



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIERÍA
INDUSTRIAL VALENCIA

TRABAJO FIN DE MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

**DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE
METODOLOGÍAS NUMÉRICAS DE
ELEMENTOS FINITOS PARA EL ANÁLISIS
ACÚSTICO DE SILENCIADORES
DISIPATIVOS. INFLUENCIA DE ALTAS
TEMPERATURAS Y GRADIENTES
TÉRMICOS.**

AUTOR: JESÚS RODRÍGUEZ GARCÍA

TUTOR: FRANCISCO DAVID DENIA GUZMÁN

Curso Académico: 2020-21

AGRADECIMIENTOS

A toda mi familia por todo el apoyo que he recibido durante mis años de grado y, en concreto, durante estos tres años de máster. En especial, a mis padres, Jesús y Paqui, por haberme dado una educación y unos valores que me han permitido llegar hasta donde estoy, así como haberme proporcionado todos los recursos posibles y la libertad para tener la vida que he querido.

A mi tutor, Francisco David Denia, por ser una persona admirable y profesional desde el primer momento que nos conocimos, así como por haberme ofrecido todo tipo de ayuda relacionada con el trabajo, en estos tiempos de pandemia en los que estamos.

A mis grupos de amigos de Valencia y de mi pueblo, San Pedro del Pinatar, por haberme apoyado en los buenos y malos momentos, pues han sido meses duros y poder desconectar con ellos ha sido una buena salida de escape.

RESUMEN

Este Trabajo Fin de Máster se centra en el desarrollo e implementación de una metodología numérica basada en elementos finitos que permita modelizar y analizar el comportamiento acústico de silenciadores disipativos, teniendo en cuenta el efecto del conducto perforado y la influencia de altas temperaturas y gradientes térmicos. Para el desarrollo del trabajo, se ha empleado el programa de cálculo Ansys, en sus versiones Ansys Parametric Design Language (APDL) y Ansys Workbench.

En primer lugar, se parte de una introducción teórica sobre los fundamentos de la acústica en conductos y silenciadores disipativos, ejerciendo como base para entender cualquier apartado posterior. Además, se exponen los fundamentos en los que se basa el método de los elementos finitos para analizar la atenuación acústica de los silenciadores disipativos.

Por otro lado, se describe con detalle el problema a resolver, definiendo las características iniciales de la geometría a utilizar, del material absorbente y del conducto perforado. También se enumeran los diferentes casos de estudio, diferenciándose entre sí por la modificación de parámetros asociados a la propia geometría del silenciador, propiedades del material absorbente y del conducto perforado.

Tras definir el problema, se desarrollan las dos metodologías a seguir con Ansys para el correcto diseño de los casos de estudio, previamente definidos, y su posterior cálculo del índice de pérdidas de transmisión (TL) y procesado de resultados.

Antes de entrar en el análisis de resultados, se valida el funcionamiento de dichas metodologías mediante una comparación detallada del TL para algunas configuraciones concretas. Una vez confirmada la validez de las metodologías desarrolladas e implementadas, el último paso es analizar y comentar los resultados obtenidos, así como detallar el efecto producido por la modificación paramétrica realizada en cada uno de dichos casos con el objetivo de obtener mejoras en los índices de pérdidas de transmisión.

Por último, se desarrollan una serie de conclusiones obtenidas tras la realización del Trabajo Fin de Máster.

Palabras clave: Silenciador disipativo, Conducto perforado, Alta temperatura, Gradiente térmico, Ansys APDL, Ansys Workbench, Acústica, Elementos finitos, Material absorbente, Índice de pérdidas de transmisión.

RESUM

Aquest Treball Fi de Màster se centra en el desenvolupament i implementació d'una metodologia numèrica basada en elements finits que permeti analitzar el comportament acústic de silenciadors dissipatius, tenint en compte l'efecte del conducte perforat i la influència d'altres temperatures i gradients tèrmics. Per al desenvolupament del treball, s'ha emprat el programa de càlcul Ansys, en les seues versions Ansys Parametric Design Language (APDL) i Ansys Workbench.

En primer lloc, es parteix d'una introducció teòrica sobre els fonaments de l'acústica en conductes i silenciadors dissipatius, exercint com a base per a entendre qualsevol apartat posterior. A més, s'exposen els fonaments en els quals es basa el mètode dels elements finits per a analitzar l'atenuació acústica dels silenciadors dissipatius.

D'altra banda, es descriu amb detall el problema a resoldre, definint les característiques inicials de la geometria a utilitzar, del material absorbent i del conducte perforat. També s'enumeren els diferents casos d'estudi, diferenciant-se entre si per la modificació de paràmetres associats a la pròpia geometria del silenciador, propietats del material absorbent i del conducte perforat.

Després de definir el problema, es desenvolupen les dues metodologies a seguir amb Ansys per al correcte disseny dels casos d'estudi, prèviament definits, i el seu posterior càlcul de l'índex de pèrdues de transmissió (TL) i processament de resultats.

Abans d'entrar en l'anàlisi de resultats, es valida el funcionament d'aquestes metodologies mitjançant una comparació detallada del TL per a algunes configuracions concretes. Una vegada confirmada la validesa de les metodologies desenvolupades i implementades, l'últim pas és analitzar i comentar els resultats obtinguts, així com detallar l'efecte produït per la modificació paramètrica realitzada en cadascun d'aquests casos amb l'objectiu d'obtenir millores en els índexs de pèrdues de transmissió.

Finalment, es desenvolupen una sèrie de conclusions obtingudes després de la realització del Treball Fi de Màster.

Paraules clau: Silenciador dissipatiu, Conducte perforat, Alta temperatura, Gradient tèrmic, Ansys APDL, Ansys Workbench, Acústica, Elements finits, Material absorbent, Índex de pèrdues de transmissió.

ABSTRACT

This Master's Thesis focuses on the development and implementation of a numerical methodology based on finite elements that allows modeling and analyzing the acoustic behavior of dissipative silencers, taking into account the effect of the perforated duct and the influence of high temperatures and thermal gradients. For the development of the thesis, the commercial finite element software Ansys has been used, in its Ansys Parametric Design Language (APDL) and Ansys Workbench versions.

First of all, a theoretical introduction to the fundamentals of acoustics in ducts and dissipative silencers is given, serving as a basis for understanding any subsequent section. In addition, the fundamentals on which the finite element method is based for analyzing the acoustic attenuation of dissipative silencers are presented.

On the other hand, the problem to be solved is described in detail, defining the initial characteristics of the geometry to be used, the absorbent material and the perforated duct. The different case studies are also listed, differentiating between them by the modification of parameters associated with the geometry itself, properties of the absorbent material and of the perforated duct.

After defining the problem, the two methodologies to be followed with Ansys are developed for the correct design of the previously defined case studies and their subsequent calculation of the transmission loss index (TL) and processing of results.

Before entering into the analysis of results, the performance of these methodologies is validated through a detailed TL comparison for a number of selected configurations. Once the validation of the implemented finite element methodologies has been confirmed, the last step is to analyse and comment the results obtained, as well as to provide the relevant details of the effect produced by the parametric modification carried out in each of these cases in order to obtain improvements in the transmission loss index.

Finally, a series of conclusions obtained after the completion of the Master's Thesis is developed.

Keywords: Dissipative silencer, Perforate duct, High temperature, Thermal gradient, Ansys APDL, Ansys Workbench, Acoustics, Finite elements, Absorbent material, Transmission loss index.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	III
RESUMEN	V
RESUM.....	VII
ABSTRACT.....	IX
ÍNDICE GENERAL	XI
LISTA DE FIGURAS	XIII
LISTA DE TABLAS	XV
LISTA DE GRÁFICAS	XVII
MEMORIA.....	19
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	21
1.1 MOTIVACIÓN.....	21
1.2 ANTECEDENTES	21
1.3 OBJETIVOS DE ESTE TRABAJO	22
CAPÍTULO 2 FUNDAMENTOS DE ACÚSTICA DE CONDUCTOS Y SILENCIADORES.....	23
2.1 INTRODUCCIÓN.....	23
2.2 AIRE COMO MEDIO DE PROPAGACIÓN.....	24
2.2.1 Densidad.....	24
2.2.2 Velocidad de propagación	24
2.3 TIPOS DE ONDAS.....	25
2.3.1 Ondas longitudinales y transversales	25
2.3.2 Ondas planas, cilíndricas y esféricas.....	25
2.4 PROPAGACIÓN DE ONDAS	25
2.5 ONDAS PROGRESIVAS, REGRESIVAS Y ESTACIONARIAS.....	27
2.6 ECUACIÓN DE ONDAS PLANAS.....	28
2.6.1 Energía.....	29
2.6.2 Impedancia acústica	29
2.6.3 Niveles sonoros	30
2.7 ONDAS SONORAS EN CONDUCTOS.....	30
2.7.1 Cambio de medio de propagación.....	30
2.7.2 Cambio de sección del conducto.....	32
2.8 ONDAS SONORAS EN CONDUCTOS PERFORADOS.....	34
2.8.1 Impedancia acústica	35
2.9 MATERIALES FONOABSORBENTES	35
2.9.1 Propiedades de los materiales fonoabsorbentes	35
2.10 SILENCIADORES DISIPATIVOS	37
CAPÍTULO 3 MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS	39
3.1 INTRODUCCIÓN.....	39
3.2 ENFOQUE MATEMÁTICO	40
3.2.1 Formulación de elementos finitos.....	40
3.2.2 Propiedades heterogéneas acústicas del material absorbente.....	43
3.2.3 Impedancia acústica del conducto perforado	44
CAPÍTULO 4 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	45
4.1 INTRODUCCIÓN.....	45
4.2 GEOMETRÍA DEL SILENCIADOR	45
4.3 MATERIAL FONOABSORBENTE EMPLEADO	46
4.4 SUPERFICIE PERFORADA EMPLEADA	47
4.5 CASOS DE ESTUDIO	47
4.6 TEMPERATURAS EN EL INTERIOR DEL SILENCIADOR	48
4.6.1 Temperaturas constantes.....	49
4.6.2 Gradiente de temperaturas.....	49
CAPÍTULO 5 PROCEDIMIENTO EN APDL	51
5.1 INTRODUCCIÓN.....	51

5.2	ANSYS PARAMETRIC DESIGN LANGUAGE	51
5.3	LENGUAJE DE MACROS	51
CAPÍTULO 6 PROCEDIMIENTO EN WORKBENCH		63
6.1	INTRODUCCIÓN.....	63
6.2	INTERFAZ PRINCIPAL DE TRABAJO	64
6.3	PROPIEDADES DE LOS MATERIALES	66
6.4	GEOMETRÍA DEL PROBLEMA	69
6.5	MALLADO	74
6.6	CONDICIONES DE CONTORNO	76
6.7	PROCESADO DEL ANÁLISIS Y RESULTADOS	83
CAPÍTULO 7 VALIDACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS PROPUESTAS.....		87
7.1	INTRODUCCIÓN.....	87
7.2	COMPARATIVA DE RESULTADOS.....	88
7.2.1	Caso 1	88
7.2.2	Caso 2	88
7.2.3	Caso 3	89
7.2.4	Caso 4	89
CAPÍTULO 8 ANÁLISIS DE RESULTADOS		91
8.1	INTRODUCCIÓN.....	91
8.2	EFFECTO DEL CONDUCTO PERFORADO	92
8.3	EFFECTO DE LA LONGITUD DE LA CÁMARA DE EXPANSIÓN	94
8.4	EFFECTO DEL RADIO DE LA CÁMARA DE EXPANSIÓN	96
8.5	EFFECTO DE LA DENSIDAD DE COMPACTACIÓN DEL MATERIAL ABSORBENTE.....	98
8.6	EFFECTO DE LA POROSIDAD DEL CONDUCTO PERFORADO.....	100
8.7	EFFECTO DEL NÚMERO DE DIVISIONES DEL GRADIENTE TÉRMICO.....	101
CAPÍTULO 9 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.....		103
9.1	CONCLUSIONES.....	103
9.2	LÍNEAS FUTURAS	104
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		106
PRESUPUESTO.....		107
INTRODUCCIÓN.....		109
AMORTIZACIÓN DE LOS EQUIPOS.....		109
UNIDADES DE OBRA		110
COSTE TOTAL DEL TRABAJO		113
PLANOS		115
ÍNDICE DE LOS PLANOS		117
Plano de la geometría del caso 1		118
Plano de la geometría del caso 1a		119
Plano de la geometría del caso 1b		120
ANEXOS.....		121
ANEXO A. MÉTODO DE CÁLCULO DE LAS PROPIEDADES DEL MATERIAL ABSORBENTE		123
ANEXO B. MÉTODO DE CÁLCULO DE LA IMPEDANCIA DE LA SUPERFICIE PERFORADA.....		126
ANEXO C. MACROS APDL		129
Silenciador disipativo sin conducto perforado y temperaturas constantes		129
Silenciador disipativo con conducto perforado y temperaturas constantes.....		133
Silenciador disipativo sin conducto perforado y temperaturas constantes		139
ANEXO D. COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE APDL Y WORKBENCH		145

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1. Onda longitudinal (izquierda) y onda transversal (derecha) (Universidad Nacional Autónoma de México, 2010).</i>	25
<i>Figura 2. Presión sonora en dos puntos.</i>	26
<i>Figura 3. Comportamiento armónico de una onda plana.</i>	27
<i>Figura 4. Cambio de medio de propagación de una onda plana.</i>	31
<i>Figura 5. Cambio de sección de un conducto.</i>	32
<i>Figura 6. Cambio de sección en un silenciador disipativo.</i>	34
<i>Figura 7. Conducto perforado de un silenciador disipativo.</i>	34
<i>Figura 8. Silenciador disipativo con material absorbente heterogéneo y conducto perforado (Antebas, Denia, Pedrosa, & Fuenmayor, 2013).</i>	40
<i>Figura 9. Geometría y dimensiones de la geometría del silenciador disipativo.</i>	46
<i>Figura 10. Casos de estudio.</i>	48
<i>Figura 11. Temperatura constante en el interior del silenciador.</i>	49
<i>Figura 12. Gradiente térmico en el interior del silenciador.</i>	49
<i>Figura 13. Flujograma de explicación de las macros de APDL.</i>	52
<i>Figura 14. Datos de entrada (Flujograma APDL).</i>	53
<i>Figura 15. Datos de entrada (Flujograma APDL).</i>	54
<i>Figura 16. Cálculo pendiente gradiente térmico y características geométricas del silenciador (Flujograma APDL).</i>	54
<i>Figura 17. Cálculo propiedades del conducto de entrada y salida de la cámara disipativa.</i>	55
<i>Figura 18. Cálculo propiedades del conducto central interior.</i>	56
<i>Figura 19. Cálculo propiedades del conducto perforado.</i>	57
<i>Figura 20. Cálculo propiedades de la cámara disipativa.</i>	57
<i>Figura 21. Formación de los volúmenes del silenciador.</i>	58
<i>Figura 22. Mallado de volúmenes y asignación de materiales, parte 1.</i>	59
<i>Figura 23. Mallado de volúmenes y asignación de materiales, parte 2.</i>	60
<i>Figura 24. Condiciones de excitación a la entrada y salida del silenciador.</i>	61
<i>Figura 25. Condiciones de contorno en la superficie perforada.</i>	61
<i>Figura 26. Cálculo de la solución y post-proceso.</i>	62
<i>Figura 27. Pérdida de transmisión vs Frecuencia.</i>	62
<i>Figura 28. Ventana de salida de resultados.</i>	62
<i>Figura 29. Interfaz principal Ansys Workbench.</i>	64
<i>Figura 30. Barra superior de herramientas.</i>	64
<i>Figura 31. Caja de herramientas.</i>	65
<i>Figura 32. Tipos de sistemas de análisis.</i>	65
<i>Figura 33. Unidades de trabajo.</i>	65
<i>Figura 34. Menú de trabajo del análisis "Harmonic Acoustics".</i>	66
<i>Figura 35. Pestaña "Engineering Data".</i>	66
<i>Figura 36. Propiedades de los materiales del silenciador.</i>	67
<i>Figura 37. Propiedad "Complex Density and Velocity".</i>	67
<i>Figura 38. Opción de importar datos tabulares en "Complex Density and Velocity".</i>	68
<i>Figura 39. Importación de datos tabulares en "Complex Density and Velocity".</i>	68
<i>Figura 40. Definición de la matriz de densidad y velocidad del sonido del material absorbente.</i>	68
<i>Figura 41. Pestaña "Refresh Project".</i>	69
<i>Figura 42. Selección "DesignModeler" para realizar la geometría.</i>	69
<i>Figura 43. Espacio de diseño de "DesignModeler".</i>	70

<i>Figura 44. Herramientas para realizar la geometría: pestaña “Sketching”</i>	70
<i>Figura 45. Geometría del silenciador sin dimensionar</i>	71
<i>Figura 46. Dimensiones de la geometría del silenciador</i>	71
<i>Figura 47. Valores de las cotas de la geometría del silenciador</i>	72
<i>Figura 48. Opciones de revolución de un sólido</i>	72
<i>Figura 49. Revolución de la geometría del silenciador</i>	72
<i>Figura 50. Árbol de trabajo (I)</i>	73
<i>Figura 51. Árbol de trabajo (II)</i>	73
<i>Figura 52. Silenciador sólido</i>	73
<i>Figura 53. Interfaz de la pestaña “Model”</i>	74
<i>Figura 54. Asignación de material al sólido</i>	74
<i>Figura 55. Árbol de trabajo</i>	75
<i>Figura 56. Configuración del método de mallado</i>	75
<i>Figura 57. Mallado del silenciador</i>	76
<i>Figura 58. Configuración del puerto de entrada</i>	77
<i>Figura 59. Puerto de entrada al silenciador</i>	77
<i>Figura 60. Sólidos de la superficie perforada</i>	77
<i>Figura 61. Puertos de entrada y salida de la superficie perforada</i>	78
<i>Figura 62. Configuración de las paredes rígidas</i>	78
<i>Figura 63. Paredes rígidas del silenciador</i>	78
<i>Figura 64. Configuración de la excitación en la entrada</i>	79
<i>Figura 65. Excitación en la entrada del silenciador</i>	79
<i>Figura 66. Configuración de la entrada y salida anecoica</i>	79
<i>Figura 67. Salida anecoica del silenciador</i>	80
<i>Figura 68. Configuración de la matriz de admitancias</i>	81
<i>Figura 69. Valores de la matriz de admitancias</i>	82
<i>Figura 70. Progreso del árbol del proyecto</i>	83
<i>Figura 71. Configuración de las opciones del análisis acústico</i>	84
<i>Figura 72. Configuración del TL</i>	84
<i>Figura 73. Valores del TL frente a la frecuencia para el caso de silenciador disipativo con superficie perforada y gradiente térmico</i>	85
<i>Figura 74. Valores tabulados de la simulación anterior</i>	85

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Coeficientes para el cálculo del número de onda complejo y la impedancia característica de algunos materiales fonoabsorbentes (Denia, Fenómenos de Propagación, 2019).</i>	36
<i>Tabla 2. Dimensiones de la geometría del silenciador disipativo.</i>	46
<i>Tabla 3. Propiedades de la fibra de vidrio texturizada.</i>	46
<i>Tabla 4. Propiedades de la superficie perforada.</i>	47
<i>Tabla 5. Temperaturas de cada división de la cámara de expansión.</i>	50
<i>Tabla 6. Horas empleadas en la realización del TFM.</i>	109
<i>Tabla 7. Amortización y tasa horaria de los equipos utilizados.</i>	110
<i>Tabla 8. Amortización y tasa horaria de los programas utilizados.</i>	110
<i>Tabla 9. UO01: Búsqueda y lectura de información y trabajos previos.</i>	111
<i>Tabla 10. UO02: Estudio del programa Ansys y diseño de los diferentes casos de estudio.</i>	111
<i>Tabla 11. UO03: Procesado y análisis de resultados.</i>	112
<i>Tabla 12. UO04: Redacción de la memoria y creación de planos.</i>	112
<i>Tabla 13. UO05: Revisión del trabajo y corrección de dudas.</i>	113
<i>Tabla 14. Coste total del Trabajo Fin de Máster.</i>	113
<i>Tabla 15. Coeficientes para el cálculo del número de onda complejo y la impedancia característica de la fibra de vidrio texturizada (Denia, Fenómenos de Propagación, 2019).</i>	124
<i>Tabla 16. Cálculo de parámetros dependientes de la temperatura y términos constantes del material absorbente.</i>	124
<i>Tabla 17. Cálculo complejo de la impedancia característica y longitud de onda en función de la frecuencia.</i>	125
<i>Tabla 18. Cálculo complejo de la velocidad y densidad del aire en función de la frecuencia.</i>	125
<i>Tabla 19. Tabla final de las propiedades del material absorbente para importar a Ansys Workbench.</i>	125
<i>Tabla 20. Cálculo de parámetros variables y términos constantes de la superficie perforada.</i>	127
<i>Tabla 21. Cálculo complejo de la impedancia característica y longitud de onda en función de la frecuencia.</i>	127
<i>Tabla 22. Cálculo de la impedancia acústica del perforado.</i>	128
<i>Tabla 23. Cálculo de los coeficientes de admitancias Y_{11} e Y_{12}.</i>	128
<i>Tabla 24. Tabla final de los coeficientes de admitancias de la superficie perforada para importar a Ansys Workbench.</i>	128

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Comparativa resultados APDL vs Workbench: Caso 1.	88
Gráfica 2. Comparativa resultados APDL vs Workbench: Caso 2.	88
Gráfica 3. Comparativa resultados APDL vs Workbench: Caso 3.	89
Gráfica 4. Comparativa resultados APDL vs Workbench: Caso 4.	89
Gráfica 5. Efecto del conducto perforado. Caso 1 (líneas continuas) y caso 2 (líneas discontinuas).	92
Gráfica 6. Efecto del conducto perforado. Caso 3 (línea roja) y caso 4 (línea azul).	93
Gráfica 7. Efecto de la longitud de la cámara de expansión. Caso 1a.	94
Gráfica 8. Efecto de la longitud de la cámara de expansión. Caso 2a.	94
Gráfica 9. Efecto de la longitud de la cámara de expansión. Caso 3a (izquierda) y 4a (derecha).	95
Gráfica 10. Efecto del radio de la cámara de expansión. Caso 1b.	96
Gráfica 11. Efecto del radio de la cámara de expansión. Caso 2b.	96
Gráfica 12. Efecto del radio de la cámara de expansión. Caso 3b (izquierda) y 4b (derecha).	97
Gráfica 13. Efecto de la densidad de compactación del material absorbente. Caso 1c.	98
Gráfica 14. Efecto de la densidad de compactación del material absorbente. Caso 2c.	98
Gráfica 15. Efecto de la densidad de compactación del material absorbente. Caso 3c (izquierda) y 4c (derecha).	99
Gráfica 16. Efecto de la porosidad del conducto perforado. Caso 4.	100
Gráfica 17. Efecto del número de divisiones del gradiente térmico.	101
Gráfica 18. Comparación APDL vs Workbench. Caso 1a.	145
Gráfica 19. Comparación APDL vs Workbench. Caso 1b.	145
Gráfica 20. Comparación APDL vs Workbench. Caso 1c.	146
Gráfica 21. Comparación APDL vs Workbench. Caso 2a.	146
Gráfica 22. Comparación APDL vs Workbench. Caso 2b.	147
Gráfica 23. Comparación APDL vs Workbench. Caso 2c.	147
Gráfica 24. Comparación APDL vs Workbench. Caso 3a.	148
Gráfica 25. Comparación APDL vs Workbench. Caso 3b.	148
Gráfica 26. Comparación APDL vs Workbench. Caso 3c.	149
Gráfica 27. Comparación APDL vs Workbench. Caso 4a.	149
Gráfica 28. Comparación APDL vs Workbench. Caso 4b.	150
Gráfica 29. Comparación APDL vs Workbench. Caso 4c.	150

MEMORIA

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN

En la actualidad, vivimos rodeados de multitud de tipos de sonidos. Muchos de ellos resultan ser agradables al oído, como es escuchar una canción, el sonido de la lluvia en la ventana, las olas del mar al romper... pero, por otro lado, existen sonidos que resultan ser perjudiciales para la salud, y que en adelante denominaremos ruido.

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), el ruido se sitúa en la segunda posición de las principales causas ambientales de problemas de salud, ocupando la contaminación atmosférica el primer lugar. En concreto, el ruido provocado por el tráfico rodado, sobre todo en ciudades, es la principal fuente de contaminación acústica hoy en día.

Gracias a los avances tecnológicos de la sociedad en la que vivimos, existen numerosos medios de transporte para desplazarse de un punto a otro. El automóvil es, sin duda, el medio de transporte más común entre todos los ciudadanos para viajes cortos. En cuanto a su funcionamiento, el motor representa el corazón del automóvil. El sistema de escape, que transporta los gases de combustión generados por el motor hasta la atmósfera, tiene, entre otros objetivos, reducir el sonido generado por el gas de escape. El componente que se encarga de esta tarea es lo que conocemos como silenciador.

Por lo tanto, resulta muy interesante analizar el comportamiento acústico de un componente, como es el silenciador, que ayuda disminuir la contaminación acústica en el mundo a través del desarrollo de un Trabajo Fin de Máster.

1.2 ANTECEDENTES

A lo largo de estas últimas dos décadas, el Centro de Investigación en Ingeniería Mecánica de la Universitat Politècnica de València se ha involucrado en la investigación del comportamiento acústico de las ondas sonoras cuando se propagan en el interior de un sistema de gases de escape,

centrándose, en este caso, en uno de sus componentes que lo forman: el silenciador. Para ello, se han desarrollado diferentes proyectos y trabajos relacionados con el modelado y análisis de silenciadores acústicos mediante elementos finitos.

Por un lado, (Denia, Sánchez, Martínez, & Kirby, 2015) desarrollan un modelo mixto de elementos finitos para el análisis acústico de silenciadores disipativos perforados, sometidos a altas temperaturas y gradientes térmicos en el conducto central y en el material absorbente, así como la presencia de conducto perforado, con el objetivo de comprobar el efecto que presentan en el comportamiento acústico del silenciador, dado por el índice de pérdidas de transmisión. (Denia, Selamet, Fuenmayor, & Kirby, 2007) investigan el comportamiento acústico de silenciadores circulares disipativos perforados con entradas y salidas extendidas mediante un enfoque analítico de dos dimensiones en el que la presión y la velocidad acústica coinciden a través de discontinuidades geométricas, así como la utilización del método de elementos finitos para su análisis.

Por otro lado, (Munuera, 2019) ha desarrollado e implementado una metodología numérica detallada, simulando y caracterizando el comportamiento acústico de silenciadores puramente reactivos y disipativos, teniendo en cuenta la presencia de conducto perforado.

El presente TFM se enmarca en una de las líneas de trabajo del Centro de Investigación en Ingeniería Mecánica, relacionada con vibraciones, acústica y control de ruido, y supone una continuación de trabajos anteriores (Gárate, 2020). Tanto esta línea como los proyectos de investigación y los trabajos citados constituyen una base contundente para la realización de este Trabajo Fin de Máster, en el que se pretende diseñar, modelar y analizar silenciadores disipativos con influencia de altas temperaturas y gradientes térmicos mediante las dos versiones del programa de cálculo a través de elementos finitos Ansys, denominadas Ansys APDL y Ansys Workbench.

1.3 OBJETIVOS DE ESTE TRABAJO

El principal objetivo de este trabajo es el desarrollo y la implementación de metodologías numéricas de elementos finitos para el análisis acústico de los silenciadores disipativos, así como evaluar la influencia de éstos cuando son sometidos a altas temperaturas y a gradientes térmicos.

Para hacer frente a esto, se van a emplear dos tipos de software, como Ansys APDL y Ansys Workbench, con los que se van a analizar diferentes casos de estudio propuestos.

Además, se va llevar a cabo una validación de los resultados obtenidos de los casos de estudio mencionados, comprobando cómo influyen en la atenuación del silenciador disipativo.

De forma pormenorizada, los objetivos de este trabajo son:

- Desarrollar e implementar metodologías numéricas de elementos finitos para analizar acústicamente un silenciador disipativo, mediante los softwares Ansys APDL y Ansys Workbench, cuando se le somete a altas temperaturas y gradientes térmicos.
- Comprobar que los resultados obtenidos con ambos softwares para los diferentes casos de estudio coinciden, así como validar el uso de ambos softwares para el análisis y modelado acústico de los silenciadores disipativos.
- Evaluar el efecto producido en la atenuación del silenciador disipativo cuando se le somete a la variación de determinados parámetros propios de éste.

Capítulo 2

FUNDAMENTOS DE ACÚSTICA DE CONDUCTOS Y SILENCIADORES

2.1 INTRODUCCIÓN

En este primer capítulo se presenta y desarrollan los fundamentos acústicos de conductos y silenciadores. Antes de centrarse en conductos y silenciadores, resulta necesario introducir ciertos aspectos teóricos, que servirán de base en todas las explicaciones posteriores.

El sonido se propaga mediante ondas sonoras y su forma de propagación es a través de un medio. Por ello, se mencionan los diferentes tipos de medios existentes, centrándose en el medio más común y utilizado en este trabajo: el aire.

Siguiendo con lo anterior, se detallan y desarrollan las tipologías de onda sonora en función de diferentes criterios, así como una serie de conceptos básicos del comportamiento de éstas cuando se propagan por un medio.

El estudio del trabajo se centra en las ondas planas, presentes en el interior de los silenciadores, pudiendo ser progresivas, regresivas y estacionarias. Además, se obtiene la ecuación de ondas plana, la energía que transmiten a las partículas de un medio, así como la impedancia acústica del propio medio, parámetro importante ya que varía en función del medio que se tenga.

Por otro lado, el aire o gases que circulan por el interior del silenciador se ven sometidos a diferentes situaciones, como pueden ser la presencia de más de un medio de propagación, así como diferentes geometrías en los conductos. Por ello, se estudian cada uno de estos casos reales y se obtiene el índice de medida de transmisión del ruido que se va a utilizar en este trabajo.

Además, en el interior de un silenciador disipativo existe la presencia de materiales fonoabsorbentes y superficies o conductos perforados. En estos apartados se estudia la variación

del comportamiento que sufre la onda a su paso por estos, así como la obtención de las impedancias acústicas que los materiales fonoabsorbentes y la superficie perforada presentan, modificando notablemente el índice de pérdidas de transmisión anteriormente comentado.

Por último, se define el concepto de silenciador, detallando los diferentes tipos que existen y centrándose en el silenciador disipativo.

2.2 AIRE COMO MEDIO DE PROPAGACIÓN

El medio de propagación es una “plataforma” que permite la propagación del sonido u ondas sonoras a través de ella. El medio más común es el aire, pues por razones meramente prácticas, la mayoría de situaciones en las que se propaga el sonido en nuestro día a día es a través de la comunicación entre personas. No obstante, el medio puede ser también líquido (agua) o sólido (madera).

En este Trabajo Fin de Máster, el medio de propagación empleado es el aire, encontrándose presente en el interior del silenciador. Se trata de un medio de propagación gaseoso y se define a partir de su densidad y la velocidad de propagación.

2.2.1 Densidad

El aire presenta una serie de propiedades principales como son: presión (Pa), densidad (kg/m³), temperatura (°C), capacidad calorífica (J/kg °C), viscosidad (Pa s) y conductividad térmica (W/m °C).

Haciendo uso de las tres primeras propiedades y utilizando la ecuación de gas perfecto, se obtiene la densidad en función de la temperatura:

$$\rho_T = \frac{P_T \cdot M_m}{R \cdot T} \quad (1)$$

2.2.2 Velocidad de propagación

La velocidad de propagación es la velocidad a la que se propaga una onda en el espacio. Suponiendo que el proceso de propagación es adiabático y haciendo uso de la ecuación (1), se obtiene:

$$c = \sqrt{\frac{\gamma \cdot P_T}{\rho_T}} = \sqrt{\frac{\gamma \cdot R \cdot T}{M_m}} \quad (2)$$

Donde los términos constantes en (1) y (2) se corresponden con: R = 8,314 J(K mol); M_m = 0,02897 kg/mol; P_T = 101325 Pa.

El mismo planteamiento se obtiene para los medios de propagación en estado líquido y sólido, pero no se entra en detalle en este trabajo. Para más información, se puede consultar la referencia (Denia, La Ecuación de Ondas, 2019).

2.3 TIPOS DE ONDAS

2.3.1 Ondas longitudinales y transversales

Este tipo de ondas se diferencian entre sí según el movimiento de las partículas que la componen.

En el caso de las **ondas longitudinales**, las partículas que componen el medio oscilan en la misma dirección en la que avanza la perturbación. Éstas pueden propagarse en gases, líquidos y sólidos.

En el caso de las **ondas transversales**, las partículas que componen el medio oscilan en dirección transversal a la dirección de avance de la perturbación. Éstas se propagan, sobre todo, en sólidos, ya que necesitan que el medio pueda transmitir tensión tangencial.

Un ejemplo de éstas se puede observar en la Figura 1:

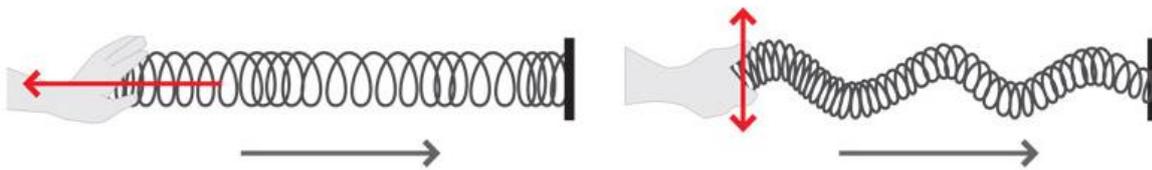


Figura 1. Onda longitudinal (izquierda) y onda transversal (derecha) (Universidad Nacional Autónoma de México, 2010).

2.3.2 Ondas planas, cilíndricas y esféricas

Este tipo de ondas se diferencian entre sí según la forma de propagación de las partículas que la componen. Antes de definir cada una de éstas, conviene introducir el concepto de frente de onda.

Se define como frente de onda al lugar geométrico en el que se encuentran todos los puntos que, en un determinado instante, se encuentran en el mismo estado de vibración o, dicho de otra forma, presentan igual fase.

Las **ondas planas** u ondas unidimensionales son aquellas que se propagan en una sola dimensión, produciendo frentes de ondas paralelos y de amplitud constante cuya dirección normal es coincidente con la dirección de propagación de la onda.

Las **ondas cilíndricas** u ondas bidimensionales son aquellas que se propagan en un plano, produciendo frente de ondas circulares y concéntricos cuyo eje o centro es el punto exacto donde ha sido generada la onda. Conforme las ondas se van alejando del centro, presentan mayor radio y, por tanto, diferente comportamiento respecto a las demás. Un ejemplo típico es la onda producida al dejar caer un cuerpo en el agua.

Las **ondas esféricas** u ondas tridimensionales son aquellas que se propagan de igual manera en todas las direcciones, siendo los frentes de ondas esferas concéntricas cuyo centro es la propia fuente. El comportamiento de los frentes, en este caso, dependerá del radio y del tiempo, igual que ocurre en las ondas cilíndricas.

2.4 PROPAGACIÓN DE ONDAS

Una vez finalizado el apartado anterior, se sabe que los parámetros “tiempo” y “posición” son muy útiles a la hora de definir el comportamiento de una onda sonora en un medio. Para verlo de una

manera más visual, en la Figura 2 se representa una onda sonora, en la cual, si se escogen dos puntos como pueden ser los picos de ésta y se obtiene la presión en cada uno de ellos, se observa una diferencia clara: no coinciden en el tiempo.

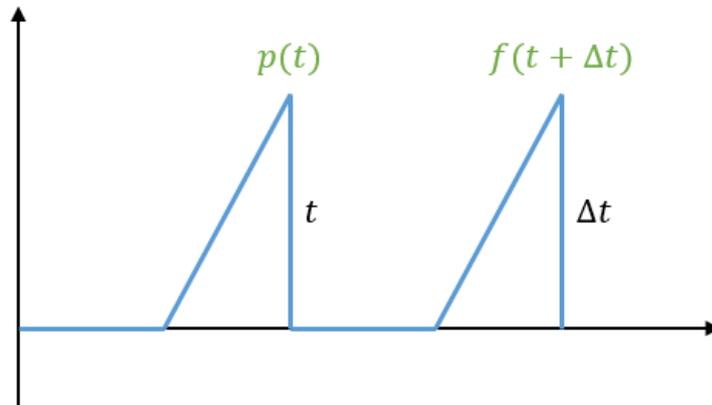


Figura 2. Presión sonora en dos puntos.

Por lo tanto, ambos sonidos serán iguales con la excepción anterior, obteniéndose la ecuación siguiente:

$$p(t) = f(t + \Delta t) \quad (3)$$

Además, sabiendo:

$$\Delta t = \frac{x}{c_0} \rightarrow \text{Generalizando: } p(t) = f\left(t \pm \frac{x}{c_0}\right) \quad (4)$$

Una vez se conoce la expresión del campo de presiones para una onda que se propaga en un medio, ésta puede representarse en función de senos o cosenos. Esto se debe a que, de manera general y haciendo simplificaciones, las ondas se propagan con una única frecuencia principal o fundamental. La expresión de una onda sonora con comportamiento armónico se puede observar en la Figura 3 y viene dada por:

$$p(x, t) = p_0 \cos \omega \left(t - \frac{x}{c_0} \right) \rightarrow p(x, t) = p_0 \cos(\omega t - kx) \quad (5)$$

Donde p_0 corresponde con la amplitud de la señal; $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$ con la velocidad angular y $k = \omega/c_0$ con el número de onda.

La ecuación (5) se puede escribir de una manera más sencilla, haciendo uso de la notación compleja. Para ello, se hace uso de la fórmula de Euler:

$$e^{jz} = \cos z + j \operatorname{sen} z \quad (6)$$

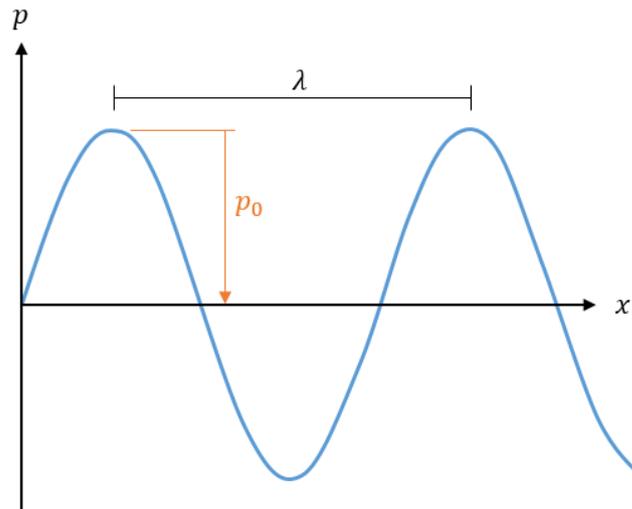


Figura 3. Comportamiento armónico de una onda plana.

Quedando la expresión cosenoidal de la onda:

$$p(x, t) = p_0 \cos(\omega t - kx) = \text{Re}\{p_0 e^{j(\omega t - kx)}\} = \text{Re}\{p_0 e^{-jkx} e^{j\omega t}\} \quad (7)$$

Por otro lado, la amplitud compleja viene dada por:

$$\widehat{p}_0 = p_0 e^{-jkx} \quad (8)$$

Y sustituyendo en (7):

$$p(x, t) = \text{Re}\{\widehat{p}_0 e^{j\omega t}\} \quad (9)$$

2.5 ONDAS PROGRESIVAS, REGRESIVAS Y ESTACIONARIAS

Una vez se tiene una cierta base sobre la propagación de los diferentes tipos de ondas en los numerosos medios posibles, conviene explicar las ondas progresivas, regresivas y estacionarias.

Las **ondas progresivas** son aquellas que se propagan en sentido creciente de la coordenada espacial y presentan la función $f(ct-x)$. En el caso de una onda plana, la onda se propagaría en el sentido positivo de la coordenada x , por lo tanto, su forma de onda e impedancia compleja es (Bresó, 2016):

$$p(x, t) = p_0 \cos(\omega t - kx) \rightarrow \widehat{p}_0 = p_0 e^{-jkx} \quad (10)$$

Las **ondas regresivas** son aquellas que se propagan en sentido decreciente de la coordenada espacial y presentan la función $f(ct+x)$. En el caso de una onda plana, la onda se propagaría en el sentido negativo de la coordenada x , por lo tanto, su forma de onda e impedancia compleja es (Bresó, 2016):

$$p(x, t) = p_0 \cos(\omega t + kx) \rightarrow \widehat{p}_0 = p_0 e^{jkx} \quad (11)$$

Las **ondas estacionarias** son aquellas que no presentan flujo de energía. Se producen cuando una onda progresiva incide sobre un obstáculo, creando una onda regresiva en sentido contrario.

2.6 ECUACIÓN DE ONDAS PLANAS

La ecuación de ondas es una forma de expresar la propagación de la perturbación de una onda. En este trabajo se centran los estudios y desarrollos en las ondas planas, ya que son las ondas presentes en el interior de los conductos del silenciador. A la hora de obtener la ecuación de ondas final, existen numerosos pasos y simplificaciones que se llevan a cabo para la deducción de ésta. Si se quiere conocer la deducción completa, puede hacerlo siguiendo la referencia (Denia, La Ecuación de Ondas, 2019).

La ecuación de ondas tiene la siguiente forma:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \quad (12)$$

Para la deducción de ésta, es necesario partir de las ecuaciones de dinámica, continuidad y estado. Además, es necesario aplicar las siguientes hipótesis:

$$p_T = p_0 + p \quad \text{siendo } p \ll p_0 \quad (13)$$

$$\rho_T = \rho_0 + \rho \quad \text{siendo } \rho \ll \rho_0 \quad (14)$$

$$u_T = u_0 + u \quad \text{siendo } u_0 = 0 \text{ (no hay flujo medio)} \quad (15)$$

La solución de la ecuación de ondas presenta la siguiente forma:

$$p(x, t) = f(ct - x) + g(ct + x) \quad (16)$$

Y como se ha visto en el apartado 2.4, se puede expresar de la siguiente manera:

$$p(x, t) = A \cos(\omega t - kx + \varphi_1) + B \cos(\omega t + kx + \varphi_2) \quad (17)$$

Donde el primer término corresponde con la onda progresiva y el segundo con la onda regresiva. En notación compleja, se expresa:

$$p(x, t) = \hat{A} e^{j(\omega t - kx)} + \hat{B} e^{j(\omega t + kx)} \quad (18)$$

Y, como se sabe, los términos \hat{A} y \hat{B} corresponden con las amplitudes complejas. Una vez se ha deducido la ecuación de ondas, el campo acústico se definirá principalmente según la presión y velocidad:

Presión:
$$p(x) = \hat{A} e^{-jkx} + \hat{B} e^{jkx} \quad (19)$$

Velocidad:
$$u(x) = \frac{1}{Z_0} (\hat{A} e^{-jkx} - \hat{B} e^{jkx}) \quad (20)$$

2.6.1 Energía

La energía que una onda le transmite a una partícula de un medio al incidir sobre ella, viene dada por una suma de la energía cinética del movimiento de las partículas, y la energía potencial debida a la compresibilidad del fluido. Por lo tanto, para caracterizar fuentes sonoras es muy útil la energía, aunque resulta muy común recurrir a la intensidad sonora. La intensidad sonora se define como la energía por unidad de tiempo (potencia) que fluye por una superficie unitaria perpendicular a la dirección de propagación. La intensidad instantánea puede calcularse como (Denia, La Ecuación de Ondas, 2019):

$$I(t) = p(t) u(t) \rightarrow \vec{I}(t) = p(t) \vec{u}(t) \quad (21)$$

Por otro lado, si se quiere obtener la potencia acústica es necesario realizar una integral de superficie, tal como:

$$Pot(t) = \int \vec{I}(t) d\vec{S} \quad (22)$$

Centrándose en casos de naturaleza temporal en régimen transitorio, los valores importantes a obtener son la intensidad y potencia media

$$\bar{I} = \frac{1}{T} \int_0^T I(t) dt = \frac{|\hat{P}|^2}{2\rho_0 c} = \frac{P_{eff}^2}{\rho_0 c}; \quad \bar{P} = \frac{1}{T} \int_0^T Pot(t) dt \quad (23)$$

2.6.2 Impedancia acústica

La impedancia acústica se puede definir como la resistencia que un medio, ya sea sólido, líquido o gaseoso, presenta cuando las ondas se propagan por él. Es decir, se trata de la facilidad que presenta un medio a la hora de propagar el sonido. Además, la impedancia acústica relaciona la presión acústica existente en un medio con la velocidad de las partículas de la siguiente forma:

$$Z = \frac{p}{v} \quad (24)$$

Para una onda plana progresiva, la impedancia característica de un medio se obtiene mediante el producto de la densidad y la velocidad del sonido en el medio:

$$Z_0 = \rho_0 c \quad (25)$$

La unidad de la impedancia en el sistema internacional es el rayl, kg/(m²s).

Para el caso de una onda plana regresiva, el resultado sería el mismo, pero cambiando el signo. En el caso de las ondas que circulan a través del aire por el interior de un silenciador disipativo, tratándose del caso del apartado 2.7, la impedancia característica corresponde con la ecuación (25). En el caso de materiales fonoabsorbentes, como pueden ser la fibra de vidrio, lana de basalto, etc., la impedancia puede presentar una parte real y una parte imaginaria. La obtención de ésta se define en el apartado 2.9.

2.6.3 Niveles sonoros

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. Una razón, entre otras, está asociada al rango de presiones e intensidades, que es muy amplio. La utilización de la escala logarítmica se realiza con el fin de “comprimir” dichos rangos de presiones e intensidades tan amplios y disponer de valores numéricos “manejables”. Las definiciones son: (Denia, La Ecuación de Ondas, 2019)

- Nivel de **intensidad** sonora:

$$L_I = 10 \log \left(\frac{I}{I_{ref}} \right) dB \quad I_{ref} = 10 \cdot 10^{-12} W/m^2 \quad (26)$$

- Nivel de **potencia** sonora:

$$L_W = 10 \log \left(\frac{Pot}{Pot_{ref}} \right) dB \quad Pot_{ref} = 10 \cdot 10^{-12} W \quad (27)$$

- Nivel de **presión** sonora:

$$L_p = 10 \log \left(\frac{P_{eff}}{P_{ref}} \right)^2 = 20 \log \left(\frac{P_{eff}}{P_{ref}} \right) dB \quad P_{ref} = 20 \cdot 10^{-6} Pa \quad (28)$$

Los valores de referencia que se pueden observar en cada uno de los niveles mostrados ($I_{ref}, Pot_{ref}, P_{ref}$) están fijados en el mínimo valor necesario para que el oído humano sea capaz de percibir un sonido.

2.7 ONDAS SONORAS EN CONDUCTOS

La propagación acústica en el interior de un silenciador se puede asemejar a una propagación de una onda acústica unidimensional por el interior de un conducto, la cual puede verse sometida a diversas situaciones, como son el cambio de medio por el que se propaga; el cambio de sección que pueda sufrir el conducto, ya que existe una cámara de expansión con geometría diferente a las secciones de entrada y salida de ella; la existencia de conducto perforado en el interior de la cámara de expansión, permitiendo la entrada de aire a la cámara de expansión; así como la presencia de material fonoabsorbente en el interior de ésta, que tiene como finalidad atenuar la onda sonora ante su salida al exterior.

2.7.1 Cambio de medio de propagación

Cuando una onda se propaga por un conducto, en el interior de éste se puede dar la presencia de dos medios diferentes, como puede ser aire/agua. Esta situación se puede observar en la Figura 4, donde cada uno presenta diferentes impedancias características $Z_1 = \rho_1 c_1$ y $Z_2 = \rho_2 c_2$.

Una onda plana progresiva que se propaga por el medio de propagación 1, incide en el plano de separación de ambos medios con su onda incidente en dirección perpendicular a éste. El resultado

será que parte de esta onda incidente se refleja como una onda regresiva en el medio 1, y la otra parte se transmite al medio 2.

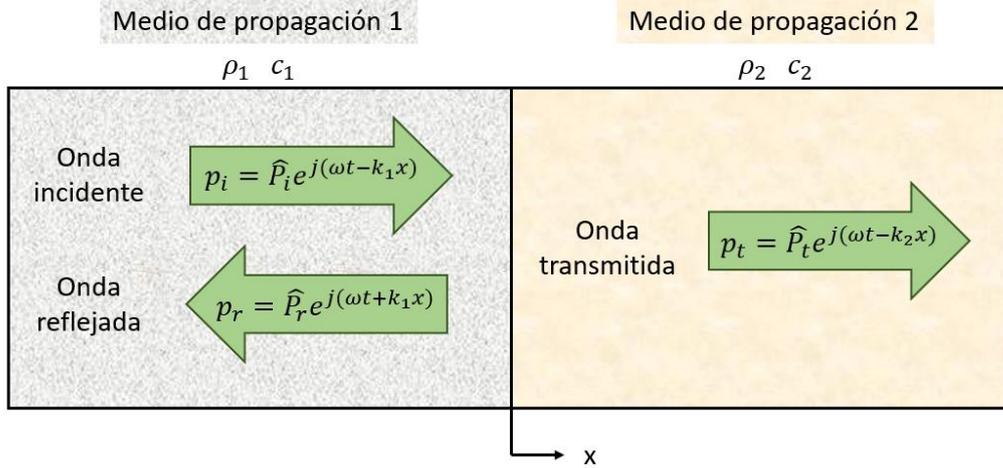


Figura 4. Cambio de medio de propagación de una onda plana.

Las tres ondas presentan la misma frecuencia, siendo la principal diferencia la velocidad del sonido en cada uno de los medios. Esto conlleva a que en el medio 2 el número de onda sea distinto al del medio 1, es decir, $k_1 \neq k_2$. Además, en el plano de separación de ambos medios se iguala la presión ($p_1 = p_2$) y velocidad ($u_1 = u_2$), obteniéndose:

$$p_1 = \widehat{P}_i e^{j(\omega t - k_1 x)} + \widehat{P}_r e^{j(\omega t + k_1 x)} \quad p_2 = p_t = \widehat{P}_t e^{j(\omega t - k_2 x)} \quad (29)$$

$$u_1 = \frac{1}{Z_1} (\widehat{P}_i e^{j(\omega t - k_1 x)} - \widehat{P}_r e^{j(\omega t + k_1 x)}) \quad u_2 = \frac{1}{Z_2} \widehat{P}_t e^{j(\omega t - k_2 x)} \quad (30)$$

Como en el plano de separación de ambos medios $x = 0$, se puede deducir:

$$p_1 = p_2 \rightarrow \widehat{P}_i + \widehat{P}_r = \widehat{P}_t \quad (31)$$

$$u_1 = u_2 \rightarrow \frac{\widehat{P}_i - \widehat{P}_r}{Z_1} = \frac{\widehat{P}_t}{Z_2} \quad (32)$$

Sustituyendo la ecuación (31) en la ecuación (32), se obtiene el coeficiente de reflexión. Este se puede definir como la relación existente entre la onda reflejada y la onda incidente:

$$R = \frac{\widehat{P}_r}{\widehat{P}_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (33)$$

Por otro lado, se define el coeficiente de reflexión de potencia como la relación entre la energía reflejada y la energía incidente:

$$\alpha_r = \frac{\overline{Pot}_r}{\overline{Pot}_i} = \left| \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right|^2 = |R|^2 \quad (34)$$

Pasando a las condiciones del medio 2, se obtiene el coeficiente de transmisión como la relación existente entre la onda transmitida y la onda incidente:

$$T = \frac{\widehat{P}_t}{\widehat{P}_i} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (35)$$

Al igual que ocurría con el caso anterior, se define el coeficiente de transmisión de potencia como la relación entre la energía transmitida y la energía incidente:

$$\alpha_t = \frac{\overline{Pot}_t}{\overline{Pot}_i} = |T|^2 \frac{Z_1}{Z_2} = 4 \frac{Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (36)$$

Centrándose en el silenciador, existe un índice que relaciona la potencia acústica incidente en éste y la potencia que se transmite al exterior al utilizarse una salida anecoica (no existe reflexión de la onda a la salida). Este índice sirve para caracterizar la acústica de materiales absorbentes y dispositivos de ruido y se denomina índice de pérdida de transmisión o TL:

$$TL = 10 \log \frac{\overline{Pot}_i}{\overline{Pot}_t} = 10 \log \frac{1}{\alpha_t} \quad (37)$$

2.7.2 Cambio de sección del conducto

Un silenciador disipativo está formado por la unión de varios conductos con diferentes tamaños y secciones. Estos cambios de sección son muy útiles para controlar las emisiones acústicas. En la Figura 5 se puede observar el conducto de entrada (conducto 1) y la cámara de expansión del silenciador (conducto 2), en los cuales se va a estudiar el comportamiento de una onda progresiva al pasar de un conducto a otro.

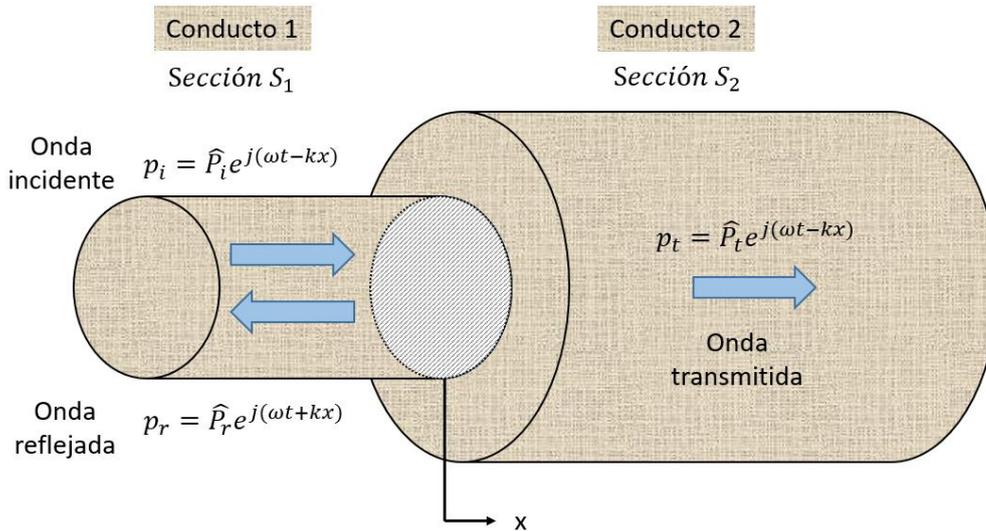


Figura 5. Cambio de sección de un conducto.

Al igual que ocurría en el apartado 2.7.1 cuando existían varios medios de propagación, la onda incidente se transmite y se refleja al llegar al plano de separación de ambos conductos (sección rallada en azul). En este plano, la coordenada X es igual a 0 y se cumplen las condiciones de continuidad de presión y flujo másico acústico:

$$p_1 = p_2 \rightarrow \widehat{P}_i + \widehat{P}_r = \widehat{P}_t \quad (38)$$

$$\rho_0 u_1 S_1 = \rho_0 u_2 S_2 \rightarrow \rho_0 \frac{\widehat{P}_i - \widehat{P}_r}{Z_0} S_1 = \rho_0 \frac{\widehat{P}_t}{Z_0} S_2 \rightarrow (\widehat{P}_i - \widehat{P}_r) S_1 = \widehat{P}_t S_2 \quad (39)$$

Del mismo modo, el coeficiente de reflexión se define como:

$$R = \frac{\widehat{P}_r}{\widehat{P}_i} = \frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} \quad (40)$$

El coeficiente de transmisión se define como:

$$T = \frac{\widehat{P}_t}{\widehat{P}_i} = \frac{2S_1}{S_1 + S_2} \quad (41)$$

Las potencias que asociadas a las ondas presentes en el cambio de sección son las siguientes:

$$\overline{Pot}_i = \bar{I}_i S_1 = \frac{|\widehat{P}_i|^2 S_1}{2\rho_0 c} \quad \overline{Pot}_r = \bar{I}_r S_1 = \frac{|\widehat{P}_r|^2 S_1}{2\rho_0 c} \quad \overline{Pot}_t = \bar{I}_t S_2 = \frac{|\widehat{P}_t|^2 S_2}{2\rho_0 c} \quad (42)$$

Y, por tanto, los coeficientes de reflexión y transmisión de potencia son, respectivamente:

$$\alpha_r = R^2 = \left(\frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} \right)^2 \quad \alpha_t = T^2 \frac{S_2}{S_1} = \frac{4 S_1 S_2}{(S_1 + S_2)^2} \quad (43)$$

Para este caso de cambio de sección, el índice de pérdidas de transmisión o TL viene dado por:

$$TL = 10 \log \frac{\overline{Pot}_i}{\overline{Pot}_t} = 10 \log \frac{\overline{Pot}_i}{\overline{Pot}_i - \overline{Pot}_r} = 10 \log \frac{1}{\alpha_t} = 10 \log \frac{(S_1 + S_2)^2}{4 S_1 S_2} \quad (44)$$

Como se puede observar, es un parámetro que depende de las características del silenciador, y es el más empleado para definir las curvas de atenuación de los silenciadores. Por lo tanto, en este Trabajo de Fin de Máster se empleará este parámetro.

En la Figura 5 sólo aparece un cambio de sección entre dos conductos, situación que se asemeja a la mitad del silenciador. Si se representan los cambios de sección de un silenciador completo, como se puede observar en la Figura 6, el índice de pérdidas de transmisión o TL sería:

$$TL = 10 \log \left(\frac{Pot_1^{PROG}}{Pot_3^{PROG}} \right) = 10 \log \left(\frac{|\widehat{P}_1|^2 S_1}{|\widehat{P}_3|^2 S_3} \right) = 20 \log \left(\left(\frac{S_1}{S_3} \right)^{\frac{1}{2}} \left| \frac{\widehat{P}_1}{\widehat{P}_3} \right| \right) \quad (45)$$

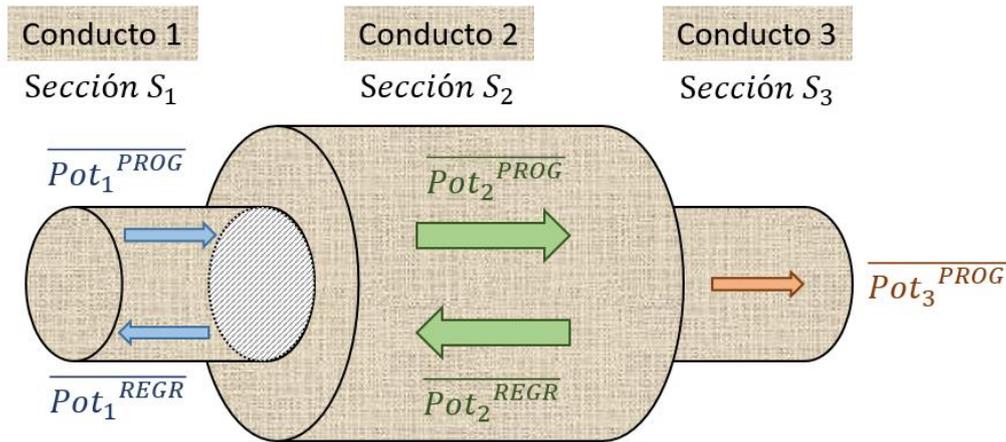


Figura 6. Cambio de sección en un silenciador disipativo.

2.8 ONDAS SONORAS EN CONDUCTOS PERFORADOS

Los tubos o conductos perforados son elementos presentes en el interior de la cámara de expansión de los silenciadores disipativos y están formados por numerosos orificios situados unos al lado de otros. Su principal función es la de separar el material fonoabsorbente, situado en la cámara de expansión, del conducto central, conducto por donde circula el aire o los gases de escape. Además, son imprescindibles en el guiado del flujo de aire que entra en el silenciador, pues ayudan a la disminución de las pérdidas de flujo y mejoran la calidad del ruido ocasionado en los cambios de sección. En la Figura 7 se puede observar el interior de un silenciador disipativo:

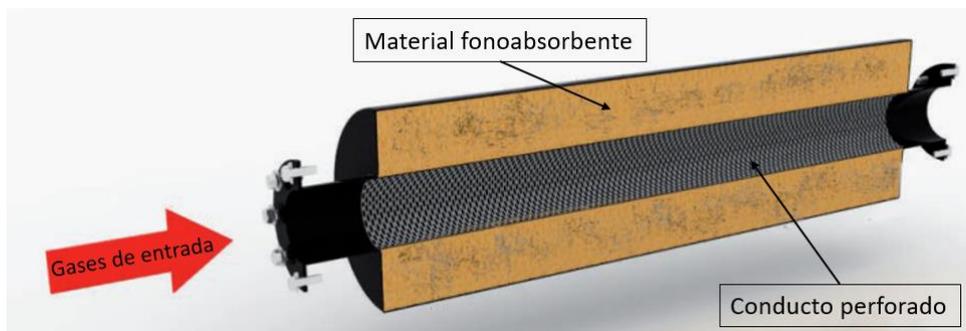


Figura 7. Conducto perforado de un silenciador disipativo.

A la hora de modelar un conducto perforado para el estudio de un silenciador disipativo, éste puede ser sustituido por una impedancia acústica compleja que representa el efecto de la existencia de este elemento en nuestro sistema. Por lo tanto, no es necesario modelar este componente de manera física, sino simplemente sustituirlo por una superficie que presente una oposición a las ondas sonoras idéntica a la que produciría el conducto perforado. La impedancia acústica es, por tanto, el parámetro más importante del modelado de tubos perforados. Se trata de una función compleja que depende de tres parámetros principales: el campo acústico, indicando si el flujo es transversal o tangencial; el nivel de presión acústica y la geometría y distribución de los elementos perforados que tiene en cuenta la porosidad. Estos son la forma y tamaño de los orificios, espesor de la pared de la placa perforada y distancia entre orificios (Munuera, 2019).

2.8.1 Impedancia acústica

El aire presente en el interior del silenciador disipativo recorre el conducto central, atravesando parte de este los orificios de la superficie perforada e introduciéndose en el material fonoabsorbente. A la relación entre la diferencia de presiones acústicas a la entrada y salida de la superficie perforada y la velocidad acústica con la que atraviesa dicha superficie se le denomina impedancia acústica Z_p de la superficie perforada y viene dada por:

$$Z_p = \frac{P_e - P_s}{|U|} = R_0 + jX_0 \quad (46)$$

Esta expresión presenta una parte real y otra imaginaria, es decir, es un valor complejo. Además, P_e corresponde con la presión acústica de entrada al orificio, P_s a la presión acústica de salida de un orificio, $|U|$ a la velocidad acústica media que atraviesa un orificio, R_0 corresponde con la resistencia de la impedancia acústica y X_0 con la reactancia.

El modelo elegido y comúnmente usado para caracterizar la superficie perforada es el propuesto por Sullivan y Crocker. Para un silenciador disipativo con presencia de material fonoabsorbente, se utiliza la siguiente ecuación:

$$Z_p = \rho_0 c_0 \frac{1}{\sigma} \left[6 \cdot 10^{-3} + jk_0 \left(t_h + 0,425 \left(1 + \frac{Z_{abs} \cdot k_{abs}}{\rho_0 c_0 k_0} \right) d_h \cdot F(\sigma) \right) \right] \quad (47)$$

Donde ρ_0 corresponde con la densidad del aire, c_0 con la velocidad del sonido en el aire, k_0 con el número de onda, t_h con el espesor de la superficie perforada, d_h con el diámetro de los orificios de la superficie perforada, σ con la porosidad de la superficie perforada, Z_{abs} y k_{abs} con la impedancia y el número de onda del material absorbente, parámetros que se explicarán en el apartado 2.9.

Además, se añade un factor de corrección $F(\sigma)$:

$$F(\sigma) = 0.5[(1 - 0.7\sqrt{\sigma}) + (1 - 1.41\sqrt{\sigma} + 0.34(\sqrt{\sigma})^3 + 0.07(\sqrt{\sigma})^5)] \quad (48)$$

2.9 MATERIALES FONOAHSORBENTES

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 M. J., 2010).

Como se vio en el apartado 2.6.2, la impedancia acústica del aire resultaba ser una magnitud real y constante. En el caso de materiales fonoabsorbentes, la impedancia característica es una magnitud compleja y dependiente de la frecuencia.

2.9.1 Propiedades de los materiales fonoabsorbentes

Los materiales absorbentes se pueden modelar como fluidos equivalentes mediante el uso de valores complejos y dependientes de la frecuencia de la velocidad del sonido c_{abs} y densidad ρ_{abs} (o, de manera equivalente, de la impedancia característica Z_{abs} y el número de onda k_{abs}).

Modelos empíricos como el propuesto por Delany y Bazley para materiales fibrosos son comúnmente usados para calcular c_{abs} y ρ_{abs} en términos de resistividad de flujo estacionario de aire R_{flujo} . Una vez se conoce la resistividad, las propiedades acústicas del material se pueden expresar en función de una serie de coeficientes $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7$ y a_8 , que provienen del ajuste matemático de una curva de medidas de laboratorio, y del parámetro de baja frecuencia $\xi = \frac{\rho_0 f}{R_{flujo}}$, donde ρ_0 es la densidad del aire y f es la frecuencia.

$$Z_{abs} = Z_0 [1 + a_5 (\xi)^{a_6} - j a_7 (\xi)^{a_8}] = Z_0 \left[1 + a_5 \left(\frac{\rho_0 f}{R_{flujo}} \right)^{a_6} - j a_7 \left(\frac{\rho_0 f}{R_{flujo}} \right)^{a_8} \right] \quad (49)$$

$$k_{abs} = k_0 [1 + a_3 (\xi)^{a_4} - j a_1 (\xi)^{a_2}] = k_0 \left[1 + a_3 \left(\frac{\rho_0 f}{R_{flujo}} \right)^{a_4} - j a_1 \left(\frac{\rho_0 f}{R_{flujo}} \right)^{a_2} \right] \quad (50)$$

La constante de propagación se puede obtener como:

$$\gamma = j \cdot k_{abs} = k_{aire} \left[a_1 \left(\frac{\rho_{aire} f}{R_{flujo}} \right)^{a_2} + j \left(1 + a_3 \left(\frac{\rho_{aire} f}{R_{flujo}} \right)^{a_4} \right) \right] \quad (51)$$

En este Trabajo Fin de Máster, las ecuaciones (49), (50) y (51) se van a emplear para evaluar las propiedades de un material absorbente para una distribución de temperaturas dada. En primer lugar, para cada temperatura, se obtienen las propiedades del aire: densidad ρ_0 , velocidad c_0 , impedancia característica $Z_0 = \rho_0 c_0$ y número de onda k_0 . La resistividad local se puede calcular con la ecuación de Christie:

$$R_{flujo} = R_0 \left(\frac{T + 273,15}{T_0 + 273,15} \right)^{0,6} \quad (52)$$

Donde $T_0 = 15^\circ C$ se toma como temperatura de referencia; R_0 corresponde con la resistividad del aire en el material a dicha temperatura de referencia; y T corresponde con el valor de temperatura que se quiera.

En la Tabla 1 se muestran los coeficientes mencionados anteriormente para tres materiales habitualmente utilizados en control de ruido.

Material	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8
Fibra de vidrio E	0,220	-0,585	0,201	-0,583	0,095	-0,669	0,169	-0,571
Lana de basalto	0,218	-0,605	0,128	-0,675	0,060	-0,766	0,138	-0,628
Fibra texturizada	0,189	-0,595	0,160	-0,577	0,095	-0,754	0,085	-0,732

Tabla 1. Coeficientes para el cálculo del número de onda complejo y la impedancia característica de algunos materiales fonoabsorbentes (Denia, Fenómenos de Propagación, 2019).

En el caso de este Trabajo Fin de Máster, el material fonoabsorbente a utilizar es la fibra de vidrio texturizada de Owens Corning, por lo que se usarán los coeficientes de la tercera fila de la Tabla 1.

Por último, se pueden obtener las propiedades acústicas c_{abs} y ρ_{abs} , comentadas al comienzo del apartado, a partir de la impedancia y número de onda del material, tal y como se muestra a continuación:

$$k_{abs} = \frac{\omega}{c_{abs}} \rightarrow c_{abs} = \frac{\omega}{k_{abs}} \quad ; \quad Z_{abs} = \rho_{abs} \cdot c_{abs} \rightarrow \rho_{abs} = \frac{Z_{abs}}{c_{abs}} \quad (53)$$

2.10 SILENCIADORES DISIPATIVOS

Un silenciador es un componente del sistema de escape de gases de los motores de combustión interna cuya función es reducir la transmisión de ruido hacia el exterior. En el proceso del diseño de un silenciador es necesario atender a una serie de criterios (Martínez M. J., 2010):

- *El criterio acústico*, este criterio determina que se debe alcanzar una atenuación mínima para un determinado rango de frecuencias.
- *El criterio aerodinámico y de operación*, en el que se marca una mínima caída de carga a través del silenciador dadas unas condiciones de flujo y temperatura determinadas.
- *El criterio geométrico y de instalación*, definiendo el volumen permisible del silenciador, su longitud, diámetro, peso, posición y las posibles restricciones geométricas de su instalación en el sistema de escape.

Atendiendo al principio de atenuación, los silenciadores pueden clasificarse en tres tipos: silenciadores reactivos, silenciadores disipativos y resonadores. Este Trabajo Fin de Máster se centra en los silenciadores disipativos.

Los silenciadores disipativos son aquellos en los que la atenuación acústica es producida por la utilización de materiales absorbentes de gran superficie específica, generalmente en forma de fibra (fibra de vidrio, lanas metálicas o de basalto, etc.). Presentan un amplio rango de frecuencias atenuadas tendiendo a incrementarse a medida que aumenta la superficie. Es decir, los materiales situados oponen una resistencia al flujo de aire que los atraviesa produciendo una fricción viscotérmica en los canales o poros que disipa en forma de calor la energía cinética del campo sonoro (Bresó, 2016).

En este tipo de silenciadores, la energía acústica empieza a disiparse cuando la onda entra en contacto con el material absorbente. Otro modo de disipación de la energía acústica es con la introducción de conductos perforados. Cuando la onda atraviesa los pequeños orificios de dicha superficie, se introduce una disipación adicional.

En cuanto al rango de frecuencias de trabajo, los silenciadores disipativos atenúan con gran efectividad cuando los ruidos presentan altas frecuencias o un amplio espectro de frecuencias. Sin embargo, a bajas frecuencias, no es aconsejable su uso.

Un inconveniente que presentan los silenciadores disipativos es el deterioro que puede sufrir el material absorbente debido a los gases calientes que entran en contacto con ellos, pudiendo llegar a desintegrarlos y obstruir el conducto central. Por ello, se introducen elementos como los conductos perforados, que proporcionan rigidez al silenciador y evitan el arrastre de material absorbente.

Capítulo 3

MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

3.1 INTRODUCCIÓN

El Método de los Elementos Finitos, abreviadamente MEF, es una herramienta muy útil que permite resolver problemas de ingeniería que no se pueden o son costosos de resolver mediante métodos matemáticos comunes. El problema a resolver en este Trabajo Fin de Máster es la propagación de las ondas por un sólido como es un silenciador disipativo, y dicho problema presenta una base de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, resultando muy complejo obtener una solución analítica.

Por ello, partiendo de una geometría dada con infinitos grados de libertad, el Método de Elementos Finitos se encarga en dividirla en una cantidad finita de partes llamadas “elementos independientes” en los que una función local es definida. Estos elementos están conectados entre sí a partir de “nodos” (siendo una incógnita en ellos el valor de la función local) formando una “malla”. La geometría inicial pasa a ser discretizada en una geometría mallada que forma un sistema de N grados de libertad, simplificando la complejidad del problema inicial, ya que se pasa de tener que resolver un problema muy complejo a la resolución de varios problemas más asequibles.

Por otro lado, al simplificar un dominio continuo con infinitos grados de libertad y obtener un dominio discretizado con N grados de libertad, existe cierta imprecisión en la resolución del problema, pues se trata de un método de aproximación. Es por ello que, una vez obtenidos los resultados, se recomienda comprobar que presentan una cierta coherencia antes de validarlos.

Para el modelado y la simulación de silenciadores, es el Método de Elementos Finitos una de las técnicas más utilizadas. Las dos vías para la formulación en Elementos finitos son: el método de

residuos ponderados, como el método de Galerkin (formulación diferencial) y el método variacional, como el método de Rayleigh-Ritz (formulación variacional).

3.2 ENFOQUE MATEMÁTICO

Para desarrollar matemáticamente el método de elementos finitos aplicado en este trabajo, se utiliza como base el artículo “A finite element approach for the acoustic modelling of perforated dissipative mufflers with non-homogeneous properties” desarrollado por A. G. Antebas, F. D. Denia, A. M. Pedrosa y F. J. Fuenmayor (Antebas, Denia, Pedrosa, & Fuenmayor, 2013).

3.2.1 Formulación de elementos finitos

En la Figura 8 se observa un silenciador disipativo con material absorbente heterogéneo y conducto perforado. El subdominio de aire del conducto central se corresponde con Ω_a y el del material absorbente con Ω_m . La condición de pared rígida viene representada por las superficies límites Γ_a y Γ_m , sin tener en cuenta las correspondientes con la entrada y salida (Γ_i y Γ_o) ni la del conducto perforado Γ_p . El conducto que contiene aire es caracterizado por la densidad ρ_0 y la velocidad del sonido c_0 , mientras que el conducto perforado se caracteriza por su impedancia característica \tilde{Z}_p . El material absorbente es caracterizado por valores complejos equivalentes de densidad $\rho_m(x)$ y velocidad del aire $c_m(x)$ que dependen de la coordenada longitudinal, llevando a variaciones espaciales de $\tilde{Z}_p(x)$. En los apartados 3.2.2 y 3.2.3 se detalla más información.

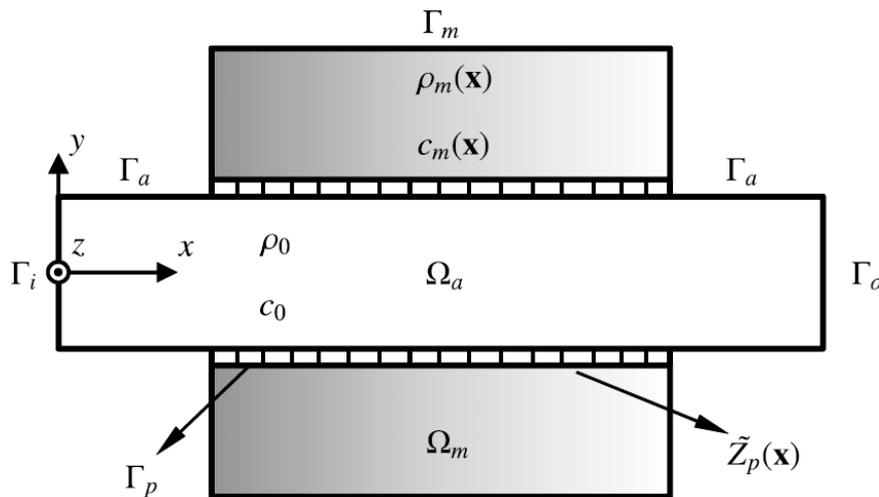


Figura 8. Silenciador disipativo con material absorbente heterogéneo y conducto perforado (Antebas, Denia, Pedrosa, & Fuenmayor, 2013).

Aplicando el método de elementos finitos a la ecuación de onda, es posible obtener los campos de presiones y velocidades a partir de un sistema de ecuaciones algebraicos.

Se parte de la ecuación de Helmholtz, que es aquella por la que se rige la propagación de la onda en el conducto central de aire:

$$\nabla^2 P_a + k_0^2 P_a = 0 \quad (54)$$

Donde ∇^2 es el “Laplaciano”; P_a es la presión acústica y k_0 se corresponde con el número de onda del aire, siendo $k_0 = \omega/c_0$.

Particularizando para el material absorbente, la propagación de la onda se define por:

$$\nabla \left(\frac{1}{\rho_m} \nabla P_m \right) + \frac{1}{\rho} k_m^2 P_m = 0 \quad (55)$$

Donde $k_m = \frac{\omega}{c_m(x)}$ se corresponde con el equivalente al número de onda complejo del material absorbente.

Utilizando el método de elementos finitos, la presión acústica es aproximada por funciones de prueba particularizándola para el “*elemento e*” del silenciador, como:

$$P_a = \sum_{i=1}^{N_{npe}} N_i \cdot \widetilde{P}_{a_i}^e = N \widetilde{P}_a^e \quad (56)$$

$$P_m = \sum_{i=1}^{N_{npe}} N_i \cdot \widetilde{P}_{m_i}^e = N \widetilde{P}_m^e \quad (57)$$

Donde $\widetilde{P}_{a_i}^e$ y $\widetilde{P}_{m_i}^e$ se corresponden con las presiones nodales; N_i con las funciones de forma y N_{npe} con el número de nudos por elemento. Aplicando el método de residuos ponderados con el enfoque de Galerkin, y tras haber usado el teorema de Green, se obtienen los residuos ponderados de los subdominios Ω_a y Ω_m , respectivamente:

$$\sum_{e=1}^{N_e^a} \left(\int_{\Omega_a^e} \nabla^T N \nabla N \, d\Omega - k_0^2 \int_{\Omega_a^e} N^T N \, d\Omega \right) \widetilde{P}_a^e = \sum_{e=1}^{N_e^a} \int_{\Gamma_a^e} N^T \frac{\partial P_a}{\partial n} \, d\Gamma \quad (58)$$

$$\sum_{e=1}^{N_e^m} \left(\int_{\Omega_m^e} \nabla^T N \nabla N \, d\Omega - \int_{\Omega_m^e} \frac{k_m^2}{\rho_m} N^T N \, d\Omega \right) \widetilde{P}_m^e = \sum_{e=1}^{N_e^m} \int_{\Gamma_m^e} N^T \frac{\partial P_m}{\partial n} \, d\Gamma \quad (59)$$

Donde N_e^a y N_e^m se corresponden con el número de elementos finitos existentes en el conducto perforado y en los subdominios del material absorbente, respectivamente; y n se corresponde con el vector unitario enfocado hacia el exterior.

Aplicando la condición de pared rígida para la expresión (58), la integral presente a la derecha de la igualdad sólo haría referencia al límite del conducto perforado Γ_p y las superficies de entrada y salida Γ_i y Γ_o , respectivamente. Haciendo uso de la expresión de Euler, el gradiente de presión normal al conducto perforado del interior del conducto central de aire se expresa como:

$$\frac{\partial P_a}{\partial n} = -\rho_0 \frac{\partial U_{n_a}}{\partial t} = -j\rho_0 \omega \cdot U_{n_a} \quad (60)$$

Siendo U_{n_a} la velocidad acústica normal al conducto perforado de la interfase.

La impedancia acústica es definida como:

$$\widetilde{Z}_p = \frac{P_a - P_m}{U_{n_a}} \quad (61)$$

Y sustituyendo las expresiones de las presiones acústicas (82) y (85), y la de la impedancia del perforado (89) en la expresión (88), se obtiene para el elemento e:

$$\frac{\partial P_a}{\partial n} = -j\rho_0\omega \cdot \frac{N\widetilde{P}_a^e - N\widetilde{P}_m^e}{\widetilde{Z}_p} \quad (62)$$

Del mismo modo ocurre para la integral a la derecha de la igualdad de la expresión (87), aplicándose solo para el límite del conducto perforado Γ_p . El gradiente de presión normal al conducto perforado en el material absorbente se expresa:

$$\frac{\partial P_m}{\partial n} = -\rho_m \frac{\partial U_{n_m}}{\partial t} = -j\rho_m\omega \cdot U_{n_m} \quad (63)$$

Siendo U_{n_m} la velocidad normal al conducto perforado del a interfase. Teniendo en cuenta que las direcciones de los vectores exteriores U_{n_a} y U_{n_m} son opuestas, y sustituyendo las expresiones (82), (85) y (89) en la expresión (63), se tiene:

$$\frac{\partial P_m}{\partial n} = j\rho_m\omega \cdot \frac{N\widetilde{P}_a^e - N\widetilde{P}_m^e}{\widetilde{Z}_p} \quad (64)$$

Reemplazando la expresión (62) en el gradiente de presión de (58), se obtiene el residuo ponderado del subdominio Ω_a :

$$\begin{aligned} \sum_{e=1}^{N_e^a} \left(\int_{\Omega_a^e} \nabla^T N \nabla N d\Omega - k_0^2 \int_{\Omega_a^e} N^T N d\Omega \right) \widetilde{P}_a^e &= \sum_{e=1}^{N_e^a} \int_{\Gamma_a^e \cap \Gamma_i} N^T \frac{\partial P_a}{\partial n} d\Gamma \\ &+ \sum_{e=1}^{N_e^a} \int_{\Gamma_a^e \cap \Gamma_o} N^T \frac{\partial P_a}{\partial n} d\Gamma - j\rho_0\omega \sum_{e=1}^{N_e^a} \int_{\Gamma_a^e \cap \Gamma_p} N^T \frac{N\widetilde{P}_a^e - N\widetilde{P}_m^e}{\widetilde{Z}_p} d\Gamma \end{aligned} \quad (65)$$

De igual modo, se obtiene el residuo ponderado del subdominio Ω_m :

$$\sum_{e=1}^{N_e^m} \left(\int_{\Omega_m^e} \nabla^T N \nabla N d\Omega - \int_{\Omega_m^e} \frac{k_m^2}{\rho_m} N^T N d\Omega \right) \widetilde{P}_m^e = j\rho_m\omega \sum_{e=1}^{N_e^m} \int_{\Gamma_m^e \cap \Gamma_p} N^T \frac{N\widetilde{P}_a^e - N\widetilde{P}_m^e}{\widetilde{Z}_p} d\Gamma \quad (66)$$

Con el objetivo de obtener formas más compactas de las expresiones (65) y (66), se obtienen las siguientes matrices:

$$K_a = \sum_{e=1}^{N_e^a} \int_{\Omega_a^e} \nabla^T N \nabla N d\Omega \quad ; \quad K_m = \sum_{e=1}^{N_e^m} \int_{\Omega_m^e} \nabla^T N \nabla N d\Omega \quad (67)$$

$$M_a = \frac{1}{c_0^2} \sum_{e=1}^{N_e^a} \int_{\Omega_a^e} N^T N d\Omega \quad ; \quad M_m = \sum_{e=1}^{N_e^m} \int_{\Omega_m^e} \frac{1}{\rho_m} \frac{1}{c_m^2} N^T N d\Omega \quad (68)$$

$$C_{aa} = \rho_0 \sum_{e=1}^{N_e^a} \int_{\Gamma_a^e \cap \Gamma_p} \frac{1}{\widetilde{Z}_p} N^T N d\Gamma \quad ; \quad C_{ma} = - \sum_{e=1}^{N_e^m} \int_{\Gamma_m^e \cap \Gamma_p} \frac{1}{\widetilde{Z}_p} N^T N d\Gamma \quad (69)$$

$$C_{am} = -\rho_0 \sum_{e=1}^{N_e^a} \int_{\Gamma_a^e \cap \Gamma_p} \frac{1}{\widetilde{Z}_p} N^T N d\Gamma \quad ; \quad C_{mm} = - \sum_{e=1}^{N_e^m} \int_{\Gamma_m^e \cap \Gamma_p} \frac{1}{\widetilde{Z}_p} N^T N d\Gamma \quad (70)$$

$$F_a = \sum_{e=1}^{N_e^a} \int_{\Gamma_a^e \cap \Gamma_i} N^T \frac{\partial P_a}{\partial n} d\Gamma + \sum_{e=1}^{N_e^a} \int_{\Gamma_a^e \cap \Gamma_o} N^T \frac{\partial P_a}{\partial n} d\Gamma \quad (71)$$

El resultado final para las expresiones (65) y (66) es, respectivamente:

$$(K_a + j\omega C_{aa} - \omega^2 M_a) \widetilde{P}_a + j\omega C_{am} \widetilde{P}_m = F_a \quad (72)$$

$$(K_m + j\omega C_{mm} - \omega^2 M_m) \widetilde{P}_m + j\omega C_{ma} \widetilde{P}_a = 0 \quad (73)$$

Para evaluar las expresiones integrales (67) - (71) se ha utilizado la cuadratura Gaussiana. Además, resulta importante ser preciso a la hora de introducir las variaciones espaciales de las propiedades del material absorbente ρ_m y c_m y la impedancia característica del perforado \widetilde{Z}_p .

Para acabar, las expresiones (72) y (73) se pueden presentar de forma matricial de la siguiente manera:

$$\left(\begin{bmatrix} K_a & 0 \\ 0 & K_a \end{bmatrix} + j\omega \begin{bmatrix} C_{aa} & C_{am} \\ C_{ma} & C_{mm} \end{bmatrix} - \omega^2 \begin{bmatrix} M_a & 0 \\ 0 & M_m \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} \widetilde{P}_a \\ \widetilde{P}_m \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_a \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (74)$$

Por último, una vez resuelta la expresión (80), se utiliza el índice de pérdidas de transmisión acústica (TL) para analizar el comportamiento acústico de los silenciadores disipativos, visto en el capítulo anterior.

$$TL = 10 \cdot \log \frac{P_{inc}}{P_{trans}} \quad (75)$$

Donde P_{inc} y P_{trans} se corresponden con las presiones incidentes y de transmisión, respectivamente.

3.2.2 Propiedades heterogéneas acústicas del material absorbente

Como se ha visto en el apartado 2.9.1, el comportamiento acústico de los materiales absorbentes viene dado por su impedancia característica y el número de onda.

Estos dos parámetros dependen de la temperatura, entre otras variables. En este Trabajo Fin de Máster, se tienen dos situaciones diferentes de presencia de temperatura en la cámara de expansión: temperatura constante o gradiente térmico (temperatura variable). En el primer caso, la temperatura permanece constante a lo largo del silenciador y, por tanto, los parámetros de impedancia característica y número de onda son constantes también, según las expresiones vistas en el apartado comentado anteriormente.

Por otro lado, en el caso del gradiente térmico, al presentar una temperatura variable desde el inicio de la cámara de expansión hasta el final de esta, el valor de la impedancia característica y el número de onda varía también. La temperatura variará a lo largo de la coordenada longitudinal del

silenciador “x”, según se explica más adelante en el apartado 4.6.2. Es por ello, que, de manera directa, la resistividad local del aire dependerá de dicha coordenada $R_{flujos}(x)$.

Las expresiones que determinan el comportamiento del material absorbente quedan:

$$\frac{Z_m(x)}{Z_0} = \left[1 + a_5 \left(\frac{\rho_0 f}{R_{flujos}(x)} \right)^{a_6} - j a_7 \left(\frac{\rho_0 f}{R_{flujos}(x)} \right)^{a_8} \right] \quad (76)$$

$$\frac{k_m(x)}{k_0} = \left[1 + a_3 \left(\frac{\rho_0 f}{R_{flujos}(x)} \right)^{a_4} - j a_1 \left(\frac{\rho_0 f}{R_{flujos}(x)} \right)^{a_2} \right] \quad (77)$$

Por lo tanto, la heterogeneidad asociada con R , Z_m y k_m es producida por las variaciones espaciales en la temperatura.

3.2.3 Impedancia acústica del conducto perforado

Del mismo modo que en el apartado anterior, el comportamiento del conducto perforado se rige por la impedancia acústica de dicho conducto, vista en el apartado 2.8.1.

Este parámetro depende, además de la temperatura, de las propiedades del material absorbente y de la porosidad del conducto. Para el caso de temperatura constante, la expresión de la impedancia del conducto es la mostrada en dicho apartado.

Para el caso del gradiente térmico, la temperatura varía a lo largo de este, variando, a su vez también, las propiedades del material absorbente. Por lo tanto, introduciendo la heterogeneidad del material absorbente, la expresión de la impedancia cuando la temperatura es variable a lo largo de x, resulta:

$$\tilde{Z}_p(x) = \rho_0 c_0 \frac{1}{\sigma} \left[6 \cdot 10^{-3} + j k_0 \left(t_h + 0,425 \left(1 + \frac{Z_m(x) \cdot k_m(x)}{\rho_0 c_0 k_0} \right) d_h \cdot F(\sigma) \right) \right] \quad (78)$$

El factor de corrección viene dado por:

$$F(\sigma) = 0.5[(1 - 0.7\sqrt{\sigma}) + (1 - 1.41\sqrt{\sigma} + 0.34(\sqrt{\sigma})^3 + 0.07(\sqrt{\sigma})^5)] \quad (79)$$

Capítulo 4

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

4.1 INTRODUCCIÓN

Tras haber presentado los fundamentos teóricos de conductos y silenciadores, así como su formulación mediante el método de elementos finitos, se describe el problema que se va a tratar en este Trabajo Fin de Máster.

En este apartado se presenta la geometría base del silenciador, las propiedades del material fonoabsorbente a utilizar y las características de la superficie perforada presente en el interior del silenciador. Además, se definen una serie de casos de estudio variando tantos parámetros propios de la geometría, incluso propiedades del material absorbente y del conducto perforado. Los resultados de estos casos de estudio se muestran en el Capítulo 8.

4.2 GEOMETRÍA DEL SILENCIADOR

El silenciador a analizar en este trabajo va a partir de dos geometrías distintas, siendo la única diferencia en ellas la presencia de la superficie perforada. A nivel visual, la geometría de ambos casos iniciales se muestra en la Figura 9. Ésta está formada por un conducto circular de entrada de aire o gases y otro de salida del silenciador, ambos unidos por un conducto interior, también circular y del mismo radio. Además, la cámara de expansión es circular y presenta diferente radio con respecto a los conductos restantes. En el interior de la cámara de expansión se encuentra la fibra texturizada y, como se ha comentado, la superficie perforada puede estar o no presente.

A partir de estos dos casos, se irán realizando modificaciones de ciertos parámetros y se observará el comportamiento acústico del silenciador disipativo.

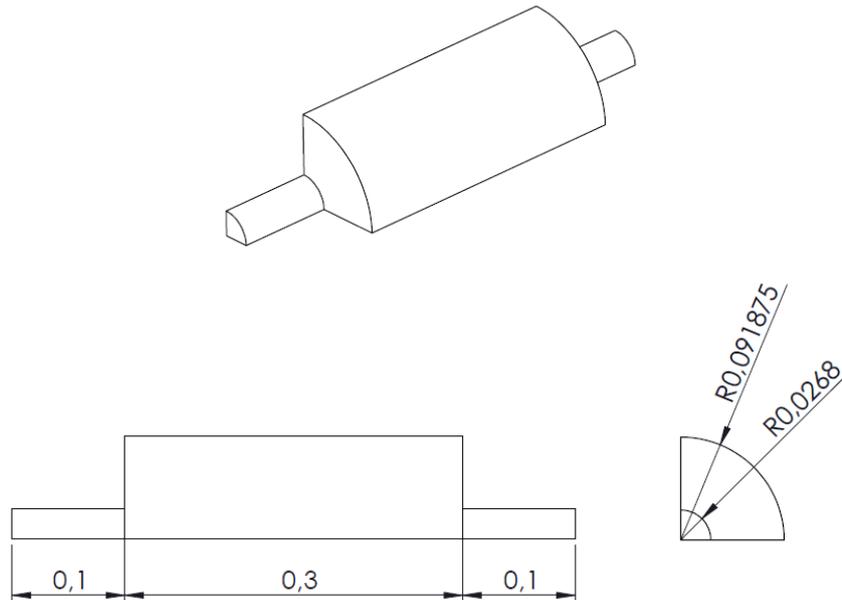


Figura 9. Geometría y dimensiones de la geometría del silenciador disipativo.

Las dimensiones correspondientes a la geometría del silenciador, sin superficie perforada, se muestran tabuladas en la Tabla 2 y de una manera visual, en la Figura 9, donde las cotas vienen dadas en metros.

Medida	Valor
Longitud del conducto de entrada	0,1 m
Longitud del conducto central	0,3 m
Longitud del conducto de salida	0,1 m
Radio del conducto principal	0,0268 m
Radio de la cámara de expansión	0,091875 m

Tabla 2. Dimensiones de la geometría del silenciador disipativo.

Dos de los parámetros a modificar en el apartado 4.5, correspondiente con los casos de estudio, son la longitud de la cámara de expansión y el radio de la cámara de expansión.

4.3 MATERIAL FONOAORSORBENTE EMPLEADO

El comportamiento del material absorbente viene definido por los parámetros de impedancia característica Z_{abs} y el número de onda k_{abs} , los cuales dependen de la frecuencia y de la resistividad al flujo estacionario como se ha visto en el apartado 2.9.1.

En este Trabajo de Fin de Máster se ha utilizado como material fonoabsorbente la **fibra de vidrio texturizada**. Las principales propiedades de este tipo de fibra vienen dadas en la Tabla 3:

Propiedad	Valor
Resistividad al flujo estacionario R_0	4896 Pa s/m ²
Densidad de compactación $\rho_{compact}$	100 kg/m ³

Tabla 3. Propiedades de la fibra de vidrio texturizada.

En este caso, el parámetro a modificar y que se verá reflejado en el apartado 4.5 corresponde con la densidad de compactación de la fibra.

4.4 SUPERFICIE PERFORADA EMPLEADA

De igual forma y como se ha visto en el apartado 2.8, un silenciador disipativo puede presentar una superficie que protege el espacio de la cámara de expansión donde se coloca el material absorbente. Esta se caracteriza por poseer un conjunto de orificios que la atraviesan con un determinado diámetro, además de presentar un espesor y porosidad. La porosidad se puede definir como el cociente entre el área donde no existe material y el área total de la superficie perforada.

Para calcular el efecto de dicha superficie perforada y sabiendo que existe material absorbente en la cámara de expansión, se hace uso de la ecuación (47) del apartado 2.8.1 en la cual se introducen las propiedades de la superficie perforada, presentados en la Tabla 4.

Propiedades	Valor
Densidad del aire ρ_0	1,225 kg/m ³
Velocidad del sonido en el aire c_0	340 m/s
Número de onda k_0	$\frac{\omega}{c_0} = \frac{2\pi f}{340} \rightarrow$ Dependiente de la frecuencia
Espesor de la superficie perforada t_h	0,001 m
Diámetro de los orificios d_h	0,0035 m
Porosidad de la superficie perforada σ	0,08
Z_{abs}	Expresión (49) \rightarrow Dependiente de la frecuencia
k_{abs}	Expresión (50) \rightarrow Dependiente de la frecuencia

Tabla 4. Propiedades de la superficie perforada.

Se puede observar que los valores de densidad y velocidad en el aire están dados a partir de la temperatura de referencia que se toma como 15 grados. Los parámetros k_0 , Z_{abs} y k_{abs} son parámetros que dependen de la frecuencia.

Por último, el parámetro a modificar y que significará otro caso de estudio corresponde con la porosidad de la superficie perforada.

4.5 CASOS DE ESTUDIO

En este apartado se detallan los diferentes casos de estudios a analizar. Como puede observarse en la Figura 10 se parte de cuatro casos iniciales (caso 1, caso 2, caso 3 y caso 4), diferenciados entre sí por la distribución de la temperatura en el interior del silenciador y la presencia de la superficie perforada. Las características restantes permanecen iguales para todos los casos, que son las detalladas en los apartados 4.2, 4.3 y 4.4. Estos 4 casos sirven como base para, posteriormente, realizar modificaciones paramétricas de sus geometrías, sus propiedades del material absorbente y de la superficie perforada. Es por ello por lo que nacen tres subcasos (casos a, casos b y casos c), que tendrán en común una letra, la cual hace referencia al tipo de modificación realizada.

Todo lo que se ha comentado se detalla visualmente a continuación:

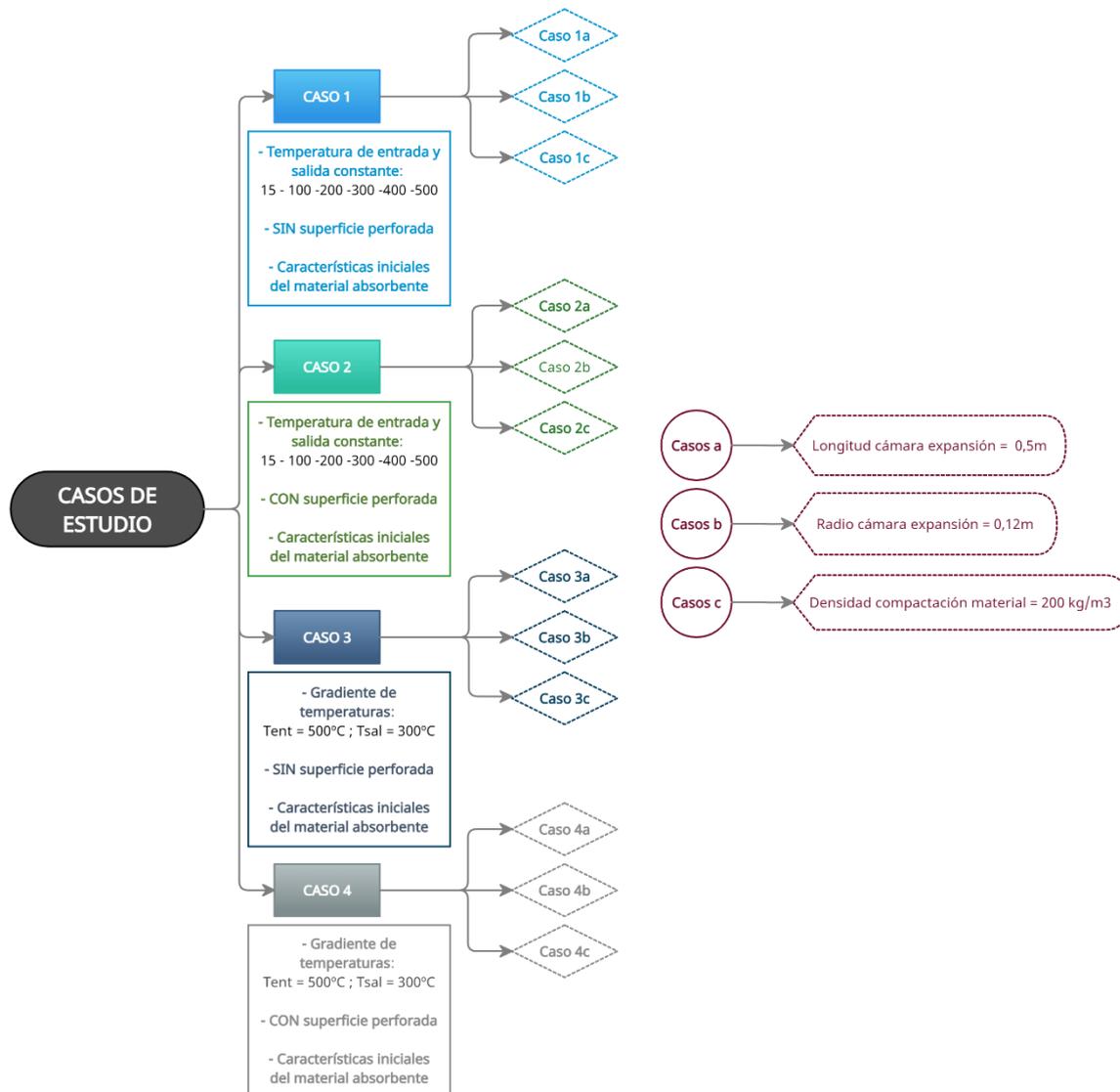


Figura 10. Casos de estudio.

Una vez se han definido los casos de estudios, el siguiente paso es llevarlos a cabo e implementarlos en las dos versiones de Ansys: APDL y Workbench.

4.6 TEMPERATURAS EN EL INTERIOR DEL SILENCIADOR

En este apartado se van a describir las dos formas en las que la temperatura se encuentra presente en el interior del silenciador. Como se ha visto en los casos de estudio del apartado 4.5, la temperatura puede presentarse de manera constante a lo largo del silenciador o en forma de gradiente térmico, es decir, que exista una variación de temperatura a lo largo de este. Por lo tanto, se presentan a continuación las dos formas de distribución de temperaturas para los casos de estudio 2 y 4 de la Figura 10, correspondientes con los casos que presentan superficie perforada.

4.6.1 Temperaturas constantes

En este caso, la temperatura del aire es la misma desde que entra hasta que sale del silenciador, es decir, permanece constante en todos los volúmenes o cuerpos que lo forman. Por lo tanto, para el cálculo de las propiedades del aire, material absorbente y superficie perforada, la temperatura es la misma y, como consecuencia, la densidad y velocidad del sonido presentaran los mismos valores en los tres materiales.

En la Figura 11 se puede observar un boceto de la mitad de un silenciador en 2D, en la que se muestran los conductos que lo forman, presentando temperatura constante en cada uno de ellos.



Figura 11. Temperatura constante en el interior del silenciador.

4.6.2 Gradiente de temperaturas

En este caso, la temperatura del aire que entra por el silenciador es diferente a la que sale. Para introducir la variación de temperaturas a lo largo de este, la cámara de expansión del silenciador se divide en un número de secciones, presentando cada una de ellas temperaturas diferentes e inferiores conforme se acerca la salida del silenciador. Para este Trabajo Fin de Máster se han escogido 5 divisiones en la cámara, fijando una temperatura a la entrada de 500°C y otra a la salida de 300°C.

El cálculo de las temperaturas en cada una de las secciones se realiza de manera lineal. Es decir, sabiendo que, a la entrada, que corresponde con el punto de inicio, se tiene 500°C y a la salida, que corresponde con el punto final de 0,5 m de longitud, se puede calcular la temperatura al inicio y al final de cada una de las secciones (T1, T2, T3, T4 y T5), mediante la ecuación de la recta. Una vez se obtienen estas temperaturas, la temperatura correspondiente a cada división (Tmed_1, Tmed_2, Tmed_3, Tmed_4 y Tmed_5) equivale a la temperatura media entre la temperatura de inicio y fin de la división en la que se encuentre. Esta explicación se puede observar y entender de una manera visual en la Figura 12:

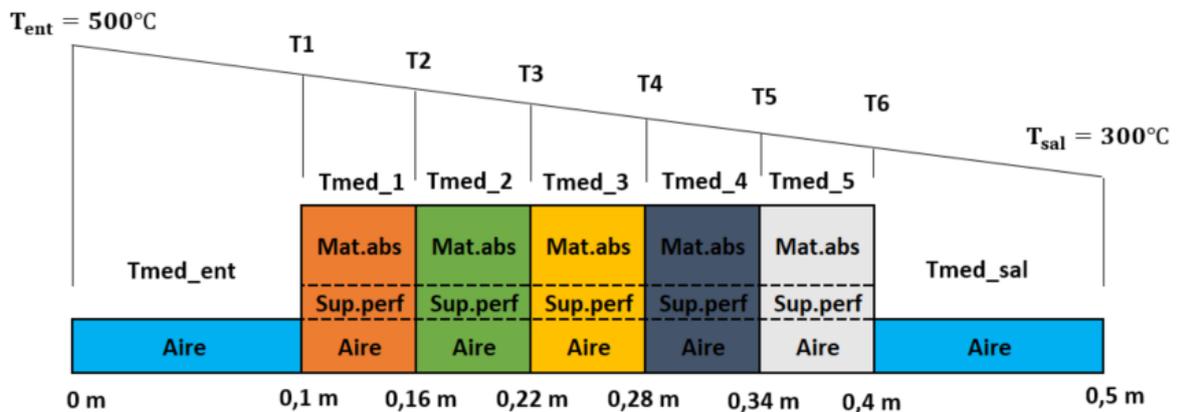


Figura 12. Gradiente térmico en el interior del silenciador.

Con el objetivo de mostrar las temperaturas medias de cada una de las divisiones, se muestran algunos cálculos. La longitud de cada una de las divisiones se obtiene de manera muy sencilla:

$$Long_{divisiones} = \frac{Long_{camaraExpansion}}{n^{\circ} divisiones} = \frac{0,3}{5} \rightarrow Long_{divisiones} = 0,06 m \quad (80)$$

La pendiente de la recta que une la temperatura de entrada y salida viene dada por:

$$Pendiente = \frac{T_{sal} - T_{ent}}{X_{sal} - X_{ent}} = \frac{300 - 500}{0,5 - 0} \rightarrow Pendiente = -400 \quad (81)$$

Las temperaturas límites de las divisiones se obtienen mediante la ecuación de la recta:

$$T_{limite} = Pendiente (X_{limite} - X_{ent}) + T_{ent} \quad (82)$$

Donde X_{limite} se corresponde con la longitud del límite de la división donde se quiera obtener la temperatura.

Las temperaturas medias se obtienen mediante la media aritmética de las temperaturas límites del inicio y fin de cada división, resultando:

Temperaturas medias	Valores (°C)	Temperaturas medias	Valores (°C)
Tmed_ent	480	Tmed_4	376
Tmed_1	448	Tmed_5	352
Tmed_2	424	Tmed_sal	320
Tmed_3	400		

Tabla 5. Temperaturas de cada división de la cámara de expansión.

Capítulo 5

PROCEDIMIENTO EN APDL

5.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describe la manera de implementar los casos de estudio definidos mediante la versión APDL de Ansys, desarrollando detalladamente el método empleado, paso a paso, desde la definición de parámetros, pasando por el diseño del silenciador, hasta la ejecución de la solución.

5.2 ANSYS PARAMETRIC DESIGN LANGUAGE

Ansys Parametric Design Language es una herramienta diseñada para el cálculo y análisis de una gran variedad de sistemas, que afronta todo tipo de problemas y, entre ellos, los acústicos.

Como otros tipos de software, APDL presenta una interfaz gráfica compleja, aunque poco intuitiva, así como todas las ayudas para el correcto diseño y solución de cualquier tipo de análisis. El proceso de diseño de elementos resulta un poco tedioso, ya que no es una herramienta de diseño como pueden serlo otros programas como SolidWorks. La gran ventaja que presenta es que, al estar todos los modelos basados en un lenguaje paramétrico de diseño, permite al usuario una serie de comodidades como la parametrización, el uso de macros, bifurcaciones, bucles...

En este trabajo se ha empleado el lenguaje de macros como el método de creación, mallado, solución y post-proceso del problema.

5.3 LENGUAJE DE MACROS

Cada uno de los casos de estudio presenta una macro diferente, aunque todas tienen una base común. Para realizar una correcta y detallada explicación de estas, se muestra, en la Figura 13, un diagrama de flujo del funcionamiento de la macro del caso más complejo (caso 4), correspondiente a silenciador disipativo con conducto perforado y gradiente térmico. De este modo, se dan por explicadas las macros de los casos restantes, mostradas en el ANEXO C. MACROS APDL

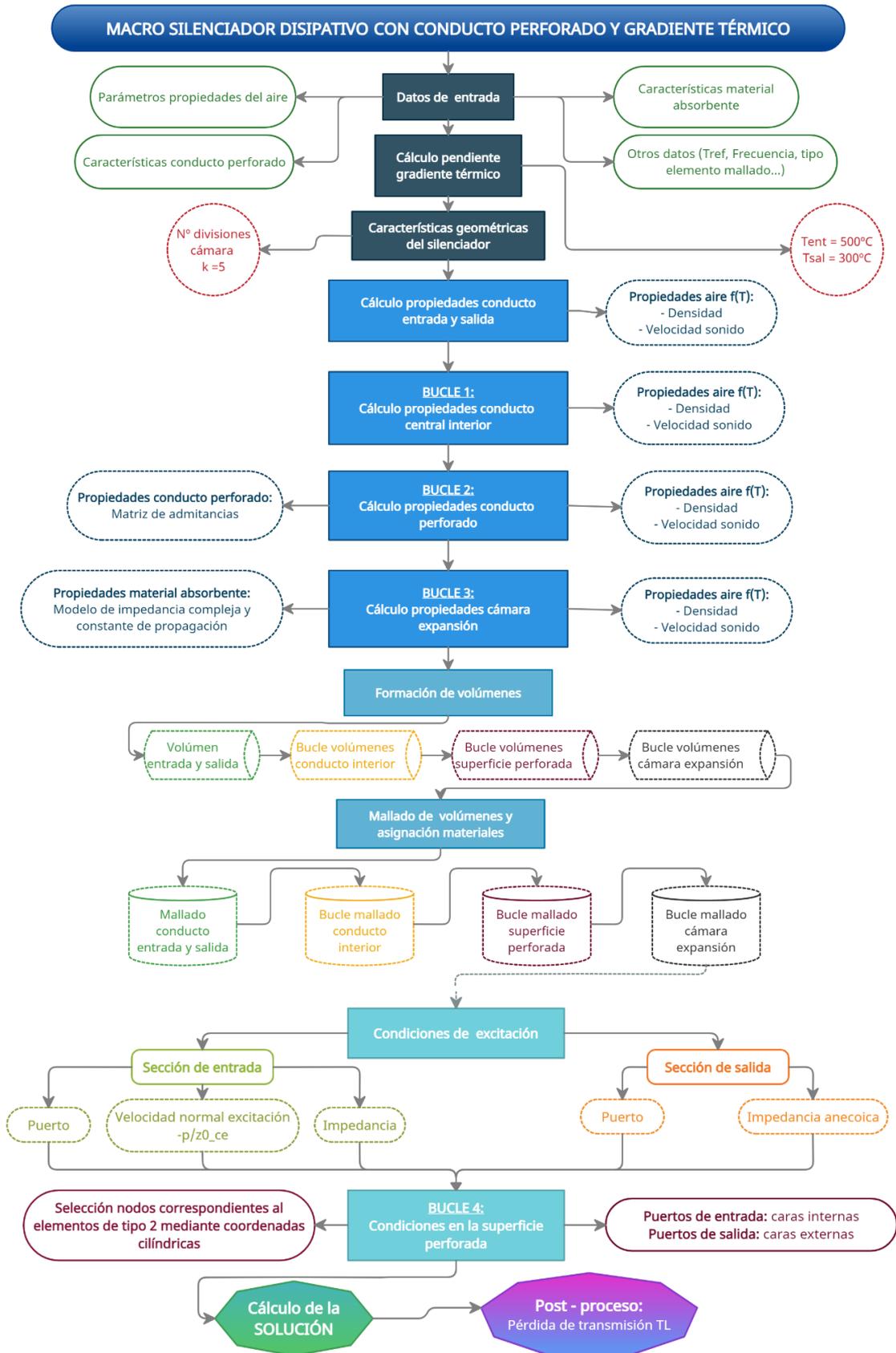


Figura 13. Flujograma de explicación de las macros de APDL.

La macro se puede dividir en **cinco bloques**, diferenciados por diferentes tonos de color azul en el flujograma anterior. El **primer bloque** corresponde a los datos, parámetros de entrada y valores característicos del silenciador. Estos, a priori, son valores constantes que no cambian a lo largo de la macro, por lo que se introducen al comienzo.

De la línea 1 a la línea 60 de la Figura 14 y Figura 15 se muestran los datos de entrada correspondiente al primer bloque del flujograma. En la Figura 14 se muestran las constantes del modelo de gas perfecto, las características del material a usar, entre las que hay que destacar, en la línea 21, el valor de la densidad de compactación del material a usar, pues su variación es uno de los casos de estudio definidos. También se introducen los coeficientes del modelo de fibra de vidrio de Owens Corning, presentados anteriormente en la Tabla 1.

```
1 /title, Pérdida de Transmisión (dB) de Silenciador Disipativo
2 !
3 /prep7
4 /view,1,1,1,1
5 ! *****
6 ! Parámetros para el cálculo de propiedades del aire (Modelo de gas perfecto)
7 ! *****
8 R=8.314 ! Constante de gas perfecto (J/K mol) K==kelvin
9 Mm=0.02897 ! Masa molar del aire (kg/mol)
10 Patm=101325 ! Presión (Pa)
11 gamma=1.4 ! Cociente de calores específicos
12 !
13 ! *****
14 ! Características del material absorbente
15 ! *****
16 ! Fibra de vidrio de Owens Corning
17 A1=1.083099 ! Coeficientes para el cálculo de la resistividad
18 A2=1.827587 ! A1 y A2 se calculan con:
19 ! (1) resis0=4896 Pa s/m^2; rho_compac=100 kg/m^3
20 ! (2) resis0=17378 Pa s/m^2; rho_compac=200 kg/m3
21 rho_compac=100 ! Densidad de compactación de la fibra (kg/m^3)
22 resis0=A1*rho_compac**A2 ! Resistividad a temperatura de referencia
23 !
24 ! Modelo de Owens Corning
25 a1=0.189
26 a2=-0.595
27 a3=0.160
28 a4=-0.577
29 a5=0.095
30 a6=-0.754
31 a7=0.085
32 a8=-0.732
33 !
```

Figura 14. Datos de entrada (Flujograma APDL).

En la Figura 15 se muestran las características correspondientes al conducto perforado así como el cálculo de las correcciones de Ingard y Fok, obtenidas en (Denia, Selamet, Fuenmayor, & Kirby, 2007). Por otro lado, se presentan otros tipos de datos como son la temperatura de referencia para el cálculo de la resistividad, el rango de frecuencias de trabajo y los tipos de elementos que se han utilizado para el mallado. El tetraedro acústico de 10 nodos se ha empleado en el conducto central y en la cámara disipativa, mientras que los hexaedros de 20 nodos se han empleado para el conducto perforado, ya que presentan la ventaja de que se le puede introducir la matriz de admitancia característica. Además, en violeta aparece rodeado el valor de la porosidad, cuyo efecto se va a estudiar en el análisis de resultados.

```

34 ! *****
35 ! Características del conducto perforado
36 ! *****
37 dori=0.0035          ! Diámetro de orificios
38 espe=0.001          ! Espesor real del conducto
39 poro=0.08           ! Porosidad en tanto por uno
40 !
41 raizporo=sqrt(poro)  ! Cálculo de factor de interacción de orificios
42 Ingard=1-0.7*raizporo
43 Fok=1-1.41*raizporo+0.34*raizporo**3+0.07*raizporo**5
44 mean_IngardFok=0.5*(Ingard+Fok)
45 !
46 ! *****
47 ! Otros datos
48 ! *****
49 ! Temperatura de referencia para el cálculo de la resistividad resis0 (°C)
50 Tref=15
51 ! Rango de frecuencias
52 f_fin=3000          ! Máxima frecuencia de cálculo (Hz)
53 f_ini=10            ! Frecuencia inicial
54 deltaf=10          ! Incremento de frecuencia
55 Nfrec=(f_fin-f_ini)/deltaf+1 ! Número de frecuencias de cálculo
56 ! Elementos de mallado
57 et,1,221,,1        ! Tetraedro acústico de 10 nodos
58 et,2,220,,1        ! Hexaedros y prismas de 20 nodos
59 pi=3.141592653589793 ! Valor numérico de Pi
60 !

```

Figura 15. Datos de entrada (Flujograma APDL).

En la Figura 16 se muestra el cálculo de la pendiente de la recta de temperaturas provocada por el gradiente térmico, así como los valores característicos que definen la geometría del silenciador.

```

61 ! *****
62 ! Cálculo de la pendiente de la recta formada entre Tent y Tsal (Gradiente)
63 ! *****
64 Tent=500            !Temperatura de entrada al conducto de entrada (°C)
65 Tsal=300            !Temperatura de salida al conducto de salida (°C)
66 Xent=0              !Coordenada en X en el punto donde se aplica la Tent
67 Xsal=0.5            !Coordenada en X en el punto donde se aplica la Tsal
68 Pend=(Tsal-Tent)/(Xsal-Xent) !Pendiente de la recta que une a los dos puntos anteriores
69 !
70 ! *****
71 ! Características geométricas del silenciador disipativo
72 ! *****
73 rduct=0.0268        ! Conducto de entrada, central y salida
74 lduct=0.1           ! Longitud del conducto de entrada y salida
75 rchamb=0.091875     ! Cámara central disipativa
76 lchamb=0.3          ! Longitud de la cámara
77 k=5                 ! Número de divisiones de la cámara (sin entrada ni salida)
78 Long_div=lchamb/k   ! Longitud de cada división de la cámara
79 !

```

Figura 16. Cálculo pendiente gradiente térmico y características geométricas del silenciador (Flujograma APDL).

Estas dos secciones son de modificación libre. En la figura anterior se encuentran marcados en verde los parámetros a variar en los casos de estudio definidos, así como en violeta el parámetro de número de divisiones, cuyo efecto se va a estudiar en el análisis de resultados.

Una vez definidos todos los parámetros iniciales, comienza el **segundo bloque**, en el cual se desarrollan una serie de bucles para el cálculo de las propiedades de los conductos del silenciador.

Los conductos de entrada y de salida del silenciador solo presentan aire, a una temperatura media constante a lo largo de ambos conductos. Por lo tanto, dado que dichas temperaturas no varían, el

cálculo de las propiedades del aire del conducto de entrada y de salida (línea 80 a 104) se introduce al comienzo del bloque. Las propiedades de densidad y velocidad del sonido dependen de esta temperatura, definiéndose los primeros materiales de la macro (líneas 90, 91, 102 y 103) y comenzando con la creación de una amplia lista de materiales.

```
80 ! *****
81 ! CÁLCULO PROPIEDADES CONDUCTO ENTRADA
82 ! *****
83 X_ce=lduct !Coordenada en X del nuevo punto
84 T_iniciocamara=Pend*(X_ce-Xent)+Tent !Temperatura del nuevo punto
85 Tmed_ce=(Tent+T_iniciocamara)/2
86 ! Propiedades del aire del conducto entrada
87 rho0_ce=Patm*Mm/(R*(Tmed_ce+273.15)) ! Densidad del aire (kg/m^3)
88 c0_ce=sqrt(gamma*R*(Tmed_ce+273.15)/Mm) ! Velocidad del sonido (m/s)
89 ! Material del aire del conducto entrada
90 mp,dens,1,rho0_ce
91 mp,sonc,1,c0_ce
92 ! *****
93 ! CÁLCULO PROPIEDADES CONDUCTO SALIDA
94 ! *****
95 X_cs=Xsal-lduct
96 T_finalcamara=Pend*(X_cs-Xent)+Tent
97 Tmed_cs=(T_finalcamara+Tsal)/2
98 ! Propiedades del aire del conducto salida
99 rho0_cs=Patm*Mm/(R*(Tmed_cs+273.15)) ! Densidad del aire (kg/m^3)
100 c0_cs=sqrt(gamma*R*(Tmed_cs+273.15)/Mm) ! Velocidad del sonido (m/s)
101 ! Material del aire del conducto salida
102 mp,dens,2,rho0_cs
103 mp,sonc,2,c0_cs
104 !
```

Figura 17. Cálculo propiedades del conducto de entrada y salida de la cámara disipativa.

Tras obtener las propiedades de los conductos de entrada y de salida del silenciador, el siguiente conducto en el que se va a calcular sus propiedades es el conducto que une a ambos, es decir, el conducto central interior. Resulta evidente que por este conducto también pasa aire, pero, en este caso, la temperatura va variando a lo largo de las secciones (parámetro K de la Figura 16) del conducto interior. Como consecuencia, se hace uso de un bucle para el cálculo de la densidad y velocidad de sonido en cada división, en el cual se calculan las temperaturas a la entrada y salida de cada sección (línea 113 y 114, respectivamente) y la temperatura media de ambas (línea 115), la cual corresponde a la temperatura media de la sección y es la que se usa para el cálculo de dichas propiedades. Por último, se asocia el material correspondiente. Este último paso resulta muy importante y, para ello, es necesario disponer de un contador de material (línea 106), al que se ha nombrado "mater".

```
105 ! Contador del número de material
106 mater=3
107 ! *****
108 ! CÁLCULO PROPIEDADES CONDUCTO CENTRAL INTERIOR
109 ! *****
110 *DO,A,1,k,1
111   X1=lduct+Long_div*(A-1)
112   X2=lduct+Long_div*A
113   T1=Pend*(X1-Xent)+Tent
114   T2=Pend*(X2-Xent)+Tent
115   Tmed=(T1+T2)/2
116   ! Propiedades del aire
117   rho0=Patm*Mm/(R*(Tmed+273.15))           ! Densidad del aire (kg/m^3)
118   c0=sqrt(gamma*R*(Tmed+273.15)/Mm)       ! Velocidad del sonido (m/s)
119   ! Material del aire correspondiente
120   mp,dens,mater,rho0
121   mp,sonc,mater,c0
122   mater=mater+1
123 *ENDDO
124 !
```

Figura 18. Cálculo propiedades del conducto central interior.

De forma consecutiva, el siguiente conducto a calcular es el conducto perforado, que separa el conducto central interior y la cámara disipativa. Para ello, como se observa en la Figura 19, se hace uso de un bucle (línea 128 a 170) en el cual se calculan, de la misma forma que en la Figura 18, las propiedades del aire correspondientes a cada una de las secciones comentadas anteriormente. La novedad es que, dentro de este bucle, se introduce otro bucle con el que se calcula la matriz de admitancia de dicha superficie (línea 156 a 163). Antes de comenzar con los cálculos, se debe activar una tabla con las siguientes condiciones: válida para modelos de fluido equivalente de especificaciones de medios perforados, el número de material correspondiente (contador “mater”), así como el modelo de matriz de admitancia. Esta función aparece en la línea 140. Para el cálculo de los componentes que conforman dicha matriz, es necesario obtener también la parte real e imaginaria de la impedancia característica del material fonoabsorbente que se emplee (línea 144 a 148). Una vez obtenidos todos los componentes anteriores, resulta necesario guardarlos. Esta operación se realiza en las líneas 165, 166 y 167, donde se rellenan dos tablas con todos los parámetros de la matriz obtenidos en función de la frecuencia.

Recalcar que se calcula la componente real e imaginaria, ya que Ansys no es capaz de trabajar con números complejos. Las fórmulas a utilizar son las vistas en los apartados 2.8 y 2.9. De esta manera, queda introducido el efecto de la superficie perforada en el silenciador.

El último paso, dentro de este segundo bloque, es calcular las propiedades de la cámara de expansión, como se muestra en la Figura 20. Conviene recordar que en el interior de ésta se encuentra el material absorbente, siendo en este caso, fibra de vidrio texturizada Owens. Por lo tanto, se utiliza un nuevo bucle (línea 175 a 203) en el cual se calculan, del mismo modo que en el apartado anterior, las propiedades del aire en las diferentes secciones de la cámara y un bucle interno de cálculo de la impedancia característica del material absorbente. Antes de este último cálculo, de nuevo, se debe activar una tabla válida para el modelo de impedancia compleja y constante de propagación que se necesita. Esta función aparece en la línea 189. Siguiendo los pasos anteriores, los datos obtenidos se introducen en una tabla en función de la frecuencia (línea 199 y 200).

```

125 ! *****
126 ! CÁLCULO PROPIEDADES CONDUCTO PERFORADO
127 ! *****
128 *DO, B, 1, k, 1
129   X1=lduct+Long_div*(B-1)
130   X2=lduct+Long_div*B
131   T1=Pend*(X1-Xent)+Tent
132   T2=Pend*(X2-Xent)+Tent
133   Tmed=(T1+T2)/2
134   ! Propiedades del aire
135   rho0=Patm*Mm/(R*(Tmed+273.15))           ! Densidad del aire (kg/m^3)
136   c0=sqrt(gamma*R*(Tmed+273.15)/Mm)       ! Velocidad del sonido (m/s)
137   mp, dens, mater, rho0
138   mp, sonc, mater, c0
139   resis=resis0*((Tmed+273.15)/(Tref+273.15))**0.6 ! Ecuación de Christie. Se toma Tref = 15°C
140   tb, perf, mater, , , ymat                 ! Matriz de admittancias
141   *DO, C, 1, Nfrec, 1
142     frequ=f_ini+(C-1)*deltaf
143     w=2*pi*frequ
144     ! Material absorbente
145     Real_Zabs=rho0*c0*(1+a5*(frequ*rho0/resis)**a6)
146     Imag_Zabs=-rho0*c0*a7*(frequ*rho0/resis)**a8
147     Real_Gammaabs=w/c0*a1*(frequ*rho0/resis)**a2
148     Imag_Gammaabs=w/c0*(1+a3*(frequ*rho0/resis)**a4)
149     !
150     ! Superficie perforada
151     Real_Zperf=rho0*c0*0.006/poro+0.425*dori*mean_IngardFok*(Real_Zabs*Real_Gammaabs-Imag_Zabs*Imag_Gammaabs)/poro
152     Imag_Zperf1=rho0*w*espe/poro+rho0*w*0.425*dori*mean_IngardFok/poro
153     Imag_Zperf2=0.425*dori*mean_IngardFok*(Real_Zabs*Imag_Gammaabs+Imag_Zabs*Real_Gammaabs)/poro
154     Imag_Zperf=Imag_Zperf1+Imag_Zperf2
155     Modulo_Zperf2=Real_Zperf**2+Imag_Zperf**2
156     y11r=Real_Zperf/Modulo_Zperf2
157     y11i=-Imag_Zperf/Modulo_Zperf2
158     y12r=-Real_Zperf/Modulo_Zperf2
159     y12i=Imag_Zperf/Modulo_Zperf2
160     y21r=-Real_Zperf/Modulo_Zperf2
161     y21i=Imag_Zperf/Modulo_Zperf2
162     y22r=Real_Zperf/Modulo_Zperf2
163     y22i=-Imag_Zperf/Modulo_Zperf2
164     !
165     tbfield, freq, frequ                     ! Tabla en función de la frecuencia
166     tbddata, 1, y11r, y11i, y12r, y12i, y21r, y21i ! Parámetros del modelo YMAT a cada frecuencia frequ
167     tbddata, 7, y22r, y22i                   ! Más parámetros (no caben en la tabla anterior)
168   *ENDDO
169   mater=mater+1
170 *ENDDO

```

Figura 19. Cálculo propiedades del conducto perforado.

```

171 !
172 ! *****
173 ! CÁLCULO PROPIEDADES CÁMARA CON MATERIAL ABSORBENTE
174 ! *****
175 *DO, D, 1, k, 1
176   X1=lduct+Long_div*(D-1)
177   X2=lduct+Long_div*D
178   T1=Pend*(X1-Xent)+Tent
179   T2=Pend*(X2-Xent)+Tent
180   Tmed=(T1+T2)/2
181   ! Propiedades del aire
182   rho0=Patm*Mm/(R*(Tmed+273.15))           ! Densidad del aire (kg/m^3)
183   c0=sqrt(gamma*R*(Tmed+273.15)/Mm)       ! Velocidad del sonido (m/s)
184   mp, dens, mater, rho0
185   mp, sonc, mater, c0
186   !
187   resis=resis0*((Tmed+273.15)/(Tref+273.15))**0.6 ! Ecuación de Christie. Se toma Tref = 15°C
188   ! Modelo de Ansys de impedancia compleja y constante de propagación
189   tb, perf, mater, , , zpro                 ! Material absorbente. Modelo de impedancia compleja y
190   !                                         constante de propagación
191   *DO, E, 1, Nfrec, 1
192     frequ=f_ini+(E-1)*deltaf
193     w=2*pi*frequ
194     Real_Zabs=rho0*c0*(1+a5*(frequ*rho0/resis)**a6)
195     Imag_Zabs=-rho0*c0*a7*(frequ*rho0/resis)**a8
196     Real_Gammaabs=w/c0*a1*(frequ*rho0/resis)**a2
197     Imag_Gammaabs=w/c0*(1+a3*(frequ*rho0/resis)**a4)
198     !
199     tbfield, freq, frequ                     ! Tabla en función de la frecuencia
200     tbddata, 1, Real_Zabs, Imag_Zabs, Real_Gammaabs, Imag_Gammaabs ! Parámetros del modelo ZPRO a cada frecuencia frequ
201   *ENDDO
202   mater=mater+1
203 *ENDDO
204 !

```

Figura 20. Cálculo propiedades de la cámara disipativa.

Llegados a este punto, se inicia el **tercer bloque**, correspondiente a la formación de la geometría (volúmenes) del silenciador y su posterior mallado, asignando las propiedades de los materiales obtenidos a cada uno de los volúmenes.

En la Figura 21 se presenta la formación de todos los conductos, comenzando por el conducto de entrada y salida del silenciador. Para el cálculo de la totalidad de los conductos presentes en la

cámara de expansión (conducto central interior, conducto perforado y cámara disipativa, en este orden) se han utilizado, una vez más, una serie de bucles, los cuales calculan la longitud de inicio y fin de cada una de las secciones y crean el volumen correspondiente a cada sección, el cual varía en radio según en el conducto en el que se encuentre.

En cuanto a la creación de los conductos, se han creado las mitades de éstos (180 grados de revolución) gracias a que el silenciador presenta conductos circulares concéntricos, siendo una geometría axisimétrica. Esto permite reducir el número de nodos y elementos, obteniéndose un menor coste computacional.

Destacar el parámetro de entrada “espesor” de la línea 225, remarcada en verde. Este parámetro es distinto del parámetro “espe” (línea 38 de la Figura 15 que corresponde al espesor real del conducto perforado), y se utiliza únicamente para el mallado del conducto perforado. Como se puede observar, su valor es muy pequeño (prácticamente 0), con el objetivo de que no se viole el principio de conservación de la masa, haciendo que se obtengan valores inconsistentes del índice de pérdidas de transmisión a bajas frecuencias.

```
205 ! *****
206 ! FORMACIÓN VOLÚMENES
207 ! *****
208 ! Volumen conducto de entrada
209 cylind,0,rduct,0,lduct,0,180
210 !
211 ! Volumen conducto de salida
212 cylind,0,rduct,lduct+lchamb,2*lduct+lchamb,0,180
213 !
214 ! Volúmenes conducto interior
215 *DO,F,1,k,1
216   X1=lduct+Long_div*(F-1)
217   X2=lduct+Long_div*F
218   cylind,0,rduct,X1,X2,0,180 ! Volumen de la sección correspondiente
219 *ENDDO
220 vsel,all ! Selecciona todos los volúmenes
221 vglue,all ! Pegado de todos los volúmenes (sin globalizarlos en 1) para dominio continuo
222 numcmp,all ! Compresión de numeración
223 !
224 ! Volúmenes superficie perforada
225 espesor=0.0002 ! Espesor del elemento asociado al conducto perforado
226 ! ! (ANSYS requiere mariado para aplicar la matriz de admitancias TMAP)
227 *DO,G,1,k,1
228   X1=lduct+Long_div*(G-1)
229   X2=lduct+Long_div*G
230   cylind,rduct,rduct+espesor,X1,X2,0,180 ! Volumen de la sección correspondiente
231 *ENDDO
232 vsel,all ! Selecciona todos los volúmenes
233 vglue,all ! Pegado de todos los volúmenes (sin globalizarlos en 1) para dominio continuo
234 numcmp,all ! Compresión de numeración
235 !
236 ! Volúmenes cámara absorbente
237 *DO,H,1,k,1
238   X1=lduct+Long_div*(H-1)
239   X2=lduct+Long_div*H
240   cylind,rduct+espesor,rchamb,X1,X2,0,180 ! Volumen de la sección correspondiente con material absorbente
241 *ENDDO
242 vsel,all ! Selecciona todos los volúmenes
243 vglue,all ! Pegado de todos los volúmenes (sin globalizarlos en 1) para dominio continuo
244 numcmp,all ! Compresión de numeración
245 !
```

Figura 21. Formación de los volúmenes del silenciador.

Tras la formación de los volúmenes, se pasa al mallado de estos, asignando los materiales correspondientes a cada conducto.

Antes de comenzar con los mallados, se debe fijar el tamaño de malla, parámetro “h”. Como se quiere obtener la mínima longitud de onda, el valor de c_0 debe ser el mínimo posible. Este valor mínimo se obtiene justo en la salida de la cámara de expansión, ya que la temperatura que se tiene es la menor. Además, en este caso, se han considerado 15 elementos por longitud de onda, pero, en casos anteriores, se ha variado este valor de 15 hasta 10 debido a que se han obtenido problemas en la solución.

Una vez obtenido este parámetro, imprescindible para realizar el mallado, se comienza con el mallado, siendo los conductos de entrada y de salida al silenciador los primeros en obtener sus mallas. Para ello, se selecciona el tipo de elemento (elemento tipo 1, en ambos casos, correspondiente a tetraedros acústicos de 10 nodos), el número de material correspondiente al conducto (cuyas propiedades son las obtenidas en el segundo bloque), el volumen correspondiente a este y se realiza el mallado. Todo esto aparece de la línea 257 a la 268 de la Figura 22.

```
246 ! *****
247 ! MALLADO DE LOS VOLÚMENES
248 ! *****
249 ! Se escoge el mínimo c0 para definir tamaño malla h
250 X_final_camara=lchamb+lduct ! Distancia punto final cámara
251 T_final_camara=Pend*(X_final_camara-Xent)+Tent ! Temperatura a dicho punto
252 c0_final_camara=sqrt(gamma*R*(T_final_camara+273.15)/Mm) ! Velocidad del sonido (m/s)
253 lambda=c0_final_camara/f_fin ! Mínima longitud de onda (a frecuencia máxima)
254 h=lambda/15 ! 15 elementos por (mínima) longitud de onda
255 esize,h
256 !
257 ! Mallado conducto entrada
258 type,1 ! Selecciona el tipo de elemento
259 mat,1 ! Selecciona el número de material
260 vsel,s,,1 ! Selecciona el volumen a mallar
261 vmesh,all ! Realiza el mallado
262 vsel,all
263 !
264 ! Mallado conducto salida
265 mat,2 ! Selecciona el número de material
266 vsel,s,,2 ! Selecciona el volumen a mallar
267 vmesh,all ! Realiza el mallado
268 vsel,all
```

Figura 22. Mallado de volúmenes y asignación de materiales, parte 1.

Los siguientes y últimos conductos a mallar son el conducto central interior, el conducto perforado y la cámara disipativa. Se puede observar, en la Figura 23, la utilización de bucles similares a los usados para la formación de los volúmenes. Los tres bucles presentan la misma estructura: se selecciona el tipo de elemento, el volumen correspondiente a cada sección (mediante la selección de todos los volúmenes de un mismo conducto y re-selección de éstos según el punto de inicio y fin de longitud de estos, es decir, según su localización), el material adecuado y se malla.

El mallado del conducto central interior se realiza desde la línea 271 a la línea 282; el mallado del conducto perforado se realiza desde la línea 284 hasta la línea 295 y el mallado de la cámara disipativa se realiza desde la línea 297 hasta la línea 308.

Las principales diferencias entre estos tres bucles de mallado se encuentran en el conducto perforado. El tipo de elemento usado para mallar es diferente al resto de mallados, pues se utiliza el elemento tipo 2 (línea 286), correspondiente a hexaedros acústicos de 10 nodos. Por otro lado, se utiliza la función “VSWEEP” para el mallado (línea 292), ya que es el proceso requerido para mallar elementos de tipo 2.

Llegados a este punto, se tiene la geometría del silenciador completamente mallada.

```
269 !
270 mater=3
271 ! Mallado de los volúmenes del conducto interior
272 *DO,I,1,k,1
273   type,1
274   X1=lduct+Long_div*(I-1)
275   X2=lduct+Long_div*I
276   vsel,s,,3,k+2
277   vsel,r,loc,z,X1,X2
278   mat,mater
279   vmesh,all
280   vsel,all
281   mater=mater+1
282 *ENDDO
283 !
284 ! Mallado de los volúmenes de la superficie perforada
285 *DO,J,1,k,1
286   type,2
287   X1=lduct+Long_div*(J-1)
288   X2=lduct+Long_div*J
289   vsel,s,,3+k,2*k+2
290   vsel,r,loc,z,X1,X2
291   mat,mater
292   VSWEEP,all
293   vsel,all
294   mater=mater+1
295 *ENDDO
296 !
297 ! Mallado de los volúmenes de la cámara absorbente
298 *DO,L,1,k,1
299   type,1
300   X1=lduct+Long_div*(L-1)
301   X2=lduct+Long_div*L
302   vsel,s,,2*k+3,3*k+2
303   vsel,r,loc,z,X1,X2
304   mat,mater
305   vmesh,all
306   vsel,all
307   mater=mater+1
308 *ENDDO
309 eplot
310 !
```

Figura 23. Mallado de volúmenes y asignación de materiales, parte 2.

En este momento se pasa al **cuarto bloque**, en el que se definen las condiciones de excitación a la entrada y salida del silenciador, así como las condiciones de contorno en el conducto perforado.

En la Figura 24 se muestran las condiciones de excitación a la entrada y salida del silenciador. Se calcula la impedancia característica “ z_0 ” en la entrada (línea 314), así como la velocidad normal de excitación (línea 316), permitiendo la descomposición de las ondas en parte progresiva y regresiva.

En la superficie de entrada se define un puerto de entrada al silenciador (línea 320), así como dos cargas superficiales: velocidad normal de excitación y condición de impedancia (línea 322 y 323). Estas dos cargas son definidas para que se aplique una velocidad cuya parte progresiva está asociada a la presión de excitación definida en la línea 315.

En la superficie de salida se define un puerto de salida del silenciador (línea 326), así como la carga superficial de radiación (línea 327).

```
311 ! *****
312 ! Condiciones de excitación en sección de entrada y salida
313 ! *****
314 z0_ce=rho0_ce*c0_ce          ! Impedancia característica en la entrada (rayl)
315 p=1                          ! Excitación en sección de entrada
316 vn=-p/z0_ce                 ! Valor de velocidad normal de excitación a partir de presión (entrada anecoica)
317                               ! Se facilita la descomposición de ondas progresiva y regresiva y cálculo del TL
318 !
319 nsel,s,loc,z,0               ! Nodos en la sección de entrada
320 sf,all,port,1                ! Puerto de entrada del silenciador
321 !
322 sf,all,shld,vn               ! Velocidad normal de excitación
323 sf,all,impd,z0_ce            ! Condición de impedancia en la entrada
324 !
325 nsel,s,loc,z,2*lduct+lchamb  ! Nodos en la sección de salida
326 sf,all,port,2                ! Puerto de salida del silenciador
327 sf,all,inf                   ! Radiación en la salida. Impedancia anecoica en la salida
328 alls                          ! (no vuelve energía al silenciador; necesario para obtener TL)
```

Figura 24. Condiciones de excitación a la entrada y salida del silenciador.

En la Figura 25 se muestran las condiciones de contorno de la superficie perforada. Antes de comenzar con el bucle de asignación de puertos de entrada y de salida a las caras interiores y exteriores del conducto perforado, se cambia el sistema de coordenadas cartesianas a coordenadas cilíndricas (línea 334) con el objetivo de facilitar la selección de los tramos requeridos.

El bucle de definición de puertos es similar a los anteriores, ya que selecciona los elementos que se sitúan a un radio específico y se vuelve a realizar una re-selección de los elementos dentro de la sección de tramo especificada. Tras esto, se le asignan las propiedades del conducto perforado a cada sección correspondiente, es decir, la matriz de admitancia obtenida bloques anteriores.

```
329 ! *****
330 ! Condiciones en superficie perforada. Matriz de admitancia
331 ! *****
332 ! Definición de puertos a conectar mediante matriz de admitancia (nodos a ambos lados del conducto perforado)
333 mater=3
334 csys,1                          ! Sistema de coordenadas cilíndricas
335 *DO,M,1,k,1
336   esel,s,type,,2
337   nsle,s
338   X1=lduct+Long_div*(M-1)
339   X2=lduct+Long_div*M
340   nsel,s,loc,x,rduct
341   nsel,r,loc,z,X1,X2
342   sf,all,port,mater              ! Puerto 1 (caras interiores)
343   mater=mater+1
344   nsel,s,loc,x,rduct+espesor
345   nsel,r,loc,z,X1,X2
346   sf,all,port,mater              ! Puerto 2 (caras exteriores)
347   alls
348   mater=mater+1
349 *ENDDO
350 csys,0                          ! Sistema de coordenadas cartesianas
351 finish
352 !
```

Figura 25. Condiciones de contorno en la superficie perforada.

Una vez hecho, se tiene definido el silenciador al completo, mallado y con condiciones de contorno y, entraríamos en el quinto y último bloque.

En el **quinto y último bloque**, mostrado en la Figura 26, se especifica el tipo de análisis, siendo en este caso, armónico (línea 357), así como el método más eficiente para resolver dicho análisis, mediante solución automática (línea 358). También se especifica el análisis por pasos y el rango de frecuencias para la resolución del este (líneas 359 a 361). Por último, se resuelve.

En la etapa de procesado de datos, tras obtener la solución, se calcula el índice de pérdidas de transmisión (TL), presentado en la línea 369. Llegados a este punto, se dispondría de la solución del problema.

```
353 ! *****
354 ! CÁLCULO DE LA SOLUCIÓN
355 ! *****
356 /solu
357 antype,harmic
358 hropt,auto
359 kbc,1
360 harf,0,f_fin
361 nsub,Nfrec          ! Frecuencias de cálculo especificadas antes
362 solve
363 finish
364 ! *****
365 ! Post-processing
366 ! *****
367 /post1
368 spower,1,2          ! Cálculo de potencia sonora
369 plst,Disipativo_con_conducto_GT0102,a2p,t1 ! TL - pérdida de transmisión
370 finish
```

Figura 26. Cálculo de la solución y post-proceso.

Gráficamente, se obtiene dicho índice en función de la frecuencia y debe presentar una forma como la mostrada en la Figura 27:

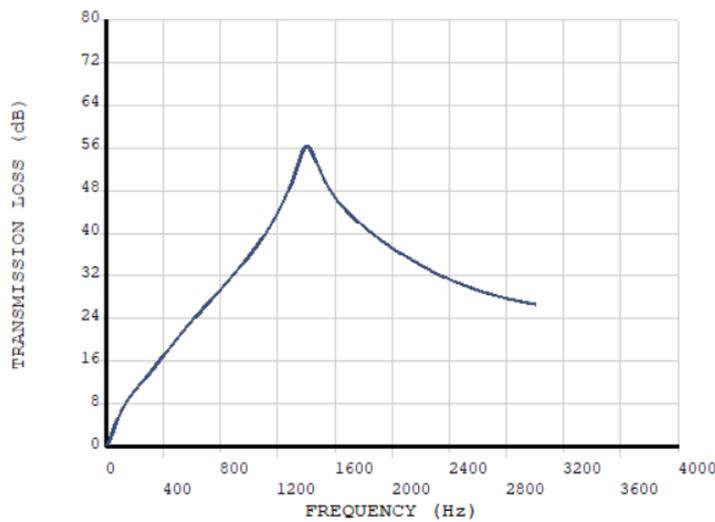


Figura 27. Pérdida de transmisión vs Frecuencia.

También se obtiene una ventana de resultados como se muestra en la Figura 28:

```
Mechanical APDL 2019 R3 Output Window
***** TRANSMISSION LOSS FROM PORT 1 TO 2 *****
FREQUENCY (Hz)    TRANSMISSION LOSS (dB)
10.000000         0.28234900
20.000000         0.79390900
30.000000         1.44860000
40.000000         2.18394000
50.000000         2.94605000
60.000000         3.69730000
70.000000         4.41542000
80.000000         5.08953000
90.000000         5.71607000
100.000000        6.29580000
110.000000        6.83184000
120.000000        7.32843000
130.000000        7.79023000
140.000000        8.22188000
150.000000        8.62782000
160.000000        9.01216000
170.000000        9.37864000
180.000000        9.73064000
190.000000        10.07120000
200.000000        10.40280000
210.000000        10.72800000
220.000000        11.04860000
230.000000        11.36640000
240.000000        11.68290000
250.000000        11.99920000
260.000000        12.31620000
```

Figura 28. Ventana de salida de resultados.

Capítulo 6

PROCEDIMIENTO EN WORKBENCH

6.1 INTRODUCCIÓN

Una vez detallado el procedimiento de implementación y ejecución de los casos de estudio mediante la versión APDL, en este apartado se va a describir el mismo procedimiento mediante la versión Workbench.

En primer lugar, se presenta la interfaz de la pantalla principal del programa, en la que se muestran diferentes tipos de análisis de un sistema. Tras escoger el análisis adecuado, correspondiente al análisis acústico de un silenciador disipativo, se procede a explicar detalladamente cada uno de los pasos por los que está formado.

La primera sección se corresponde con la introducción de las propiedades del conjunto de materiales existentes, siendo aire y fibra de vidrio texturizada. Una vez definidos, la siguiente sección se corresponde con el diseño y creación de la geometría del silenciador disipativo, donde se introducen las cotas correspondientes y se crean los volúmenes que van a generar el sólido final. Diseñada la geometría, se entra en la sección correspondiente al modelo. En esta se realiza el mallado de la geometría, se establecen las condiciones de contorno correspondientes y se introducen los ajustes de análisis adecuados para obtener la solución final. Una vez se hayan completado todos los pasos ordenadamente, solo queda realizar la simulación del problema desarrollado y obtener la solución del análisis escogido.

Tras desarrollar brevemente el proceso completo de desarrollo del análisis de este trabajo, se procede a la explicación detallada de este, centrándose en uno de los casos de estudio propuestos para este trabajo. Del mismo modo que en el apartado 5.3, se explicará el caso 4, correspondiente al de silenciador disipativo con conducto perforado y gradiente térmico.

Por lo tanto, el procedimiento en Workbench se puede dividir en los siguientes pasos:

- Interfaz principal de trabajo
- Propiedades de los materiales
- Geometría del problema
- Mallado
- Condiciones de contorno
- Procesado del análisis y resultados

6.2 INTERFAZ PRINCIPAL DE TRABAJO

Cuando se abre el programa, la primera imagen que se tiene es la mostrada en la Figura 29.

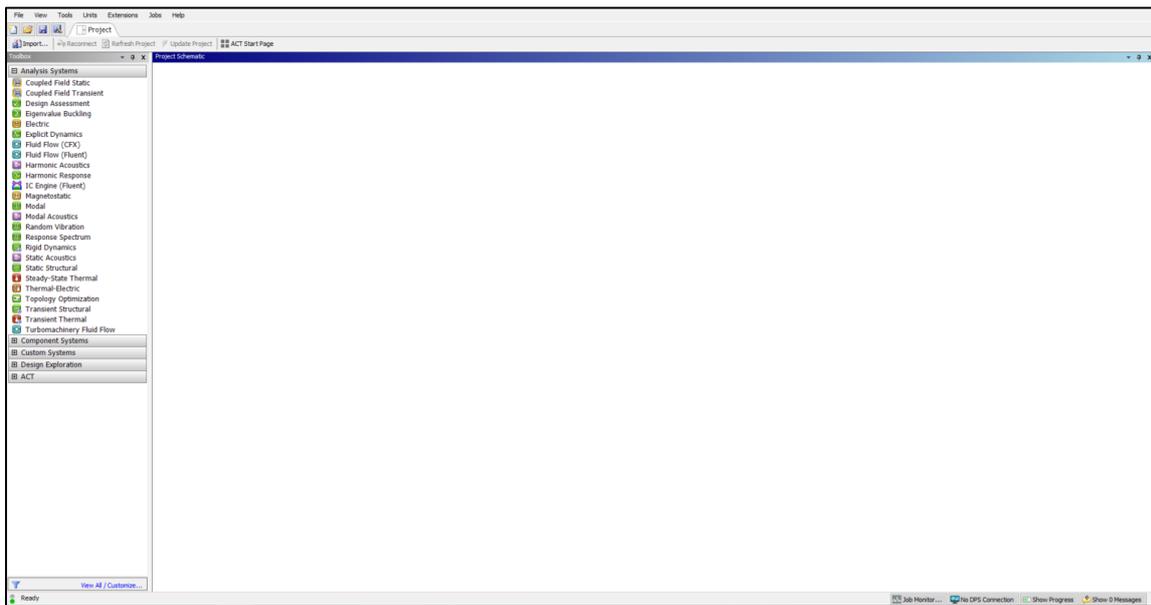


Figura 29. Interfaz principal Ansys Workbench.

Se trata de un entorno de trabajo que presenta, como la mayoría de programas, una barra superior de herramientas (Figura 30), con opciones de archivo, vista, herramientas, unidades de trabajo, extensiones y ayuda al usuario. En la parte izquierda se sitúa una caja de herramientas o “toolbox” (Figura 31), en el aparecen diferentes sistemas para realizar un tipo de análisis concreto, analizar componentes, realizar sistemas personalizados, etc.; y en la zona central se sitúa la zona del esquema del proyecto o “Project Schematic”.



Figura 30. Barra superior de herramientas.

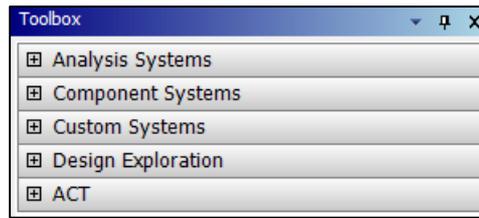


Figura 31. Caja de herramientas.

Centrándose en la primera pestaña, los diferentes sistemas de análisis existentes son:

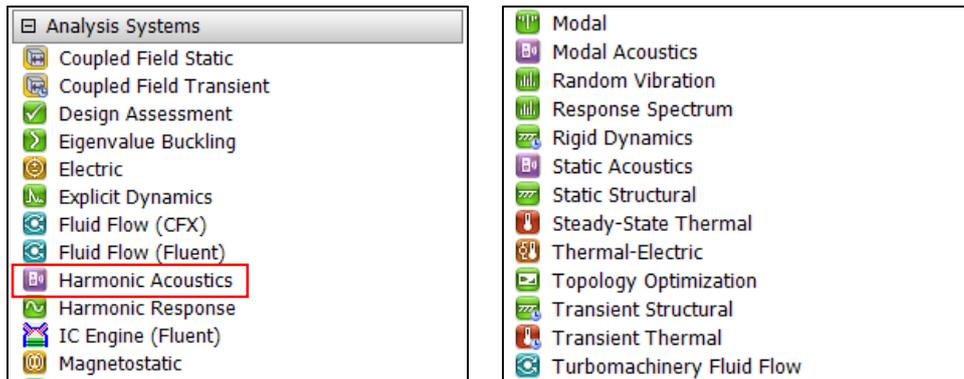


Figura 32. Tipos de sistemas de análisis.

En este Trabajo de Fin de Máster, el problema estudiado requiere un análisis acústico, por lo que el tipo de sistema de análisis escogido es *“Harmonic Acoustics”*, señalado en rojo en la imagen anterior.

Antes de comenzar con el análisis, se recomienda comprobar las unidades de trabajo y esto puede hacerse en la pestaña *“Units”* de la Figura 30. Las unidades de trabajo que se emplean en este trabajo son las correspondientes con el Sistema Internacional (Figura 33).

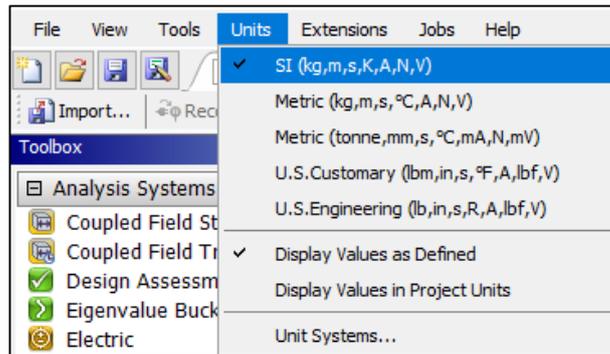


Figura 33. Unidades de trabajo.

Una vez elegidas, se comienza con el análisis. Se hace doble click sobre *“Harmonic Acoustics”* y se despliega el menú de trabajo en la zona del esquema de proyecto, como se observa en la Figura 34:

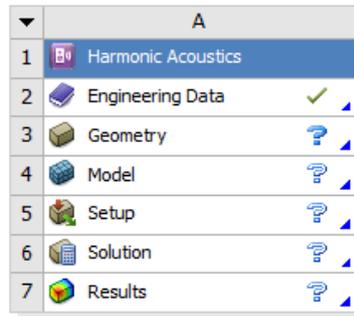


Figura 34. Menú de trabajo del análisis “Harmonic Acoustics”.

Es a partir de este momento cuando el análisis escogido se divide en varias secciones. Las secciones “Engineering Data”, “Geometry”, “Model” y “Setup” se corresponden con el pre-proceso; la sección “Solution” con el procesado y, por último, la sección “Results” con el post-procesado.

6.3 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

Esta sección se corresponde con la de “Engineering Data” de la Figura 34, en la que se introducen las propiedades de los materiales. Además de materiales como el aire y el material absorbente, se tiene la presencia de superficie perforada. Por otro lado, la temperatura se presenta como un gradiente térmico, decreciendo a lo largo de la cámara de expansión

En primer lugar, se hace doble click en la pestaña “Engineering Data” y se abre una nueva ventana como la mostrada en la Figura 35. En la parte central se añaden los materiales existentes, nombrándolos adecuadamente. En la parte izquierda se encuentran las propiedades a añadir al nuevo material. Haciendo doble click sobre ellas, se añaden en el apartado central inferior, donde se les da un valor y las unidades correspondientes (por defecto las del Sistema Internacional).

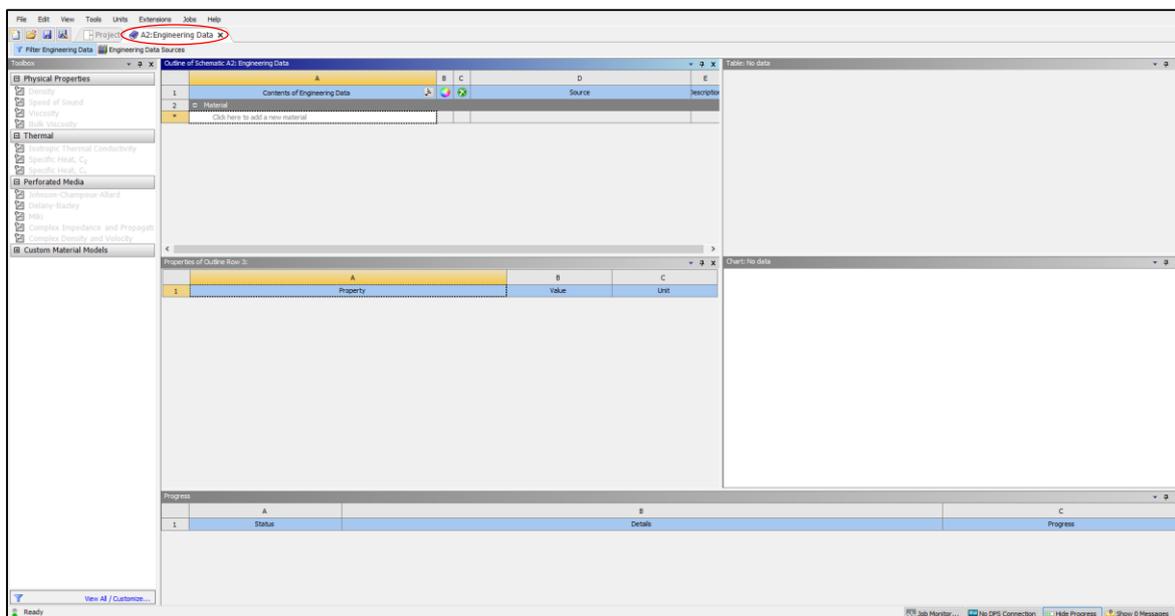


Figura 35. Pestaña “Engineering Data”.

En este caso, el aire circula tanto por los conductos de entrada, central y de salida, así como por la superficie perforada y el material absorbente. Sin embargo, presenta diferentes propiedades desde que entra hasta que sale, ya que la temperatura es variable. Por lo tanto, para el conducto de

entrada y salida (Aire_entrada y Aire_salida), así como para las divisiones de la cámara de expansión (Aire_x, Fibra_x y SuperfPerf_x; siendo x el número de división), se crea un material distinto. Esto puede observarse en la Figura 36:

	A	B
1	Contents of Engineering Data	
2	Material	
3	Aire_1	
4	Aire_2	
5	Aire_3	
6	Aire_4	
7	Aire_5	
8	Aire_entrada	
9	Aire_salida	
10	Fibra_1	
11	Fibra_2	
12	Fibra_3	
13	Fibra_4	
14	Fibra_5	
15	SuperfPerf_1	
16	SuperfPerf_2	
17	SuperfPerf_3	
18	SuperfPerf_4	
19	SuperfPerf_5	

Figura 36. Propiedades de los materiales del silenciador.

Los conductos de entrada, central y salida, así como las secciones de superficie perforada y material absorbente, presentan propiedades de densidad y velocidad del aire en función de la temperatura correspondiente.

Para el caso del material absorbente, además de presentar las propiedades de densidad y velocidad del sonido a una determinada temperatura, es necesario añadir la propiedad “Complex Density and Velocity”.

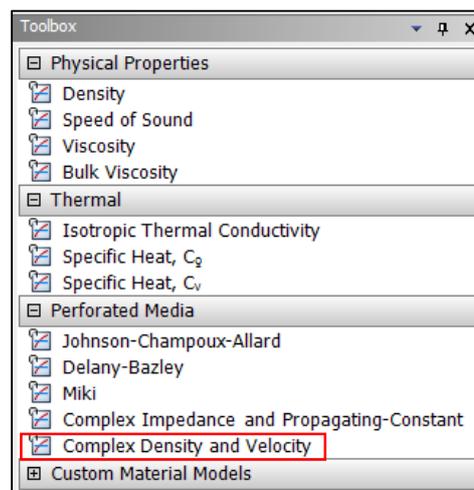


Figura 37. Propiedad “Complex Density and Velocity”.

Una vez añadida, en la parte lateral derecha aparece la tabla de esta propiedad. En ella se deben introducir los valores de densidad y velocidad del sonido en función de la frecuencia. Esto se puede

realizar haciendo click derecho sobre la propia tabla y clicando sobre la opción “*Import Delimited Data...*”, como aparece en la Figura 38:

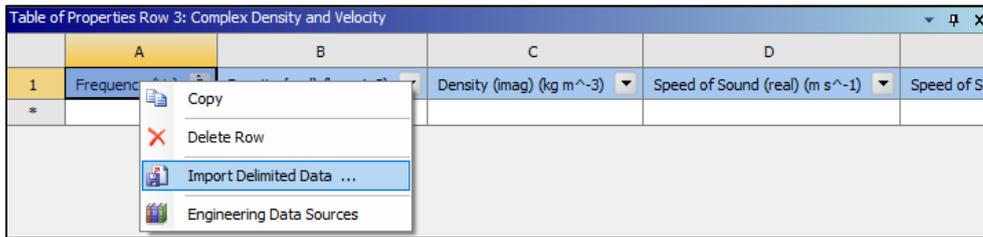


Figura 38. Opción de importar datos tabulares en “*Complex Density and Velocity*”.

El nuevo cuadro que aparece es el de la Figura 39. Se debe importar un archivo de texto creado externamente, en el que existan 5 columnas: frecuencia, densidad real, densidad imaginaria, velocidad real y velocidad imaginaria. La forma de calcular y obtener estos archivo se explica en el ANEXO A. MÉTODO DE CÁLCULO DE LAS PROPIEDADES DEL MATERIAL ABSORBENTE.

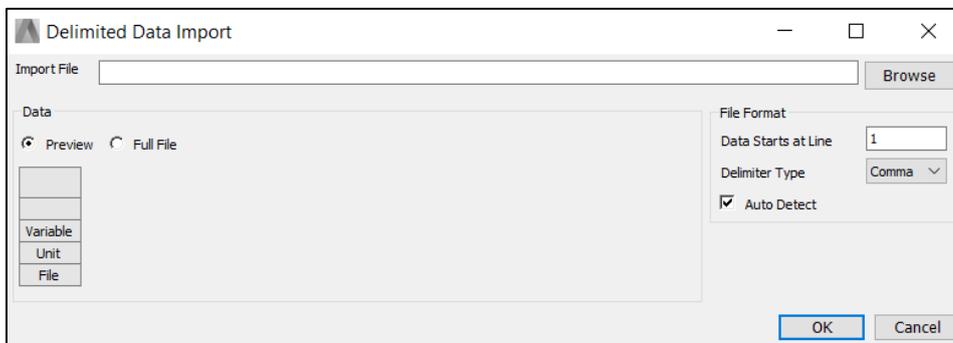


Figura 39. Importación de datos tabulares en “*Complex Density and Velocity*”.

Se importa el archivo de texto comentado y, en cada columna, se selecciona la opción “*Import*” y la variable correspondiente, como puede observarse en la Figura 40:

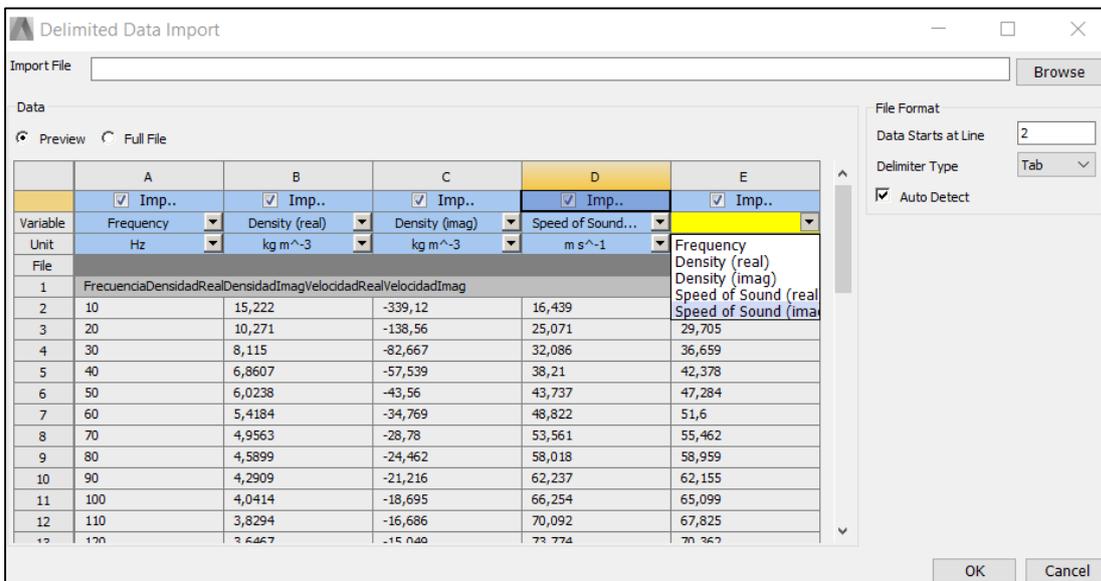


Figura 40. Definición de la matriz de densidad y velocidad del sonido del material absorbente.

En el caso de que no se tuviera gradiente térmico y la temperatura fuera constante a lo largo de todo el silenciador, sólo habría que añadir tres materiales: el aire de los conductos de entrada,

central y salida; la superficie perforada y el material absorbente; todos ellos a la misma temperatura.

Volviendo al caso actual, una vez añadidos todos los materiales existentes en el silenciador junto con sus propiedades, se retorna a la pestaña de “Project”, presente en la interfaz principal y se hace click en la pestaña “Refresh Project” del menú superior, actualizándose el análisis y quedando definidos los materiales.

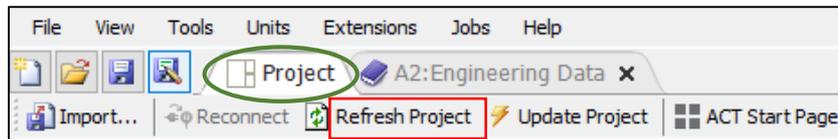


Figura 41. Pestaña “Refresh Project”.

6.4 GEOMETRÍA DEL PROBLEMA

Una vez definidos los materiales del problema, el siguiente paso es diseñar la geometría del silenciador disipativo, en este caso, con presencia de superficie perforada. Existen dos formas o vías de diseño: “SpaceClaim Geometry” y “DesignModeler Geometry”. En este Trabajo Fin de Máster se va a utilizar el “DesignModeler Geometry” debido a que resulta más intuitivo a la hora de realizar todo el diseño. Para ello, se pulsa el botón derecho sobre la pestaña “Geometry” y se selecciona la opción anterior.

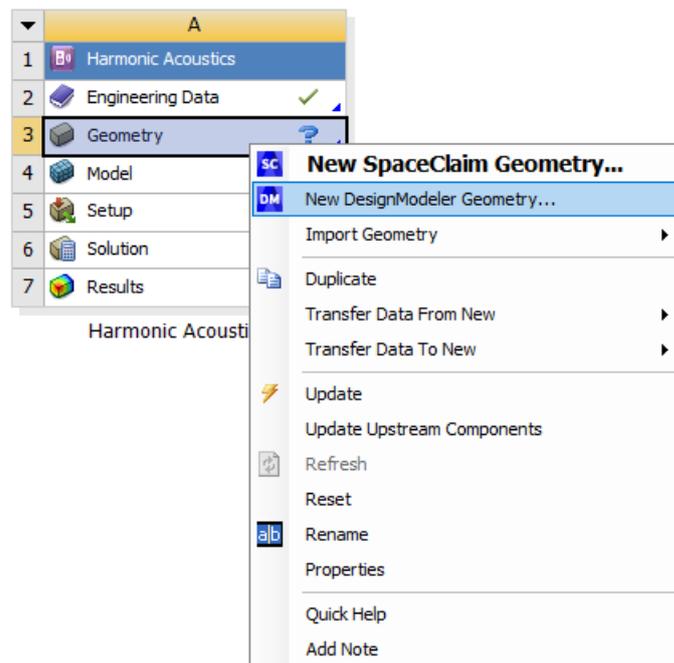


Figura 42. Selección “DesignModeler” para realizar la geometría.

Al entrar en el espacio de diseño, mostrado en la Figura 43, se pueden observar varios menús, tanto en la parte superior como en la parte izquierda, los cuales serán muy útiles para realizar el diseño.

Lo primero que se debe hacer es elegir las unidades que se quieren. En la parte superior del espacio de trabajo, se puede observar una barra de herramientas con diferentes opciones, entre las cuales se sitúa la opción “Units”.

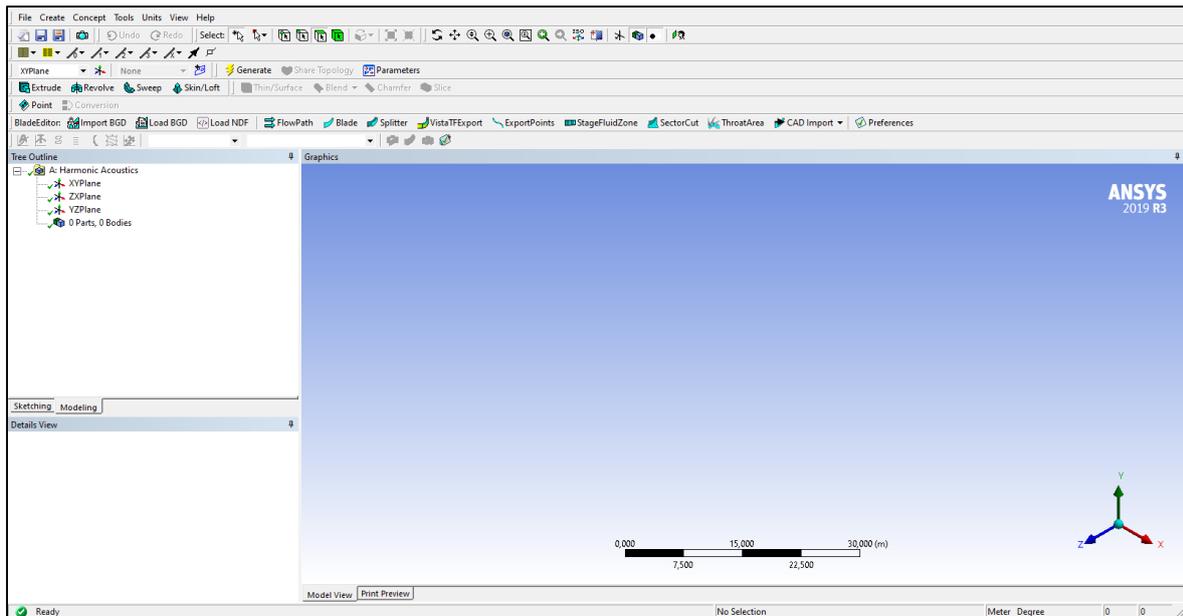


Figura 43. Espacio de diseño de “DesignModeler”.

El primer paso es la selección del plano de trabajo. Pulsando sobre el eje Z en los ejes de ordenadas que aparecen en la parte inferior derecha, se escoge el plano XY como plano para el diseño. Tras esto, se comienza con el diseño de la geometría, realizando una serie de rectángulos correspondientes a los diferentes conductos del silenciador, ya que posteriormente se realizará una revolución de estos.

En las herramientas de diseño de la parte izquierda, se pincha sobre la pestaña “Sketching” y, dentro de esta, sobre el menú “Draw”. Se escoge la opción de rectángulos y se empieza con la creación de los conductos de entrada, salida y central, así como la cámara de expansión.

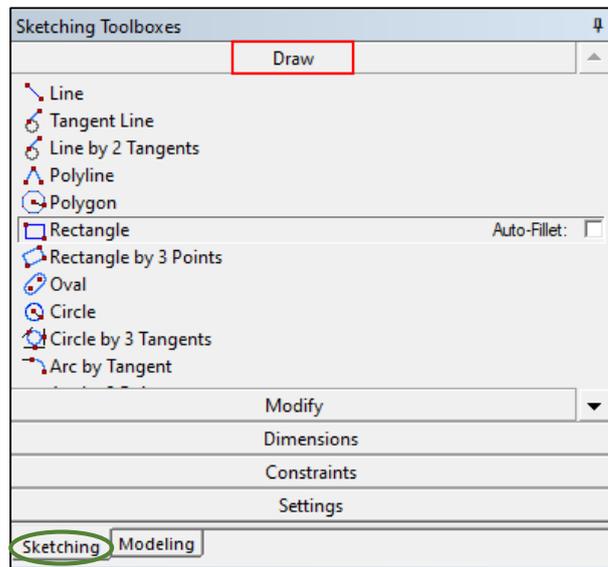


Figura 44. Herramientas para realizar la geometría: pestaña “Sketching”.

Recordar que, al presentar gradiente térmico en su interior, la cámara de expansión se divide en 5 divisiones. Por lo tanto, se comienzan a realizar los rectángulos del conducto de entrada, central (dividido en 5 secciones) y salida, así como la cámara de expansión, donde se sitúa la superficie perforada y el material absorbente, quedando aproximadamente:

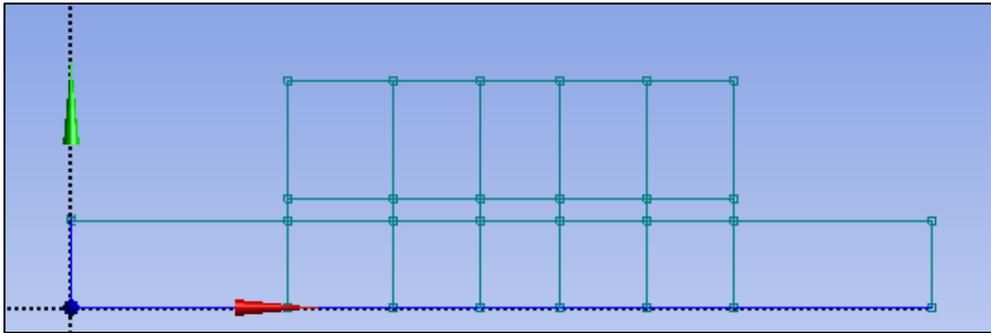


Figura 45. Geometría del silenciador sin dimensionar.

Los puntos y aristas en común de los rectángulos colindantes deben ser coincidentes entre ellos, de manera que al realizarlos aparezca la letra P (de punto coincidente con uno existente) y la letra C (de arista coincidente con una existente).

En el caso de que no exista superficie perforada, los rectángulos intermedios de la cámara de expansión se eliminarían.

Antes de dimensionar dichos rectángulos, se debe introducir la restricción de que las aristas verticales de los rectángulos de la cámara de expansión deben ser colineales. Esta opción se encuentra dentro de "Sketching", en el menú "Constraints", siendo la opción "Coincidents".

Dentro de la pestaña "Sketching", en "Dimensions", se elige el tipo de cota que se quiere. Generalmente se usan cotas horizontales y verticales, quedando:

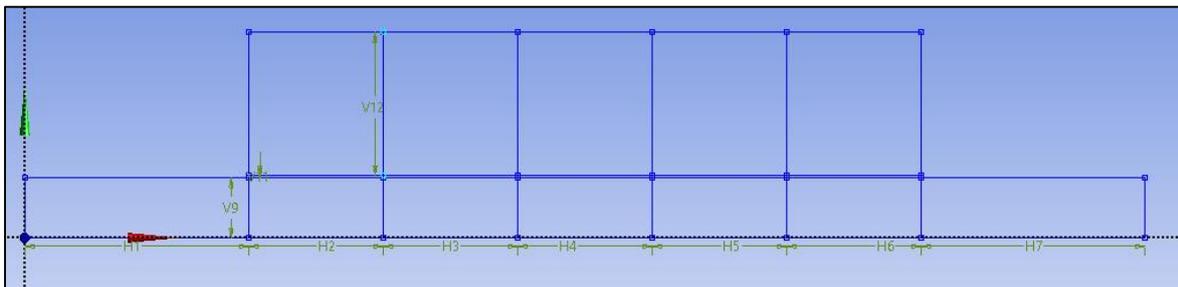


Figura 46. Dimensiones de la geometría del silenciador.

Una vez realizadas las cotas, se les da el valor numérico que tengan en la ventana inferior izquierda, en "Details View":

Details View	
[-] Details of Sketch1	
Sketch	Sketch1
Sketch Visibility	Show Sketch
Show Constraints?	No
[-] Dimensions: 10	
<input type="checkbox"/> H1	0,1 m
<input type="checkbox"/> H2	0,06 m
<input type="checkbox"/> H3	0,06 m
<input type="checkbox"/> H4	0,06 m
<input type="checkbox"/> H5	0,06 m
<input type="checkbox"/> H6	0,06 m
<input type="checkbox"/> H7	0,1 m
<input type="checkbox"/> V11	0,001 m
<input type="checkbox"/> V12	0,064075 m
<input type="checkbox"/> V9	0,0268 m

Figura 47. Valores de las cotas de la geometría del silenciador.

Por último y una vez diseñada la geometría en 2D, se revoluciona ésta para convertirla en un sólido. En el menú superior, se encuentra la opción “Revolve” y, una vez pulsada, aparece un menú en la parte izquierda inferior, en el cual se deben introducir las siguientes opciones:

Details View	
[-] Details of Revolve1	
Revolve	Revolve1
Geometry	Sketch1
Axis	2D Edge
Operation	Add Frozen
Direction	Normal
<input type="checkbox"/> FD1, Angle (>0)	360 °
As Thin/Surface?	No
Merge Topology?	Yes
[-] Geometry Selection: 1	
Sketch	Sketch1

Figura 48. Opciones de revolución de un sólido.

En la opción “Geometry” se debe escoger el “sketch” realizado; en “Axis” se escoge el eje X de revolución y en “Operation” se escoge “Add Frozen”, para que se generen sólidos independientes los unos de los otros. Una vez definidas las opciones de revolución, se realiza mediante el botón “Generate”, situado en el menú superior.

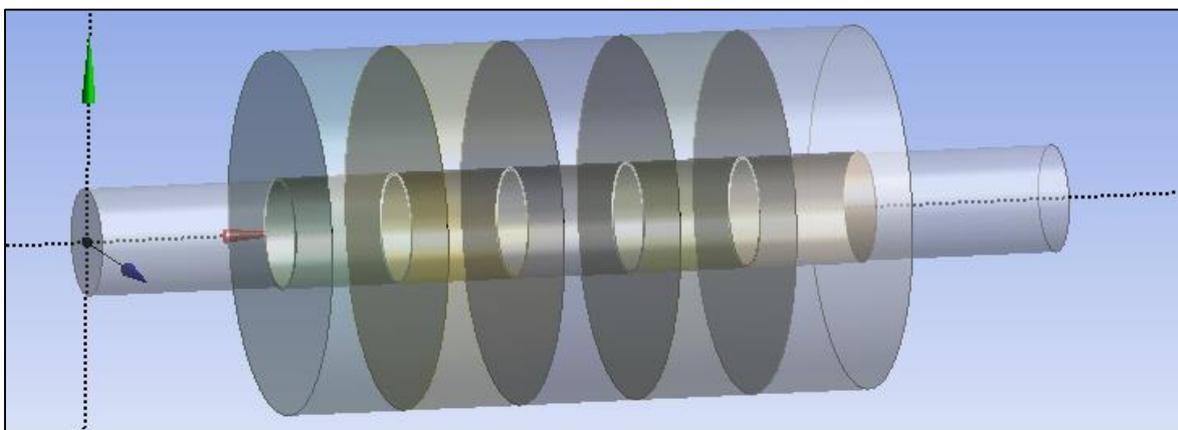


Figura 49. Revolución de la geometría del silenciador.

En el menú izquierdo, en la pestaña “Modeling” se presenta el árbol de trabajo, y en este punto se deberá tener el siguiente:

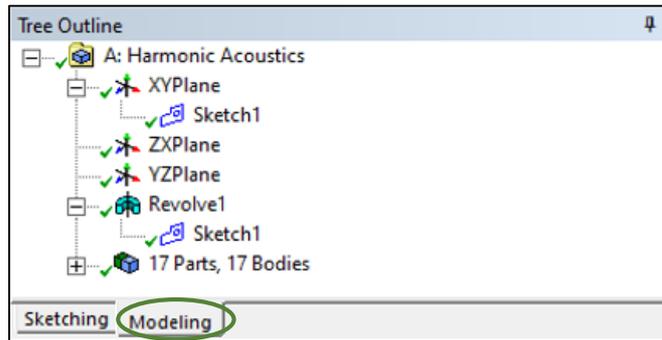


Figura 50. Árbol de trabajo (I).

Antes de dar por finalizada la geometría, se debe hacer un pegado de volúmenes, manteniendo cada uno su identidad. Esto es necesario ya que el dominio de propagación de las ondas es continuo y, por tanto, la malla generada posteriormente debe ser continua en las transiciones de un volumen a otro. Por lo tanto, desplegando los 17 cuerpos en dicho árbol de trabajo y seleccionando todos, se hace click izquierdo encima de uno de ellos y se le da a la opción “Form new part”, quedando:

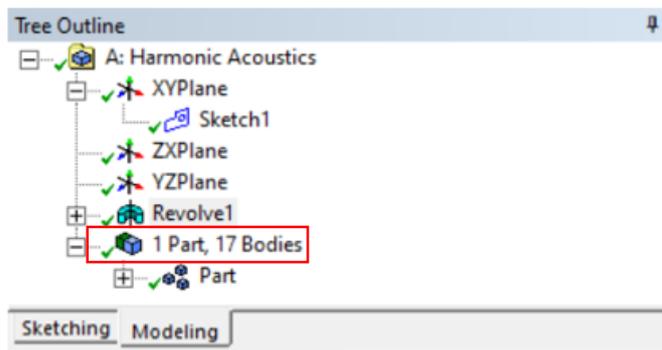


Figura 51. Árbol de trabajo (II).

Llegados a este punto, se daría por concluida la geometría del silenciador y se pasaría al mallado de este.

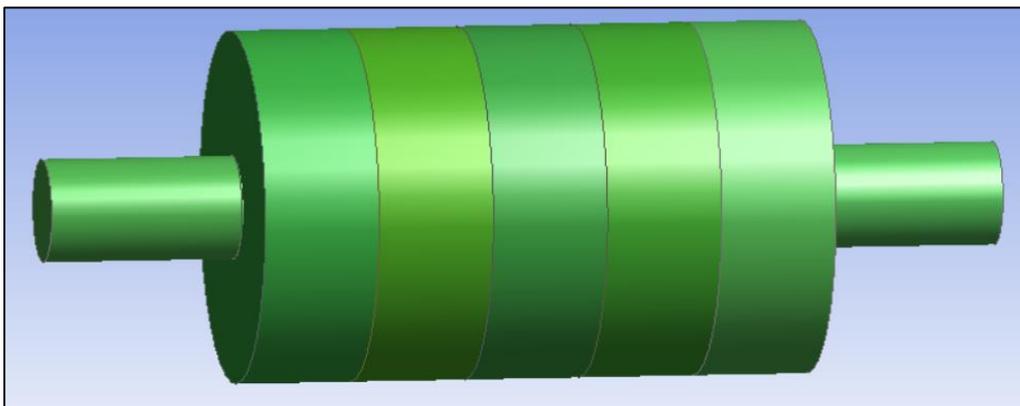


Figura 52. Silenciador sólido.

6.5 MALLADO

En la sección “*Model*” se entra en una nueva interfaz en la que se va a realizar el mallado del silenciador, además de definir las condiciones de contorno y obtener los resultados del TL.

De nuevo, esta interfaz presenta un menú superior de herramientas, un árbol de trabajo en la parte central izquierda, una ventana de detalles de dicho árbol y una ventana central donde se muestran visualmente todos los cambios realizados a la geometría del silenciador.

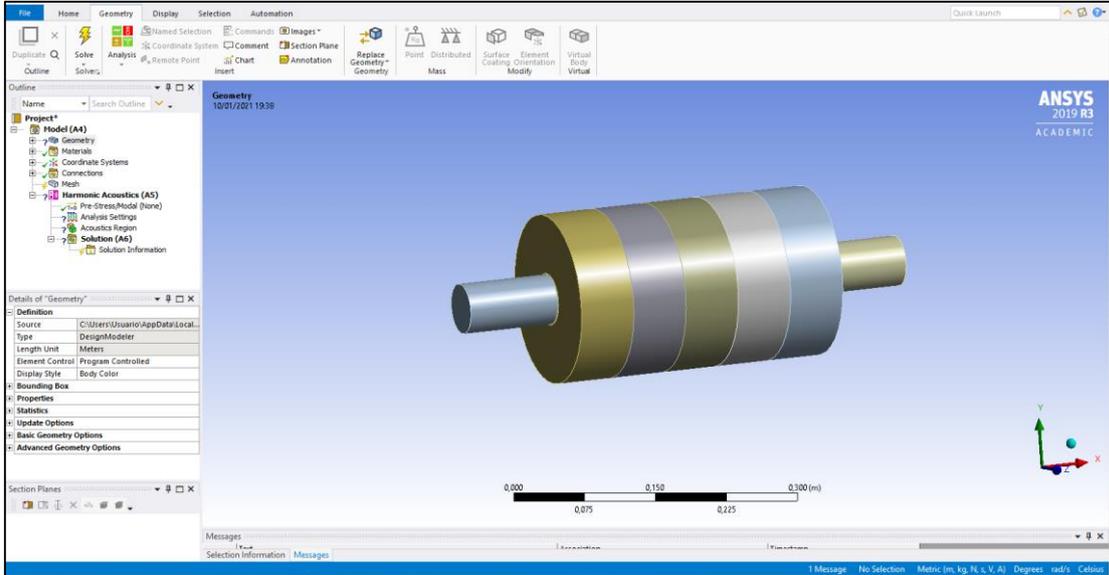


Figura 53. Interfaz de la pestaña “*Model*”.

El primer paso es asignar los materiales creados anteriormente al sólido, pinchando en “*Model*” → “*Geometry*” → “*Part*” y se seleccionando un sólido. Una vez seleccionado, en la pestaña inferior de detalles, se asigna el material adecuado. Este proceso se realiza para todos y cada uno de los sólidos, quedando todos completamente definidos como en la Figura 54:

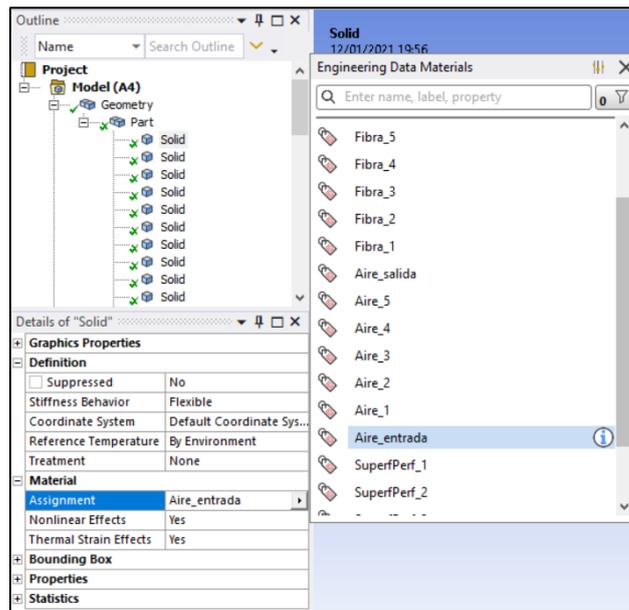


Figura 54. Asignación de material al sólido.

Como se puede observar en el árbol de trabajo de la Figura 55, conforme se van completando las tareas de este, aparece un tick verde al lado de cada una, sirviendo de guía en el proceso de mallado.

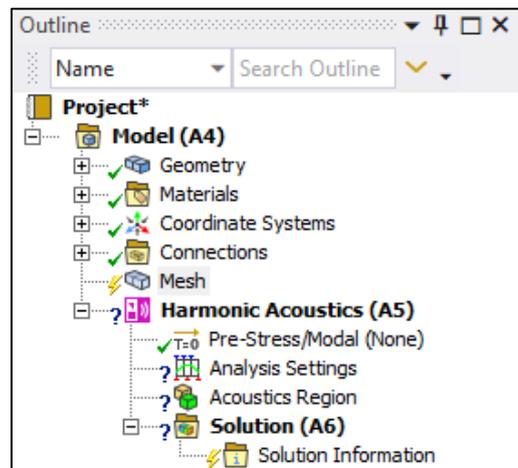


Figura 55. Árbol de trabajo.

Una vez asignados los materiales, se comienza a mallar. En primer lugar, se definen las opciones de la operación de mallado. Pinchando en el árbol de trabajo en “Mesh”, en el menú superior aparecen las herramientas de mallado. Se selecciona “Method” y en la ventana de detalles aparecen las diferentes opciones del método elegido. En “Geometry” se seleccionan todos los cuerpos y en “Method” se selecciona “Sweep”.

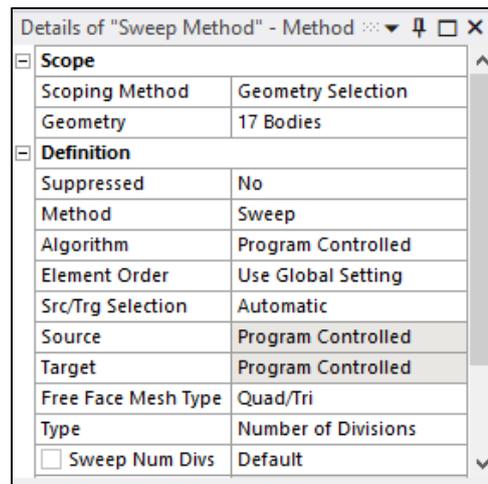


Figura 56. Configuración del método de mallado.

Además, se debe especificar que el mallado de las cuatro caras de la cámara de expansión, correspondientes a la superficie perforada y a la propia cámara, se realice de forma mapeada. Como anteriormente se ha definido el mallado con el método “Sweep”, la malla se repite por toda la superficie de la cámara de expansión. Esto se realiza pinchando de nuevo en el árbol de trabajo en “Mesh”, luego en “Face Meshing” y en “Geometry” se seleccionan estas cuatro superficies.

A esta altura ya se tiene realizada toda la configuración del mallado, quedando únicamente por seleccionar el tamaño de los elementos. Pulsando, una vez más en “Mesh”, en la ventana de detalles aparece la opción “Element Size”, donde se elige un tamaño de elemento de 0,02m.

El último paso es el del mallado del silenciador completo, y esto se realiza mediante la opción “Generate”, presente en el menú superior. La malla obtenida es la mostrada en la Figura 57:

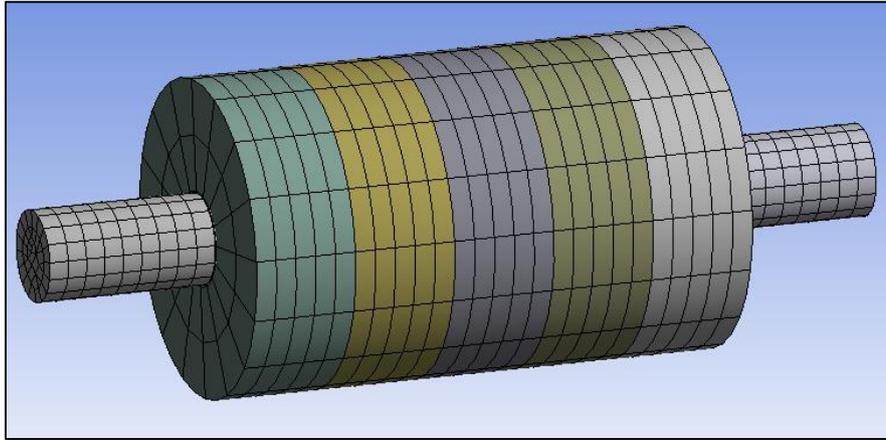


Figura 57. Mallado del silenciador.

6.6 CONDICIONES DE CONTORNO

Tras obtener el mallado del silenciador, el siguiente paso es fijar las condiciones de contorno del sólido. Esto puede realizarse en esta misma interfaz, en la pestaña “Harmonic Acoustics” del árbol de trabajo, la cual se correspondería con la sección “Setup” de la Figura 34.

En primer lugar, se define la región acústica. Para ello, en la pestaña “Acoustic Region”, se seleccionan todos los cuerpos del silenciador en “Geometry”. Tras definir la región acústica del análisis, se pasa a definir el comportamiento que presentan las superficies. Las superficies caracterizadas como puertos van a tener un comportamiento “transparente” a la propagación de la onda acústica. Por el contrario, las paredes rígidas tendrán un coeficiente de transmisión del sonido nulo por lo que no van a dejar que la onda sonora se propague a través de ellos (Munuera, 2019). Como puertos se tienen la superficie de entrada de aire al silenciador y la de salida de éste. Además, al presentar superficie perforada, también se debe definir como puerto, pues el aire la atraviesa.

Para definir los puertos, en la pestaña “Acoustic Boundary Conditions”, se selecciona la opción “Port”. Una vez añadido el puerto, es aconsejable darle un nombre en función de si es de entrada (“Entrada”) o de salida (“Salida”), ya que posteriormente resultará muy útil para identificarlos. Siguiendo con la configuración, dentro de las opciones del puerto, se selecciona la superficie (ya sea de entrada o de salida del silenciador) en “Geometry”, escogiendo después la región acústica a la que pertenece. Para el caso del puerto de entrada al silenciador, la configuración del puerto sería la mostrada en la Figura 58:

Details of "Entrada"	
Port Surface(s)	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
Port Position	On Exterior Face
Inside Surface Bodies	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
Definition	
Type	Port
Port Behavior	Transparent
Suppressed	No

Figura 58. Configuración del puerto de entrada.

Una vez definida, visualmente el puerto debería aparecer representado como en la Figura 59:

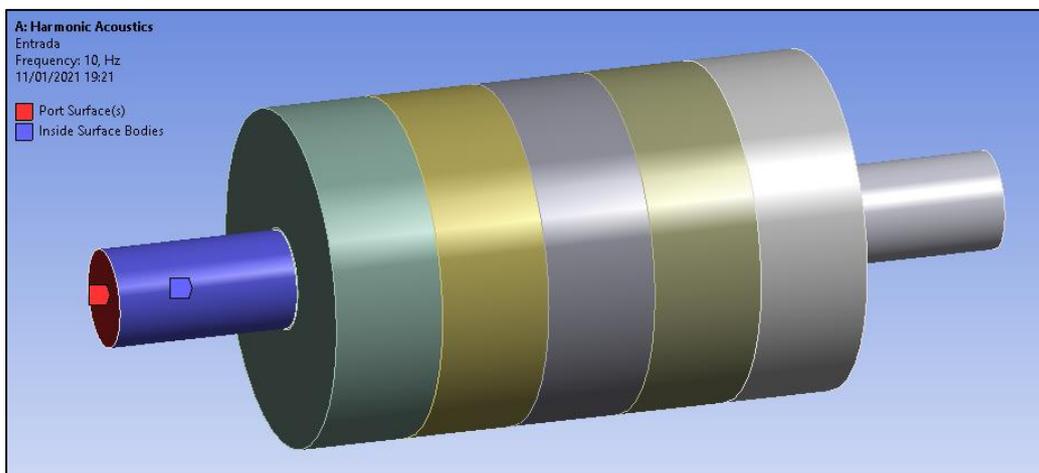


Figura 59. Puerto de entrada al silenciador.

El puerto de salida del aire del silenciador se realiza del mismo modo.

Para el caso de los puertos de la superficie perforado, es necesario ocultar los cuerpos que la engloban. Para ello, se clic sobre el botón izquierdo en el sólido (*Árbol de trabajo* → "Geometry" → "Part") que se quiera ocultar y, seleccionando la opción "Hide Body", se dejan únicamente los sólidos correspondientes a la superficie perforada, como en la Figura 60:

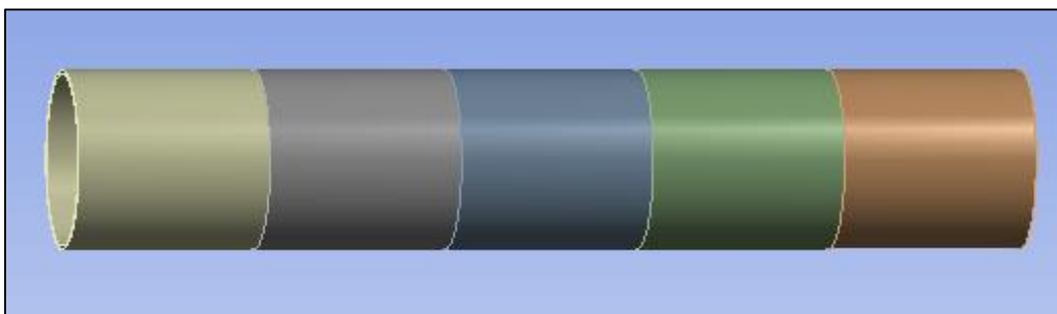


Figura 60. Sólidos de la superficie perforada.

Del mismo modo que en el caso anterior, se añaden como puertos de entrada a cada una de las superficies interiores de las 5 divisiones, y como puertos de salida a cada una de las superficies exteriores de las 5 divisiones, quedando:

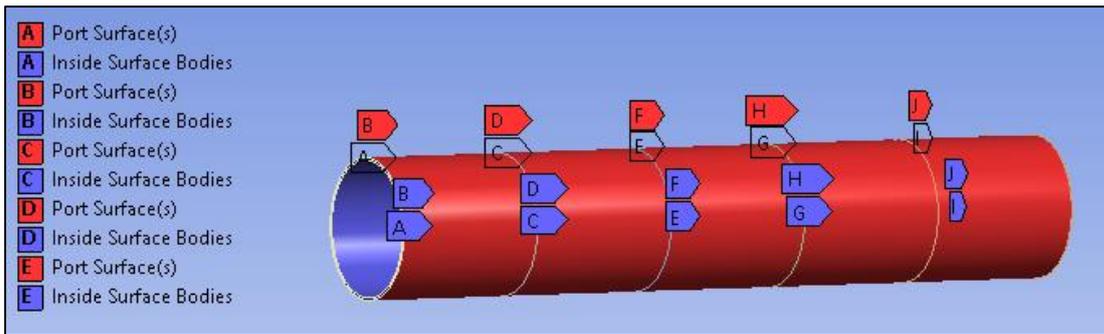


Figura 61. Puertos de entrada y salida de la superficie perforada.

De esta manera quedan definidos la totalidad de puertos del silenciador. Por otro lado, las paredes rígidas no son necesarias de definir, pues el programa establece automáticamente como paredes rígidas a todo aquello que no se ha definido como puerto. Si se quisiera añadir manualmente, puede hacerse en “Acoustic Boundary Conditions”, escogiendo la opción “Rigid Wall” en la que se seleccionan todas las superficies exteriores que no sean puertos, en este caso, 11 caras.

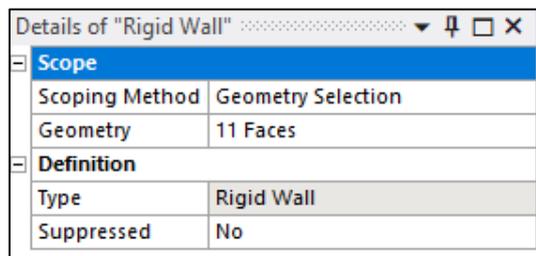


Figura 62. Configuración de las paredes rígidas.

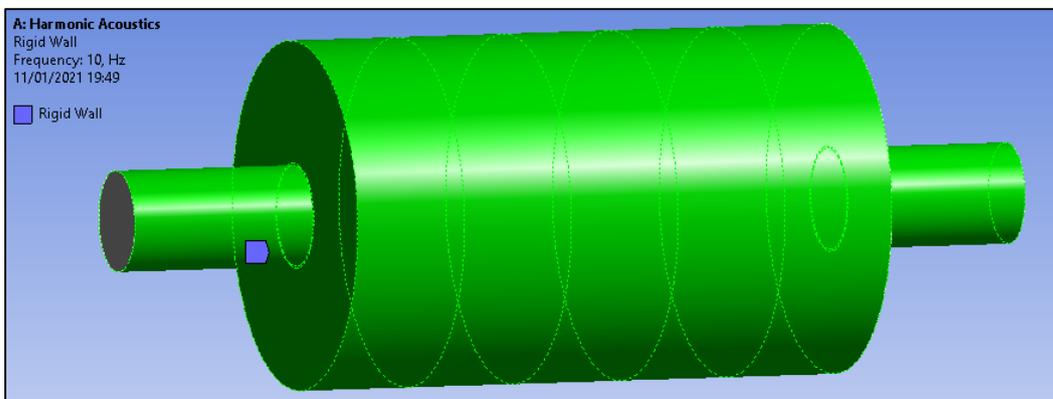


Figura 63. Paredes rígidas del silenciador.

Una vez definido el comportamiento de las superficies del silenciador, el siguiente paso es definir la excitación que va a caracterizar a la onda acústica. Para ello, se introduce una onda armónica de valor la unidad y con sentido positivo en el eje X. Esto se realiza en la pestaña “Acoustic Excitacions”, seleccionando la opción “Surface Velocity”. La excitación se aplica en la superficie de entrada y con un valor o magnitud de -1 m/s, donde el signo negativo indica que se aplica en sentido contrario al vector normal de la superficie de entrada.

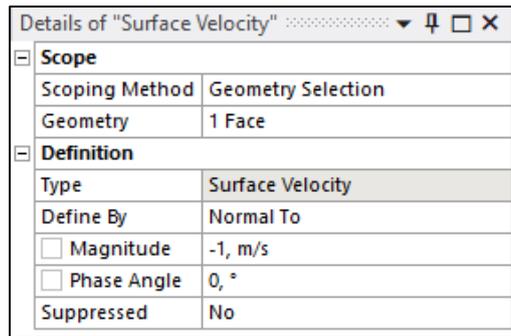


Figura 64. Configuración de la excitación en la entrada.

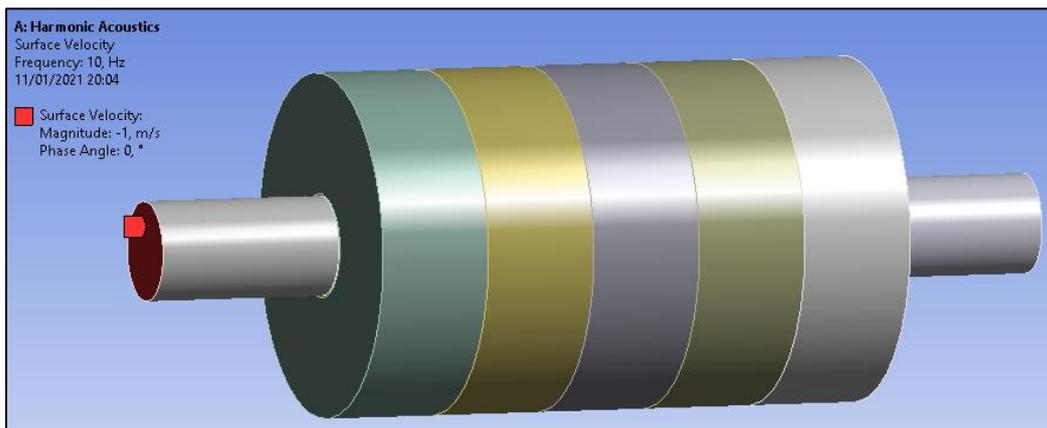


Figura 65. Excitación en la entrada del silenciador.

Otra condición de contorno que debe añadirse es que la salida del silenciador debe de ser anecoica, impidiendo que las ondas que salgan al exterior se reflejen, siendo absorbidas por el ambiente. Esta condición se puede añadir seleccionando "Radiation Boundary" en la pestaña "Acoustic Boundary Conditions". En la configuración de ésta, se seleccionan las superficies de entrada y de salida de aire del silenciador.

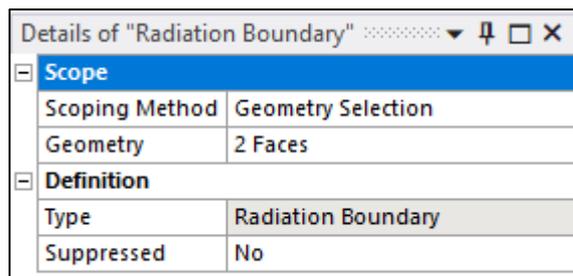


Figura 66. Configuración de la entrada y salida anecoica.

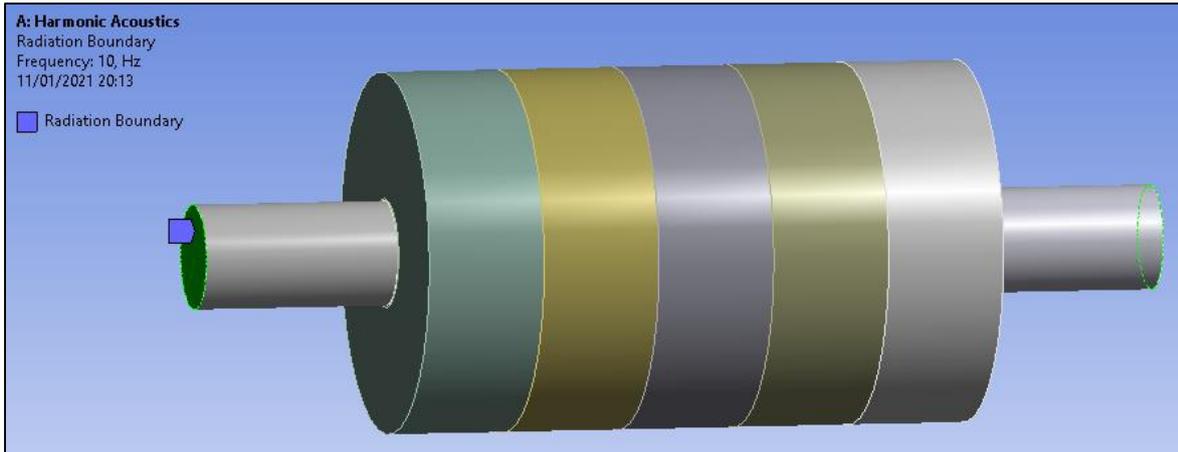


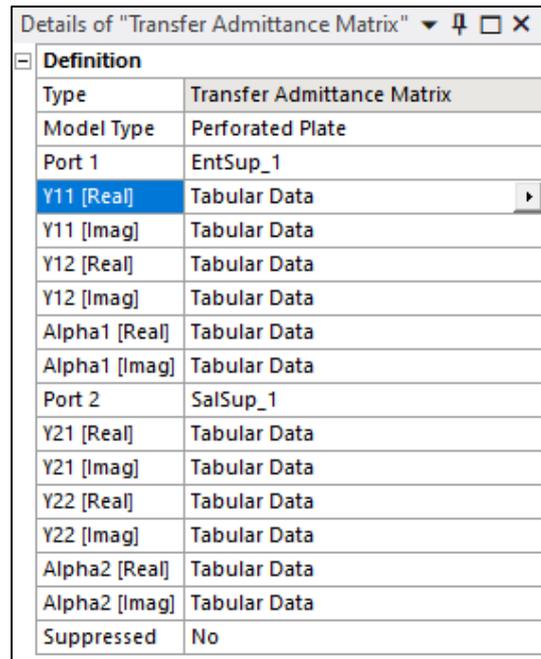
Figura 67. Salida anecoica del silenciador.

Llegados a este punto, estarían definidas todas las condiciones de contorno para el caso del silenciador disipativo con superficie perforada y en presencia de gradiente térmico. Pero, antes de acabar, queda un último paso: introducir el efecto del perforado. Como se ha visto en el apartado 6.3, todos los materiales han sido definidos, pero la superficie perforada únicamente presentaba las propiedades de densidad y velocidad del sonido. Por lo tanto, para introducir el efecto de la superficie perforada, se utiliza la opción “*Transfer Admittance Matrix*” en la pestaña “*Acoustic Models*”. Además, los puertos de entrada y salida de la superficie perforada entran en acción con esta opción, la cual utiliza una matriz de admitancia para representar las impedancias entre dos contornos o caras diferentes. La admitancia, es la inversa de la impedancia. De ésta forma, ANSYS Workbench define la matriz de admitancias entre las caras de dos sets de la siguiente manera (Munuera, 2019):

$$\begin{bmatrix} V_{n1} \\ V_{n2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix}$$

- V_{n1} = Velocidad normal en los nodos de la 1º cara o en el lado positivo del elemento seleccionado.
- V_{n2} = Velocidad normal en los nodos de la 2º cara o en el lado positivo del elemento seleccionado.
- P_1 = Presión en los nodos de la 1º cara o en el lado positivo del elemento seleccionado.
- P_2 = Presión en los nodos de la 2º cara o en el lado positivo del elemento seleccionado.
- $Y_{11}, Y_{12}, Y_{21}, Y_{22}$ = Coeficientes de admitancias (nº complejo).
- α_1, α_2 = Coeficientes de término fuente (nº complejo).

Se deben introducir 5 matrices, ya que la superficie perforada está dividida en 5 secciones. Una vez introducidas, en la ventana de propiedades se deben añadir los puertos de entrada y salida de cada una de las secciones. Los coeficientes de admitancias y de término fuente se introducen de manera tabular, seleccionando la opción “*Tabular (Frequency)*”. La ventana de configuración para una de las secciones queda de la siguiente forma:



Definition	
Type	Transfer Admittance Matrix
Model Type	Perforated Plate
Port 1	EntSup_1
Y11 [Real]	Tabular Data
Y11 [Imag]	Tabular Data
Y12 [Real]	Tabular Data
Y12 [Imag]	Tabular Data
Alpha1 [Real]	Tabular Data
Alpha1 [Imag]	Tabular Data
Port 2	SalSup_1
Y21 [Real]	Tabular Data
Y21 [Imag]	Tabular Data
Y22 [Real]	Tabular Data
Y22 [Imag]	Tabular Data
Alpha2 [Real]	Tabular Data
Alpha2 [Imag]	Tabular Data
Suppressed	No

Figura 68. Configuración de la matriz de admitancias.

El siguiente paso es introducir los valores tabulares de dichos coeficientes. El cálculo de estos valores y creación de las tablas para su importación viene explicado en el ANEXO B. MÉTODO DE CÁLCULO DE LA IMPEDANCIA DE LA SUPERFICIE PERFORADA. Seleccionadas las tablas con las columnas de valores de estos coeficientes, se pegan sobre las columnas mostradas en la Figura 69, quedando definido el efecto de la superficie perforada.

Desarrollo e implementación de metodologías numéricas de elementos finitos para el análisis acústico de silenciadores disipativos. Influencia de altas temperaturas y gradientes térmicos

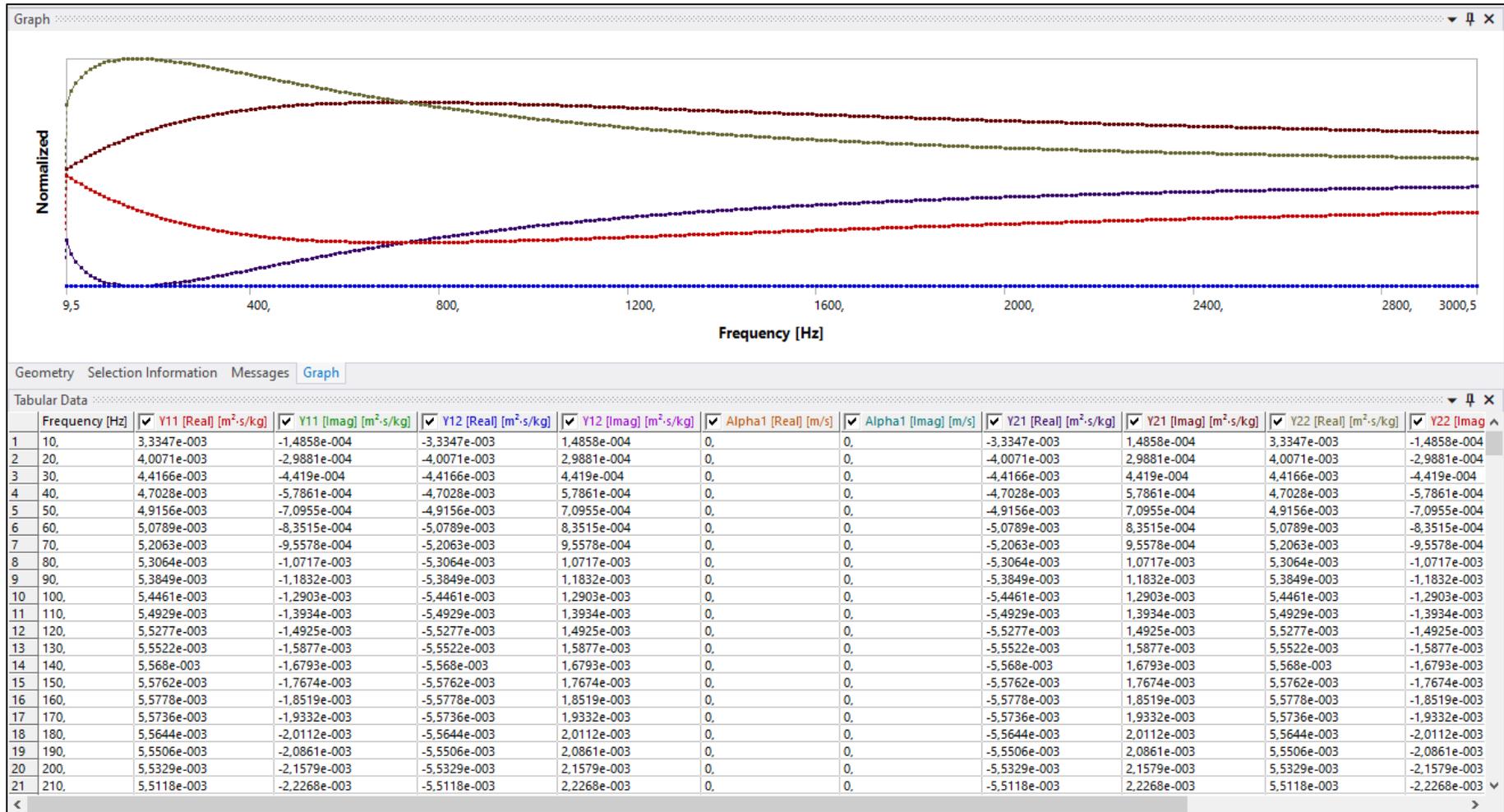


Figura 69. Valores de la matriz de admitancias.

En este punto del análisis, el árbol del proyecto debería tener esta forma:

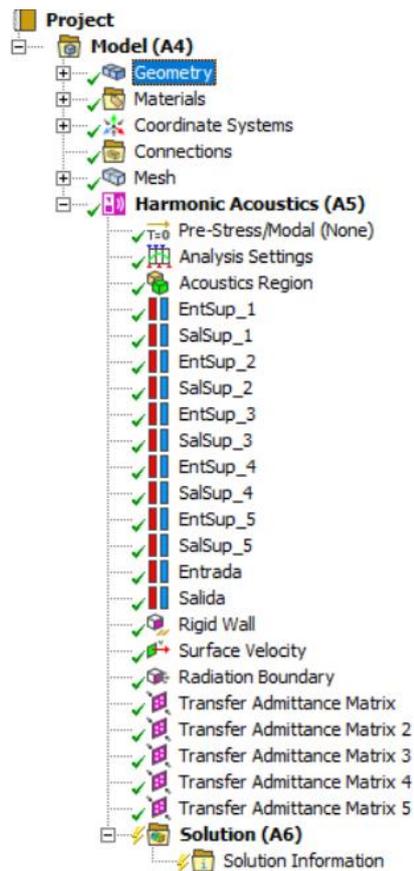


Figura 70. Progreso del árbol del proyecto.

6.7 PROCESADO DEL ANÁLISIS Y RESULTADOS

Una vez quedan definidas las condiciones de contorno, se da por definido el caso del modelo a analizar. Se inicia la etapa de procesado, en la cual se van a definir los ajustes del análisis acústico que se va a realizar.

En primer lugar, se selecciona “*Analysis Settings*” en la tarea “*Harmonic Acoustic*” del árbol de trabajo. En la ventana de configuración que aparece, se define el rango de frecuencias de trabajo, así como el número de soluciones que se van a obtener dentro del rango especificado. Para este trabajo, dicha configuración queda de la siguiente forma:

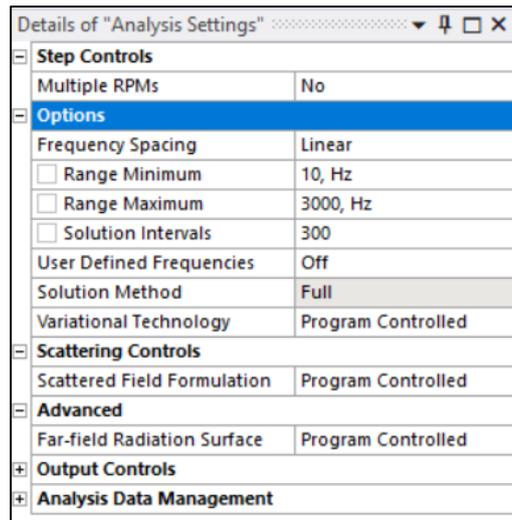


Figura 71. Configuración de las opciones del análisis acústico.

Tras completar la configuración del análisis, lo único que queda por definir es el parámetro que se quiere obtener como resultado del análisis. Para ello, se selecciona en el árbol de trabajo la tarea "Solution". En la barra de herramientas superior, se pincha en "Acoustics", seleccionando la opción "Transmission Loss", que se corresponde con el índice de pérdidas de transmisión TL. Una vez añadido, se configuran las opciones de dicho parámetro, seleccionando los puertos de entrada y salida del silenciador, pues el rango de frecuencias se autocompleta del apartado anterior.

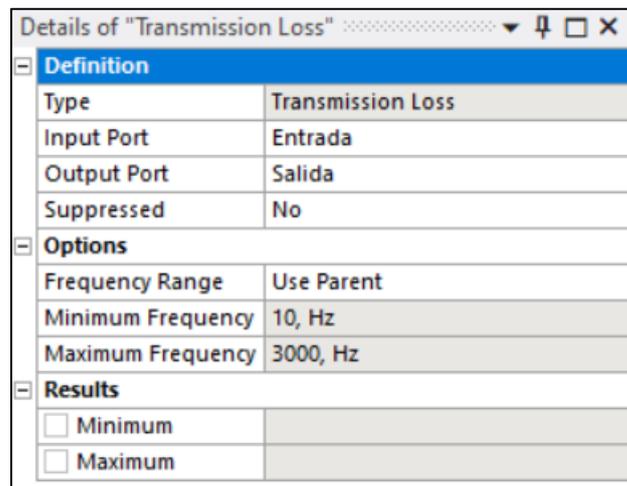


Figura 72. Configuración del TL.

Es en este momento cuando se puede realizar el lanzamiento del análisis, pinchando en el botón "Solve" de la barra de herramientas superior. El programa tarda unos minutos en dar la solución y, tras obtenerla, aparece en la ventana central (pestaña "Worksheet"), la gráfica de los valores del TL frente a la frecuencia. Dentro de dicha ventana central, existe la opción de conocer el valor que se quiera a una determinada frecuencia, mediante la pestaña "Graph".

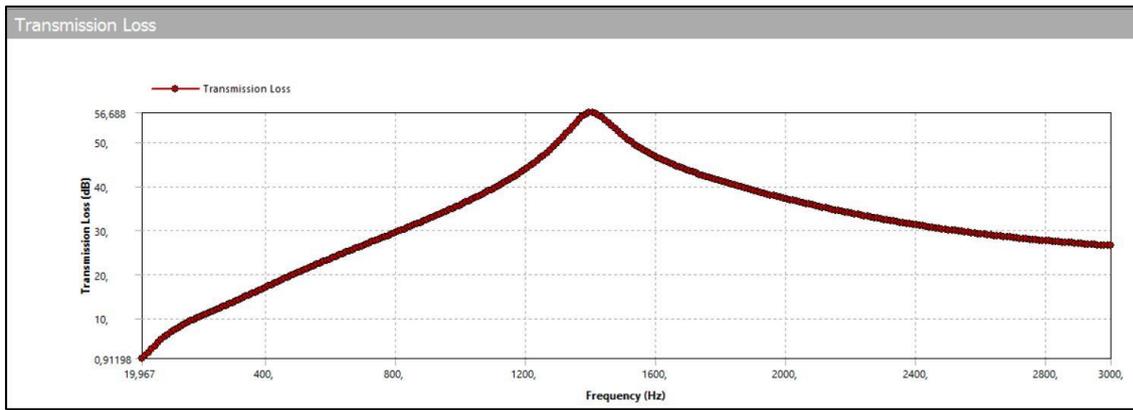


Figura 73. Valores del TL frente a la frecuencia para el caso de silenciador disipativo con superficie perforada y gradiente térmico.

Por otro lado, en la ventana inferior “*Tabular data*” se encuentran todos los valores de TL frente a la frecuencia tabulados, pudiendo exportarlos para hacer un tratamiento de datos en otros programas, como Excel o Matlab. Esto se hace pinchando sobre el botón derecho en la tabla y seleccionando la opción “*export*”, donde se puede guardar como un documento de texto.

Tabular Data		
	Frequency [Hz]	<input checked="" type="checkbox"/> Transmission Loss [dB]
1	19,967	1,0422
2	29,933	1,6685
3	39,9	2,3626
4	49,867	3,0821
5	59,833	3,7951
6	69,8	4,4812
7	79,767	5,1297
8	89,733	5,7362
9	99,7	6,3004
10	109,67	6,8246
11	119,63	7,3121
12	129,6	7,7668
13	139,57	8,193
14	149,53	8,5945

Figura 74. Valores tabulados de la simulación anterior.

En el caso de que se quisiera hacer alguna modificación en la geometría del silenciador, Ansys Workbench presenta la ventaja de que los pasos posteriores, tales como el mallado o las condiciones de contorno, no sufran modificaciones. De este modo, se pueden realizar diferentes tipos de casos sin tener que volver a hacer todo el proceso desde el inicio.

Capítulo 7

VALIDACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS PROPUESTAS

7.1 INTRODUCCIÓN

En los dos apartados anteriores se han presentado las dos metodologías a emplear en este Trabajo Fin de Máster para analizar los casos de estudio presentados en el apartado 4.5.

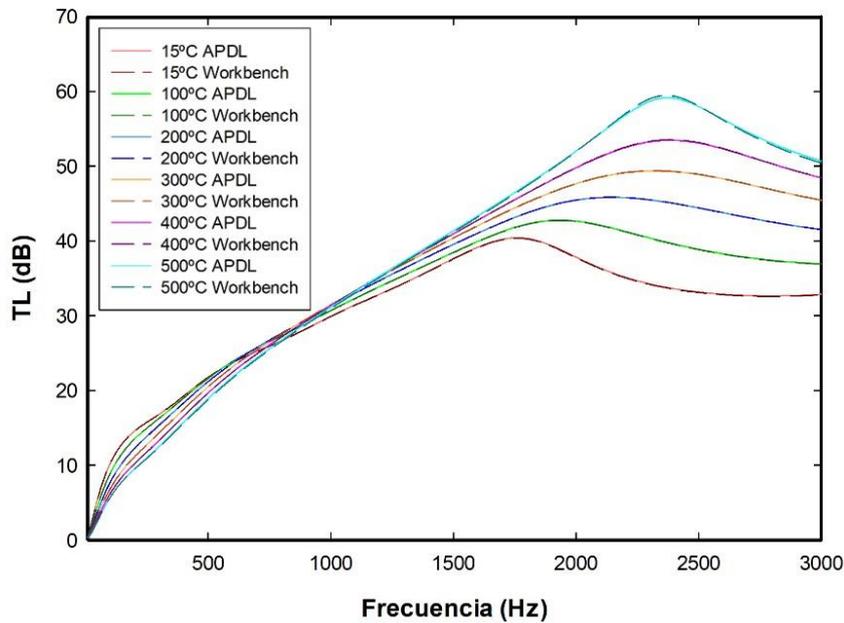
En este apartado se valida el correcto funcionamiento de las dos versiones empleadas mediante la comparación de los resultados del TL obtenidos en los casos de estudio 1, 2, 3 y 4 de la Figura 10. De esta manera, quedan validados los casos restantes.

En resumen, los casos de estudio a comparar son los siguientes:

- **Caso 1:** Silenciador disipativo con temperatura constante a la entrada y salida y sin presencia de superficie perforada
- **Caso 2:** Silenciador disipativo con gradiente de temperaturas y sin presencia de superficie perforada
- **Caso 3:** Silenciador disipativo con temperatura constante a la entrada y salida y con presencia de superficie perforada
- **Caso 4:** Silenciador disipativo con gradiente de temperaturas y con presencia de superficie perforada

7.2 COMPARATIVA DE RESULTADOS

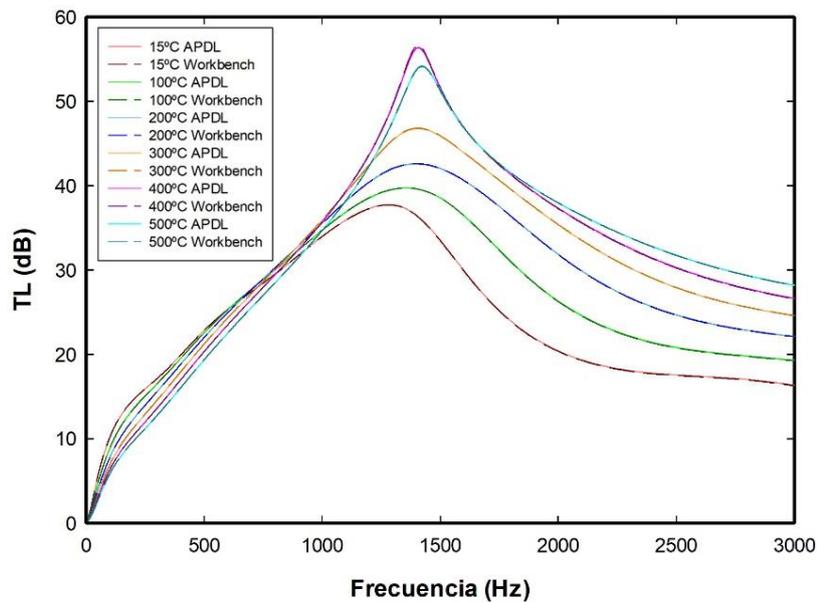
7.2.1 Caso 1



Gráfica 1. Comparativa resultados APDL vs Workbench: Caso 1.

Los ensayos numéricos para todo el rango de temperaturas han sido realizados con ambas versiones, Ansys APDL y Ansys Workbench y, como se puede observar, las curvas de TL se solapan y son indistinguibles. La existencia de mínimas discrepancias puede estar asociada a pequeñas diferencias en las mallas de elementos finitos utilizadas.

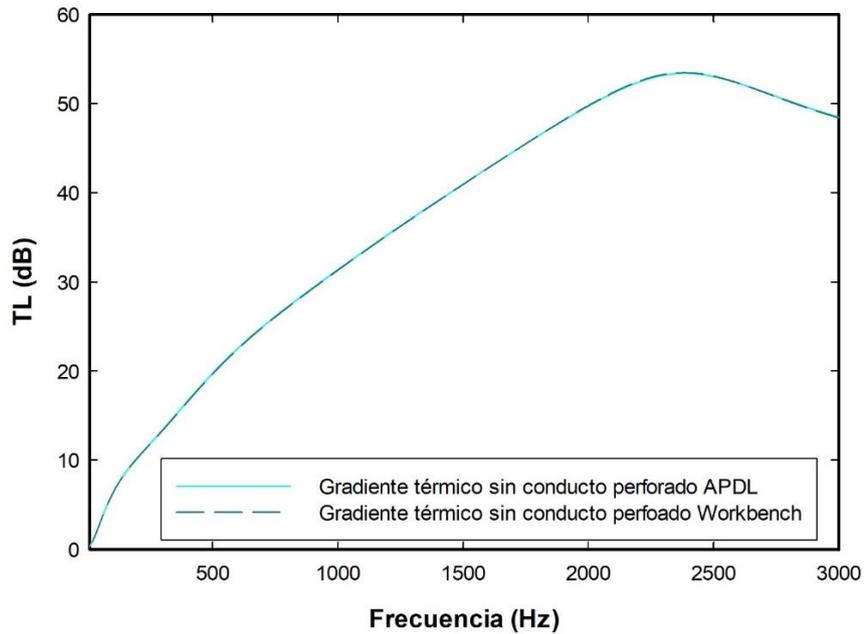
7.2.2 Caso 2



Gráfica 2. Comparativa resultados APDL vs Workbench: Caso 2.

Los ensayos numéricos para todas estas temperaturas han sido realizados con ambas versiones, Ansys APDL y Ansys Workbench y, como era de esperar, también coinciden los resultados.

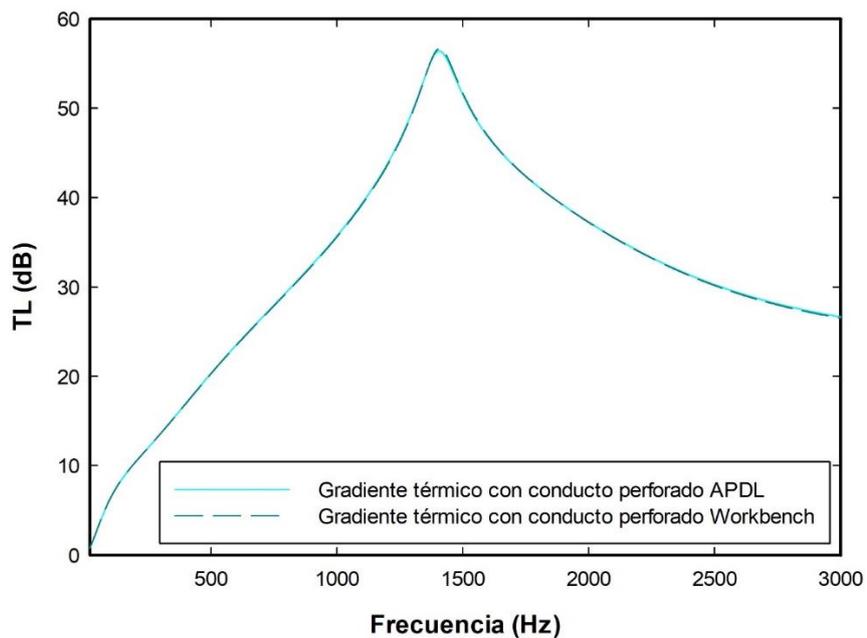
7.2.3 Caso 3



Gráfica 3. Comparativa resultados APDL vs Workbench: Caso 3.

Las simulaciones de elementos finitos para esta configuración han sido realizadas con ambas versiones, Ansys APDL y Ansys Workbench y, como se puede observar, se obtienen resultados exactamente iguales entre ambas.

7.2.4 Caso 4



Gráfica 4. Comparativa resultados APDL vs Workbench: Caso 4.

Los ensayos numéricos para esta configuración han sido realizados con ambas versiones, Ansys APDL y Ansys Workbench y, una vez más, se obtienen resultados exactamente iguales entre ambos.

Capítulo 8

ANÁLISIS DE RESULTADOS

8.1 INTRODUCCIÓN

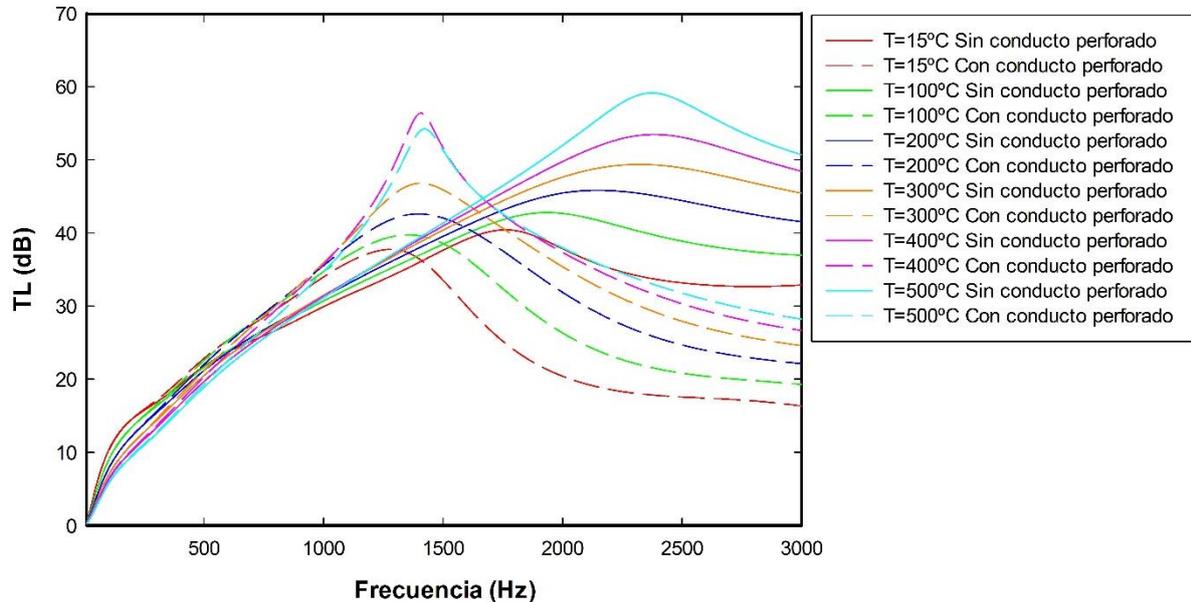
En este apartado se presentan los resultados gráficos de los casos de estudio definidos en el apartado 4.5, analizando el efecto producido en el comportamiento acústico del silenciador cuando se modifican ciertos parámetros, como son la longitud y radio de la cámara de expansión, la densidad de compactación del material absorbente, la porosidad de la superficie perforada y el número de divisiones del gradiente térmico.

A modo resumen, se detallan los casos de estudio que van a ser analizados:

- **Casos 1, 2, 3 y 4:** casos de partida con las características del Capítulo 4, donde la longitud de la cámara disipativa es de 0,3 m, el radio de dicha cámara es de 0,091875 m y la densidad de compactación de la fibra de vidrio es de 100 kg/m^3 . En los casos 1 y 2 (y sus respectivos casos hijos) se aplican temperaturas constantes a lo largo de todo el silenciador; y en los casos 3 y 4 (y sus respectivos hijos) se aplica un gradiente térmico.
- **Casos 1a, 2a, 3a y 4a:** se parte del caso base y se modifica la longitud de la cámara de expansión a 0,5 m.
- **Casos 1b, 2b, 3b y 4b:** se parte del caso base y se modifica el radio de la cámara de expansión a 0,12 m.
- **Casos 1c, 2c, 3c y 4c:** se parte del caso base y se modifica la densidad de compactación de la fibra a 200 kg/m^3 .

8.2 EFECTO DEL CONDUCTO PERFORADO

En la Gráfica 5 se muestran los casos 1 y 2, correspondientes al silenciador disipativo con temperaturas constantes, diferenciados entre sí por la ausencia (caso 1) o presencia (caso 2) del conducto perforado. Con esta comparativa se pretende analizar el efecto que produce la presencia de dicho conducto en el interior de la cámara de expansión del silenciador disipativo.



Gráfica 5. Efecto del conducto perforado. Caso 1 (líneas continuas) y caso 2 (líneas discontinuas).

La fibra de vidrio, utilizada como material absorbente, presenta una resistividad moderada. En ambos casos, se puede observar que, a bajas frecuencias, el índice de pérdidas de transmisión es menor con altas temperaturas. A altas frecuencias, el índice de pérdidas de transmisión es mayor con altas temperaturas debido al aumento de la resistividad del material, que favorece la disipación de energía sonora en forma de calor para las pequeñas longitudes de onda asociadas.

Además, resulta interesante trabajar con la fibra de vidrio ya que, en torno a los 700 Hz, existe un punto de transición en el que se invierte el comportamiento de esta, ocurriendo lo comentado en el párrafo anterior.

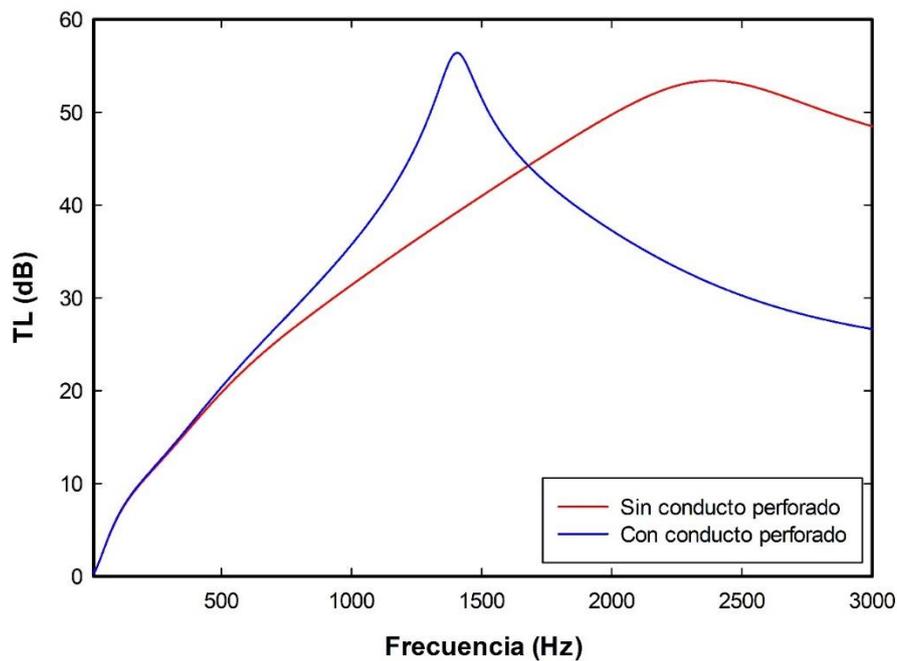
Los valores máximos de atenuación se alcanzan, para los casos con ausencia de superficie perforada, a 2370 Hz a 500 °C, presentando un valor de 59,13 dB, mientras que, para los casos con presencia de superficie perforada, se alcanza a 1410 Hz a 400 °C, presentando un valor de 56,37 dB.

Analizando los dos comportamientos presentados en la Gráfica 5, existe una diferencia notable cuando existe o no presencia de perforado. A bajas frecuencias, ambos casos presentan valores de TL muy parecidos, por lo que apenas influye el efecto del conducto, ya que la longitud de onda es tan grande que el perforado resulta prácticamente transparente desde el punto de vista acústico. Cuando la onda se sitúa en frecuencias medias del rango de trabajo, los casos con ausencia de superficie perforada aumentan constantemente, ya que la onda se disipa en el material absorbente. Los casos con presencia de superficie perforada aumentan más bruscamente, sobre todo a altas temperaturas, debido a la disipación del aire en los orificios del conducto. Cuando las frecuencias se sitúan en valores altos del rango de trabajo, los casos con ausencia de superficie perforada

presentan sus valores máximos dado que la energía sonora no encuentra el impedimento del conducto perforado, penetrar en la cámara exterior con fibra y disiparse en forma de calor. Sin embargo, el efecto del conducto perforado a altas frecuencias presenta un comportamiento negativo, disminuyendo los valores de TL, al suponer un obstáculo para la entrada de energía sonora en la cámara exterior.

La presencia de dicho conducto bloquea la entrada de la onda dentro de la fibra, reduciendo la posibilidad de que se disipe energía sonora en el interior del material absorbente. Esto provoca que los valores del índice de pérdidas de transmisión disminuyan. Además, este efecto negativo aparece notablemente a altas frecuencias, ya que la impedancia del perforado aumenta con la frecuencia, provocando el bloqueo a frecuencias más altas.

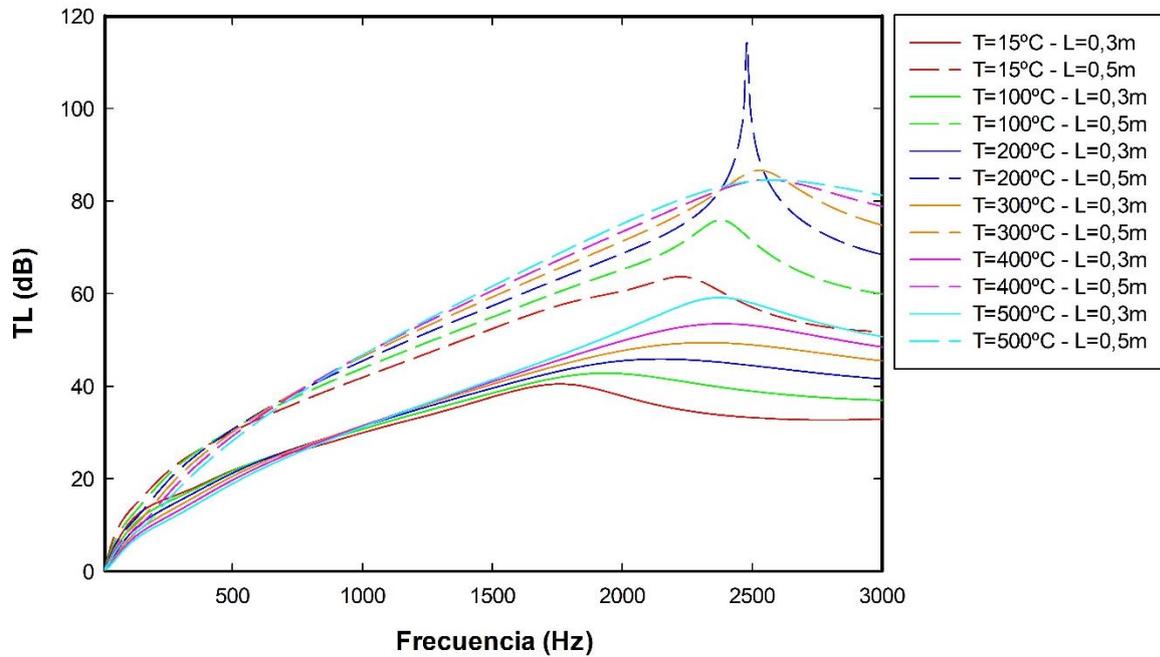
Del mismo modo ocurre cuando se introduce un gradiente térmico, como son los casos 3 y 4, sin y con presencia de conducto perforado, respectivamente. Esto se puede observar en la Gráfica 6:



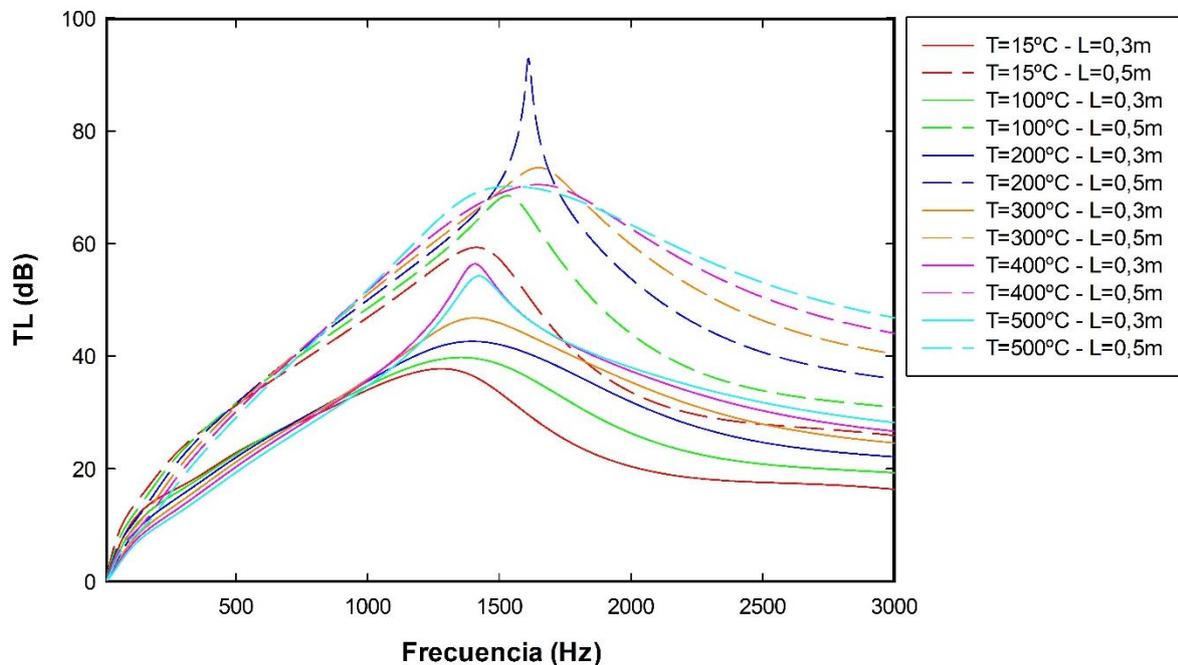
Gráfica 6. Efecto del conducto perforado. Caso 3 (línea roja) y caso 4 (línea azul).

8.3 EFECTO DE LA LONGITUD DE LA CÁMARA DE EXPANSIÓN

En la Gráfica 7 y Gráfica 8 se muestran los casos 1a y 2a, respectivamente, correspondientes al silenciador disipativo con temperaturas constantes y con diferente longitud de la cámara de expansión con respecto a sus casos base (caso 1 y 2).



Gráfica 7. Efecto de la longitud de la cámara de expansión. Caso 1a.



Gráfica 8. Efecto de la longitud de la cámara de expansión. Caso 2a.

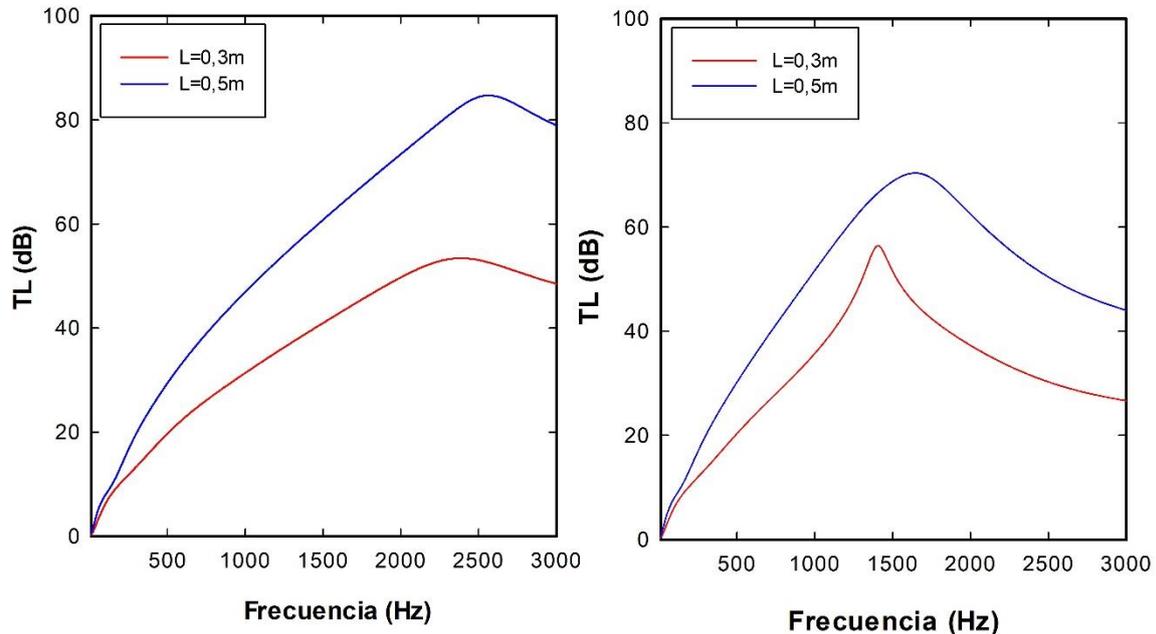
El caso 1a se corresponde con el caso sin conducto perforado y el caso 2a se corresponde con el caso con conducto perforado. Como este efecto ya se ha comprobado anteriormente, la principal diferencia entre estos casos y sus casos base (caso 1 y 2), es la longitud de la cámara de expansión.

Las líneas continuas se corresponden con los casos iniciales de 0,3 m de longitud de la cámara y las líneas discontinuas se corresponden con los casos de 0,5 m de longitud de la cámara.

El valor máximo de atenuación para ambas gráficas se obtiene cuando la longitud de la cámara es de 0,5 m. Para los casos de la Gráfica 7, sin conducto perforado, el valor máximo de TL es de 114,23 Hz a 2480 Hz a 200 °C, mientras que, para los casos de la Gráfica 8, con conducto perforado, el valor máximo de TL es de 92,86 Hz alcanzándose a 1610 a 200 °C. Resulta impactante el comportamiento que presenta en ambas gráficas la onda a la temperatura de 200 °C, ya que se observa un pico de atenuación bastante brusco. Esto se puede deber a que, casualmente con esta configuración concreta de parámetros y temperatura, se produzca un comportamiento muy resonante.

Analizando ambos casos, los valores obtenidos del índice de pérdidas de transmisión con la longitud de 0,5 m son mayores, en todas las temperaturas presentadas, que los obtenidos con la longitud inicial de la cámara de expansión de 0,3 m. Este efecto resulta lógico, pues al aumentar la longitud de la cámara de expansión, aumenta también la cantidad del material absorbente en dicha cámara. Disponer de mayor cantidad de material absorbente provoca un aumento del índice de pérdidas de transmisión, ya que la onda dispone de más material absorbente para disiparse, con respecto a los casos iniciales 1 y 2.

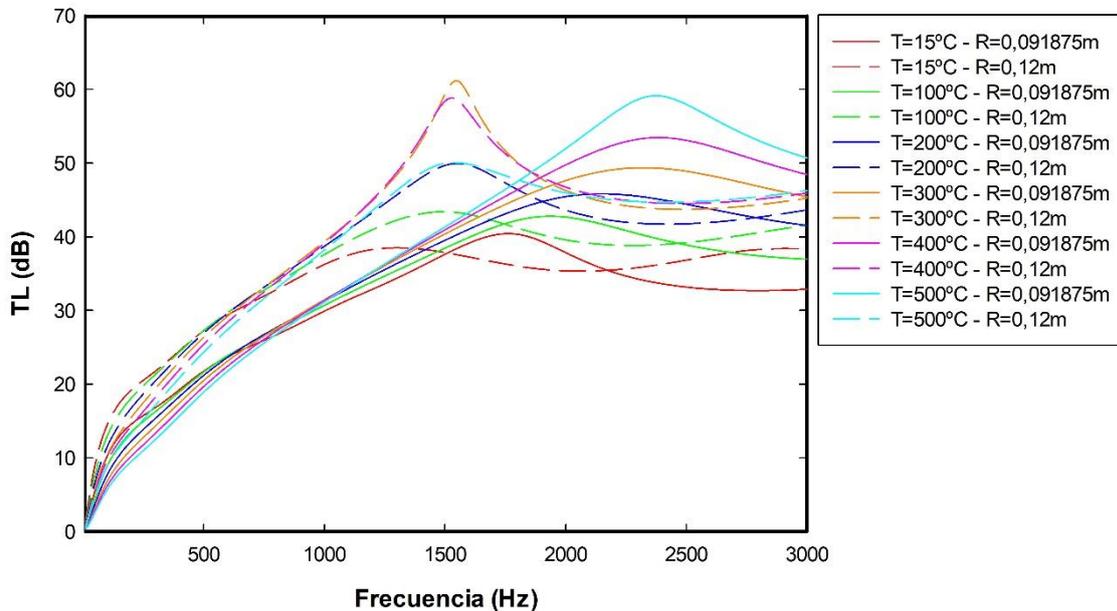
Al igual que con las temperaturas constantes, al introducir un gradiente térmico en el silenciador y aumentar de nuevo la longitud de la cámara, se obtiene el mismo efecto. Esto puede observarse en la Gráfica 9, en la que se muestran los casos 3a (izquierda) y 4a (derecha), correspondientes a los casos de silenciador disipativo sin y con presencia de conducto perforado, respectivamente, y con la longitud de la cámara de expansión de 0,5 m. Estos casos se comparan con sus casos base 3 y 4.



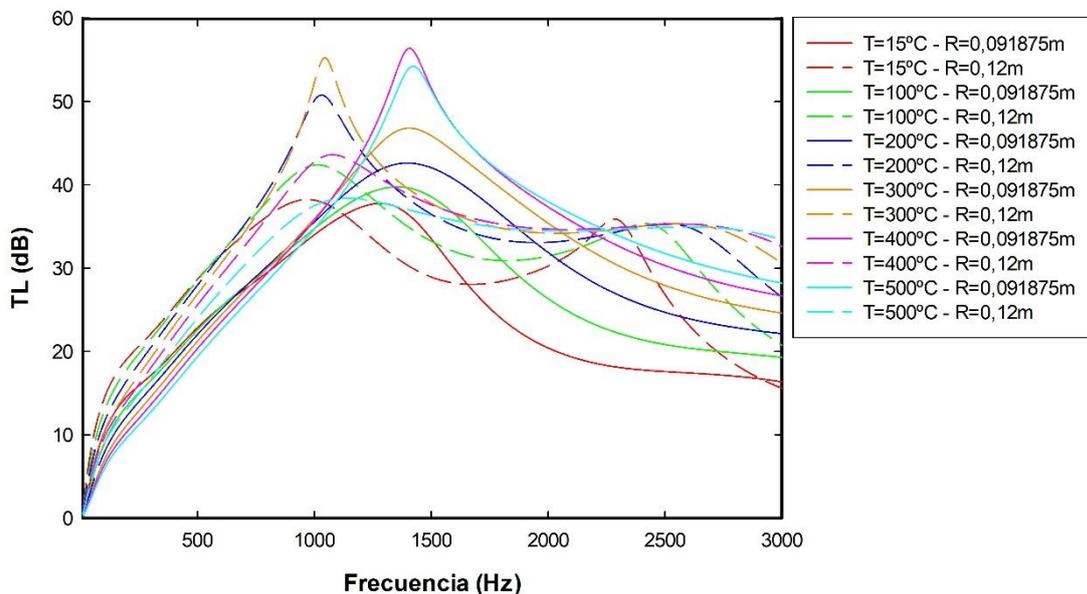
Gráfica 9. Efecto de la longitud de la cámara de expansión. Caso 3a (izquierda) y 4a (derecha).

8.4 EFECTO DEL RADIO DE LA CÁMARA DE EXPANSIÓN

En la Gráfica 10 y Gráfica 11 se muestran los casos 1b y 2b, respectivamente, correspondientes al silenciador disipativo con temperaturas constantes y con diferente radio de la cámara de expansión con respecto a sus casos base (caso 1 y 2).



Gráfica 10. Efecto del radio de la cámara de expansión. Caso 1b.



Gráfica 11. Efecto del radio de la cámara de expansión. Caso 2b.

El caso 1b se corresponde con el caso sin conducto perforado y el caso 2b se corresponde con el caso con conducto perforado. De nuevo, como este efecto no se va a comprobar, la principal diferencia entre estos casos y sus casos base (caso 1 y 2), es el radio de la cámara de expansión. Las

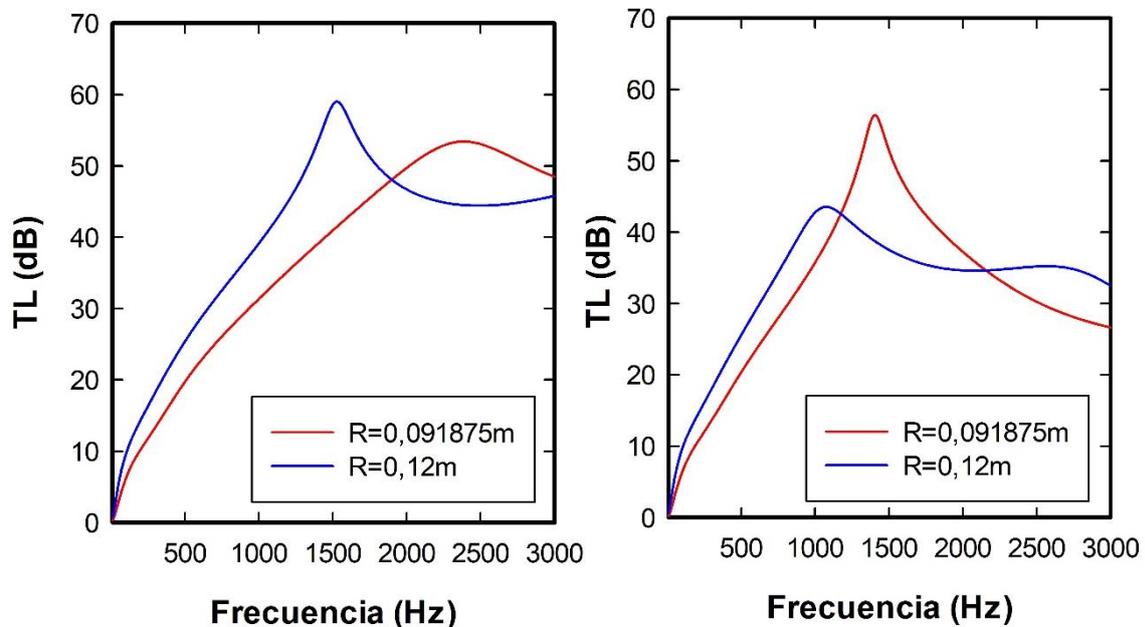
líneas continuas se corresponden con los casos iniciales de 0,091875 m de radio de la cámara y las líneas discontinuas se corresponden con los casos de 0,12 m de radio de la cámara.

Analizando el efecto de las Gráfica 10 y Gráfica 11, la diferencia no es tan notable como la comentada en el apartado 8.3. A frecuencias bajas, el comportamiento del silenciador con el radio de 0,12 m es el esperado, obteniéndose valores de TL superiores con respecto a la configuración base de radio 0,091875 m. Sin embargo, cuando se alcanzan frecuencias medias en torno a 1500 Hz, el silenciador deja de trabajar de este modo, empeorando el comportamiento y disminuyendo los valores del TL. Este comportamiento se puede deber a que, a medida que se aumenta el radio, la cámara de expansión es mayor y hay más tridimensionalidad, propagándose más modos tridimensionales. La propagación de modos tridimensionales (o modos de orden superior) está asociada a una reducción del TL, ya que la onda deja de ser plana y existe un efecto de traspaso de energía que con la tridimensionalidad se ve favorecida, haciendo que el silenciador trabaje peor.

Por lo tanto, cuando los modos de orden superior empiezan a ser importantes, en torno a 1500 Hz, el silenciador deja de trabajar como al comienzo, disminuyendo su capacidad de atenuación.

Además, en la Gráfica 11, al presentar el conducto perforado, se añade un impedancia acústica que varía con la frecuencia, generando otra resonancia, y sumada a la presencia de modos tridimensionales, la onda presenta un comportamiento atípico, como la que se observa en dicha gráfica.

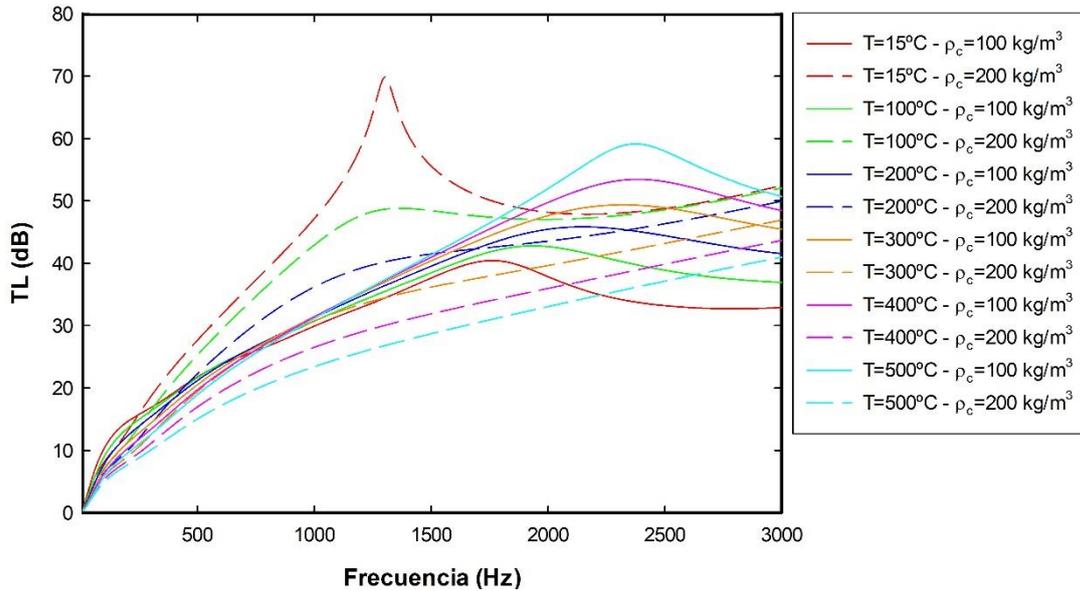
De igual modo ocurre al introducir un gradiente térmico en el silenciador y aumentar el radio de la cámara de expansión. Esto puede observarse en la Gráfica 12, en la que se muestran los casos 3b (izquierda) y 4b (derecha), correspondientes a los casos de silenciador disipativo sin y con presencia de conducto perforado, respectivamente, y con el radio de la cámara de expansión de 0,12 m. Estos casos se comparan con sus casos base 3 y 4.



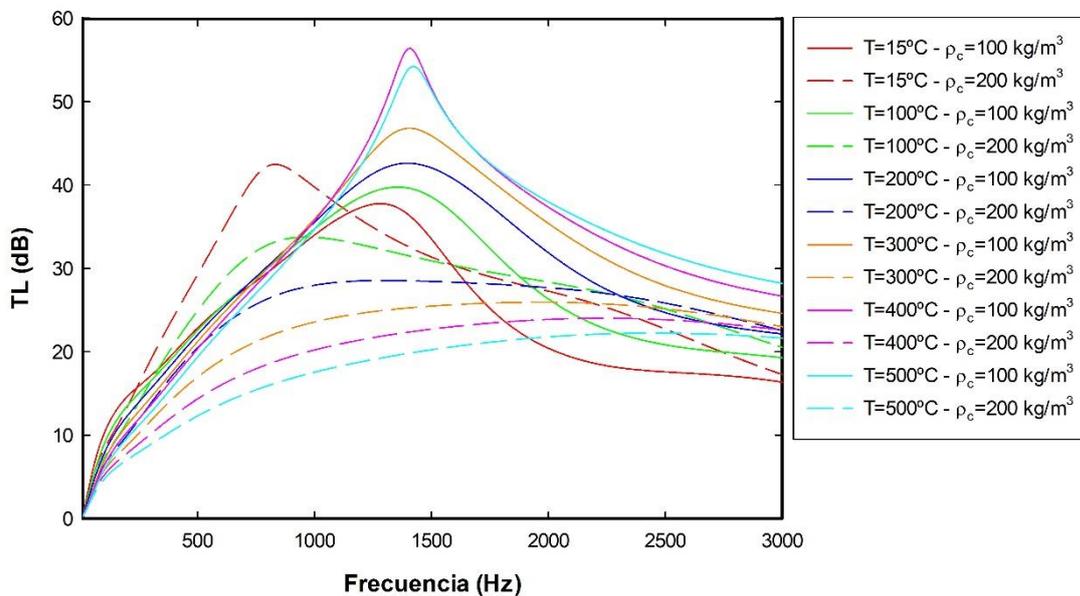
Gráfica 12. Efecto del radio de la cámara de expansión. Caso 3b (izquierda) y 4b (derecha).

8.5 EFECTO DE LA DENSIDAD DE COMPACTACIÓN DEL MATERIAL ABSORBENTE

En la Gráfica 13 y Gráfica 14 se muestran los casos 1c y 2c, respectivamente, correspondientes al silenciador disipativo con temperaturas constantes y con diferente densidad de compactación del material absorbente respecto a sus casos base (caso 1 y 2).



Gráfica 13. Efecto de la densidad de compactación del material absorbente. Caso 1c.



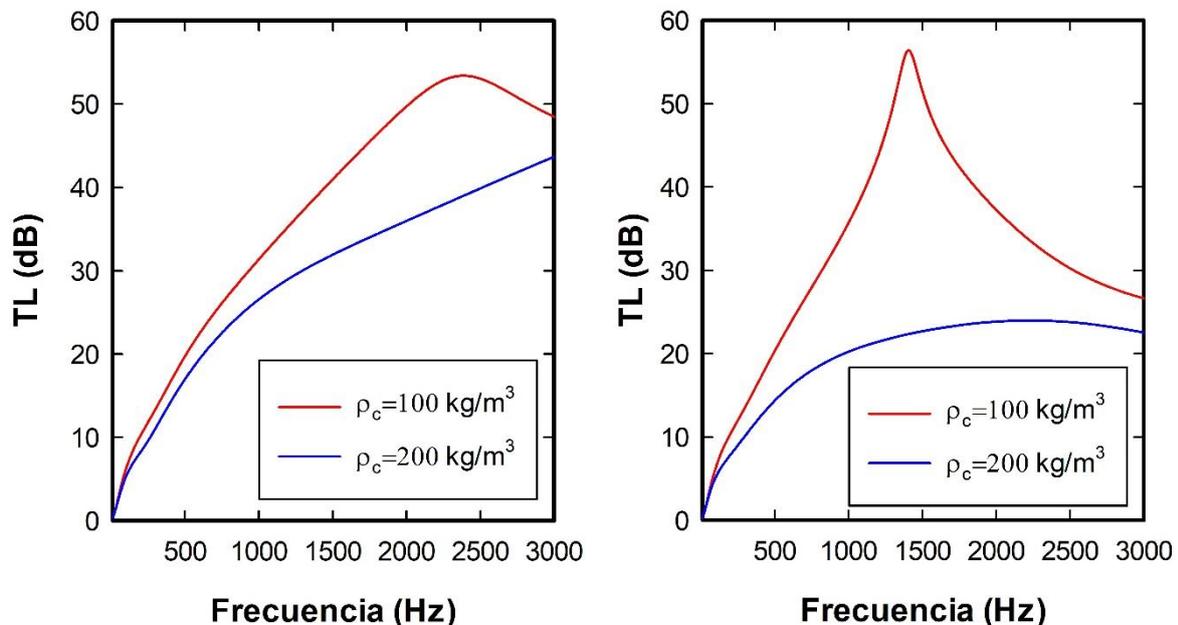
Gráfica 14. Efecto de la densidad de compactación del material absorbente. Caso 2c.

El caso 1c se corresponde con el caso sin conducto perforado y el caso 2c se corresponde con el caso con conducto perforado. De nuevo, como este efecto no se va a comprobar, la principal diferencia entre estos casos y sus casos base (caso 1 y 2), es la densidad de compactación del material absorbente. Las líneas continuas se corresponden con los casos iniciales de 100 kg/m³ de

compactación del material y las líneas discontinuas se corresponden con los casos de 200 kg/m^3 de compactación del material.

Con el rango de frecuencias de trabajo empleado, cuando la densidad de compactación es la inicial, se observa que sí se produce un punto de inversión, en torno a los 700 Hz, en la que se introduce el comportamiento de la fibra. Sin embargo, cuando se aumenta la densidad de compactación de la fibra a 200 kg/m^3 , dicha frecuencia no aparece en el rango de trabajo y, como consecuencia, no se produce la inversión del comportamiento y, a menores temperaturas, mayores valores de TL. Esto se puede observar a temperaturas bajas, en torno a los $15 - 100^\circ\text{C}$, donde el índice de pérdidas aumenta cuando la densidad de compactación es mayor. Sin embargo, para el resto de temperaturas, se produce lo contrario, disminuyendo el TL. Si el rango de frecuencias fuera mayor, los valores de TL a altas temperaturas deberían ser superiores a los de bajas temperaturas, observándose la frecuencia de intersección comentada. Además, el índice de pérdidas de transmisión debería aumentar conforme mayor es la densidad de compactación, ya que esto aumentaría la resistividad y, como consecuencia, disminuiría la impedancia característica del material absorbente. Este último efecto se puede intuir en la Gráfica 13.

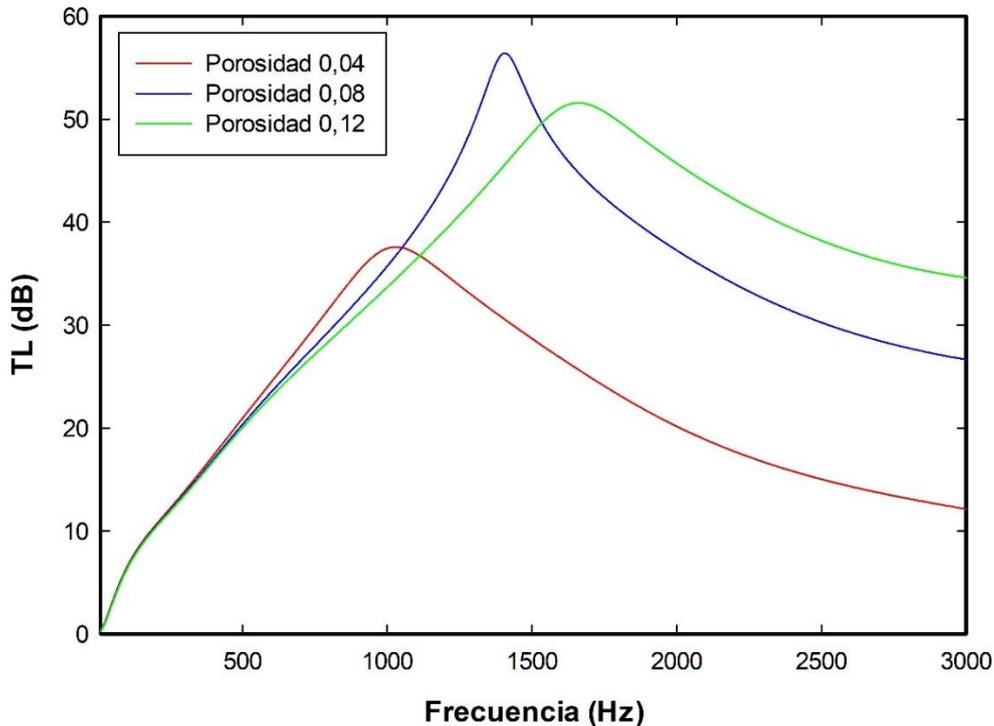
Al introducir un gradiente térmico, el efecto es más notable. En la Gráfica 15 se muestran los casos 3c (izquierda) y 4c (derecha), correspondientes a los casos de silenciador disipativo sin y con presencia de conducto perforado, respectivamente, y con densidad de compactación de 200 kg/m^3 . Como las temperaturas de entrada y salida son altas, al igual que ocurría anteriormente, los valores del TL disminuyen. Sin embargo, en la Gráfica 15 correspondiente al caso 3c, se puede observar claramente que, si el rango de frecuencias fuera mayor, el valor del TL cuando la densidad de compactación es de 200 kg/m^3 sería mayor que cuando es de 100 kg/m^3 . En la Gráfica 16 correspondiente al caso 4c, al introducir el conducto perforado, se introduce la impedancia del perforado y el funcionamiento del silenciador no es el adecuado.



Gráfica 15. Efecto de la densidad de compactación del material absorbente. Caso 3c (izquierda) y 4c (derecha).

8.6 EFECTO DE LA POROSIDAD DEL CONDUCTO PERFORADO

En la Gráfica 16 se muestra el caso 4, correspondiente al silenciador disipativo con conducto perforado y gradiente térmico.



Gráfica 16. Efecto de la porosidad del conducto perforado. Caso 4.

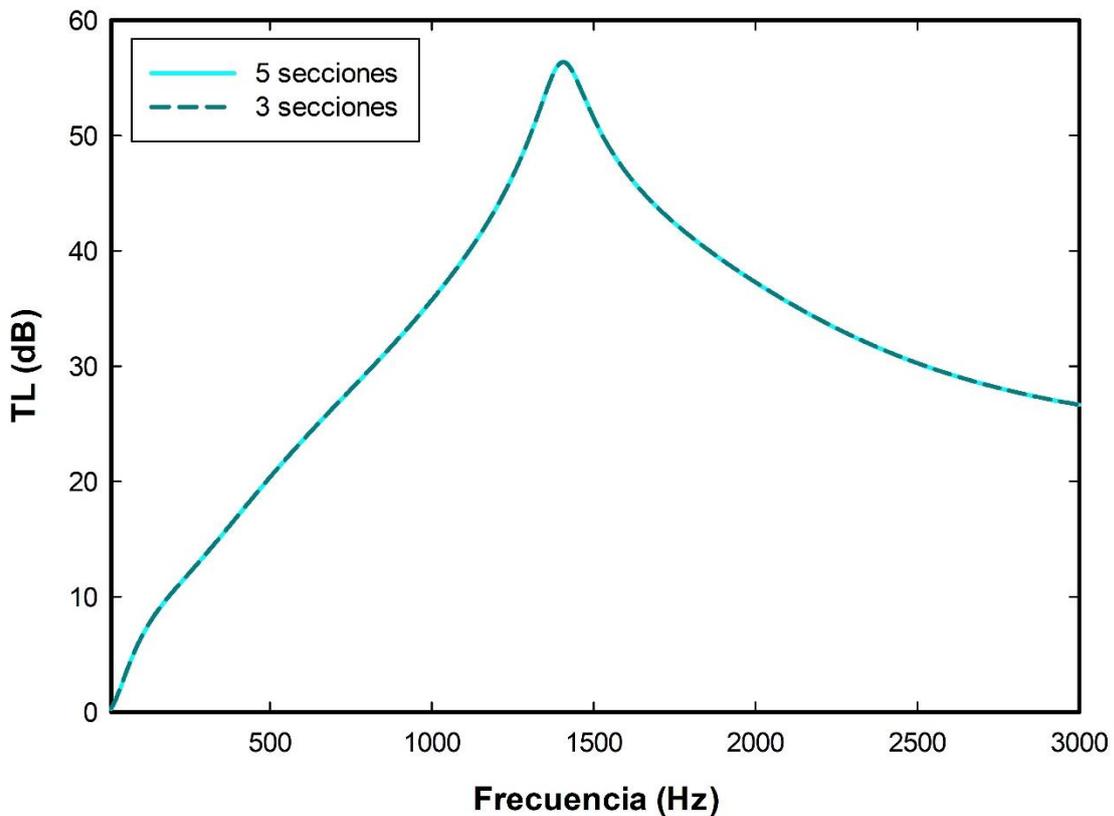
Para analizar el efecto de la porosidad del conducto perforado, se han realizado dos variantes del caso 4, en el que el valor de la porosidad de dicho conducto se ha modificado. Se tienen, por lo tanto, tres casos con diferente porosidad, siendo el caso inicial con porosidad 0,08 y los casos restantes se han variado por encima y por debajo de este valor.

Como se puede observar, a bajas frecuencias, la porosidad del conducto apenas influye. A bajas/medias frecuencias, cada caso con diferente porosidad tiene un rango pequeño en el que presenta mayor TL que los demás. Cuando la frecuencia se sitúa de valores medios en adelante, es el caso con mayor porosidad el que presenta los valores mayores de TL.

La porosidad se puede definir como el cociente entre el área donde no existe material y el área total de la superficie perforada. Por lo tanto, a medida que aumenta la porosidad, mayor será el área donde no exista material. Debido a ello, la onda presenta mayor facilidad para atravesar el conducto perforado y disiparse en el material absorbente y, como consecuencia, el conducto perforado va perdiendo importancia. De hecho, para valores de porosidad superiores al 0,2 – 0,3, el efecto acústico del conducto perforado suele despreciarse.

8.7 EFECTO DEL NÚMERO DE DIVISIONES DEL GRADIENTE TÉRMICO

En la Gráfica 17 se muestra el caso 4, correspondiente al silenciador disipativo con conducto perforado y gradiente térmico.



Gráfica 17. Efecto del número de divisiones del gradiente térmico.

Para analizar el efecto del número de secciones o divisiones en las que se divide la cámara de expansión para el cálculo del gradiente térmico, tal y como se mostró en el apartado 4.6.2, se han realizado dos simulaciones: el caso 4, que presenta 5 secciones; y una modificación de este caso, siendo el nuevo número de secciones igual a 3.

Como puede observarse, el número de secciones axiales del gradiente térmico no afecta al resultado final del índice de pérdidas de transmisión. Por lo tanto, se pueden usar números de divisiones bajos para reducir el coste computacional, ya que los resultados van a ser igual de fiables que con altos números de divisiones.

Como se comentará más adelante en líneas futuras, el gradiente que más efecto tiene en la cámara de expansión es el radial (en este trabajo se ha empleado el gradiente térmico axial).

Capítulo 9

CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

9.1 CONCLUSIONES

En el presente Trabajo Fin de Máster se ha desarrollado e implementado de manera eficaz una metodología numérica basada en elementos finitos, modelizando y analizando el comportamiento acústico de silenciadores disipativos y prestando especial atención en el efecto del conducto perforado, así como en la influencia con altas temperaturas y gradientes térmicos. Dicha metodología ha sido implementada mediante el programa Ansys, en sus versiones APDL y Workbench, obteniendo el índice de pérdidas de transmisión (TL) para caracterizar acústicamente los silenciadores disipativos.

Una serie de casos de estudio han sido definidos e implementados con ambas versiones de Ansys. Además, se ha realizado una comparación de los resultados obtenidos, mostrando una concordancia excelente y, como consecuencia, permitiendo la validación de ambas metodologías.

Con el fin de analizar de una forma clara el efecto producido en el comportamiento acústico de los silenciadores disipativos por la presencia de superficie perforada, así como la modificación paramétrica de valores geométricos y de propiedades del material absorbente y del conducto perforado, se ha realizado una comparación de las prestaciones de atenuación sonora de los diferentes casos de estudio en base a su índice de pérdidas de transmisión (TL).

Las diferentes distribuciones de temperaturas consideradas en el interior de la cámara del silenciador han permitido analizar por completo el comportamiento acústico de éste, pues en la realidad, el silenciador presenta un gradiente térmico. Asimismo, también resulta muy útil disponer de la información proporcionada por distribuciones de temperaturas uniformes.

En cuanto a la presencia del conducto perforado, los resultados obtenidos han sido los esperados, bloqueando el paso de la onda sonora hacia la cámara y, como consecuencia, reduciendo la

posibilidad de que se disipe en el material absorbente. Es por ello por lo que dicho conducto sólo se utilice como soporte mecánico del material absorbente para evitar su arrastre al exterior; en la práctica las porosidades son muy elevadas para evitar efectos negativos en la atenuación sonora.

De nuevo y resultando lógico, aumentar la longitud de la cámara de expansión ha llevado a una mejora acústica del silenciador disipativo, ya que se dispone de más material absorbente para que la energía acústica de las ondas sonoras se disipe en él.

Por el contrario, aumentar el radio de la cámara de expansión no ha arrojado unos resultados claros como ocurría con el caso anterior. A pesar de disponer de mayor cantidad de material absorbente, diferentes modos tridimensionales han entrado en juego, reduciendo el índice de pérdidas de transmisión y obteniendo un comportamiento acústico irregular.

Para los casos en los que se ha aumentado la densidad de compactación de la fibra, se esperaba que el valor del TL aumentase, pues la resistividad del material sería mayor. Sin embargo, este comportamiento no ha llegado a producirse y esto ha sido achacado al rango de frecuencias de trabajo, ya que se ha comprobado que, en las últimas frecuencias de dicho rango, el comportamiento de silenciador comenzaba a ser el esperado.

Por otro lado, el efecto producido por la variación de la porosidad del conducto perforado ha resultado ser el esperado. La configuración que presentaba la porosidad más alta ha presentado mejores valores de atenuación a medida que la frecuencia iba aumentando. La explicación es fácil, pues a mayor porosidad, mayor es el área donde no existe pared de conducto y la onda tiene más facilidad para atravesar el conducto perforado y disiparse en el material absorbente.

Por último, se ha comprobado que el número de secciones axiales en las que ha sido dividido el gradiente térmico tiene muy poca influencia a partir de cierto número, obteniéndose la misma precisión de resultados tanto con 3 secciones como con 5 secciones.

9.2 LÍNEAS FUTURAS

Tras la realización de este Trabajo Fin de Máster, se proponen una serie de líneas futuras de trabajo bastante interesantes, con el objetivo de investigar el efecto acústico de los silenciadores disipativos.

Aparte del material absorbente utilizado en este trabajo como es la fibra de vidrio, se podrían emplear otros materiales distintos, presentando diferentes coeficientes para el cálculo del número de onda complejo y la impedancia característica. Además, se podría utilizar otra geometría de silenciador disipativo, creando configuraciones más complejas y, en cuanto al gradiente térmico, incluir la segmentación radial en anillos de la cámara de expansión constituiría otra línea de trabajo bastante atrayente. De hecho, en la bibliografía hay evidencia del impacto notable del gradiente radial de temperaturas en el TL.

Por otro lado, otra línea más compleja es la de incluir la presencia del flujo medio, que corresponde al flujo neto de gases de escape, pasando a considerar en este caso modelos aeroacústicos.

Por último, existen otros dispositivos del sistema de escape que pueden ser analizados acústicamente, como los catalizadores y las trampas de partículas. De hecho, esta línea está siendo explorada actualmente por algunos de los integrantes del grupo de investigación. Especialmente

interesante sería considerar el comportamiento acústico integral del sistema completo, formado por ejemplo por la disposición en serie de un catalizador, una trampa de partículas y uno o dos silenciadores.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Antebas, A. G., Denia, F. D., Pedrosa, A. M., & Fuenmayor, F. J. (2013). A finite element approach for the acoustic modeling of perforated dissipative mufflers with non-homogeneous properties. *Mathematical and Computer Modelling*, 1970-1978.
- Bresó, J. (Septiembre de 2016). Modelado y análisis de la influencia del gradiente de temperatura en silenciadores de escape disipativos mediante elementos finitos. Valencia, Valencia, España.
- Denia, F. D. (2019). *Fenómenos de Propagación*. Valencia: Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales.
- Denia, F. D. (2019). *La Ecuación de Ondas*. Valencia: Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales.
- 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.
- Gárate, D. (2020). *Modelización y análisis del comportamiento acústico de silenciadores disipativos en presencia de altas temperaturas y gradientes térmicos con Ansys Workbench y APDL*. Valencia.
- Martín, A. (Marzo de 2014). *Universidad Politécnica de Madrid*. Obtenido de <http://oa.upm.es/23098/1/amd-apuntes-acustica-v2.1.pdf>
- Martínez, A. (18 de Noviembre de 2020). *Concepto Definición*. Obtenido de <https://conceptodefinicion.de/acustica/>
- Martínez, M. J. (2010). *Modelado analítico-numérico y caracterización experimental de silenciadores de escape híbridos*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Möser, M., & Barros, J. L. (2009). *Ingeniería Acústica. Teoría y Aplicaciones*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Munuera, P. (2019). Desarrollo e implementación de una metodología de caracterización del comportamiento acústico de silenciadores reactivos y disipativos mediante Ansys Workbench. Valencia, Valencia, España.
- Universidad Nacional Autónoma de México. (2010). *Enciclopedia de Conocimientos Fundamentales*. Obtenido de http://catalogacionrua.unam.mx/enciclopedia/fisica/Text/25_tema_02_2.3.html
- Veloso, C. (11 de Septiembre de 2016). *Electrontools*. Obtenido de <https://www.electrontools.com/Home/WP/ondas-sonoras-caracteristicas/>

PRESUPUESTO

INTRODUCCIÓN

En este apartado se presentan los costes asociados a la realización de este Trabajo Fin de Máster. Este ha sido desarrollado en una serie de etapas y las horas empleadas en cada una de estas son las siguientes:

Etapas	Tiempo (h)
Búsqueda y lectura de información y trabajos previos	25
Estudio del programa Ansys y diseño de los diferentes casos de estudio	80
Procesado y análisis de resultados	60
Redacción de la memoria y creación de planos	100
Revisión del trabajo y corrección de dudas	35
TOTAL	300

Tabla 6. Horas empleadas en la realización del TFM.

AMORTIZACIÓN DE LOS EQUIPOS

Este Trabajo Fin de Máster se ha realizado mediante el ordenador personal, de manera que no ha supuesto la compra de ningún equipo. De este modo, el cálculo de las amortizaciones se va a realizar con la siguiente fórmula:

$$a = \frac{V_c - V_r}{t} \quad (83)$$

Donde a se define como la amortización en €/año; V_c y V_r se corresponden con el valor obtenido por la compra del equipo y el valor residual, respectivamente, en €; y t se corresponde con el tiempo de la amortización, en años.

Una vez se tiene la amortización, se obtiene el precio por hora de los diferentes equipos utilizados, con la siguiente fórmula:

$$T_h = \frac{a + m}{h} \quad (84)$$

Donde T_h se define como la tasa horario en €/h; a y m se corresponden con la amortización y el coste asociado al mantenimiento, ambos en €/año; y h se corresponde con las horas al año que se han utilizado los equipos, siendo de 2080 h/año, que se corresponden con 260 días laborables al año con 8 horas de uso diario.

A continuación, se muestran los diferentes equipos y programas utilizados en este trabajo junto con el cálculo de la tasa horaria de cada uno de ellos:

	V_c	V_r	t	a	m	T_h
Ordenador	1200	200	10	100	0	0,048
Mesa de escritorio	100	20	20	4	0	0,002
Ratón	10	2	5	2	5	0,003
Silla de escritorio	120	50	10	7	0	0,003
Alfombrilla	10	3	2	4	0	0,002
Flexo	15	5	8	1	0	0,001
Segunda pantalla	200	30	15	11	0	0,005
Ansys	24000	0	1	24000	0	11,538
Solidworks	6000	0	1	6000	0	2,885
SigmaPlot	500	0	1	500	0	0,240
Microsoft Office	169	0	8	21	0	0,010

Tabla 7. Amortización y tasa horaria de los equipos utilizados.

	V_c	V_r	t	a	m	T_h
Ansys	24000	0	1	24000	0	11,538
Solidworks	6000	0	1	6000	0	2,885
SigmaPlot	500	0	1	500	0	0,240
Microsoft Office	169	0	8	21	0	0,010

Tabla 8. Amortización y tasa horaria de los programas utilizados.

El único equipo que necesita mantenimiento es el ratón, ya que, al ser inalámbrico, se deben cambiar las pilas al gastarse.

Los costes de las licencias de los programas Ansys, Solidworks y SigmaPlot son anuales. El coste asociado a Microsoft Office es obtenido en la página oficial, siendo una licencia de por vida, estableciendo un periodo de 8 años en el que podrá quedarse obsoleto.

UNIDADES DE OBRA

En este apartado se detallan las distintas unidades de obra existentes, las cuales se corresponden con las etapas presentadas en la Tabla 6. En cada una de ellas se detallan las horas de trabajo y coste asociado de los profesionales involucrados, los equipos utilizados, así como el coste de electricidad generado por estos, en concreto, por el ordenador y el flexo. Por otro lado, se añade un coste asociado al uso de Internet. La tarifa mensual supone un coste de 20€, estableciendo 30 días naturales como duración de un mes y 24 horas al día. El precio unitario de Internet se estima entonces en 0,028 €/h.

Las unidades de obra asociadas a la realización de este Trabajo Fin de Máster son:

U001	BÚSQUEDA Y LECTURA DE INFORMACIÓN Y TRABAJOS PREVIOS					
	Descripción	Unidad	Medición	Precio unitario (€)	Importe (€)	
1.1	Ingeniero industrial	h	17	18,8	319,600	
1.2	Ordenador	h	17	0,048	0,817	
1.3	Mesa de escritorio	h	17	0,002	0,033	
1.4	Ratón	h	17	0,003	0,054	
1.5	Silla de escritorio	h	17	0,003	0,057	
1.6	Alfombrilla	h	17	0,002	0,029	
1.7	Flexo	h	6	0,001	0,004	
1.8	Segunda pantalla	h	17	0,005	0,093	
1.9	Electricidad	€/kWh	2,5	0,14	0,350	TOTAL
1.10	Internet	h	17	0,028	0,476	321,51€

Tabla 9. U001: Búsqueda y lectura de información y trabajos previos.

U002	ESTUDIO DEL PROGRAMA ANSYS Y DISEÑO DE LOS DIFERENTES CASOS DE ESTUDIO					
	Descripción	Unidad	Medición	Precio unitario (€)	Importe (€)	
2.1	Ingeniero industrial	h	83	18,8	1560,400	
2.2	Ordenador	h	83	0,048	3,990	
2.3	Mesa de escritorio	h	83	0,002	0,160	
2.4	Ratón	h	83	0,003	0,263	
2.5	Silla de escritorio	h	83	0,003	0,279	
2.6	Alfombrilla	h	83	0,002	0,140	
2.7	Flexo	h	83	0,001	0,050	
2.8	Segunda pantalla	h	83	0,005	0,452	
2.9	Ansys	h	83	11,538	957,692	
2.10	Microsoft Office	h	20	0,010	0,203	
2.11	Electricidad	€/kWh	19,8	0,14	2,772	TOTAL
2.12	Internet	h	83	0,028	2,324	2528,73€

Tabla 10. U002: Estudio del programa Ansys y diseño de los diferentes casos de estudio.

U003	PROCESADO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS					
	Descripción	Unidad	Medición	Precio unitario (€)	Importe (€)	
3.1	Ingeniero industrial	h	60	18,8	1128,000	
3.2	Ordenador	h	60	0,048	2,885	
3.3	Mesa de escritorio	h	60	0,002	0,115	
3.4	Ratón	h	60	0,003	0,190	
3.5	Silla de escritorio	h	60	0,003	0,202	
3.6	Alfombrilla	h	60	0,002	0,101	
3.7	Flexo	h	12	0,001	0,007	
3.8	Segunda pantalla	h	60	0,005	0,327	
3.9	SigmaPlot	h	30	0,240	7,212	
3.10	Microsoft Office	h	15	0,010	0,152	
3.11	Electricidad	€/kWh	9,2	0,14	1,288	TOTAL
3.12	Internet	h	60	0,028	1,680	1142,16€

Tabla 11. U003: Procesado y análisis de resultados.

U004	REDACCIÓN DE LA MEMORIA Y CREACIÓN DE PLANOS					
	Descripción	Unidad	Medición	Precio unitario (€)	Importe (€)	
4.1	Ingeniero industrial	h	100	18,8	1880,000	
4.2	Ordenador	h	100	0,048	4,808	
4.3	Mesa de escritorio	h	100	0,002	0,192	
4.4	Ratón	h	100	0,003	0,317	
4.5	Silla de escritorio	h	100	0,003	0,337	
4.6	Alfombrilla	h	100	0,002	0,168	
4.7	Flexo	h	30	0,001	0,018	
4.8	Segunda pantalla	h	100	0,005	0,545	
4.9	Solidworks	h	40	2,885	115,385	
4.10	SigmaPlot	h	50	0,240	12,019	
4.11	Microsoft Office	h	70	0,010	0,711	
4.12	Electricidad	€/kWh	7,5	0,14	1,050	TOTAL
4.13	Internet	h	100	0,028	2,800	2018,35€

Tabla 12. U004: Redacción de la memoria y creación de planos.

U005	REVISIÓN DEL TRABAJO Y CORRECCIÓN DE DUDAS					
	Descripción	Unidad	Medición	Precio unitario (€)	Importe (€)	
5.1	Ingeniero industrial	h	40	18,8	752,000	
5.2	Ingeniero senior	h	40	47,5	1900,000	
5.3	Ordenador	h	40	0,048	1,923	
5.4	Mesa de escritorio	h	40	0,002	0,077	
5.5	Ratón	h	40	0,003	0,127	
5.6	Silla de escritorio	h	40	0,003	0,135	
5.7	Alfombrilla	h	40	0,002	0,067	
5.8	Flexo	h	8	0,001	0,005	
5.9	Segunda pantalla	h	40	0,005	0,218	
5.10	Ansys	h	20	11,538	230,769	
5.11	Solidworks	h	5	2,885	14,423	
5.12	SigmaPlot	h	10	0,240	2,404	
5.13	Microsoft Office	h	10	0,010	0,102	
5.14	Electricidad	€/kWh	4,8	0,14	0,672	TOTAL
5.15	Internet	h	40	0,028	1,120	2904,04€

Tabla 13. U005: Revisión del trabajo y corrección de dudas.

COSTE TOTAL DEL TRABAJO

El coste total de este Trabajo Fin de Máster es la suma de los costes totales de las unidades de obra anteriores:

Descripción	Importe (€)
Presupuesto de ejecución material (suma de unidades de obra)	8914,79
Gastos generales (13%)	1158,92
Beneficio industrial (6%)	534,89
Presupuesto de ejecución por contrata	10608,60
IVA (21%)	2227,81
PRESUPUESTO TOTAL	12836,40

Tabla 14. Coste total del Trabajo Fin de Máster.

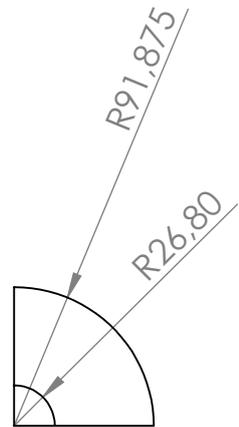
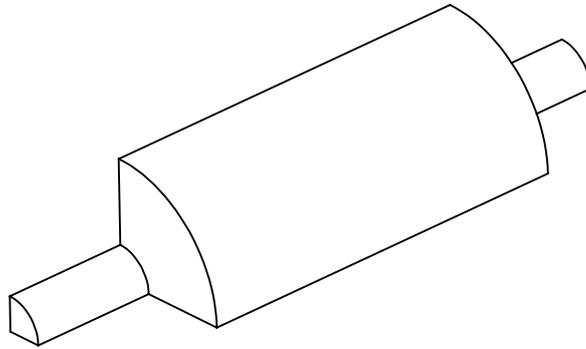
El presupuesto total de este Trabajo Fin de Máster es:

DOCE MIL OCHOCIENTOS TREINTA Y SEIS EUROS CON CUARENTA CÉNTIMOS

PLANOS

ÍNDICE DE LOS PLANOS

PLANO DE LA GEOMETRÍA DEL CASO 1.....	118
PLANO DE LA GEOMETRÍA DEL CASO 1A	119
PLANO DE LA GEOMETRÍA DEL CASO 1B.....	120



TRABAJO FINAL DE MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



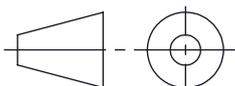
ESCUELA
TÉCNICA
SUPERIOR
INGENIERÍA
INDUSTRIAL
VALENCIA

Proyecto: DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE METODOLOGÍAS NUMÉRICAS DE ELEMENTOS FINITOS PARA EL ANÁLISIS ACÚSTICO DE SILENCIADORES DISIPATIVOS. INFLUENCIA DE ALTAS TEMPERATURAS Y GRADIENTES TÉRMICOS

Plano: Geometría silenciador disipativo. Caso 1.

Escala: 1:5

Nº Plano:



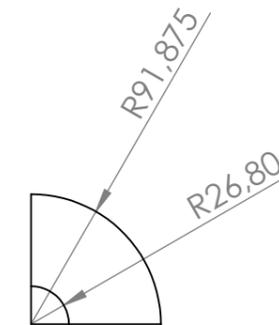
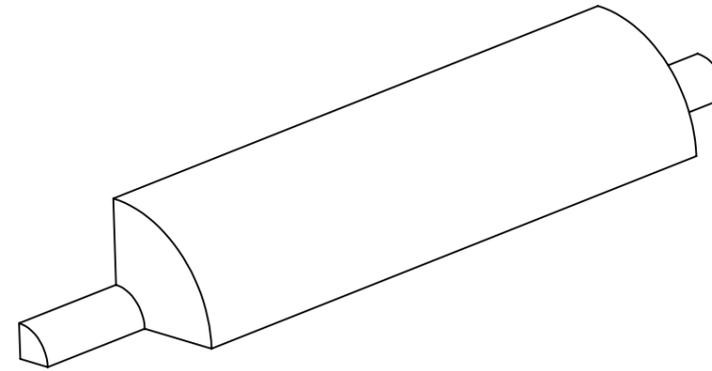
Creado por:
Jesús Rodríguez García

Fecha:
Marzo 2021

Aprobado por:
Francisco David Denia Guzmán

Fecha:
Marzo 2021

1



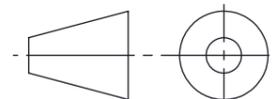
TRABAJO FINAL DE MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA
TÉCNICA
SUPERIOR
INGENIERÍA
INDUSTRIAL
VALENCIA



Proyecto:

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE
METODOLOGÍAS NUMÉRICAS DE ELEMENTOS
FINITOS PARA EL ANÁLISIS ACÚSTICO DE
SILENCIADORES DISIPATIVOS. INFLUENCIA DE
ALTAS TEMPERATURAS Y GRADIENTES TÉRMICOS

Plano:

Geometría silenciado disipativo. Caso 1a.

Creado por:

Jesús Rodríguez García

Aprobado por:

Francisco David Denia Guzmán

Escala:

1:5

Fecha:

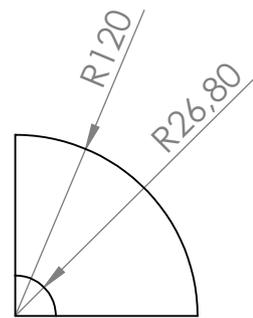
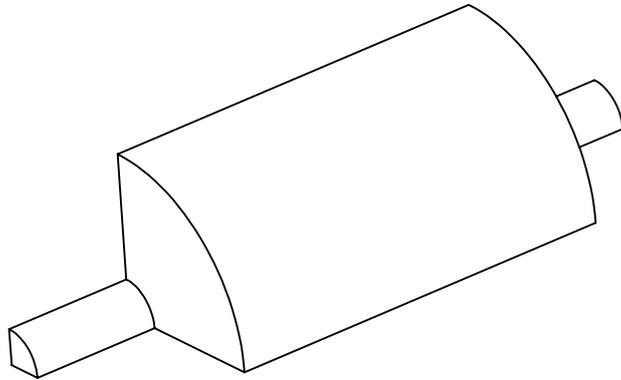
Marzo 2021

Fecha:

Marzo 2021

Nº Plano:

2



TRABAJO FINAL DE MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



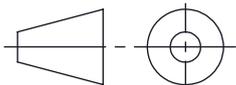
ESCUELA
TÉCNICA
SUPERIOR
INGENIERÍA
INDUSTRIAL
VALENCIA

Proyecto: DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE METODOLOGÍAS NUMÉRICAS DE ELEMENTOS FINITOS PARA EL ANÁLISIS ACÚSTICO DE SILENCIADORES DISIPATIVOS. INFLUENCIA DE ALTAS TEMPERATURAS Y GRADIENTES TÉRMICOS

Plano: Geometría silenciador disipativo. Caso 1b.

Escala: 1:5

Nº Plano:



Creado por:
Jesús Rodríguez García

Fecha:
Marzo 2021

Aprobado por:
Francisco David Denia Guzmán

Fecha:
Marzo 2021

3

ANEXOS

ANEXO A. MÉTODO DE CÁLCULO DE LAS PROPIEDADES DEL MATERIAL ABSORBENTE

En este anexo se va a desarrollar el método de cálculo de las propiedades del material absorbente, así como los pasos para su importación en el programa Ansys Workbench.

Como se ha visto en el apartado 6.3, las propiedades del material fonoabsorbente presente en la cámara de expansión se introducen en una tabla con 5 columnas. La primera columna se corresponde con los valores de frecuencia, cuyo rango de trabajo ha sido elegido en el apartado 6.7, siendo entre 10 – 3000 Hz. La segunda y tercera columna se corresponden con los valores reales e imaginarios de la densidad del material absorbente ρ_{abs} , y la cuarta y quinta columna se corresponden con los valores reales e imaginario de la velocidad del aire c_{abs} .

Como se ha visto en el apartado 2.9.1, estos valores complejos se pueden obtener mediante las siguientes expresiones:

$$k_{abs} = \frac{\omega}{c_{abs}} \Rightarrow c_{abs} = \frac{\omega}{k_{abs}} \quad (85)$$

$$Z_{abs} = \rho_{abs} \cdot c_{abs} \Rightarrow \rho_{abs} = \frac{Z_{abs}}{c_{abs}} \quad (86)$$

Donde ω se corresponde con la velocidad angular y es un valor dependiente de la frecuencia $\omega = 2\pi f$. Los parámetros Z_{abs} y k_{abs} se corresponden con la impedancia característica y el número de onda, y vienen dados por:

$$Z_{abs} = Z_0 [1 + a_5 (\xi)^{a_6} - j a_7 (\xi)^{a_8}] = Z_0 \left[1 + a_5 \left(\frac{\rho_0 f}{R_{fluj0}} \right)^{a_6} - j a_7 \left(\frac{\rho_0 f}{R_{fluj0}} \right)^{a_8} \right] \quad (87)$$

$$k_{abs} = k_0 [1 + a_3 (\xi)^{a_4} - j a_1 (\xi)^{a_2}] = k_0 \left[1 + a_3 \left(\frac{\rho_0 f}{R_{fluj0}} \right)^{a_4} - j a_1 \left(\frac{\rho_0 f}{R_{fluj0}} \right)^{a_2} \right] \quad (88)$$

La resistividad local R_{fluj0} se puede calcular con la ecuación de Christie:

$$R_{fluj0} = R_0 \left(\frac{T + 273,15}{T_0 + 273,15} \right)^{0,6} \quad (89)$$

Donde $T_0 = 15^\circ C$ se toma como temperatura de referencia; R_0 corresponde con la resistividad del aire en el material a dicha temperatura de referencia que, en este caso, se corresponde con la fibra de vidrio texturizada, con valor 4896 s/m^2 ; y T corresponde con el valor de temperatura que se quiera.

Los coeficientes de la fibra de vidrio son los siguientes:

Material	Fibra texturizada
a_1	0,189
a_2	-0,595
a_3	0,160
a_4	-0,577
a_5	0,095
a_6	-0,754
a_7	0,085
a_8	-0,732

Tabla 15. Coeficientes para el cálculo del número de onda complejo y la impedancia característica de la fibra de vidrio texturizada (Denia, Fenómenos de Propagación, 2019).

Por último, todas las expresiones de los parámetros vistos anteriormente dependen de la frecuencia de trabajo y de la temperatura. Tanto para los casos de temperatura constante como de gradiente de temperaturas (vistos en el apartado 4.6.1 y 4.6.2, respectivamente), la temperatura va a tener que ser escogida por el usuario, siendo esta un valor constante a lo largo del silenciador o un valor variable, por lo que el método que se presenta a continuación es válido para ambos casos.

El objetivo final es obtener la tabla que se ha comentado anteriormente. Para ello, se utiliza el programa Excel, herramienta muy útil para el tratamiento de una gran cantidad de datos mediante fórmulas.

En primer lugar, se calculan los parámetros que dependen de la temperatura, así como los que permanecen constantes. Los valores sombreados en color naranja son aquellos que deben introducirse, mientras que los que no están sombreados son calculados automáticamente, ya que dependen de éstos.

Fibra de vidrio texturizada	
Temperatura (°C)	448
Resistividad inicial (s/m ²)	4896
Resistividad final (s/m ²)	8489,568
Densidad aire (kg/m ³)	0,490
Velocidad sonido (m/s)	538
Zo (rayl)	263,534
Coeficientes del material absorbente	
a1	0,189
a2	-0,595
a3	0,16
a4	-0,577
a5	0,095
a6	-0,754
a7	0,085
a8	-0,732

Tabla 16. Cálculo de parámetros dependientes de la temperatura y términos constantes del material absorbente.

El siguiente paso es crear una columna de frecuencia, en la cual se introducen los valores del rango de frecuencias elegidos; una segunda y tercera columna para el cálculo del valor complejo de la impedancia característica Z_{abs} y de la longitud de onda k_{abs} ; y una cuarta y quinta columna para el cálculo del valor complejo de la velocidad c_{abs} y de la densidad ρ_{abs} . Dentro de estas dos últimas columnas, los valores complejos de dichos parámetros, se dividen en valor real e imaginario. A continuación, se muestra en dos imágenes, todo el proceso comentado. Las tablas van seguidas, pero se han dividido en dos para obtener una mejor visualización, además de solo mostrar los valores iniciales del rango de frecuencia, ya que la tabla real presenta todo el rango de frecuencias.

Frecuencia (Hz)	Zabs (rayl)	kabs (m ⁻¹)
10	7194,74307330372-5263,14178003568j	1,49783528049457-1,86583175271622j
20	4373,44477048746-3168,77288003091j	2,08512343214967-2,47052713243515j
30	3290,86280459863-2355,0075884117j	2,54829438930184-2,91143157560594j
40	2700,53548825081-1907,81893873878j	2,94946486343693-3,27119757888833j
50	2323,14713442825-1620,31340939444j	3,31193526499237-3,5805960759715j

Tabla 17. Cálculo complejo de la impedancia característica y longitud de onda en función de la frecuencia.

Frecuencia (Hz)	Velocidad Cabs (m/s)			Densidad pabs (kg/m ³)		
	Complejo	Real	Imaginario	Complejo	Real	Imaginario
10	16,4391997590581+20,4780734564935j	16,43919976	20,47807346	15,2216258202266-339,119387404351j	15,22162582	-339,1193874
20	25,0711147173509+29,705133132456j	25,07111472	29,70513313	10,2705294402192-138,560266009604j	10,27052944	-138,560266
30	32,0864753318943+36,6588639928576j	32,08647533	36,65886399	8,11501222413152-82,6670642505849j	8,115012224	-82,66706425
40	38,2102291541575+42,3782668670944j	38,21022915	42,37826687	6,8606994597564-57,5386104717995j	6,86069946	-57,53861047
50	43,7365854501019+47,2844526565309j	43,73658545	47,28445266	6,02377613340403-43,5595130982838j	6,023776133	-43,5595131

Tabla 18. Cálculo complejo de la velocidad y densidad del aire en función de la frecuencia.

Una vez obtenidos los valores reales e imaginario de ambos parámetros, solo queda realizar la tabla de las 5 columnas final:

Frecuencia	DensidadReal	DensidadImag	VelocidadReal	VelocidadImag
10	15,22162582	-339,1193874	16,43919976	20,47807346
20	10,27052944	-138,560266	25,07111472	29,70513313
30	8,115012224	-82,66706425	32,08647533	36,65886399
40	6,86069946	-57,53861047	38,21022915	42,37826687
50	6,023776133	-43,5595131	43,73658545	47,28445266

Tabla 19. Tabla final de las propiedades del material absorbente para importar a Ansys Workbench.

Es importante dar los nombres adecuados a los cabeceros de dicha tabla, pues son los que aparecerán a la hora de realizar la importación en Ansys Workbench.

El último paso es copiar todos estos valores y pegarlos en un archivo de texto (.txt), con un nombre que sea identificativo. Este archivo de texto es el que se importa en la Figura 39.

ANEXO B. MÉTODO DE CÁLCULO DE LA IMPEDANCIA DE LA SUPERFICIE PERFORADA

En este anexo se va a desarrollar el método de cálculo de la impedancia de la superficie perforada, así como los pasos para su importación en el programa Ansys Workbench.

Como se ha visto en el apartado 6.6, el efecto de la superficie perforada se introduce mediante una matriz de admitancias formada por los coeficientes de admitancia y los coeficientes de término fuente. Dicha matriz representa las impedancias entre dos contornos o caras diferentes. De esta forma, ANSYS Workbench define la matriz de admitancias entre las caras de dos sets de la siguiente manera (Munuera, 2019):

$$\begin{bmatrix} V_{n1} \\ V_{n2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix}$$

- V_{n1} = Velocidad normal en los nodos de la 1ª cara o en el lado positivo del elemento seleccionado.
- V_{n2} = Velocidad normal en los nodos de la 2ª cara o en el lado positivo del elemento seleccionado.
- P_1 = Presión en los nodos de la 1ª cara o en el lado positivo del elemento seleccionado.
- P_2 = Presión en los nodos de la 2ª cara o en el lado positivo del elemento seleccionado.
- $Y_{11}, Y_{12}, Y_{21}, Y_{22}$ = Coeficientes de admitancias (nº complejo).
- α_1, α_2 = Coeficientes de término fuente (nº complejo).

La tabla que se debe importar en Ansys Workbench está formada por 9 columnas, sin contar con las columnas correspondientes a los coeficientes de término fuente, ya que son nulos. La primera columna se corresponde con los valores de frecuencia, en la cual se introducen los valores del rango de frecuencias elegidos en el apartado 6.7, siendo entre 10 – 3000 Hz. La segunda y tercera columna corresponden con los términos Y_{11real} e $Y_{11imaginario}$ y la cuarta y quinta columna se corresponden con los términos Y_{12real} e $Y_{12imaginario}$. La columna sexta y séptima se corresponden con los términos Y_{21real} e $Y_{21imaginario}$ y la octava y novena columna se corresponden con los términos Y_{22real} e $Y_{22imaginario}$. Los términos Y_{11} e Y_{22} se obtienen haciendo la inversa de la impedancia característica de la superficie perforada ($1/Z_p$). Por otro lado, los términos Y_{12} e Y_{21} se obtienen haciendo la inversa de la impedancia característica de la superficie perforada pero con valor negativo ($-1/Z_p$).

Por lo tanto, se debe calcular la impedancia acústica del perforado. Para un silenciador disipativo con presencia de material fonoabsorbente, se utiliza la siguiente ecuación:

$$Z_p = \rho_0 c_0 \frac{1}{\sigma} \left[6 \cdot 10^{-3} + jk_0 \left(t_h + 0,425 \left(1 + \frac{Z_{abs} \cdot k_{abs}}{\rho_0 c_0 k_0} \right) d_h \cdot F(\sigma) \right) \right] \quad (90)$$

Donde ρ_0 corresponde con la densidad del aire, c_0 con la velocidad del sonido en el aire, k_0 con el número de onda, t_h con el espesor de la superficie perforada, d_h con el diámetro de los orificios de la superficie perforada, σ con la porosidad de la superficie perforada, Z_{abs} y k_{abs} con la impedancia y el número de onda del material absorbente, parámetros que se han obtenido en el apartado anterior. Además, se añade un factor de corrección $F(\sigma)$:

$$F(\sigma) = 0.5[(1 - 0.7\sqrt{\sigma}) + (1 - 1.41\sqrt{\sigma} + 0.34(\sqrt{\sigma})^3 + 0.07(\sqrt{\sigma})^5)] \quad (91)$$

Para la obtención de la tabla que se importa en Ansys Workbench, se va a utilizar, de nuevo, el programa Excel.

En primer lugar, se calculan los parámetros variables, que dependen de la temperatura o de la porosidad, así como los que permanecen constantes. Los valores sombreados en color naranja son aquellos que deben introducirse, mientras que los que no están sombreados son calculados automáticamente, ya que dependen de éstos. El valor de la temperatura debe ser el mismo que se introduce en la Tabla 16, ya que se utilizan los términos Z_{abs} y k_{abs} del material absorbente y se deben evaluar a la misma temperatura.

SUPERFICIE PERFORADA	
Temperatura (°C)	448
Densidad aire (kg/m3)	0,490
Velocidad sonido (m/s)	538
Diámetro agujero (m)	0,0035
Espesor placa (m)	0,001
Porosidad	0,08
Factor corrección	0,7055

Tabla 20. Cálculo de parámetros variables y términos constantes de la superficie perforada.

El siguiente paso es crear una serie de columnas en la que se irán calculando diferentes términos. La primera columna se corresponde con la frecuencia, en la cual se introducen los valores del rango de frecuencias elegidos. En la segunda y tercera columna se copian las columnas del valor complejo de la impedancia característica Z_{abs} y de la longitud de onda k_{abs} del apartado anterior, evaluadas a la misma temperatura. En la cuarta columna se obtiene la multiplicación de los dos parámetros anteriores para su introducción en la impedancia acústica del perforado, la cual se obtiene en la columna quinta. Por último, en la sexta y séptima columna se calculan los valores complejos de los coeficientes Y_{11} e Y_{12} . A partir de estos, se podrán obtener los valores reales e imaginarios de todos los coeficientes restantes.

Frecuencia (Hz)	Zabs (rayl)	kabs (m ⁻¹)
10	7194,74307330372-5263,14178003568j	1,49783528049457-1,86583175271622j
20	4373,44477048746-3168,77288003091j	2,08512343214967-2,47052713243515j
30	3290,86280459863-2355,0075884117j	2,54829438930184-2,91143157560594j
40	2700,53548825081-1907,81893873878j	2,94946486343693-3,27119757888833j
50	2323,14713442825-1620,31340939444j	3,31193526499237-3,5805960759715j

Tabla 21. Cálculo complejo de la impedancia característica y longitud de onda en función de la frecuencia.

Frecuencia (Hz)	Zabs*kabs (rayl·m ⁻¹)	Zperf (rayl)
10	956,402957050303-21307,4995231876j	299,278857508824+13,3342385619809j
20	1290,6327935148-17411,9965510087j	248,177282025586+18,5067514335118j
30	1529,64376722739-15582,3745046084j	224,176127417912+22,4301742807004j
40	1724,28184170066-14461,0300764776j	209,466225424234+25,7715092496143j
50	1892,42508475716-13684,6246343517j	199,281265589843+28,765282520532j

Tabla 22. Cálculo de la impedancia acústica del perforado.

Frecuencia (Hz)	Y11 (m ² s/kg)	Y12 (m ² s/kg)
10	0,00333474550163209-0,000148578126876015j	-0,00333474550163209+0,000148578126876015j
20	0,00400709507040561-0,000298811848663899j	-0,00400709507040561+0,000298811848663899j
30	0,00441656313863629-0,000441903792622183j	-0,00441656313863629+0,000441903792622183j
40	0,00470285034409934-0,000578611424811047j	-0,00470285034409934+0,000578611424811047j
50	0,00491561379629841-0,000709544969989168j	-0,00491561379629841+0,000709544969989168j

Tabla 23. Cálculo de los coeficientes de admitancias Y₁₁ e Y₁₂.

Una vez se obtienen los coeficientes anteriores, basta con separar la parte real e imaginaria de ambos, y posicionarlas de la siguiente manera:

Frecuencia	Y11 real	Y11 imaginario	Y12 real	Y12 imaginario	Y21 real	Y21 imaginario	Y22 real	Y22 imaginario
10	0,003334746	-0,000148578	-0,003334746	0,000148578	-0,003334746	0,000148578	0,003334746	-0,000148578
20	0,004007095	-0,000298812	-0,004007095	0,000298812	-0,004007095	0,000298812	0,004007095	-0,000298812
30	0,004416563	-0,000441904	-0,004416563	0,000441904	-0,004416563	0,000441904	0,004416563	-0,000441904
40	0,00470285	-0,000578611	-0,00470285	0,000578611	-0,00470285	0,000578611	0,00470285	-0,000578611
50	0,004915614	-0,000709545	-0,004915614	0,000709545	-0,004915614	0,000709545	0,004915614	-0,000709545

Tabla 24. Tabla final de los coeficientes de admitancias de la superficie perforada para importar a Ansys Workbench.

El último paso es copiar todos estos valores y pegarlos en la tabla de la Figura 69. Las columnas de los coeficientes de término fuente se quedarán con el valor 0.

ANEXO C. MACROS APDL

Silenciador disipativo sin conducto perforado y temperaturas constantes

```
/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=15          ! 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)
!
rho_compac=100             ! Densidad de compactación de la fibra (kg/m^3). Se
utiliza para todas las fibras en general, salvo Delany y Bazley
!
! Selección de material
! *****
! Fibra de vidrio de Owens Corning
A1=1.083099              ! Coeficientes para el cálculo de la resistividad
A2=1.827587              ! A1 y A2 se calculan con los datos: (1) resis0=4896 Pa s/m^2;
rho_compac=100 kg/m^3; (2) resis0=17378 Pa s/m^2; rho_compac=200 kg/m3
resis0=A1*rho_compac**A2    ! Resistividad a temperatura de referencia (falta calcular
su valor final a la temperatura de trabajo)
!
! Modelo de Owens Corning
!
a1=0.189
a2=-0.595
a3=0.160
a4=-0.577
a5=0.095
a6=-0.754
a7=0.085
a8=-0.732
!
! *****
! 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,l,1,Nfrec,1      ! DO,Par,IVAL,FVAL,INC: l va desde 1 con incrementos de 1 hasta que
llega a FVAL
frequ=f_ini+(l-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
!
! *****
! *****
! 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 (volumen 1)
cylind,0,rduct,lduct,lduct+lchamb,0,180 ! Conducto central (volumen 2)
cylind,0,rduct,lduct+lchamb,2*lduct+lchamb,0,180 ! Conducto de salida (volumen 3)
!
cylind,rduct,rchamb,lduct,lduct+lchamb,0,180 ! Cámara con material absorbente (volumen 4)
!
vsel,all          ! Selecciona todos los volúmenes
vglue,all         ! Pegado de todos los volúmenes (sin globalizarlos en uno) 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          ! Número de divisiones por línea
! Conducto central de aire
type,1
mat,1            ! Material: Aire
vsel,s,,,1,3,1   ! Selecciona desde el primer volumen hasta el tercero
vmesh,all        ! Malla los volúmenes anteriores
vsel,all         ! Selecciona todo lo anterior
! Cámara exterior disipativa
mat,2            ! Material: Fibra
vsel,s,,,4       ! Selecciona el cuarto volumen
vmesh,all        ! Malla el cuarto volumen
vsel,all         ! Selecciona lo anterior
nummrg,all       ! Fusiona todos los volúmenes anteriores seleccionados
eplot           ! Grafica
!
! *****
!
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  
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
```

Silenciador disipativo con conducto perforado y temperaturas constantes

```
/title, Pérdida de Transmisión (dB) de Silenciador Disipativo con Conducto Perforado
! Se incluye presencia de conducto perforado
!
/prop7
/view,1,1,1,1
! *****
! Cálculo de propiedades del aire. Modelo de gas perfecto
! *****
Temp=15          ! 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)
!
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=0.08      ! 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)
!
rho_compac=100 ! Densidad de compactación de la fibra (kg/m^3). Se utiliza para todas
las fibras en general, salvo Delany y Bazley
!
! Selección de material
! *****
AA1=1.083099    ! Coeficientes para el cálculo de la resistividad
AA2=1.827587    ! AA1 y AA2 se calculan con los datos: (1) resis0=4896 Pa s/m^2;
rho_compac=100 kg/m^3; (2) resis0=17378 Pa s/m^2; rho_compac=200 kg/m3
resis0=AA1*rho_compac**AA2 ! Resistividad a temperatura de referencia (falta calcular su valor
final a la temperatura de trabajo)
!
! Modelo de Owens Corning
!
a1=0.189
a2=-0.595
a3=0.160
a4=-0.577
a5=0.095
a6=-0.754
a7=0.085
a8=-0.732
```

```

! *****
! 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
!
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_Ga
mmaabs)/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/10          ! 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
nset,s,loc,x,rduct
nset,r,loc,z,lduct,lduct+lchamb
sf,all,port,3 ! Puerto 1 (caras interiores)
nset,s,loc,x,rduct+espesor
nset,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
```

Silenciador disipativo sin conducto perforado y temperaturas constantes

```
/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
!
! *****
! Características del material absorbente
! *****
! Fibra de vidrio de Owens Corning
A1=1.083099     ! Coeficientes para el cálculo de la resistividad
A2=1.827587     ! A1 y A2 se calculan con los datos: (1) resis0=4896 Pa s/m^2;
rho_compac=100 kg/m^3; (2) resis0=17378 Pa s/m^2; rho_compac=200 kg/m3
rho_compac=100 ! Densidad de compactación de la fibra (kg/m^3). Se utiliza para todas
las fibras en general, salvo Delany y Bazley
resis0=A1*rho_compac**A2 ! Resistividad a temperatura de referencia (falta calcular su valor
final a la temperatura de trabajo)
!
! Modelo de Owens Corning
a1=0.189
a2=-0.595
a3=0.160
a4=-0.577
a5=0.095
a6=-0.754
a7=0.085
a8=-0.732
!
Tref=15         ! Temperatura de referencia para resis0 (°C)
!Rango de frecuencias
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
!
et,1,221,,1    ! Tetraedro acústico de 10 nodos (interpolación cuadrática). No acoplado
pi=3.141592653589793 ! Valor numérico de Pi
!
! *****
! Cálculo de la pendiente de la recta formada entre Tent y Tsal (Gradiente)
! *****
Tent=500      !Temperatura de entrada al conducto de entrada (°C)
```

```

Tsal=300          !Temperatura de salida al conducto de salida (°C)
Xent=0           !Coordenada en X en el punto donde se aplica la Tent (m)
Xsal=0.5         !Coordenada en X en el punto donde se aplica la Tsal (m) = Longitud
silenciador
Pend=(Tsal-Tent)/(Xsal-Xent) !Pendiente de la recta que une a los dos puntos anteriores
k=5              !Número de divisiones de la cámara (sin entrada ni salida)
!
! Características geométricas silenciador
rduct=0.0268     ! Conducto de entrada, central y salida
lduct=0.1        ! Longitud del conducto de entrada y salida
rchamb=0.091875 ! Cámara central disipativa
lchamb=0.3       ! Longitud de la cámara
Long_div=lchamb/k ! Longitud de cada división de la cámara
!
! *****
! CÁLCULO PROPIEDADES CONDUCTO ENTRADA
! *****
X_ce=lduct       !Coordenada en X del nuevo punto
T_iniciocamara=Pend*(X_ce-Xent)+Tent !Temperatura del nuevo punto
Tmed_ce=(Tent+T_iniciocamara)/2
! Propiedades del aire
rho0_ce=Patm*Mm/(R*(Tmed_ce+273.15)) ! Densidad del aire (kg/m^3)
c0_ce=sqrt(gamma*R*(Tmed_ce+273.15)/Mm) ! Velocidad del sonido (m/s)
! Material del aire de entrada
mp,dens,1,rho0_ce
mp,sonc,1,c0_ce
! *****
! CÁLCULO PROPIEDADES CONDUCTO SALIDA
! *****
X_cs=Xsal-lduct
T_finalcamara=Pend*(X_cs-Xent)+Tent
Tmed_cs=(T_finalcamara+Tsal)/2
! Propiedades del aire
rho0_cs=Patm*Mm/(R*(Tmed_cs+273.15)) ! Densidad del aire (kg/m^3)
c0_cs=sqrt(gamma*R*(Tmed_cs+273.15)/Mm) ! Velocidad del sonido (m/s)
! Material del aire de salida
mp,dens,2,rho0_cs
mp,sonc,2,c0_cs
!
! Contador del número de material
mater=3
! *****
! CÁLCULO PROPIEDADES CONDUCTO CENTRAL INTERIOR
! *****
*DO,C,1,k,1
X1=lduct+Long_div*(C-1)
X2=lduct+Long_div*C
T1=Pend*(X1-Xent)+Tent
T2=Pend*(X2-Xent)+Tent
Tmed=(T1+T2)/2
! Propiedades del aire

```

```

rho0=Patm*Mm/(R*(Tmed+273.15))      ! Densidad del aire (kg/m^3)
c0=sqrt(gamma*R*(Tmed+273.15)/Mm)  ! Velocidad del sonido (m/s)
! Material del aire correspondiente
mp,dens,mater,rho0
mp,sonc,mater,c0
mater=mater+1
*ENDDO
! *****
! CÁLCULO PROPIEDADES CÁMARA CON MATERIAL ABSORBENTE
! *****
*DO,D,1,k,1
X1=lduct+Long_div*(D-1)
X2=lduct+Long_div*D
T1=Pend*(X1-Xent)+Tent
T2=Pend*(X2-Xent)+Tent
Tmed=(T1+T2)/2
! Propiedades del aire
rho0=Patm*Mm/(R*(Tmed+273.15))      ! Densidad del aire (kg/m^3)
c0=sqrt(gamma*R*(Tmed+273.15)/Mm)    ! Velocidad del sonido (m/s)
mp,dens,mater,rho0
mp,sonc,mater,c0
!
resis=resis0*((Tmed+273.15)/(Tref+273.15))**0.6 ! Ecuación de Christie. Se toma Tref = 15°C
(en general no coincidirá con Temp)
! Modelo de Ansys de impedancia compleja y constante de propagación
tb,perf,mater,,zpro                  ! Material absorbente. Modelo de impedancia compleja y
constante de propagación (zpro)
!
*DO,l,1,Nfrec,1                      ! DO,Par,IVAL,FVAL,INC: l va desde 1 con incrementos de 1
hasta que llega a FVAL
frequ=f_ini+(l-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
mater=mater+1
*ENDDO
!
! *****
! FORMACIÓN VOLÚMENES
! *****
! Volumen conducto de entrada
cylind,0,rduct,0,lduct,0,180
!
! Volumen conducto de salida

```

```

cylind,0,rduct,lduct+lchamb,2*lduct+lchamb,0,180
!
! Volúmenes conducto interior
*DO,A,1,k,1
X1=lduct+Long_div*(A-1)
X2=lduct+Long_div*A
cylind,0,rduct,X1,X2,0,180      ! Volumen de la sección correspondiente
*ENDDO
vsel,all          ! Selecciona todos los volúmenes
vglue,all        ! Pegado de todos los volúmenes (sin globalizarlos en uno) para conseguir
dominio continuo
numcmp,all       ! Compresión de numeración
!
! Volúmenes cámara absorbente
*DO,B,1,k,1
X1=lduct+Long_div*(B-1)
X2=lduct+Long_div*B
cylind,rduct,rchamb,X1,X2,0,180  ! Volumen de la sección correspondiente con material
absorbente
*ENDDO
vsel,all          ! Selecciona todos los volúmenes
vglue,all        ! Pegado de todos los volúmenes (sin globalizarlos en uno) para conseguir
dominio continuo
numcmp,all       ! Compresión de numeración
!
! *****
! MALLADO DE LOS VOLÚMENES
! *****
! Se escoge el mínimo c0 para definir tamaño malla h
X_final_camara=lchamb+lduct      ! Distancia punto final cámara
T_final_camara=Pend*(X_final_camara-Xent)+Tent      ! Temperatura a dicho punto
c0_final_camara=sqrt(gamma*R*(T_final_camara+273.15)/Mm)  ! Velocidad del sonido (m/s)
lambda=c0_final_camara/f_fin      ! Mínima longitud de onda (a frecuencia
máxima)
h=lambda/10                      ! 10 elementos por (mínima) longitud de onda
esize,h                          ! Número de divisiones por línea
!
! Mallado conducto entrada
type,1          ! Selecciona el tipo de elemento
mat,1           ! Selecciona el número de material
vsel,s,,,1     ! Selecciona el volumen a mallar
vmesh,all      ! Realiza el mallado
vsel,all
!
! Mallado conducto salida
mat,2           ! Selecciona el número de material
vsel,s,,,2     ! Selecciona el volumen a mallar
vmesh,all      ! Realiza el mallado
vsel,all
!
mater=3

```

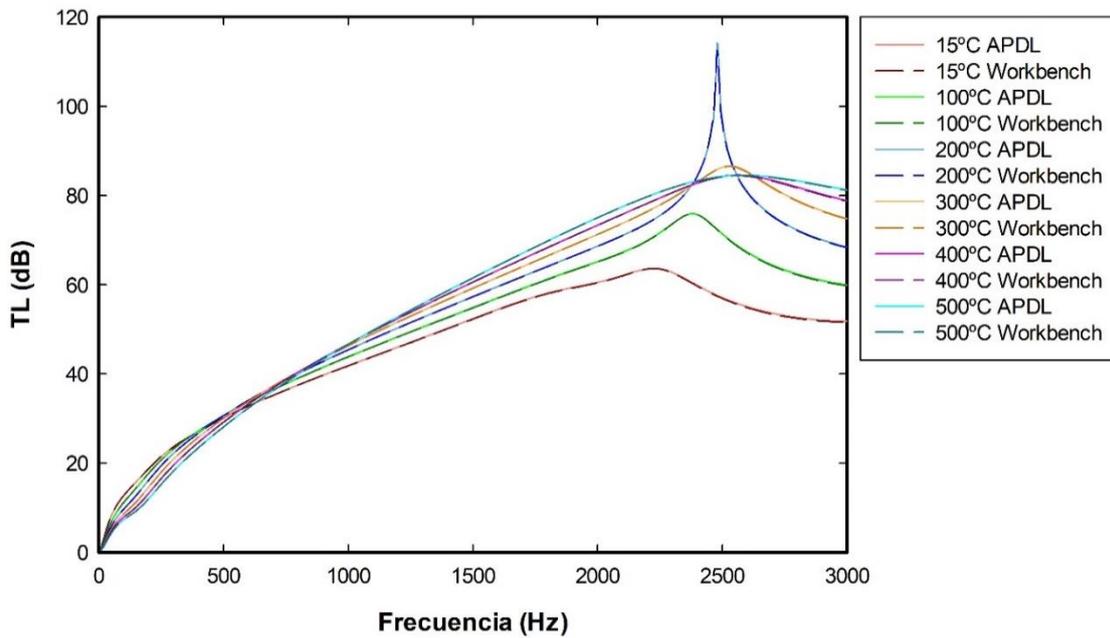
```

! Mallado de los volúmenes del conducto interior
*DO,E,1,k,1
X1=lduct+Long_div*(E-1)
X2=lduct+Long_div*E
vsel,s,,,3,k+2
vsel,r,loc,z,X1,X2
mat,mater
vmesh,all
vsel,all
mater=mater+1
*ENDDO
!
! Mallado de los volúmenes de la cámara absorbente
*DO,F,1,k,1
X1=lduct+Long_div*(F-1)
X2=lduct+Long_div*F
vsel,s,,,3+k,2*k+2
vsel,r,loc,z,X1,X2
mat,mater
vmesh,all
vsel,all
mater=mater+1
*ENDDO
eplot
!
! *****
! Condiciones de excitación en sección de entrada
! *****
z0_ce=rho0_ce*c0_ce          ! Impedancia característica en la entrada (rayl)
p=1                          ! Excitación en sección de entrada. Se puede poner otro valor. Lo
                             ! hace bien igualmente
vn=-p/z0_ce                  ! 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_ce         ! 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

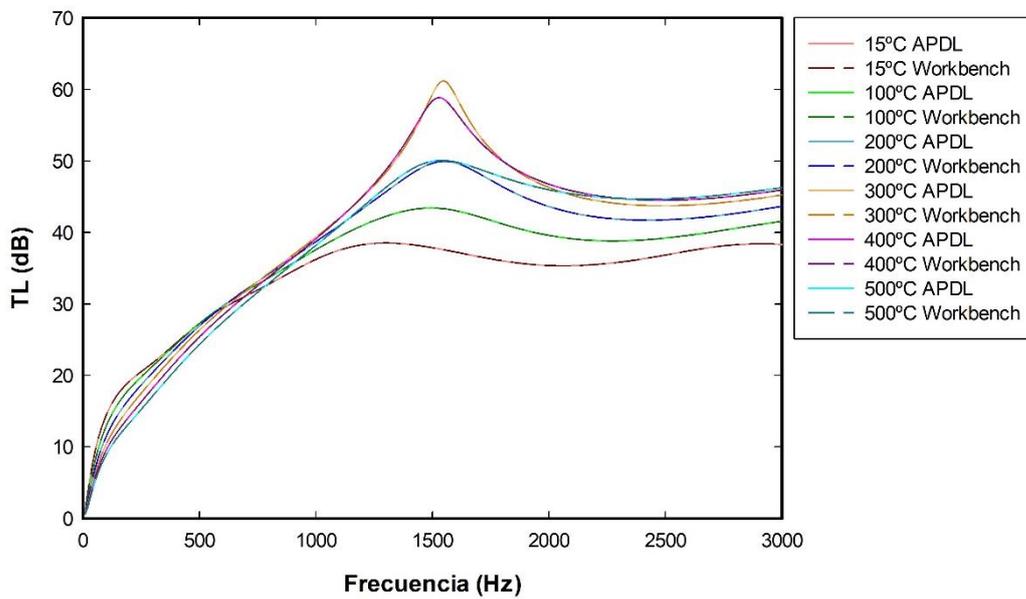
```

```
!  
! *****  
! CÁLCULO DE LA 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_conducto_GT0102,a2p,tl    ! TL - pérdida de transmisión  
finish
```

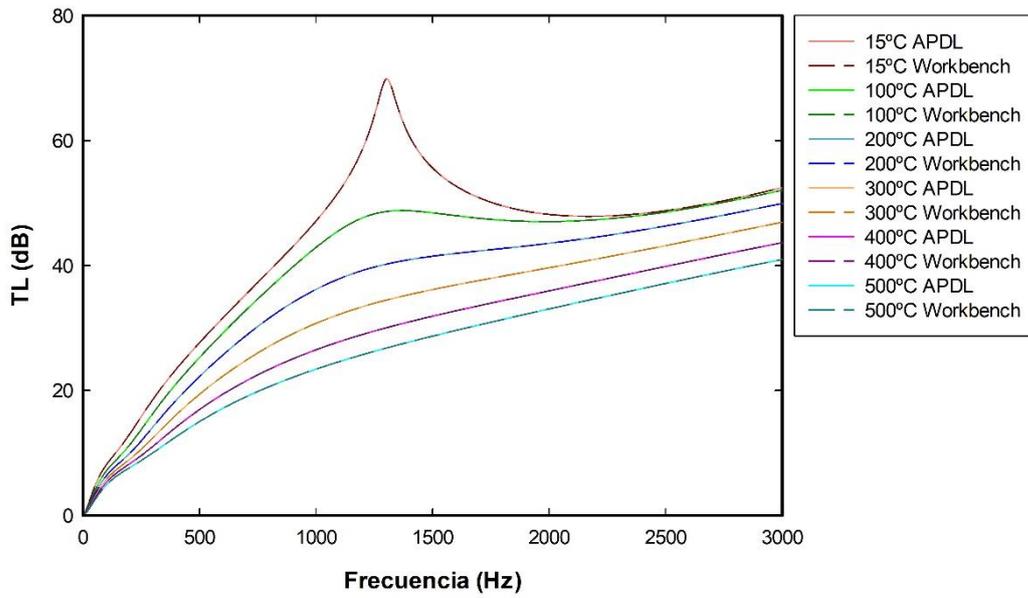
ANEXO D. COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE APDL Y WORKBENCH



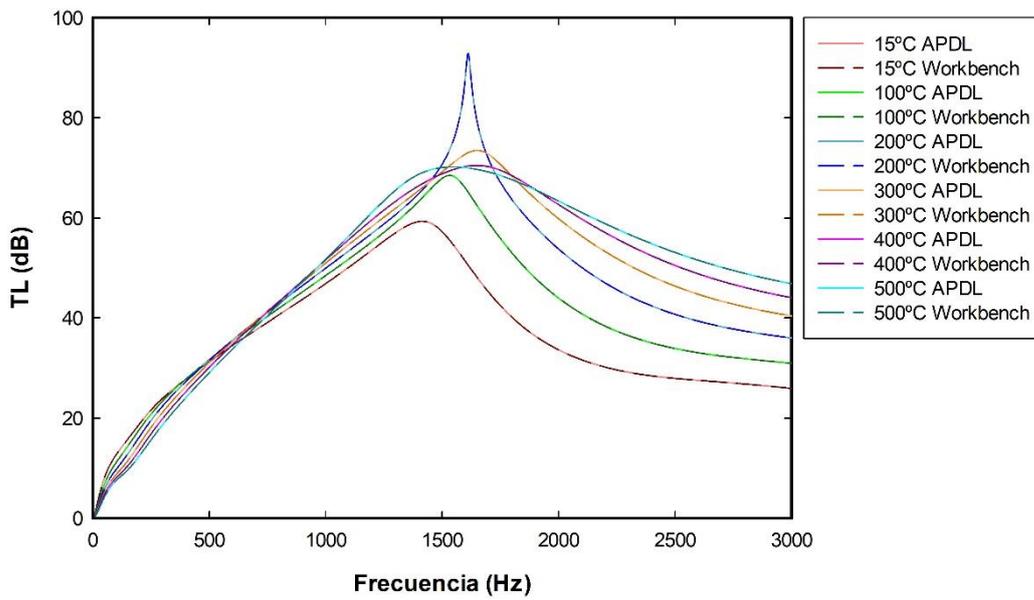
Gráfica 18. Comparación APDL vs Workbench. Caso 1a.



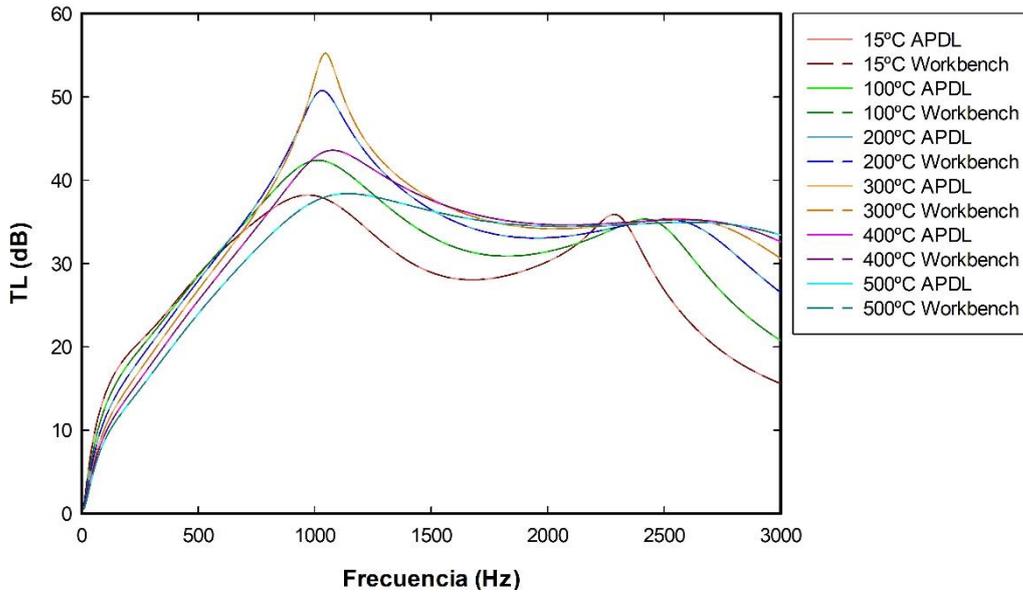
Gráfica 19. Comparación APDL vs Workbench. Caso 1b.



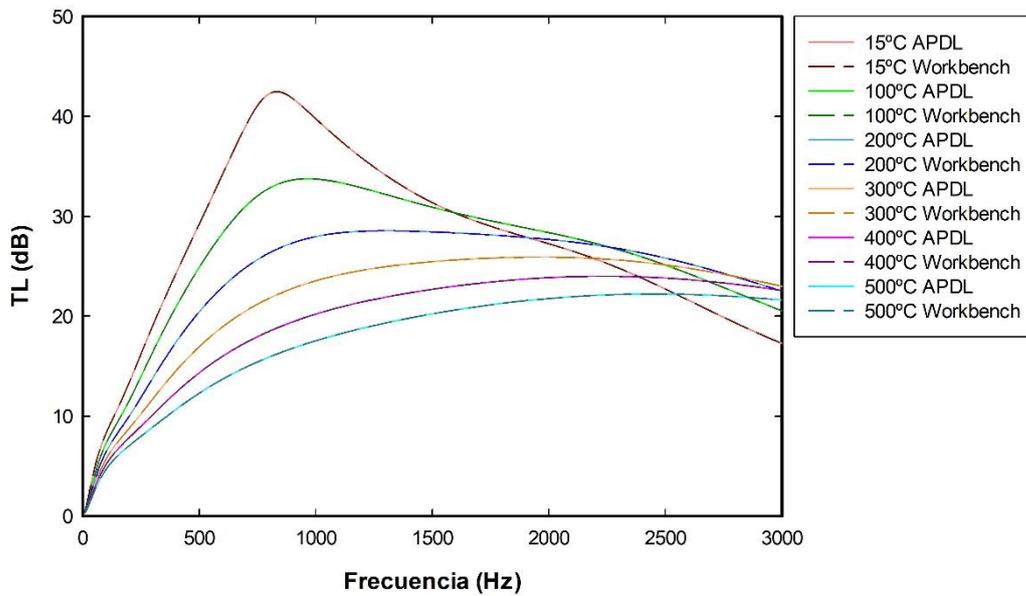
Gráfica 20. Comparación APDL vs Workbench. Caso 1c.



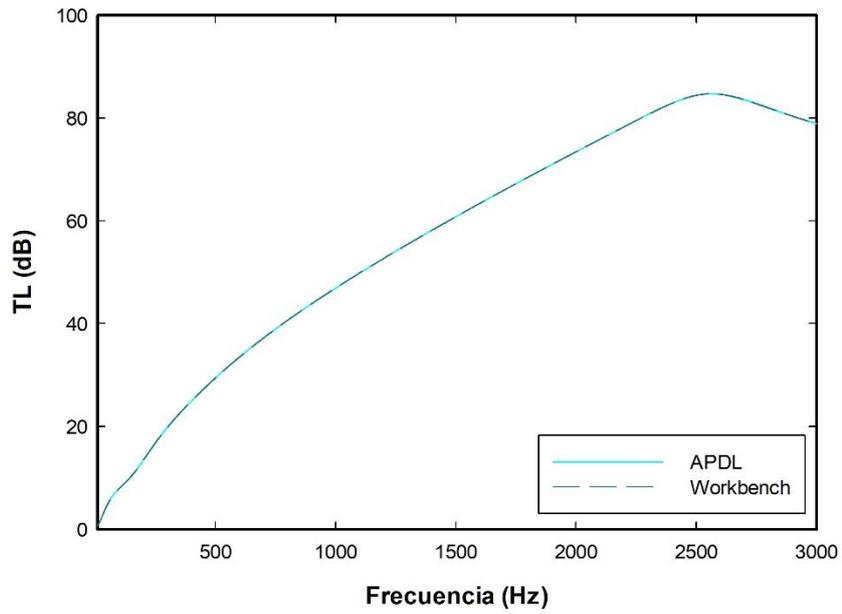
Gráfica 21. Comparación APDL vs Workbench. Caso 2a.



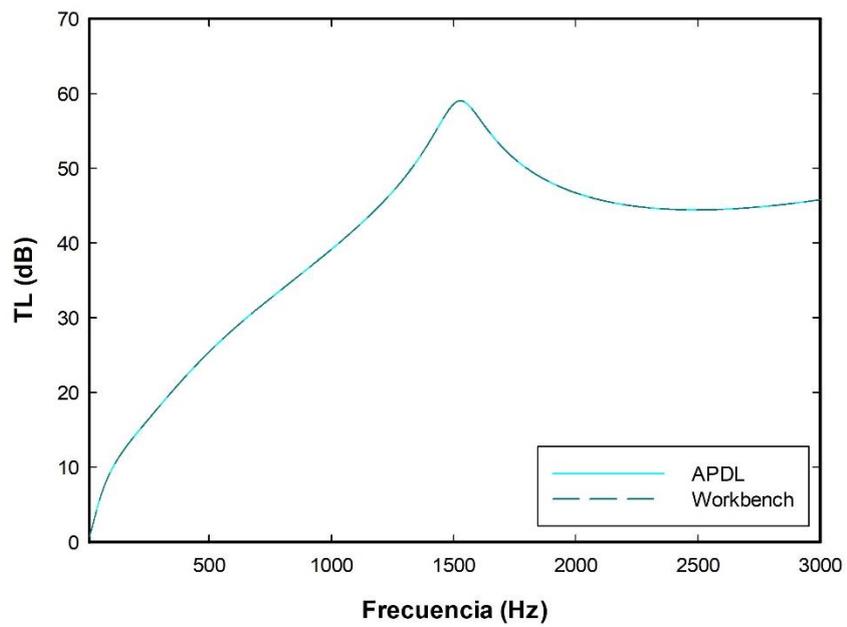
Gráfica 22. Comparación APDL vs Workbench. Caso 2b.



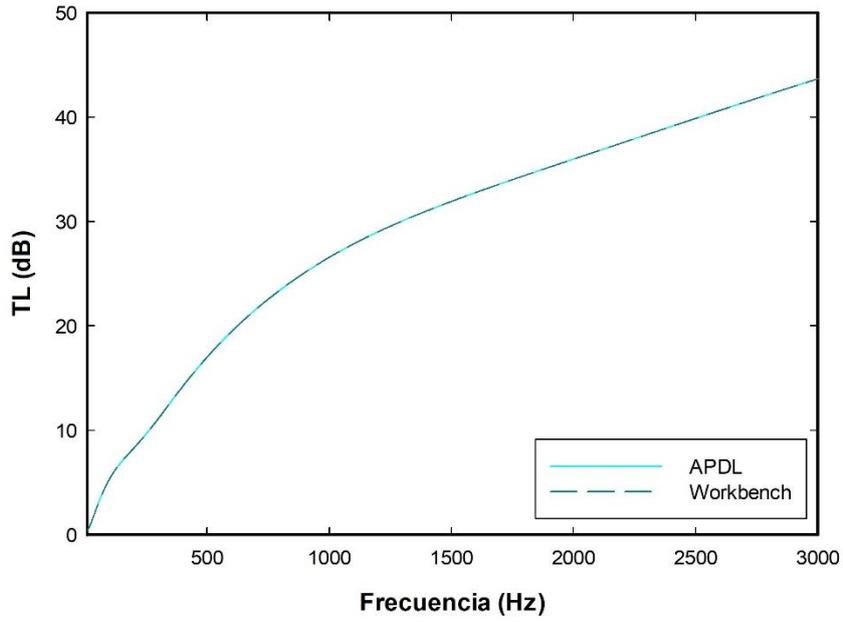
Gráfica 23. Comparación APDL vs Workbench. Caso 2c.



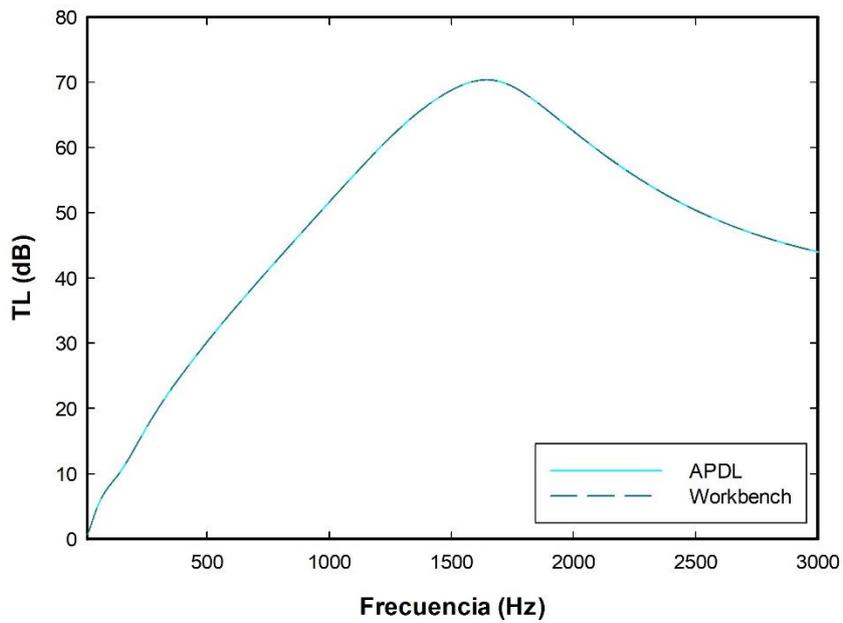
Gráfica 24. Comparación APDL vs Workbench. Caso 3a.



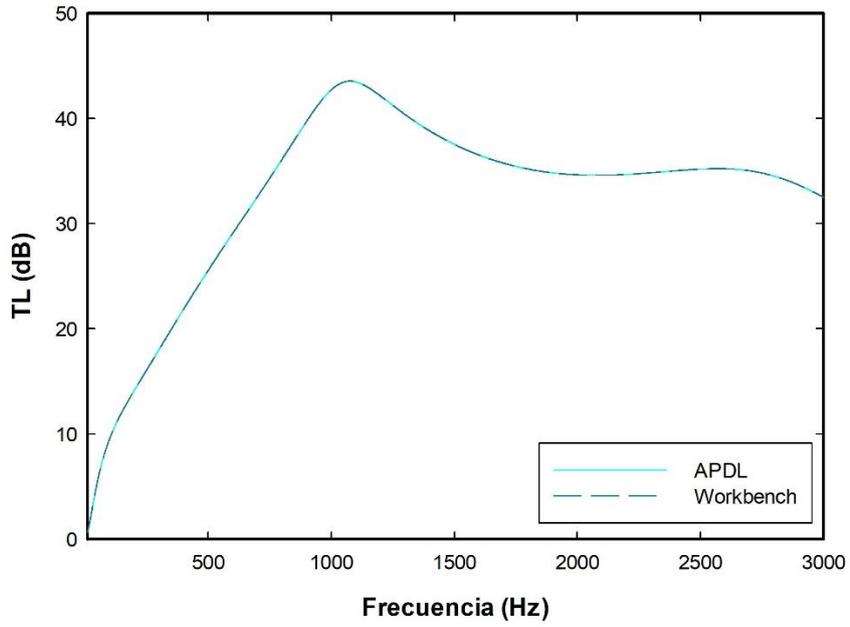
Gráfica 25. Comparación APDL vs Workbench. Caso 3b.



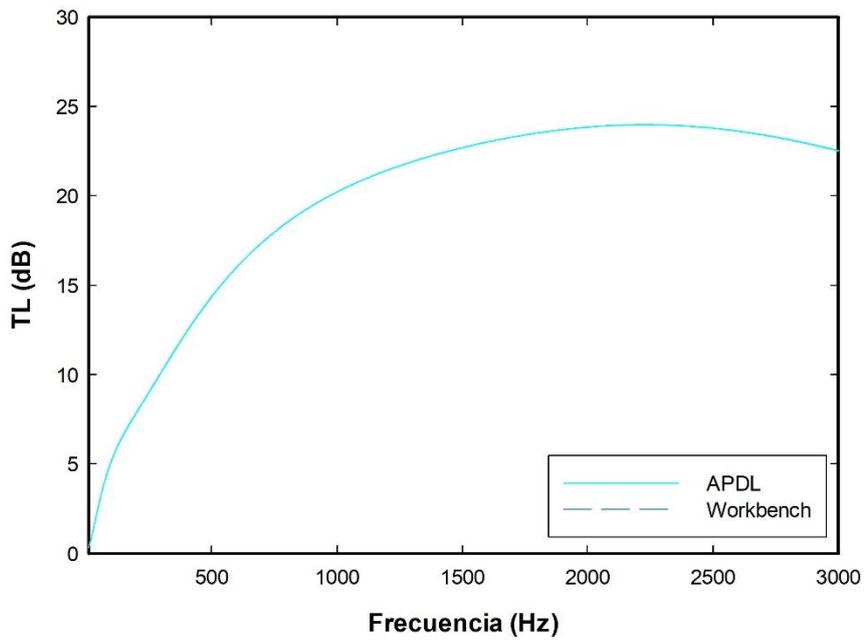
Gráfica 26. Comparación APDL vs Workbench. Caso 3c.



Gráfica 27. Comparación APDL vs Workbench. Caso 4a.



Gráfica 28. Comparación APDL vs Workbench. Caso 4b.



Gráfica 29. Comparación APDL vs Workbench. Caso 4c.