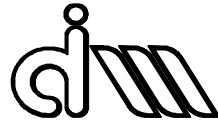


UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales



Trabajo Fin de Máster en Ingeniería Mecánica

“MODELIZACIÓN Y ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO ACÚSTICO DE
SILENCIADORES DISIPATIVOS EN PRESENCIA DE ALTAS TEMPERATURAS Y
GRADIENTES TÉRMICOS CON ANSYS WORKBENCH Y APDL”

Presentado por: D. Danilo Abelardo Gárate Montalvo
Dirigido por: Dr. D. Francisco David Denia Guzmán

Valencia, noviembre de 2020

AGRADECIMIENTOS

En este Trabajo Fin de Máster me gustaría agradecer a mis padres, Danilo y Eufrania, por todo el apoyo brindando en el transcurso de estos últimos años que han permitido formarme personal y profesionalmente de la mejor manera.

A mi tutor y director, Francisco Denia, por su tiempo y atención para el presente trabajo, por ser un excelente profesor y un gran ser humano.

A todos los grandes amigos y amigas que tuve el honor de conocer en mi estadía en España, por haber vivido experiencias inolvidables, por todo su apoyo, risas y viajes.

Gracias.



RESUMEN

Este Trabajo Fin de Máster se centra en el desarrollo de una metodología numérica completa para la modelización y análisis del comportamiento acústico de silenciadores disipativos en presencia de altas temperaturas y gradientes térmicos. Además, por su importancia en la práctica, se tiene en cuenta el efecto en la atenuación sonora de la presencia de un conducto perforado dentro del silenciador. Los programas utilizados para el desarrollo del trabajo son Ansys Workbench y Ansys Parametric Design Language (APDL), basados en el método de elementos finitos.

Como parte del desarrollo de este trabajo, en el segundo capítulo se presentan los fundamentos teóricos para entender la ciencia detrás de los silenciadores, de manera muy concisa se exponen temas relacionados con las propiedades del medio de propagación y las características fundamentales de las ondas cuya modelización es de interés en el marco del presente trabajo. También se hace hincapié en aspectos relevantes de la propagación de ondas, materiales fonoabsorbentes y conductos perforados, terminando el capítulo con una breve teoría acerca de los silenciadores disipativos y sus partes.

En el tercer capítulo se presentan los aspectos relevantes con relación al diseño de cada uno de los silenciadores que se van a modelizar mediante los programas comerciales, con el fin de establecer claramente las condiciones geométricas, dimensionales, etc. al momento de la creación tanto de las macros en APDL como del diseño en 3D en Ansys Workbench.

En el capítulo cuatro se presenta la implementación en las dos versiones de Ansys, para lo cual se explican detalladamente las macros desarrolladas correspondientes a APDL, con el fin de abarcar una infinidad de casos tanto presentes como futuros, mientras que en Ansys Workbench se explica el desarrollo para el correcto modelado de los silenciadores y condiciones de contorno. Posteriormente, para ambos programas se ejecutan los respectivos cálculos basados en el método de elementos finitos (MEF).

Una vez definida por completo la metodología a seguir en dichos programas, en el capítulo cinco se procede a estudiar de forma exhaustiva multitud de configuraciones de diseño. Se presentan los casos de estudio considerados y sus respectivos resultados luego de cada simulación. Además, se analizan en detalle los resultados obtenidos para



establecer directrices básicas de cálculo y diseño que permitan encontrar la mejor pérdida de transmisión entre las distintas variantes presentadas en el capítulo cinco. Finalmente se llega al sexto capítulo en donde se presentan las conclusiones más relevantes.

Palabras Clave: Ansys, Workbench, APDL, Elementos Finitos, Silenciadores Disipativos, Conductos Perforados, Temperatura, Gradiente Térmico, Materiales Absorbentes, Acústica, Atenuación.



RESUM

Este Treball Fi de Màster es centra en el desenvolupament d'una metodologia numèrica completa per a la modelització i anàlisi del comportament acústic de silenciadors dissipatius en presència d'altres temperatures i gradients tèrmics. A més, per la seua importància en la pràctica, es té en compte l'efecte en l'atenuació sonora de la presència d'un conducte perforat dins del silenciador. Els programes utilitzats per al desenvolupament de la feina són Ansys Workbench i Ansys Parametric Design Language (APDL), basats en el mètode d'elements finits.

Com a part del desenvolupament d'este treball, en el segon capítol es presenten els fonaments teòrics per entendre la ciència darrere dels silenciadors, de manera molt concisa s'exposen temes relacionats amb les propietats del medi de propagació i les característiques fonamentals de les ones la modelització de les quals és d'interès en el marc del present treball. També es posa l'accent en aspectes rellevants de la propagació d'ones, materials fonoabsorbents i conductes perforats, acabant el capítol amb una breu teoria sobre els silenciadors dissipatius i les seues parts.

En el tercer capítol es presenten els aspectes rellevants en relació al disseny de cada un dels silenciadors que es van a modelitzar mitjançant els programes comercials, per tal d'establir clarament les condicions geomètriques, dimensionals, etc. al moment de la creació tant de les macros en APDL com del disseny en 3D en Ansys Workbench.

En el capítol quatre es presenta la implementació en les dues versions d'Ansys i s'expliquen detalladament les macros desenvolupades corresponents a APDL, per tal d'abastar una infinitat de casos tant presents com futurs, mentre que en Ansys Workbench s'explica el desenvolupament per al correcte modelat dels silenciadors i condicions de contorn. Posteriorment, per als dos programes s'executen els respectius càlculs basats en el mètode d'elements finits (MEF).

Una vegada definida completament la metodologia a seguir en estos programes, en el capítol cinc es procedeix a estudiar de forma exhaustiva multitud de configuracions de disseny. Es presenten els casos d'estudi considerats i els seus respectius resultats després de cada simulació. A més, s'analitzen en detall els resultats obtinguts per establir



directrius bàsiques de càlcul i disseny que permeten trobar la millor pèrdua de transmissió entre les diferents variants presentades en el capítol 5. Finalment s'arriba al capítol sis on es presenten les conclusions més rellevants.

Paraules clau: Ansys, Workbench, APDL, Elements Finitis, Silenciadors Dissipatius, Conductes Perforats, Temperatura, Gradient Tèrmic, Materials Absorbents, Acústica, Atenuació.



ABSTRACT

This Master's Thesis focuses on the development of a complete numerical methodology for the modelling and analysis of the acoustic behavior of dissipative silencers in the presence of high temperature and thermal gradients. Furthermore, due to its importance in practice, the effect on sound attenuation of the presence of a perforated duct inside the silencer is considered. The programs used for the development of the work are Ansys Workbench and Ansys Parametric Design Language (APDL), based on the finite element method.

As part of the development of this work, in the second chapter the theoretical foundations to understand the science behind silencers are presented, together with a description in a very concise way of topics related to the properties of the propagation medium and the fundamental characteristics of the waves whose modelling is of interest within the framework of this work. Relevant aspects of wave propagation, sound absorbing materials and perforated ducts are also emphasized, the chapter being concluded with a brief theory about dissipative silencers and their parts.

The third chapter presents the relevant aspects in relation to the design of each of the silencers to be modelled by commercial programs, in order to clearly establish the geometric and dimensional conditions, etc. at the time of creating both the macros in APDL and the 3D design in Ansys Workbench.

In chapter four the implementation in the two versions of Ansys is presented, for which the macros developed corresponding to APDL are explained in detail, in order to cover an infinity of cases both present and future, while in Ansys Workbench the development is explained for the correct modelling of silencers and boundary conditions. Subsequently, for both programs the respective calculations based on the finite element method (FEM) are executed.

Once the methodology to be followed in these programs has been completely defined, in chapter five we proceed to study in an exhaustive manner several design configurations. The case studies considered, and their respective results are presented after each simulation. In addition, the results obtained are analyzed in detail to establish basic calculation and design guidelines that allow finding the best transmission loss among the



different variants presented in chapter five. Finally, the sixth chapter is reached where the most relevant conclusions are presented.

Keywords: Ansys, Workbench, APDL, Finite Elements, Dissipative Silencers, Perforated Ducts, Temperature, Thermal Gradient, Absorbent Materials, Acoustics, Attenuation.



ÍNDICE

| | |
|--|-----------|
| CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1 MOTIVACIÓN..... | 2 |
| 1.2 ANTECEDENTES | 2 |
| 1.3 OBJETIVOS DE ESTE TRABAJO..... | 3 |
| CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO..... | 4 |
| 2.1 INTRODUCCIÓN | 5 |
| 2.2 EL MEDIO DE PROPAGACIÓN..... | 5 |
| 2.3 TIPOS DE ONDAS..... | 6 |
| 2.3.1 SEGÚN EL MOVIMIENTO DE LAS PARTÍCULAS | 6 |
| 2.3.2 SEGÚN EL SENTIDO DE PROPAGACIÓN..... | 6 |
| 2.3.3 SEGÚN LA FORMA DE PROPAGACIÓN | 7 |
| 2.4 ONDAS PLANAS | 7 |
| 2.4.1 CARACTERIZACIÓN DE UNA ONDA | 8 |
| 2.4.2 IMPEDANCIA ACÚSTICA..... | 9 |
| 2.4.3 CUANTIFICACIÓN DEL SONIDO | 9 |
| 2.5 PROPAGACIÓN DE ONDAS SONORAS EN CONDUCTOS..... | 10 |
| 2.5.1 CAMBIO DE MEDIO DE PROPAGACIÓN..... | 10 |
| 2.5.2 CAMBIO DE SECCIÓN | 12 |
| 2.6 MATERIALES FONOAORSORBENTES..... | 14 |
| 2.7 PLACA PERFORADA..... | 15 |
| 2.8 SILENCIADORES DISIPATIVOS..... | 16 |
| CAPITULO 3: DISEÑOS DE LOS SILENCIADORES DISIPATIVOS..... | 19 |
| 3.1 SILENCIADOR DISIPATIVO SIN CONDUCTO PERFORADO Y TEMPERATURAS UNIFORMES..... | 20 |
| 3.2 SILENCIADOR DISIPATIVO SIN CONDUCTO PERFORADO Y GRADIENTE TÉRMICO..... | 21 |
| 3.3 SILENCIADOR DISIPATIVO CON CONDUCTO PERFORADO Y TEMPERATURAS UNIFORMES..... | 22 |
| 3.4 SILENCIADOR DISIPATIVO CON CONDUCTO PERFORADO Y GRADIENTE TÉRMICO..... | 24 |
| CAPITULO 4: IMPLEMENTACIÓN EN ANSYS PARAMETRIC DESIGN LANGUAGE Y ANSYS WORKBENCH..... | 25 |
| 4.1 ANSYS PARAMETRIC DESIGN LANGUAGE (APDL)..... | 26 |
| 4.2 ANSYS WORKBENCH..... | 38 |
| 4.2.1 MATERIALES | 39 |
| 4.2.2 GEOMETRÍA..... | 41 |
| 4.2.3 MALLADO | 44 |
| 4.2.4 CONDICIONES DE CONTORNO..... | 47 |
| 4.2.5 DEFINICIÓN DEL CONDUCTO PERFORADO | 50 |
| 4.2.6 SIMULACIÓN Y RESULTADOS..... | 52 |
| CAPITULO 5: SIMULACIONES Y RESULTADOS..... | 55 |
| 5.1 VALIDACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS IMPLEMENTADAS..... | 56 |
| 5.2 CASOS DE ESTUDIO..... | 58 |



| | | |
|-------|--|-----------|
| 5.3 | SILENCIADOR DISIPATIVO SIN CONDUCTO PERFORADO Y TEMPERATURAS UNIFORMES..... | 60 |
| 5.3.1 | CASO 1.1..... | 60 |
| 5.3.2 | CASO 1.2..... | 61 |
| 5.3.3 | CASO 1.3..... | 62 |
| 5.4 | SILENCIADOR DISIPATIVO SIN CONDUCTO PERFORADO Y GRADIENTE TÉRMICO..... | 63 |
| 5.4.1 | CASO 2.1..... | 63 |
| 5.4.2 | CASO 2.2..... | 64 |
| 5.4.3 | CASO 2.3..... | 65 |
| 5.5 | SILENCIADOR DISIPATIVO CON CONDUCTO PERFORADO Y TEMPERATURAS UNIFORMES..... | 66 |
| 5.5.1 | CASO 3.1..... | 66 |
| 5.5.2 | CASO 3.2..... | 67 |
| 5.5.3 | CASO 3.3..... | 67 |
| 5.6 | SILENCIADOR DISIPATIVO CON CONDUCTO PERFORADO Y GRADIENTE TÉRMICO..... | 69 |
| 5.6.1 | CASO 4.1..... | 69 |
| 5.6.2 | CASO 4.2..... | 70 |
| 5.6.3 | CASO 4.3..... | 71 |
| 5.7 | DIFERENTE GRADIENTE TÉRMICO..... | 73 |
| 5.8 | DIFERENTE NÚMERO DE SEGMENTOS..... | 74 |
| 5.9 | EFECTO DEL CONDUCTO PERFORADO..... | 75 |
| 5.10 | EFECTO DE LA LONGITUD DE LA CÁMARA DISIPATIVA..... | 76 |
| 5.11 | EFECTO DE LA DENSIDAD DE COMPACTACIÓN..... | 78 |
| | CAPITULO 6: CONCLUSIONES..... | 81 |
| 6.1 | APDL ANSYS WORKBENCH..... | 82 |
| 6.2 | TEMPERATURAS UNIFORMES Y GRADIENTES TÉRMICOS..... | 83 |
| 6.3 | EFECTO DEL CONDUCTO PERFORADO, LONGITUD DE CÁMARA DISIPATIVA Y DENSIDAD DE COMPACTACIÓN DE LA FIBRA..... | 84 |
| 6.4 | NÚMERO DE SEGMENTOS..... | 85 |
| 6.5 | TRABAJOS FUTUROS..... | 85 |
| | REFERENCIAS..... | 87 |
| | ANEXOS..... | 89 |
| 7.1 | MACRO DE APDL PARA SILENCIADOR DISIPATIVO SIN CONDUCTO PERFORADO Y TEMPERATURA UNIFORME..... | 89 |
| 7.2 | MACRO DE APDL PARA SILENCIADOR DISIPATIVO SIN CONDUCTO PERFORADO Y GRADIENTE TÉRMICO..... | 93 |
| 7.3 | MACRO DE APDL PARA SILENCIADOR DISIPATIVO CON CONDUCTO PERFORADO Y TEMPERATURA UNIFORME..... | 99 |
| 7.4 | MACRO DE APDL PARA SILENCIADOR DISIPATIVO CON CONDUCTO PERFORADO Y GRADIENTE TÉRMICO..... | 105 |
| 7.5 | COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE APDL Y ANSYS WORKBENCH..... | 113 |



Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN

Con los avances tecnológicos en las últimas décadas se han desarrollado diferentes dispositivos con el objetivo de mejorar la calidad de vida del ser humano, es así como el desarrollo del sector automotriz ha avanzado a pasos agigantados desde los motores de vapor hasta lo que tenemos actualmente, motores de combustión interna, motores híbridos y eléctricos. Siendo los motores de combustión interna los más utilizados, debido a su coste económico, su autonomía, accesibilidad, etc.

Cuando un motor de combustión interna está en funcionamiento genera vibraciones en el vehículo que en conjunto con las vibraciones del aire adyacente generan sonidos deseados y no deseados, llamados ruido. (Cheng, 2012)

Debido al gran crecimiento del parque automotor, sobre todo en grandes ciudades, el ruido de los vehículos presenta serios problemas para la salud de las personas que se encuentran constantemente expuestas a dicha contaminación acústica, por lo que instituciones como la Organización Mundial de la Salud (OMS) han definido a la contaminación acústica como uno de los problemas ambientales con mayor relevancia en el mundo. (Pacheco, Franco, & Behrentz, 2009)

1.2 ANTECEDENTES

En el Centro de Investigación del Dpto. de Ingeniería Mecánica de la Universitat Politècnica de València se han desarrollado múltiples proyectos en relación con la utilización de herramientas computacionales para el diseño y análisis de elementos finitos de silenciadores acústicos y sus diferentes tipologías, (Denia, Sánchez, Martínez, & Kirby, 2015) obtienen un modelo mixto de elementos finitos para el análisis acústico de silenciadores disipativos perforados, incluyendo varios efectos simultáneamente, entre ellos, altas temperaturas y gradientes térmicos en el conducto central y en el material absorbente y la utilización de conducto perforado, demostrando la influencia de dichos efectos en la pérdida de transmisión de silenciadores acústicos. (Denia, Selamet, Fuenmayor, & Kirby, 2007) estudian el comportamiento de silenciadores disipativos perforados con la entrada y salida extendida mediante un enfoque analítico simétrico bidimensional que iguala la presión y velocidad acústicas a través de sus discontinuidades geométricas, también utilizan el método de elementos finitos para el análisis de múltiples



efectos. (Munuera, 2019) presenta una metodología numérica detallada para simular y caracterizar el comportamiento acústico mediante Ansys Workbench de silenciadores de escape de motores de combustión interna, teniendo en cuenta silenciadores reactivos y disipativos, además del efecto de la presencia de un conducto perforado.

Las referencias anteriormente citadas son de gran utilidad para la realización del presente proyecto, tanto para los cálculos de propiedades de los materiales a utilizar para cada caso de análisis como para el diseño y simulación del silenciador disipativo mediante Ansys Workbench y Ansys Parametric Design Language (APDL).

1.3 OBJETIVOS DE ESTE TRABAJO

Modelar y analizar el comportamiento acústico de silenciadores disipativos en presencia de altas temperaturas y gradientes térmicos mediante Ansys Workbench y APDL.

Simular la pérdida de transmisión del silenciador ante variables como el conducto perforado en el silenciador, la dimensión de la cámara de expansión, la densidad de compactación de la fibra.

Comparar los resultados obtenidos mediante Ansys Workbench y APDL, considerando los gradientes térmicos aplicados, fiabilidad de los resultados y determinar cuál se considera el software más adecuado para este proyecto.



Capítulo 2

MARCO TEÓRICO

2.1 INTRODUCCIÓN

La modelización numérica de los fenómenos de propagación sonora llevada a cabo en el presente TFM es completamente tridimensional. En aras de la brevedad, en el desarrollo teórico presentado aquí solamente se consideran ondas planas. Si el lector desea disponer de información detallada de la formulación matemática completa multidimensional del MEF, puede recurrir a algunas de las referencias proporcionadas en la bibliografía (Denia, Martínez, Baeza, & Fuenmayor, 2012) y (Denia, Sánchez, Martínez, & Kirby, 2015)

El sonido se produce debido a una perturbación de presión en un medio elástico capaz de comprimirse, dicha perturbación se transmite a través de la vibración de las moléculas del medio a puntos colindantes del origen de la perturbación.

Las características del fenómeno de propagación dependen de las propiedades inerciales y elásticas del medio. (Denia, La Ecuación de Ondas, 2019)

2.2 EL MEDIO DE PROPAGACIÓN

Para que la perturbación sonora sea capaz de propagarse necesita de un soporte llamado medio de propagación, este puede ser sólido, líquido o gaseoso. Siendo el medio gaseoso el de mayor importancia para el proyecto actual ya que los gases presentes en el interior de los silenciadores se consideran como aire, asumiendo que el proceso de propagación es adiabático.

Las principales propiedades para determinar las características del aire son: la densidad, la presión, la temperatura, el calor específico, la viscosidad, la conductividad térmica, haciendo uso de la ecuación de estado del gas ideal para obtener algunas relaciones en función de la temperatura.

- Densidad:

$$\rho_T = \frac{p_T M_m}{RT} \quad (1)$$

- Velocidad de propagación:

$$c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M_m}} \quad (2)$$

Donde se consideran los valores típicos del aire: $\gamma 1.4$; $R = 8.314 \text{ Nm/K}$; $M_m = 0.02897 \text{ kg}$; Mientras que la temperatura tendrá distintos valores para efectos prácticos del presente proyecto.

2.3 TIPOS DE ONDAS

2.3.1 SEGÚN EL MOVIMIENTO DE LAS PARTÍCULAS

Las ondas acústicas producidas se pueden clasificar según el movimiento de las partículas como ondas longitudinales, en las que la dirección de desplazamiento de las partículas alrededor de la posición de equilibrio es la misma que la dirección de propagación de la perturbación y ondas transversales, en las cuales el desplazamiento de las partículas alrededor de la posición de equilibrio es perpendicular a la dirección de propagación de la perturbación.

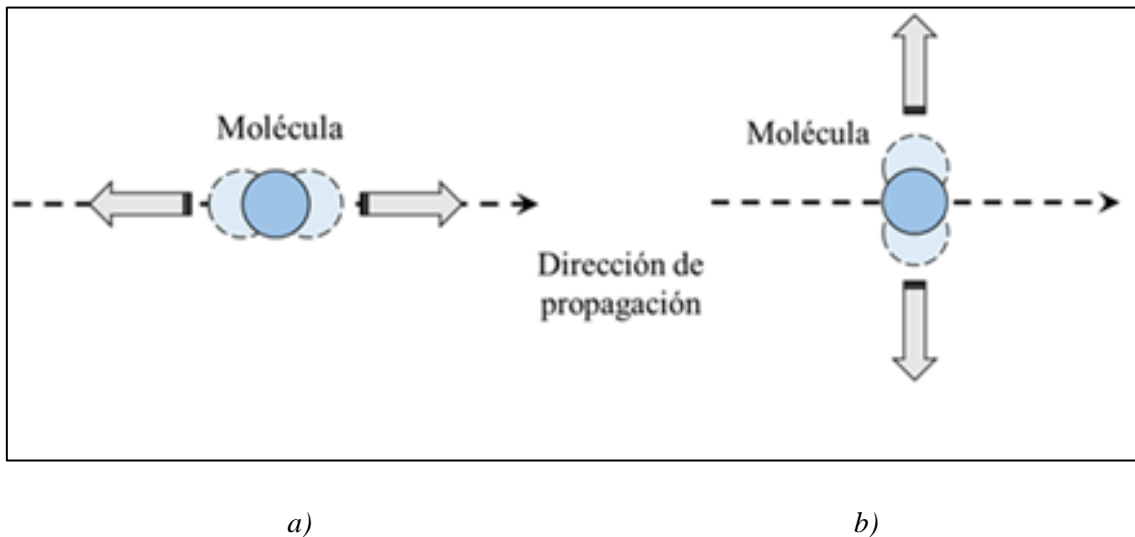


Figura 1. Movimiento de una molécula en una onda a). Longitudinal. b). Transversal.
(Munuera, 2019)

2.3.2 SEGÚN EL SENTIDO DE PROPAGACIÓN

Las ondas progresivas son aquellas cuya propagación se produce en sentido creciente de la coordenada espacial, se definen como una función $f(ct - x)$

Las ondas regresivas son aquellas cuya propagación se produce en sentido decreciente de la coordenada espacial, se definen como una función $g(ct + x)$

Mientras que una onda estacionaria puede ser una combinación de una onda progresiva y una regresiva, resultando un transporte neto de energía nulo.

2.3.3 SEGÚN LA FORMA DE PROPAGACIÓN

Este tipo de clasificación toma como criterio la forma en la que la onda es propagada, existiendo tres tipos de onda: las ondas planas o unidimensionales, las ondas cilíndricas o bidimensionales y las ondas esféricas o tridimensionales.

Se considera onda plana o unidimensional cuando la onda producida por un elemento puntual en vibración se propaga en una sola dimensión produciendo así frentes de onda paralelos, esto quiere decir que en un instante determinado todos los puntos con un estado de vibración idéntico se encuentran en un plano cuya dirección normal coincide con la dirección de propagación de la onda.

Se considera onda cilíndrica o bidimensional cuando la onda producida por una fuente puntual se propaga en un plano produciendo así frentes de onda circulares cuyo centro es el eje del foco que ha generado la onda.

Se consideran ondas esféricas o tridimensionales cuando la onda se propaga de igual manera en todas las direcciones. Por lo tanto, los frentes de onda son esferas concéntricas cuyo centro es la fuente. El comportamiento de los frentes de onda dependerá del tiempo y del radio al que se encuentren de la fuente.

2.4 ONDAS PLANAS

Se considera únicamente este tipo de ondas debido a que es el caso presentado en dispositivos como los silenciadores disipativos.

La propagación de la perturbación se puede expresar en forma de ecuación a partir de las ecuaciones de la dinámica, continuidad y una ecuación de estado. (Denia, La Ecuación de Ondas, 2019). La ecuación para las ondas planas viene dada por la siguiente expresión:

$$p(x, t) = A \cos(\omega t - kx + \varphi_1) + B \cos(\omega t + kx + \varphi_2) \quad (3)$$

También se puede expresar mediante su forma compleja:

$$p(x, t) = \hat{A} e^{j(\omega t - kx)} + \hat{B} e^{j(\omega t + kx)} \quad (4)$$

Siendo posible definir el campo acústico con las siguientes relaciones.

1. Presión

$$p(x) = \hat{A}e^{-jkx} + \hat{B}e^{jkx} \quad (5)$$

2. Velocidad

$$u(x) = \frac{1}{Z_0}(\hat{A}e^{-jkx} - \hat{B}e^{jkx}) \quad (6)$$

3. Desplazamiento

$$\xi(x) = \frac{1}{j\omega Z_0}(\hat{A}e^{-jkx} - \hat{B}e^{jkx}) \quad (7)$$

4. Condensación o compresión.

$$\theta(x) = \frac{1}{\rho_0 c^2}(\hat{A}e^{-jkx} + \hat{B}e^{jkx}) \quad (8)$$

2.4.1 CARACTERIZACIÓN DE UNA ONDA

Además de las relaciones presentadas anteriormente para definir el campo acústico de una onda plana resulta de interés práctico el concepto de intensidad sonora, que se define como la energía por unidad de tiempo que fluye por una superficie unitaria perpendicular a la dirección de propagación. La intensidad instantánea puede calcularse de manera general como: (Denia, La Ecuación de Ondas, 2019)

$$I(t) = p(t) u(t) \Rightarrow \vec{I}(t) = p(t) \vec{u}(t) \quad (9)$$

A partir de la intensidad, puede obtenerse la potencia acústica mediante integración en la superficie S considerada:

$$Pot(t) = \int \vec{I}(t) d\vec{S} \quad (10)$$

Para el caso particular de solución armónica, puede obtenerse la intensidad en un punto:

$$I(t) = p(t) u(t) = Re(\hat{P}e^{j\omega t})Re(\hat{U}e^{j\omega t}) = \frac{1}{2}Re(\hat{P}\hat{U}^* + \hat{P}\hat{U}e^{j2\omega t}) \quad (11)$$

Si se considera la integral a lo largo de un periodo se obtiene la intensidad activa:

$$\bar{I} = \frac{1}{2}Re(\hat{P}\hat{U}^*) \quad (12)$$

En el caso de ondas planas progresivas resulta finalmente:

$$\bar{I} = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(\hat{P}\hat{U}^*) = \frac{1}{2\rho_0 c} \operatorname{Re}(\hat{P}\hat{P}^*) = \frac{|\hat{P}|^2}{2\rho_0 c} = \frac{P_{eff}^2}{\rho_0 c} \quad (13)$$

Donde: $P_{eff} = \frac{|\hat{P}|}{\sqrt{2}}$ Presión eficaz (rms)

2.4.2 IMPEDANCIA ACÚSTICA

La relación entre presión acústica en un medio y la velocidad de la partícula se define en general como impedancia acústica específica. Se puede entender como la resistencia que opone un medio a las ondas sonoras que se propagan en este.

$$Z = \frac{p}{v} \quad (14)$$

La relación entre la presión y la velocidad para una onda plana progresiva definida como la impedancia característica del medio de propagación se puede calcular de la siguiente manera.

$$Z = \rho_0 c_0 \quad (15)$$

Para materiales fonoabsorbentes tales como fibras de vidrio, lana de basalto, etc. la impedancia acústica específica puede tener una parte real R_A y una parte imaginaria X_A , ambas en general dependientes de la frecuencia. Su unidad en el sistema internacional de unidades, $kg/(m^2s)$, se conoce como *rayl*.

2.4.3 CUANTIFICACIÓN DEL SONIDO

Para la cuantificación del sonido y su medida, así como en la aplicación de técnicas de control de ruido, es habitual la utilización de escalas logarítmicas. La aplicación de dichas escalas proporciona valores comúnmente conocidos como niveles sonoros.

1- Nivel de intensidad sonora

$$L_I = 10 \log \left(\frac{I}{I_{ref}} \right) dB \quad I_{ref} = 10 \cdot 10^{-12} W/m^2 \quad (16)$$

2- Nivel de potencia sonora

$$L_W = 10 \log \left(\frac{Pot}{Pot_{ref}} \right) dB \quad Pot_{ref} = 10 \cdot 10^{-12} W \quad (17)$$

3- Nivel de presión sonora:

$$L_p = 10 \log \left(\frac{P_{eff}}{P_{ref}} \right)^2 = 20 \log \left(\frac{P_{eff}}{P_{ref}} \right) \text{ dB} \quad P_{ref} = 20 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \quad (18)$$

Donde, I_{ref} , Pot_{ref} , P_{ref} hacen referencia al valor mínimo necesario para que el oído humano pueda percibir un sonido, situando en este valor como se puede observar en las fórmulas el nivel nulo de decibelios.

2.5 PROPAGACIÓN DE ONDAS SONORAS EN CONDUCTOS

Al propagarse una onda sonora en un determinado medio, pueden generarse varios fenómenos causados por cambios en las condiciones existentes. Algunos de esos fenómenos son interesantes debido a que en el silenciador disipativo a analizar existen cambios de sección, también se estudia un cambio de temperatura desde el inicio al final del silenciador e incluso un cambio de medio de propagación al interior de la cámara disipativa, debido a que entra en juego el material absorbente como un segundo medio.

2.5.1 CAMBIO DE MEDIO DE PROPAGACIÓN

Al tener dos medios de propagación distintos, estos se pueden definir por sus correspondientes impedancias características $Z_1 = \rho_1 c_1$ y $Z_2 = \rho_2 c_2$.

Cuando una onda plana progresiva se transmite del medio 1 al medio 2, se genera una onda transmitida y una onda reflejada debido al plano de separación de ambos medios.

Presentando la onda incidente, reflejada y transmitida respectivamente como:

$$p_i = \hat{P}_i e^{j(\omega t - k_1 x)} \quad (19)$$

$$p_r = \hat{P}_r e^{j(\omega t + k_1 x)} \quad (20)$$

$$p_t = \hat{P}_t e^{j(\omega t + k_2 x)} \quad (21)$$

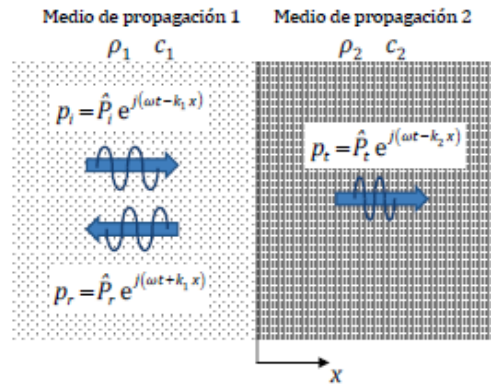


Figura 2. Reflexión y transmisión de ondas planas en dos medios de propagación. (Denia, Fenómenos de Propagación, 2019)

Las tres ondas se caracterizan por tener la misma frecuencia, pero diferente velocidad del sonido y número de onda. Mientras que en el plano de separación de ambos medios se satisface las condiciones de contorno de igual presión ($p_1 = p_2$) e igual velocidad ($u_1 = u_2$). Dando como resultado la presión y velocidad en cada medio como:

$$p_1 = \widehat{P}_i e^{j(\omega t - k_1 x)} + \widehat{P}_r e^{j(\omega t + k_1 x)} \quad (22)$$

$$p_2 = p_t = \widehat{P}_t e^{j(\omega t - k_2 x)} \quad (23)$$

$$u_1 = \frac{1}{Z_1} (\widehat{P}_i e^{j(\omega t - k_1 x)} - \widehat{P}_r e^{j(\omega t + k_1 x)}) \quad (24)$$

$$u_2 = \frac{1}{Z_2} \widehat{P}_t e^{j(\omega t - k_2 x)} \quad (25)$$

En el plano de separación se tiene que $x = 0$ y gracias a las condiciones de continuidad de presión y velocidad se obtiene: $p_1 = p_2 \rightarrow \widehat{P}_i + \widehat{P}_r = \widehat{P}_t$; $u_1 = u_2 \rightarrow \frac{\widehat{P}_i - \widehat{P}_r}{Z_1} = \frac{\widehat{P}_t}{Z_2}$

Definiendo el coeficiente de reflexión R como:

$$R = \frac{\widehat{P}_r}{\widehat{P}_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (26)$$

Se utiliza el coeficiente de reflexión de potencia α_r como la relación entre la energía reflejada y la energía incidente:

$$\alpha_r = \frac{\overline{Pot}_r}{\overline{Pot}_i} = |R|^2 \quad (27)$$

Mientras que el coeficiente de transmisión T se define como:

$$T = \frac{\widehat{P}_t}{\widehat{P}_i} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (28)$$

Para trabajar en términos de energía acústica se utiliza el coeficiente de transmisión de potencia α_t :

$$\alpha_t = \frac{\overline{Pot}_t}{\overline{Pot}_i} = 4 \frac{Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (29)$$

Se tiene en cuenta la conservación de energía, por lo que:

$$\alpha_t = 1 - \alpha_r \quad (30)$$

Esta última ecuación es muy útil cuando las impedancias acústicas son complejas como es el caso del material fonoabsorbente, Lana de basalto.

Finalmente, la caracterización acústica de materiales absorbentes de control de ruido se lleva a cabo mediante el índice de pérdida de transmisión:

$$TL = 10 \log \frac{\overline{Pot}_i}{\overline{Pot}_t} = 10 \log \frac{1}{\alpha_t} \quad (31)$$

2.5.2 CAMBIO DE SECCIÓN

En la figura 3 se presenta un cambio de sección al inicio de un silenciador disipativo, formado por dos conductos con diferente área transversal.

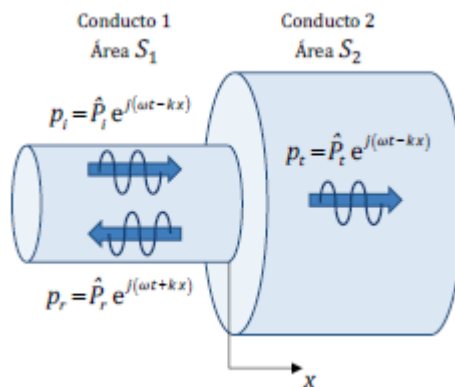


Figura 3. Reflexión y transmisión de ondas planas en un cambio de sección. (Denia, Fenómenos de Propagación, 2019)

En el plano de separación ($x = 0$) se satisfacen las condiciones de continuidad de presión

y flujo másico acústico: $p_1 = p_2 \rightarrow \widehat{P}_i + \widehat{P}_r = \widehat{P}_t$

Desarrollando se obtiene el coeficiente de reflexión como:

$$R = \frac{\widehat{P}_r}{\widehat{P}_i} = \frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} \quad (32)$$

En el caso del silenciador disipativo se presentan los siguientes casos:

- $S_1 < S_2$: Los tubos forman una expansión y se tiene que $-1 \leq R \leq 0$
- $S_1 > S_2$: Los tubos forman una contracción y se tiene que $0 \leq R \leq 1$

El coeficiente de transmisión se obtiene como:

$$T = \frac{\widehat{P}_t}{\widehat{P}_i} = \frac{2S_1}{S_1 + S_2} \quad (33)$$

Presentándose los siguientes casos:

- $S_1 < S_2$: Los tubos forman una expansión y se tiene que $0 \leq T \leq 1$
- $S_1 > S_2$: Los tubos forman una contracción y se tiene que $1 \leq T \leq 2$

Durante el cambio de sección se puede producir una reflexión importante de energía hacia la fuente sonora, las potencias asociadas son:

$$\overline{Pot}_i = \bar{I}_i S_1 = \frac{|\widehat{P}_i|^2 S_1}{2\rho_0 c} \quad (34)$$

$$\overline{Pot}_r = \bar{I}_r S_1 = \frac{|\widehat{P}_r|^2 S_1}{2\rho_0 c} \quad (35)$$

$$\overline{Pot}_t = \bar{I}_t S_2 = \frac{|\widehat{P}_t|^2 S_2}{2\rho_0 c} \quad (36)$$

Dando lugar a los coeficientes de reflexión y transmisión de potencia:

$$\alpha_r = R^2 = \left(\frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} \right)^2 \quad (37)$$

$$\alpha_t = T^2 \frac{S_2}{S_1} = \frac{4 S_1 S_2}{(S_1 + S_2)^2} \quad (38)$$

Obteniendo finalmente el índice de pérdidas de transmisión:

$$TL = 10 \log \frac{\overline{Pot}_i}{\overline{Pot}_t} = 10 \log \frac{\overline{Pot}_i}{\overline{Pot}_i - \overline{Pot}_r} = 10 \log \frac{1}{\alpha_t}$$

$$TL = 10 \log \frac{(S_1 + S_2)^2}{4 S_1 S_2} \quad (39)$$

2.6 MATERIALES FONOABSORBENTES

La principal función de los materiales fonoabsorbentes o porosos es disminuir la energía acústica del sonido. Estos materiales están presentes en una gran variedad de aplicaciones para aumentar la atenuación sonora. Los materiales fonoabsorbentes más utilizados son las fibras naturales, artificiales y espumas poliméricas (Martínez, 2010). Estos materiales pueden atenuar los sonidos debido en parte a que en el interior del material la onda acústica sufre una serie de reflexiones, y también debido a las pérdidas viscosas que se dan lugar en los intersticios.

Las propiedades acústicas de este tipo de materiales se obtienen habitualmente de forma experimental o bien se ajustan a modelos matemáticos de tipo empírico o semi empírico. La propiedad que genera mayor interés para efectos prácticos del presente proyecto es la impedancia característica, que se puede ajustar a la siguiente expresión:

$$Z_{abs} = Z_{aire} \left[1 + a_5 \left(\frac{\rho_{aire} f}{R_{flujo}} \right)^{a_6} - j a_7 \left(\frac{\rho_{aire} f}{R_{flujo}} \right)^{a_8} \right] \quad (40)$$

Para la realización de cálculos y simulaciones donde se involucra materiales absorbentes es habitual calcular el número de onda complejo.

$$k_{abs} = k_{aire} \left[1 + a_3 \left(\frac{\rho_{aire} f}{R_{flujo}} \right)^{a_4} - j a_1 \left(\frac{\rho_{aire} f}{R_{flujo}} \right)^{a_2} \right] \quad (41)$$

Finalmente, del número de onda se puede obtener la constante de propagación.

$$\gamma = j \cdot k_{abs} = k_{aire} \left[a_1 \left(\frac{\rho_{aire} f}{R_{flujo}} \right)^{a_2} + j \left(1 + a_3 \left(\frac{\rho_{aire} f}{R_{flujo}} \right)^{a_4} \right) \right] \quad (42)$$

En las expresiones anteriores, Z_{aire} , k_{aire} y ρ_{aire} hacen referencia a la impedancia, número de onda y densidad del aire presente entre las fibras del material absorbente respectivamente. El valor f representa la frecuencia (Hz) y R_{flujo} la resistividad a flujo estacionario del material absorbente ($Pa s/m^2$). Los coeficientes a_1 , a_2 , a_3 , a_4 , a_5 , a_6 , a_7 y a_8 se obtienen por ajuste matemático y se muestran en la tabla 1 para tres materiales que se utilizan de manera habitual en control de ruido.

Tabla 1. Coeficientes experimentales para el número de onda y la impedancia de materiales fonoabsorbentes. (Denia, Fenómenos de Propagación, 2019)

| Material | Fibra de vidrio E | Lana de basalto | Fibra texturizada |
|----------|-------------------|-----------------|-------------------|
| a_1 | 0.220 | 0.218 | 0.189 |
| a_2 | -0.585 | -0.605 | -0.595 |
| a_3 | 0.201 | 0.128 | 0.160 |
| a_4 | -0.583 | -0.675 | -0.577 |
| a_5 | 0.095 | 0.060 | 0.095 |
| a_6 | -0.669 | -0.766 | -0.754 |
| a_7 | 0.169 | 0.138 | 0.085 |
| a_8 | -0.571 | -0.628 | -0.732 |

Como se mencionó anteriormente el material que se toma en cuenta para el presente proyecto es únicamente la Lana de basalto, por lo que se utiliza los coeficientes respectivos.

Al producirse el cambio de medio de propagación de aire a un material absorbente, la onda transmitida que atraviesa este último medio se disipa progresivamente, causando que la energía acústica se convierta en calor mediante los fenómenos de fricción viscotérmica. Por este motivo, el coeficiente de transmisión de potencia es frecuentemente interpretado como un coeficiente de absorción.

2.7 PLACA PERFORADA

Resulta interesante estudiar el efecto del conducto perforado que se encuentra entre el conducto central y la cámara disipativa, para esto es necesario definir la impedancia acústica correspondiente a la superficie perforada como: (Munjál, 2014)

$$\tilde{Z}_p = \frac{P_a - P_m}{U_n} = R_0 + j X_0 \quad (43)$$

Donde P_a corresponde a la presión acústica en el conducto central, en donde el medio es el aire, P_m corresponde a la presión acústica en el material absorbente que se encuentra en la cámara disipativa y U_n representa la velocidad acústica promedio que atraviesa el orificio. La impedancia acústica se expresa como un número complejo siendo la parte real R_0 la resistencia de la impedancia acústica y la parte imaginaria X_0 la reactancia.

Cuando los niveles de presión acústica son considerablemente bajos a un lado y al otro de la superficie perforada y se presenta un régimen lineal, la impedancia acústica se

relaciona linealmente con la diferencia de presión que hay entre ambas caras. Sin embargo, cuando la presión acústica es aumentada se produce un incremento de la amplitud de la velocidad y variaciones del desfase a través de los orificios, este hecho lleva a que el comportamiento de la propagación de la onda a través de la superficie perforada presente un carácter no lineal, en estos casos la impedancia depende de la velocidad a través de los orificios (Munuera, 2019).

(Denia, Selamet, Fuenmayor, & Kirby, 2007) obtienen la impedancia acústica en ausencia del material absorbente mediante la siguiente ecuación:

$$Z_p = \frac{0.006 + jk_0 (t_p + 0.85 d_h F(\sigma))}{\sigma} \quad (44)$$

Donde d_h representa el diámetro de los agujeros del conducto perforado, t_p representa el espesor del conducto perforado, σ representa la porosidad y $F(\sigma)$ representa una función que explica la interacción entre los agujeros del conducto perforado.

La porosidad σ puede ser definida como el cociente entre el área de la superficie que corresponde a las perforaciones, es decir, el área donde no hay material, y el área total de la superficie perforada.

La función $F(\sigma)$ es obtenida mediante el valor promedio de las correcciones de Ingard y Fok, determinadas mediante $F_I(\sigma)$ y $F_F(\sigma)$ respectivamente. (Bento, 1983).

$$F_I(\sigma) = 1 - 0.7 \sqrt{\sigma} \quad (45)$$

$$F_F(\sigma) = 1 - 1.41\sqrt{\sigma} + 0.34(\sqrt{\sigma})^3 + 0.07(\sqrt{\sigma})^5 \quad (46)$$

2.8 SILENCIADORES DISIPATIVOS

Los silenciadores son dispositivos que tienen la función de contrarrestar la transmisión del sonido producido por los motores de combustión, reduciendo el ruido que sale al medioambiente.

Los silenciadores se pueden clasificar en silenciadores pasivos, que son los que emplean medios físicos para la atenuación del sonido, y en silenciadores activos, los cuales se consideran silenciadores retroalimentados, en los que se mide el ruido entrante y se actúa contra este imponiendo una onda de choque, reduciendo el ruido. (Pérez, 2012)

Dentro de los silenciadores pasivos se encuentran los silenciadores reactivos y los silenciadores disipativos, también llamados resistivos y que son los que se utilizan para el presente proyecto.

La característica principal de este tipo de silenciadores es la utilización de materiales absorbentes de gran superficie específica, de esta forma, la potencia sonora que incide sobre el material absorbente se transforma en calor evitando la atenuación del sonido se produzca por reflexión sino por una atenuación sonora de banda ancha por conversión a calor y una pérdida de presión muy baja.

Los silenciadores disipativos presentan un amplio rango de frecuencias atenuadas, tendiendo a incrementarse a medida que aumenta la superficie específica por lo que presentan mayor efectividad atenuando ruidos emitidos a altas frecuencias, no así, a frecuencias bajas no presentan gran efectividad.

Para aumentar la efectividad de la atenuación sonora se puede incorporar tubos perforados, con un porcentaje de porosidad baja, generando una disipación adicional gracias a la fricción existente en los orificios. (Munuera, 2019)

En el presente proyecto se plantea estudiar silenciadores disipativos sin conducto perforado y con conducto perforado, las partes de cada uno se presentan en las figuras 4 y 5 respectivamente. En la figura 5 además se muestra la división de segmentos y el efecto del gradiente térmico

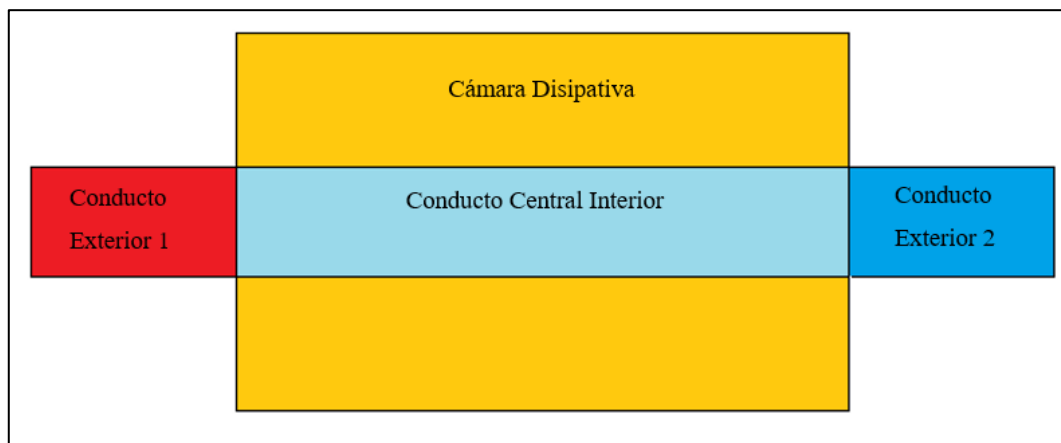


Figura 4. Partes de un Silenciador Disipativo Sin Conducto Perforado

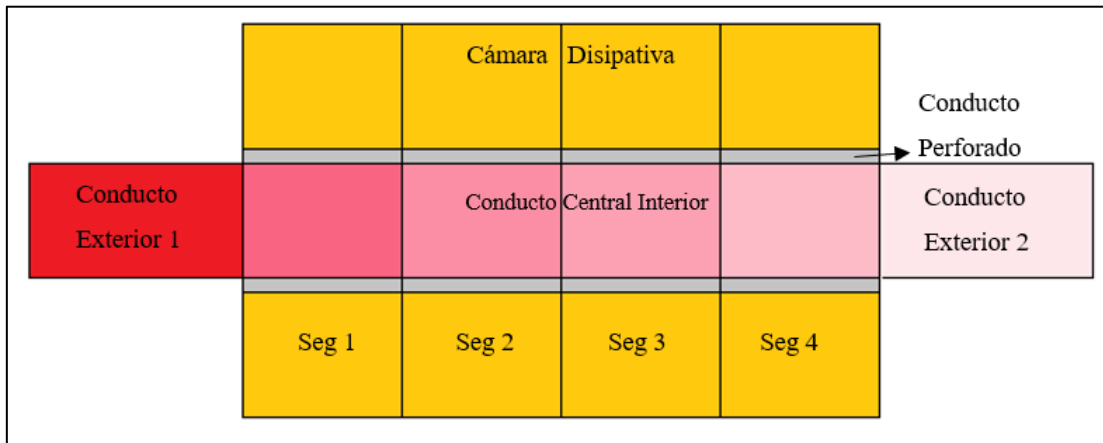


Figura 5. Partes de un Silenciador Disipativo Sin Conducto Perforado



Capítulo 3

DISEÑOS DE LOS SILENCIADORES DISIPATIVOS

3.1 SILENCIADOR DISIPATIVO SIN CONDUCTO PERFORADO Y TEMPERATURAS UNIFORMES

El primer diseño planteado para el proyecto es el silenciador disipativo sin conducto perforado, mostrado en la figura 6, que consta de un conducto central por donde entra y sale el aire y de una cámara disipativa mostrada de color azul que contiene el material absorbente.

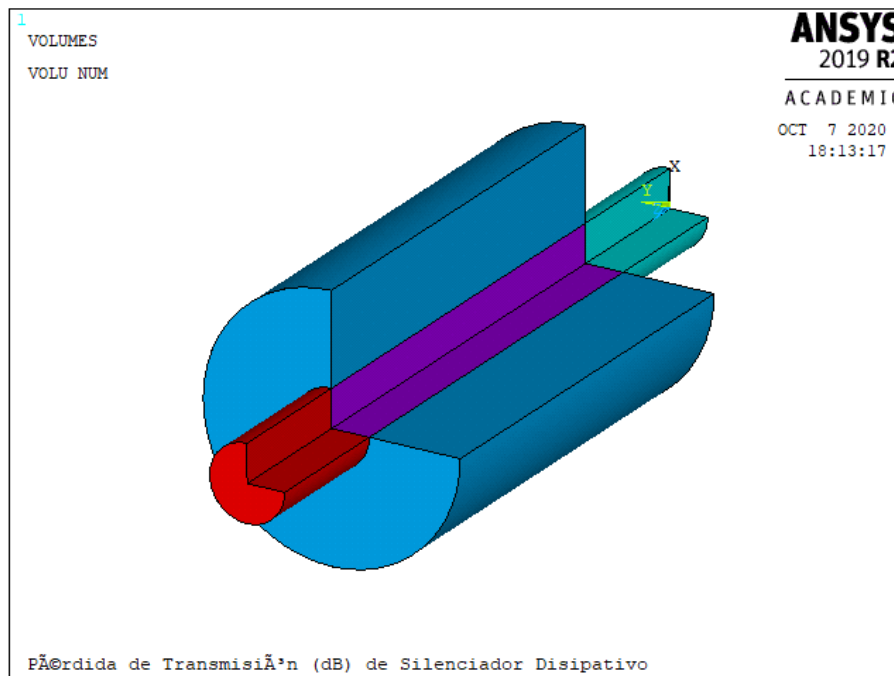


Figura 6: Silenciador disipativo sin conducto perforado

Cabe destacar que el conducto central está dividido en 2 conductos exteriores que servirán de entrada y salida, mientras que en el interior únicamente se tiene un conducto debido a que en este diseño se trabaja con una temperatura constante de trabajo del aire.

Las características del material absorbente son consideradas para el desarrollo del programa en Ansys mediante lo visto en la sección 2.6, es decir, el material absorbente tendrá la impedancia característica y la constante de propagación correspondiente a cada frecuencia comprendida dentro de un rango determinado.

3.2 SILENCIADOR DISIPATIVO SIN CONDUCTO PERFORADO Y GRADIENTE TÉRMICO

Este siguiente diseño presenta la novedad del gradiente térmico para lo cual se ha segmentado tanto el conducto central como la cámara disipativa, en este caso en 4 segmentos, sin embargo, el usuario puede escoger el número de segmentos que crea conveniente.

En la figura 7 se presenta el diseño propuesto en donde cada segmento tendrá la media de las temperaturas correspondientes en cada división de segmentos. Para esto es necesario una temperatura de entrada y una temperatura de salida.

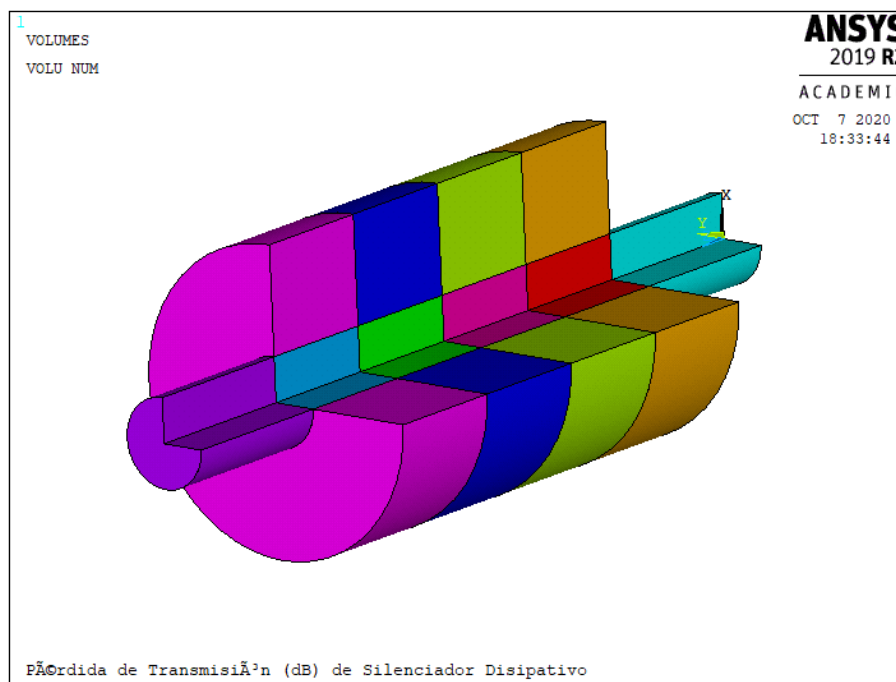


Figura 7. Silenciador disipativo con gradiente térmico sin conducto perforado

Para este caso también se utiliza la impedancia característica del material absorbente vista en la sección 2.6, lo que varía con el caso anterior es que cada segmento tiene que ser calculado debido a que se encuentran a distintas temperaturas, por lo que cada uno tendrá su correspondiente impedancia característica y constante de propagación en un rango de frecuencias determinado.

3.3 SILENCIADOR DISIPATIVO CON CONDUCTO PERFORADO Y TEMPERATURAS UNIFORMES

En la figura 8 se presenta el diseño del silenciador disipativo con conducto perforado.

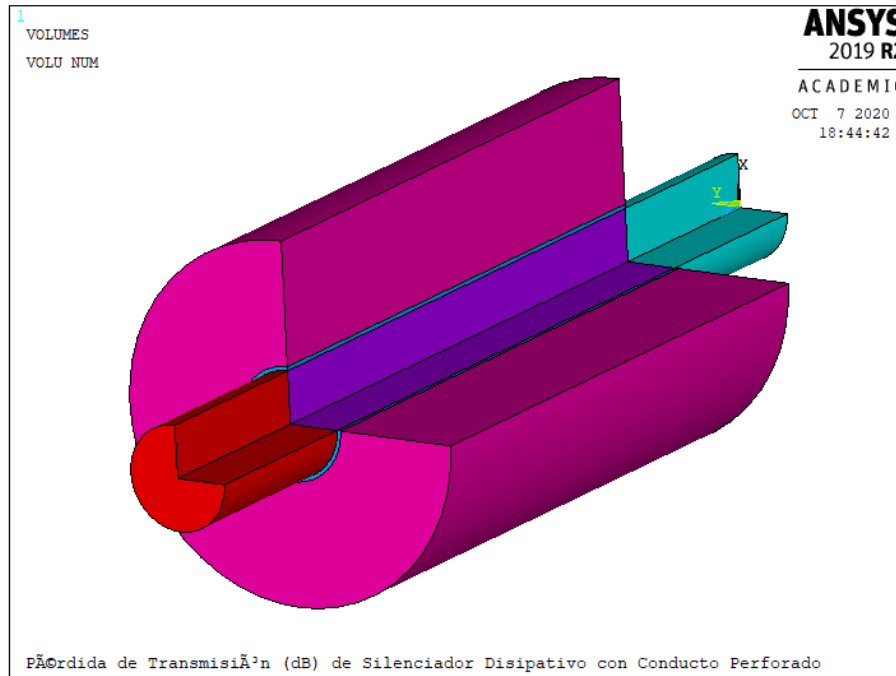


Figura 8. Silenciador disipativo con conducto perforado

Como se puede observar el conducto perforado actúa de un acople entre el conducto central y la cámara disipativa, dicho conducto perforado tendrá sus respectivas características de porosidad para cada caso de análisis.

Para este caso hay que obtener la impedancia característica del conducto perforado combinando lo visto en las secciones 2.6 y 2.7, por lo que se debe incorporar el efecto del material absorbente, (Denia, Martínez, Baeza, & Fuenmayor, 2012) permiten obtener la impedancia característica correspondiente al silenciador disipativo con conducto perforado de la siguiente manera:

$$\tilde{Z}_p = Z_0 \frac{0.006 + jk_0 \left(t_p + 0.425 d_h \left(1 + \frac{\tilde{\rho}}{\rho_0} \right) F(\sigma) \right)}{\sigma} \quad (47)$$

Es muy importante seleccionar un valor adecuado de σ para la superficie perforada, ya que, si se elige un valor muy pequeño, supondría que la onda acústica no se transfiera a la cámara disipativa mientras que un valor muy grande supondría un efecto de la



superficie perforada nula, causando que la onda acústica se transfiera a la cámara disipativa en una cantidad más de la deseada.

El valor de porosidad que se considera correcto para los análisis es de 0.1 es decir el 10%.

Una vez definida la impedancia acústica para el silenciador disipativo con conducto perforado, es necesario definir la matriz de admitancia, debido a que será esta propiedad la que el software necesita para caracterizar correctamente el conducto perforado.

Para definir la matriz de admitancia se realiza una analogía a la ingeniería eléctrica, en donde la admitancia (Y) de un circuito es la facilidad que este ofrece al paso de la corriente, por lo que se podría definir la admitancia como la inversa de la impedancia:

$$Y = Z^{-1} = \frac{1}{Z} \quad (48)$$

3.4 SILENCIADOR DISIPATIVO CON CONDUCTO PERFORADO Y GRADIENTE TÉRMICO

De manera similar que el diseño de la sección 3.2 este diseño se caracteriza por tener un gradiente térmico a lo largo del conducto central, por lo que tanto la cámara disipativa como el conducto perforado y el conducto central son segmentados en un número de segmentos determinado por el usuario. En la figura 9 se muestra un ejemplo con 4 segmentos.

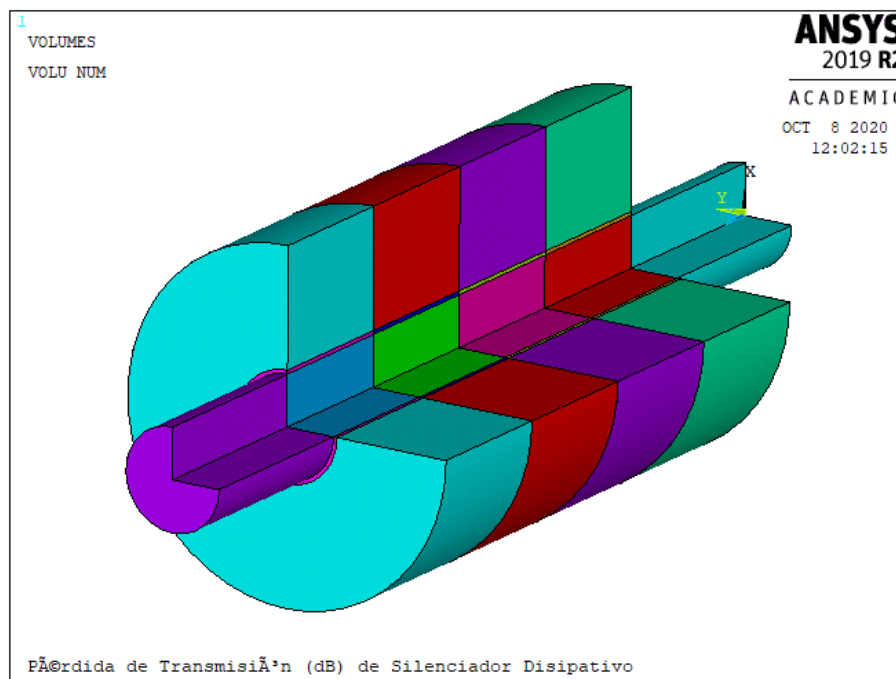


Figura 9: Silenciador disipativo con conducto perforado y gradiente térmico

Las características de la cámara disipativa son las mismas que se encuentran en la sección 2.6 mientras que las del conducto perforado se presentan en la sección 3.3, con la diferencia de que cada segmento tiene su propia impedancia dependiendo de la temperatura a la que se encuentra.



Capítulo 4

IMPLEMENTACIÓN EN ANSYS PARAMETRIC DESIGN LANGUAGE Y ANSYS WORKBENCH

4.1 ANSYS PARAMETRIC DESIGN LANGUAGE (APDL)

APDL es un software base de Ansys el cual permite muchas funciones como parametrización, la creación y desarrollo de macros, bucles y operaciones matemáticas complejas y su respectivo análisis mediante el método de los elementos finitos (MEF).

A primera vista, APDL puede resultar complicado, teniendo en cuenta que su interfaz no es tan intuitiva como otros softwares, sobre todo al momento de diseñar componentes en 3D, por lo que es muy recomendable el uso de macros con sus respectivos comandos para la creación de dichos elementos, así como para el correspondiente proceso de mallado, condiciones de contorno, solución y post proceso.

Aquí se muestra la implementación del caso más completo, es decir el diseño de la sección 3.4 correspondiente al silenciador disipativo con conducto perforado y gradiente térmico, debido a que este diseño contiene todos los niveles de dificultad del proyecto, por lo que resulta sencillo encontrar la solución para los demás diseños a partir de este.

Como se mencionó anteriormente el uso de macros es muy útil al momento de diseñar y solucionar los casos propuestos por lo que se presenta la macro correspondiente al silenciador disipativo con conducto perforado y gradiente térmico.

En la figura 10 se presenta las primeras 36 líneas de la macro, en donde se introducen varios datos de entrada especificados en su línea y nombre correspondiente.

Una variable por considerar dentro del proyecto es la presentada en la línea 11:

$$- \text{rho_compac} = 100 \quad ! \text{Densidad de compactación de la fibra (kg/m}^3\text{)}.$$

Esta variable es importante ya que se debe estudiar su efecto para valores de 100 y 200 kg/m^3 .

Los datos que corresponden a las dimensiones tanto del conducto perforado como del silenciador en general son tomados de (Denia, Sánchez, Martínez, & Kirby, 2015). Cabe destacar que el valor del espesor presentado en la línea 17 es el que se utiliza para el posterior cálculo de las propiedades del conducto perforado.

Se considera las constantes del modelo de gas ideal, y los parámetros asociados al conducto perforado donde la porosidad se representa en la línea 18.

- $\text{poro} = 0.1$! Porosidad en tanto por uno

También se calculan las correcciones de Ingard y Fok, en las líneas 20 y 21 respectivamente, para caracterizar correctamente el conducto perforado.

Desde la línea 26 a la 35 se presentan los coeficientes correspondientes a la Lana de basalto, presentados anteriormente en la tabla 1.

```
1 /title, Pérdida de Transmisión (dB) de Silenciador Disipativo con Conducto Perforado
2 /prep7
3 /view,1,1,1,1
4 ! *****
5 ! Cálculo de propiedades del aire. Modelo de gas perfecto
6 ! *****
7 R=8.314                   ! Constante de gas perfecto (J/K mol)   K==kelvin
8 Mm=0.02897               ! Masa molar del aire (kg/mol)
9 Patm=101325              ! Presión (Pa)
10 gamma=1.4               ! Cociente de calores específicos
11 rho_compac=100          ! Densidad de compactación de la fibra (kg/m^3).
12 ! *****
13 ! Parámetros asociados al conducto perforado para el cálculo
14 ! de su impedancia acústica
15 ! *****
16 dori=0.0035             ! Diámetro de orificios
17 espe=0.001              ! Espesor real del conducto
18 poro=0.1                 ! Porosidad en tanto por uno
19 raizporo=sqrt(poro)     ! Cálculo de factor de interacción de orificios
20 Ingard=1-0.7*raizporo
21 Fok=1-1.41*raizporo+0.34*raizporo**3+0.07*raizporo**5
22 mean_IngardFok=0.5*(Ingard+Fok)
23 ! *****
24 ! Características del Material
25 ! Lana de basalto
26 a1=0.2178
27 a2=-0.6051
28 a3=0.1281
29 a4=-0.6746
30 a5=0.0599
31 a6=-0.7664
32 a7=0.1376
33 a8=-0.6276
34 AA1=3.012                ! Coeficientes para el cálculo de la resistividad
35 AA2=1.761
36 resis0=AA1*rho_compac**AA2   ! Resistividad a temperatura de referencia
```

Figura 10. Definición de constantes y características del material

Las siguientes líneas son presentadas en la figura 11, en donde el usuario puede disponer del diseño en sí, tanto para las dimensiones del silenciador (líneas 39 a la 42) como para el número de segmentos (línea 45) que se desean en el interior de la cámara disipativa, el conducto perforado y el conducto central interior.

En la línea 43 y 44 se presentan las temperaturas de entrada al silenciador y la temperatura del medioambiente, es decir, la temperatura a la salida del silenciador, esto con el objetivo de calcular las correspondientes temperaturas promedio en cada segmento determinado para su posterior caracterización.

Desde la línea 49 a la 52 se presentan el rango de frecuencias a la que se trabaja para el análisis, de esto dependerá gran parte del coste computacional que tendrá ya que las respectivas impedancias tanto de la cámara disipativa como del conducto perforado son calculadas para cada frecuencia que se determina.

Para estos casos se ha determinado una frecuencia inicial de 10 Hz, una frecuencia final de 3000 Hz con un incremento de 10 Hz, resultado un número de frecuencias de cálculo de 300 frecuencias.

```
37 ! *****
38 ! DATOS DE ENTRADA
39 rduct=0.0268 ! Radio de conducto de entrada, central y salida
40 lduct=0.1 ! Longitud de conductos exteriores
41 rchamb=0.091875 ! Cámara central disipativa
42 lchamb=0.3 ! Longitud de la cámara central disipativa
43 Temp_e=600 ! Temperatura de entrada al silenciador
44 Temp_s=300 ! Temperatura de salida al medioambiente
45 n_seg=4 ! Número de segmentos de la cámara disipativa
46
47 ! *****
48 ! Modelo de Ansys de impedancia compleja y constante de propagación
49 f_fin=3000 ! Máxima frecuencia de cálculo (Hz)
50 f_ini=10 ! Frecuencia inicial
51 deltaf=10 ! Incremento de frecuencia
52 Nfrec=(f_fin-f_ini)/deltaf+1 ! Número de frecuencias de cálculo
53 !
54 pi=3.141592653589793 ! Valor numérico de Pi
55 Tref=15 ! Temperatura de referencia para resis0 (°C)
56 ! *****
```

Figura 11. Datos de entrada y definición de rango de frecuencias

En la figura 12 se presenta la tercera parte de la macro en donde se definen 2 tipos de elementos, tetraedros de 10 nodos para el conducto central y para la cámara disipativa, mientras que para el conducto perforado se definen hexaedros de 20 nodos debido a que este tipo de elemento si permite introducir la matriz de admitancia característica.

Desde la línea 60 a la 72 se definen las propiedades de los conductos de entrada y salida del silenciador, debido a que estos no cambiaran de propiedades con los segmentos, se debe tener en cuenta que se trabaja con las temperaturas medias en ambos conductos y

por lo tanto se calcula la densidad del aire y la velocidad del sonido con dichas temperaturas, además se comienza creando los 2 primeros materiales correspondientes a los conductos de entrada y salida.

```
57 et,1,221,,1 ! Tetraedro acústico de 10 nodos
58 et,2,220,,1 ! Hexaedros y prismas de 20 nodos
59 ! Propiedades de los tubos de entrada
60 Lme=lduct/2 ! Longitud media del tubo de entrada
61 T_e_1=Temp_e+Lme*((Temp_s-Temp_e)/(2*lduct+lchamb)) ! Temperatura en la longitud media del conducto de entrada
62 rho0_e_1=Patm*Mm/(R*(T_e_1+273.15)) ! Densidad del aire (kg/m^3)
63 c0_e_1=sqrt(gamma*R*(T_e_1+273.15)/Mm) ! Velocidad del sonido (m/s)
64 mp,dens,1,rho0_e_1 ! Material (regiones de aire)
65 mp,sonc,1,c0_e_1
66 ! Propiedades de los tubos de salida
67 Lms=lduct+lchamb+lduct/2 ! Longitud media del tubo de salida
68 T_e_2=Temp_e+Lms*((Temp_s-Temp_e)/(2*lduct+lchamb)) ! Temperatura en la longitud media del conducto de salida
69 rho0_e_2=Patm*Mm/(R*(T_e_2+273.15)) ! Densidad del aire (kg/m^3)
70 c0_e_2=sqrt(gamma*R*(T_e_2+273.15)/Mm) ! Velocidad del sonido (m/s)
71 mp,dens,2,rho0_e_2 ! Material (regiones de aire)
72 mp,sonc,2,c0_e_2
73
74 nl=3
75 ! CONDUCTO INTERIOR
76 *DO,I,1,n_seg,1
77 Lc=lduct+lchamb*(I-0.5)/n_seg
78 Temp_c=Temp_e+Lc*((Temp_s-Temp_e)/(2*lduct+lchamb)) ! Temperatura en la longitud media de cada segmento
79 rho0_c=Patm*Mm/(R*(Temp_c+273.15)) ! Densidad del aire (kg/m^3)
80 c0_c=sqrt(gamma*R*(Temp_c+273.15)/Mm) ! Velocidad del sonido (m/s)
81 mp,dens,nl,rho0_c ! Material para los segmentos del conducto interior
82 mp,sonc,nl,c0_c
83 nl=nl+1
84 *ENDDO
```

Figura 12. Propiedades del conducto central

Para caracterizar correctamente el material correspondiente a cada segmento del conducto interior se hace uso del bucle presentado desde la línea 76 a la 83, dentro del cual se calcula la longitud a la que se encuentra cada segmento, su respectiva temperatura y por ende sus propiedades, aquí se considera que en el conducto interior está compuesto únicamente de aire por lo que se calcula la densidad y la velocidad del sonido correspondiente.

En la figura 13 se presenta la cuarta parte de la macro, correspondiente al cálculo de las propiedades de los materiales de cada segmento del conducto perforado, se inicia con un bucle desde la línea 86 hasta la 92 en donde se calculan las propiedades para las regiones de aire del conducto perforado, esto es similar al primer bucle presentado en la figura 10, sin embargo, desde la línea 95 hasta la 121 se presenta otro bucle dentro del primer bucle en el cual se utiliza las ecuaciones vistas, tanto en las secciones 2.6 las ecuaciones vistas, tanto en las secciones 2.6 como en la 3.4, teniendo en cuenta que Ansys no permite trabajar con número complejos, por lo que se representan las partes reales e imaginarias

de la impedancia característica del material absorbente, dando como resultado una matriz de admitancias con sus partes reales e imaginarias de igual manera.

Cabe destacar las líneas 94, 118, 119 y 120 que cumplen la función de definir las propiedades del conducto perforado en cada material de cada segmento.

```
85 ! CONDUCTO PERFORADO
86 *DO, J, 1, n_seg, 1
87 Lc=lduct+lchamb*(J-0.5)/n_seg ! Longitud media de cada segmento
88 Temp_c=Temp_e+Lc*(Temp_s-Temp_e)/(2*lduct+lchamb) ! Temperatura en cada segmento
89 rho0_c=Patm*Mm/(R*(Temp_c+273.15)) ! Densidad del aire (kg/m^3)
90 c0_c=sqrt(gamma*R*(Temp_c+273.15)/Mm) ! Velocidad del sonido (m/s)
91 mp,sonc,nl,rho0_c ! Material para cada segmento(regiones de aire)
92 mp,sonc,nl,c0_c
93 resis=resis0*((Temp_c+273.15)/(Tref+273.15))**0.6 ! Ecuación de Christie. Se toma Tref = 15°C
94 tb,perf,nl,,ymat ! Modelo de la matriz de admitancia
95 *DO, K, 1, Nfrec, 1
96 frequ=f_ini+(K-1)*deltaf
97 w=2*pi*frequ
98 ! Material absorbente (repetido)
99 Real_Zabs=rho0_c*c0_c*(1+a5*(frequ*rho0_c/resis)**a6)
100 Imag_Zabs=-rho0_c*c0_c*a7*(frequ*rho0_c/resis)**a8
101 Real_Gammaabs=w/c0_c*a1*(frequ*rho0_c/resis)**a2
102 Imag_Gammaabs=w/c0_c*(1+a3*(frequ*rho0_c/resis)**a4)
103 ! Superficie perforada
104 Real_Zperf=rho0_c*c0_c*0.006/poro+0.425*dori*mean_IngardFok*(Real_Zabs*Real_Gammaabs-Imag_Zabs*Imag_Gammaabs)/poro
105 Imag_Zperf1=rho0_c*w*espe/poro+rho0_c*w*0.425*dori*mean_IngardFok/poro
106 Imag_Zperf2=0.425*dori*mean_IngardFok*(Real_Zabs+Imag_Gammaabs+Imag_Zabs*Real_Gammaabs)/poro
107 Imag_Zperf=Imag_Zperf1+Imag_Zperf2
108 Modulo_Zperf2=Real_Zperf**2+Imag_Zperf**2
109 y11r=Real_Zperf/Modulo_Zperf2
110 y11i=-Imag_Zperf/Modulo_Zperf2
111 y12r=-Real_Zperf/Modulo_Zperf2
112 y12i=Imag_Zperf/Modulo_Zperf2
113 y21r=-Real_Zperf/Modulo_Zperf2
114 y21i=Imag_Zperf/Modulo_Zperf2
115 y22r=Real_Zperf/Modulo_Zperf2
116 y22i=-Imag_Zperf/Modulo_Zperf2
117 !
118 tbfield, frequ, frequ ! Tabla en función de la frecuencia
119 tbdata, 1, y11r, y11i, y12r, y12i, y21r, y21i ! Parámetros del modelo YMAT a cada frecuencia frequ
120 tbdata, 7, y22r, y22i ! Más parámetros (no caben en la tabla anterior)
121 *ENDDO
122 nl=nl+1
123 *ENDDO
```

Figura 13. Propiedades del conducto perforado

En la figura 14 se presenta la quinta parte de la macro, correspondiente a obtener las propiedades de la cámara disipativa, las mismas que fueron obtenidas en la cuarta parte para el conducto perforado, con la diferencia de que en este caso se guardan las propiedades de impedancia y contante de propagación, esto se consigue en las líneas 134, 142 y 143.

```

124 ! CAMARA DISIPATIVA
125 *DO,L,1,n_seg,1
126 Lc=lduct+lchamb*(L-0.5)/n_seg
127 Temp_c=Temp_e+Lc*((Temp_s-Temp_e)/(2*lduct+lchamb)) ! Temperatura en la longitud media de cada segmento de la camara disipativa
128 rho0_c=Patm*Mm/(R*(Temp_c+273.15)) ! Densidad del aire (kg/m^3)
129 c0_c=sqrt(gamma*R*(Temp_c+273.15)/Mm) ! Velocidad del sonido (m/s)
130 mp,dens,nl,rho0_c ! Material para los segmentos de la camara disipativa (regiones de aire)
131 mp,sonc,nl,c0_c
132
133 resis=resis0*((Temp_c+273.15)/(Tref+273.15))^0.6 ! Ecuación de Christie. Se toma Tref = 15°C (en general no coincidirá con Temp)
134 tb,perf,nl,,zpro ! Modelo de impedancia compleja y constante de propagación (zpro)
135 *DO,M,1,Nfrec,1
136 frequ=f_ini+(M-1)*deltaf
137 w=2*pi*frequ
138 Real_Zabs=rho0_c*c0_c*(1+a5*(frequ*rho0_c/resis)**a6)
139 Imag_Zabs=-rho0_c*c0_c*a7*(frequ*rho0_c/resis)**a8
140 Real_Gammaabs=w/c0_c*a1*(frequ*rho0_c/resis)**a2
141 Imag_Gammaabs=w/c0_c*(1+a3*(frequ*rho0_c/resis)**a4)
142 ! Tabla en función de la frecuencia
143 tldata,1,Real_Zabs,Imag_Zabs,Real_Gammaabs,Imag_Gammaabs ! Parámetros del modelo ZPRO a cada frecuencia frequ
144 *ENDDO
145 ni=ni+1
146 *ENDDO
147
    
```

Figura 14. Propiedades de la cámara disipativa

Una vez definidos los materiales con sus respectivas propiedades para cada segmento requerido se procede a crear la geometría del silenciador disipativo.

En la figura 15 se presenta la sexta parte de la macro, correspondiente a la generación del modelo geométrico del silenciador disipativo con conducto perforado.

En la línea 151 se presenta una variable *espesor*, este será el utilizado para generar la malla posteriormente y es distinto al introducido al inicio de la macro, *espe*, esto se hace porque el espesor del conducto perforado debe ser lo menor posible, teóricamente 0, para no violar el principio de conservación de la masa.

```

148 ! *****
149 ! Modelo geométrico, condiciones de contorno, mallado, etc.
150 ! *****
151 espesor=0.0002 ! Espesor del elemento asociado al conducto perforado
152 ! (Ansys requiere mallado para aplicar la matriz de admitancias YMAT)
153 ! Volúmenes (se crea mitad estética; también valdría un cuarto o cualquier ángulo, por axisimetría del modelo)
154 cylind,0,rduct,0,lduct,0,180 ! Conducto de entrada
155 cylind,0,rduct,lduct+lchamb,2*lduct+lchamb,0,180 ! Conducto de salida
156
157 *DO,N,1,n_seg,1
158 X1=lduct+lchamb*(N-1)/n_seg
159 X2=lduct+lchamb*(N)/n_seg
160 cylind,0,rduct,X1,X2,0,180 ! Creación de los volúmenes del cilindro interior
161 *ENDDO
162 vsel,all
163 vglue,all ! Pegado de volúmenes para conseguir dominio continuo
164 numcmp,all ! Compresión de numeración
165
166 *DO,O,1,n_seg,1
167 X1=lduct+lchamb*(O-1)/n_seg
168 X2=lduct+lchamb*(O)/n_seg
169 cylind,rduct,rduct+espesor,X1,X2,0,180 ! Creación de los volúmenes del conducto perforado
170 *ENDDO
171 vsel,all
172 vglue,all ! Pegado de volúmenes para conseguir dominio continuo
173 numcmp,all ! Compresión de numeración
174
175 *DO,P,1,n_seg,1
176 X1=lduct+lchamb*(P-1)/n_seg
177 X2=lduct+lchamb*(P)/n_seg
178 cylind,rduct+espesor,rchamb,X1,X2,0,180 ! Creación de los volúmenes de la Cámara con material absorbente
179 *ENDDO
180 vsel,all
181 vglue,all ! Pegado de volúmenes para conseguir dominio continuo
182 numcmp,all ! Compresión de numeración
    
```

Figura 15. Generación del modelo geométrico

De manera similar que, con las propiedades, primero se genera los conductos de entrada y salida en las líneas 154 y 155 debido a que estas van a ser siempre constantes sin importar el número de segmentos deseados.

Para ahorrar coste computacional se realiza únicamente la mitad del silenciador, es decir, una revolución de 180 grados.

Los volúmenes correspondientes al conducto central interior se presentan desde las líneas 157 a la 164, para el conducto perforado se presenta desde las líneas 166 a la 173 y para la cámara disipativa desde las líneas 175 a la 182. Son bastante similares, pero se realizan por separado para conseguir un orden específico de los volúmenes dependiendo del número de segmentos requeridos.

También cabe destacar que se realiza un pegado de los volúmenes para conseguir que haya continuidad en el mallado posterior.

una vez definido el modelo geométrico se procede al mallado, en la figura 16 se presenta la séptima parte correspondiente al mallado de los conductos exteriores del silenciador.

```
183 | *****
184 | ! Mallado de volúmenes
185 | *****
186 | Lmm=lchamb+lduct           ! Longitud hasta el final de la cámara disipativa
187 | T_m=Temp_e+Lmm*(Temp_s-Temp_e)/(2*lduct+lchamb) ! Temperatura a la salida de la cámara
188 | c0_m=sqrt(gamma*R*(T_m+273.15)/Mm)           ! Velocidad del sonido (m/s)
189 | lambda=c0_m/f_fin           ! Mínima longitud de onda (a frecuencia máxima)
190 | h=lambda/15                 ! 10 elementos por (mínima) longitud de onda
191 |                             ! (refinar para obtener mayor precisión)
192 | esize,h
193 |
194 | ! Conducto exterior 1 de aire
195 | type,1                       ! Selección del tipo de elemento
196 | mat,1                         ! Selección del material
197 | vsel,s,,1                   ! Selección del volumen a mallar
198 | vmesh,all                    ! Mallado
199 | vsel,all
200 | ! Conducto exterior 2 de aire
201 | mat,2                       ! Selección del material
202 | vsel,s,,2                   ! Selección del volumen a mallar
203 | vmesh,all                    ! Mallado
204 | vsel,all
```

Figura 16. Mallado de los conductos exteriores

En primer lugar, se define el tamaño de malla, h , para esto se ha considerado que se debe tomar como mínimo 10 elementos por longitud de onda, para lo cual se debe elegir el mínimo valor de c_0 , este valor se encuentra a la salida de la cámara disipativa debido a que existe menor temperatura. Todo esto se presenta desde las líneas 186 a la 192 en donde se define el tamaño de malla, sin embargo, el número de elementos presentado en

la línea 190 puede variar, dependiendo del número de segmentos elegidos ya que un valor de 10 o de 15 puede presentar problemas en la posterior solución, por lo que se recomienda variar este dato si existe algún problema de tamaño de elemento.

Desde las líneas 194 a la 204 se presenta el mallado de los conductos exteriores en donde se selecciona el tipo de elemento número 1, correspondiente a tetraedros de 10 nodos y el material específico para cada conducto, con sus respectivas propiedades calculadas anteriormente.

En la figura 17 se presenta la octava parte de la macro, correspondiente al mallado de los segmentos del cilindro central interior, del conducto perforado y de la cámara disipativa.

```
205 ! Segmentos del Cilindro interior
206 nl=3
207 *DO,Q,1,n_seg,1
208     type,1
209     X1=lduct+lchamb*(Q-1)/n_seg
210     X2=lduct+lchamb*(Q)/n_seg
211     vsel,s,,,3,n_seg+2
212     vsel,r,loc,z,X1,X2
213     mat,nl
214     vmesh,all
215     vsel,all
216     nl=nl+1
217 *ENDDO
218 ! Segmentos del conducto perforado
219 *DO,R,1,n_seg,1
220     type,2
221     X1=lduct+lchamb*(R-1)/n_seg
222     X2=lduct+lchamb*(R)/n_seg
223     vsel,s,,,n_seg+3,2*n_seg+2
224     vsel,r,loc,z,X1,X2
225     mat,nl
226     VSWEEP,all
227     vsel,all
228     nl=nl+1
229 *ENDDO
230 *DO,S,1,n_seg,1
231 ! Segmentos de la cámara disipativa
232     type,1
233     X1=lduct+lchamb*(S-1)/n_seg
234     X2=lduct+lchamb*(S)/n_seg
235     vsel,s,,,2*n_seg+3,3*n_seg+2
236     vsel,r,loc,z,X1,X2
237     mat,nl
238     vmesh,all
239     vsel,all
240     nl=nl+1
241 *ENDDO
242 eplot
```

Figura 17. Mallado de los segmentos

Para conseguir un correcto mallado con el material específico se utilizan bucles similares a los del modelo geométrico, tomando más en cuenta que la selección del volumen se realiza por orden de volumen y por localización, esto se puede ver por ejemplo en la línea 211 en donde se selecciona todos los volúmenes del cilindro interior y en la línea 212 se selecciona el volumen correspondiente a la localización específica del número de segmento. Con la diferencia de la selección de volúmenes el mallado es similar al de los conductos exteriores.

Cabe destacar que el mallado de los segmentos del conducto perforado se realiza con la opción de *Sweep*, debido a que el tipo de elemento de hexaedros y prismas así lo requiere.

Con esto queda definido el mallado de todo el silenciador con sus respectivas propiedades para el posterior análisis.

Ahora es necesario definir las condiciones de contorno, en la figura 18 se presenta la novena parte de la macro, correspondiente a la definición de las condiciones de excitación en la sección de entrada del silenciador, para esto se calcula Z_0 en la línea 245 y la velocidad normal de excitación u_n en la línea 247, esto se hace para facilitar la descomposición de ondas progresivas y regresivas y el cálculo del TL.

```
243 ! *****
244 ! Condiciones de excitación en sección de entrada
245 z0_e=rho0_e_1*c0_e_1      ! Impedancia característica en la entrada(rayl)
246 p=1                      ! Excitación en sección de entrada. Se puede poner otro valor.
247 vn=-p/(rho0_e_1*c0_e_1)  ! Valor de velocidad normal de excitación a partir de presión (entrada anecoica)
248 nsel,s,loc,z,0           ! Nodos en la sección de entrada
249 sf,all,port,1            ! Puerto de entrada del silenciador
250 !
251 sf,all,shld,vn           ! Velocidad normal de excitación
252 sf,all,impd,z0_e        ! Condición de impedancia en la entrada
253 !
254 nsel,s,loc,z,2*lduct+lchamb ! Nodos en la sección de salida
255 sf,all,port,2           ! Puerto de salida del silenciador
256 sf,all,inf              ! Radiación en la salida.
257 !Impedancia anecoica en la salida (no vuelve energía al silenciador; necesario para obtener TL)
258 alls
```

Figura 18. Condiciones de excitación en sección de entrada

En las líneas 249 y 255 se definen los puertos de entrada y salida del silenciador luego de haber seleccionado los nodos correspondientes a cada localización.

Las líneas 251 y 252 permiten que se aplique una velocidad cuya parte progresiva tiene asociada la presión p definida en la línea 246.

También es necesario definir las condiciones en la superficie perforada, debido a que actúan como puertos entre el conducto central y la cámara disipativa.

En la figura 19 se muestra la definición de dichas condiciones para lo cual se utiliza un bucle que es de ayuda para seleccionar cada segmento del conducto perforado y su correspondiente parte interior y exterior que actúa como puerto interior y puerto exterior respectivamente.

```
259 ! *****
260 ! Condiciones en superficie perforada. Matriz de admitancia
261 ! Definición de puertos a conectar mediante matriz de admitancia
262 ! (nodos a ambos lados del conducto perforado)
263 n2=3
264 csys,1 ! Sistema de coordenadas cilíndricas
265 *DO,T,1,n_seg,1
266 esel,s,type,,2
267 nsel,s
268 X1=lduct+lchamb*(T-1)/n_seg
269 X2=lduct+lchamb*(T)/n_seg
270 nsel,s,loc,x,rduct
271 nsel,r,loc,z,X1,X2
272 sf,all,port,n2 ! Puerto 1 (caras interiores)
273 n2=n2+1
274 nsel,s,loc,x,rduct+espesor
275 nsel,r,loc,z,X1,X2
276 sf,all,port,n2 ! Puerto 2 (caras exteriores)
277 alls
278 n2=n2+1
279 *ENDDO
280 csys,0
281 finish
```

Figura 19. Condiciones en superficie perforada

Cabe destacar que se hace uso de las coordenadas cilíndricas y de la ayuda del tipo de elemento para seleccionar correctamente los segmentos requeridos.

Con esto se ha definido completamente el caso del silenciador disipativo con conducto perforado y gradiente térmico, en la figura 20 se muestra un ejemplo de cómo se debe tener el diseño con el mallado correspondiente y las condiciones de contorno definidas.

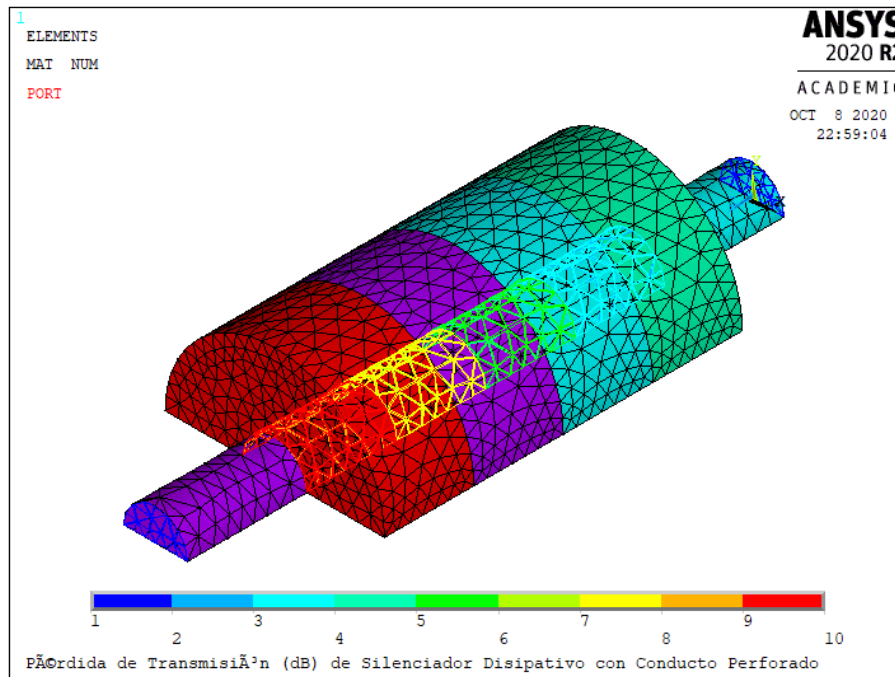


Figura 20. Silenciador definido para el análisis

Finalmente, en la figura 21 se muestra las condiciones de solución para el respectivo análisis. En la línea 286 se elige el análisis de tipo armónico y en la línea 287 se permite elegir al programa el método más eficiente con la opción de *auto*. Desde la línea 288 a la 290 se define que el análisis debe ser por pasos y con las frecuencias definidas anteriormente. Una vez especificado el tipo de análisis se soluciona mediante la línea 291.

```

282 ! *****
283 ! Cálculo de solución
284 ! *****
285 /solu
286 antype,harmic
287 hropt,auto
288 kbc,1
289 harf,0,f_fin
290 nsub,Nfrec          ! Frecuencias de cálculo especificadas antes
291 solve
292 finish
293 ! *****
294 ! Post-processing
295 ! *****
296 /post1
297 spower,1,2          ! Cálculo de potencia sonora (puertos 1 y 2: entrada y salida del silenciador)
298 plst,D_cond_grad0102,a2p,t1  ! TL - pérdida de transmisión
299 finish
    
```

Figura 21. Solución y Post proceso

Una vez solucionado, esto puede tardar dependiendo del incremento de frecuencias que se haya dispuesto, se presenta en el post proceso la pérdida de transmisión mediante la línea 298, debe dar un resultado parecido al presentado en la figura 22.

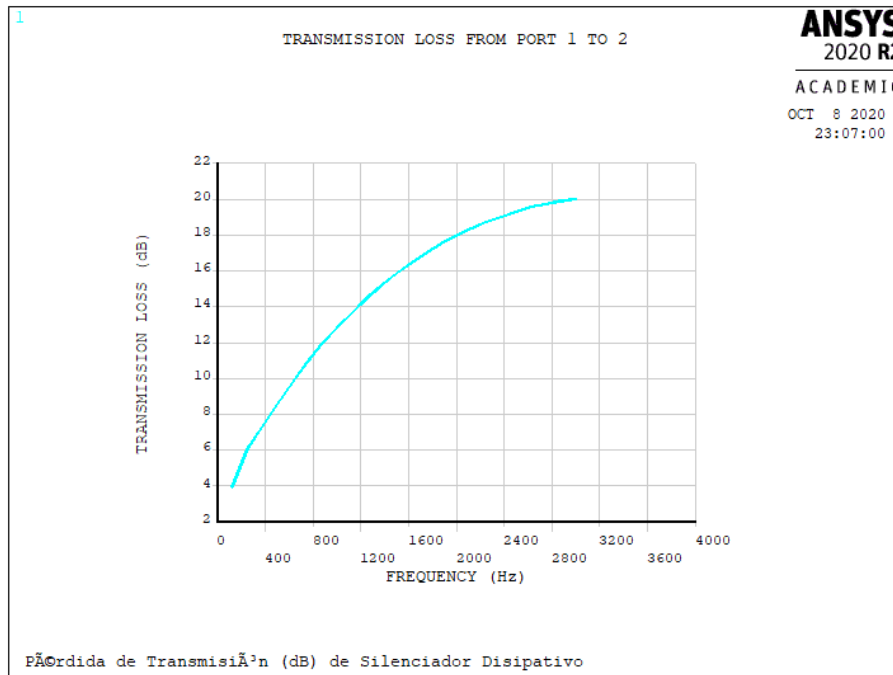


Figura 22. Pérdida de transmisión obtenida

Sin embargo, lo que se toma en cuenta a más de la gráfica es la tabla con los resultados, la cual se puede exportar para un posterior análisis en MATLAB.

Un ejemplo de la tabla mencionada se muestra en la figura 23, en donde se puede observar el incremento de frecuencia de 10 Hz y su respectivo resultado.

| FREQUENCY (Hz) | TRANSMISSION LOSS (dB) |
|----------------|------------------------|
| 10.000000 | 0.93477300 |
| 20.000000 | 1.82139000 |
| 30.000000 | 2.40063000 |
| 40.000000 | 2.80165000 |
| 50.000000 | 3.10197000 |
| 60.000000 | 3.34093000 |
| 70.000000 | 3.53970000 |
| 80.000000 | 3.71055000 |
| 90.000000 | 3.86111000 |
| 100.000000 | 3.99641000 |
| 110.000000 | 4.11992000 |
| 120.000000 | 4.23412000 |
| 130.000000 | 4.34088000 |
| 140.000000 | 4.44160000 |
| 150.000000 | 4.53742000 |

Figura 23. Tabla de resultados para la pérdida de transmisión.

4.2 ANSYS WORKBENCH

Ansys Workbench es un software que a diferencia de APDL, posee un entorno muy intuitivo para la creación del modelo geométrico y el mallado, enfocado más hacia el usuario. (Munuera, 2019) presenta una explicación muy detallada del pre-procesado, procesado y post-procesado para el análisis de silenciadores reactivos y disipativos con conducto perforado mediante MEF en Ansys Workbench, sin embargo, en el presente proyecto se enfocará más hacia el modelado con gradiente térmico debido a que se considera el caso más complejo en donde se hace uso del software MATLAB para el cálculo de las propiedades del material absorbente como del perforado.

En la figura 24 se presenta el entorno de trabajo de Ansys Workbench en donde se puede observar que se ha creado 3 componentes, se recomienda hacerlo de esta manera para poder modificarlo sin problema para futuros análisis con diferentes parámetros.

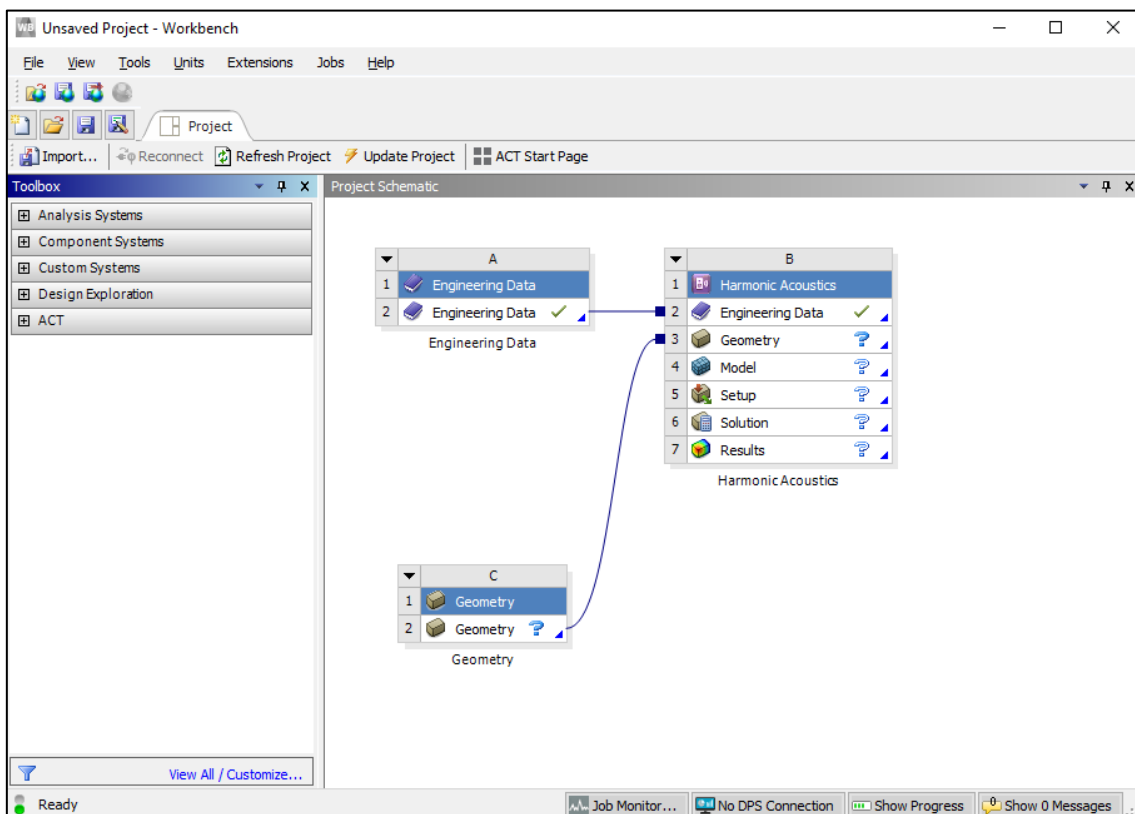


Figura 24. Entorno de trabajo de Ansys Workbench

Es importante tener en cuenta las unidades en las que se va a trabajar por lo que en la pestaña Unit se selecciona el sistema métrico internacional (SI).

Para agregar los componentes, dentro del *Toolbox* mostrado en la parte izquierda de la pantalla se agrega *Engineering Data* y *Geometry* dentro del apartado *Component Systems*. Una vez agregados estos componentes que representaran las propiedades y comportamiento de los materiales y la geometría del modelo, se agrega *Harmonic Acoustics* dentro del apartado *Analysis Systems*, el cual permite realizar un análisis acústico que es el deseado para el presente proyecto.

Para unir los componentes simplemente se arrastra desde los componentes *Engineering Data* y *Geometry* hacia los mismos subcomponentes del *Harmonic Acoustics*.

En la parte derecha de cada componente aparecen una serie de indicadores que definen el estado en el que se encuentra dicho componente. El tic verde (✓) significa que está correctamente configurado; la interrogación azul (?) marca que un componente tiene ya los requisitos previos completados para poder ser definido; y la interrogación blanca (?) significa que dicho componente aún no se puede definir, ya que no se han completado los requisitos previos, es decir, que los componentes anteriores a este aún no están correctamente configurados.

4.2.1 MATERIALES

El primer componente que se debe configurar es el *Engineering Data*. Dentro de este componente se define básicamente las propiedades de los materiales que se usarán para el análisis. Para empezar a editar este componente (y cualquiera de los demás) se hace doble clic con el botón derecho sobre su icono.

Para este caso en particular se debe introducir los materiales correspondientes a cada temperatura, se recuerda que el caso más complejo consta del conducto perforado con gradiente térmico, para el modelado se ha utilizado el caso de 4 segmentos dentro del conducto interior central, el conducto perforado y la cámara disipativa, por lo que al agregar los materiales hay que tener en cuenta todos los casos posibles.

En la figura 25 se presenta la ventana correspondiente a la configuración del componente *Engineering Data* en donde en el apartado *Outline of Schematic* se agregan todos los materiales deseados, se ha tratado de detallar para poder distinguirlos para cada caso.

Para el caso de los conductos externos e interiores centrales se necesita Aire como material, sin embargo, se tienen diferentes materiales de Aire debido a que se encuentran a distintas temperaturas y por lo tanto cambia su densidad y velocidad del sonido.

De igual manera se debe hacer con el material absorbente, Lana de Basalto, que tendrá variantes correspondientes a cada temperatura y para este material también se considera variantes si se modifica la densidad de compactación.

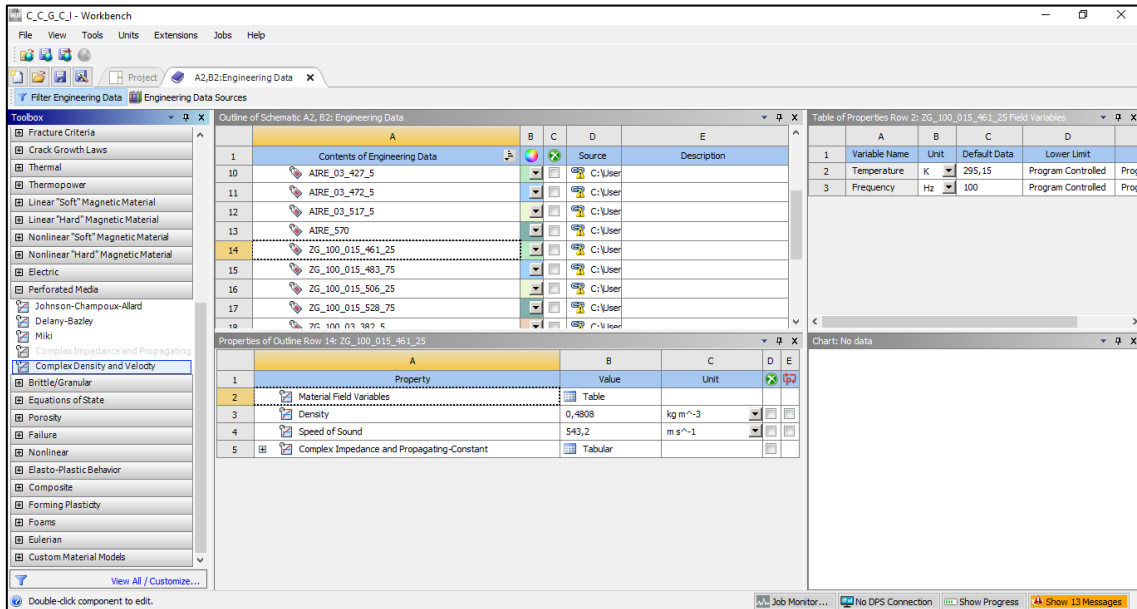


Figura 25. Configuración de Engineering Data

Para agregar las propiedades a cada material en el apartado *Toolbox* se selecciona la densidad y la velocidad del sonido dentro del subapartado *Physical Properties* y para el caso de los materiales absorbentes se agrega *Complex Impedance and Propagating-Constant* dentro del subapartado *Perforated Media*. Una vez agregados las propiedades correspondientes en el apartado *Properties of Outline Row*: se configura cada propiedad ya sea para la densidad o la velocidad del sonido a cada temperatura correspondiente, para configurar la propiedad de Impedancia compleja y constante de propagación se necesita importar una tabla con información sobre la Resistencia, Reactancia, Constante de Atenuación y Constante de Fase de cada material con su respectivo intervalo de frecuencia. Un ejemplo de una tabla introducida se presenta en la figura 26.

| Table of Properties Row 5: Complex Impedance and Propagating-Constant | | | | | |
|---|----------------|--|---|---|--|
| | A | B | C | D | E |
| 1 | Frequency (Hz) | Resistance (kg m ⁻² s ⁻¹) | Reactance (kg m ⁻² s ⁻¹) | Attenuation Constant (Nepers/Length) (m ⁻¹) | Phase Constant (Radians/Length) (m ⁻¹) |
| 2 | 10 | 8670,8 | -6186,8 | 3,6064 | 3,8669 |
| 3 | 20 | 5205,1 | -4004,4 | 4,7419 | 4,9317 |
| 4 | 30 | 3884,5 | -3104,7 | 5,5654 | 5,7103 |
| 5 | 40 | 3167,6 | -2591,9 | 6,2349 | 6,3523 |
| 6 | 50 | 2710,7 | -2253,2 | 6,8093 | 6,9116 |
| 7 | 60 | 2391,3 | -2009,5 | 7,3176 | 7,4143 |
| 8 | 70 | 2153,9 | -1824,2 | 7,7769 | 7,8757 |
| 9 | 80 | 1969,8 | -1677,6 | 8,198 | 8,3052 |
| 10 | 90 | 1822,3 | -1558,1 | 8,5883 | 8,7092 |
| 11 | 100 | 1701,2 | -1458,4 | 8,9532 | 9,0923 |
| 12 | 110 | 1599,8 | -1373,7 | 9,2966 | 9,4579 |
| 13 | 120 | 1513,4 | -1300,7 | 9,6216 | 9,8087 |
| 14 | 130 | 1438,9 | -1237 | 9,9306 | 10,147 |
| 15 | 140 | 1373,9 | -1180,7 | 10,226 | 10,473 |

Figura 26. Impedancia compleja y Constante de propagación a cada frecuencia.

A diferencia de Ansys APDL en donde se calcula automáticamente estas propiedades a través de bucles presentados en la sección anterior, aquí se debe importar dichas propiedades para cada material a cada temperatura lo que resulta muy demorado si se tienen en cuenta se tendrán varias temperaturas dependiendo del número de segmentos deseados. Es por esto por lo que se hace uso del software MATLAB en donde mediante un Script se realiza el cálculo de la Impedancia Compleja, constante de propagación y matrices de Admitancias, que se necesitaran más adelante, mediante las ecuaciones de las secciones 2.6 y 3.4.

Dicho Script no se presenta debido a que es muy similar al cálculo realizado mediante la macro correspondiente a APDL que se encuentra detallada en la sección anterior.

Una vez definidos los materiales con los que se realizarán las simulaciones, se volverá a la ventana principal dándole a la pestaña *Project* y se actualizará o refrescará el programa dándole a *Refresh project* en la barra del menú, situada en la parte superior de la ventana. Se recomienda ingresar todos los materiales de los casos correspondientes al principio, ya que este componente se puede exportar para futuros análisis.

4.2.2 GEOMETRÍA

Para obtener la geometría del modelo correspondiente se tienen tres opciones posibles dentro de Ansys Workbench, la primera opción es importar ficheros CAD, una opción muy aconsejable si la geometría es compleja, aunque hay que tener en cuenta que a la hora de importar ficheros pueden aparecer problemas de compatibilidad, la segunda y tercera opción es generar el fichero desde el mismo programa, para ello, ANSYS

Workbench dispone de dos espacios de diseño diferentes (*Design Modeler* y *Space Claim*). En el presente trabajo se utiliza *Design Modeler* debido a que tiene una interfaz más familiar a los distintos softwares CAD y permite editar el modelo con mayor flexibilidad. Para acceder a este módulo, se hará clic derecho sobre la casilla de geometría y se selecciona *New Design Modeler Geometry*.

Para realizar el croquis que representa el perfil a revolucionar se selecciona en la pestaña *Modeling* el plano XY, para indicar que éste será el plano del croquis. Clicando sobre el eje Z en el icono de vistas, se tendrá como vista de trabajo el plano XY seleccionado.

Se genera rectángulos desde *Sketching* → *Draw* → *Rectangle*. Una vez escogido se definen rectángulos que harán referencia a los conductos exteriores y cada segmento tanto para el conducto interior, el conducto perforado y la cámara disipativa. Las medidas de cada rectángulo no son importantes ahora, ya que posteriormente se dimensionará.

Mediante *Sketching* → *Constraints* se definen las respectivas restricciones para definir correctamente el modelo.

Para definir las dimensiones del croquis hay que ir al apartado *Dimensions*, dentro de *Sketching*, se seleccionan las opciones de cotas horizontales y verticales. Las dimensiones se guardan como una variable V_x o H_x cuyos valores se pueden cambiar directamente desde la ventana de detalles de vista.

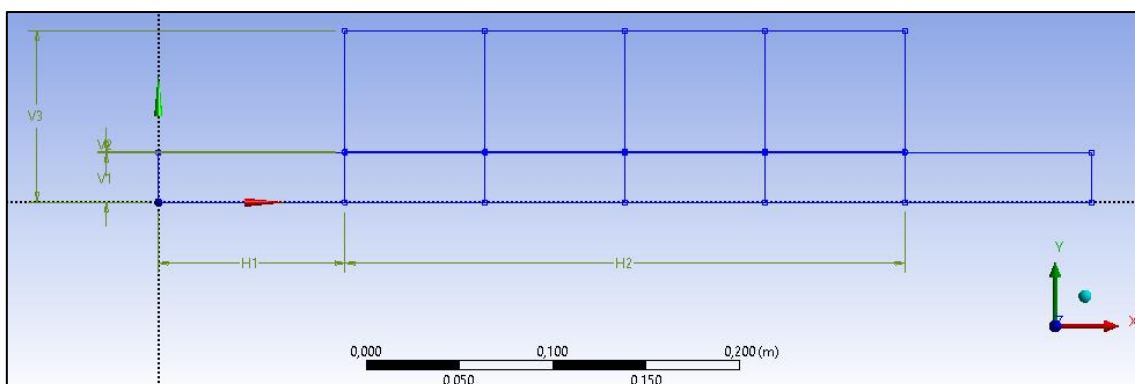


Figura 27. Sketch del modelo

Una vez generado el sketch, se procede a la revolución a través del eje X para generar el sólido, de igual manera que en APDL, es posible representar una porción de todo el sólido con el objetivo de ahorrar coste computacional. Mediante *Barra de menú* → *Create* →

Revolve. En los detalles de la operación, se selecciona el croquis que se acaba de hacer. El eje de revolución, que es el eje X del sistema de coordenadas, indica que la operación genere sólidos congelados (*Add Frozen*) y en *Angle* se define el ángulo deseado. En la figura 26 se representa la revolución de 90 grados del sketch formado con anterioridad, en donde se ha generado un sólido independiente del otro con el objetivo de facilitar el mallado y posteriormente introducir los materiales absorbentes y el efecto del perforado.

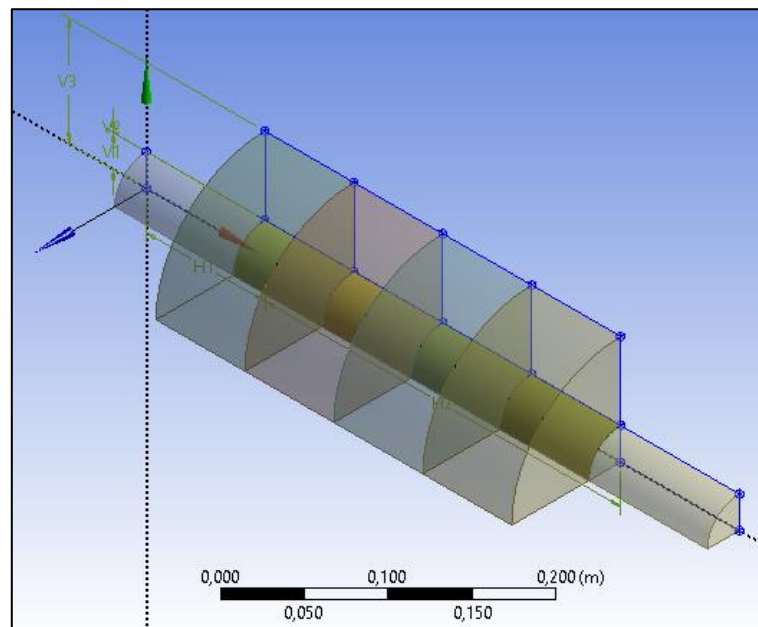


Figura 28. Geometría generada

Para facilitar la creación de posteriores geometrías, se puede parametrizar el modelo de la siguiente forma. Dentro del croquis utilizado para generar la revolución, se puede seleccionar cada una de las dimensiones que se han acotado anteriormente y definir las, como parámetros de diseño. Se puede acceder a los parámetros creados y así editarlos en *Barra de menú* → *Tools* → *Parameters*. Si se cambia el valor de un parámetro, hay que volver a generar la geometría pulsando *Generate*.

El hecho de tener parametrizado el modelo geométrico supone varias ventajas, ya que no solo se puede modificar la geometría de una manera rápida y simple, sino que también se mantienen las características de los componentes posteriores. Esto hará que no sea necesario redefinir el modelo, simplemente habrá que volver a lanzar el ensayo para conseguir los resultados de una configuración diferente a la que ya estaba definida.

4.2.3 MALLADO

Una vez configurado el componente de materiales y definido el componente de geometría se procede al respectivo mallado del modelo, mediante el componente *Model*, en el cual no solo se podrá realizar el mallado de la geometría, sino también definir las condiciones de contorno del estudio y obtener los resultados del *TL* a diferentes frecuencias sin necesidad de cambiar de componente.

En primer lugar, se le asignará el material a los cuerpos que se han creado previamente. Para ello, se seleccionará uno de los cuerpos que aparecen al desplegar la pestaña de *Geometry*. En el apartado *Material* se asigna el material correspondiente, teniendo en cuenta que cada parte del modelo va a estar sometido a una temperatura específica y por lo tanto se deberá asignar un material específico. Esta acción se repite con los otros cuerpos.

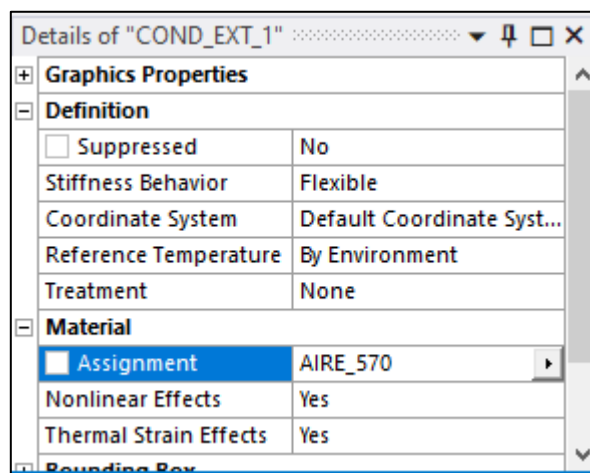


Figura 29. Asignación del material

Una vez asignado el material, se definen las características del mallado en la pestaña *Mesh*. Es muy importante que al momento de mallar se genere continuidad de un volumen a otro, en este caso se presenta la opción de seleccionar uno por uno cada elemento y darle propiedades de mallado como el tamaño de líneas, en donde se puede especificar cuantas divisiones se requiere para cada línea. En la figura 30 se muestra un ejemplo, en donde se configura para los conductos exteriores el tamaño de línea, también se pueden configurar opciones como *Bias* que permite que el tamaño de los elementos varíe según se requiera, en la figura 28 está representado como *Edge Sizing 2*.

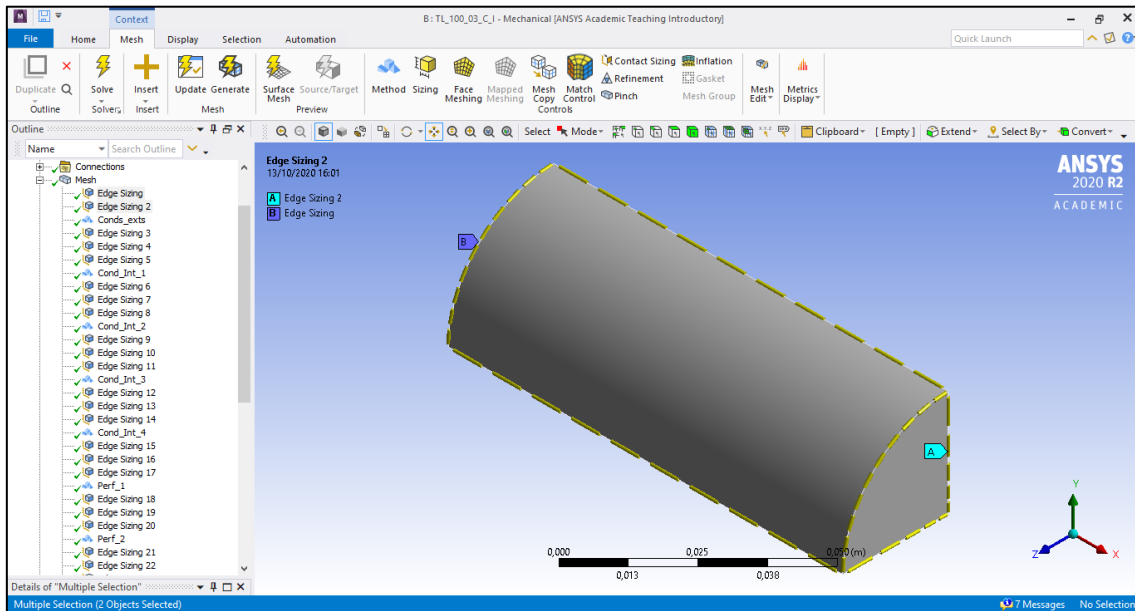


Figura 30. Condiciones de mallado

Una vez definido la configuración de los tamaños de línea y asegurándose que exista continuidad de un volumen a otro se procede a especificar el método de mallado, para lo cual hay que dirigirse a *Barra de herramientas* → *Mesh control* → *Method*, de esta manera, aparecerá dentro de *Mesh* un nuevo componente donde se define el método de mallado.

Este método de mallado de igual manera se define para cada elemento, excepto los conductos exteriores que fueron configurados con los mismos tamaños de línea y están separados, evitando que haya inconsistencias al momento de mallar. En la figura 28 se muestra un método para cada segmento ya sea del conducto interior, el conducto perforado o la cámara disipativa.

A continuación, se le especifica al programa que las cuatro caras laterales de la cámara de expansión se deben de mallar de forma mapeada. Al haber definido el método de mallado con un *Sweep* esta malla se repetirá a lo largo de toda la cámara de expansión. Para ello se entra en *Barra de herramientas* → *Mesh control* → *Face Meshing* y se seleccionan las cuatro caras laterales de la cámara de expansión.

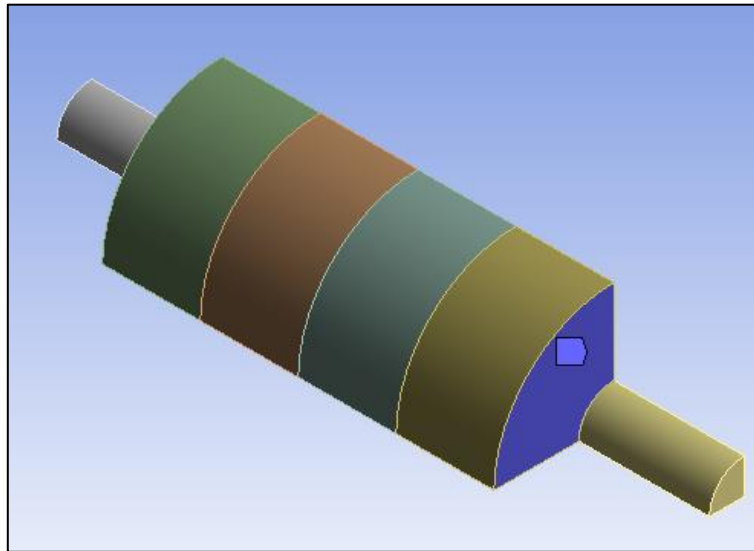


Figura 31. Selección de las caras laterales de la cámara de expansión.

Por último, se selecciona el tamaño de malla en la pestaña *Sizing* que se encuentra dentro de *Mesh*. En la casilla *Element Size* se selecciona un tamaño de elemento de 0,01m.

| Details of "Mesh" ⌵ | |
|--|----------------------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> Display | |
| <input checked="" type="checkbox"/> Defaults | |
| <input checked="" type="checkbox"/> Sizing | |
| Size Function | Adaptive |
| Relevance Center | Coarse |
| <input checked="" type="checkbox"/> Element Size | 0,01 |
| Mesh Defeaturing | Yes |
| <input type="checkbox"/> Defeature Size | Default |
| Transition | Fast |
| Initial Size Seed | Assembly |
| Span Angle Center | Coarse |
| Bounding Box Diagonal | 0,263660 m |
| Average Surface Area | 8,9149e-003 m ² |
| Minimum Edge Length | 0,168390 m |

Figura 32. Características del tamaño de malla.

Para generar la malla se clica en *Barra de herramientas* → *Mesh* → *Generate Mesh*.

En la figura 33 se presenta el componente mallado, se puede observar en las esquinas o en el cambio de un volumen a otro que los nodos coinciden visualmente, asegurando la continuidad entre los volúmenes.

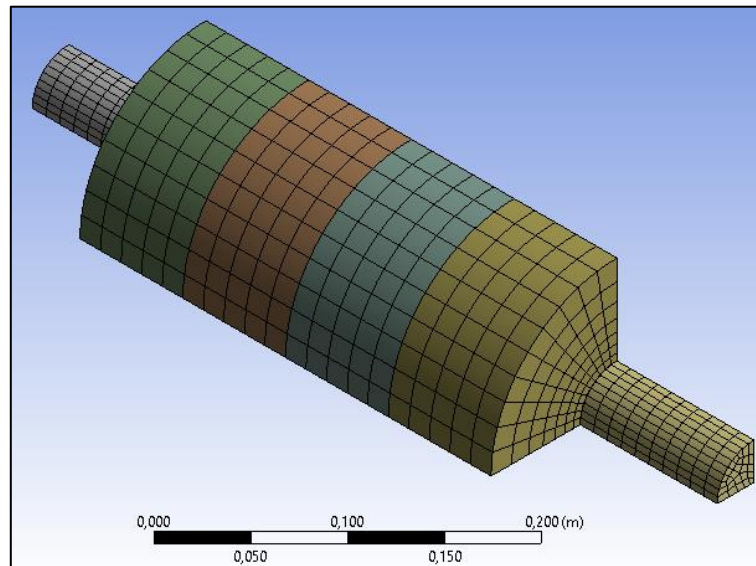


Figura 33. Componente Mallado

Finalmente, dentro de la pestaña *Mesh Edit* se selecciona las opciones de *Contact Match Group*, esta aparecerá como un nuevo componente debajo de *Mesh*, con un clic derecho se selecciona *Detect Connections*, también se añade la opción de *Node Merge Group* dentro de *Mesh Edit* y con un clic derecho se da a la opción de *Generate*.

De esta manera se asegura que los nodos coincidentes tanto exterior como interiormente se unan, provocando continuidad, que antes parecía únicamente visual, ahora total.

4.2.4 CONDICIONES DE CONTORNO

Una vez obtenido el modelo del silenciador con conducto perforado y gradiente térmico, tan solo queda aplicarle las restricciones y condiciones de contorno necesarias para asemejar el modelo al caso que se quiere estudiar en la realidad. Para definir estas restricciones se va a trabajar dentro del mismo componente *Model*. Tanto la definición de las restricciones, como los parámetros del ensayo, se completan en la pestaña *Harmonic Acoustics*.

En primer lugar, se definirá la región acústica. Para ello, se selecciona *Acoustic Region* y en la ventana de propiedades se seleccionan todos los cuerpos creados.

Una vez definida cual será la región acústica que debe considerar el programa, se definen los puertos de entrada y salida del modelo.

Para definir los puertos se selecciona la pestaña *Harmonic Acoustic* y se clic en *Barra de herramientas* → *Acoustic Boundary Conditions* → *Port*. Primero, se selecciona la superficie por donde el fluido entrará al silenciador, por lo que se selecciona la superficie con la cota X menor y después, la región acústica a la que hace referencia esa entra de fluido. Se realiza la misma operación con la superficie de salida del silenciador. Después, se cambian los nombres de los dos puertos que se acaban de crear por “Entrada” y “Salida” respectivamente. En la figura 34 se muestran los puertos de entrada (A) y salida (B).

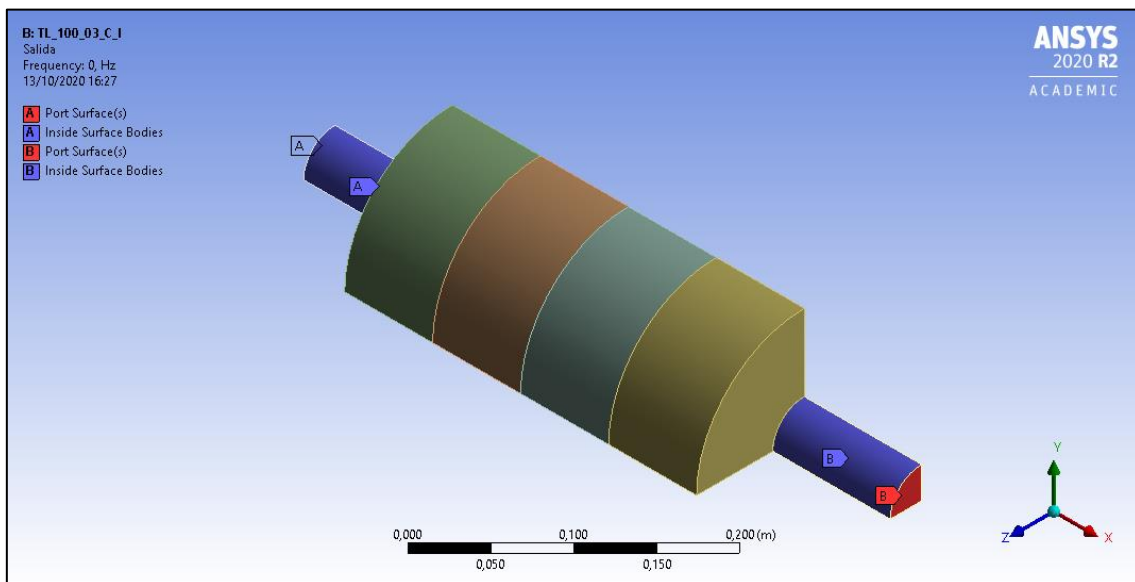


Figura 34. Puertos de entrada y salida.

Una vez definidos los puertos, se definen las paredes rígidas que corresponden al resto de superficies externas del modelo. Para definir las se va a *Barra de herramientas* → *Acoustic Boundary Conditions* → *Rigid Wall* y se seleccionan el resto de las áreas externas del modelo.

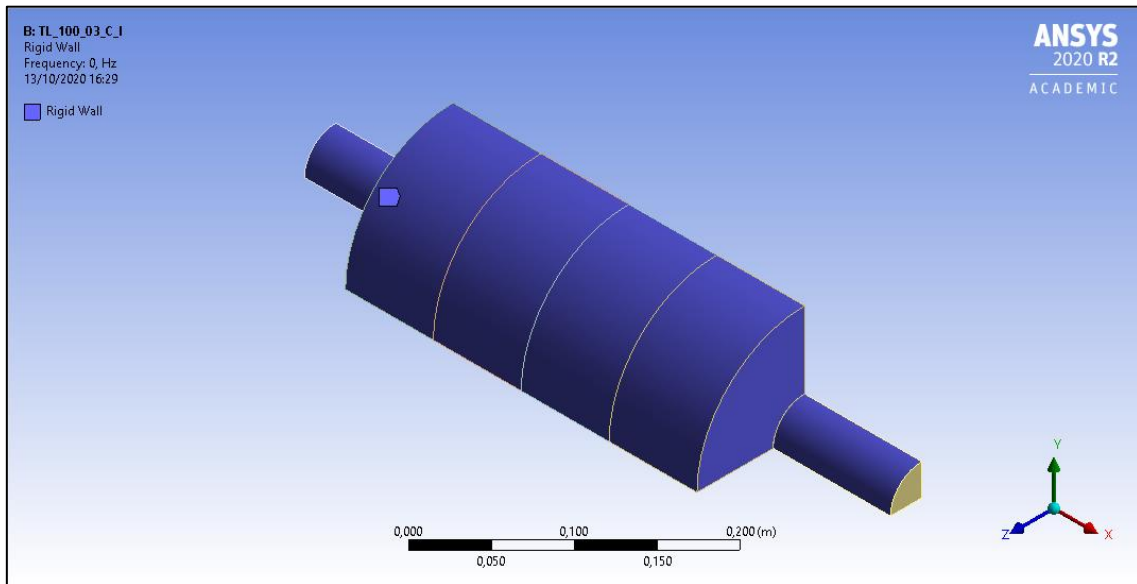


Figura 35. Paredes rígidas del modelo

Una vez definidos los puertos y las paredes del modelo, se definirá la excitación que caracteriza a la onda acústica. Para ello, se selecciona *Barra de herramientas* → *Acoustic Excitations* → *Surface Velocity*. Aparecerá entonces un cuadro donde se define la excitación. En primer lugar, se seleccionará la cara correspondiente al puerto de entrada como área de aplicación de la excitación y posteriormente se escribirá el valor de la velocidad de la onda como -1 m/s. El signo negativo indica que el vector de velocidad tiene una dirección opuesta al vector normal de esa cara.

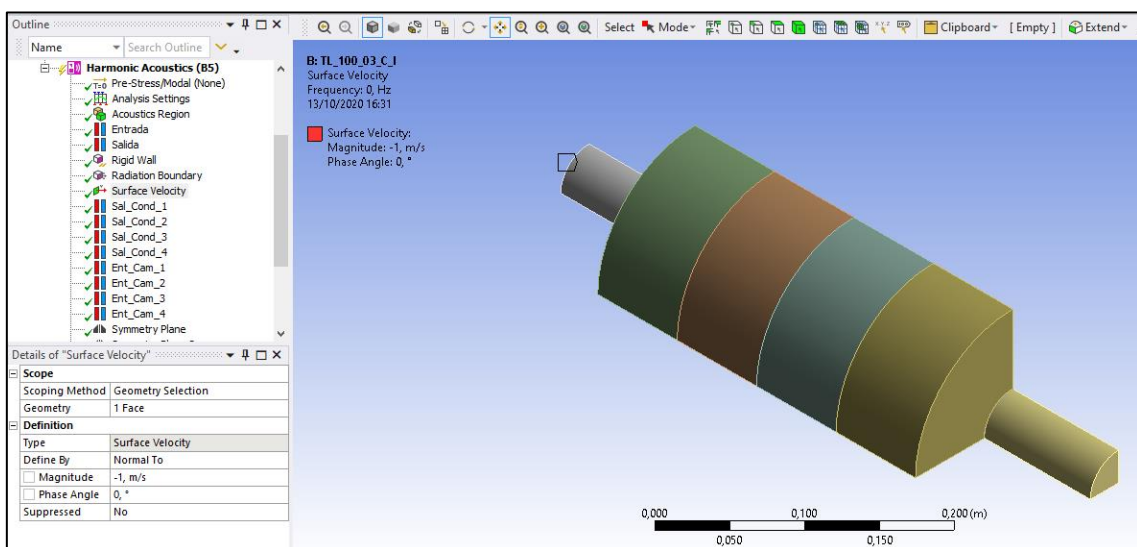


Figura 36. Configuración de la onda acústica

Es necesario definir la salida anecoica, de esta manera se evita que aparezcan ondas reflejadas del exterior, es decir, que todas las ondas que salen del silenciador son absorbidas por el entorno. Se utiliza la propiedad *Radiation Boundary* que se encuentra en *Barra de herramientas* → *Acoustic Boundary Conditions*. Al seleccionar esta condición aparece un cuadro de características, allí se seleccionarán como superficies de radiación a las dos superficies que corresponden a los puertos de salida y entrada del silenciador.

Finalmente se define la simetría del modelo, debido a que no se revoluciona los 360 grados sino únicamente 90 grados, es necesario generar simetría en el plano XZ y en el plano XY. Para esto se utiliza la propiedad *Symmetry Plane* dentro de *Barra de herramientas* → *Acoustic Boundary Conditions*. Al seleccionar esta condición aparece un cuadro donde se pide seleccionar las caras en las que existe la geometría. En la figura 37 se muestra las caras seleccionadas para los 2 planos de simetría.

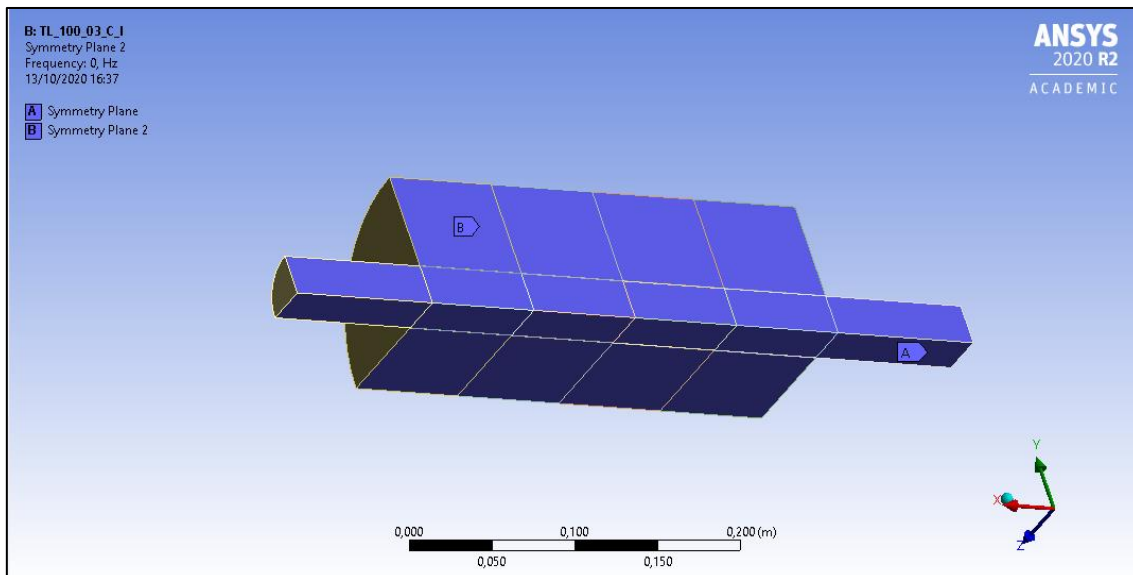


Figura 37. Condición de simetría.

4.2.5 DEFINICIÓN DEL CONDUCTO PERFORADO

En las superficies perforadas es necesario definir e importar sus características. El efecto que produce una superficie perforada se puede implementar en el programa a partir de la opción *Transfer Admittance Matrix*. Para poder seleccionar las dos superficies se han de crear dos puertos de entrada y salida de flujo en dichas áreas. Para crear los puertos, en primer lugar, se dejará visible únicamente el cuerpo de la superficie perforada yendo a

Geometry y seleccionando *Hide All Other Bodies* con el botón derecho en el cuerpo que representa al perforado. Tras esto, y clicando previamente en *Harmonic Acoustic*, se creará un puerto en *Barra de herramientas* → *Acoustic Boundary Conditions* → *Port* y se seleccionará la cara interna como superficie, además del propio anillo como la región acústica a la que hace referencia. Después, se renombra el puerto creado como “Salida del conducto”. Se repite la operación con la cara exterior y se renombra como “Entrada de la cámara”. Este procedimiento se debe realizar para cada segmento del conducto perforado.

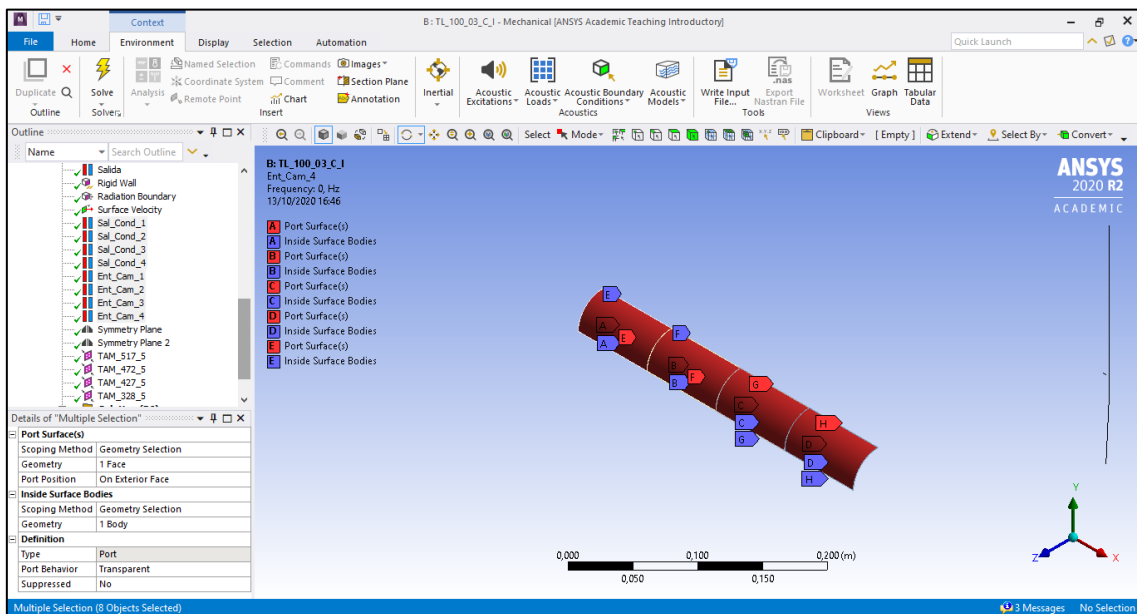


Figura 38. Creación de los puertos de salida y entrada a la superficie perforada

Esta opción utiliza una matriz de admitancia para representar las impedancias entre dos contornos o caras diferentes.

Para poder introducir los valores requeridos, se clicará en *Barra de herramientas* → *Acoustic Models* → *Transfer Admittance Matrix* y aparecerá una nueva condición de contorno. Se selecciona la matriz de admitancia en *Árbol de trabajo* → *Harmonic Acoustics* → *Transfer Admittance Matrix* y de esta manera se desplegará un cuadro con las propiedades para poder introducir la matriz de admitancia.

En primer lugar, se seleccionan los dos puertos de entrada y salida del conducto para cada segmento como las superficies de referencia entre las que actuará la impedancia del perforado. Para los valores de la matriz de admitancia se permite introducirlos de manera

tabulada, para ello, se debe clicar en cualquiera de los apartados a rellenar y seleccionar *Tabular (Frequency)*. Esta nueva estructura dará la posibilidad de introducir las admitancias como tablas. Se utilizan las tablas creadas con anterioridad con el software MATLAB, se abre mediante Excel y se copian las columnas de los valores de Excel y se pegan en las columnas de la variable correspondiente hasta que, finalmente, quede completada la tabla de la siguiente forma:

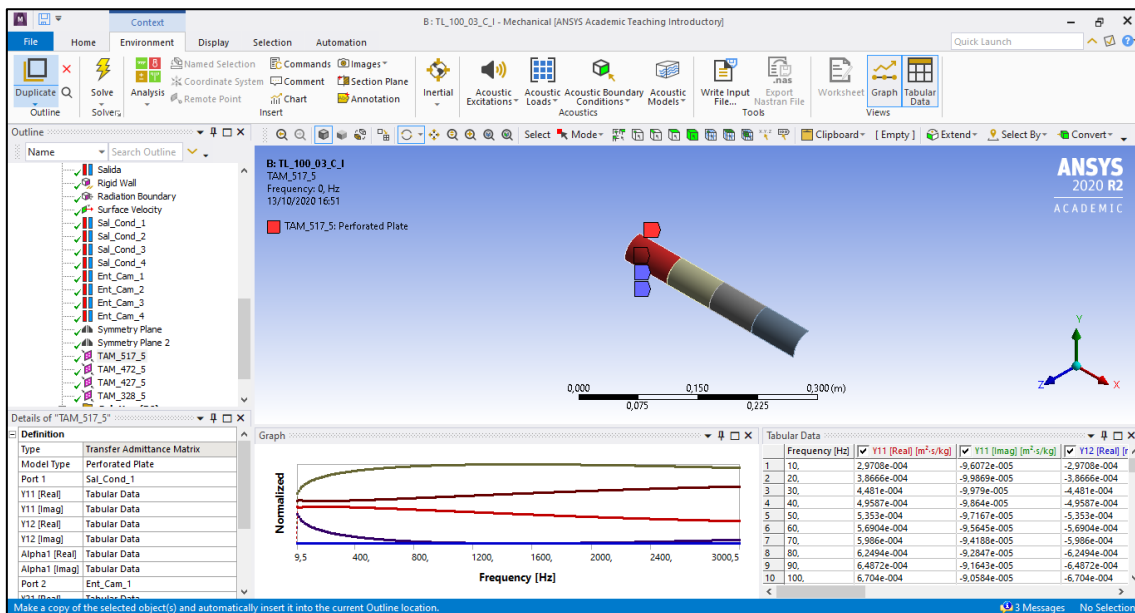


Figura 39. Configuración de los valores de la matriz de admitancia

De igual manera se definen para los demás segmentos del conducto perforado, teniendo en cuenta que cada uno está a distinta temperatura, por lo tanto, diferentes propiedades específicas.

4.2.6 SIMULACIÓN Y RESULTADOS

Una vez introducidas las condiciones de contorno, el modelo queda completamente definido. En este punto se habrá terminado la fase de pre-procesado y a continuación, se inicia el procesado. Para ello, se han de definir todos los parámetros que caracterizan el estudio acústico como el rango de frecuencias en el que se quiere realizar, el número de estudios dentro de ese rango de frecuencias, el tipo de solución que se quiere mostrar, etc.

Para configurar estos parámetros se sigue la ruta *Árbol de trabajo* → *Harmonic Acoustics* → *Analysis settings*. Una vez seleccionado este apartado se desplegará un cuadro con las opciones del análisis acústico. En este cuadro se introduce el rango de frecuencias a

estudio (de 0 a 3000 Hz) y el número de soluciones dentro de este rango (300), quedando configurado este cuadro como sigue:

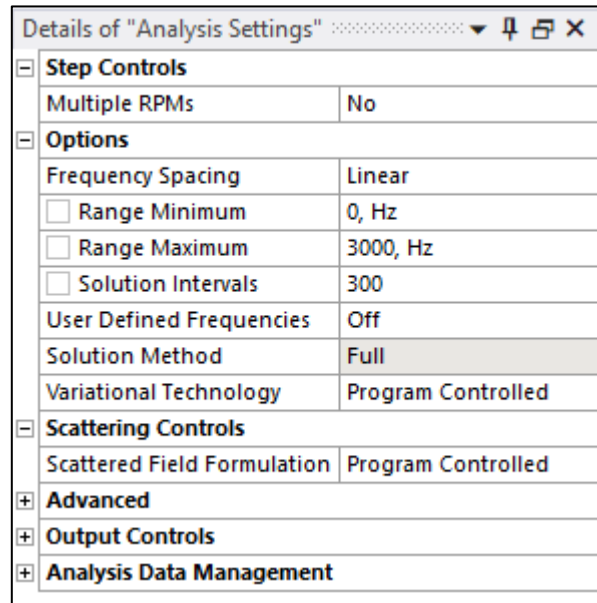


Figura 40. Configuración del análisis acústico.

Tras definir las propiedades del análisis se entra en el apartado *Solution*. Una vez seleccionado este apartado, cambiarán los iconos del menú de herramientas, apareciendo los correspondientes a la solución del estudio. En este caso, se quiere conocer la gráfica del *TL* respecto a la frecuencia, que es el factor que caracteriza a un silenciador. Para indicarle al programa que esa es la solución que se requiere, hay que seleccionar dentro de la barra de herramientas: *Acoustic* → *Transmission loss*. En la zona inferior aparecerá un cuadro con las propiedades de esta solución. En el cuadro únicamente hay que definir los puertos de entrada y salida del silenciador, ya que el rango de frecuencias en el que se ofrecerá la solución ya está fijado del paso anterior.

Una vez está todo configurado se clic en *Solve*, en la parte superior de la pantalla, para lanzar el ensayo. Cuando el programa ha terminado de calcular aparecen tres pantallas donde se muestra la gráfica del *TL*, los datos tabulados del *TL* frente a la frecuencia y una ventana de mensajes.

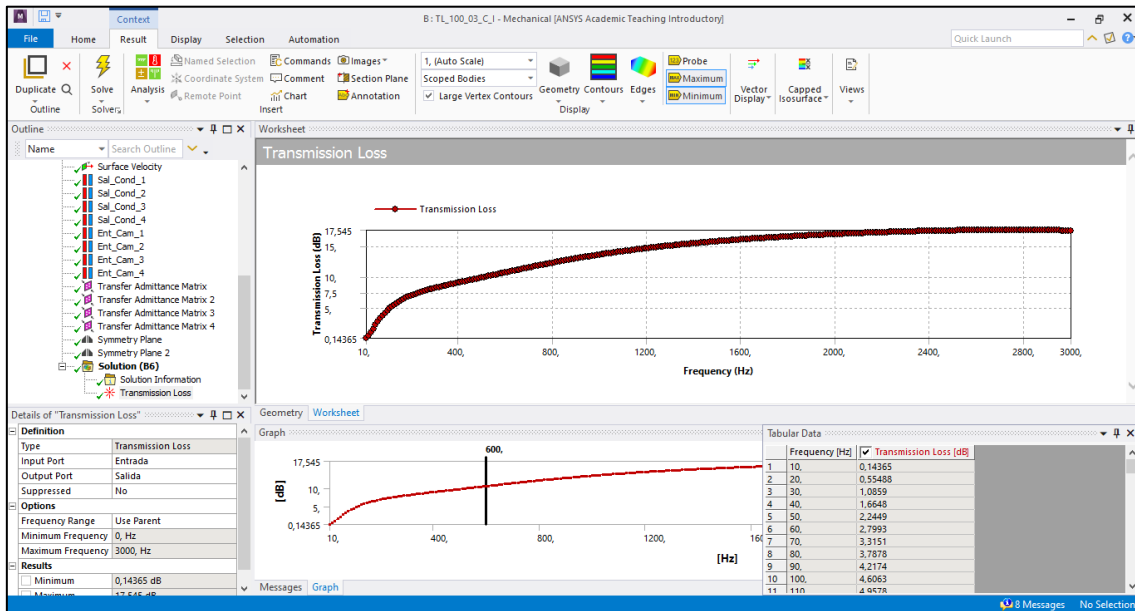


Figura 41. Ventana de solución

Se pueden exportar la tabla con los datos del nivel de TL correspondiente a cada frecuencia ensayada, para poder así reproducir la gráfica en otros programas e incluso comparar diferentes gráficas. Para ello, se clica con el botón derecho dentro de la ventana *Tabular Data* y se selecciona *export* para generar un documento de texto y guardarlo.



Capítulo 5

SIMULACIONES Y RESULTADOS

5.1 VALIDACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS IMPLEMENTADAS

Antes de realizar las simulaciones necesarias para el presente proyecto se procede a validar las metodologías numéricas diseñadas en los softwares APDL y Ansys Workbench, para lo cual se realiza una simulación correspondiente a cada diseño presentado en el capítulo 3, teniendo en cuenta las mismas condiciones para cada software.

Como ejemplo se ha tomado en cuenta el diseño del Silenciador Disipativo con conducto perforado y gradiente térmico, debido a que presenta la mayor dificultad.

Dichas condiciones son presentadas en la tabla 2.

Tabla 2. Condiciones de análisis para la simulación de validación.

| Condiciones de análisis para simulación de validación | |
|---|-----------------------|
| Longitud de conductos exteriores | 0.1 m |
| Longitud de la cámara disipativa | 0.3 m |
| Radio de conductos de entrada, central y salida | 0.0268 m |
| Radio de cámara disipativa | 0.091875 m |
| Espesor del conducto perforado | 0.0002 m |
| Densidad de compactación de la fibra | 100 kg/m ³ |
| Temperatura de entrada | 600 °C |
| Temperatura de salida | 300 °C |
| Número de segmentos | 4 |
| Máxima frecuencia de cálculo | 3000 Hz |
| Frecuencia Inicial | 10 Hz |
| Incremento de frecuencia | 10 Hz |

Los resultados obtenidos se presentan en la figura 42, en la que la línea azul con puntos azules representa la pérdida de transmisión obtenida con el software APDL, mientras que la línea roja representa la pérdida de transmisión obtenida con Ansys Workbench.

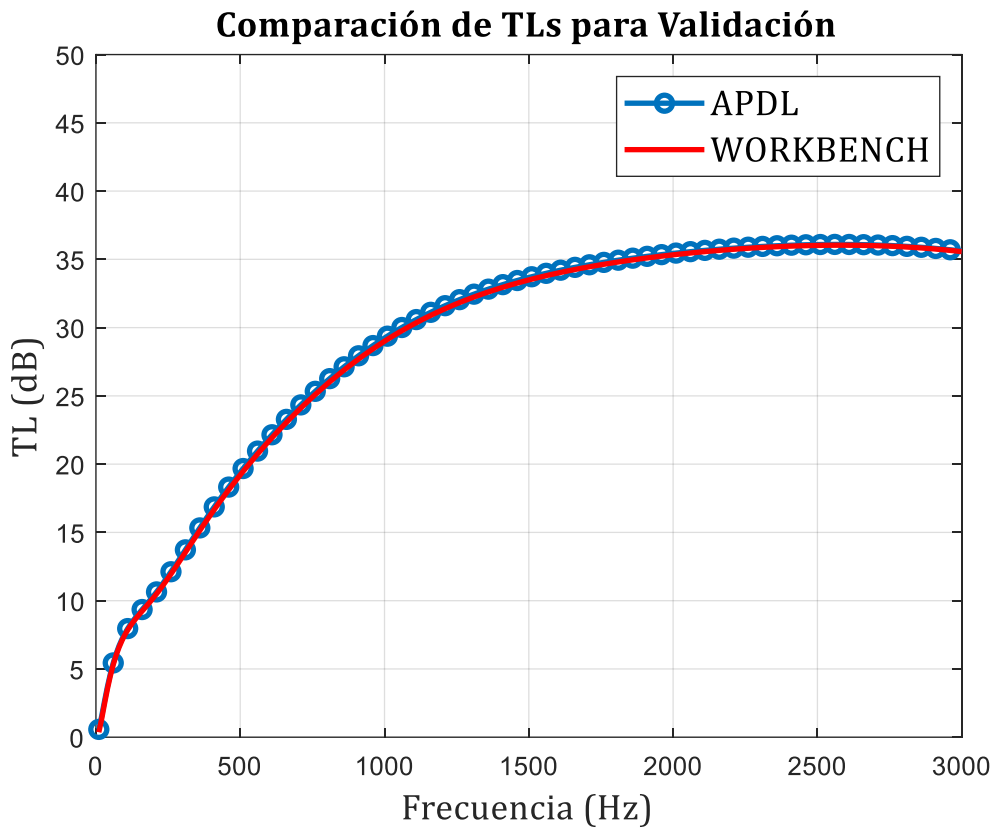


Figura 42. Comparación de TLs para Validación

Como se puede ver los resultados de ambos softwares son prácticamente idénticos, por lo que se procede a realizar todos los casos de estudio necesarios para los objetivos del presente proyecto.

5.2 CASOS DE ESTUDIO

Como se ha mencionado en el presente proyecto se estudia el comportamiento de los silenciadores disipativos ante diferentes temperaturas de funcionamiento y gradientes térmicos, teniendo en cuenta variables como el conducto perforado, la densidad de compactación y también se estudia el efecto de la longitud de la cámara disipativa, por lo que todos los casos que se estudian se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 3. Casos de estudio

| Caso | Conducto Perforado | Gradiente Térmico | Temperatura Constante / Entrada – Salida (°C) | Longitud Cámara Disipativa (m) | Densidad de Compactación de la fibra (kg/m ³) |
|------|--------------------|-------------------|---|--------------------------------|---|
| 1.1 | No | No | 15 – 150 – 250 – 350 – 450 – 550 | 0.3 | 100 |
| 1.2 | No | No | 15 – 150 – 250 – 350 – 450 – 550 | 0.15 | 100 |
| 1.3 | No | No | 15 – 150 – 250 – 350 – 450 – 550 | 0.3 | 200 |
| 2.1 | No | Sí | 600 – 300 | 0.3 | 100 |
| 2.2 | No | Sí | 600 – 300 | 0.15 | 100 |
| 2.3 | No | Sí | 600 – 300 | 0.3 | 200 |
| 3.1 | Sí | No | 15 – 150 – 250 – 350 – 450 – 550 | 0.3 | 100 |
| 3.2 | Sí | No | 15 – 150 – 250 – 350 – 450 – 550 | 0.15 | 100 |
| 3.3 | Sí | No | 15 – 150 – 250 – 350 – 450 – 550 | 0.3 | 200 |
| 4.1 | Sí | Sí | 600 – 300 | 0.3 | 100 |
| 4.2 | Sí | Sí | 600 – 300 | 0.15 | 100 |
| 4.3 | Sí | Sí | 600 – 300 | 0.3 | 200 |

Como se observa en la tabla 2, los casos de estudio que no poseen gradiente térmico se analizan con varias temperaturas de funcionamiento, pero constantes, mientras que los que si tienen gradiente térmico se analizan simplemente con una temperatura de entrada y salida, estos últimos se plantean realizar con una división de 4 segmentos. Es por esto



por lo que se adicionalmente se plantea realizar un par de análisis más en los que se reduce el número de segmentos para analizar la influencia de estos y en los que los valores de temperatura de entrada y salida varían de igual manera para validación de resultados.

Todos los casos presentados son simulados utilizando el desarrollo planteado en el capítulo 4, tanto en APDL como en Ansys Workbench.

Una vez realizadas todas las simulaciones se procede a exportar las tablas de resultados correspondientes a la pérdida de transmisión tanto en APDL como en Ansys Workbench y con la ayuda de MATLAB se procesan los resultados.

En las siguientes secciones se presentan los resultados de cada caso planteado en la tabla 3, teniendo en cuenta que los resultados obtenidos en los softwares APDL y Ansys Workbench son idénticos, las figuras presentadas corresponden únicamente a los resultados obtenidos en el software APDL.

5.3 SILENCIADOR DISIPATIVO SIN CONDUCTO PERFORADO Y TEMPERATURAS UNIFORMES

5.3.1 CASO 1.1

Para este caso se tiene una longitud de cámara disipativa de 0.3 m y una densidad de compactación de $100\text{ (kg/m}^3\text{)}$, a distintas temperaturas de funcionamiento se tienen los siguientes resultados, presentados en la figura 43.

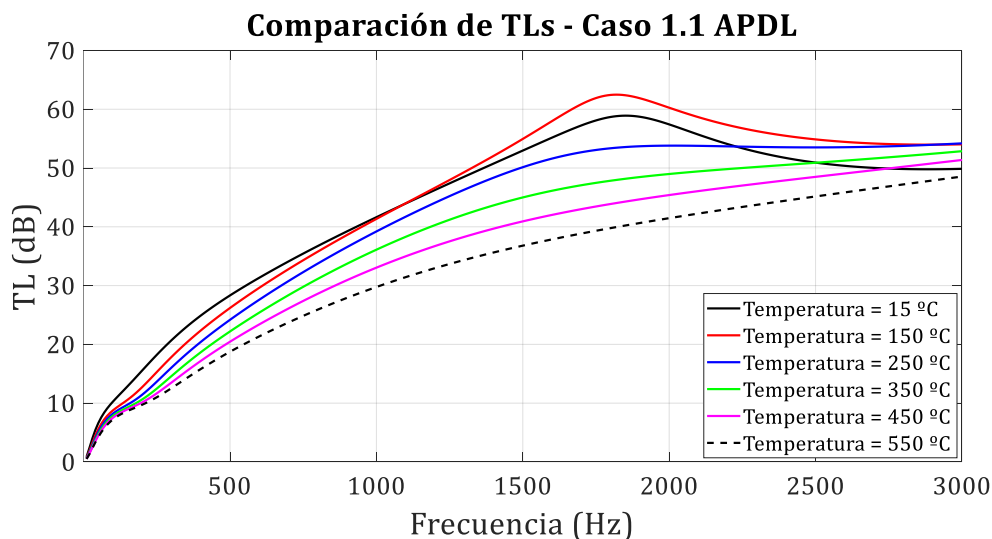


Figura 43. Pérdidas de transmisión del Caso 1.1.

Se puede observar que a los 3000 Hz , la pérdida de transmisión obtenida para las temperaturas medias de funcionamiento de 150 °C y 250 °C es mayor, 54 dB , representando un mejor funcionamiento del silenciador, no así para temperaturas menores a 150 °C , que se podría considerar un “estado frío”, y para temperaturas mayores a 250 °C , la pérdida de transmisión disminuye, teniendo 48.16 dB con una temperatura de 550 °C , representando que la eficacia del silenciador disminuye.

Para las temperaturas de 15 °C y 150 °C se observa picos de atenuación propios del silenciador a medias frecuencias, mientras que a medida que la temperatura aumenta, estos picos se van desplazando hacia frecuencias menores, esto es debido a que la resistividad del material absorbente aumenta a medida que aumenta la temperatura, provocando un efecto de amortiguación del material absorbente

5.3.2 CASO 1.2

En este caso se mantiene constante la densidad de compactación y se reduce la longitud de la cámara disipativa de 0.3 m a 0.15 m , a distintas temperaturas de funcionamiento se tienen los siguientes resultados, presentados en la figura 44.

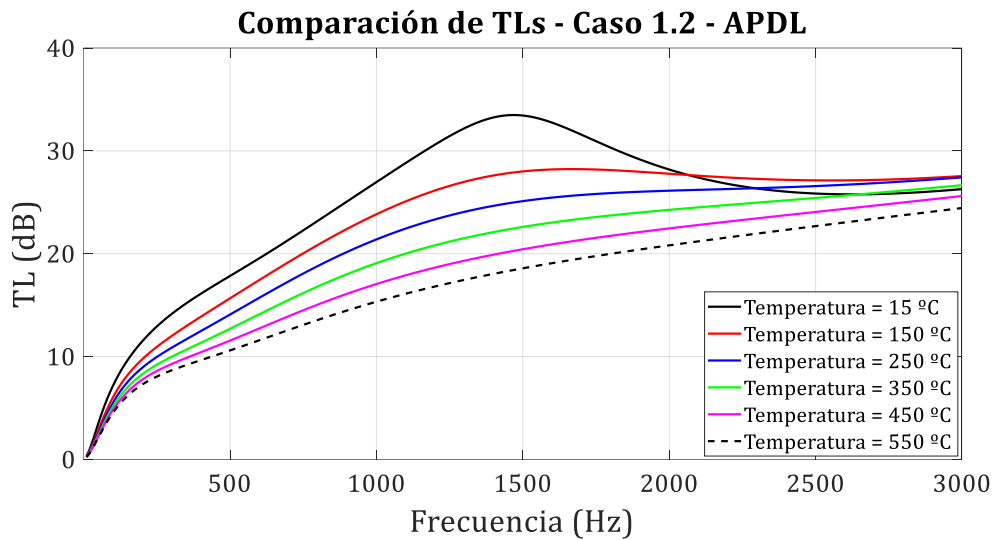


Figura 44. Pérdidas de transmisión del Caso 1.2.

El comportamiento del silenciador con la variación en geometría larga a corta es bastante similar que en el Caso 1.2, teniendo la mayor pérdida de transmisión con temperaturas de 150 °C y 250 °C , 27.53 dB a 3000 Hz , de igual manera, para temperaturas menores 150 °C y mayores a 250 °C la pérdida de transmisión disminuye, obteniendo 24.4 dB a 3000 Hz con una temperatura de 550 °C , reduciendo la eficiencia del silenciador.

Al tener una geometría más corta, se tiene menor material absorbente, es por esto por lo que la mayor pérdida de transmisión para este caso es mucho menor a la mayor pérdida de transmisión del caso anterior, sin embargo, los picos de atenuación del silenciador se ven desplazados más rápidamente a menores frecuencias que con el caso anterior, lo que representa un mayor efecto amortiguador del silenciador.

5.3.3 CASO 1.3

Para este caso se tiene una longitud de cámara disipativa nuevamente de 0.3 m pero varía la densidad de compactación de 100 kg/m^3 a 200 kg/m^3 , obteniendo los resultados presentados en la figura 45.

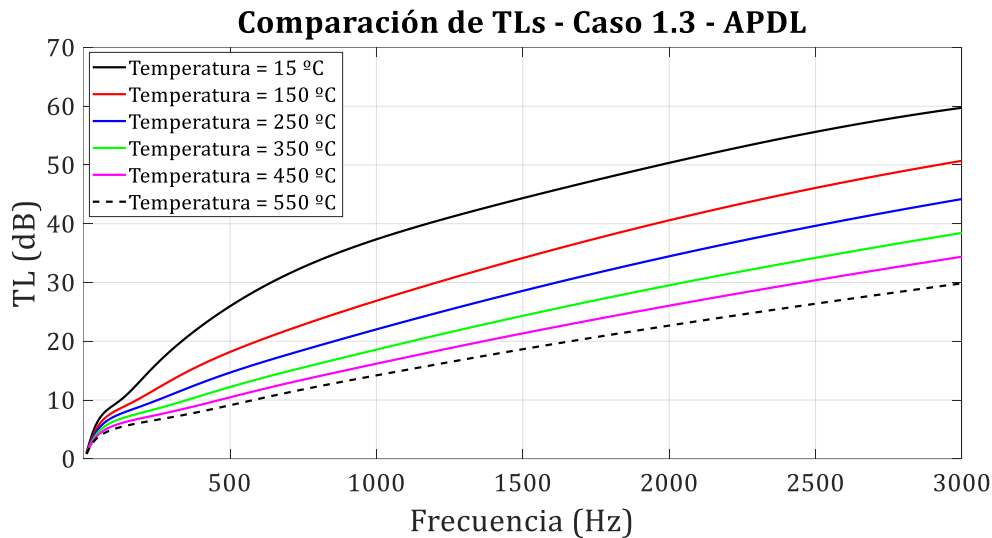


Figura 45. Pérdidas de transmisión del Caso 1.3

Al aumentar la densidad de compactación de la fibra, aumenta la resistividad del material absorbente, causando un efecto amortiguador mucho más marcado, por esto no se tiene ningún pico de atenuación.

Para este caso el silenciador está funcionando de mejor manera a una temperatura de 15 °C con 60 dB a 3000 Hz , presentando un mejor funcionamiento que con el Caso 1.2, sin embargo, para temperaturas de 150 °C y 250 °C , la pérdida de transmisión disminuye a 50.71 y 44.2 dB respectivamente, lo cual indica que para mayores temperaturas, una mayor densidad de compactación de la fibra causa una menor pérdida de transmisión en comparación con el Caso 1.2, en donde la densidad de compactación de la fibra es menor.

Para temperaturas más altas el silenciador pierde bastante eficiencia, obteniendo 30 dB a 3000 Hz con una temperatura de 550 °C .

5.4 SILENCIADOR DISIPATIVO SIN CONDUCTO PERFORADO Y GRADIENTE TÉRMICO

5.4.1 CASO 2.1

Para este caso se tiene una longitud de cámara disipativa de 0.3 m y una densidad de compactación de $100\text{ (kg/m}^3\text{)}$ con un gradiente térmico de $600 - 300\text{ }^\circ\text{C}$, obteniendo como resultado una pérdida de transmisión presentada en la figura 46.

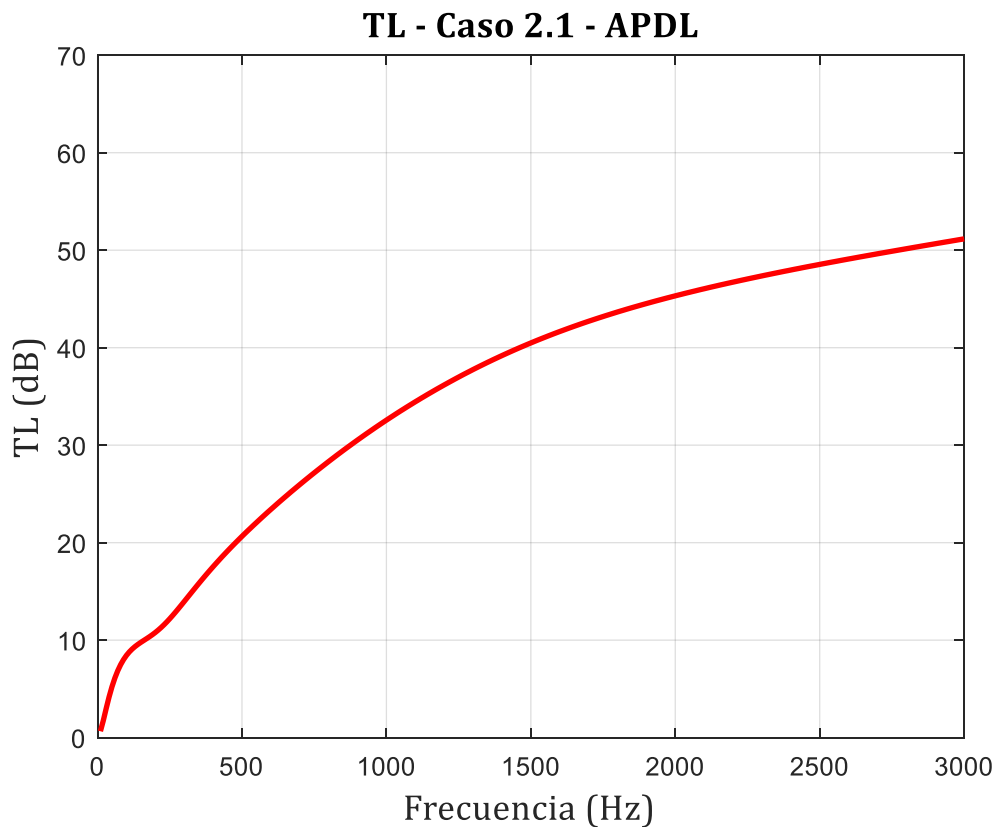


Figura 46. Pérdida de transmisión del Caso 2.1.

Al realizar las simulaciones con el gradiente térmico se obtiene una pérdida de transmisión de 50.85 dB a los 3000 Hz .

Se puede ver un pequeño pico de atenuación a bajas frecuencias, alrededor de los 200 Hz , representando un efecto de amortiguamiento bastante temprano, esto es debido a que, a la entrada de la cámara disipativa, se tienen temperaturas muy elevadas, causando valores de resistividad del material absorbente muy altos.

En comparación con el Caso 1.1, que tiene las mismas condiciones de entrada para el análisis, la pérdida de transmisión es bastante similar a la temperatura media de $250\text{ }^\circ\text{C}$.

5.4.2 CASO 2.2

En este caso se mantiene constante la densidad de compactación y se reduce la longitud de la cámara disipativa de 0.3 m a 0.15 m , en la figura 46 se presenta la pérdida de transmisión obtenida.

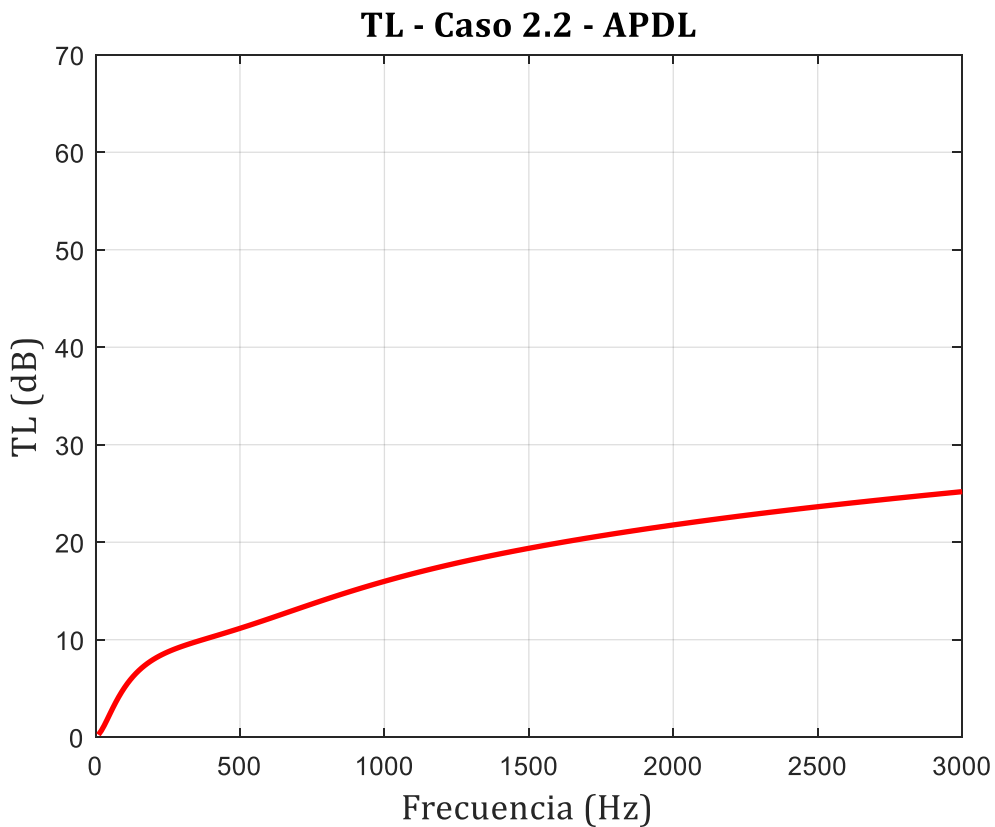


Figura 47. Pérdida de transmisión del Caso 2.2.

Al reducir la longitud de la cámara disipativa, se usa una menor cantidad de material absorbente por lo que la pérdida de transmisión disminuye considerablemente de 25.16 dB a 3000 Hz , comparándolo con el Caso 1.2, presenta un resultado similar al de la temperatura media de 250 °C .

De igual manera a la entrada de la cámara disipativa se tienen elevadas temperaturas, lo que causa valores elevados de resistividad del material absorbente, presentando un mayor efecto amortiguador, es por esto por lo que se observa una gráfica más estable que la del caso anterior, sobre todo a bajas frecuencias.

5.4.3 CASO 2.3

Para este caso se tiene una longitud de cámara disipativa nuevamente de 0.3 m pero varía la densidad de compactación de 100 kg/m^3 a 200 kg/m^3 , la pérdida de transmisión obtenida se presenta en la figura 48.

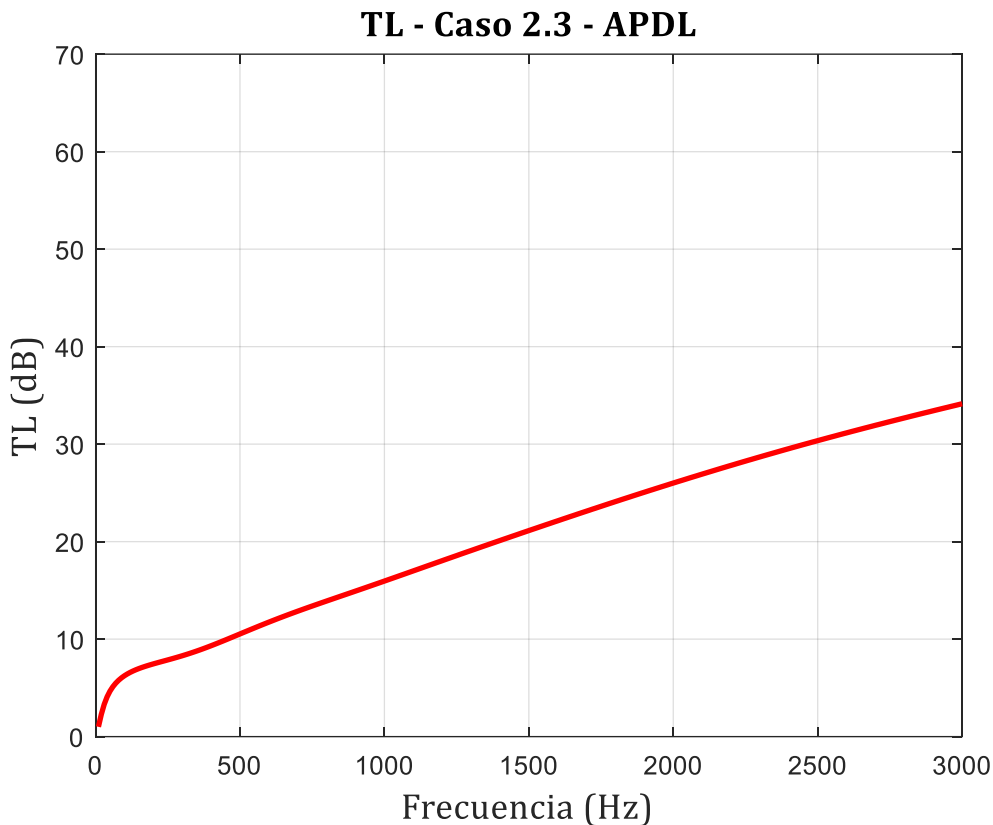


Figura 48. Pérdida de transmisión del Caso 2.3.

Al tener el efecto del gradiente térmico en el análisis y trabajar con una densidad de compactación mayor se obtiene una pérdida de transmisión de 34 dB a 3000 Hz , comparándolo con el Caso 2.1, se puede observar que la eficiencia del silenciador disipativo ha reducido.

Al comparar con los resultados del Caso 1.3, la pérdida de transmisión ya no se asemeja a la obtenida con una temperatura media de funcionamiento de 250 °C , sino mas bien se asemeja bastante a la de 450 °C , esto es comprensible debido a que en el Caso 1.3 los resultados a distinta temperatura varían considerablemente, no así para los Caos 1.1 y 1.2.

5.5 SILENCIADOR DISIPATIVO CON CONDUCTO PERFORADO Y TEMPERATURAS UNIFORMES

5.5.1 CASO 3.1

Aquí se tiene que con una longitud de cámara disipativa de 0.3 m y una densidad de compactación de $100\text{ (kg/m}^3\text{)}$ las pérdidas de transmisión obtenidas a distintas temperaturas se presentan en la figura 49.

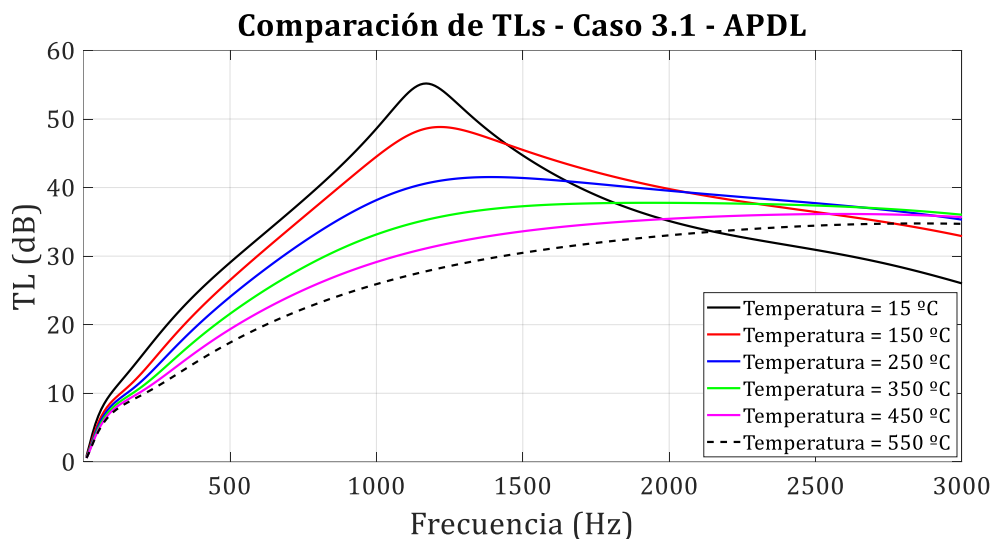


Figura 49. Pérdidas de transmisión del Caso 3.1.

Con la inclusión del conducto perforado se puede observar el material absorbente pierde eficiencia debido a que una parte del flujo de aire ya no entra a la cámara disipativa, por lo que no se produce la absorción de energía.

La mayor pérdida de transmisión se tiene con una temperatura de 350 °C , con 36.04 dB a 3000 Hz , sin embargo, a diferencia del Caso 1.1, que presenta las mismas condiciones de entrada, pero no posee conducto perforado, a temperaturas mayores de 350 °C no existe mayor diferencia, teniendo que con una temperatura de 550 °C se obtiene 34.6 dB a 3000 Hz , aquí se puede observar que el material absorbente pierde influencia sobre la reducción del ruido.

Nuevamente se presentan picos de atenuación propios del silenciador a medias frecuencias que van desapareciendo a medida que la temperatura aumenta, debido a que, a elevadas temperaturas, mayor resistividad tiene el material absorbente, aunque, en comparación con el Caso 1.1, los picos se presentan a menores frecuencias.

5.5.2 CASO 3.2

En este caso se mantiene constante la densidad de compactación y se reduce la longitud de la cámara disipativa de 0.3 m a 0.15 m , obteniendo las pérdidas de transmisión a diferentes temperaturas presentadas en la figura 50.

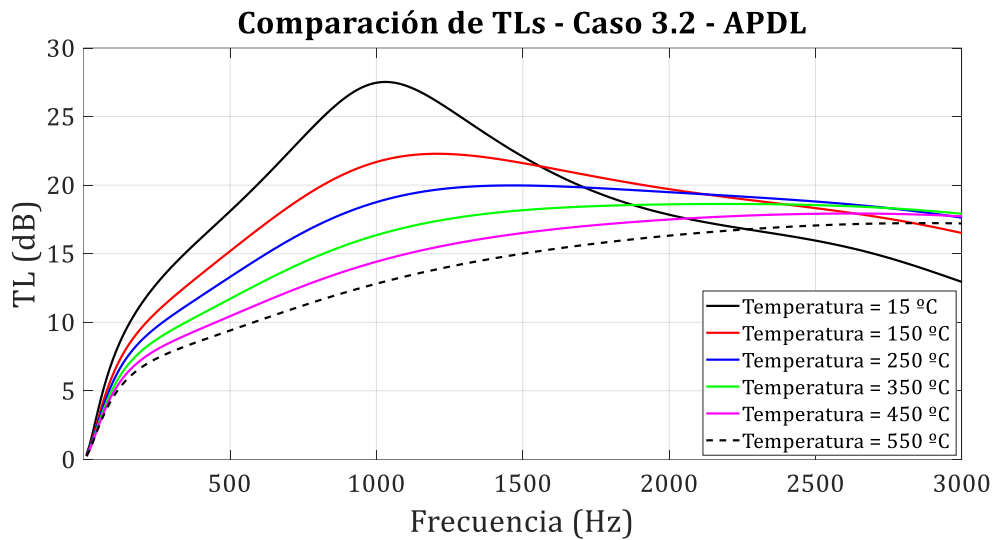


Figura 50. Pérdidas de transmisión del Caso 3.2.

Como se puede observar, con la inclusión del conducto perforado disminuye la pérdida de transmisión y la reducción de la longitud de la cámara disipativa más aún, obteniendo la máxima con una temperatura de 350°C con 17.93 dB a 3000 Hz , de igual manera que el caso anterior, se puede observar que, a mayores temperaturas, no existe mayor diferencia, mientras que, para temperaturas menores, por ejemplo 15°C , la pérdida de transmisión reduce hasta los 12.94 dB a 3000 Hz , todo esto se explica por la influencia del conducto perforado, ya que no todo el aire pasa a la cámara disipativa.

De igual manera se observan picos de atenuación, aunque esta vez a frecuencias menores, que van desapareciendo a medida que la temperatura aumenta.

5.5.3 CASO 3.3

Para este caso se tiene una longitud de cámara disipativa nuevamente de 0.3 m pero varía la densidad de compactación de 100 kg/m^3 a 200 kg/m^3 , las pérdidas de transmisión a diferentes temperaturas se presentan en la figura 51.

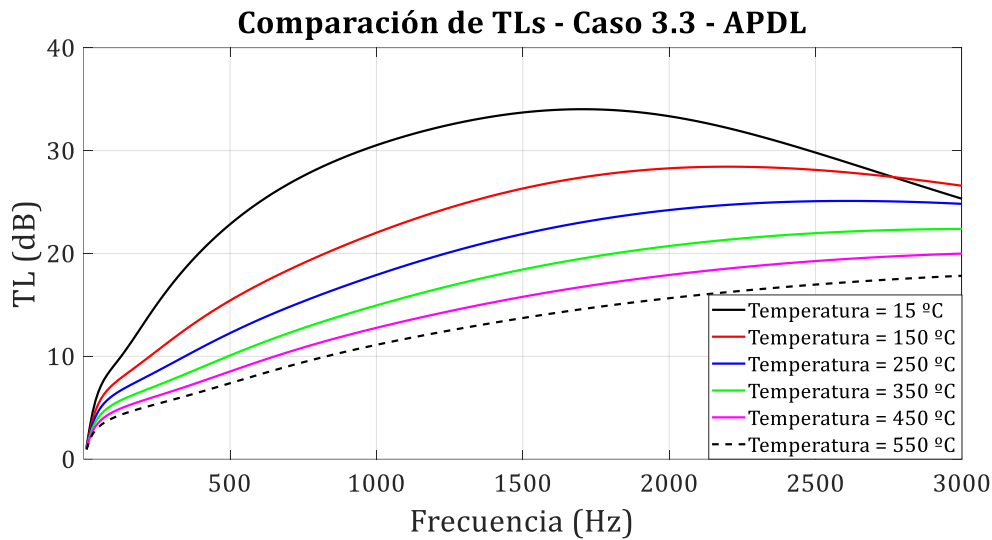


Figura 51. Pérdidas de transmisión del Caso 3.3.

La influencia del conducto perforado y del aumento de la densidad de compactación de la fibra se puede observar claramente, por una parte, en comparación con el Caso 1.3 que no posee conducto perforado, la eficiencia del silenciador disipativo disminuye, teniendo la máxima pérdida de transmisión de 26.58 dB a 3000 Hz con una temperatura de 150 °C . Por otra parte, en comparación con el Caso 3.1 que tiene una menor densidad de compactación, la pérdida de transmisión también disminuye, aunque, el silenciador se comporta mejor a bajas temperaturas como 15 °C .

Con una densidad de compactación mayor, la resistividad del material absorbente se eleva considerablemente, por lo que se presenta un gran efecto amortiguador, eliminando los picos de atenuación completamente y obteniendo únicamente pequeñas atenuaciones a bajas frecuencias.

5.6 SILENCIADOR DISIPATIVO CON CONDUCTO PERFORADO Y GRADIENTE TÉRMICO

5.6.1 CASO 4.1

En este caso se tiene una longitud de cámara disipativa de 0.3 m y una densidad de compactación de $100\text{ (kg/m}^3\text{)}$ obteniendo la pérdida de transmisión presentada en la figura 52.

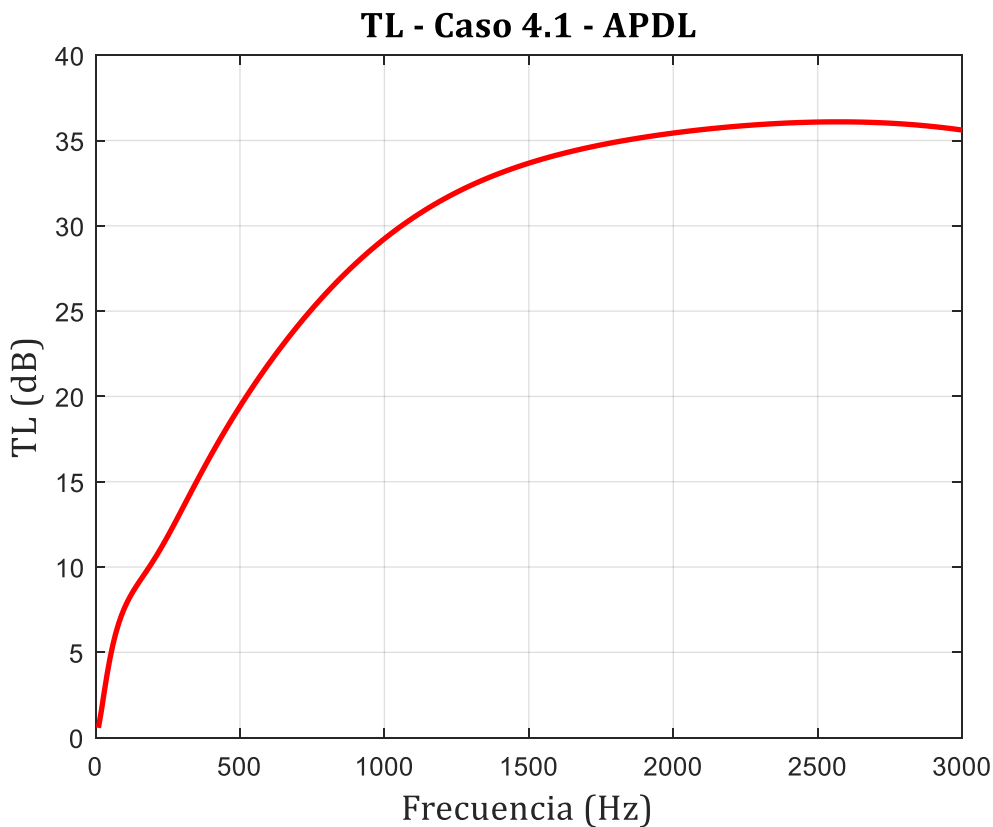


Figura 52. Pérdida de transmisión del Caso 4.1.

Al simular con gradiente térmico, se puede observar claramente la influencia del conducto perforado ya que, en comparación con el Caso 2.1, la pérdida de transmisión disminuye a 35.59 dB a los 3000 Hz , debido a que una parte del aire no pasa hacia la cámara disipativa. En comparación con el Caso 3.1, los resultados son bastantes parecidos a la temperatura de $350\text{ }^{\circ}\text{C}$.

A bajas frecuencias se presenta una pequeña atenuación, esto es debido a que a la entrada de la cámara disipativa se presentan elevadas temperaturas, por lo que la resistividad del material absorbente aumenta, causando un gran efecto amortiguador.

5.6.2 CASO 4.2

En este caso se mantiene constante la densidad de compactación y se reduce la longitud de la cámara disipativa de 0.3 m a 0.15 m , con el mismo gradiente térmico del caso anterior se obtiene una pérdida de transmisión presentada en la figura 53.

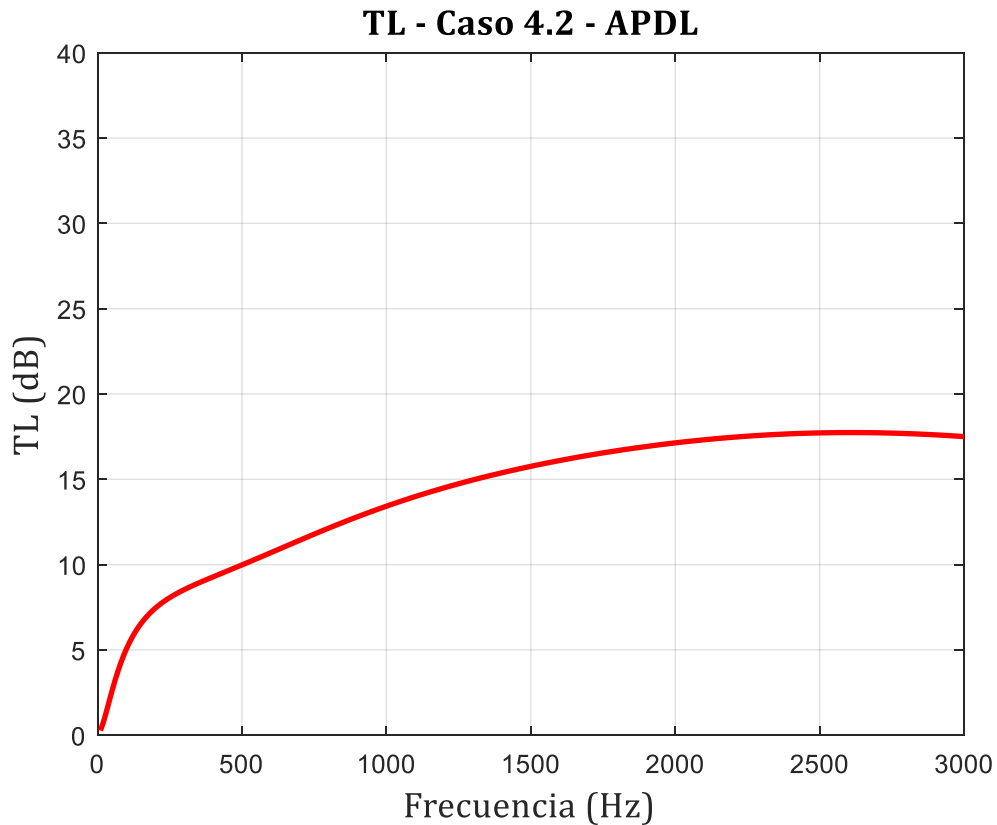


Figura 53. Pérdida de transmisión del Caso 4.2.

Al reducir la longitud de la cámara disipativa y por lo tanto reducir material absorbente, se obtiene una menor pérdida de transmisión. Al comparar con los resultados presentados en el Caso 3.2 se puede observar la influencia del conducto perforado, con estos factores se obtiene una pérdida de transmisión de 17.45 dB a 3000 Hz .

Al comparar con el Caso 3.2, los resultados se asemejan a los obtenidos con una temperatura media de funcionamiento de 350 °C .

5.6.3 CASO 4.3

Para este caso se tiene una longitud de cámara disipativa nuevamente de 0.3 m pero varía la densidad de compactación de 100 kg/m^3 a 200 kg/m^3 con el mismo gradiente térmico de los casos anteriores se obtiene pérdida de transmisión presentada en la figura 54.

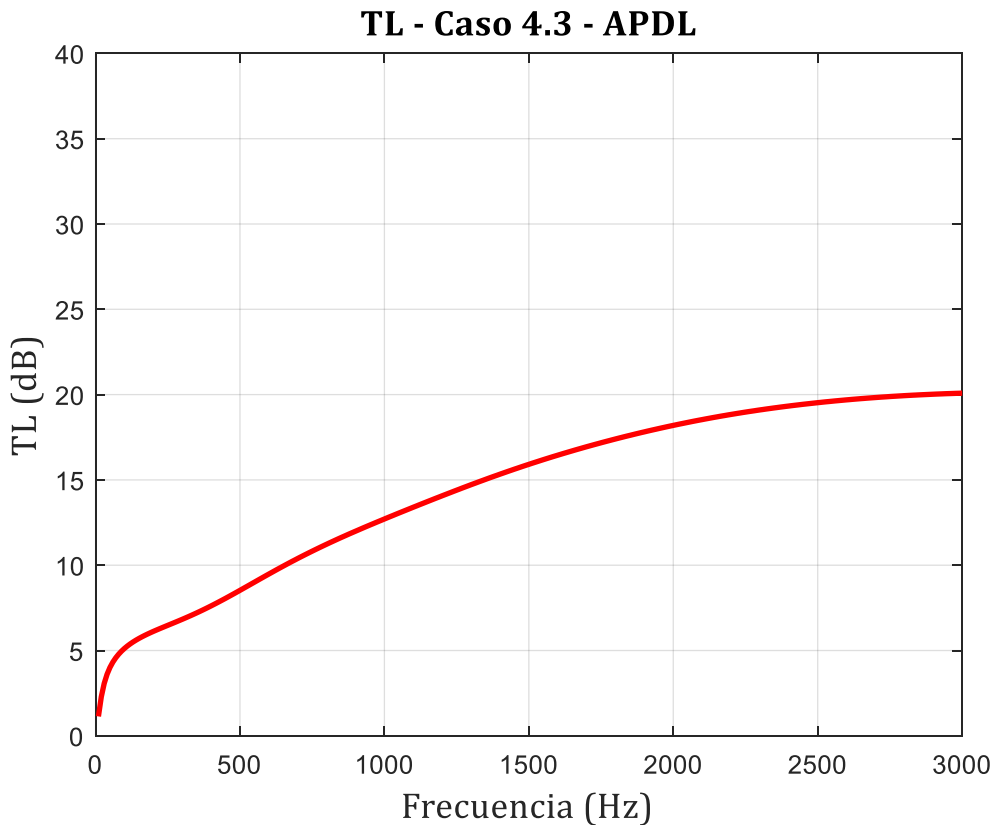


Figura 54. Pérdida de transmisión del Caso 4.3.

Al incrementar la densidad de compactación de la cámara se obtiene una menor pérdida de transmisión, comparación con el Caso 4.1, también se observa la influencia del conducto perforado, ya que en comparación con el Caso 2.3, la pérdida de transmisión también disminuye, debido a que una parte del aire no está pasando hacia la cámara disipativa. Es así como la pérdida de transmisión que se obtiene es de 19.94 dB a 3000 Hz .

En comparación con el Caso 3.3, los resultados son bastante similares a los obtenidos con una temperatura media de funcionamiento de 450 °C , al igual que en el caso 2.3, esto es



debido a que al incrementar la densidad de compactación produce resultados con mayores variaciones a medida que aumenta la temperatura.

5.7 DIFERENTE GRADIENTE TÉRMICO

En la figura 55 se presenta dos casos distintos en los que se ha realizado diferentes simulaciones con distinto gradiente térmico, la línea azul representa un gradiente térmico de 800 – 100 °C, mientras que la línea roja representa el gradiente térmico con el que se ha estado trabajando que es de 600 – 300 °C.

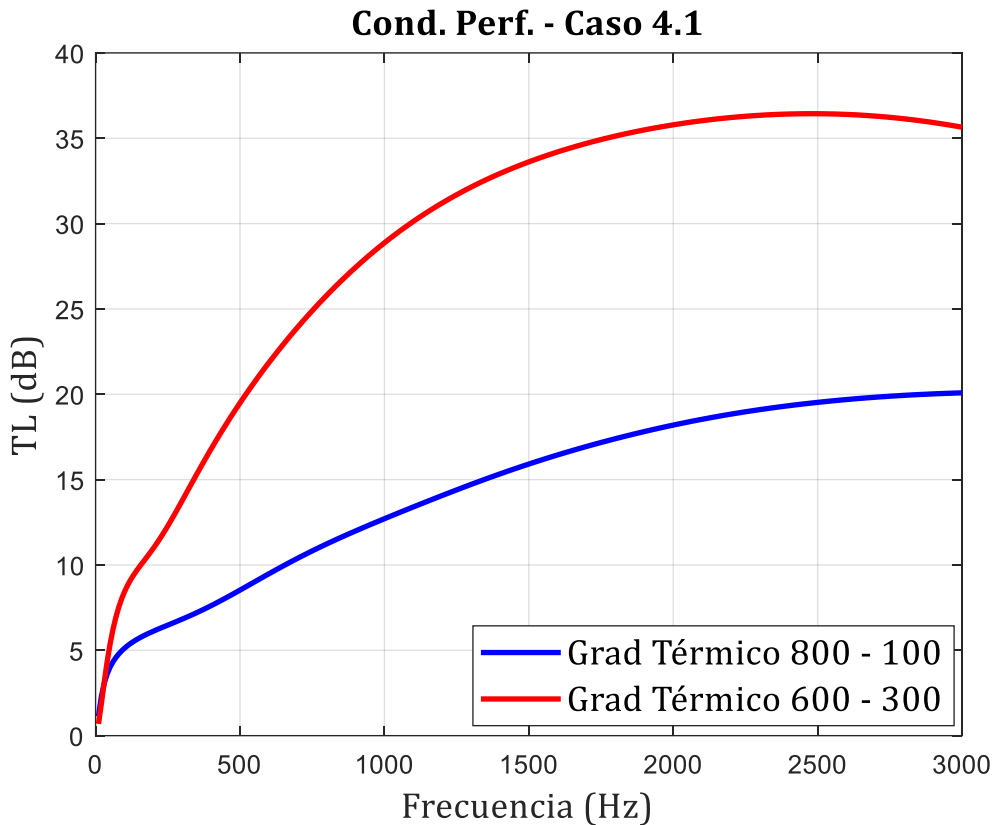


Figura 55. Pérdidas de transmisión con Diferente Gradiente Térmico

Como resultado se puede observar que la pérdida de transmisión obtenida con el gradiente térmico de 600 – 300 °C resulta considerablemente mayor que la obtenida con el gradiente térmico de 800 – 100 °C.

Como se ha visto anteriormente, temperaturas muy elevadas o muy bajas, afectan negativamente al funcionamiento del silenciador.

5.8 DIFERENTE NÚMERO DE SEGMENTOS

En la figura 56 se presenta una comparación de simulaciones con las mismas condiciones de entrada con excepción del número de segmentos, la línea con línea y puntos azules tiene 4 segmentos y la línea roja tiene 2 segmentos.

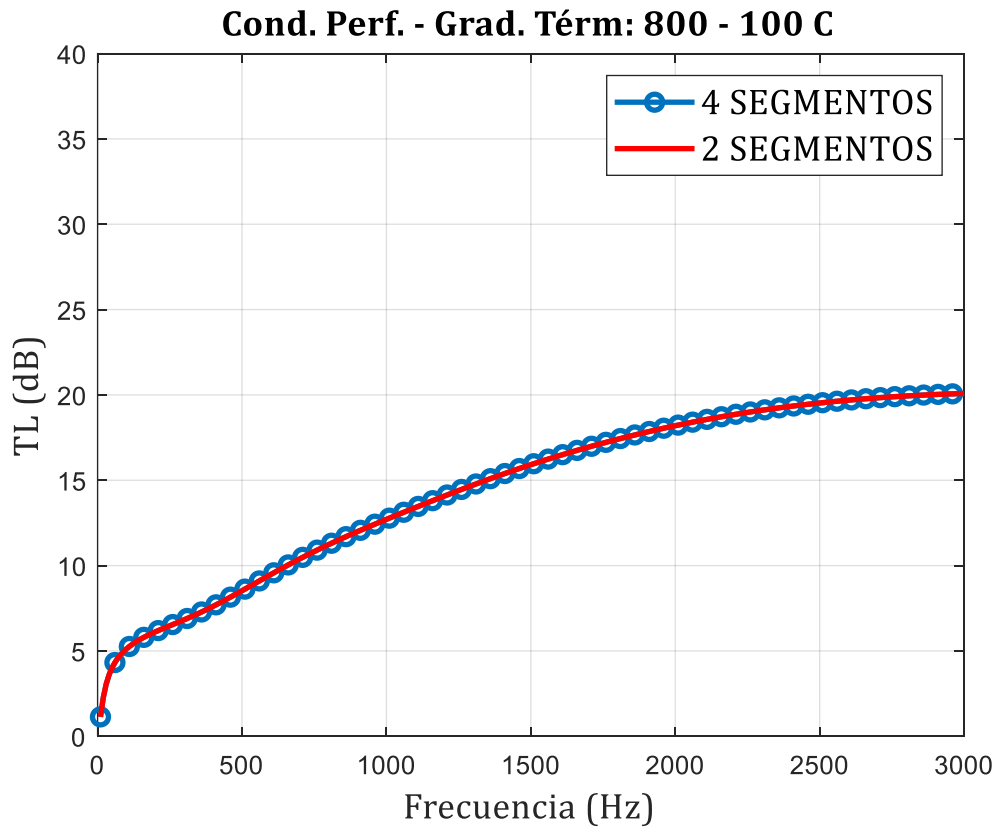


Figura 56. Pérdidas de transmisión con Diferente número de segmentos

Como se puede observar, el resultado es prácticamente igual, por lo que se puede concluir que no es necesario tantos segmentos para obtener resultados fiables, con 2 segmentos es suficiente para futuras investigaciones.

5.9 EFECTO DEL CONDUCTO PERFORADO

En la figura 57 se representa los casos correspondientes a los silenciadores con gradiente térmico.

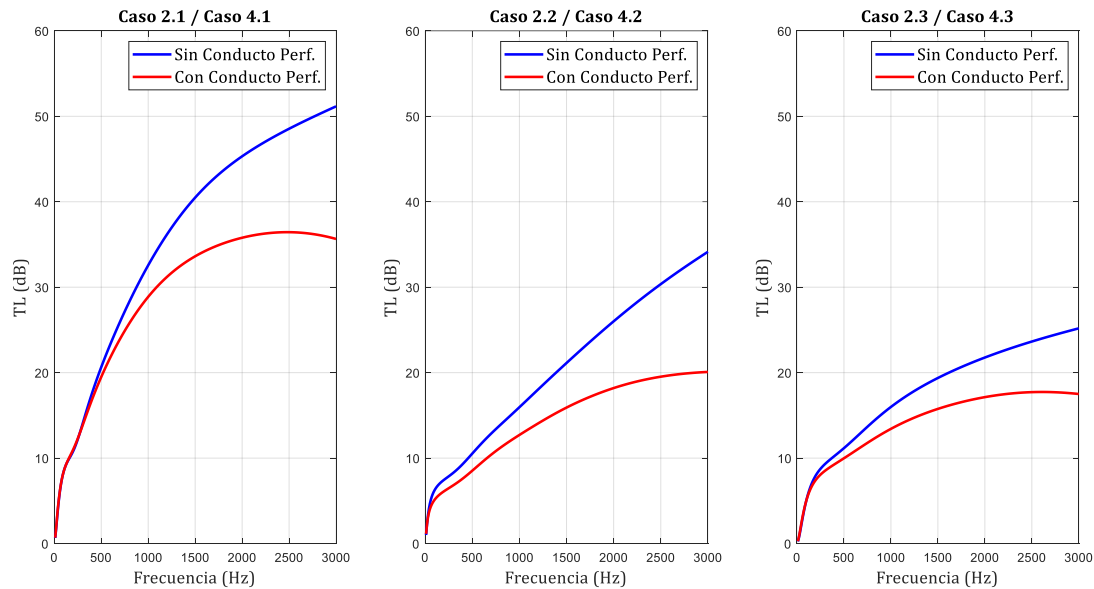


Figura 57. Efecto del conducto perforado.

En los tres casos la diferencia es la existencia o no del conducto perforado, a la izquierda se está representado el caso 2.1 y 4.1 en los cuales la longitud de la cámara disipativa es de 0.3 m , la densidad de compactación de la fibra es de $100(\text{kg}/\text{m}^3)$, en el centro se está representado el caso 2.2 y 4.2 en los cuales la longitud de la cámara disipativa es de 0.15 m , la densidad de compactación de la fibra es de $100(\text{kg}/\text{m}^3)$ y a la derecha se está representado el caso 2.3 y 4.3 en los cuales la longitud de la cámara disipativa es de 0.3 m , la densidad de compactación de la fibra es de $200(\text{kg}/\text{m}^3)$.

Se puede ver claramente que en los 3 casos en los que existe el conducto perforado la pérdida de transmisión de los silenciadores se ve reducida, sobre todo a medias y altas frecuencias, esto es debido a una parte del flujo de aire que ingresa al silenciador no ingresa a la cámara disipativa, por efecto de la porosidad del conducto perforado.

De esta forma la cámara disipativa no absorbe toda la energía del aire y por lo tanto la pérdida de transmisión se ve reducida.

5.10 EFECTO DE LA LONGITUD DE LA CÁMARA DISIPATIVA

En las figuras 58, 59 y 60 se muestran comparaciones entre casos en los que la longitud de la cámara disipativa varía. Par las figuras 58 y 59, las líneas continuas representan la longitud de la cámara disipativa de 0.3 m, mientras que las líneas entrecortadas representan una longitud de 0.15 m.

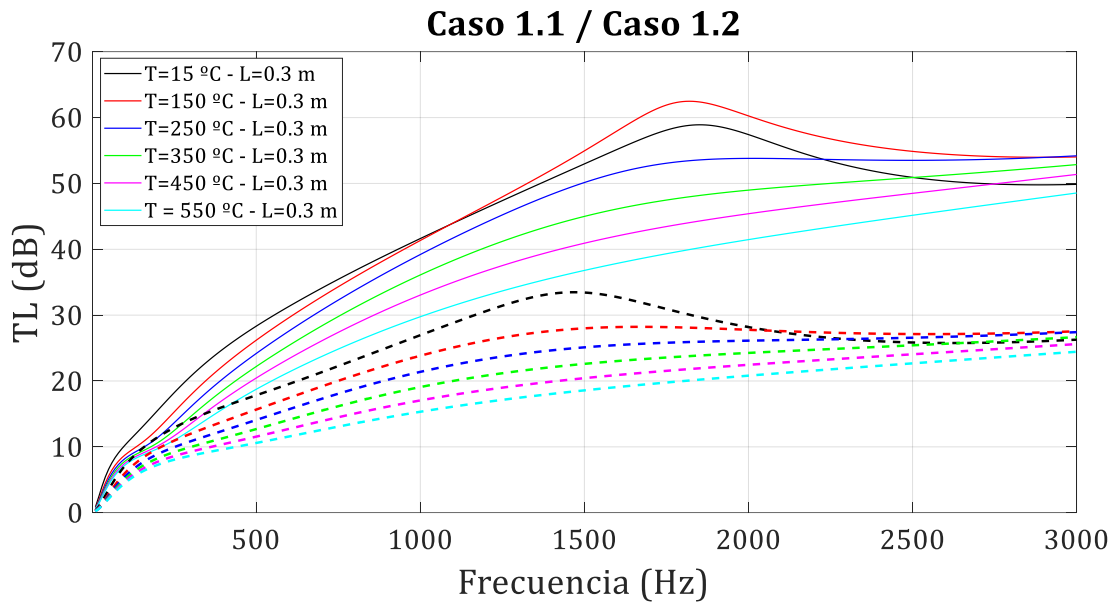


Figura 58. Efecto de la longitud de la Cámara Disipativa, Caso 1.1 y Caso 1.2

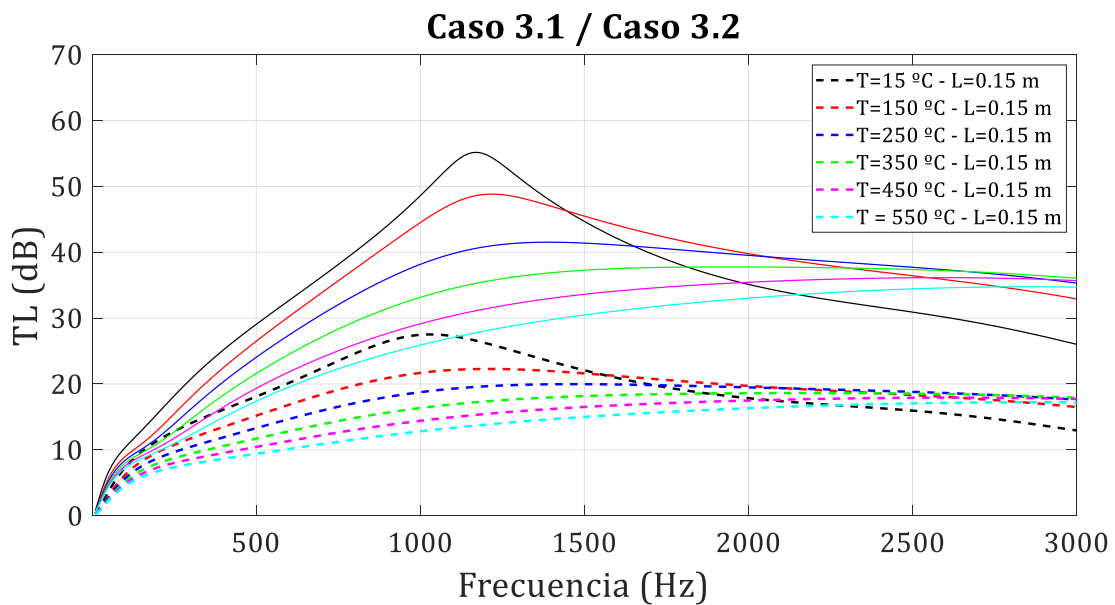


Figura 59. Efecto de la longitud de la Cámara Disipativa, Caso 3.1 y Caso 3.2

En la figura 58 se presenta los casos 1.1 y 1.2, que corresponden al silenciador disipativo sin conducto perforado, mientras que en la figura 59 se presenta los casos 3.1 y 3.2 que corresponden al silenciador disipativo con conducto perforado en los cuatro casos la densidad de compactación de la fibra es de $100(kg/m^3)$. En ambas gráficas la diferencia radica en la longitud de la cámara disipativa, en donde se puede ver claramente que, al reducir dicha longitud, la pérdida de transmisión disminuye, esto debido a que se tiene una menor cantidad de material absorbente y por lo tanto menor pérdida de transmisión.

Cabe destacar que al reducir la longitud de la cámara disipativa también se reducen los picos de atenuación propios del silenciador.

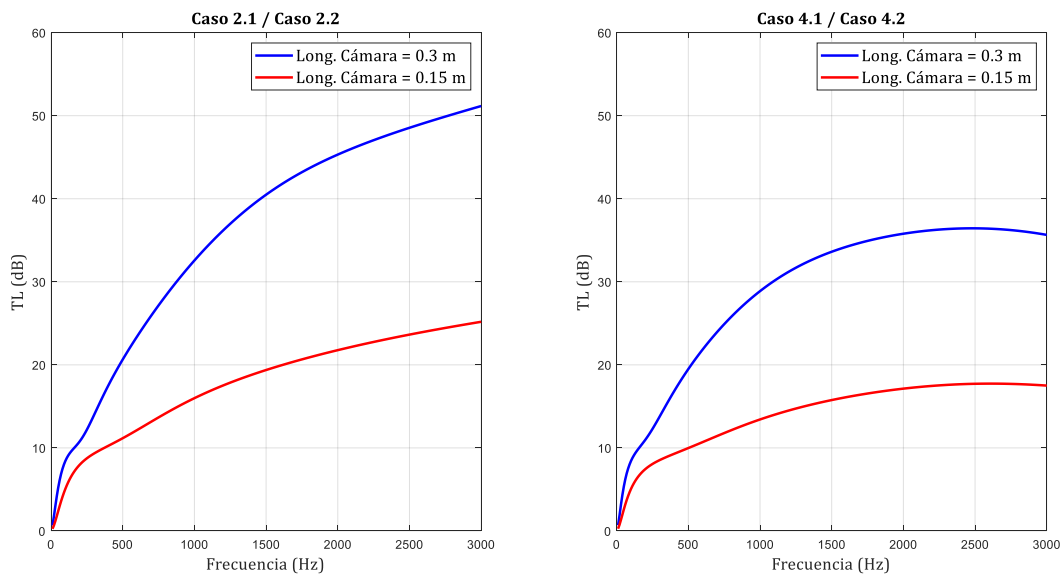


Figura 60. Efecto de la longitud de la Cámara Disipativa. Gradiente Térmico.

A la izquierda se presenta los casos 2.1 y 2.2 en los cuales no existe la presencia de conducto perforado, mientras que a la derecha se presenta los casos 4.1 y 4.2 en los que, si existe conducto perforado, en los cuatro casos la densidad de compactación de la fibra es de $100(kg/m^3)$. Puede observarse que, a mayor longitud de cámara disipativa, mayor es el TL en general, debido a una mayor cantidad de material fonoabsorbente en el interior del silenciador.

5.11 EFECTO DE LA DENSIDAD DE COMPACTACIÓN

En las figuras 61, 62 y 63 se muestra comparaciones de distintos casos, en las que la densidad de compactación de la fibra varía.

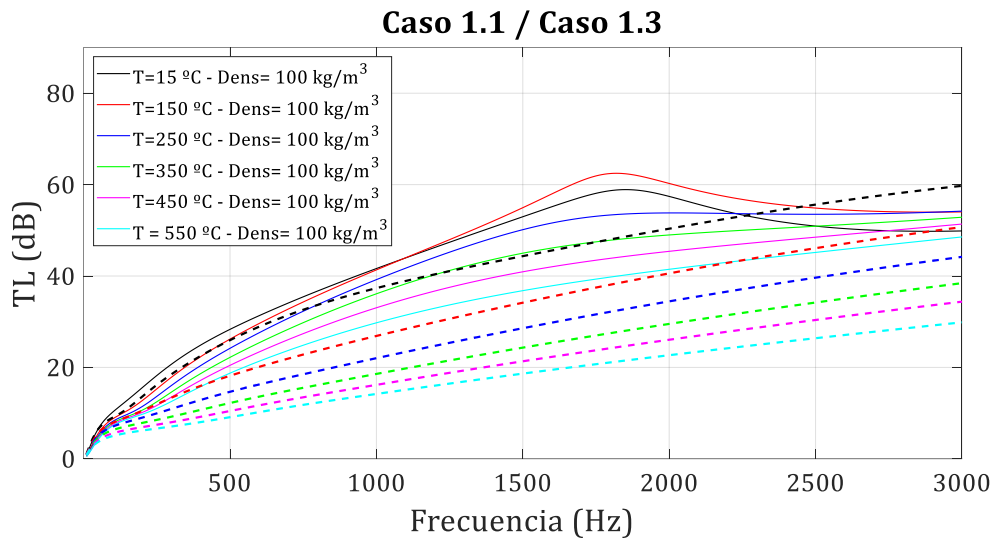


Figura 61. Efecto de la Densidad de Compactación de la Fibra. Caso 1.1 y Caso 1.3.

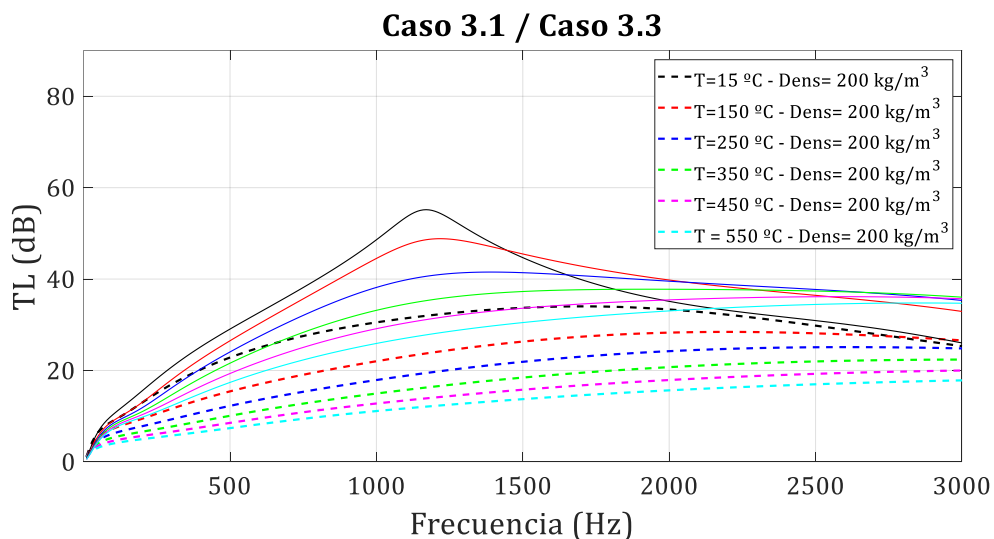


Figura 62. Efecto de la Densidad de Compactación de la Fibra. Caso 3.1 y Caso 3.3.

En la figura 61 se presenta los casos 1.1 y 1.3, que representan al silenciador disipativo sin conducto perforado, pero con distinta densidad de compactación. Al observar detenidamente se puede ver que, para temperaturas menores, alrededor de 15°C la densidad de compactación produce un aumento de la pérdida de transmisión, sin embargo,

a medida que la temperatura aumenta, con una mayor densidad de compactación de la fibra, la pérdida de transmisión reduce considerablemente.

En la figura 62 se presentan los casos 3.1 y 3.3, que representan al silenciador disipativo con conducto perforado, para estos casos la pérdida de transmisión siempre es menor si la densidad de compactación de la fibra aumenta, para temperaturas bajas como 15°C no existe mayor diferencia, pero a medida que la temperatura aumenta, la diferencia es más notoria. Por otra parte, una mayor densidad de compactación de la fibra provoca mayor resistividad del material absorbente causando un efecto amortiguador muy notorio ya que se eliminan por completo los picos de atenuación propios del silenciador.

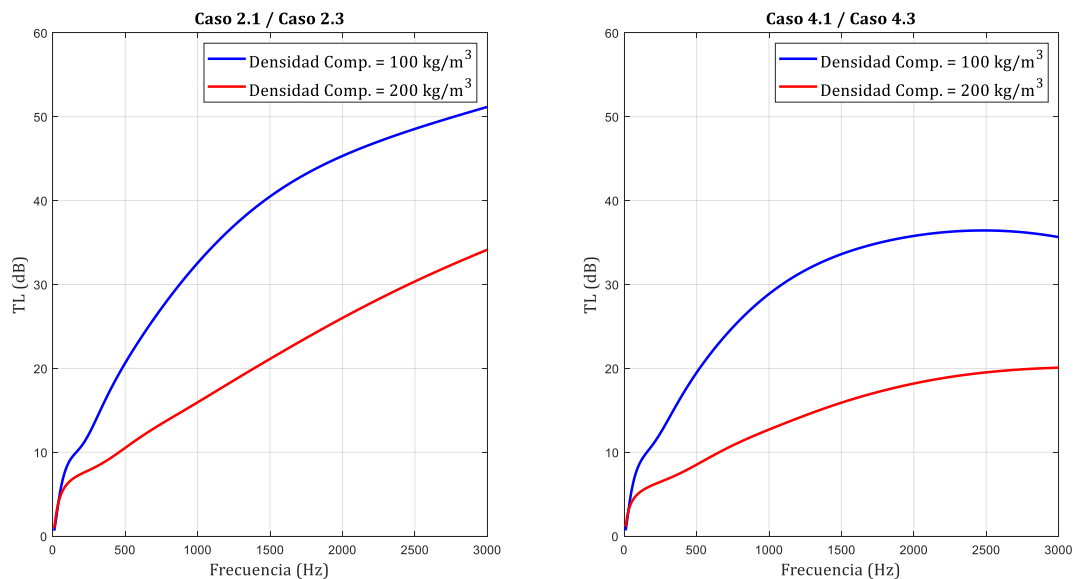


Figura 63. Efecto de la Densidad de Compactación de la Fibra. Gradiente Térmico.

A la izquierda se presenta los casos 2.1 y 2.3 en los cuales no existe la presencia de conducto perforado, mientras que a la derecha se presenta los casos 4.1 y 4.3 en los que, si existe conducto perforado, en los cuatro casos la longitud de la cámara disipativa es de 0.3 m.

Al estar trabajando con un gradiente térmico de 600 – 300 °C, la pérdida de transmisión disminuye con una densidad de compactación de la fibra mayor, sobre todo a medias y altas frecuencias, ya que, para frecuencias muy pequeñas, por debajo de los 200 Hz, no existe mayor diferencia entre las pérdidas de transmisión de cada comparación.



Es muy notorio la mayor resistividad del material absorbente cuando la densidad de compactación de la fibra aumenta, sobre todo para la figura de la izquierda para la cual desde los 500 *Hz* representa un comportamiento casi lineal.



Capítulo 6

CONCLUSIONES

En el presente Trabajo Fin de Máster se ha desarrollado e implementado una metodología numérica completa para la modelización y análisis del comportamiento acústico de silenciadores disipativos con conducto perforado en presencia de altas temperaturas y gradientes térmicos. Para ello, se ha recurrido al programa comercial de elementos finitos Ansys, en sus versiones APDL y Workbench. Ha sido necesario llevar a cabo una revisión bibliográfica exhaustiva centrada en modelos acústicos de silenciadores, así como en materiales absorbentes y su comportamiento en función de la temperatura. Una vez desarrolladas, implementadas y validadas las metodologías a seguir en Ansys APDL y Workbench, se ha procedido a estudiar de forma exhaustiva multitud de configuraciones de diseño, analizando en detalle el efecto en la atenuación del campo de temperatura y su gradiente, la presencia de conducto perforado, la longitud de la cámara disipativa, la densidad de compactación de la fibra y el número de segmentos (con temperatura uniforme) utilizados en la modelización. Esto ha permitido establecer algunas directrices básicas de cálculo y diseño acústico.

6.1 APDL ANSYS WORKBENCH

Con las metodologías desarrolladas, ha sido posible modelar con éxito el comportamiento acústico de silenciadores disipativos en presencia de altas temperaturas y gradientes térmicos mediante ambos softwares, Ansys Workbench y APDL.

Se han realizado todas las simulaciones correspondientes a los casos presentados en la tabla 2, teniendo en cuenta que para los casos en los que existe gradiente térmico se ha dividido la parte central del silenciador en 4 segmentos para todos los casos correspondientes. En las simulaciones llevadas a cabo se han obtenido resultados idénticos con ambos programas, Ansys APDL y Ansys Workbench. Aparte de los resultados mostrados en el capítulo 5, se proporciona más información en los anexos.

El modelado en Ansys Workbench presenta la ventaja de tener un interfaz muy intuitiva y fácil de desarrollar el modelo 3D y el respectivo mallado, aunque poco práctico debido a que hay que ingresar demasiados datos correspondientes a los materiales, debido a que sus propiedades se han calculado con un software externo, por ejemplo MATLAB, más aún si se decide seccionar en muchos segmentos, también cabe recalcar que se debe hacer

un diseño para cada caso lo cual representa demasiado tiempo resultando no útil para futuras investigaciones.

APDL presenta la ventaja de trabajar con macros, haciendo posible automatizar varios procesos tanto de cálculo como de modelización de componentes gracias al uso de bucles y de esta manera simular infinidad de casos ya que dichas macros poseen datos de entrada que se pueden acoplar a las necesidades del usuario, es por esto resulta muy ventajoso el uso de APDL ante Ansys Workbench.

Otra ventaja que presenta APDL es que, al momento de realizar la malla, esta se pudo definir en base a un tamaño mínimo de refinamiento y es muy fácil asegurarse de la continuidad de los elementos a través de los volúmenes mientras que en Ansys Workbench se necesita definir detalladamente cada componente para conseguir una correcta continuidad en el modelo, además de que el tamaño de elementos se debe encontrar tras varias simulaciones.

6.2 TEMPERATURAS UNIFORMES Y GRADIENTES TÉRMICOS

En las secciones 5.1 y 5.3 se presentan análisis con temperaturas uniformes, que como se puede observar resulta muy extenso y por lo tanto mucho coste computacional realizar todas esas simulaciones, además, en la vida real esto no representa casos reales, debido a que por lo general al inicio del silenciador se presentan los gases provenientes de la combustión del motor, lo que genera que las temperaturas a la entrada sean muy elevadas, mientras que a la salida sean muy inferiores, resultando los casos presentados en las secciones 5.2 y 5.4 los más convenientes de analizar debido a que el gradiente térmico se acerca más a la realidad. Sin embargo, es interesante analizar el funcionamiento del silenciador con el cambio de temperatura, en donde, en la mayoría de los casos que se presentan, la pérdida de transmisión disminuye a medida que la temperatura aumenta en el rango de frecuencias estudiado. Esto se debe al aumento de la resistividad de la fibra con la temperatura, lo cual origina un efecto de saturación. A frecuencias mayores de las estudiadas aquí, mayor temperatura puede implicar mayor TL, como se ha descrito en algunas publicaciones científicas.

Como se ha mostrado en los casos 2.1, 2.2, 4.1 y 4.2 resultan muy similares los resultados a aquellos que se analizan con las mismas condiciones de entrada a una temperatura media

de funcionamiento de 250°C para el silenciador disipativo sin conducto perforado y de 350°C para el silenciador con conducto perforado.

La macro realizada para los casos 5.2 y 5.4 presentan mayor complejidad frente a la macro realizada para los casos 5.1 y 5.3 al tener que considerar varios segmentos para los conductos interiores, conductos perforados y cámara disipativa. Sin embargo, una vez realizada es muy útil debido a que únicamente se necesita la definición de número de segmentos y datos de entrada para la simulación de cada caso obteniendo así resultados acercados más a la realidad y por lo tanto más confiables.

6.3 EFECTO DEL CONDUCTO PERFORADO, LONGITUD DE CÁMARA DISIPATIVA Y DENSIDAD DE COMPACTACIÓN DE LA FIBRA

El uso del conducto perforado en el silenciador ayuda a proteger la capa absorbente de la cámara disipativa, evitando que impurezas grandes traspasen desde el conducto interior o que la fibra sea arrastrada fuera del silenciador, hacia el medio ambiente. Sin embargo, como se puede ver en la sección 5.9, al utilizar conducto perforado la pérdida de transmisión de los silenciadores se ve reducida, sobre todo a medias y altas frecuencias, dependiendo del valor de porosidad con el que se trabaje, que para el presente proyecto es de 10%, la pérdida de transmisión se ve afectada debido a que la cámara disipativa no está absorbiendo la energía de todo el aire que ingresa al silenciador sino únicamente del aire que logra pasar por los orificios del conducto perforado.

En la sección 5.10 la reducción de la longitud de la cámara disipativa ha producido que la pérdida de transmisión disminuya tanto a bajas como a altas frecuencias. Esto debido a que se tiene una menor cantidad de material fonoabsorbente, reduciendo la capacidad de absorber energía del aire entrante, provocando una menor eficiencia del silenciador.

Como se puede observar en la sección 5.11 a niveles de frecuencia muy bajas, la densidad de compactación de la fibra permite un aumento de la pérdida de transmisión únicamente para bajas temperaturas, temperaturas en “estado frío” prácticamente, se puede concluir que para temperaturas mayores a 200 °C, una mayor densidad de compactación de la fibra causaría una menor pérdida de transmisión causando un funcionamiento deficiente del silenciador. Mas aun si se trata del silenciador con conducto perforado, porque la

temperatura a la que la pérdida de transmisión comienza a reducir es mucho menor que 200 °C. El motivo es similar al explicado antes para la temperatura: el aumento de densidad de compactación origina un aumento de la resistividad de la fibra, lo cual produce un efecto de saturación. A frecuencias mayores de las estudiadas aquí, mayor densidad de compactación puede implicar mayor TL, como se ha descrito en algunas publicaciones científicas.

Una mayor densidad de compactación produce mayor resistividad en el material fonoabsorbente, más aún a altas temperaturas, por lo que el efecto de amortiguamiento del silenciador se ve incrementado, eliminando por completo los picos de atenuación.

6.4 NÚMERO DE SEGMENTOS

La reducción de número de segmentos para las simulaciones representa un menor coste computacional tanto en APDL, debido a que el tiempo de cálculo de propiedades y la generación de volúmenes se reduce, y en Ansys Workbench sobre todo representa una mayor ventaja ya que al tener menores segmentos se tiene una menor cantidad de temperaturas y por lo tanto menor cantidad de materiales que introducir reduciendo en gran medida el tiempo de configuración de las propiedades. También se reduce el tiempo de mallado debido a que se planteaba configurar uno por uno los volúmenes, al tener menos segmentos se tienen menos volúmenes. Se ha comprobado que, con los gradientes térmicos utilizados en este TFM, dos segmentos permiten obtener una precisión suficiente en los resultados.

6.5 TRABAJOS FUTUROS

Tras realizar este trabajo de fin de máster, se pretende dejar algunas directrices para los futuros proyectos enfocados al análisis de silenciadores disipativos.

Sería interesante incluir efectos adicionales como la presencia de flujo medio. Además, los trabajos futuros podrían implicar la posibilidad de utilizar las macros realizadas en el presente proyecto, las cuales abren las puertas a infinidad de casos en los cuales se puede analizar silenciadores disipativos con diferente longitud de cámara disipativa al igual que diferente densidad de compactación de la fibra o conducto perforado si se desea o no. De igual manera se puede analizar con otro material absorbente simplemente modificando los coeficientes característicos de cada material.



Es interesante buscar un método alternativo al presentado en el presente proyecto para la modelización y análisis en Ansys Workbench, ya que el método expuesto ha resultado muy largo y poco útil si se tiene en cuenta que los casos de estudio fueron muy extensos y por lo tanto se necesitó desarrollar varios diseños dentro de la interfaz de Ansys Workbench.

REFERENCIAS

- Bento, J. (1983). *Acoustic characteristics of perforate liners in expansion chambers*. Southampton: University of Southampton.
- Cheng, G. (2012). *Vehicle noise, vibration and sound quality*. Pennsylvania: Warrendale.
- Denia, F. D. (2019). *Fenómenos de Propagación*. Valencia: Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales.
- Denia, F. D. (2019). *La Ecuación de Ondas*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Denia, F. D., Martínez, J., Baeza, L., & Fuenmayor, F. (2012). Acoustic modelling of exhaust devices with nonconforming finite element meshes and transfer matrices. *Applied Acoustics*, 713-722.
- Denia, F. D., Sánchez, E., Martínez, J., & Kirby, R. (2015). Finite element based acoustic analysis of dissipative silencers with high temperature and thermal-induced heterogeneity. *Finite Elements in Analysis and Design*, 46-57.
- Denia, F. D., Selamet, A., Fuenmayor, F., & Kirby, R. (2007). Acoustic attenuation performance of perforated dissipative mufflers with empty inlet/outlet extensions. *Journal of Sound and Vibration*, 1000-1017.
- Martínez, M. (2010). *Modelado analítico numérico y caracterización experimental de silenciadores de escape híbridos*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Munjal, M. L. (2014). *Acoustics of Ducts and Mufflers*. Bangalore: John Wiley & Sons, Inc.
- Munuera, P. (2019). *Desarrollo e implementación de una metodología de caracterización del comportamiento acústico de silenciadores reactivos y disipativos mediante Ansys Workbench*. Valencia: Universitat Politècnica de València.
- Pacheco, J., Franco, J., & Behrentz, E. (2009). *Caracterización de los niveles de contaminación auditiva en Bogotá: Estudio piloto*. Bogotá: Universidad de los Andes.



Pérez, D. (2012). *Modelado Acústico de Silenciadores*. Sevilla: Universidad de Sevilla.

ANEXOS

7.1 MACRO DE APDL PARA SILENCIADOR DISIPATIVO SIN CONDUCTO PERFORADO Y TEMPERATURA UNIFORME

```
/title, Pérdida de Transmisión (dB) de Silenciador Disipativo
! No se incluye presencia de conducto perforado
/prep7
/view,1,1,1,1
! *****
! Cálculo de propiedades del aire. Modelo de gas perfecto
! *****
Temp=550          ! Temperatura de trabajo del aire (°C)
R=8.314           ! Constante de gas perfecto (J/K mol)  K==kelvin
Mm=0.02897       ! Masa molar del aire (kg/mol)
Patm=101325      ! Presión (Pa)
gamma=1.4        ! Cociente de calores específicos
!
rho0=Patm*Mm/(R*(Temp+273.15))  ! Densidad del aire (kg/m^3)
c0=sqrt(gamma*R*(Temp+273.15)/Mm)  ! Velocidad del sonido (m/s)
z0=rho0*c0          ! Impedancia característica (rayl)
! *****
! Cálculo de propiedades del material absorbente
! *****
! Modelo con impedancia Zabs y constante de propagación Gammaabs
! Real(Zabs) = rho0*c0*(1+a5*(f*rho0/resis)**a6)
! Imag(Zabs) = -rho0*c0*a7*(f*rho0/resis)**a8
! Real(Gammaabs) = w/c0*a1*(f*rho0/resis)**a2          ! Modelo con constante de propagación;
w=2*pi*f
! Imag(Gammaabs) = w/c0*(1+a3*(f*rho0/resis)**a4)      ! Modelo con constante de propagación;
w=2*pi*f
!
rho_compac=100    ! Densidad de compactación de la fibra (kg/m^3). Se utiliza para todas las
fibras en general, salvo Delany y Bazley
!
! Lana de basalto
A1=3.012          ! Coeficientes para el cálculo de la resistividad
A2=1.761
resis0=A1*rho_compac**A2  ! Resistividad a temperatura de referencia (falta calcular su valor final a
la temperatura de trabajo)
a1=0.2178
a2=-0.6051
a3=0.1281
a4=-0.6746
a5=0.0599
a6=-0.7664
a7=0.1376
```



```
a8=-0.6276
! *****
! Cálculo de resistividad final a la temperatura de trabajo
! *****
Tref=15                ! Temperatura de referencia para resis0 (°C)
resis=resis0*((Temp+273.15)/(Tref+273.15))**0.6    ! Ecuación de Christie. Se toma Tref = 15°C (en
general no coincidirá con Temp)
! *****
! Tipo de elemento
! Propiedades del aire
! Propiedades del material absorbente: barrido en frecuencia
! *****
et,1,221,,1          ! Tetraedro acústico de 10 nodos (interpolación cuadrática). No acoplado
! Aire (material 1)
mp,dens,1,rho0      ! Material (regiones de aire)
mp,sonc,1,c0
!
! Material absorbente (material 2)
mp,dens,2,rho0      ! Aire en los poros del material absorbente
mp,sonc,2,c0
!
f_fin=3000          ! Máxima frecuencia de cálculo (Hz)
f_ini=10            ! Frecuencia inicial
deltaf=10           ! Incremento de frecuencia
!
! Modelo de Ansys de impedancia compleja y constante de propagación
!
Nfrec=(f_fin-f_ini)/deltaf+1 ! Número de frecuencias de cálculo
tb,perf,2,,,zpro    ! Material 2. Modelo de impedancia compleja y constante de propagación (zpro)
!
! Barrido en frecuencia para cálculo de propiedades de material 2
!
pi=3.141592653589793 ! Valor numérico de Pi
*DO,I,1,Nfrec,1
frequ=f_ini+(I-1)*deltaf
w=2*pi*frequ
Real_Zabs=rho0*c0*(1+a5*(frequ*rho0/resis)**a6)
Imag_Zabs=-rho0*c0*a7*(frequ*rho0/resis)**a8
Real_Gammaabs=w/c0*(1+a3*(frequ*rho0/resis)**a4)
Imag_Gammaabs=-w/c0*a1*(frequ*rho0/resis)**a2
!
tbfield,freq,frequ          ! Tabla en función de la frecuencia
tbdata,1,Real_Zabs,Imag_Zabs,Real_Gammaabs,Imag_Gammaabs ! Parámetros del modelo ZPRO a
cada frecuencia frequ
*ENDDO
! *****
! Modelo geométrico, condiciones de contorno, mallado, etc.
! *****
!
```



```
! Condiciones de excitación en sección de entrada
p=1          ! Excitación en sección de entrada. Se puede poner otro valor. Lo hace bien
igualmente
vn=-p/(rho0*c0)  ! Valor de velocidad normal de excitación a partir de presión (entrada anecoica).
Se hace así para
              ! facilitar descomposición de ondas progresiva y regresiva y cálculo del TL
!
! Modelo sólido
!
rduct=0.0268    ! Conducto de entrada, central y salida
lduct=0.1
!
rchamb=0.091875 ! Cámara central disipativa
lchamb=0.3
!
! Volúmenes (se crea mitad estética; también valdría un cuarto o cualquier ángulo, por axisimetría del
modelo)
!
cylind,0,rduct,0,lduct,0,180          ! Conducto de entrada, central y salida
cylind,0,rduct,lduct,lduct+lchamb,0,180
cylind,0,rduct,lduct+lchamb,2*lduct+lchamb,0,180
!
cylind,rduct,rchamb,lduct,lduct+lchamb,0,180  ! Cámara con material absorbente
!
vsel,all
vglue,all          ! Pegado de volúmenes para conseguir dominio continuo
numcmp,all        ! Compresión de numeración
!
              ! Mallado de volúmenes
lambda=c0/f_fin    ! Mínima longitud de onda (a frecuencia máxima)
h=lambda/10        ! 10 elementos por (mínima) longitud de onda (refinar para obtener mayor
precisión)
esize,h
! Conducto central de aire
type,1
mat,1
vsel,s,,1,3,1
vmesh,all
vsel,all
! Cámara exterior disipativa
mat,2
vsel,s,,4
vmesh,all
vsel,all
nummrg,all
eplot
!
! *****
!
```



```
nset,s,loc,z,0      ! Nodos en la sección de entrada
sf,all,port,1      ! Puerto de entrada del silenciador
!
! Las dos siguientes líneas permiten que se aplique una velocidad cuya parte progresiva
! tiene asociada la presión p definida arriba. Si no se hace así no funciona.
!
sf,all,shld,vn      ! Velocidad normal de excitación
sf,all,impd,z0      ! Condición de impedancia en la entrada
!
nset,s,loc,z,2*1duct+lchamb ! Nodos en la sección de salida
sf,all,port,2      ! Puerto de salida del silenciador
sf,all,inf          ! Radiación en la salida. Impedancia anecoica en la salida (no vuelve energía al
silenciador; necesario para obtener TL)
alls
finish
!
! *****
! Cálculo de solución
! *****
/solu
antype,harmic
hropt,auto
kbc,1
harf,0,f_fin
nsub,Nfrec          ! Frecuencias de cálculo especificadas antes
solve
finish
! post-processing
/post1
spower,1,2          ! Cálculo de potencia sonora (puertos 1 y 2: entrada y salida del silenciador)
plst,Disipativo_sin_conducto0102,a2p,tl ! TL - pérdida de transmisión
finish
```

7.2 MACRO DE APDL PARA SILENCIADOR DISIPATIVO SIN CONDUCTO PERFORADO Y GRADIENTE TÉRMICO

```
/title, Pérdida de Transmisión (dB) de Silenciador Disipativo
! No se incluye presencia de conducto perforado
!
/prep7
/view,1,1,1,1
! *****
! Cálculo de propiedades del aire. Modelo de gas perfecto
! *****
R=8.314          ! Constante de gas perfecto (J/K mol)  K==kelvin
Mm=0.02897      ! Masa molar del aire (kg/mol)
Patm=101325     ! Presión (Pa)
gamma=1.4       ! Cociente de calores específicos
!
rho_compac=200  ! Densidad de compactación de la fibra (kg/m^3). Se utiliza para todas las
                ! fibras en general, salvo Delany y Bazley
! *****
! Características del Material
! Lana de basalto
!
a1=0.2178
a2=-0.6051
a3=0.1281
a4=-0.6746
a5=0.0599
a6=-0.7664
a7=0.1376
a8=-0.6276
!
AA1=3.012       ! Coeficientes para el cálculo de la resistividad
AA2=1.761
resis0=AA1*rho_compac**AA2 ! Resistividad a temperatura de referencia (falta calcular su valor final
a la temperatura de trabajo)
! *****
! DATOS DE ENTRADA
rduct=0.0268    ! Radio de conducto de entrada, central y salida
lduct=0.1       ! Longitud de conductos exteriores
rchamb=0.091875 ! Cámara central disipativa
lchamb=0.3     ! Longitud de la cámara central disipativa
Temp_e=600     ! Temperatura de entrada al silenciador
Temp_s=300     ! Temperatura de salida al medioambiente
n_seg=4        ! Número de segmentos de la cámara disipativa
! *****
! Modelo de Ansys de impedancia compleja y constante de propagación
f_fin=3000     ! Máxima frecuencia de cálculo (Hz)
f_ini=10       ! Frecuencia inicial
```




```
deltaf=130          ! Incremento de frecuencia
Nfrec=(f_fin-f_ini)/deltaf+1 ! Número de frecuencias de cálculo
!
pi=3.141592653589793    ! Valor numérico de Pi
Tref=15                ! Temperatura de referencia para resis0 (°C)

! Propiedades de los tubos de entrada y salida
Lme=lduct/2
                                ! Longitud media del tubo de entrada
T_e_1=Temp_e+Lme*((Temp_s-Temp_e)/(2*lduct+lchamb))
                                ! Temperatura en la longitud media del conducto de entrada
rho0_e_1=Patm*Mm/(R*(T_e_1+273.15))
                                ! Densidad del aire (kg/m^3)
c0_e_1=sqrt(gamma*R*(T_e_1+273.15)/Mm)
                                ! Velocidad del sonido (m/s)
et,1,221,,1
                                ! Tetraedro acústico de 10 nodos (interpolación cuadrática). No acoplado
mp,dens,1,rho0_e_1
                                ! Material (regiones de aire)
mp,sonc,1,c0_e_1

Lms=lduct+lchamb+lduct/2
                                ! Longitud media del tubo de salida
T_e_2=Temp_e+Lms*((Temp_s-Temp_e)/(2*lduct+lchamb))
                                ! Temperatura en la longitud media del conducto de salida
rho0_e_2=Patm*Mm/(R*(T_e_2+273.15))
                                ! Densidad del aire (kg/m^3)
c0_e_2=sqrt(gamma*R*(T_e_2+273.15)/Mm)
                                ! Velocidad del sonido (m/s)
mp,dens,2,rho0_e_2
                                ! Material (regiones de aire)
mp,sonc,2,c0_e_2

n1=3
*DO,I,1,n_seg,1
    Lc=lduct+lchamb*(1-0.5)/n_seg
    Temp_c=Temp_e+Lc*((Temp_s-Temp_e)/(2*lduct+lchamb))
                                ! Temperatura en la longitud media de cada segmento de la camara disipativa
    rho0_c=Patm*Mm/(R*(Temp_c+273.15))
                                ! Densidad del aire (kg/m^3)
    c0_c=sqrt(gamma*R*(Temp_c+273.15)/Mm)
                                ! Velocidad del sonido (m/s)
    mp,dens,n1,rho0_c
                                ! Material para los segmentos del conducto interior
    mp,sonc,n1,c0_c
    n1=n1+1
*ENDDO

*DO,J,1,n_seg,1
```



```
Lc=lduct+lchamb*(J-0.5)/n_seg
Temp_c=Temp_e+Lc*((Temp_s-Temp_e)/(2*lduct+lchamb))
    ! Temperatura en la longitud media de cada segmento de la camara disipativa
rho0_c=Patm*Mm/(R*(Temp_c+273.15))
    ! Densidad del aire (kg/m^3)
c0_c=sqrt(gamma*R*(Temp_c+273.15)/Mm)
    ! Velocidad del sonido (m/s)
mp,dens,n1,rho0_c
    ! Material para los segmentos de la camara disipativa (regiones de aire)
mp,sonc,n1,c0_c

resis=resis0*((Temp_c+273.15)/(Tref+273.15))**0.6           ! Ecuación de
Christie. Se toma Tref = 15°C (en general no coincidirá con Temp)
tb,perf,n1,,zpro
    ! Modelo de impedancia compleja y constante de propagación (zpro)
*DO,K,1,Nfrec,1
    frequ=f_ini+(K-1)*deltaf
    w=2*pi*frequ
    Real_Zabs=rho0_c*c0_c*(1+a5*(frequ*rho0_c/resis)**a6)
    Imag_Zabs=-rho0_c*c0_c*a7*(frequ*rho0_c/resis)**a8
    Real_Gammaabs=w/c0_c*a1*(frequ*rho0_c/resis)**a2
    Imag_Gammaabs=w/c0_c*(1+a3*(frequ*rho0_c/resis)**a4)
    tbfield,freq,frequ           ! Tabla en función de la frecuencia
    tbdata,1,Real_Zabs,Imag_Zabs,Real_Gammaabs,Imag_Gammaabs  ! Parámetros del
modelo ZPRO a cada frecuencia frequ
*ENDDO
n1=n1+1
*ENDDO

! *****
! Modelo geométrico, condiciones de contorno, mallado, etc.
! *****
! Volúmenes (se crea mitad estética; también valdría un cuarto o cualquier ángulo, por axisimetría del
modelo)
!
cylind,0,rduct,0,lduct,0,180           ! Conducto de entrada
cylind,0,rduct,lduct+lchamb,2*lduct+lchamb,0,180           ! Conducto de salida
vsel,all

*DO,L,1,n_seg,1
    X1=lduct+lchamb*(L-1)/n_seg
    X2=lduct+lchamb*(L)/n_seg
    cylind,0,rduct,X1,X2,0,180
    ! Creación de los volúmenes del cilindro interior
*ENDDO
vsel,all
vglue,all           ! Pegado de volúmenes para conseguir dominio continuo
numcmp,all           ! Compresión de numeración
```



```
*DO,M,1,n_seg,1
  X1=lduct+lchamb*(M-1)/n_seg
  X2=lduct+lchamb*(M)/n_seg
  cylind,rduct,rchamb,X1,X2,0,180
Creación de los volúmenes de la Cámara con material absorbente
*ENDDO

vsel,all
vglue,all      ! Pegado de volúmenes para conseguir dominio continuo
numcmp,all     ! Compresión de numeración

! Mallado de volúmenes
! Se ha considerado que para que sea lo más refinado posible el valor de lambda debe ser mínimo, por
lo que el valor de c0 debe ser mínimo
! El mínimo valor de c0 se encuentra a menor temperatura por lo que se toma en cuenta el valor al final
de la cámara disipativa.
Lmm=lchamb+lduct
                                ! Longitud hasta el final de la cámara disipativa
T_m=Temp_e+Lmm*((Temp_s-Temp_e)/(2*lduct+lchamb))
  ! Temperatura a la salida de la camara
c0_m=sqrt(gamma*R*(T_m+273.15)/Mm)
                                ! Velocidad del sonido (m/s)
lambda=c0_m/f_fin
                                ! Mínima longitud de onda (a frecuencia máxima)
h=lambda/15
                                ! 10 elementos por (mínima) longitud de onda (refinar para obtener mayor precisión)
esize,h

! Conducto exterior 1 de aire
type,1
mat,1
vsel,s,,,1
vmesh,all
vsel,all
! Conducto exterior 2 de aire
mat,2
vsel,s,,,2
vmesh,all
vsel,all

n1=3
*DO,N,1,n_seg,1
! Segmentos del conducto interior
  mat,n1
  X1=lduct+lchamb*(N-1)/n_seg
  X2=lduct+lchamb*(N)/n_seg
  vsel,s,,,3,n_seg+2
  vsel,r,loc,z,X1,X2
  vmesh,all
```



```
vsel,all
n1=n1+1
*ENDDO
*DO,O,1,n_seg,1
! Segmentos de la cámara disipativa
mat,n1
X1=lduct+lchamb*(O-1)/n_seg
X2=lduct+lchamb*(O)/n_seg
vsel,s,,,n_seg+3,2*n_seg+2
vsel,r,loc,z,X1,X2
vmesh,all
vsel,all
n1=n1+1
*ENDDO
nummrg,all
eplot

! *****
! Condiciones de excitación en sección de entrada
z0_e=rho0_e_1*c0_e_1      ! Impedancia característica en la entrada(rayl)
p=1      ! Excitación en sección de entrada. Se puede poner otro valor. Lo hace bien igualmente
vn=-p/(rho0_e_1*c0_e_1)  ! Valor de velocidad normal de excitación a partir de presión (entrada
anecoica). Se hace así para
! facilitar descomposición de ondas progresiva y regresiva y cálculo del TL
!

nset,s,loc,z,0      ! Nodos en la sección de entrada
sf,all,port,1      ! Puerto de entrada del silenciador
!
! Las dos siguientes líneas permiten que se aplique una velocidad cuya parte progresiva
! tiene asociada la presión p definida arriba. Si no se hace así no funciona.
!
sf,all,shld,vn      ! Velocidad normal de excitación
sf,all,impd,z0_e    ! Condición de impedancia en la entrada
!
nset,s,loc,z,2*lduct+lchamb ! Nodos en la sección de salida
sf,all,port,2      ! Puerto de salida del silenciador
sf,all,inf      ! Radiación en la salida. Impedancia anecoica en la salida (no vuelve energía al
silenciador; necesario para obtener TL)
alls
finish
!
!
! *****
! Cálculo de solución
! *****
/solu
antype,harmic
hropt,auto
```



```
kbc,1
harf,0,f_fin
nsub,Nfrec      ! Frecuencias de cálculo especificadas antes
solve
finish
! post-processing
/post1
spower,1,2      ! Cálculo de potencia sonora (puertos 1 y 2: entrada y salida del silenciador)
plst,Sin_cond_grad0102,a2p,tl  ! TL - pérdida de transmisión
finish
```

7.3 MACRO DE APDL PARA SILENCIADOR DISIPATIVO CON CONDUCTO PERFORADO Y TEMPERATURA UNIFORME

```
/title, Pérdida de Transmisión (dB) de Silenciador Disipativo con Conducto Perforado
! Se incluye presencia de conducto perforado
!
/prep7
/view,1,1,1,1
! *****
! Cálculo de propiedades del aire. Modelo de gas perfecto
! *****
Temp=550          ! Temperatura de trabajo del aire (°C)
R=8.314           ! Constante de gas perfecto (J/K mol) K==kelvin
Mm=0.02897       ! Masa molar del aire (kg/mol)
Patm=101325      ! Presión (Pa)
gamma=1.4        ! Cociente de calores específicos
!
rho0=Patm*Mm/(R*(Temp+273.15)) ! Densidad del aire (kg/m^3)
c0=sqrt(gamma*R*(Temp+273.15)/Mm) ! Velocidad del sonido (m/s)
z0=rho0*c0       ! Impedancia característica (rayl)
!
! *****
! Parámetros asociados al conducto perforado para el cálculo
! de su impedancia acústica
! *****
dori=0.0035      ! Diámetro de orificios
espe=0.001       ! Espesor real del conducto (no coincide con la variable "espesor" que se utiliza
para mallar)
poro=0.1         ! Porosidad en tanto por uno
!
raizporo=sqrt(poro) ! Cálculo de factor de interacción de orificios
Ingard=1-0.7*raizporo
Fok=1-1.41*raizporo+0.34*raizporo**3+0.07*raizporo**5
mean_IngardFok=0.5*(Ingard+Fok)
!
! *****
! Cálculo de propiedades del material absorbente (parte inicial; el cálculo dependiente de la frecuencia
está más adelante)
! *****
rho_compac=200   ! Densidad de compactación de la fibra (kg/m^3). Se utiliza para todas las
fibras en general, salvo Delany y Bazley
! Lana de basalto
AA1=3.012        ! Coeficientes para el cálculo de la resistividad
AA2=1.761
resis0=AA1*rho_compac**AA2 ! Resistividad a temperatura de referencia (falta calcular su valor final
a la temperatura de trabajo)
a1=0.2178
a2=-0.6051
a3=0.1281
```



```
a4=-0.6746
a5=0.0599
a6=-0.7664
a7=0.1376
a8=-0.6276
! *****
! Cálculo de resistividad final a la temperatura de trabajo
! *****
Tref=15                ! Temperatura de referencia para resis0 (°C)
resis=resis0*((Temp+273.15)/(Tref+273.15))*0.6    ! Ecuación de Christie. Se toma Tref = 15°C (en
general no coincidirá con Temp)
!
! *****
! Tipo de elemento
! Propiedades del aire
! Propiedades del material absorbente: barrido en frecuencia
! *****
!
et,1,221,,1          ! Tetraedro acústico de 10 nodos (interpolación cuadrática). No acoplado
! Aire (material 1)
mp,dens,1,rho0      ! Material (regiones de aire)
mp,sonc,1,c0

! Material absorbente (material 2)
mp,dens,2,rho0      ! Aire en los poros del material absorbente
mp,sonc,2,c0

! Conducto perforado
et,2,220,,1          ! La matriz de transferencia/admitancia de Ansys del conducto perforado solamente
admite hexaedros y prismas
! Aire (material 3)
mp,dens,3,rho0      ! Aire en los orificios. La impedancia Zperf en función de la frecuencia se define
más adelante
mp,sonc,3,c0

f_fin=3000           ! Máxima frecuencia de cálculo (Hz)
f_ini=10             ! Frecuencia inicial
deltaf=10            ! Incremento de frecuencia
!
! Modelo de Ansys de impedancia compleja y constante de propagación
!
Nfrec=(f_fin-f_ini)/deltaf+1 ! Número de frecuencias de cálculo
tb,perf,2,,,zpro     ! Material 2. Modelo de impedancia compleja y constante de propagación (zpro)
!
! Barrido en frecuencia para cálculo de propiedades de material 2
!
pi=3.141592653589793 ! Valor numérico de Pi
*DO,I,1,Nfrec,1
    frequ=f_ini+(I-1)*deltaf
```



```
w=2*pi*frequ
Real_Zabs=rho0*c0*(1+a5*(frequ*rho0/resis)**a6)
Imag_Zabs=-rho0*c0*a7*(frequ*rho0/resis)**a8
Real_Gammaabs=w/c0*a1*(frequ*rho0/resis)**a2
Imag_Gammaabs=w/c0*(1+a3*(frequ*rho0/resis)**a4)
!
tbfield,freq,frequ          ! Tabla en función de la frecuencia
tbdata,1,Real_Zabs,Imag_Zabs,Real_Gammaabs,Imag_Gammaabs  ! Parámetros del modelo
ZPRO a cada frecuencia frequ
*ENDDO
!
! *****
! *****
!
! Superficie perforada que conecta tubo central de aire con cámara externa con material absorbente
! Ver ecuación general. La impedancia depende de la porosidad, el espesor, el diámetro de orificio,
! la frecuencia, las propiedades del material absorbente contiguo y la interacción entre orificios
! *****
! Barrido en frecuencia para cálculo de impedancia del conducto perforado
! Modelo de Ansys para impedancia de conducto perforado (matriz de admitancias)
! Por la forma de generar tablas de Ansys, parece que hay que hacerlo aparte del barrido anterior

tb,perf,3,,,ymat          ! Matriz de admitancias
!
*DO,I,1,Nfrec,1
    frequ=f_ini+(I-1)*deltaf
    w=2*pi*frequ
    !
    ! Material absorbente (repetido)
    !
    Real_Zabs=rho0*c0*(1+a5*(frequ*rho0/resis)**a6)
    Imag_Zabs=-rho0*c0*a7*(frequ*rho0/resis)**a8
    Real_Gammaabs=w/c0*a1*(frequ*rho0/resis)**a2
    Imag_Gammaabs=w/c0*(1+a3*(frequ*rho0/resis)**a4)
    !
    ! Superficie perforada
    !
    Real_Zperf=rho0*c0*0.006/poro+0.425*dori*mean_IngardFok*(Real_Zabs*Real_Gammaabs-Imag_Zabs*Imag_Gammaabs)/poro
    !
    Imag_Zperf=rho0*w*espe/poro+rho0*w*0.425*dori*mean_IngardFok/poro+0.425*dori*mean_IngardFok*(Real_Zabs*Imag_Gammaabs+Imag_Zabs*Real_Gammaabs)/poro
    ! Error de Ansys por tener demasiados términos
    Imag_Zperf1=rho0*w*espe/poro+rho0*w*0.425*dori*mean_IngardFok/poro
    Imag_Zperf2=0.425*dori*mean_IngardFok*(Real_Zabs*Imag_Gammaabs+Imag_Zabs*Real_Gammaabs)/poro
    Imag_Zperf=Imag_Zperf1+Imag_Zperf2
    !
    Modulo_Zperf2=Real_Zperf**2+Imag_Zperf**2
```




```
y11r=Real_Zperf/Modulo_Zperf2
y11i=-Imag_Zperf/Modulo_Zperf2
y12r=-Real_Zperf/Modulo_Zperf2
y12i=Imag_Zperf/Modulo_Zperf2
y21r=-Real_Zperf/Modulo_Zperf2
y21i=Imag_Zperf/Modulo_Zperf2
y22r=Real_Zperf/Modulo_Zperf2
y22i=-Imag_Zperf/Modulo_Zperf2
!
tbfield,freq,frequ          ! Tabla en función de la frecuencia
tbdata,1,y11r,y11i,y12r,y12i,y21r,y21i      ! Parámetros del modelo YMAT a cada
frecuencia frequ
tbdata,7,y22r,y22i          ! Más parámetros (no caben en la tabla anterior)
*ENDDO
!
! *****
! *****
! Modelo geométrico, condiciones de contorno, mallado, etc.
! *****
!
! Condiciones de excitación en sección de entrada
p=1          ! Excitación en sección de entrada. Se puede poner otro valor. Lo hace bien
igualmente
vn=-p/(rho0*c0)  ! Valor de velocidad normal de excitación a partir de presión (entrada anecoica).
Se hace así para
              ! facilitar descomposición de ondas progresiva y regresiva y cálculo del TL
!
! Modelo sólido
!
rduct=0.0268    ! Conducto de entrada, central y salida
lduct=0.1
!
rchamb=0.091875 ! Cámara central disipativa
lchamb=0.3
!
espesor=0.0002 ! Espesor del elemento asociado al conducto perforado (Ansys requiere mallado
para aplicar la matriz de admitancias YMAT)
!
              ! Dicho espesor debe ser lo menor posible para que los resultados sean coherentes a
frecuencias bajas
!
              ! Buscar el menor valor que permite calcular. Si no calcula, aumentar el valor
ligeramente.
!
              ! No utilizar el espesor real del conducto (este valor, llamado espe, SÍ se ha utilizado
al calcular la impedancia del conducto perforado)
!
! Volúmenes (se crea mitad estética; también valdría un cuarto o cualquier ángulo, por axisimetría del
modelo)
!
cylind,0,rduct,0,lduct,0,180          ! Conducto de entrada, central y salida
cylind,0,rduct,lduct,lduct+lchamb,0,180
```



```
cylind,0,rduct,lduct+lchamb,2*lduct+lchamb,0,180
vsel,all
vglue,all
numcmp,all
! Mallado de volúmenes
lambda=c0/f_fin ! Mínima longitud de onda (a frecuencia máxima)
h=lambda/15 ! 10 elementos por (mínima) longitud de onda (refinar para obtener mayor
precisión)
esize,h
! Conducto central de aire
type,1
mat,1
vmesh,all
!
! Superficie perforada (extrusión radial a partir de la superficie externa de los conductos mallados antes)
!
type,2
mat,3
extopt,esize,1,0
extopt,aclear,0
voffst,8,espesor
!
! Cámara con material absorbente
!
cylind,rduct+espesor,rchamb,lduct,lduct+lchamb,0,180 ! Cámara con material absorbente
!
vsel,all
vglue,all ! Pegado de volúmenes para conseguir dominio continuo
numcmp,all ! Compresión de numeración
esize,h ! Mallado de la cámara externa con material absorbente
type,1
mat,2
vmesh,5
!
! *****
! Condiciones de contorno. Entrada y salida
!
nset,s,loc,z,0 ! Nodos en la sección de entrada
sf,all,port,1 ! Puerto de entrada del silenciador
!
! Las dos siguientes líneas permiten que se aplique una velocidad cuya parte progresiva
! tiene asociada la presión p definida arriba. Si no se hace así no funciona.
!
sf,all,shld,vn ! Velocidad normal de excitación
sf,all,impd,z0 ! Condición de impedancia en la entrada
!
nset,s,loc,z,2*lduct+lchamb ! Nodos en la sección de salida
sf,all,port,2 ! Puerto de salida del silenciador
```



```
sf,all,inf          ! Radiación en la salida. Impedancia anecoica en la salida (no vuelve energía al
silenciador; necesario para obtener TL)
alls
!
! *****
! Condiciones en superficie perforada. Matriz de admitancia
!
! Definición de puertos a conectar mediante matriz de admitancia (nodos a ambos
lados del conducto perforado)
esel,s,mat,,3
nsle,s
csys,1              ! Sistema de coordenadas cilíndricas
nrel,s,loc,x,rduct
nrel,r,loc,z,lduct,lduct+lchamb
sf,all,port,3      ! Puerto 1 (caras interiores)
nrel,s,loc,x,rduct+espesor
nrel,r,loc,z,lduct,lduct+lchamb
sf,all,port,4      ! Puerto 2 (caras exteriores)
alls
csys,0              ! Sistema de coordenadas cartesianas
finish
!
! *****
! Cálculo de solución
! *****
/solu
antype,harmic
hropt,auto
kbc,1
harf,0,f_fin
nsub,Nfrec          ! Frecuencias de cálculo especificadas antes
solve
finish
! post-processing
/post1
spower,1,2          ! Cálculo de potencia sonora (puertos 1 y 2: entrada y salida del silenciador)
plst,Disipativo_con_conducto0102,a2p,tl    ! TL - pérdida de transmisión
finish
```



7.4 MACRO DE APDL PARA SILENCIADOR DISIPATIVO CON CONDUCTO PERFORADO Y GRADIENTE TÉRMICO

```
/title, Pérdida de Transmisión (dB) de Silenciador Disipativo con Conducto Perforado
/prep7
/view,1,1,1,1
! *****
! Cálculo de propiedades del aire. Modelo de gas perfecto
! *****
R=8.314          ! Constante de gas perfecto (J/K mol) K==kelvin
Mm=0.02897      ! Masa molar del aire (kg/mol)
Patm=101325     ! Presión (Pa)
gamma=1.4       ! Cociente de calores específicos
rho_compac=100  ! Densidad de compactación de la fibra (kg/m^3).
! *****
! Parámetros asociados al conducto perforado para el cálculo
! de su impedancia acústica
! *****
dori=0.0035     ! Diámetro de orificios
espe=0.001     ! Espesor real del conducto
poro=0.1        ! Porosidad en tanto por uno
raizporo=sqrt(poro) ! Cálculo de factor de interacción de orificios
Ingard=1-0.7*raizporo
Fok=1-1.41*raizporo+0.34*raizporo**3+0.07*raizporo**5
mean_IngardFok=0.5*(Ingard+Fok)
! *****
! Características del Material
! Lana de basalto
a1=0.2178
a2=-0.6051
a3=0.1281
a4=-0.6746
a5=0.0599
a6=-0.7664
a7=0.1376
a8=-0.6276
AA1=3.012      ! Coeficientes para el cálculo de la resistividad
AA2=1.761
resis0=AA1*rho_compac**AA2 ! Resistividad a temperatura de referencia
! *****
! DATOS DE ENTRADA
rduct=0.0268   ! Radio de conducto de entrada, central y salida
lduct=0.1      ! Longitud de conductos exteriores
rchamb=0.091875 ! Cámara central disipativa
lchamb=0.3     ! Longitud de la cámara central disipativa
Temp_e=600    ! Temperatura de entrada al silenciador
Temp_s=300    ! Temperatura de salida al medioambiente
n_seg=4       ! Número de segmentos de la cámara disipativa
```



```
! *****
! Modelo de Ansys de impedancia compleja y constante de propagación
f_fin=3000      ! Máxima frecuencia de cálculo (Hz)
f_ini=10        ! Frecuencia inicial
deltaf=10      ! Incremento de frecuencia
Nfrec=(f_fin-f_ini)/deltaf+1 ! Número de frecuencias de cálculo
!
pi=3.141592653589793 ! Valor numérico de Pi
Tref=15        ! Temperatura de referencia para resis0 (°C)
! *****

et,1,221,,1      ! Tetraedro
acústico de 10 nodos
et,2,220,,1      ! Hexaedros y
prismas de 20 nodos
! Propiedades de los tubos de entrada
Lme=lduct/2
      ! Longitud media del tubo de entrada
T_e_1=Temp_e+Lme*((Temp_s-Temp_e)/(2*lduct+lchamb)) ! Temperatura
en la longitud media del conducto de entrada
rho0_e_1=Patm*Mm/(R*(T_e_1+273.15)) ! Densidad del
aire (kg/m^3)
c0_e_1=sqrt(gamma*R*(T_e_1+273.15)/Mm) ! Velocidad
del sonido (m/s)
mp,dens,1,rho0_e_1 ! Material
(regiones de aire)
mp,sonc,1,c0_e_1
! Propiedades de los tubos de salida
Lms=lduct+lchamb+lduct/2
      ! Longitud media del tubo de salida
T_e_2=Temp_e+Lms*((Temp_s-Temp_e)/(2*lduct+lchamb)) ! Temperatura
en la longitud media del conducto de salida
rho0_e_2=Patm*Mm/(R*(T_e_2+273.15)) ! Densidad del
aire (kg/m^3)
c0_e_2=sqrt(gamma*R*(T_e_2+273.15)/Mm) ! Velocidad
del sonido (m/s)
mp,dens,2,rho0_e_2 ! Material
(regiones de aire)
mp,sonc,2,c0_e_2

n1=3
! CONDUCTO INTERIOR
*DO,I,1,n_seg,1
      Lc=lduct+lchamb*(I-0.5)/n_seg
      Temp_c=Temp_e+Lc*((Temp_s-Temp_e)/(2*lduct+lchamb)) ! Temperatura
en la longitud media de cada segmento
      rho0_c=Patm*Mm/(R*(Temp_c+273.15)) ! Densidad del
aire (kg/m^3)
      c0_c=sqrt(gamma*R*(Temp_c+273.15)/Mm) ! Velocidad
del sonido (m/s)
```



```
mp,dens,n1,rho0_c ! Material para
los segmentos del conducto interior
mp,sonc,n1,c0_c
n1=n1+1
*ENDDO
! CONDUCTO PERFORADO
*DO,J,1,n_seg,1
Lc=lduct+lchamb*(J-0.5)/n_seg !
Longitud media de cada segmento
Temp_c=Temp_e+Lc*((Temp_s-Temp_e)/(2*lduct+lchamb)) ! Temperatura
en cada segmento
rho0_c=Patm*Mm/(R*(Temp_c+273.15)) ! Densidad del
aire (kg/m^3)
c0_c=sqrt(gamma*R*(Temp_c+273.15)/Mm) ! Velocidad
del sonido (m/s)
mp,dens,n1,rho0_c ! Material para
cada segmento(regiones de aire)
mp,sonc,n1,c0_c
resis=resis0*((Temp_c+273.15)/(Tref+273.15))**0.6 ! Ecuación de Christie. Se toma Tref
= 15°C
tb,perf,n1,,ymat ! Modelo de la
matriz de admitancia
*DO,K,1,Nfrec,1
frequ=f_ini+(K-1)*deltaf
w=2*pi*frequ
! Material absorbente (repetido)
Real_Zabs=rho0_c*c0_c*(1+a5*(frequ*rho0_c/resis)**a6)
Imag_Zabs=-rho0_c*c0_c*a7*(frequ*rho0_c/resis)**a8
Real_Gammaabs=w/c0_c*a1*(frequ*rho0_c/resis)**a2
Imag_Gammaabs=w/c0_c*(1+a3*(frequ*rho0_c/resis)**a4)
! Superficie perforada

Real_Zperf=rho0_c*c0_c*0.006/poro+0.425*dori*mean_IngardFok*(Real_Zabs*Real_Gam
maabs-Imag_Zabs*Imag_Gammaabs)/poro
Imag_Zperf1=rho0_c*w*espe/poro+rho0_c*w*0.425*dori*mean_IngardFok/poro

Imag_Zperf2=0.425*dori*mean_IngardFok*(Real_Zabs*Imag_Gammaabs+Imag_Zabs*Real
_Gammaabs)/poro
Imag_Zperf=Imag_Zperf1+Imag_Zperf2
Modulo_Zperf2=Real_Zperf**2+Imag_Zperf**2
y11r=Real_Zperf/Modulo_Zperf2
y11i=-Imag_Zperf/Modulo_Zperf2
y12r=-Real_Zperf/Modulo_Zperf2
y12i=Imag_Zperf/Modulo_Zperf2
y21r=-Real_Zperf/Modulo_Zperf2
y21i=Imag_Zperf/Modulo_Zperf2
y22r=Real_Zperf/Modulo_Zperf2
y22i=-Imag_Zperf/Modulo_Zperf2
!
```



```

tbfield,freq,frequ                                     ! Tabla en
función de la frecuencia
tbdata,1,y11r,y11i,y12r,y12i,y21r,y21i               ! Parámetros del modelo YMAT
a cada frecuencia frequ
tbdata,7,y22r,y22i                                   ! Más parámetros (no caben en la tabla
anterior)
*ENDDO
n1=n1+1
*ENDDO
! CAMARA DISIPATIVA
*DO,L,1,n_seg,1
  Lc=lduct+lchamb*(L-0.5)/n_seg
  Temp_c=Temp_e+Lc*((Temp_s-Temp_e)/(2*lduct+lchamb))
  ! Temperatura en la longitud media de cada segmento de la camara disipativa
  rho0_c=Patm*Mm/(R*(Temp_c+273.15))
  ! Densidad del aire (kg/m^3)
  c0_c=sqrt(gamma*R*(Temp_c+273.15)/Mm)
  ! Velocidad del sonido (m/s)
  mp,dens,n1,rho0_c
  ! Material para los segmentos de la camara disipativa (regiones de aire)
  mp,sonc,n1,c0_c

  resis=resis0*((Temp_c+273.15)/(Tref+273.15))**0.6      ! Ecuación de Christie.
Se toma Tref = 15°C (en general no coincidirá con Temp)
  tb,perf,n1,,zpro
  ! Modelo de impedancia compleja y constante de propagación (zpro)
  *DO,M,1,Nfrec,1
    frequ=f_ini+(M-1)*deltaf
    w=2*pi*frequ
    Real_Zabs=rho0_c*c0_c*(1+a5*(frequ*rho0_c/resis)**a6)
    Imag_Zabs=-rho0_c*c0_c*a7*(frequ*rho0_c/resis)**a8
    Real_Gammaabs=w/c0_c*a1*(frequ*rho0_c/resis)**a2
    Imag_Gammaabs=w/c0_c*(1+a3*(frequ*rho0_c/resis)**a4)
    tbfield,freq,frequ                                     ! Tabla en función de la
frecuencia
    tbdata,1,Real_Zabs,Imag_Zabs,Real_Gammaabs,Imag_Gammaabs ! Parámetros del
modelo ZPRO a cada frecuencia frequ
  *ENDDO
  n1=n1+1
*ENDDO

! *****
! Modelo geométrico, condiciones de contorno, mallado, etc.
! *****
espesor=0.0002                                         ! Espesor del elemento asociado
al conducto perforado

!(Ansys requiere mallado para aplicar la matriz de admitancias YMAT)

```



```

! Volúmenes (se crea mitad estética; también valdría un cuarto o cualquier ángulo, por axisimetría del
modelo)
cylind,0,rduct,0,lduct,0,180          ! Conducto de entrada
cylind,0,rduct,lduct+lchamb,2*lduct+lchamb,0,180 ! Conducto de salida

*DO,N,1,n_seg,1
  X1=lduct+lchamb*(N-1)/n_seg
  X2=lduct+lchamb*(N)/n_seg
  cylind,0,rduct,X1,X2,0,180          ! Creación de
los volúmenes del cilindro interior
*ENDDO
vsel,all
vglue,all                             ! Pegado de volúmenes para
conseguir dominio continuo
numcmp,all                             ! Compresión de numeración

*DO,O,1,n_seg,1
  X1=lduct+lchamb*(O-1)/n_seg
  X2=lduct+lchamb*(O)/n_seg
  cylind,rduct,rduct+espesor,X1,X2,0,180 ! Creación de los volúmenes del conducto
perforado
*ENDDO
vsel,all
vglue,all                             ! Pegado de volúmenes para
conseguir dominio continuo
numcmp,all                             ! Compresión de numeración

*DO,P,1,n_seg,1
  X1=lduct+lchamb*(P-1)/n_seg
  X2=lduct+lchamb*(P)/n_seg
  cylind,rduct+espesor,rchamb,X1,X2,0,180 ! Creación de los volúmenes de la Cámara
con material absorbente
*ENDDO
vsel,all
vglue,all                             ! Pegado de volúmenes para
conseguir dominio continuo
numcmp,all                             ! Compresión de numeración
! *****
! Mallado de volúmenes
! *****
Lmm=lchamb+lduct                      !
Longitud hasta el final de la cámara disipativa
T_m=Temp_e+Lmm*((Temp_s-Temp_e)/(2*lduct+lchamb)) ! Temperatura a la salida de la cámara
c0_m=sqrt(gamma*R*(T_m+273.15)/Mm)      ! Velocidad del sonido
(m/s)
lambda=c0_m/f_fin                       ! Mínima longitud de
onda (a frecuencia máxima)
h=lambda/15                             ! 10 elementos por (mínima)
longitud de onda

```


!(refinar para obtener mayor precisión)

esize,h

! Conducto exterior 1 de aire

type,1

!

Selección del tipo de elemento

mat,1

!

Selección del material

vsel,s,,1

!

Selección del volumen a mallar

vmesh,all

!

Mallado

vsel,all

! Conducto exterior 2 de aire

mat,2

!

Selección del material

vsel,s,,2

!

Selección del volumen a mallar

vmesh,all

!

Mallado

vsel,all

! Segmentos del Cilindro interior

n1=3

*DO,Q,1,n_seg,1

type,1

X1=lduct+lchamb*(Q-1)/n_seg

X2=lduct+lchamb*(Q)/n_seg

vsel,s,,3,n_seg+2

vsel,r,loc,z,X1,X2

mat,n1

vmesh,all

vsel,all

n1=n1+1

*ENDDO

! Segmentos del conducto perforado

*DO,R,1,n_seg,1

type,2

X1=lduct+lchamb*(R-1)/n_seg

X2=lduct+lchamb*(R)/n_seg

vsel,s,,n_seg+3,2*n_seg+2

vsel,r,loc,z,X1,X2

mat,n1

VSWEEP,all

vsel,all

n1=n1+1

*ENDDO

*DO,S,1,n_seg,1

! Segmentos de la cámara disipativa

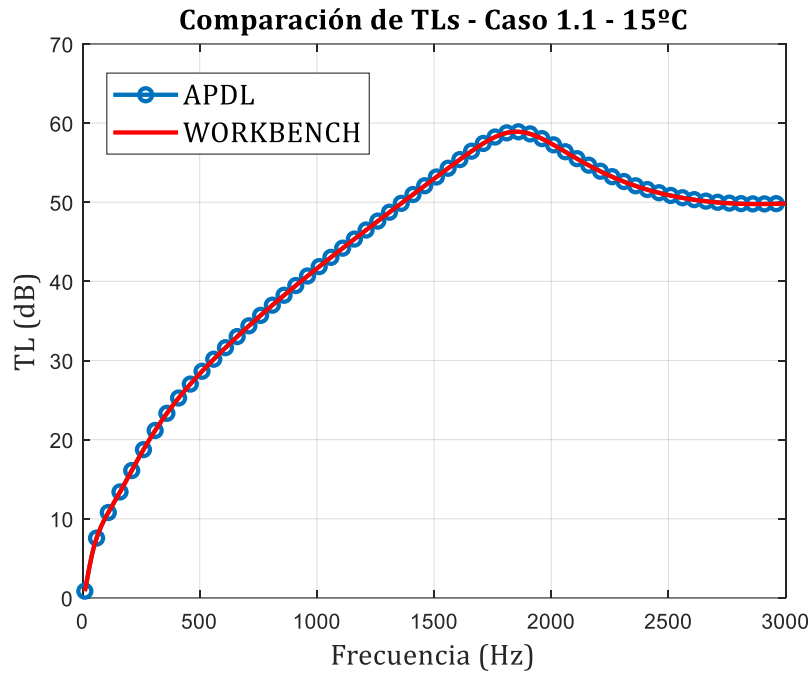


```
type,1
X1=lduct+lchamb*(S-1)/n_seg
X2=lduct+lchamb*(S)/n_seg
vsel,s,,,2*n_seg+3,3*n_seg+2
vsel,r,loc,z,X1,X2
mat,n1
vmesh,all
vsel,all
n1=n1+1
*ENDDO
eplot
! *****
! Condiciones de excitación en sección de entrada
z0_e=rho0_e_1*c0_e_1          ! Impedancia característica en la entrada(rayl)
p=1          ! Excitación en sección de entrada. Se puede poner otro valor.
vn=-p/(rho0_e_1*c0_e_1)     ! Valor de velocidad normal de excitación a partir de presión (entrada
anecoica)
nset,s,loc,z,0          ! Nodos en la sección de entrada
sf,all,port,1          ! Puerto de entrada del silenciador
!
sf,all,shld,vn          ! Velocidad normal de excitación
sf,all,impd,z0_e       ! Condición de impedancia en la entrada
!
nset,s,loc,z,2*lduct+lchamb ! Nodos en la sección de salida
sf,all,port,2          ! Puerto de salida del silenciador
sf,all,inf             ! Radiación en la salida.
!Impedancia anecoica en la salida (no vuelve energía al silenciador; necesario para obtener TL)
alls
! *****
! Condiciones en superficie perforada. Matriz de admitancia
! Definición de puertos a conectar mediante matriz de admitancia
!(nodos a ambos lados del conducto
perforado)
n2=3
csys,1          ! Sistema de coordenadas cilíndricas
*DO,T,1,n_seg,1
  esel,s,type,,2
  nsle,s
  X1=lduct+lchamb*(T-1)/n_seg
  X2=lduct+lchamb*(T)/n_seg
  nsel,s,loc,x,rduct
  nsel,r,loc,z,X1,X2
  sf,all,port,n2    ! Puerto 1 (caras interiores)
  n2=n2+1
  nsel,s,loc,x,rduct+espesor
  nsel,r,loc,z,X1,X2
  sf,all,port,n2    ! Puerto 2 (caras exteriores)
  alls
  n2=n2+1
```

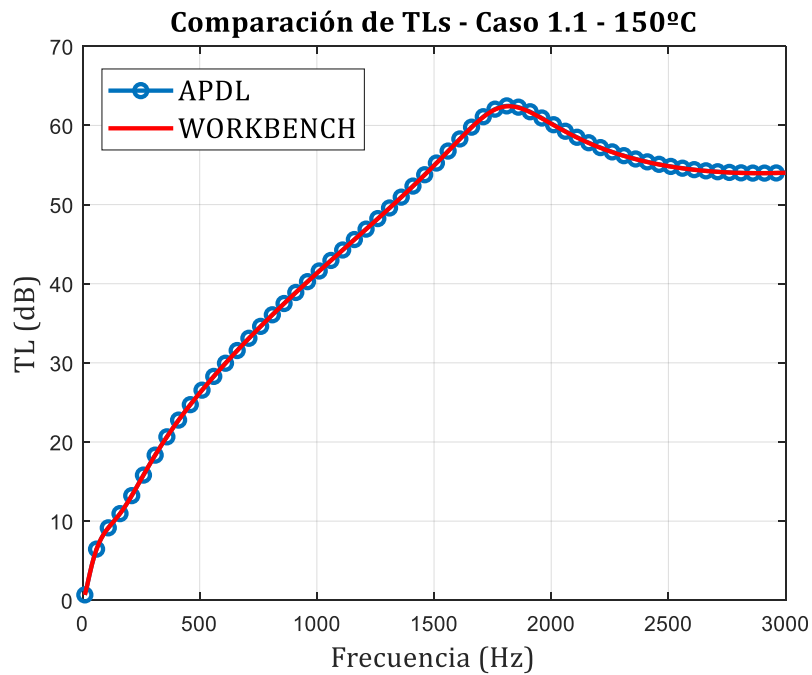


```
*ENDDO
csys,0
finish
! *****
! Cálculo de solución
! *****
/solu
antype,harmic
hropt,auto
kbc,1
harf,0,f_fin
nsub,Nfrec          ! Frecuencias de cálculo especificadas antes
solve
finish
! *****
! Post-processing
! *****
/post1
spower,1,2          ! Cálculo de potencia sonora (puertos 1 y 2: entrada y salida del silenciador)
plst,D_cond_grad0102,a2p,tl  ! TL - pérdida de transmisión
finish
```

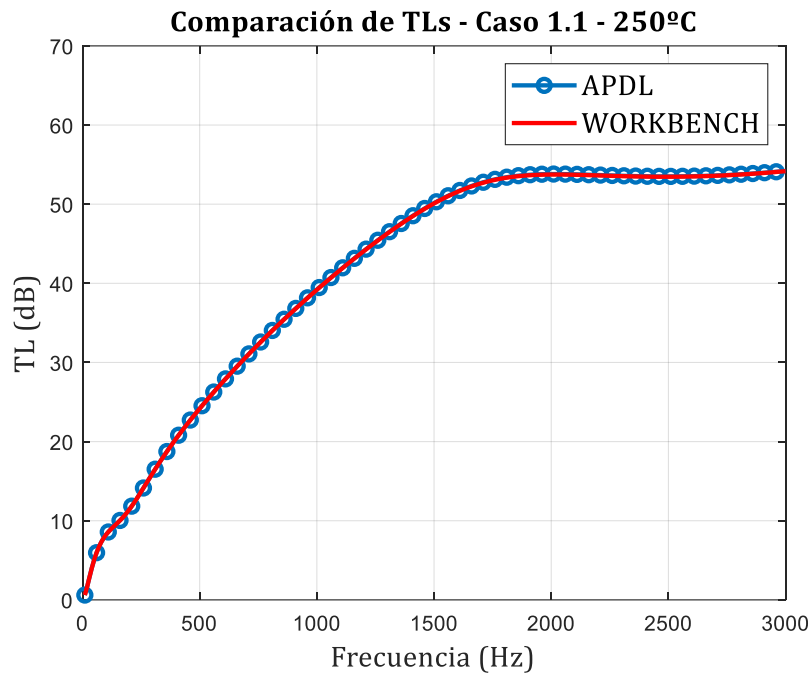
7.5 COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE APDL Y ANSYS WORKBENCH.



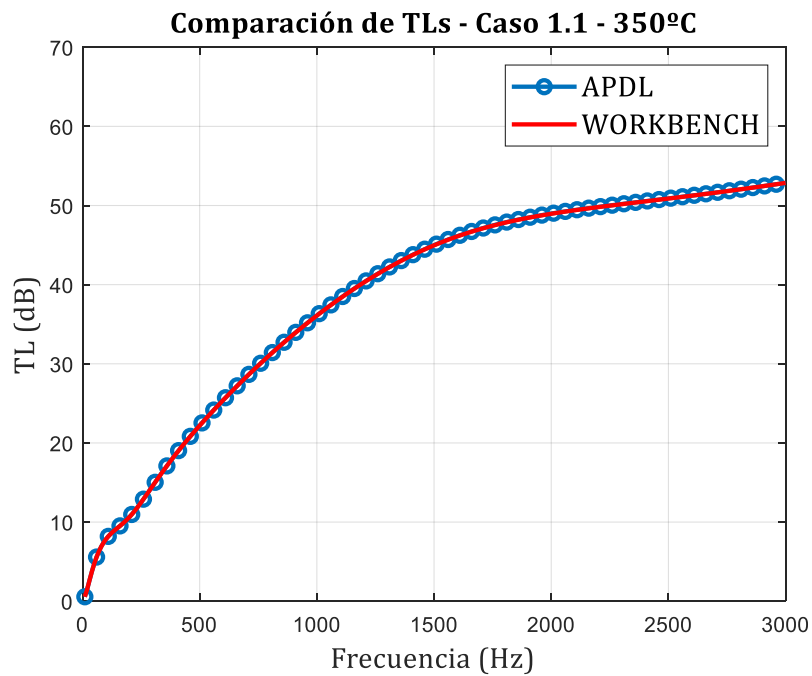
Anexo 1. Caso 1.1 - Temperatura 15 °C



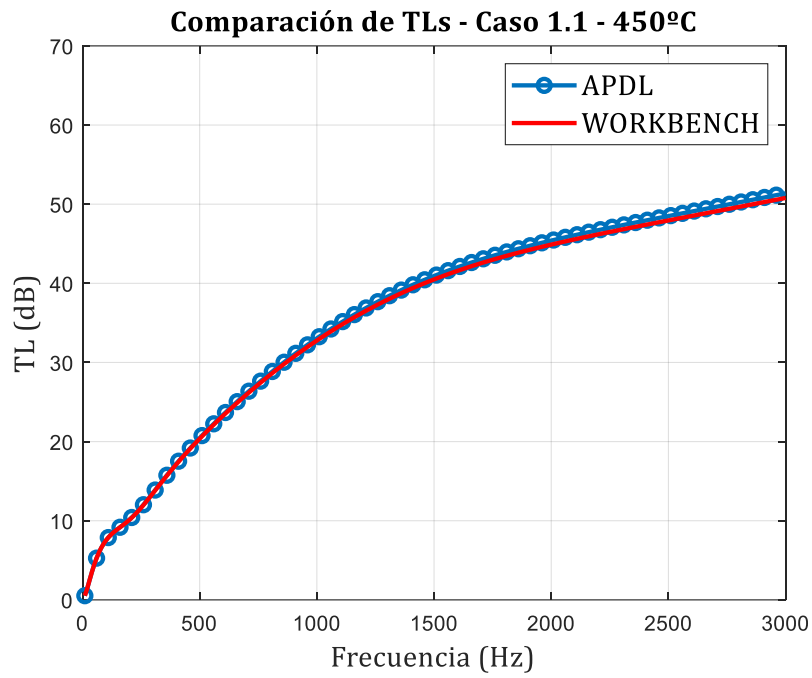
Anexo 2 Caso 1.1 - Temperatura 150 °C



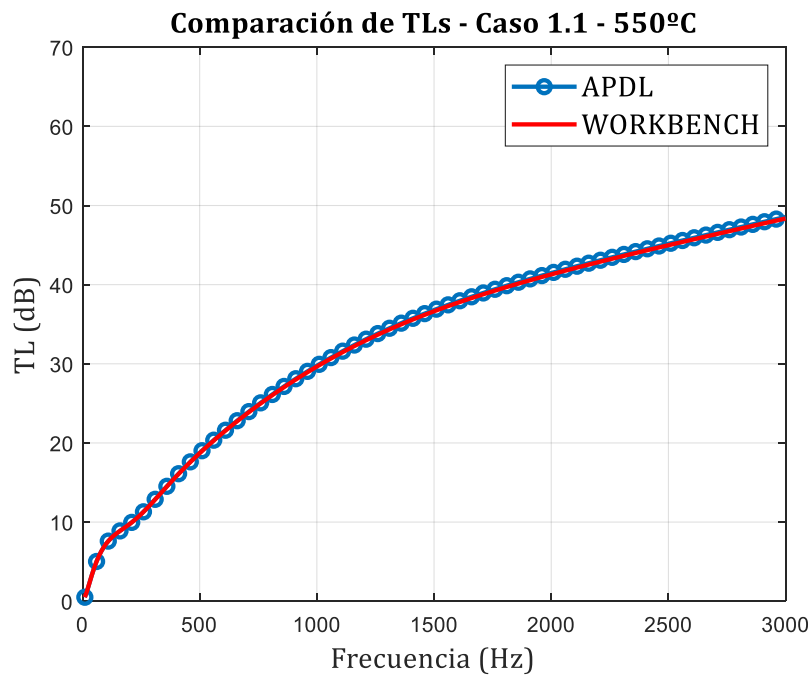
Anexo 3. Caso 1.1 - Temperatura 250 °C



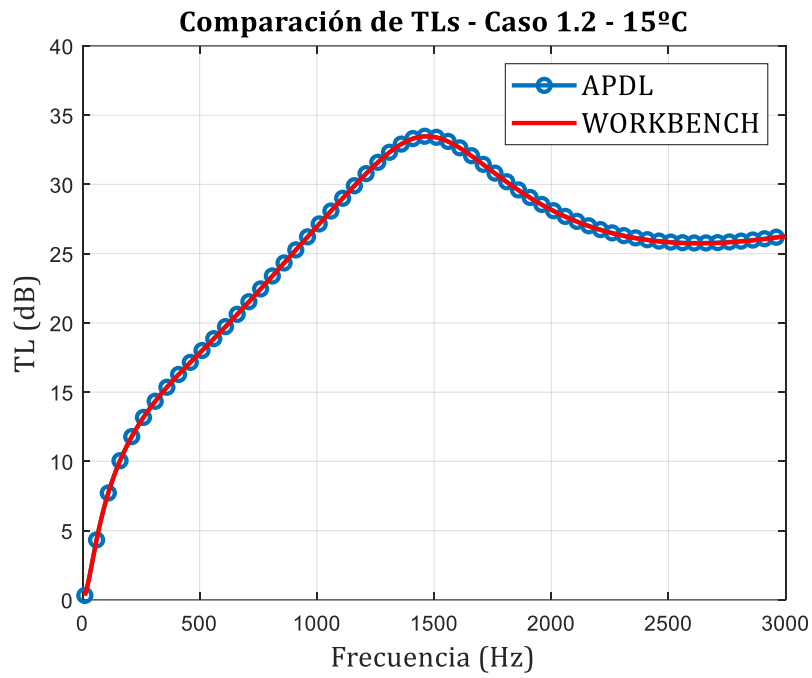
Anexo 4. Caso 1.1 - Temperatura 350 °C



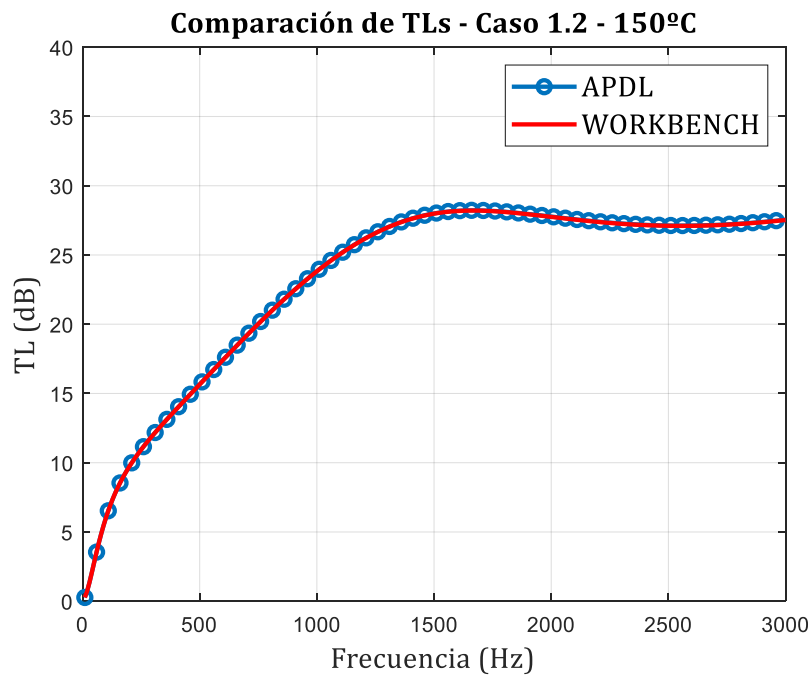
Anexo 5. Caso 1.1 - Temperatura 450 °C



Anexo 6. Caso 1.1 - Temperatura 550 °C

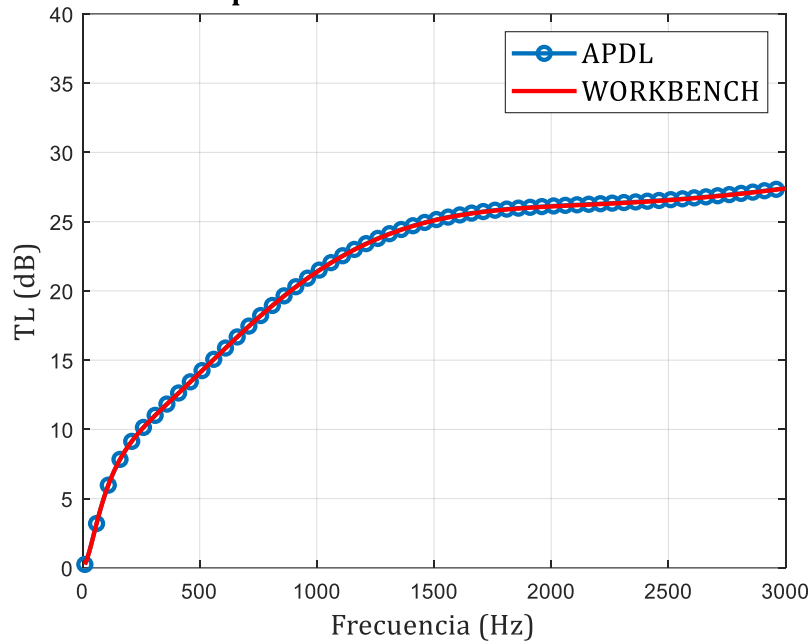


Anexo 7. Caso 1.2 - Temperatura 15 °C



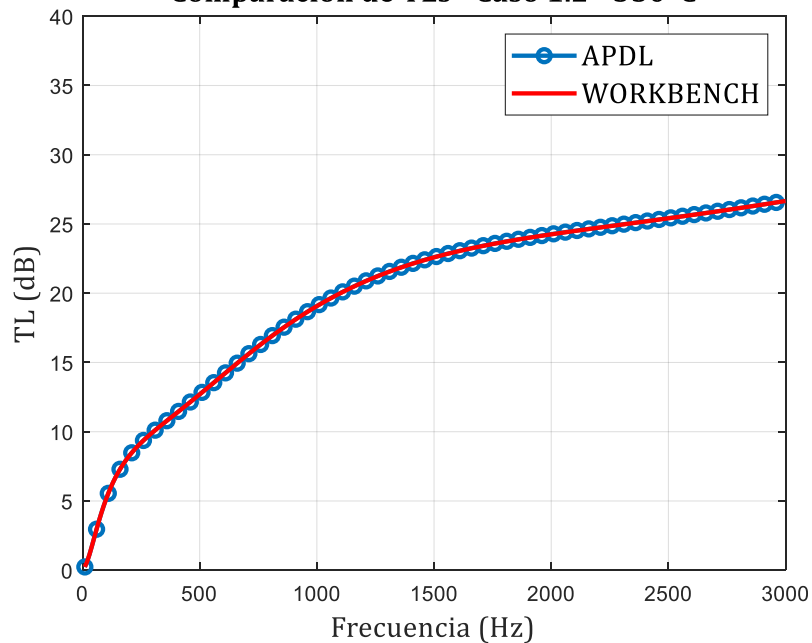
Anexo 8. Caso 1.2 - Temperatura 150 °C

Comparación de TLs - Caso 1.2 - 250°C



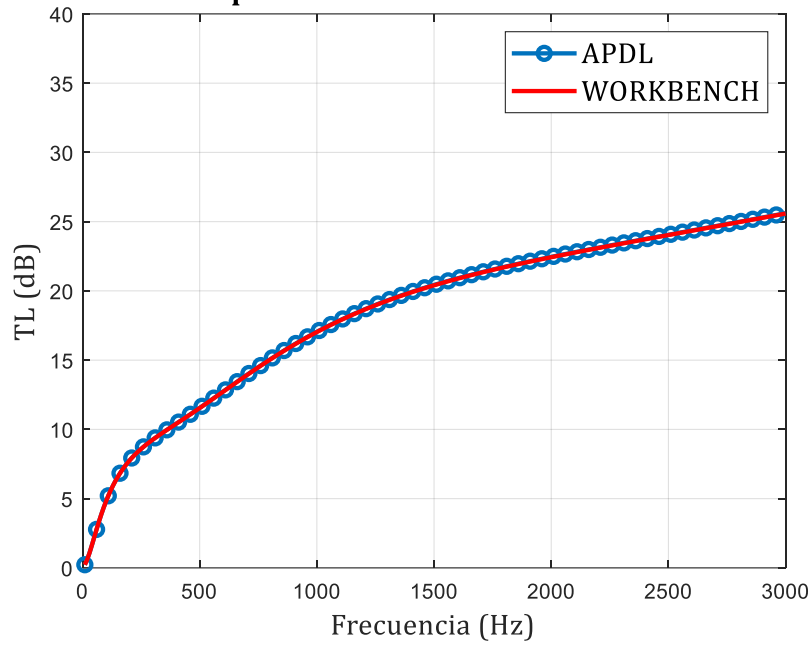
Anexo 9. Caso 1.2 - Temperatura 250 °C

Comparación de TLs - Caso 1.2 - 350°C



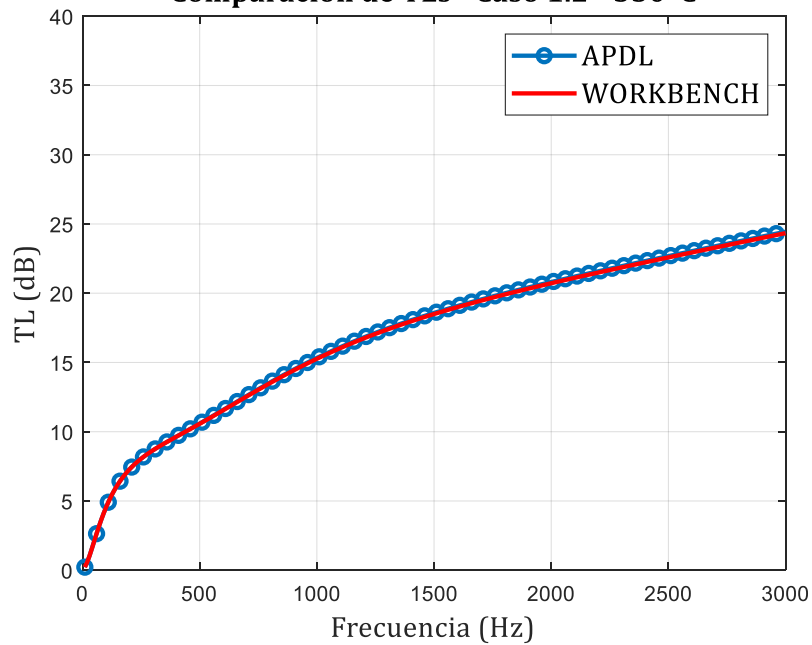
Anexo 10. Caso 1.2 - Temperatura 350 °C

Comparación de TLs - Caso 1.2 - 450°C

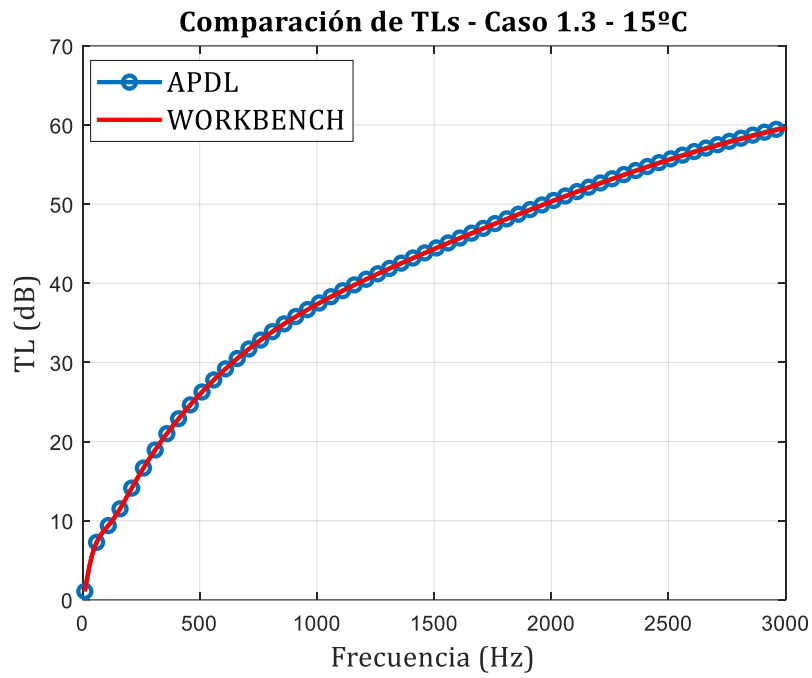


Anexo 11. Caso 1.2 - Temperatura 450 °C

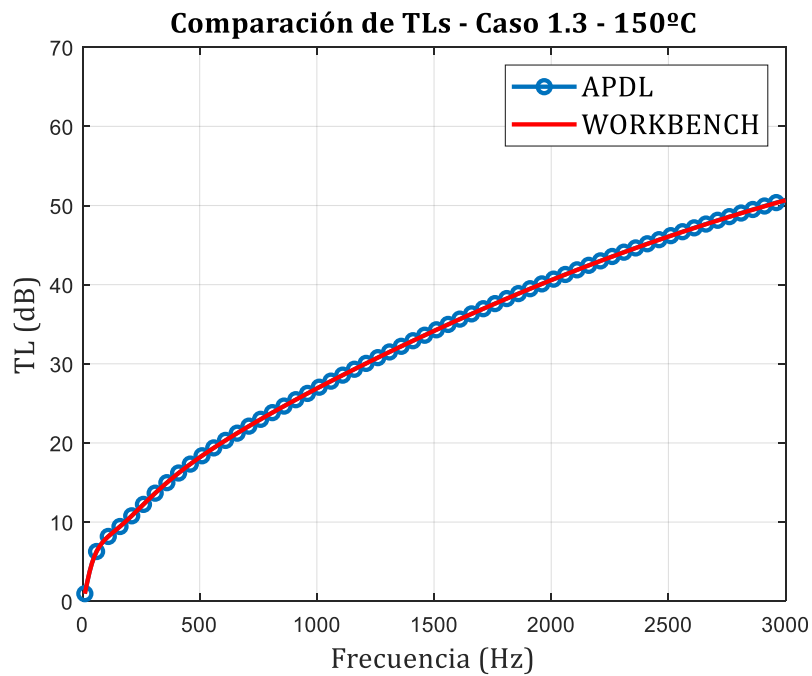
Comparación de TLs - Caso 1.2 - 550°C



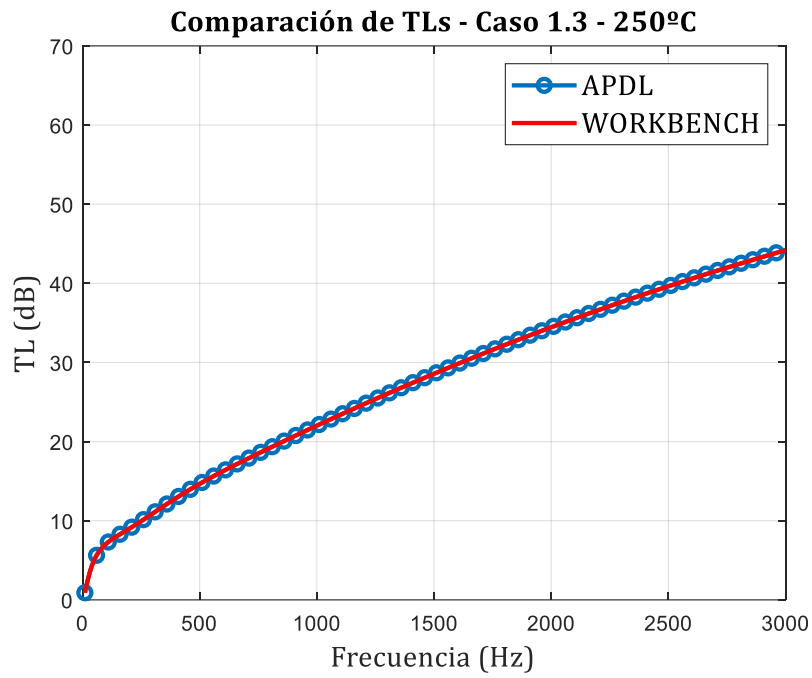
Anexo 12. Caso 1.2 - Temperatura 550 °C



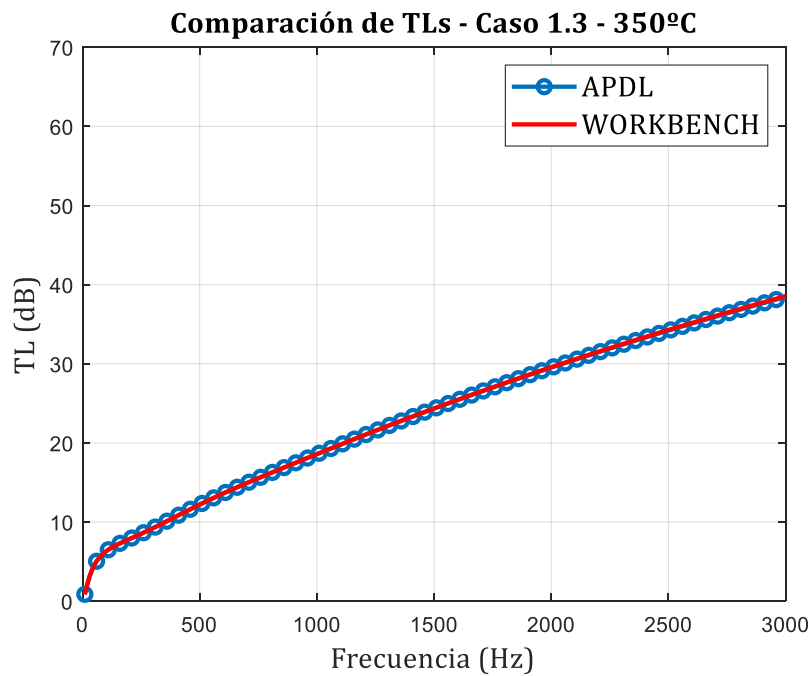
Anexo 13. Caso 1.3 - Temperatura 15 °C



Anexo 14. Caso 1.3 - Temperatura 150 °C

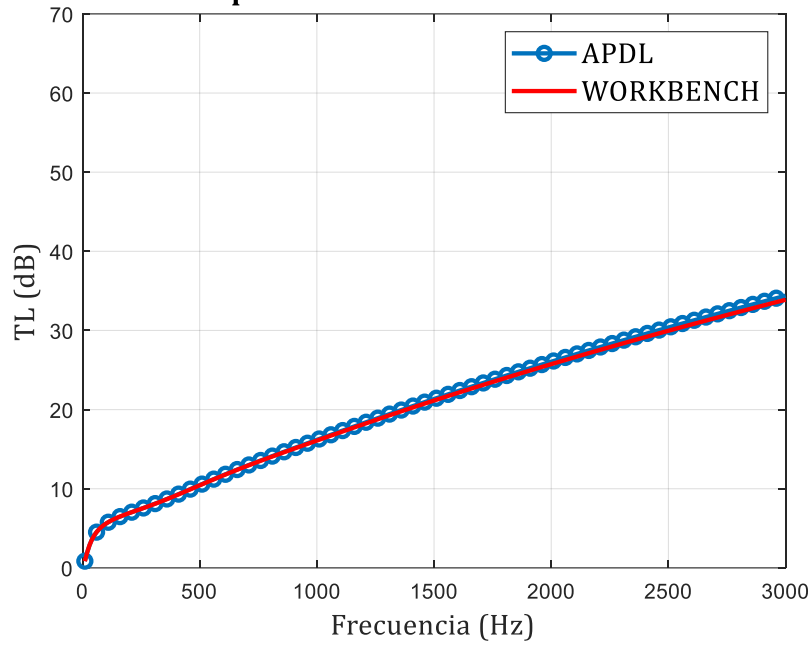


Anexo 15. Caso 1.3 - Temperatura 250 °C



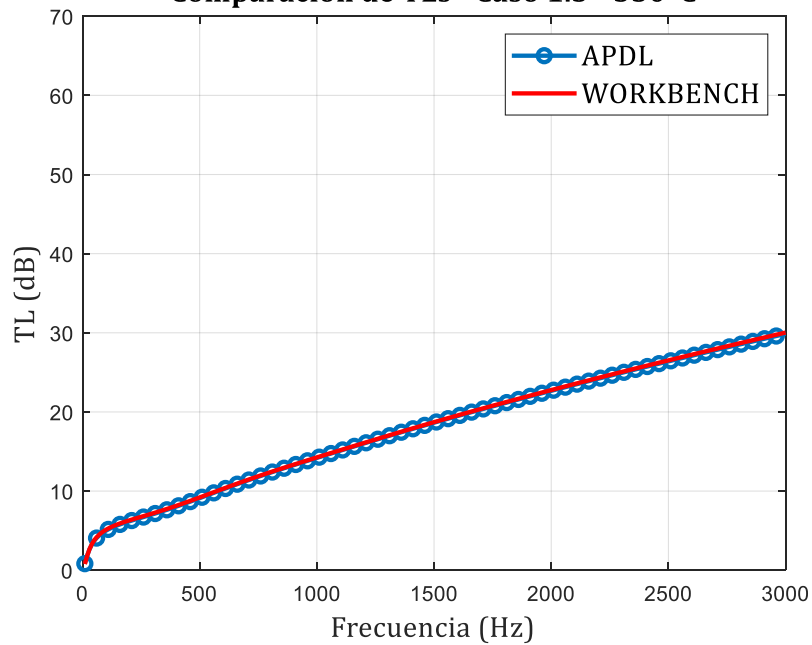
Anexo 16. Caso 1.3 - Temperatura 350 °C

Comparación de TLs - Caso 1.3 - 450°C



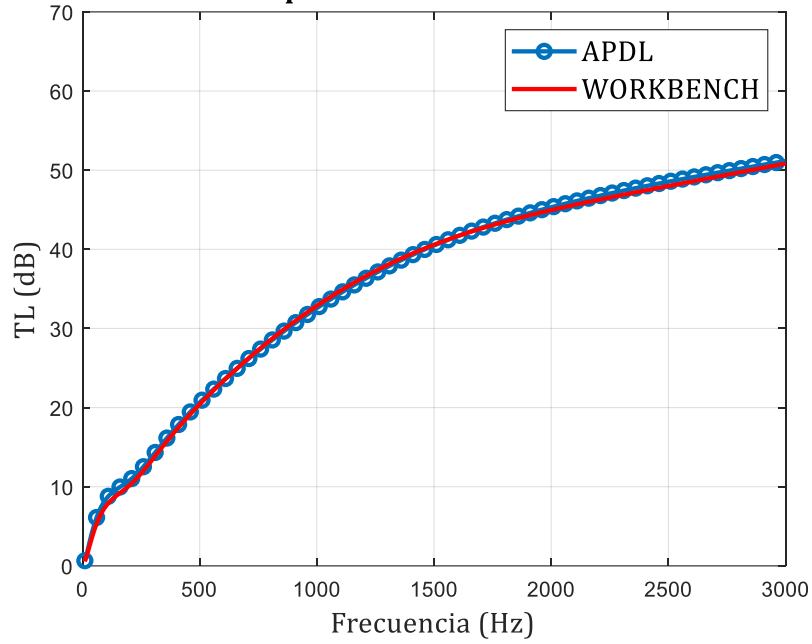
Anexo 17. Caso 1.3 - Temperatura 450 °C

Comparación de TLs - Caso 1.3 - 550°C



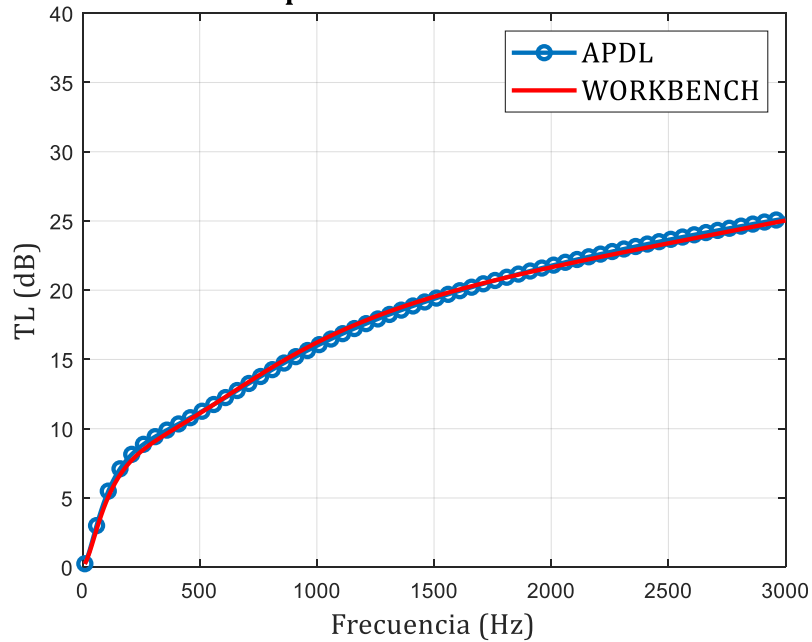
Anexo 18. Caso 1.3 - Temperatura 550 °C

Comparación de TLs - Caso 2.1

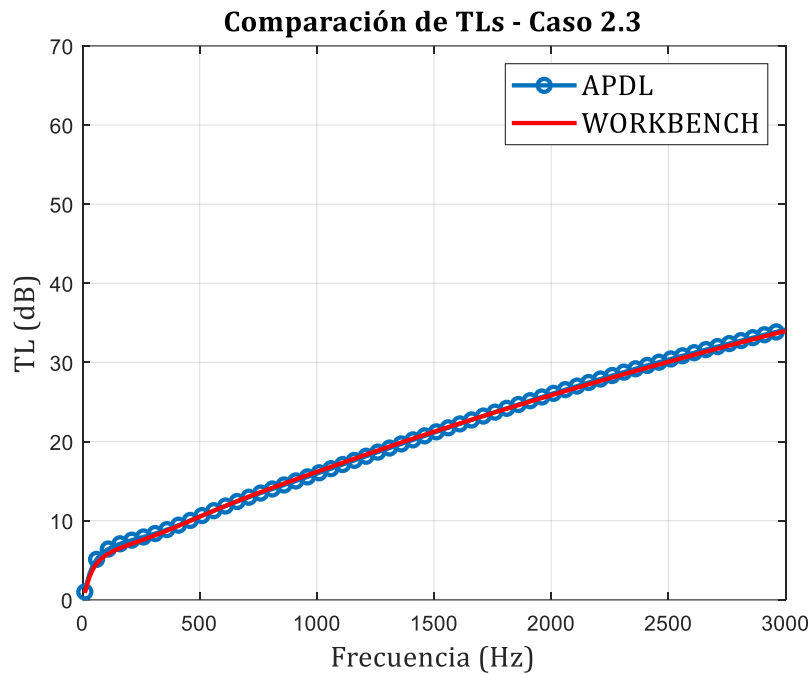


Anexo 19. Caso 2.1 APDL y Ansys Workbench

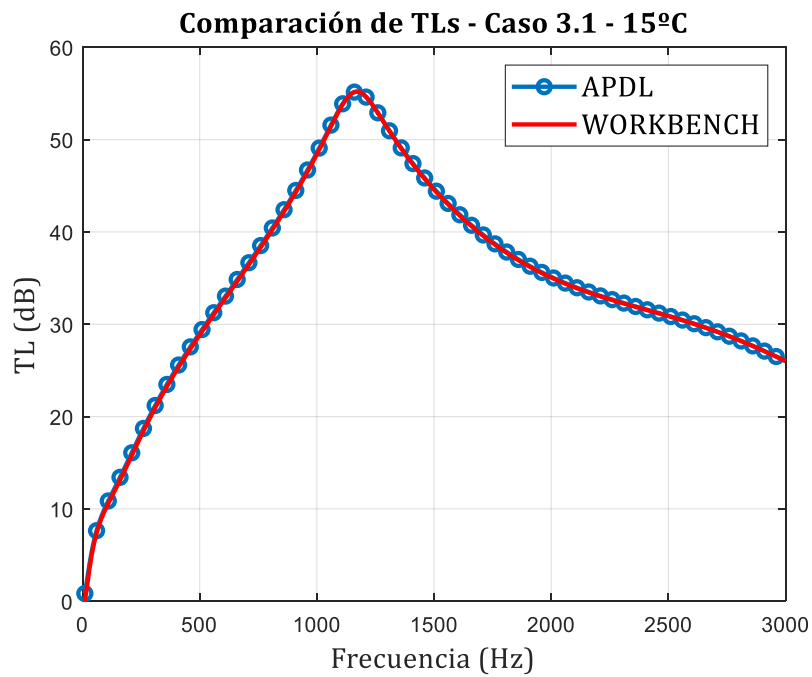
Comparación de TLs - Caso 2.2



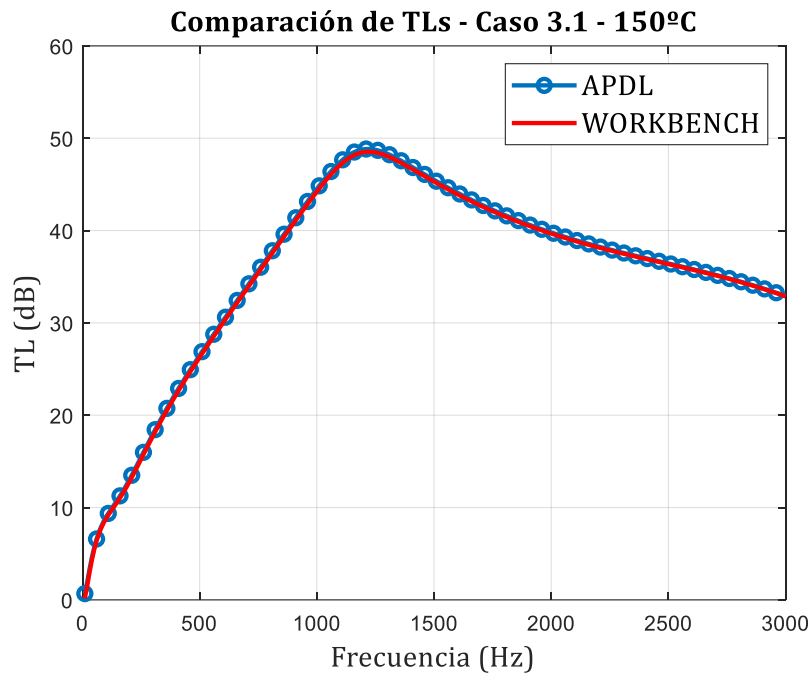
Anexo 20. Caso 2.2 APDL y Ansys Workbench



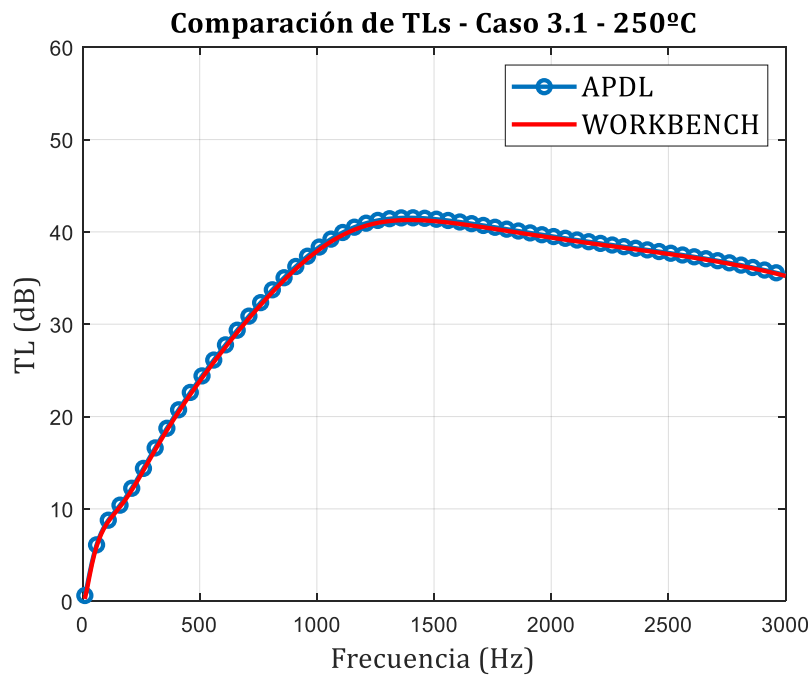
Anexo 21. Caso 2.3 APDL y Ansys Workbench



Anexo 22. Caso 3.1 - Temperatura 15 °C

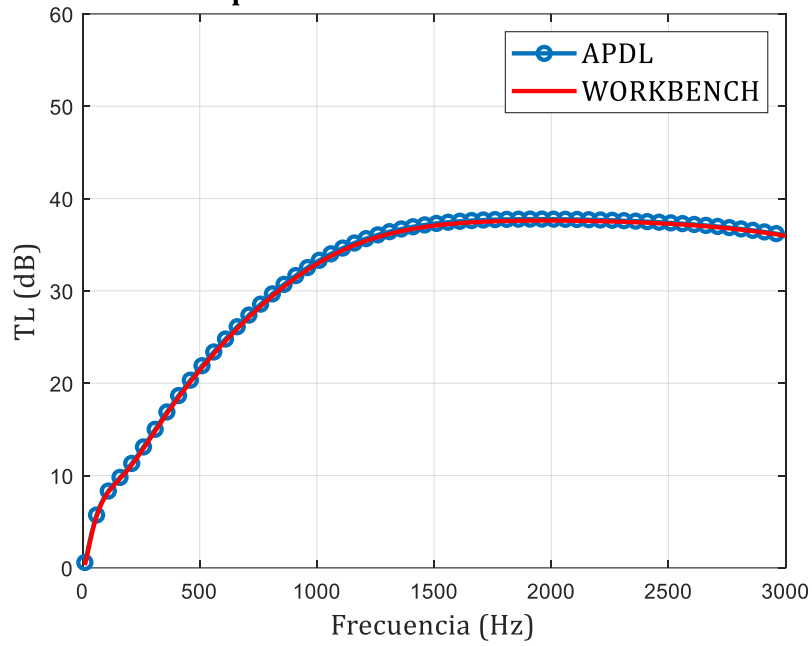


Anexo 23. Caso 3.1 - Temperatura 150 °C



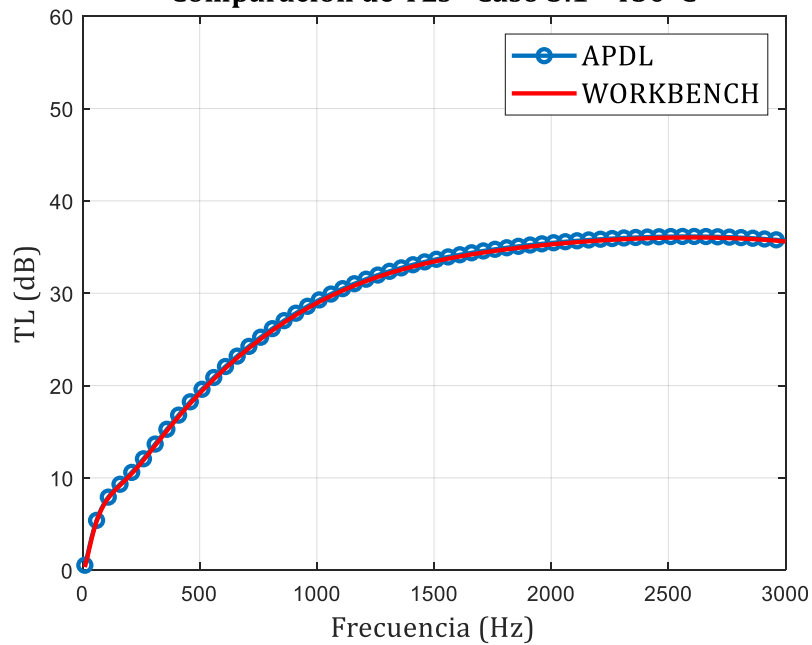
Anexo 24. Caso 3.1 - Temperatura 250 °C

Comparación de TLs - Caso 3.1 - 350°C

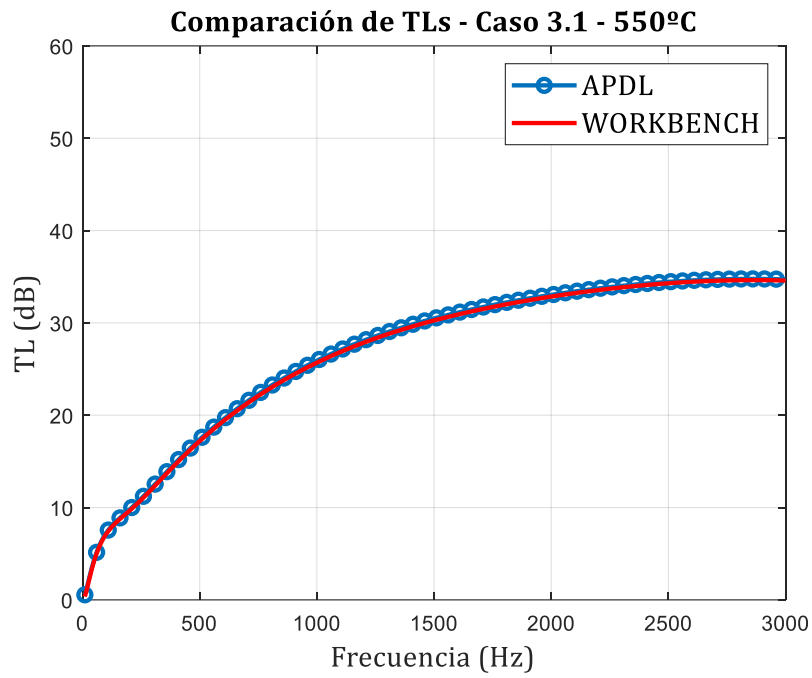


Anexo 25. Caso 3.1 - Temperatura 350 °C

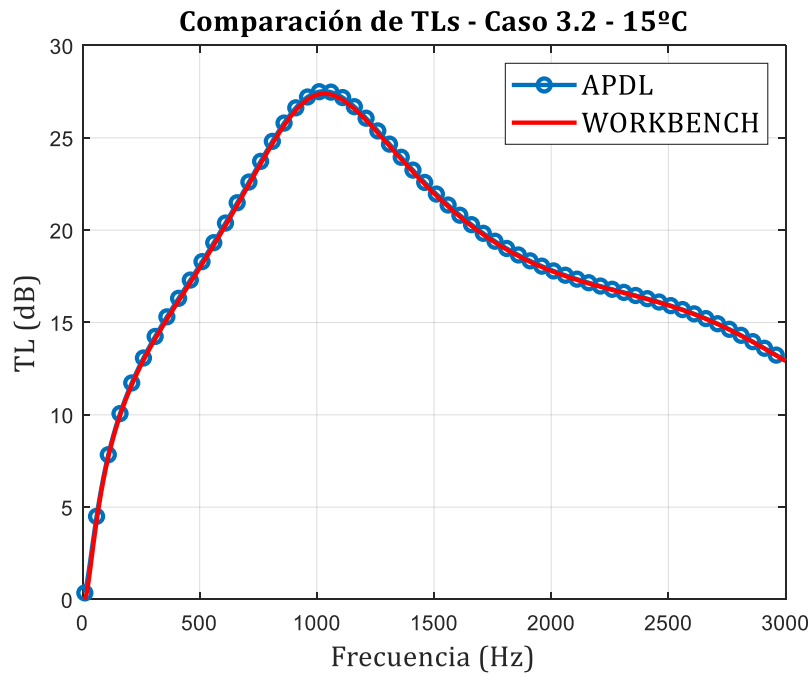
Comparación de TLs - Caso 3.1 - 450°C



Anexo 26. Caso 3.1 - Temperatura 450 °C

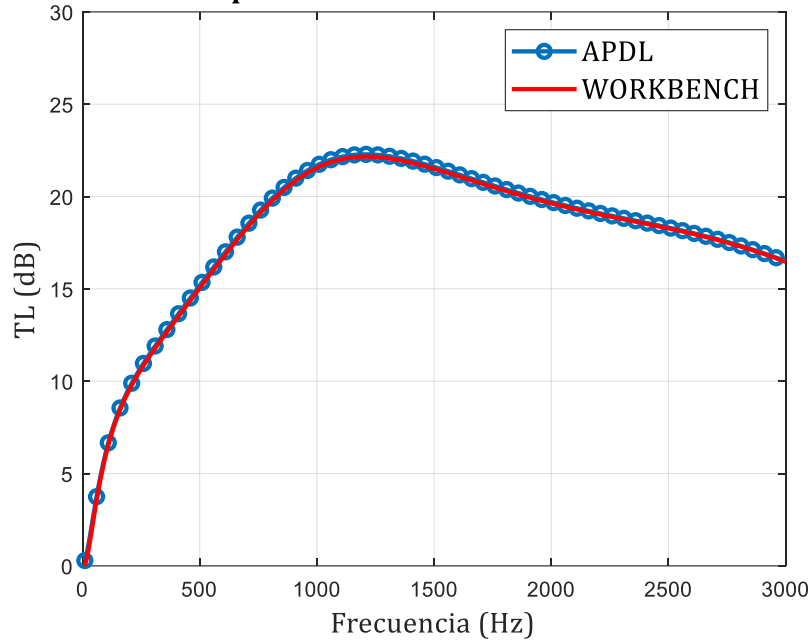


Anexo 27. Caso 3.1 - Temperatura 550 °C



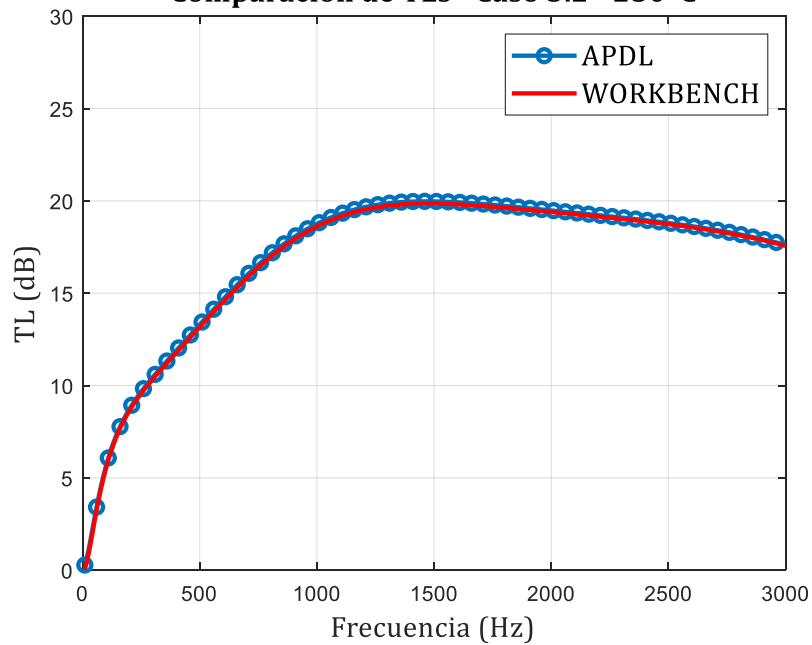
Anexo 28. Caso 3.2 - Temperatura 15 °C

Comparación de TLs - Caso 3.2 - 150°C



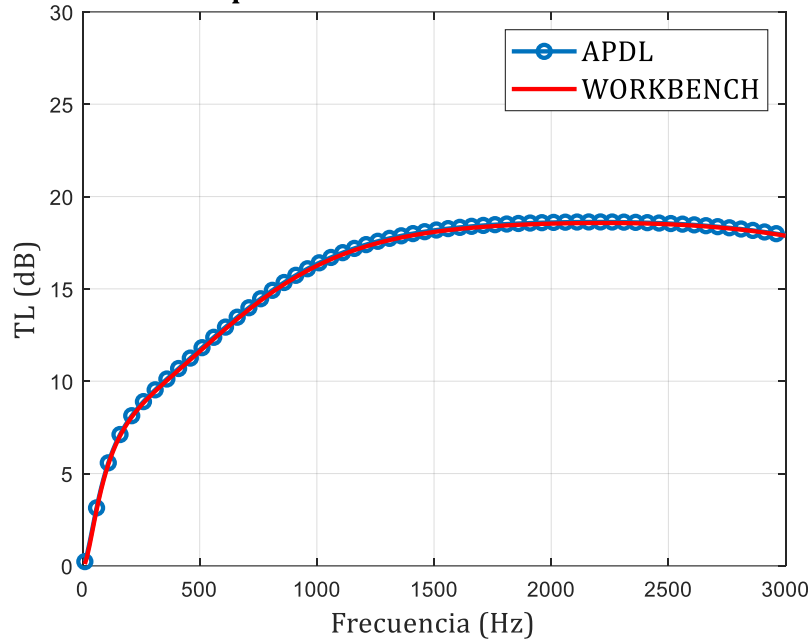
Anexo 29. Caso 3.2 - Temperatura 150 °C

Comparación de TLs - Caso 3.2 - 250°C



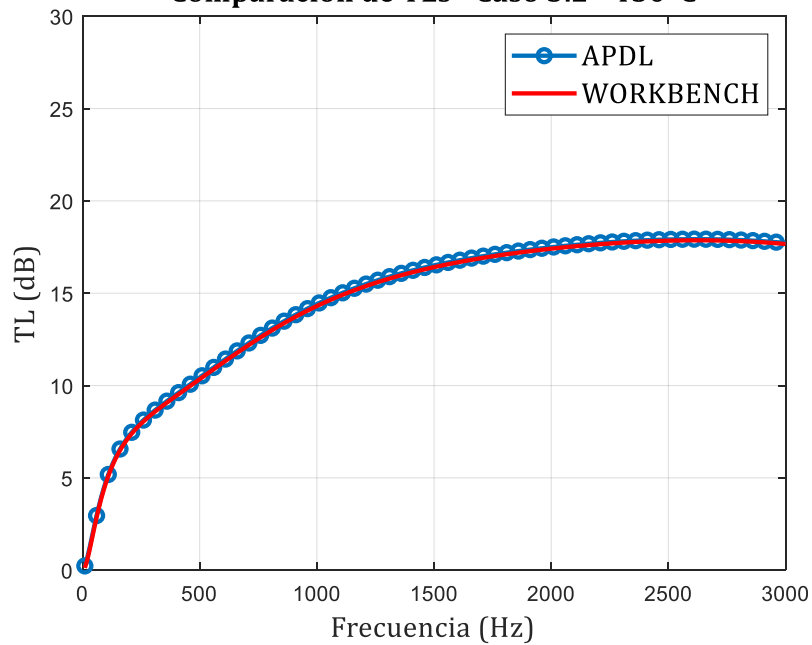
Anexo 30. Caso 3.2 - Temperatura 250 °C

Comparación de TLs - Caso 3.2 - 350°C

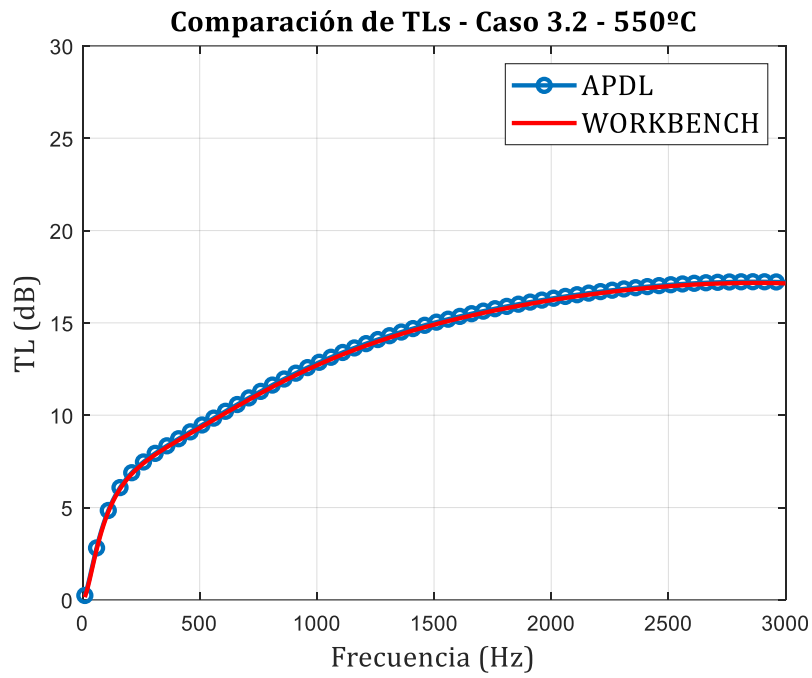


Anexo 31. Caso 3.2 - Temperatura 350 °C

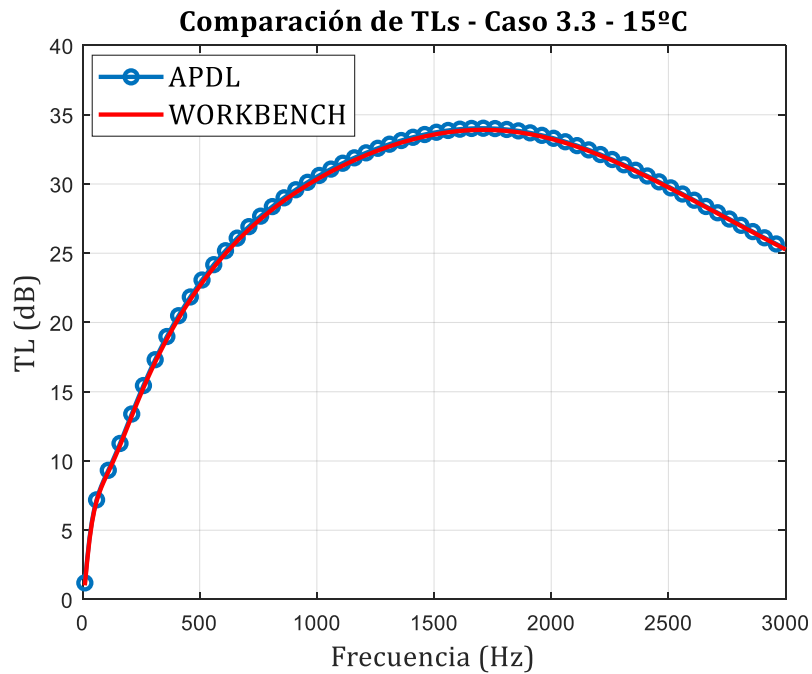
Comparación de TLs - Caso 3.2 - 450°C



Anexo 32. Caso 3.2 - Temperatura 450 °C

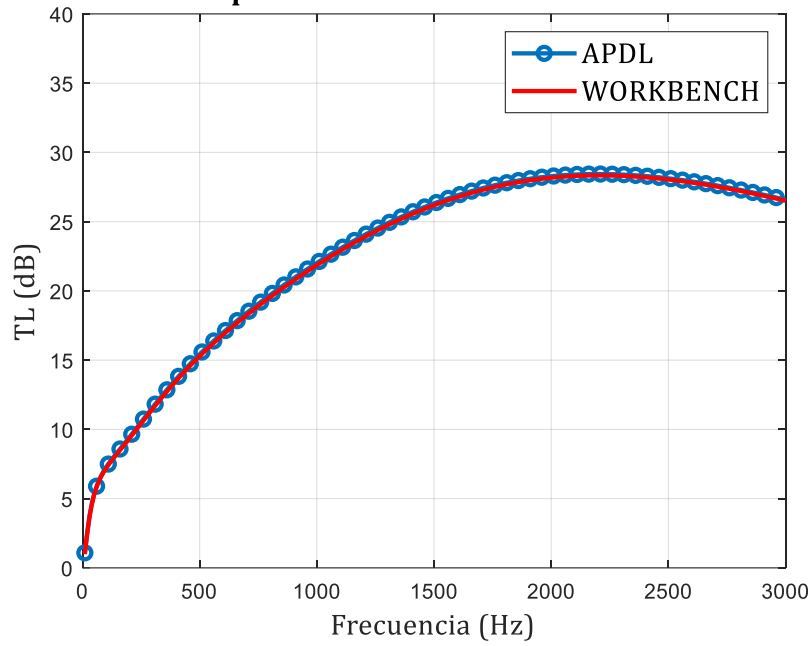


Anexo 33. Caso 3.2 - Temperatura 550 °C



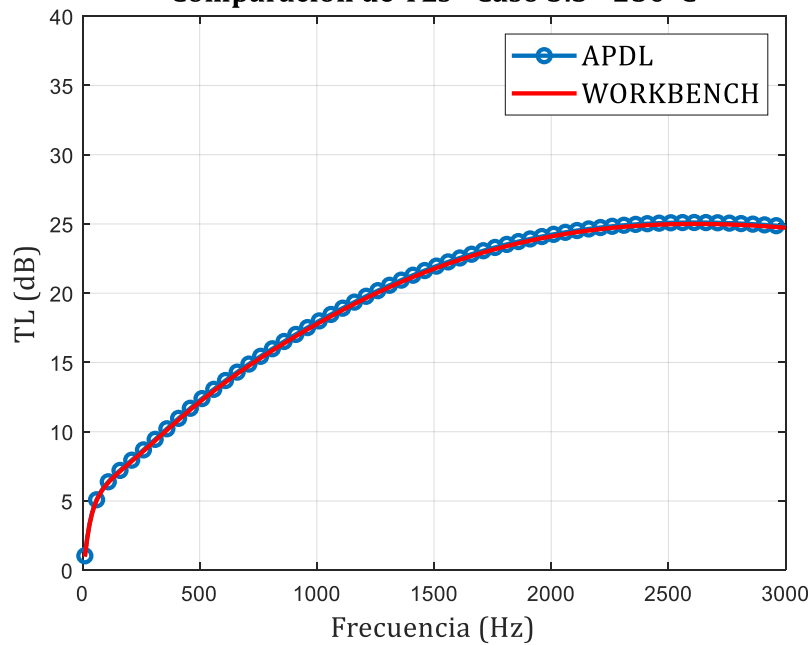
Anexo 34. Caso 3.3 - Temperatura 15 °C

Comparación de TLs - Caso 3.3 - 150°C



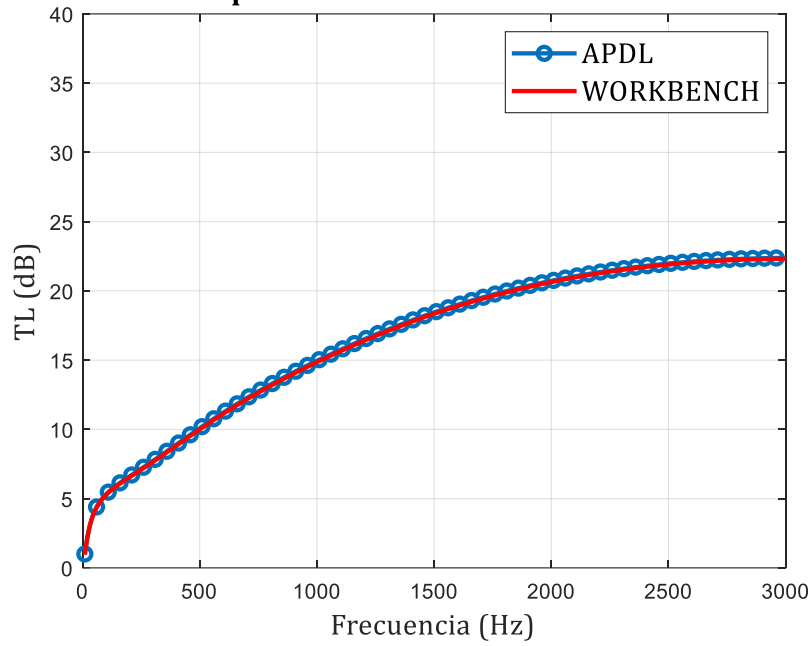
Anexo 35. Caso 3.3 - Temperatura 150 °C

Comparación de TLs - Caso 3.3 - 250°C



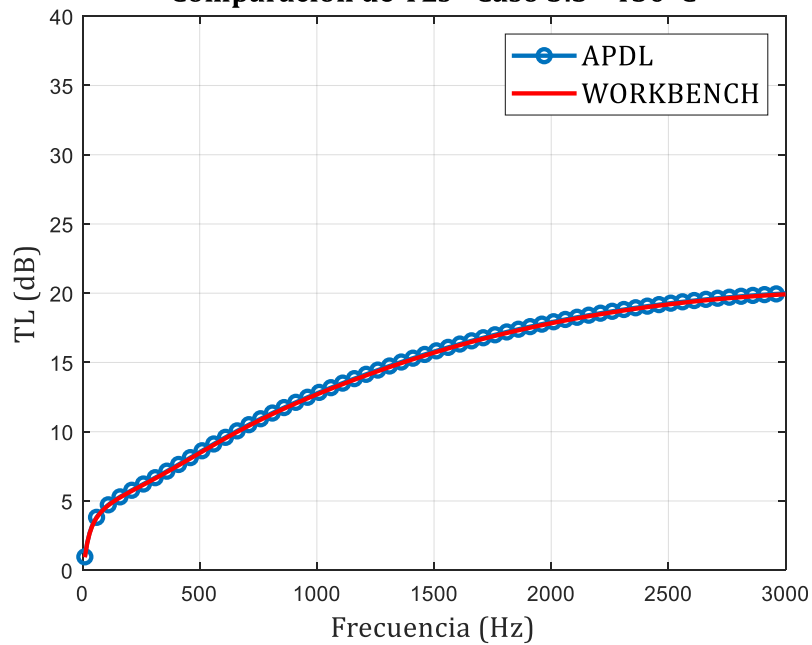
Anexo 36. Caso 3.3 - Temperatura 250 °C

Comparación de TLs - Caso 3.3 - 350°C

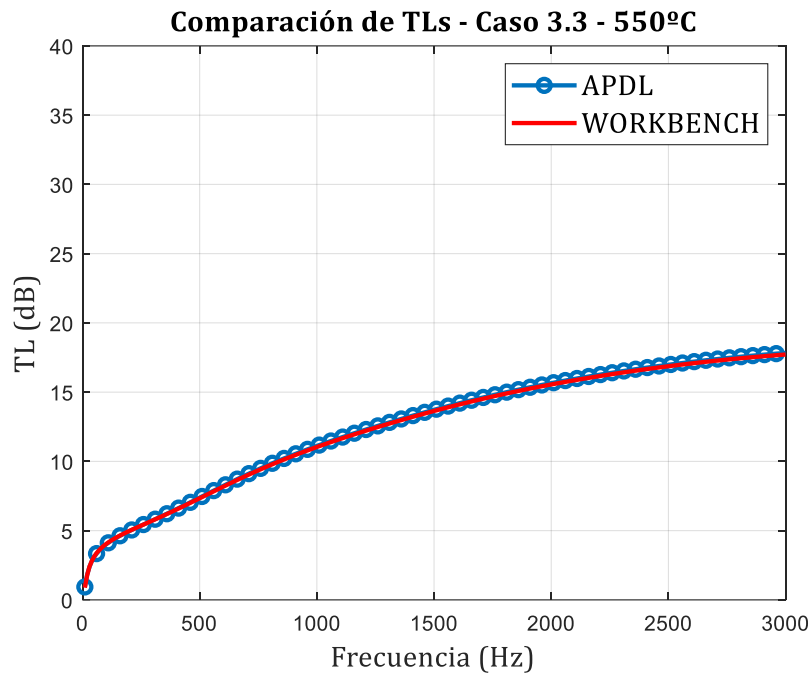


Anexo 37. Caso 3.3 - Temperatura 350 °C

Comparación de TLs - Caso 3.3 - 450°C

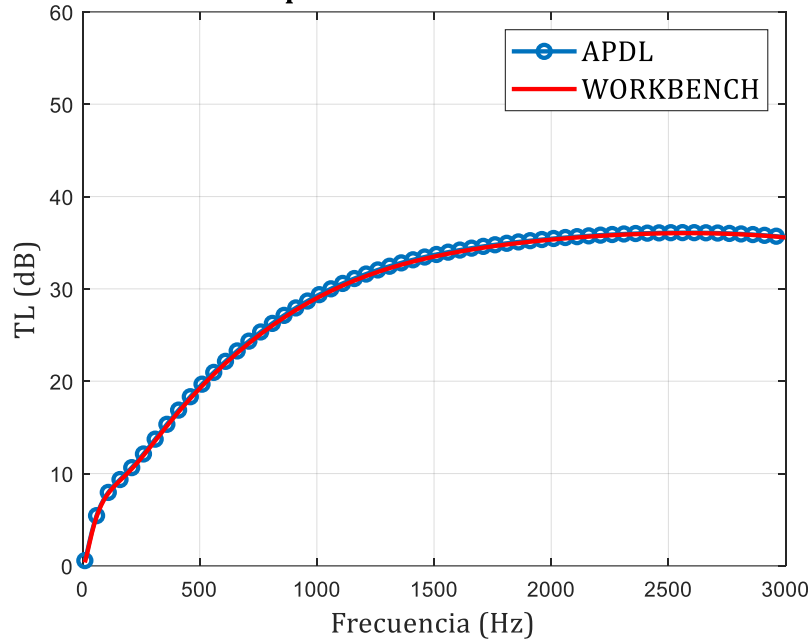


Anexo 38. Caso 3.3 - Temperatura 450 °C



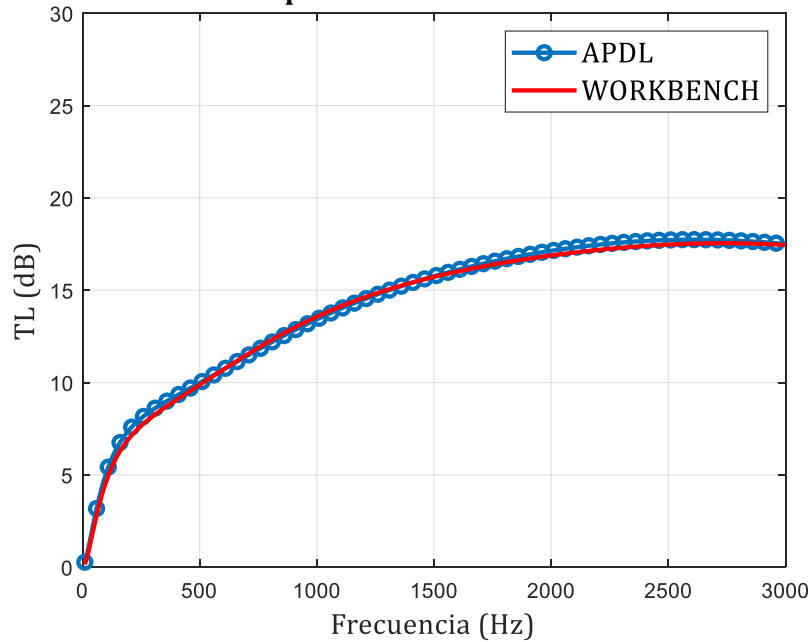
Anexo 39. Caso 3.3 - Temperatura 550 °C

Comparación de TLs - Caso 4.1

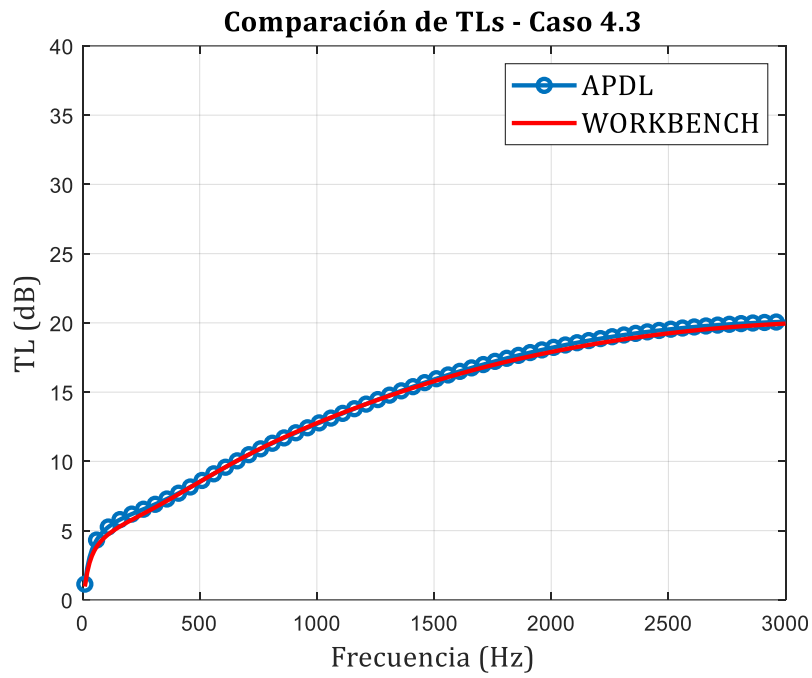


Anexo 40. Caso 4.1 APDL y Ansys Workbench

Comparación de TLs - Caso 4.2



Anexo 41. Caso 4.2 APDL y Ansys Workbench



Anexo 42. Caso 4.3 APDL y Ansys Workbench