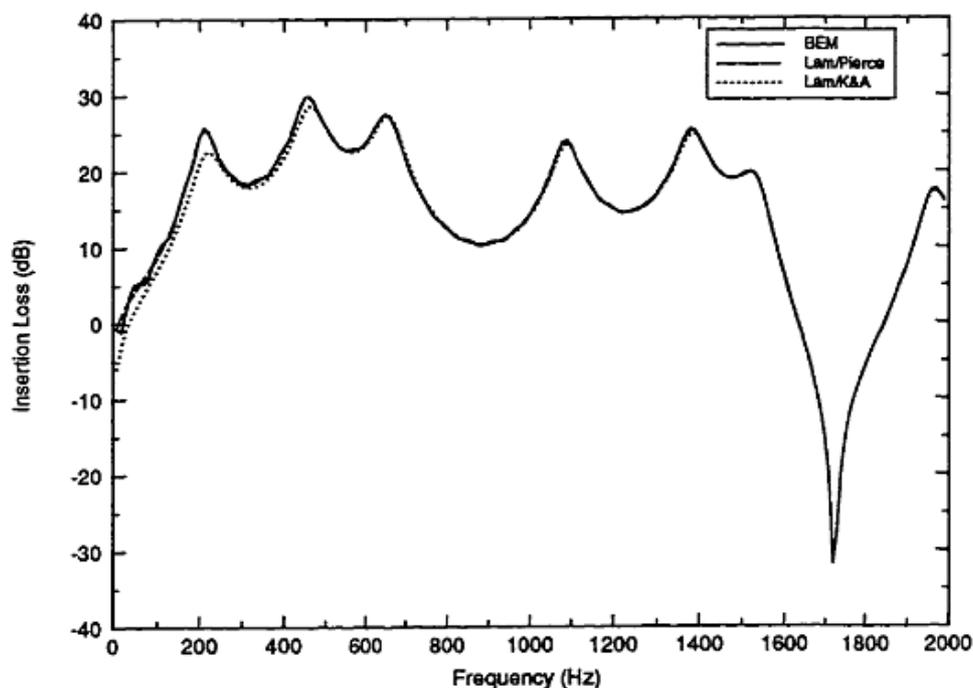
A partir de los resultados obtenidos en la Figura 4, es posible calcular las pérdidas por inserción. En la Figura 5 se muestran estos resultados, obtenidos restando los niveles de presión sonora en el receptor con la pantalla (curva azul) a los resultados obtenidos sin pantalla (curva verde), para el rango comprendido entre los 50 Hz y los 2 KHz.

Diseño de pantallas acústicas para reducir costes de fabricación.



**Figura 5.** Pérdidas por inserción

Los resultados obtenidos en la Figura 5, son muestran buena correlación con los mostrados en el estudio de referencia para este proyecto -'Geometric Models to Model Acoustic Barriers Including Atmospheric Conditions' de Amirmohamed Muradali- cuyos resultados finales para la pantalla descrita eran los que se muestran en la Figura 6. Con ello, se puede concluir que el diseño realizado es satisfactorio y por tanto se puede partir de él para obtener un mayor número de resultados, acorde a las posibilidades que ofrece COMSOL. Esto nos dará mayor información sobre la pantalla.

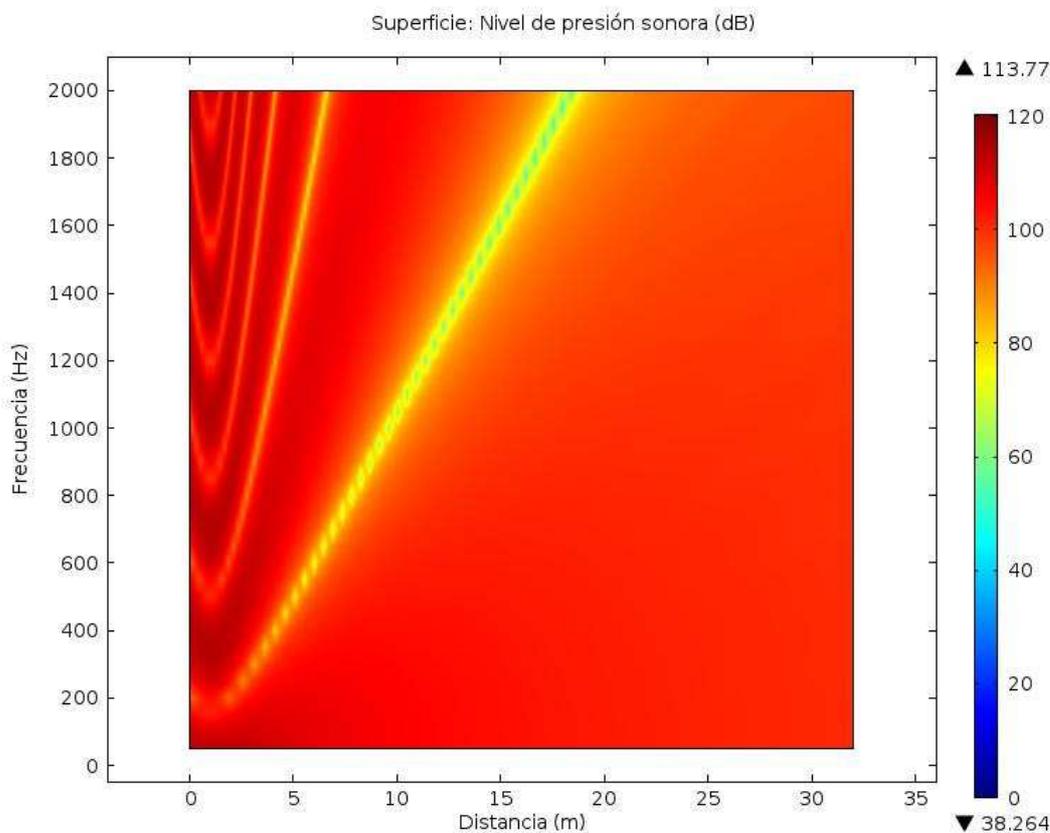


**Figura 6.** Pérdidas por inserción obtenidas en -'Geometric Models to Model Acoustic Barriers Including Atmospheric Conditions' por Amirmohamed Muradali.

Diseño de pantallas acústicas para reducir costes de fabricación.

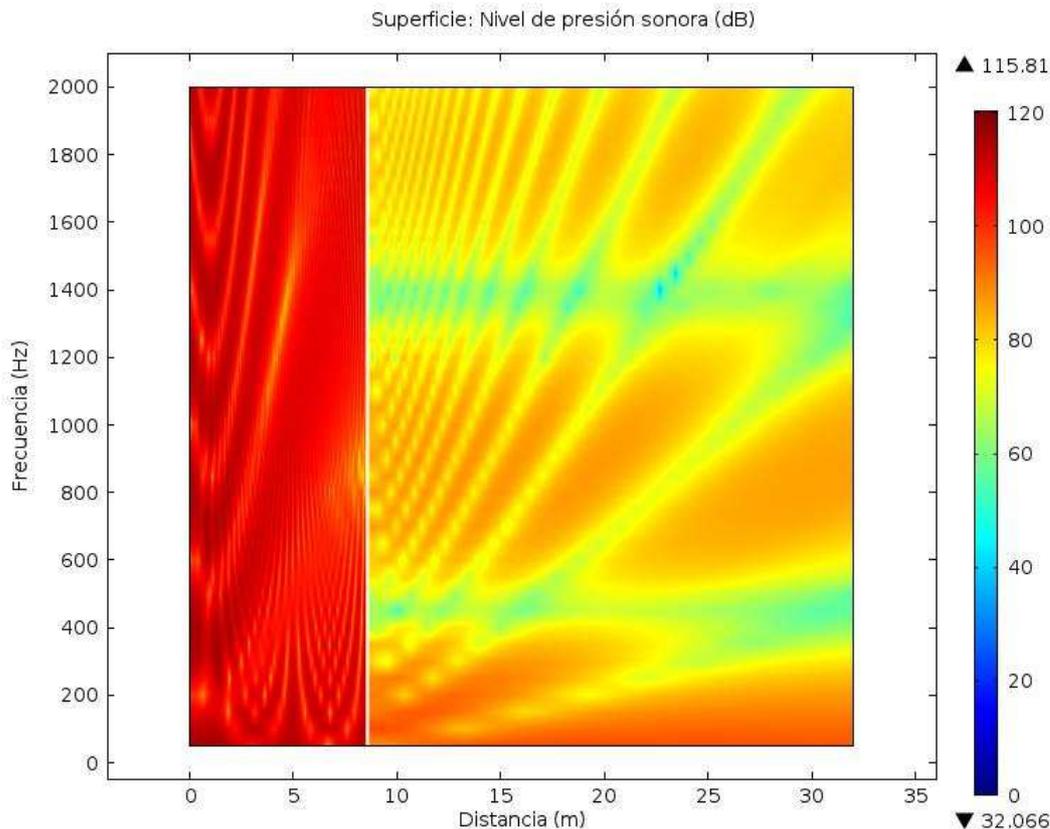
El segundo post-procesado tiene como objeto obtener los valores del nivel de presión sonora a lo largo de una línea de corte que recorre todo el dominio de propagación a 1 metro de altura. Esto nos permitirá obtener dos gráficos de extrusión, uno para los resultados sin pantalla y otro para los resultados con pantalla. Lo interesante de estos gráficos de extrusión es que podemos ver el nivel de presión sonora en todo el dominio respecto a la frecuencia, no en un solo punto como en el gráfico anterior. Esto nos da una idea mucho más precisa del efecto que tendrá la pantalla.

La Figura 7 muestra los resultados provenientes del cutline sin pantalla. Como se puede observar, el nivel de presión sonora es muy alto a todas las frecuencias, y apenas sufre alguna variación con la distancia respecto a la fuente.



**Figura 7.** Cutline sin pantalla

Por el contrario, la Figura 8 corresponde a los resultados provenientes del cutline con pantalla. La pantalla se localiza a los 8.5 m del eje x. El gráfico muestra una disminución muy considerable del nivel de presión sonora a todas las frecuencias tras la pantalla.



**Figura 8.** Cutline con pantalla.

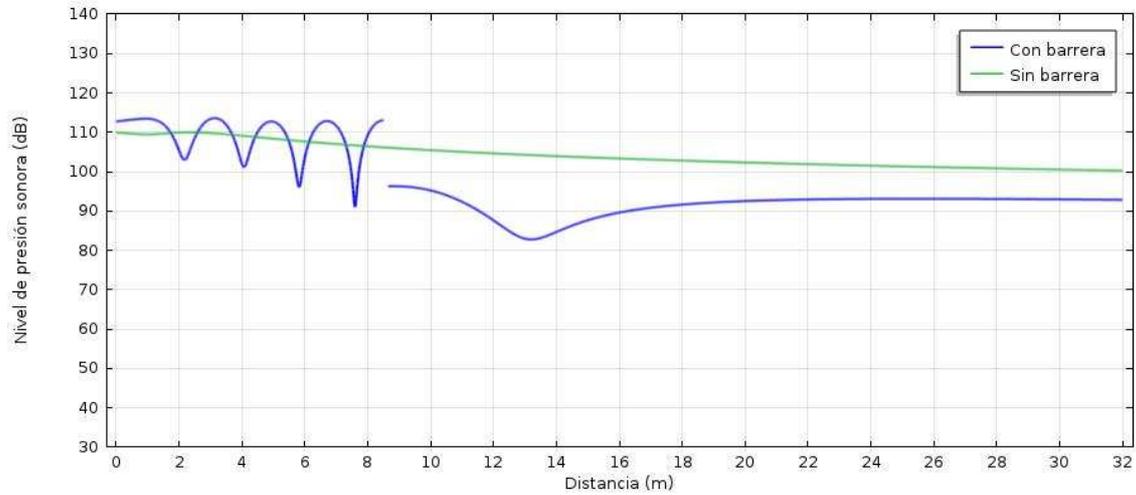
El comportamiento de la pantalla acústica depende directamente de la frecuencia. Por ello, y con la intención de obtener mayor detalle e información acerca de su comportamiento, se han post-procesado los resultados para frecuencias puntuales. A tal efecto se han definido post-procesamientos diferentes para cada frecuencia obteniendo un total de 160 graficas de resultados. A continuación se van mostrar y comentar los cuatro gráficos de post-procesado para las frecuencias que van desde los 100 Hz a los 1000 Hz en intervalos de 100 Hz. El resto de los resultados de la simulación entre 50 Hz y 2 KHz se pueden encontrar en el Anexo A – Resultados.

En primer lugar se muestran los resultados correspondientes a la frecuencia de 100 Hz.

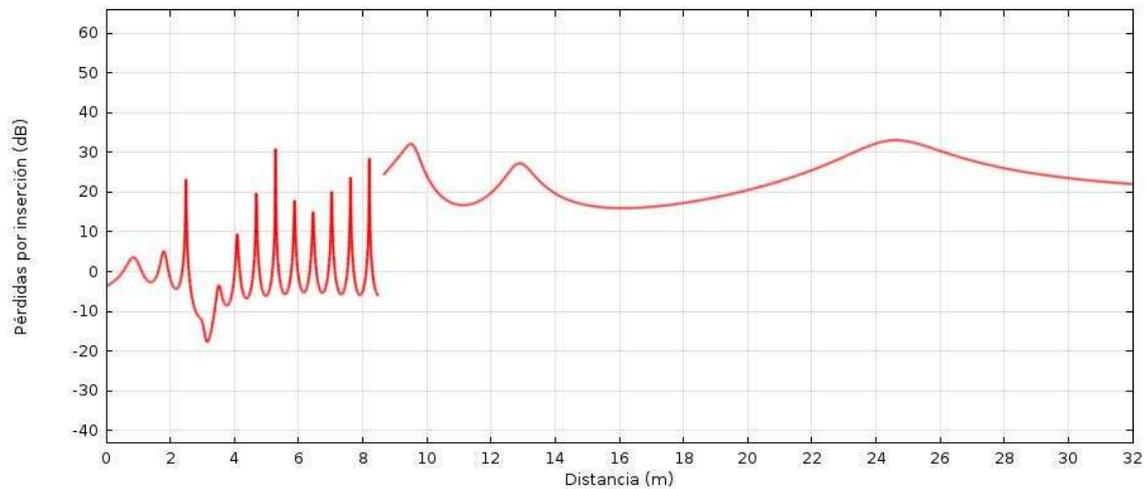
En la Figura 9 se muestra, para la línea de corte anteriormente descrita (ubicada a 1 metro sobre el suelo), los resultados del nivel de presión sonora obtenidos a la frecuencia de 100 Hz, tanto sin la pantalla como con ésta. Ambos resultados se muestran simultáneamente, lo cual permite apreciar la disminución del nivel de presión sonora cuando se instala la pantalla para esta frecuencia. La siguiente imagen, Figura 10, muestra, para la línea de corte, los resultados de la pérdida por inserción de la pantalla acústica a 100 Hz. Estos resultados son consecuencia de restar los niveles de presión sonora existentes sin la pantalla a los habidos con la pantalla ya instalada (mostrados en la Figura 9). Comparados con los resultados obtenidos para esta misma frecuencia, pero referidos a un receptor ubicado a 3 metros de altura y a 22.5 metros

Diseño de pantallas acústicas para reducir costes de fabricación.

respecto a la pantalla (mostrados en la Figura 5), se obtiene que las pérdidas por inserción obtenidas en la línea de corte son netamente superiores.



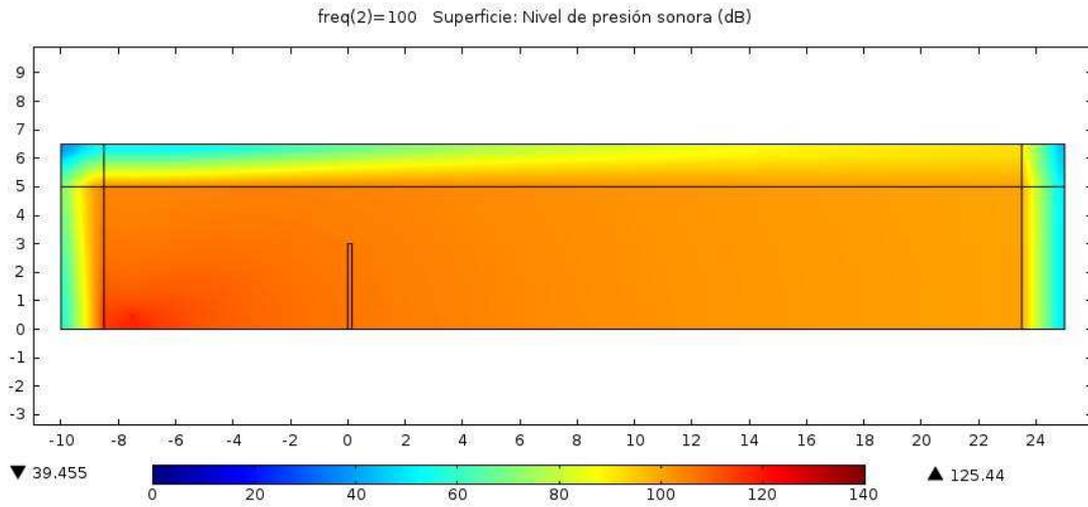
**Figura 9.** Nivel de presión sonora con y sin pantalla en la línea de corte a 100Hz.



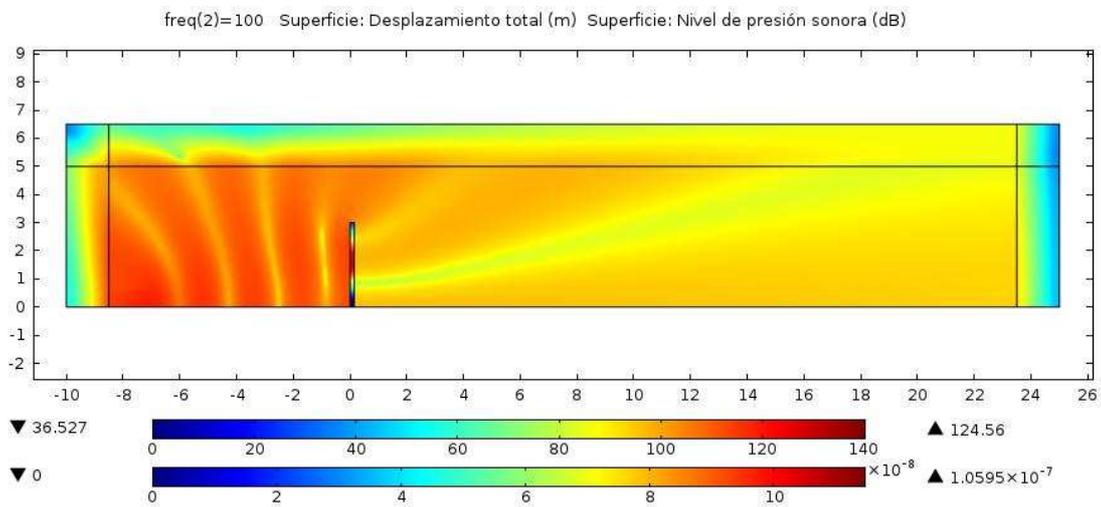
**Figura 10.** Pérdidas por inserción en la línea de corte a 100 Hz.

A continuación, las Figuras 11 y 12 muestran los niveles de presión sonora en el dominio de propagación. En la Figura 11, se puede observar los niveles de presión sonora existentes en el dominio de propagación sin la instalación de la pantalla. Cabe destacar que la pantalla aparece dibujada en la gráfica a modo de facilitar la comparación visual con los resultados obtenidos en la Figura 12, donde se muestran los resultados obtenidos una vez ya se ha colocado la pantalla. Como se observa al comparar ambas gráficas, la instalación de la pantalla produce una patente disminución del nivel de presión sonora.

Diseño de pantallas acústicas para reducir costes de fabricación.



**Figura 11.** Nivel de presión en el dominio de propagación a 100Hz sin pantalla.

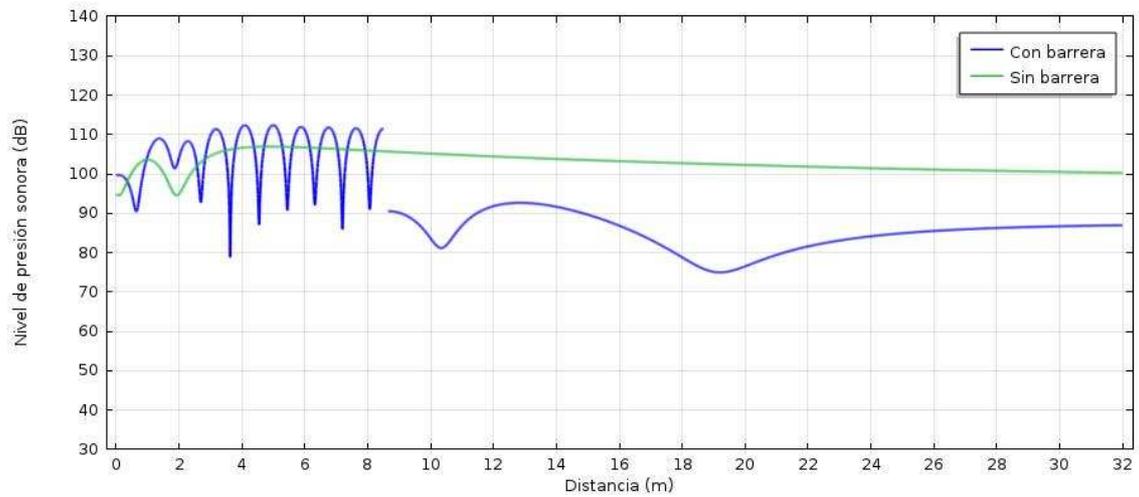


**Figura 12.** Nivel de presión en el dominio de propagación a 100Hz con pantalla.

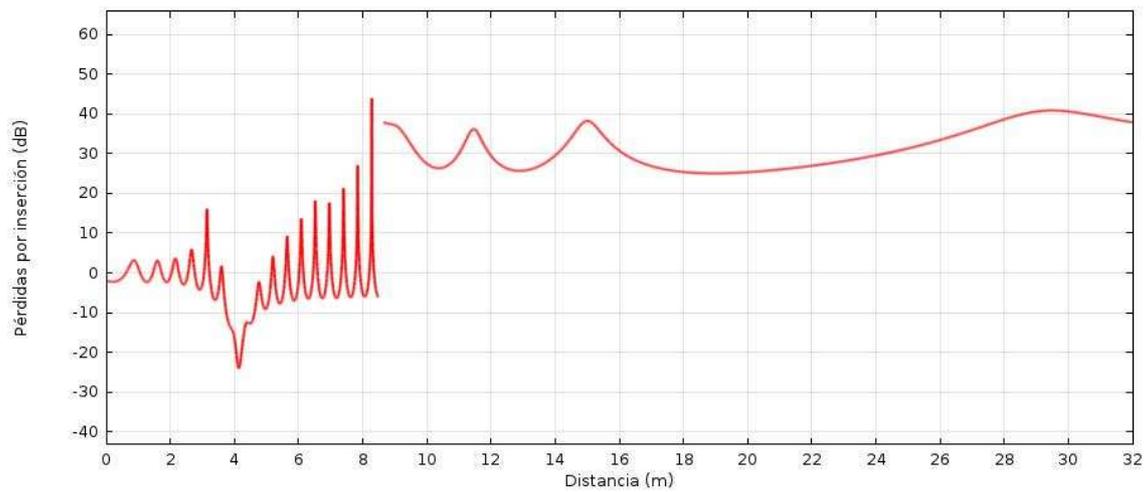
Seguidamente se muestran los resultados correspondientes a la frecuencia de 200 Hz.

En la Figura 13 se muestra, para la línea de corte, los resultados del nivel de presión sonora obtenidos a la frecuencia de 200 Hz, tanto sin la pantalla como con ésta. Ambos resultados se muestran simultáneamente, de modo que se aprecia que la disminución del nivel de presión sonora cuando se instala la pantalla es más significativa para esta frecuencia que para la anteriormente mostrada, 100 Hz. La siguiente imagen, Figura 14, muestra, para la línea de corte, los resultados de la pérdida por inserción de la pantalla acústica a 200 Hz. Comparados con los resultados obtenidos para esta misma frecuencia, pero referidos a un receptor ubicado a 3 metros de altura y a 22.5 metros respecto a la pantalla (mostrados en la Figura 5), se obtiene que las pérdidas por inserción obtenidas en la línea de corte son similares, aunque ligeramente superiores.

Diseño de pantallas acústicas para reducir costes de fabricación.



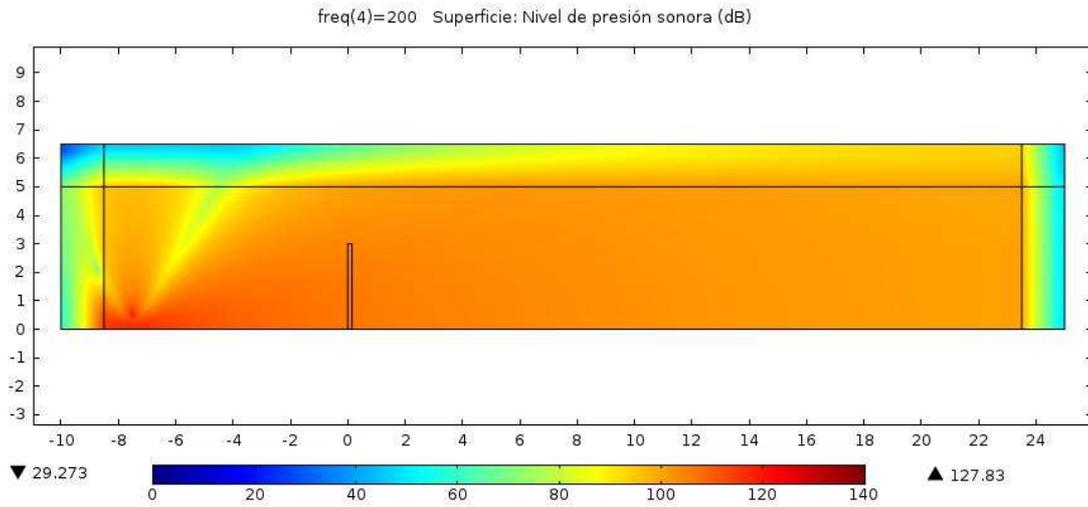
**Figura 13.** Nivel de presión sonora con y sin pantalla en la línea de corte a 200Hz.



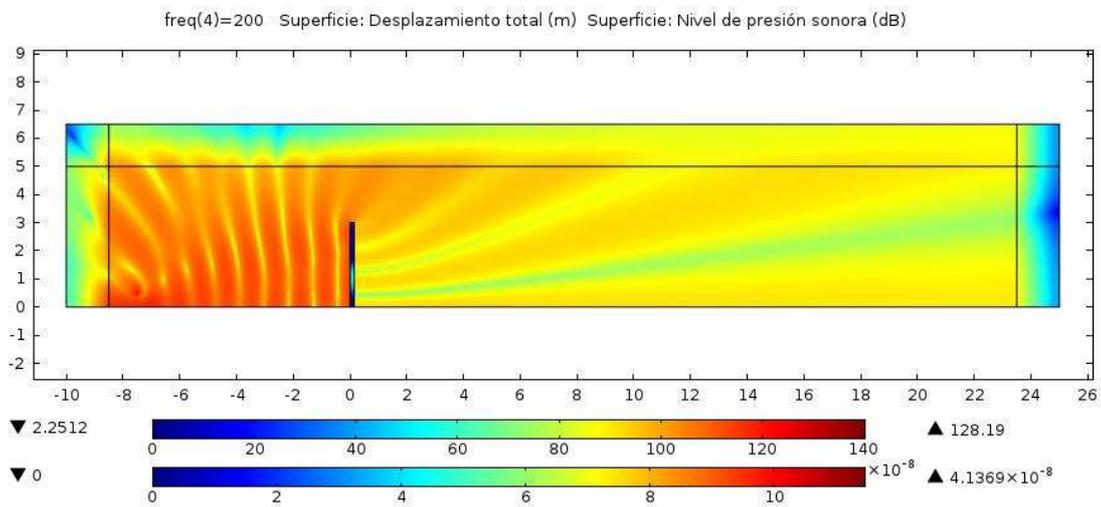
**Figura 14.** Pérdidas por inserción en la línea de corte a 200 Hz.

Seguidamente se muestran los niveles de presión sonora en el dominio de propagación en las Figuras 15 y 16. Como se observa al comparar ambas gráficas, la instalación de la pantalla produce una gran disminución del nivel de presión sonora. Comparado con los resultados obtenidos a 100 Hz, la pantalla ofrece mayor eficacia para la frecuencia de 200 Hz.

Diseño de pantallas acústicas para reducir costes de fabricación.



**Figura 15.** Nivel de presión en el dominio de propagación a 200Hz sin pantalla.

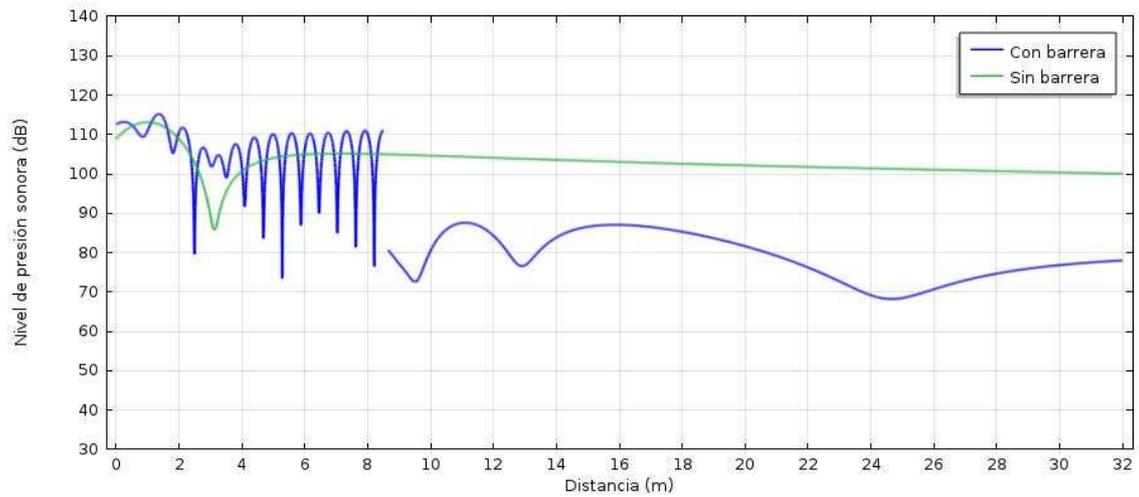


**Figura 16.** Nivel de presión en el dominio de propagación a 200Hz con pantalla.

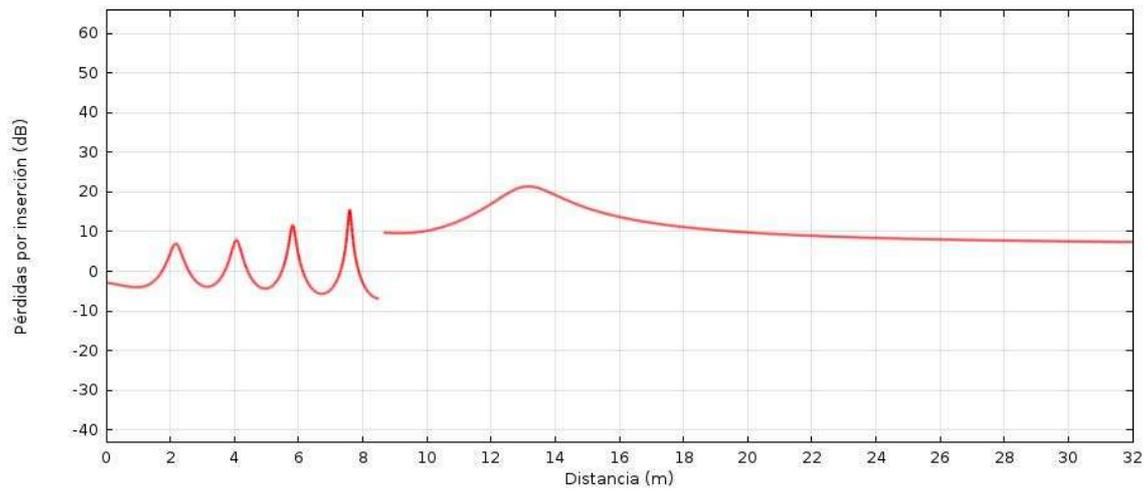
A continuación se muestran los resultados correspondientes a la frecuencia de 300 Hz.

En la Figura 17 se muestra, para la línea de corte, los resultados del nivel de presión sonora obtenidos a la frecuencia de 300 Hz, tanto sin la pantalla como con ésta. Ambos resultados se muestran simultáneamente, de modo que se aprecia que la disminución del nivel de presión sonora cuando se instala la pantalla es inferior a las dos frecuencias anteriores, 100 y 200 Hz. La siguiente imagen, Figura 18, muestra, para la línea de corte, los resultados de la pérdida por inserción de la pantalla acústica a 300 Hz. Comparados con los resultados obtenidos para esta misma frecuencia, pero referidos a un receptor ubicado a 3 metros de altura y a 22.5 metros respecto a la pantalla (mostrados en la Figura 5), se obtiene que las pérdidas por inserción obtenidas en la línea de corte son notoriamente inferiores.

Diseño de pantallas acústicas para reducir costes de fabricación.



**Figura 17.** Nivel de presión sonora con y sin pantalla en la línea de corte a 300Hz.



**Figura 18.** Pérdidas por inserción en la línea de corte a 300 Hz.

Posteriormente, se muestran los niveles de presión sonora en el dominio de propagación, en las Figuras 19 y 20. Como se observa al comparar ambas gráficas, la instalación de la pantalla ciertamente produce una disminución considerable del nivel de presión sonora, aunque está no es tan destacada como para las frecuencias anteriores (100 y 200 Hz).

Diseño de pantallas acústicas para reducir costes de fabricación.

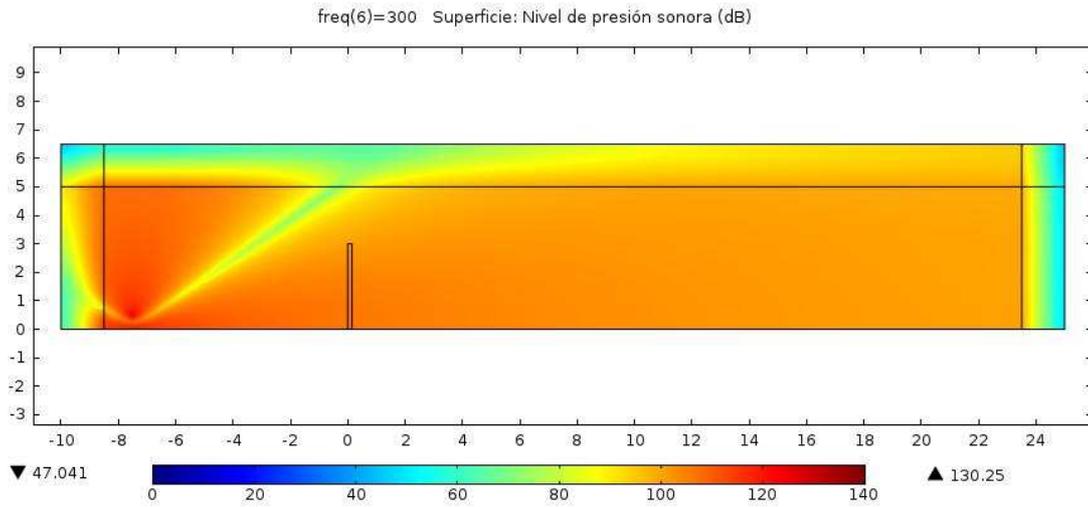


Figura 19. Nivel de presión en el dominio de propagación a 300Hz sin pantalla.

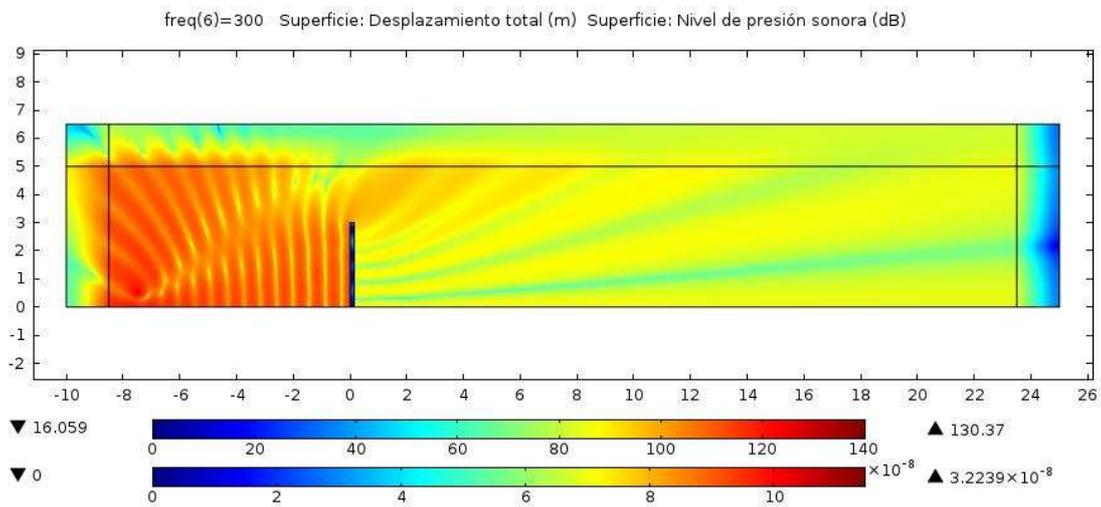
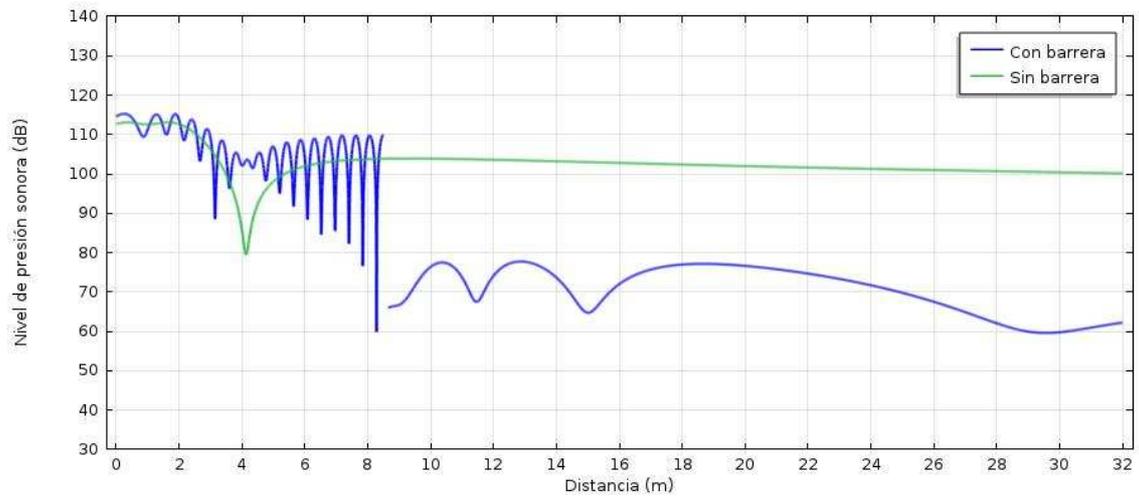


Figura 20. Nivel de presión en el dominio de propagación a 300Hz con pantalla.

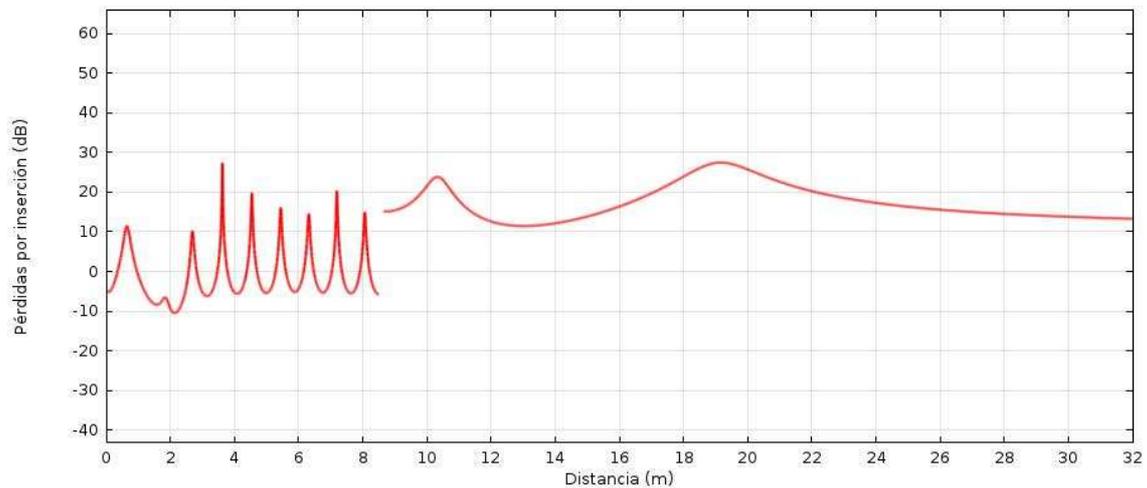
Seguidamente se muestran los resultados correspondientes a la frecuencia de 400 Hz.

En la Figura 21 se muestra, para la línea de corte, los resultados del nivel de presión sonora obtenidos a la frecuencia de 400 Hz, tanto sin la pantalla como con ésta. Ambos resultados se muestran simultáneamente, de modo que se aprecia que la disminución del nivel de presión sonora cuando se instala la pantalla es similar a la frecuencia anterior, 300 Hz. La siguiente imagen, Figura 22, muestra, para la línea de corte, los resultados de la pérdida por inserción de la pantalla acústica a 400 Hz. Comparados con los resultados obtenidos para esta misma frecuencia, pero referidos a un receptor ubicado a 3 metros de altura y a 22.5 metros respecto a la pantalla (mostrados en la Figura 5), se obtiene que las pérdidas por inserción obtenidas en la línea de corte son notoriamente inferiores.

Diseño de pantallas acústicas para reducir costes de fabricación.



**Figura 21.** Nivel de presión sonora con y sin pantalla en la línea de corte a 400Hz.



**Figura 22.** Pérdidas por inserción en la línea de corte a 400 Hz.

Por último, se muestran los niveles de presión sonora en el dominio de propagación, en las Figuras 23 y 24. Como se observa al comparar ambas gráficas, la instalación de la pantalla produce una disminución del nivel de presión sonora muy similar a la de la frecuencia mostrada anteriormente, 300 Hz.

Diseño de pantallas acústicas para reducir costes de fabricación.

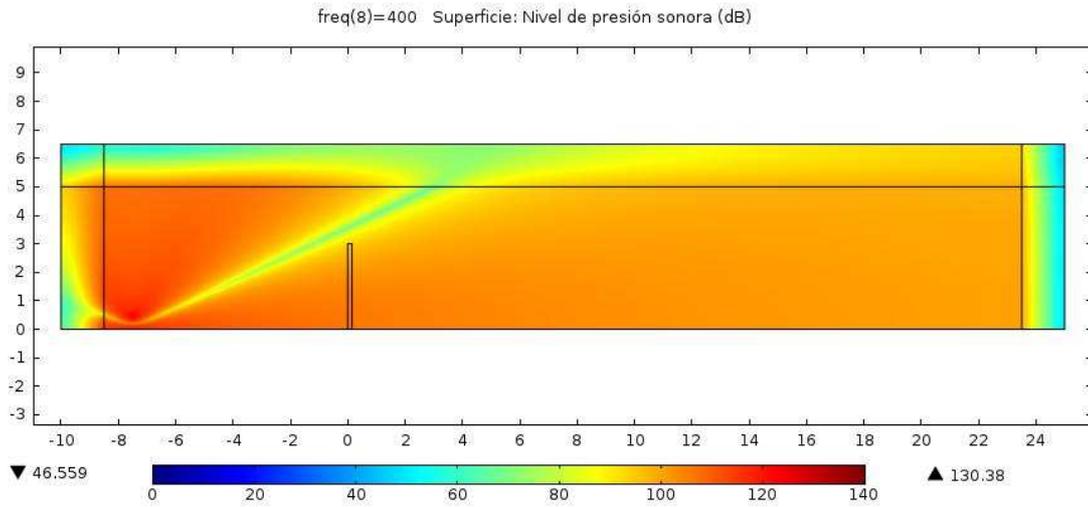


Figura 23. Nivel de presión en el dominio de propagación a 400Hz sin pantalla.

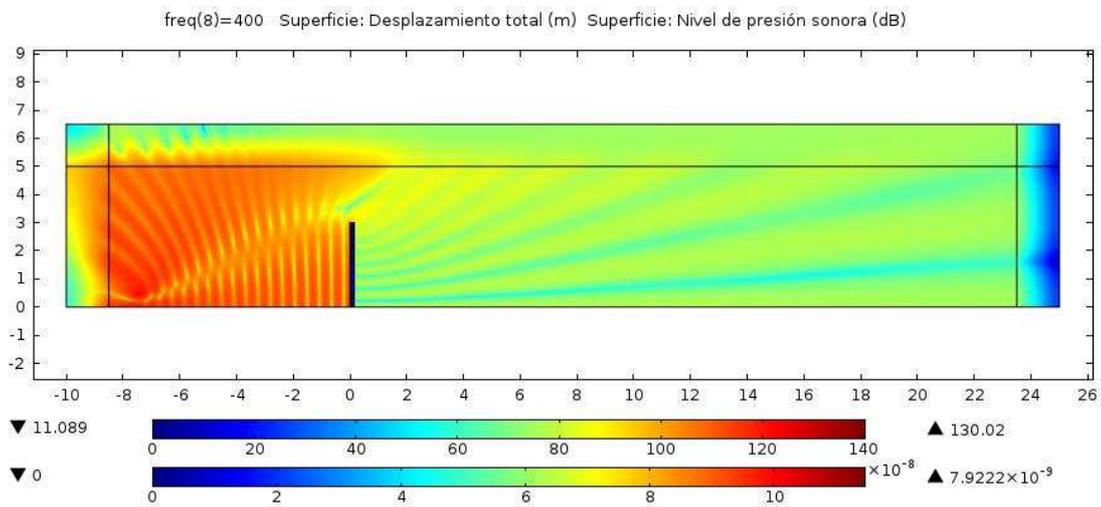
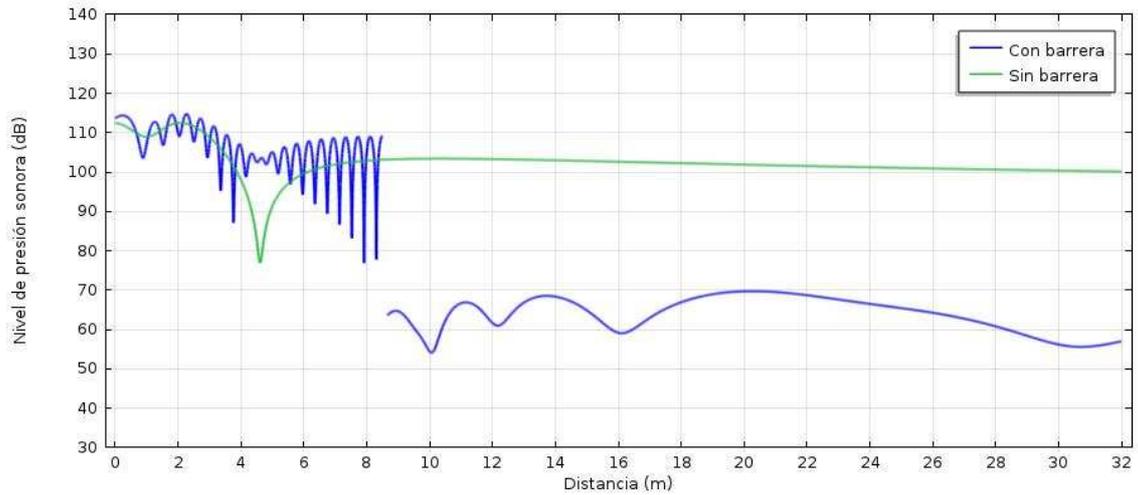


Figura 24. Nivel de presión en el dominio de propagación a 400Hz con pantalla.

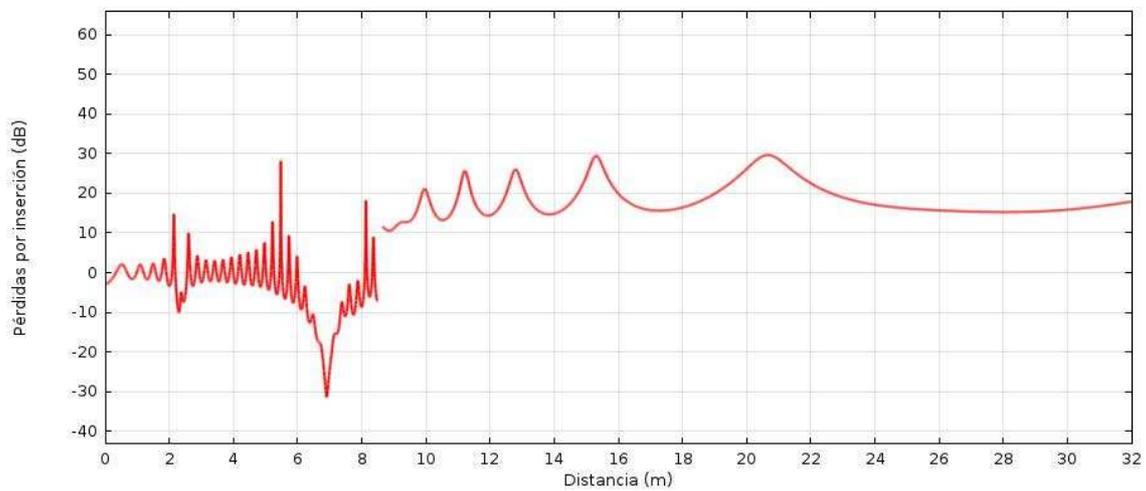
A continuación se muestran los resultados obtenidos para la frecuencia de 500Hz.

En la Figura 25 se muestra, para la línea de corte, los resultados del nivel de presión sonora obtenidos a la frecuencia de 500 Hz, tanto sin la pantalla como con la instalación de ésta. Ambos resultados se muestran simultáneamente, de modo que se aprecia que la disminución del nivel de presión sonora cuando se instala la pantalla es más notoria que la mostrada para los dos casos anteriores, 300 y 400 Hz y similar a la frecuencia de 100 Hz. La siguiente imagen, Figura 26 muestra, para la línea de corte, los resultados de la pérdida por inserción de la pantalla acústica a 500 Hz. Comparados con los resultados obtenidos para esta misma frecuencia, pero referidos a un receptor ubicado a 3 metros de altura y a 22.5 metros respecto a la pantalla (mostrados en la Figura 5), se obtiene que las pérdidas por inserción obtenidas en la línea de corte son ligeramente inferiores.

Diseño de pantallas acústicas para reducir costes de fabricación.



**Figura 25.** Nivel de presión sonora con y sin pantalla en la línea de corte a 500Hz.



**Figura 26.** Pérdidas por inserción en la línea de corte a 500 Hz.

Finalmente, se muestran los niveles de presión sonora en el dominio de propagación, en las Figuras 27 y 28. Como se observa al comparar ambas gráficas, la instalación de la pantalla produce una disminución considerable del nivel de presión sonora, quedando en rendimiento únicamente por debajo de la frecuencia de 200 Hz.

Diseño de pantallas acústicas para reducir costes de fabricación.

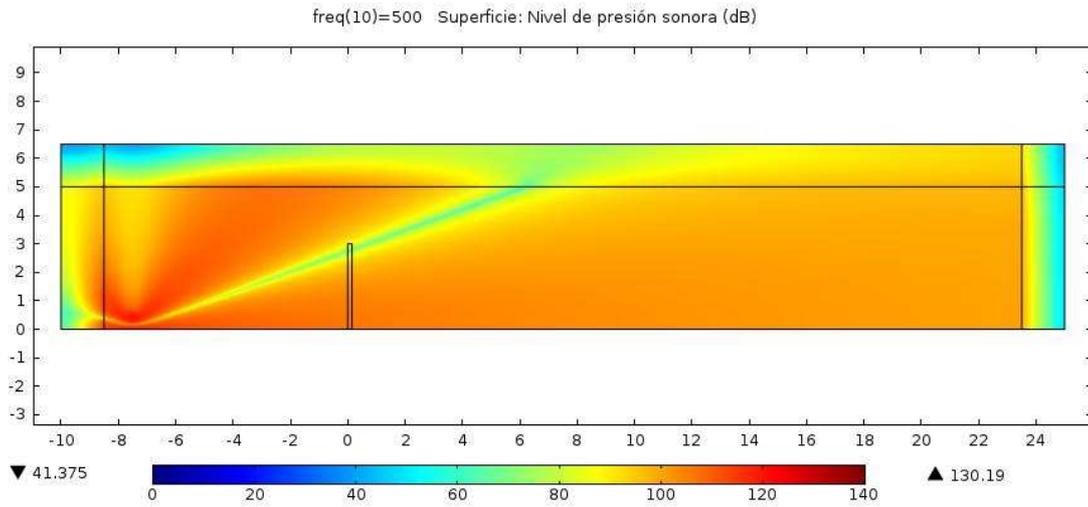


Figura 27. Nivel de presión en el dominio de propagación a 500Hz sin pantalla.

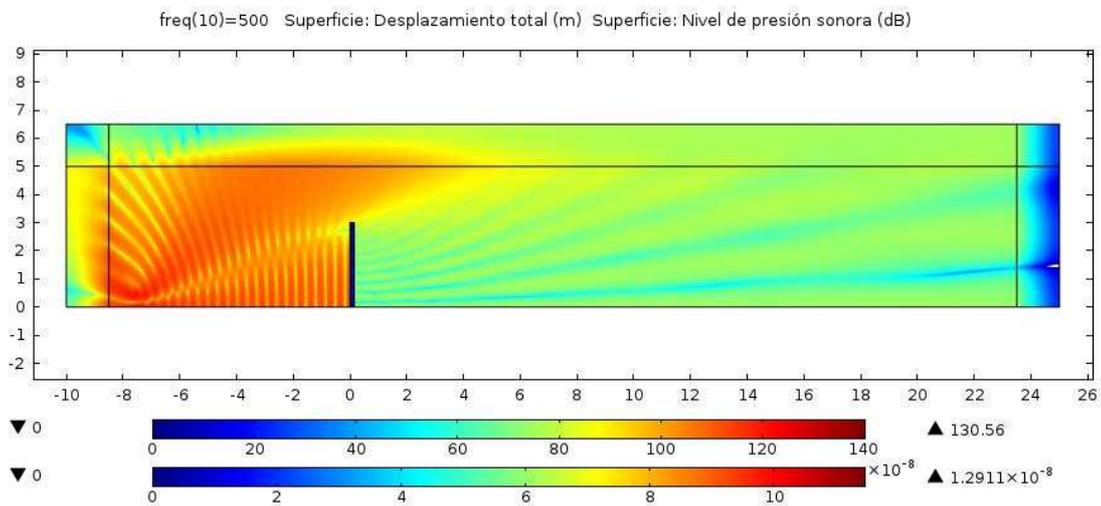


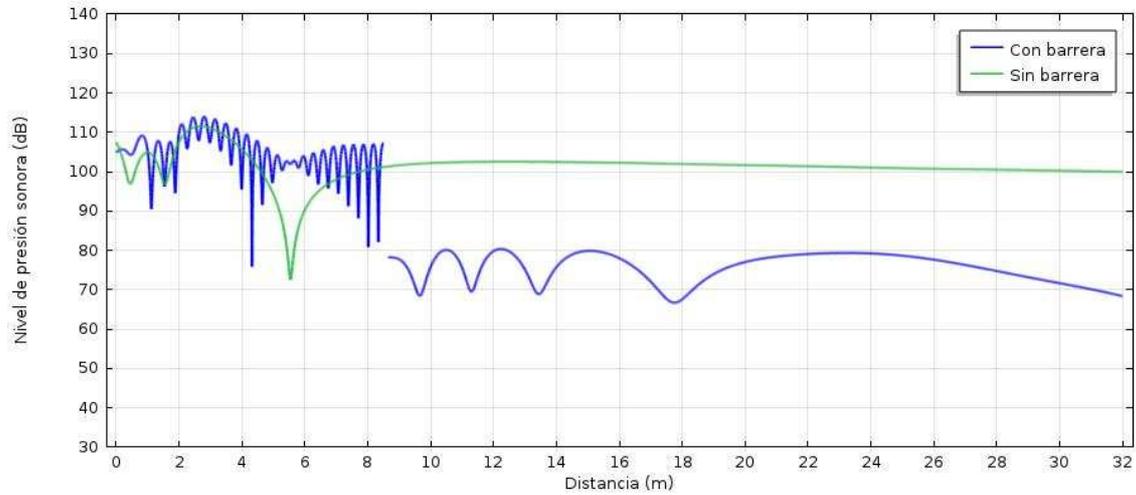
Figura 28. Nivel de presión en el dominio de propagación a 500Hz con pantalla.

A continuación se muestran los resultados correspondientes a la frecuencia de 600 Hz.

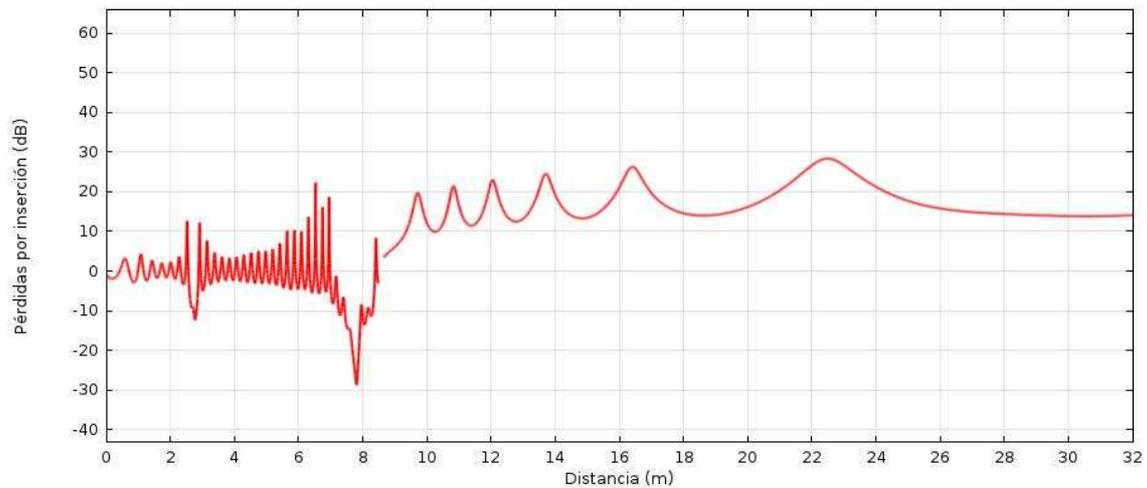
En la Figura 29 se muestra, para la línea de corte, los resultados del nivel de presión sonora obtenidos a la frecuencia de 600 Hz, tanto sin la pantalla como con ésta. Ambos resultados se muestran simultáneamente, de modo que se aprecia que la disminución del nivel de presión sonora cuando se instala la pantalla está en un término intermedio entre los valores obtenidos, siendo ligeramente inferior a las frecuencias de 100 y 500 Hz, notoriamente inferior a la de 200 Hz y superior a los mostrados en 300 y 400 Hz. La siguiente imagen, Figura 30, muestra, para la línea de corte, los resultados de la pérdida por inserción de la pantalla acústica a 600 Hz. Comparados con los resultados obtenidos para esta misma frecuencia, pero referidos a un receptor ubicado a 3 metros de altura y a 22.5 metros respecto a la pantalla

Diseño de pantallas acústicas para reducir costes de fabricación.

(mostrados en la Figura 5), se obtiene que las pérdidas por inserción obtenidas en la línea de corte son notoriamente superiores.



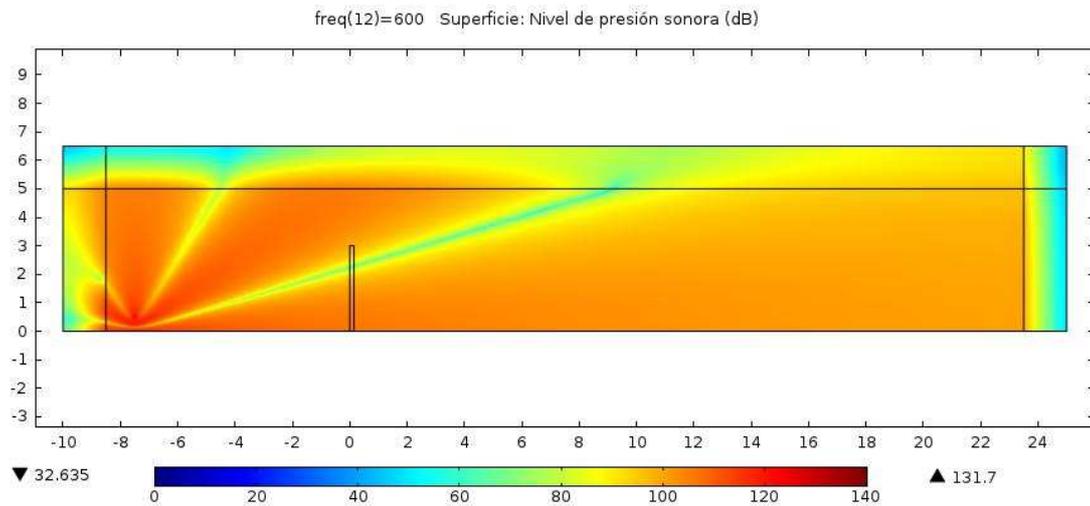
**Figura 29.** Nivel de presión sonora con y sin pantalla en la línea de corte a 600Hz.



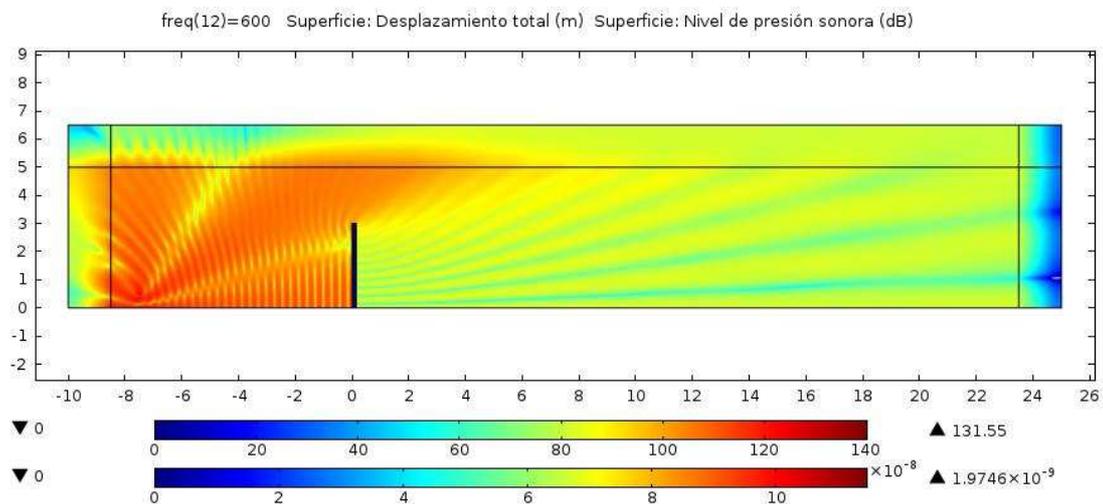
**Figura 30.** Pérdidas por inserción en la línea de corte a 600 Hz.

A continuación, se muestran los niveles de presión sonora en el dominio de propagación, en las Figuras 31 y 32. Como se observa al comparar ambas gráficas, la instalación de la pantalla ciertamente produce una disminución del nivel de presión sonora, pero ésta ya no es tan significativa como en la frecuencia anterior. No obstante la pantalla a esta frecuencia es más eficaz que a las frecuencias de 300 y 400 Hz.

Diseño de pantallas acústicas para reducir costes de fabricación.



**Figura 31.** Nivel de presión en el dominio de propagación a 600Hz sin pantalla.



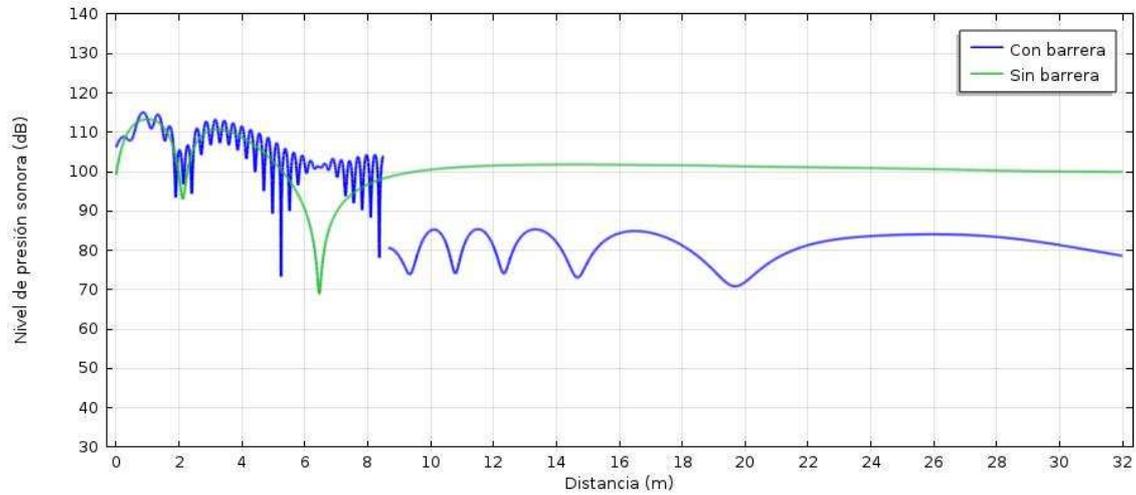
**Figura 32.** Nivel de presión en el dominio de propagación a 600Hz con pantalla.

Seguidamente se muestran los resultados correspondientes a la frecuencia de 700 Hz.

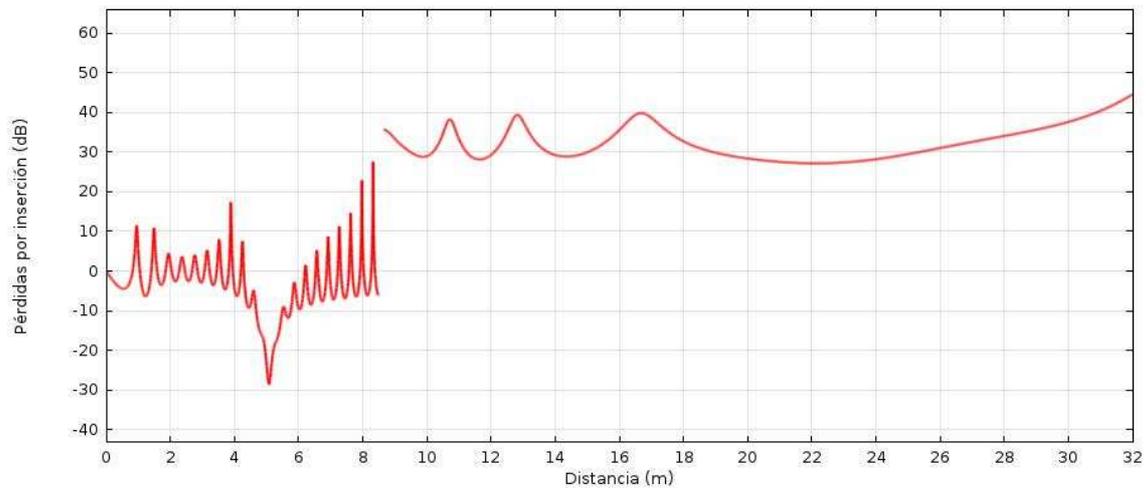
En la Figura 33 se muestra, para la línea de corte, los resultados del nivel de presión sonora obtenidos a la frecuencia de 700 Hz, tanto sin la pantalla como con ésta. Ambos resultados se muestran simultáneamente, de modo que se aprecia que la disminución del nivel de presión sonora cuando se instala la pantalla es similar a la obtenida para la frecuencia de 200 Hz, y por tanto, superior al resto de frecuencias mostradas. La siguiente imagen, Figura 34, muestra, para la línea de corte, los resultados de la pérdida por inserción de la pantalla acústica a 700 Hz. Comparados con los resultados obtenidos para esta misma frecuencia, pero referidos a un receptor ubicado a 3 metros de altura y a 22.5 metros respecto a la pantalla (mostrados en la

Diseño de pantallas acústicas para reducir costes de fabricación.

Figura 5), se obtiene que las pérdidas por inserción obtenidas en la línea de corte son superiores.



**Figura 33.** Nivel de presión sonora con y sin pantalla en la línea de corte a 700Hz.



**Figura 34.** Pérdidas por inserción en la línea de corte a 700 Hz.

Seguidamente, se muestran los niveles de presión sonora en el dominio de propagación, en las Figuras 35 y 36. Como se observa al comparar ambas gráficas, la instalación de la produce una disminución del nivel de presión sonora similar a la de la frecuencia de 200 Hz, siendo ambas frecuencias las que mayor eficacia presentan.

Diseño de pantallas acústicas para reducir costes de fabricación.

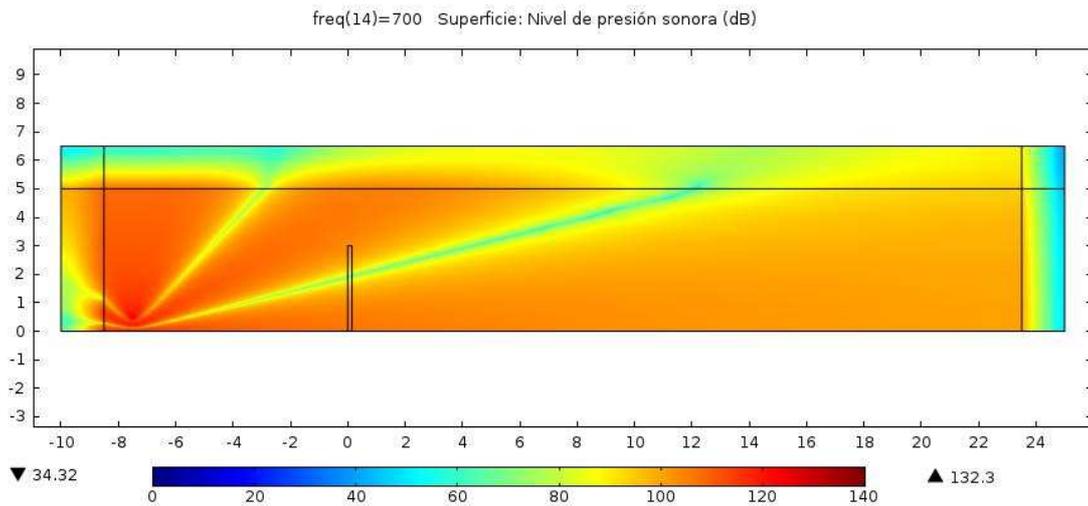


Figura 35. Nivel de presión en el dominio de propagación a 700Hz sin pantalla.

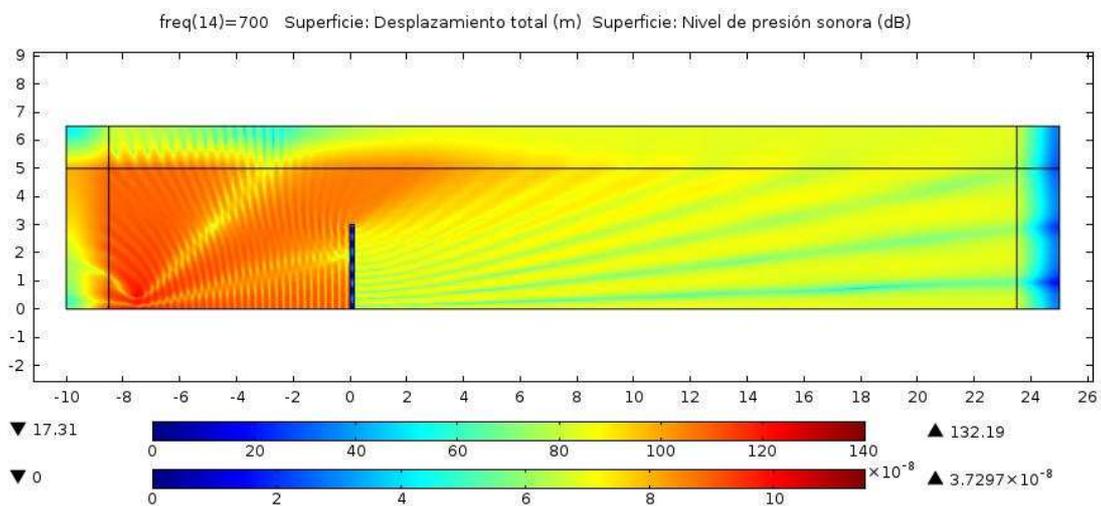
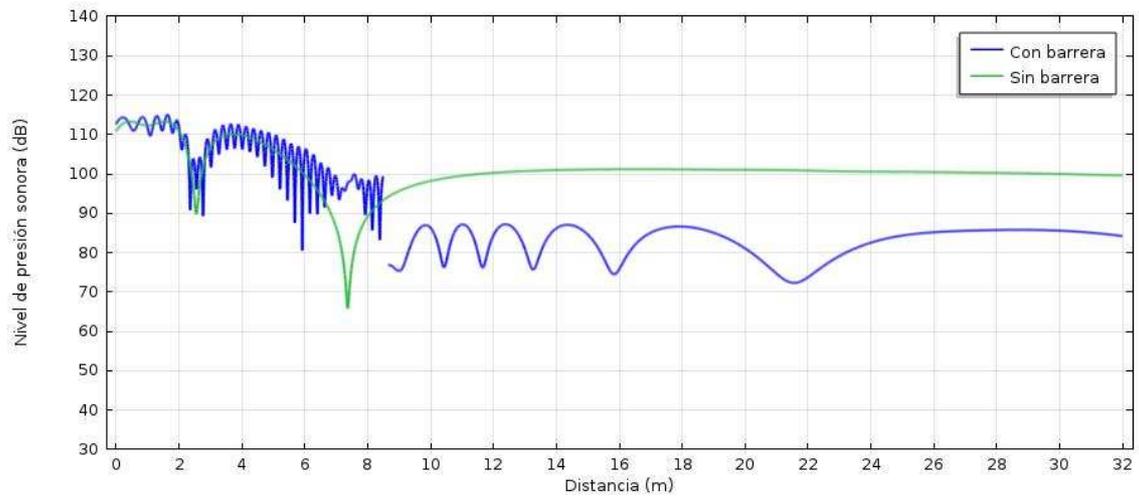


Figura 36. Nivel de presión en el dominio de propagación a 700Hz con pantalla.

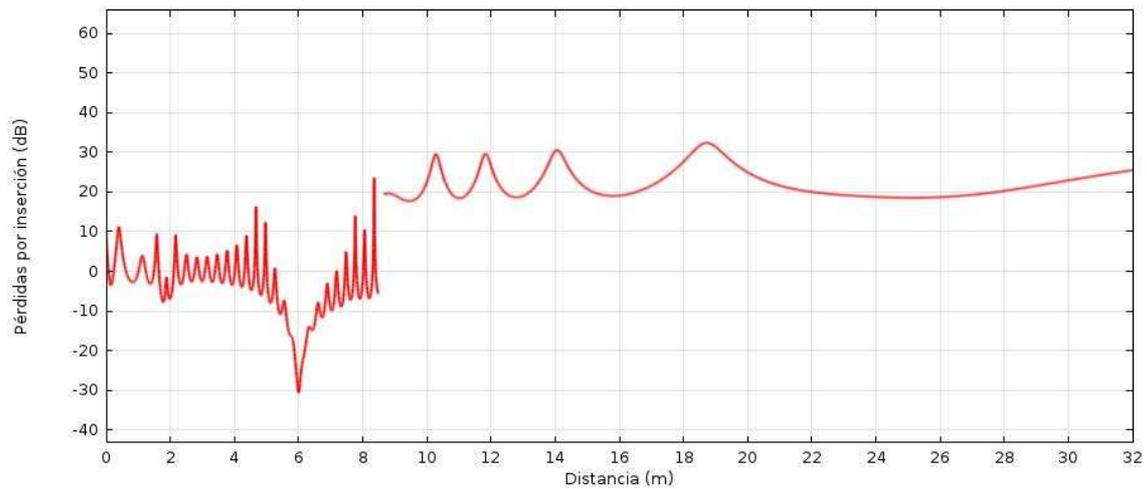
A continuación se muestran los resultados correspondientes a la frecuencia de 800 Hz.

En la Figura 37 se muestra, para la línea de corte, los resultados del nivel de presión sonora obtenidos a la frecuencia de 800 Hz, tanto sin la pantalla como con ésta. Ambos resultados se muestran simultáneamente, de modo que se aprecia que la disminución del nivel de presión sonora cuando se instala la pantalla es similar a las obtenidas en 100 y 500 Hz, inferior a las correspondientes a 200 y 700 Hz, y superiores a las mostradas para 300, 400 y 600 Hz. La siguiente imagen, Figura 38, muestra, para la línea de corte, los resultados de la pérdida por inserción de la pantalla acústica a 800 Hz. Comparados con los resultados obtenidos para esta misma frecuencia, pero referidos a un receptor ubicado a 3 metros de altura y a 22.5 metros respecto a la pantalla (mostrados en la Figura 5), se obtiene que las pérdidas por inserción obtenidas en la línea de corte son superiores.

Diseño de pantallas acústicas para reducir costes de fabricación.



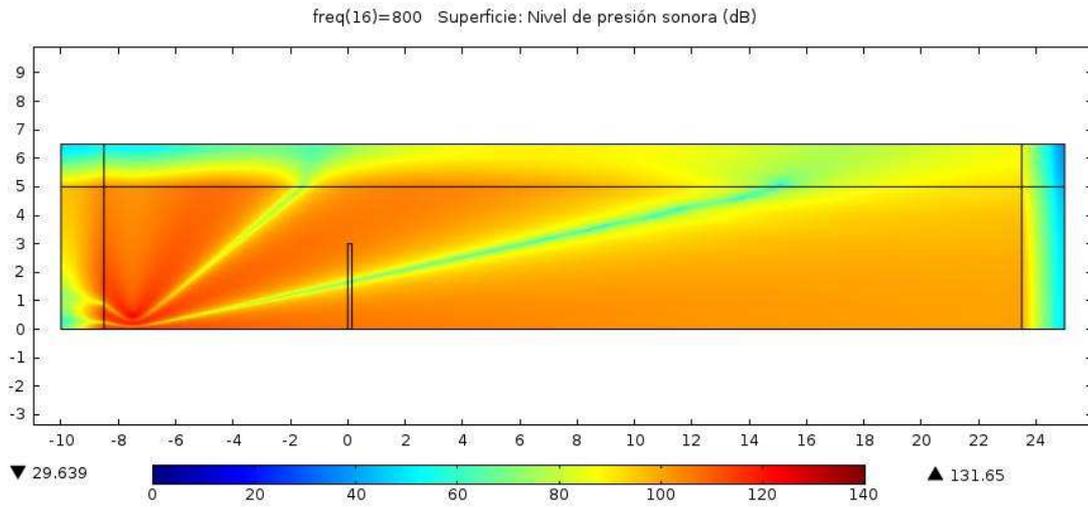
**Figura 37.** Nivel de presión sonora con y sin pantalla en la línea de corte a 800Hz.



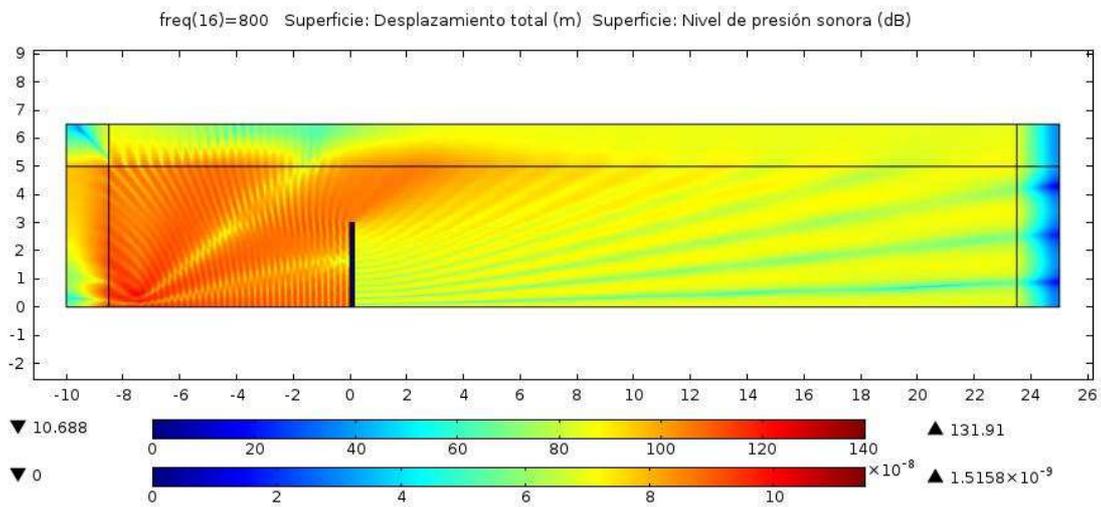
**Figura 38.** Pérdidas por inserción en la línea de corte a 800 Hz.

Posteriormente, se muestran los niveles de presión sonora en el dominio de propagación, en las Figuras 39 y 40. Como se observa al comparar ambas gráficas, la instalación de la pantalla produce una notable disminución del nivel de presión sonora, siendo ésta únicamente inferior a la obtenida para las frecuencias de 200 y 700 Hz.

Diseño de pantallas acústicas para reducir costes de fabricación.



**Figura 39.** Nivel de presión en el dominio de propagación a 800Hz sin pantalla.

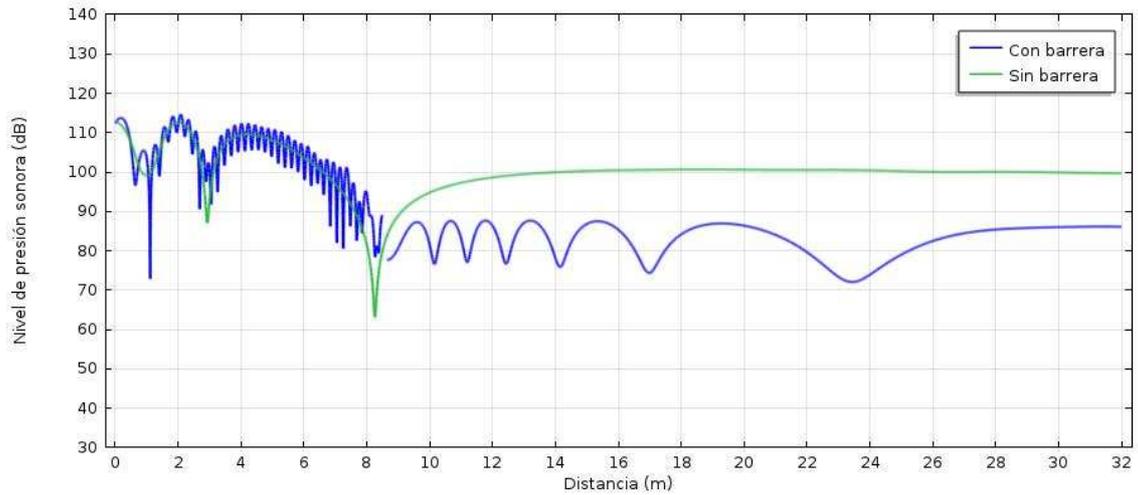


**Figura 40.** Nivel de presión en el dominio de propagación a 800Hz con pantalla.

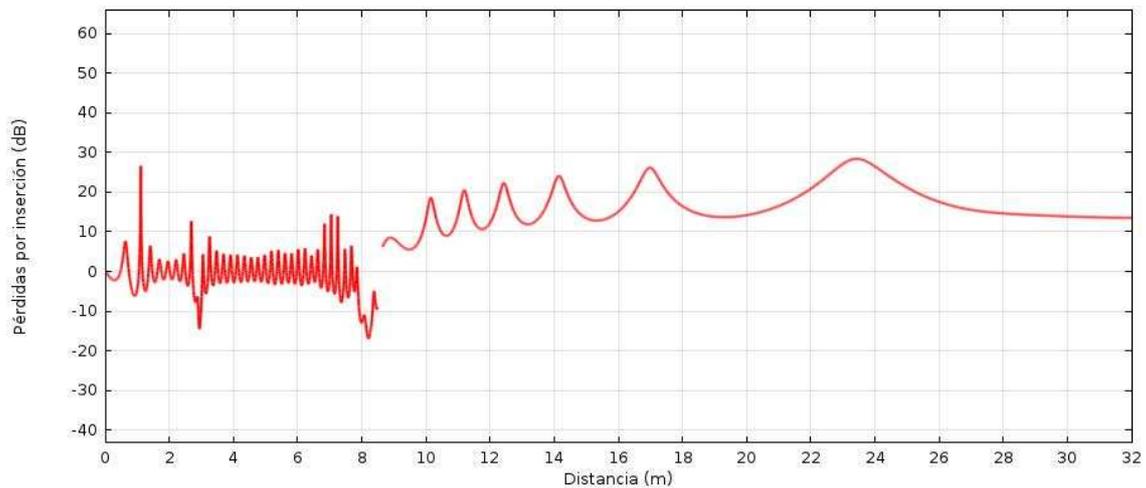
Seguidamente se muestran los resultados correspondientes a la frecuencia de 900 Hz.

En la Figura 41 se muestra, para la línea de corte, los resultados del nivel de presión sonora obtenidos a la frecuencia de 900 Hz, tanto sin la pantalla como con ésta. Ambos resultados se muestran simultáneamente, de modo que se aprecia que la disminución del nivel de presión sonora cuando se instala la pantalla es similar a la obtenida para la frecuencia de 600 Hz. La siguiente imagen, Figura 42 muestra, para la línea de corte, los resultados de la pérdida por inserción de la pantalla acústica a 900 Hz. Comparados con los resultados obtenidos para esta misma frecuencia, pero referidos a un receptor ubicado a 3 metros de altura y a 22.5 metros respecto a la pantalla (mostrados en la Figura 5), se obtiene que las pérdidas por inserción obtenidas en la línea de corte son similares, aunque ligeramente superiores.

Diseño de pantallas acústicas para reducir costes de fabricación.



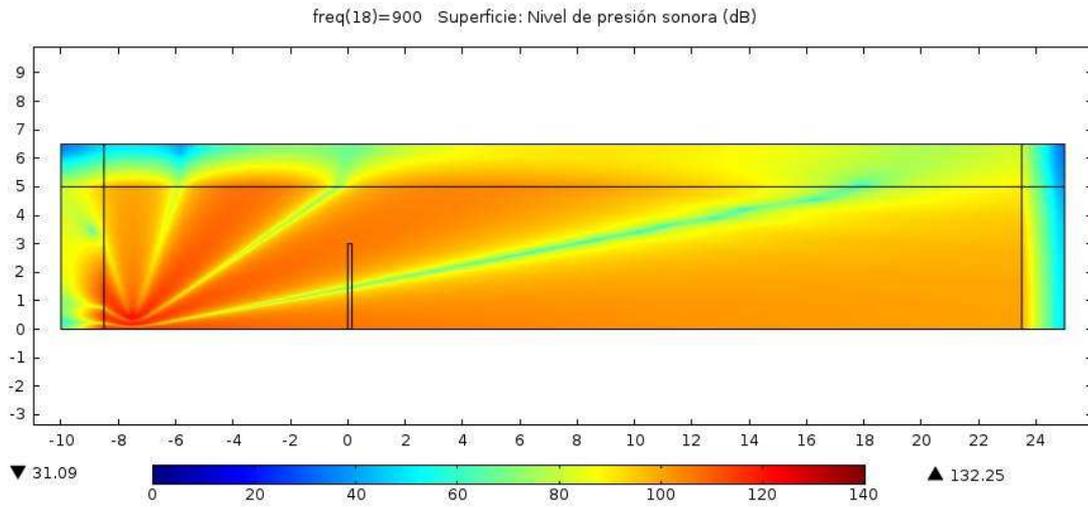
**Figura 41.** Nivel de presión sonora con y sin pantalla en la línea de corte a 900Hz.



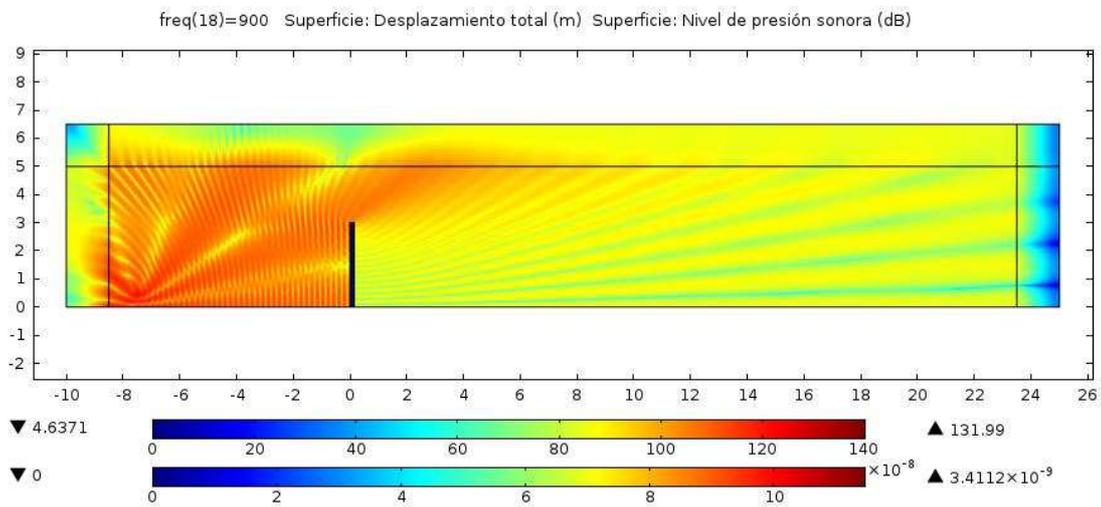
**Figura 42.** Pérdidas por inserción en la línea de corte a 900 Hz.

Por último, se muestran los niveles de presión sonora en el dominio de propagación, en las Figuras 43 y 44. Como se observa al comparar ambas gráficas, la instalación de la pantalla produce una disminución del nivel de presión sonora inferior a la de las frecuencias anteriores (700 y 800 Hz), mostrándose la pantalla ligeramente más eficaz que para las frecuencias de 300, 400 y 600 Hz.

Diseño de pantallas acústicas para reducir costes de fabricación.



**Figura 43.** Nivel de presión en el dominio de propagación a 900Hz sin pantalla.

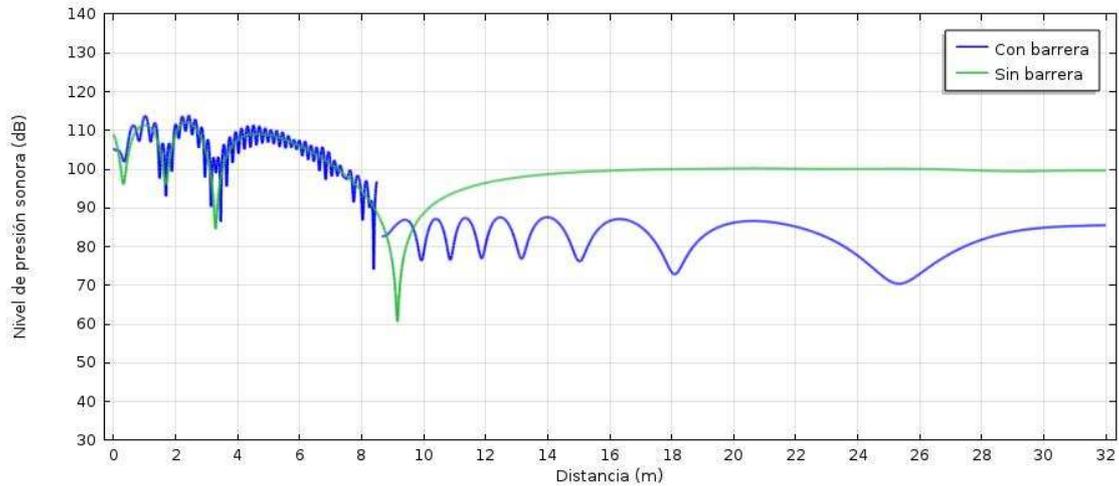


**Figura 44.** Nivel de presión en el dominio de propagación a 900Hz con pantalla.

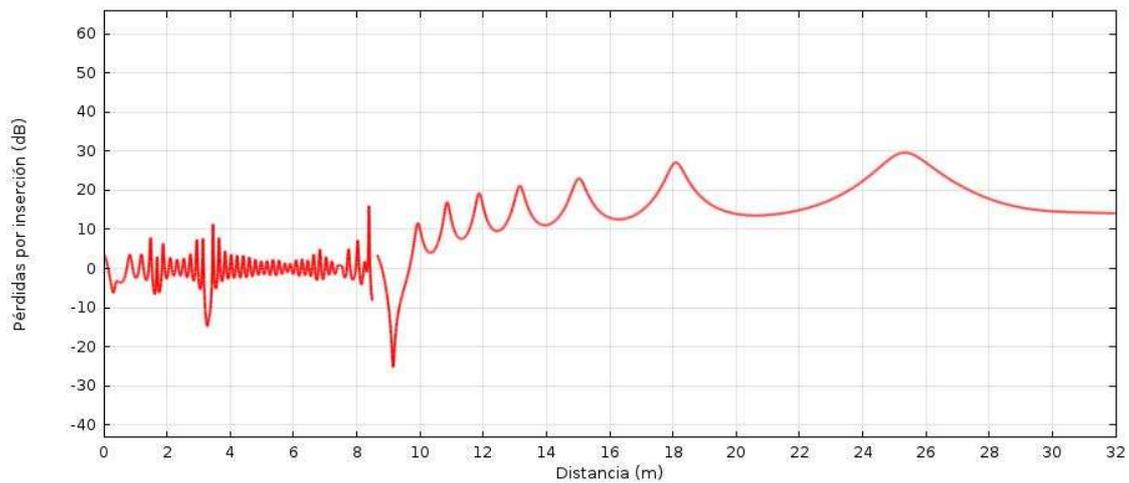
A continuación se muestran los resultados obtenidos para la frecuencia de 1000 Hz.

En la Figura 45 se muestra, para la línea de corte, los resultados del nivel de presión sonora obtenidos a la frecuencia de 1 KHz, tanto sin la pantalla como con ésta. Ambos resultados se muestran simultáneamente, de modo que se aprecia que la disminución del nivel de presión sonora cuando se instala la pantalla es similar a la frecuencia mostrada anteriormente, 900 Hz, y por tanto, también a la de 600 Hz. La siguiente imagen, Figura 46, muestra, para la línea de corte, los resultados de la pérdida por inserción de la pantalla acústica a 1 KHz. Comparados con los resultados obtenidos para esta misma frecuencia, pero referidos a un receptor ubicado a 3 metros de altura y a 22.5 metros respecto a la pantalla (mostrados en la Figura 5), se obtiene que las pérdidas por inserción obtenidas en la línea de corte son prácticamente equivalentes.

Diseño de pantallas acústicas para reducir costes de fabricación.



**Figura 45.** Nivel de presión sonora con y sin pantalla en la línea de corte a 1000Hz.



**Figura 46.** Pérdidas por inserción en la línea de corte a 1000 Hz.

Finalmente, se muestran los niveles de presión sonora en el dominio de propagación, en las Figuras 47 y 48. Como se observa al comparar ambas gráficas, la instalación de la pantalla produce una disminución del nivel de presión sonora similar a la de la frecuencia anterior (900 Hz).

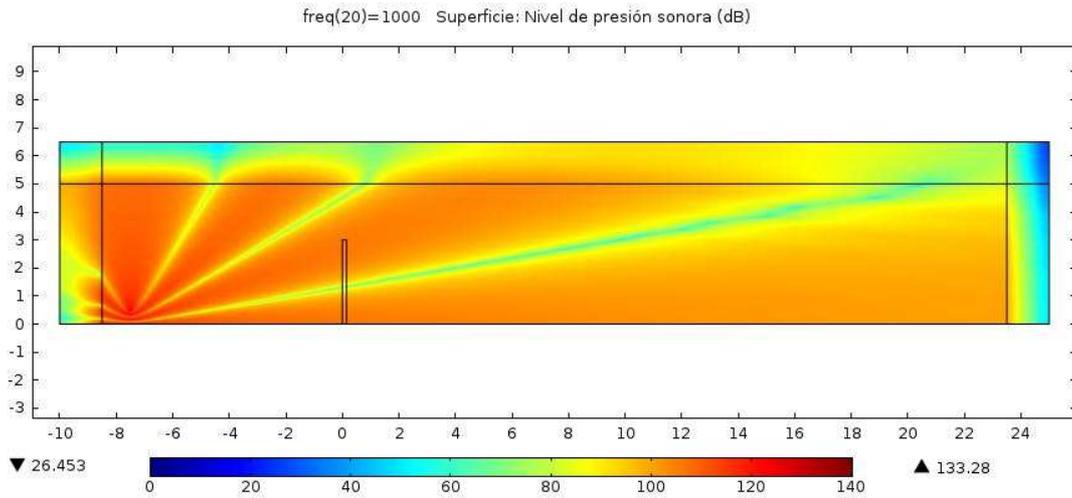


Figura 47. Nivel de presión en el dominio de propagación a 1000Hz sin pantalla.

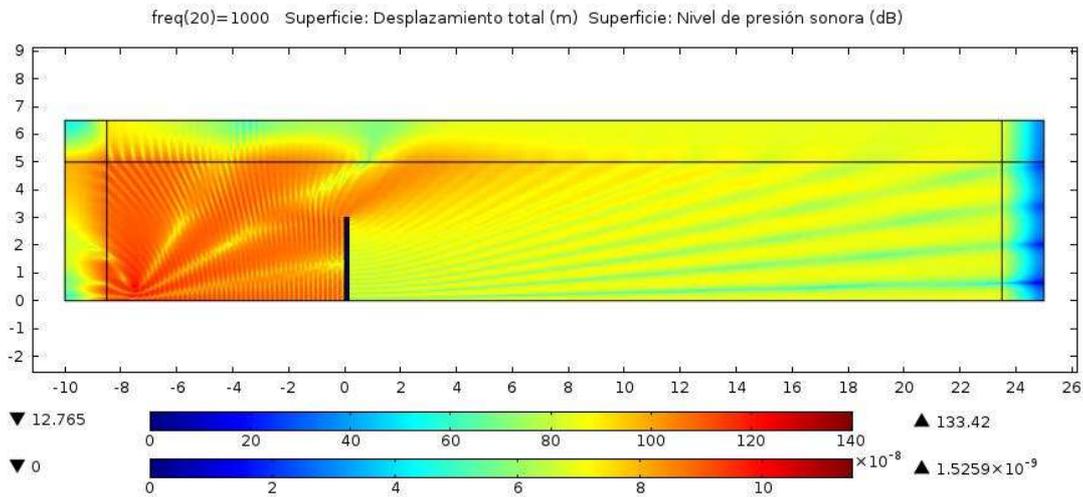


Figura 48. Nivel de presión en el dominio de propagación a 1000Hz con pantalla.

Con los resultados expuestos se puede comprobar que los niveles desglosados por frecuencias y los resultados globales obtenidos en la Figura 5, difieren. Esto es debido a que están calculados para diferentes receptores.

En primer lugar, los resultados globales de pérdidas por inserción mostrados en la Figura 5 corresponden a un receptor ubicado a 22.5 metros de la pantalla acústica y a una altura de 3 metros sobre el suelo. De ellos se extrae que la pantalla acústica posee un mejor comportamiento a las frecuencias de 200, 400, 500 y 600 Hz, con valores de pérdidas por inserción muy similares, todos ellos en el margen comprendido entre los 24 dB y los 27 dB. Por el contrario, presenta los resultados menos notorios a las frecuencias de 100, 800 y 900 Hz, con valores de pérdidas por inserción comprendidos entre los 10 y los 13 dB. Para el resto de frecuencias posee unos valores de pérdidas por inserción bastante notables, con valores comprendidos entre los 15 y los 20 dB. En conjunto se puede afirmar que la pantalla presenta un rendimiento satisfactorio para este receptor.

En segundo lugar, los resultados obtenidos para las frecuencias puntuales corresponden al receptor que forma la línea de corte situada de 1 metro de altura respecto al suelo. Esta línea de corte nos sirve por una parte para poder apreciar la variación con la distancia del nivel de presión sonora con y sin la pantalla y por otra, para a partir de éstos, obtener el resultante de las pérdidas por inserción en esta línea de corte. Las pérdidas por inserción en la línea de corte difieren a los obtenidos en la Figura 5. Así, en la línea de corte aparecen como frecuencias más destacadas las correspondientes a 200 y 700 Hz, con valores de pérdidas por inserción que oscilan entre los 30 y los 35 dB, llegando a valores máximos de 40 dB en el dominio de propagación. Las frecuencias en las que se ha obtenido una menor eficacia de la pantalla para la línea corte son las correspondientes a 300 y 400 Hz, donde los resultados oscilan en torno a los 10 dB, con valores máximos de 30 dB.

La diferencia de resultados entre las pérdidas por inserción globales obtenidas en la Figura 5 y las mostradas para las frecuencias puntuales en la línea de corte se debe a que los resultados obtenidos en la línea de corte no están directamente influenciados por la difracción de las ondas acústicas. Al propagarse las ondas acústicas, éstas chocan con la cumbre de la pantalla, dando lugar a la difracción. Esto puede apreciarse visualmente mediante las graficas mostradas correspondientes al nivel de presión sonora en el dominio de propagación. En ellas se muestra el nivel de presión sonora en el dominio de propagación sin la pantalla y con la instalación de ella. En las gráficas correspondientes al nivel de presión sonora en el dominio de propagación con la pantalla, puede observarse como los niveles de presión sonora a una altura aproximada de 3 metros a partir de la posición de la pantalla son superiores a los existentes a alturas menores, ya que están influidas por la difracción.

## V. Conclusiones.

Los resultados obtenidos muestran una excelente correlación con los obtenidos en el estudio de la 'University of Alberta' titulado 'Geometric Models to Model Acoustic Barriers Including Atmospheric Conditions' cuyo autor es Amirmohamed Muradali. En dicho estudio se realizaban varias simulaciones de distintos tipos de pantallas acústicas utilizando el software SYSNOISE. Por tanto, se puede afirmar que COMSOL ha demostrado ser una poderosa herramienta para el estudio y diseño de pantallas acústicas posibilitado un análisis profundo, lo cual repercute directamente en una disminución de los costes de fabricación. Además, debido a la variedad de cálculos y resultados diferentes que puede ofrecer, COMSOL supone una herramienta muy útil a la hora de realizar futuras investigaciones en el diseño de pantallas acústicas. Por ello, se concluye que se han cumplido los objetivos de este proyecto.

Finalmente, en futuras líneas de investigación se podría utilizar COMSOL para el diseño de otros tipos de pantallas. Dada el gran número y complejidad de cálculos que es capaz de realizar, se podrían estudiar pantallas de otras geometrías y materiales, así como, inclusive, para otros tipos de suelos, tales como los suelos fonoabsorbentes -propios de asfaltos bituminosos- u otros menos reflectantes. Asimismo, también se podrían caracterizar las pantallas acústicas para los distintos tipos de ruido, analizando sus espectros y estudiando aquellas frecuencias que suponen un mayor interés. Estos estudios se podrían completar con una campaña de mediciones acústicas en campo sobre pantallas acústicas equivalentes a las modeladas, a modo de comparación de los resultados.

Diseño de pantallas acústicas para reducir costes de fabricación.

## Agradecimientos.

Me gustaría dar las gracias a Jesús Alba Fernández y Fernando Tomàs Ibiza por su ayuda durante la realización de este trabajo. Ha sido un placer trabajar juntos.

## Bibliografía.

[1] Harris, C. M. – “Manual de medidas acústicas y control de ruido” – Ed. McGraw Hill. (1995)

[2] ISO 9613/2 – “Acoustics: Attenuation of sound during propagation outdoors. General method calculation.”

[3] MAEKAWA, Z. (1968). Noise reduction by screens. Applied Acoustics. N° 1, pp. 157-173.

[4] COMSOL Multiphysics Modeling Guide. Versión Comsol 3.5a - Nov.2008.

[5] UNE-EN ISO 354:2004. Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante

[6] UNE-EN ISO 10140-2:2011. Acústica. Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción. Parte 2: Medición del aislamiento acústico al ruido aéreo. (ISO 10140-2:2010)

[7] UNE- EN 1793-1:1998. Dispositivos reductores de ruido de tráfico en carreteras. Métodos de ensayo para determinar el comportamiento acústico. Parte 1: Características intrínsecas relativas a la absorción sonora.

[8] UNE- EN 1793-2:1998. Dispositivos reductores de ruido de tráfico en carreteras. Método de ensayo para determinar el comportamiento acústico. Parte 2: Características intrínsecas relativas al aislamiento al ruido aéreo.

[9] Finite element method

[http://en.wikipedia.org/wiki/Finite\\_Element\\_Method](http://en.wikipedia.org/wiki/Finite_Element_Method)

[10] Finite-difference time-domain method

[http://en.wikipedia.org/wiki/Finite\\_difference\\_time\\_domain](http://en.wikipedia.org/wiki/Finite_difference_time_domain)

[11] Amirmohamed Muradali. Geometric Models to Model Acoustic Barriers Including Atmospheric Conditions. ‘University of Alberta’.