



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIERÍA
INDUSTRIAL VALENCIA

TRABAJO FIN DE MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE METODOLOGÍAS NUMÉRICAS DE CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ACÚSTICO DE CATALIZADORES DE MCIA MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS

AUTOR: DIEGO REVILLA ROMERO

TUTOR: FRANCISCO DAVID DENIA GUZMÁN

**Curso Académico:
2020 - 21**

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a mi familia y en especial a mis cuatro abuelos, ya que ellos siempre creyeron en mí y han sido una de las principales motivaciones para seguir adelante con mi formación.

A mis amigos, tanto de Lerma, Valladolid como Valencia, compañeros de clase y compañeros de piso.

A la Universidad Politécnica de Valencia por haberme brindado la oportunidad de cursar el Máster en Ingeniería Industrial.

Dentro de esta última, merece especial mención Francisco David Denia Guzmán, quien primero en la asignatura de "Vibraciones y Acústica" y ahora tutelando el presente TFM y mis prácticas en empresa se ha prestado en todo momento a compartir su conocimiento y tiempo.

RESUMEN

El presente Trabajo de Fin de Máster, dentro del extenso abanico de especialidades de la ingeniería, se enfoca en el campo de la acústica. Concretamente aborda el desarrollo e implementación de metodologías numéricas de caracterización del comportamiento acústico del catalizador de un motor de combustión interna alternativo (MCIA). No se realiza un estudio de las reacciones químicas que tienen lugar en su interior, a priori fin último de este equipo, sino que se estudia su comportamiento desde el punto de vista de la emisión de ruido, con el objetivo de mejorarlo en este sentido y, junto con el resto de los elementos de la línea de escape, lograr reducir considerablemente la contaminación acústica.

Como herramienta de modelización, simulación y análisis se ha utilizado el Método de los Elementos Finitos, en concreto el programa comercial Ansys en sus versiones APDL y Workbench 2020 R1. La principal hipótesis que se ha adoptado a la hora de modelizar el catalizador ha sido la sustitución del dominio del monolito por una matriz de transferencia. Esta relaciona las propiedades de la superficie de entrada con las propiedades de la superficie de salida atendiendo a modelos probados analítica y experimentalmente. Por lo tanto, se asume una propagación de ondas 3D en los conductos y 1D en el monolito.

Con el objetivo de analizar un amplio rango de configuraciones y comprender el efecto de cada una de las variables significativas del problema, se han tomado cuatro parámetros de estudio, entre los cuales se encuentran la geometría, la resistividad del monolito, la longitud de este y el efecto del descentrado entre los conductos de entrada y salida.

Los resultados obtenidos con la metodología implementada en este trabajo se han contrastado con resultados obtenidos en trabajos anteriores, que incluyen medidas experimentales en el laboratorio.

Palabras Clave: acústica, catalizador, Ansys APDL, Ansys Workbench, Método de los Elementos Finitos, pérdidas de transmisión (TL)

RESUM

El present Treball de Fi de Màster, dins de l'extens repertori d'especialitats de l'enginyeria, s'enfoca en el camp de l'acústica. Concretament aborda el desenvolupament i implementació de metodologies numèriques de caracterització del comportament acústic del catalitzador d'un motor de combustió interna alternatiu (MCIA). No es realitza un estudi de les reaccions químiques que tenen lloc al seu interior, a priori fi última d'aquest equip, sinó que s'estudia el seu comportament des del punt de vista de l'emissió de soroll, amb l'objectiu de millorar-lo en aquest sentit i, juntament amb la resta dels elements de la línia d'escapament, aconseguir reduir considerablement la contaminació acústica.

Com a eina de modelització, simulació i anàlisi s'ha utilitzat el Mètode dels Elements Finitos, en concret el programa comercial Ansys en les seues versions APDL i Workbench 2020 R1. La principal hipòtesi que s'ha adoptat a l'hora de modelitzar el catalitzador ha estat la substitució del domini del monòlit per una matriu de transferència. Aquesta relaciona les propietats de la superfície d'entrada amb les propietats de la superfície d'eixida considerant models provats analíticament i experimentalment. Per tant, s'assumeix una propagació d'ones 3D en els conductes i 1D en el monòlit.

Amb l'objectiu d'analitzar un ampli rang de configuracions i comprendre l'efecte de cadascuna de les variables significatives del problema, s'han pres quatre paràmetres d'estudi, entre els quals es troben la geometria, la resistivitat del monòlit, la longitud d'aquest i l'efecte del descentrat entre els conductes d'entrada i eixida.

Els resultats obtinguts amb la metodologia implementada en aquest treball s'han contrastat amb resultats obtinguts en treballs anteriors, que inclouen mesures experimentals al laboratori.

Paraules Clau: acústica, catalitzador, Ansys APDL, Ansys Workbench, Mètode dels Elements Finitos, pèrdues de transmissió (TL)

ABSTRACT

This Master's Thesis, within the wide range of engineering specialities, focuses on the field of acoustics. Specifically, it addresses the development and implementation of numerical methodologies for characterizing the acoustic behaviour of the catalyst of a reciprocating internal combustion engine (ICE). A study of the chemical reactions that take place in its interior is not carried out, this being a priori the ultimate goal of this equipment, but its behaviour is studied from the point of view of noise emission, with the aim of improving it in this sense and, together with the rest of the elements of the exhaust line, achieve a considerable reduction in noise pollution.

As a modelling, simulation and analysis tool, the Finite Element Method has been used, specifically the commercial package Ansys in its APDL and Workbench 2020 R1 versions. The main hypothesis that has been adopted when modelling the catalyst has been the substitution of the monolith domain by a transfer matrix. This relates the acoustic fields at the inlet port with those associated with the outlet port, based on analytically and experimentally tested models. Therefore, 3D wave propagation is assumed in the ducts while 1D acoustic fields are considered in the monolith.

In order to analyze a wide range of configurations and understand the effect of each of the significant variables of the problem, four study parameters have been taken into account, these being the geometry, the resistivity of the monolith, the length of the monolith and the effect of the offset between the inlet and outlet ducts.

The results obtained with the methodology implemented in this work have been benchmarked against results obtained in previous works, which include experimental measurements in the laboratory.

Keywords: acoustics, catalyst, Ansys APDL, Ansys Workbench, Finite Element Method, transmission loss (TL)

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	I
RESUMEN	III
RESUM.....	V
ABSTRACT	VII

1. MEMORIA

1. OBJETO Y ALCANCE DEL TRABAJO	23
2. JUSTIFICACIÓN Y ANTECEDENTES DEL TRABAJO.....	24
3. MOTIVACIÓN	25
4. INTRODUCCIÓN	26
4.1. El ruido y su control.....	26
4.2. El catalizador	28
5. FUNDAMENTOS DE ACÚSTICA EN DISPOSITIVOS DEL SISTEMA DE ESCAPE. APLICACIÓN A CATALIZADORES	31
5.1. Tipos de ondas.....	31
5.1.1. Ondas en función del movimiento de sus partículas	31
5.1.2. Ondas en función de la relación entre el sentido de propagación y la coordenada de desplazamiento	31
5.2. Características de la propagación de la onda sonora.....	31
5.3. Tipos de sonidos	32
5.3.1. Según la frecuencia	32
5.3.2. Según la longitud de onda.....	32
5.4. Medios de propagación.....	32
5.4.1. Aire	32
5.4.2. Líquidos	33
5.4.3. Sólidos	33
5.5. Ecuación de ondas.....	34
5.5.1. Ondas planas	34
5.5.2. Ondas esféricas.....	37
5.6. Intensidad y radiación de una onda	39

5.7.	Fenómenos de propagación de ondas	39
5.7.1.	Reflexión.....	40
5.7.2.	Transmisión	41
5.7.3.	Cambios de sección	42
5.7.4.	Transmisión del sonido en particiones.....	43
5.8.	Índice de pérdida de transmisión TL	44
6.	CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DE CATALIZADORES MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS.....	45
6.1.	Introducción al MEF	45
6.2.	Secuencia del MEF para realizar un cálculo	46
1)	Discretización del dominio	46
2)	Interpolación polinómica	47
3)	Planteamiento matricial y ensamblado.....	48
4)	Condiciones de contorno	48
5)	Transformación de coordenadas.....	48
6)	Resolución	49
6.3.	Aplicación del MEF al problema de estudio	49
7.	CASOS DE ESTUDIO.....	55
8.	METODOLOGÍA DE MODELIZACIÓN ACÚSTICA DE CATALIZADORES MEDIANTE ANSYS APDL Y ANSYS WORKBENCH.....	57
8.1.	Introducción	57
8.2.	ANSYS APDL.....	58
8.2.1.	Procedimiento para ejecutar el cálculo acústico a partir de macros	58
8.3.	ANSYS WORKBENCH.....	64
8.3.1.	Engineering Data	68
8.3.2.	Geometry.....	70
8.3.3.	Model	90
8.3.4.	Simulación y resultados.....	102
8.4.	Comparación de resultados entre ANSYS APDL y ANSYS WORKBENCH	104
8.5.	Comparación entre resultados obtenidos con el MEF y experimentales	105
8.6.	Conclusiones.....	106
9.	ANÁLISIS ACÚSTICO DE CATALIZADORES MEDIANTE LAS METODOLOGÍAS IMPLEMENTADAS .	107

9.1.	Introducción	107
9.2.	Efecto de la resistividad.....	107
9.3.	Efecto de la longitud del monolito	114
9.4.	Efecto del descentrado.....	118
9.5.	Efecto de la geometría	122
10.	CONCLUSIONES	124
11.	DESARROLLOS FUTUROS	126
12.	BIBLIOGRAFÍA	127

2. PRESUPUESTO

1.1.	Secciones del trabajo.....	131
1.2.	Amortización de los equipos utilizados.....	131
1.3.	Coste desglosado por secciones.....	132
1.4.	Coste total de ejecución del trabajo	135

3. PLANOS

1.	PLANO Nº1. Sección circular sin Offset	139
2.	PLANO Nº2. Sección circular con Offset.....	140
3.	PLANO Nº3. Sección rectangular sin Offset	141
4.	PLANO Nº4. Sección rectangular con Offset	142
5.	PLANO Nº5. Sección triangular sin Offset	143
6.	PLANO Nº6. Sección triangular con Offset.....	144

4. ANEXOS

ANEXO Nº 1: CÁLCULO DE LA MATRIZ DE TRANSFERENCIA MEDIANTE MATLAB	147
ANEXO Nº 2: MACROS APDL	152

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1. Niveles de presión sonora e intensidad acústica correspondiente para una serie de espacios y aplicaciones cotidianas	27
Imagen 2. Fuentes generadoras de ruido en una ciudad tipo	28
Imagen 3. Elementos de la línea de escape de un MCIA.....	28
Imagen 4. Estructura interna del monolito	29
Imagen 5. Representación esquemática del funcionamiento de un catalizador de dos vías	30
Imagen 6. Recepción de sonido directo vs sonido reflejado.....	40
Imagen 7. Reflexión y transmisión de ondas planas al atravesar un plano de separación.....	40
Imagen 8. Fenómenos de reflexión y transmisión en un cambio de sección	42
Imagen 9. Reflexión y transmisión en particiones	43
Imagen 10. Sistema continuo	45
Imagen 11. Sistema discreto	46
Imagen 12. Elementos bidimensionales dentro del MEF.....	47
Imagen 13. Triángulo de Pascal (Técnicas Computacionales en Ingeniería Mecánica, 2019)	48
Imagen 14. Modelado 3D conductos-1D monolito del catalizador monolítico	49
Imagen 15. Ejecución de ANSYS APDL mediante el Product Launcher	59
Imagen 16. Ventana de ANSYS APDL.....	59
Imagen 17. Interfaz de ANSYS APDL.....	60
Imagen 18. Comando para la lectura de la macro	61
Imagen 19. Selección de la macro a ejecutar en "Read input from..."	61
Imagen 20. Gráfica de resultados de APDL	62
Imagen 21. Mallado del modelo con sección rectangular sin offset en APDL	62
Imagen 22. Selección del módulo del postprocesador	63
Imagen 23. Introducción de una sentencia en la barra de comandos.....	63
Imagen 24. Lista de resultados generada.....	63
Imagen 25. Entorno de ANSYS WORKBENCH.....	65
Imagen 26. Componentes del Toolbox.....	66
Imagen 27. Espacio de trabajo "Project Schematic"	67
Imagen 28. Elección de las unidades de medida.....	68
Imagen 29. Lista de materiales en Engineering Data	68

Imagen 30. Propiedades de los materiales en Engineering Data.....	69
Imagen 31. Interfaz completa de Engineering Data.....	69
Imagen 32. Refresh project.....	70
Imagen 33. Selección del generador de geometría deseado desde la ventana de proyecto.....	70
Imagen 34. Espacio de trabajo de Design Modeler.....	71
Imagen 35. Definición de unidad de medida en Design Modeler.....	72
Imagen 36. Comando "New Sketch".....	72
Imagen 37. Compás o sistema de ejes coordenados.....	73
Imagen 38. Comando "Look at Face/Plane/Sketch" para trabajar de forma normal al elemento de trabajo.....	73
Imagen 39. Generación de circunferencia centrada en el origen de coordenadas en Design Modeler.....	74
Imagen 40. Creación de cotas y definición de geometría.....	74
Imagen 41. Parametrización de cotas.....	75
Imagen 42. Procedimiento para la variación de parámetros y actualización de bocetos.....	76
Imagen 43. Creación de línea recta coincidente con el eje vertical.....	77
Imagen 44. Creación de restricciones de coincidencia.....	77
Imagen 45. Resultado de la sección semicircular completamente definida.....	78
Imagen 46. Ventana de detalles de la extrusión.....	78
Imagen 47. Procedimiento para crear un nuevo plano sobre una cara ya existente.....	79
Imagen 48. Texto informativo sobre la información que necesita un comando para modificar la geometría de la manera deseada.....	80
Imagen 49. Selección del comando "Fillet" y especificación del radio de redondeo.....	81
Imagen 50. Generación de la segunda extrusión correspondiente a la entrada a la cámara del catalizador.....	82
Imagen 51. Extrusión a partir de una geometría ya creada.....	83
Imagen 52. Modelo 3D primitivo constituido por las cinco extrusiones que lo definen.....	84
Imagen 53. Lista de parámetros del modelo 3D (Catalizador con sección rectangular y 0.15 m de longitud de monolito).....	84
Imagen 54. Detalles del boceto que define la sección triangular de cámara del catalizador.....	85
Imagen 55. Generación de offset o descentrado de los conductos de entrada y salida.....	86
Imagen 56. Operación "Boolean" que permite unir varias extrusiones en un único cuerpo.....	87
Imagen 57. Ventana de detalles de la operación "Boolean" para la definición de esta operación.....	87

Imagen 58. Selección de las diferentes extrusiones que quieren agruparse en un único cuerpo mediante "Boolean"	88
Imagen 59. Modelo con conducto de entrada y entrada al catalizador unidos	88
Imagen 60. Modelo con las extrusiones agrupadas en tres cuerpos	89
Imagen 61. Unión de los cuerpos en un único "Part" para conseguir un mallado continuo	89
Imagen 62. Interfaz del módulo "Model"	90
Imagen 63. Árbol del módulo "Model"	91
Imagen 64. Definición del material constituyente de cada "Solid"	91
Imagen 65. Interfaz del módulo "Model" con el submódulo "Mesh" seleccionado	92
Imagen 66. Detalles del método de mallado	93
Imagen 67. Procedimiento para crear un "Sizing" en una dirección determinada	94
Imagen 68. Definición del "Sizing" que permita crear un único elemento longitudinal en la cámara del catalizador	94
Imagen 69. Definición del tamaño de elemento de malla	95
Imagen 70. Malla generada	95
Imagen 71. Detalles de la malla generada	96
Imagen 72. Creación de puertos	97
Imagen 73. Definición de un puerto	97
Imagen 74. Creación de la excitación acústica del tipo "Surface Velocity"	98
Imagen 75. Definición de la excitación acústica del tipo "Surface Velocity"	98
Imagen 76. Definición del "Radiation Boundary"	99
Imagen 77. Árbol del módulo "Model" después de definir las condiciones de contorno	99
Imagen 78. Creación de los puertos para definir la matriz de admitancia	100
Imagen 79. Creación de la matriz de admitancia	101
Imagen 80. Definición de los puertos de la matriz de admitancia y selección de entrada de datos tabulada	101
Imagen 81. Elementos de la matriz de admitancias introducidos	102
Imagen 82. Definición de los ajustes del análisis	102
Imagen 83. Selección del cálculo a realizar	103
Imagen 84. Definición de los puertos entre los que se debe realizar el cálculo	103
Imagen 85. Interfaz de "Model" con los resultados obtenidos	104
Imagen 86. Prototipo de catalizador en el banco de ensayos	106

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Comparación de los resultados obtenidos mediante APDL y WORKBENCH	105
Gráfica 2. Comparativa entre MEF y medidas experimentales.....	106
Gráfica 3. Efecto de las distintas resistividades para la sección rectangular con $L=0.075$ m.....	107
Gráfica 4. Efecto de las distintas resistividades para la sección rectangular con $L=0.15$ m.....	108
Gráfica 5. Efecto de las distintas resistividades para la sección rectangular con Offset con $L=0.075$ m	109
Gráfica 6. Efecto de las distintas resistividades para la sección rectangular con Offset con $L=0.15$ m	109
Gráfica 7. Efecto de las distintas resistividades para la sección triangular con $L=0.075$ m	110
Gráfica 8. Efecto de las distintas resistividades para la sección triangular con $L=0.15$ m	110
Gráfica 9. Efecto de las distintas resistividades para la sección triangular con Offset con $L=0.075$ m.....	111
Gráfica 10. Efecto de las distintas resistividades para la sección triangular con Offset con $L=0.15$ m.....	111
Gráfica 11. Efecto de las distintas resistividades para la sección circular con $L=0.075$ m	112
Gráfica 12. Efecto de las distintas resistividades para la sección circular con $L=0.15$ m	112
Gráfica 13. Efecto de las distintas resistividades para la sección circular con Offset con $L=0.075$ m	113
Gráfica 14. Efecto de las distintas resistividades para la sección circular con Offset con $L=0.15$ m	113
Gráfica 15. Efecto de la longitud del monolito para la sección Rectangular	114
Gráfica 16. Efecto de la longitud del monolito para la sección Rectangular con Offset.....	115
Gráfica 17. Efecto de la longitud del monolito para la sección Triangular	115
Gráfica 18. Efecto de la longitud del monolito para la sección Triangular con Offset.....	116
Gráfica 19. Efecto de la longitud del monolito para la sección Circular	116
Gráfica 20. Efecto de la longitud del monolito para la sección Circular con Offset.....	117
Gráfica 21. Efecto del descentrado (Offset) para la sección Rectangular.....	119
Gráfica 22. Efecto del descentrado (Offset) para la sección Triangular.....	120
Gráfica 23. Efecto del descentrado (Offset) para la sección Circular.....	121
Gráfica 24. Comparación de las distintas geometrías sin Offset.....	122
Gráfica 25. Comparación de las distintas geometrías con Offset	123

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros asociados a la medida experimental en banco de ensayos	105
Tabla 2. Desglose de tiempos del TFM.....	131
Tabla 3. Tasa horaria y amortización de equipos.....	132
Tabla 4. Costes Sección Nº 1	133
Tabla 5. Costes de electricidad Sección Nº1	133
Tabla 6. Costes Sección Nº2	133
Tabla 7. Costes de electricidad Sección Nº2	133
Tabla 8. Costes Sección Nº3	134
Tabla 9. Costes de electricidad Sección Nº3	134
Tabla 10. Costes Sección Nº4	135
Tabla 11. Costes de electricidad Sección Nº4	135
Tabla 12. Coste total del TFM.....	135

DOCUMENTO N° 1:

MEMORIA

1. OBJETO Y ALCANCE DEL TRABAJO

El presente Trabajo de Fin de Máster, con nombre “Desarrollo e implementación de metodologías numéricas de caracterización del comportamiento acústico de catalizadores de MCIa mediante elementos finitos” y realizado en colaboración con el Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales de la Universitat Politècnica de València, tiene como principal objetivo implementar una metodología de trabajo precisa y completa, basada en el Método de los Elementos Finitos, mediante la cual caracterizar acústicamente el comportamiento del catalizador de un motor de combustión interna alternativo.

Se ha descrito con detalle el procedimiento utilizado, a modo de manual con objetivo de servir como referencia en futuros trabajos.

Una vez desarrollada la metodología, se han caracterizado y analizado distintas configuraciones de catalizador para identificar los factores diferenciales del problema y determinar la configuración óptima desde el punto de vista de la atenuación de ruido.

Los resultados obtenidos se han contrastado con los resultados de trabajos e investigaciones anteriores, principalmente analíticos con softwares diferentes.

Finalmente, se ha realizado una valoración económica del presente trabajo, con el fin de poder cuantificar los gastos que supone realizar un trabajo de estas características teniendo en cuenta los recursos utilizados en el transcurso del mismo.

El software utilizado para implementar dicha metodología ha sido Ansys, tanto en su versión APDL como Workbench 2020 R1. Se trata de uno de los programas de referencia para realizar simulaciones de este tipo. Se ha realizado una comparación entre los resultados obtenidos mediante ambas versiones con el fin de verificar la validez de la metodología desarrollada. Además, la validación práctica de la modelización numérica se ha logrado mediante la comparación con resultados experimentales de otros trabajos del grupo de investigación (Denia, Ferrándiz, Martínez-Casas, Baeza, & Sánchez-Orgaz, 2021) anteriores. Para la generación de los datos de entrada a Ansys APDL y Workbench se ha utilizado Matlab R2019b. Por último, para la creación de los planos que definen las distintas geometrías de estudio se ha utilizado SolidWorks 2019.

2. JUSTIFICACIÓN Y ANTECEDENTES DEL TRABAJO

El presente Trabajo de Fin de Máster se sitúa dentro de una de las líneas de investigación del Centro de Investigación en Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica de Valencia. En los últimos años, este centro ha enfocado una parte considerable de sus recursos y tiempo a la simulación de problemas reales mediante elementos finitos. Por lo tanto, se va a trabajar en un entorno con profesionales de este ámbito, concretamente enfocados en el modelado y caracterización acústica de los componentes de la línea de escape de los MCIA.

Este centro de investigación ha desarrollado numerosas metodologías de modelado analítico-numérico del problema acústico de los elementos de la línea de escape, posteriormente centrándose en la optimización del coste computacional de estas. Sin embargo, las limitaciones inherentes a esta metodología acotan su aplicación a geometrías sencillas. (*Denia, Albelda, Fuenmayor, & Torregrosa, 2001*) (*Denia, Antebas, Selamet, & Pedrosa, 2011*).

Con el objetivo de eliminar estas restricciones geométricas, el grupo de investigación se ha enfocado en el uso de herramientas de elementos finitos. Estas últimas posibilitan el trabajo con casos más complejos, así como la incorporación de altas temperaturas, gradientes térmicos o flujo medio a los estudios. (*Antebas, Denia, Pedrosa, & Fuenmayor, 2013*) (*Sánchez-Orgaz, Denia, Martínez-Casas, & Baeza, 2014*). Cabe destacar también líneas de trabajo en modelos híbridos analítico-numéricos, que ofrecen reducciones significativas en el coste computacional cuando se trata de casos de elevada complejidad. (*Albelda, Denia, Torres, & Fuenmayor, 2007*).

Si bien es cierto que el elemento responsable de la atenuación acústica de una línea de escape es principalmente el silenciador, el resto de los componentes tienen una configuración tanto geométrica como constructiva que los hacen muy interesantes en este aspecto. Se han desarrollado modelos para la caracterización acústica de muchos de estos componentes. (*Juárez, 2020*) (*Munuera, 2019*) (*Pelayo, 2016*).

El problema del catalizador ha sido abordado en trabajos previos. En el desarrollo de estos trabajos se han utilizado los softwares de elementos finitos Comsol Multiphysics o Synoise. (*Pelayo, 2016*). Sin embargo, la Universidad Politécnica de Valencia y concretamente el centro de investigación han apostado recientemente por el software Ansys Workbench. Por lo tanto, el presente trabajo se enfoca en el modelado del catalizador mediante elementos finitos con este nuevo software.

Una de las principales hipótesis adoptadas en este trabajo es el modelo de propagación de ondas 3D en los conductos de entrada y salida y 1D en el monolito. En los trabajos previos que han abordado la problemática del catalizador, se ha probado que esta configuración ofrece mejores resultados que un modelo de propagación 3D en conductos y 3D en el monolito. Por lo tanto, en el presente trabajo se ha adoptado directamente el modelo 3D-1D.

3. MOTIVACIÓN

El oído es el sentido que más información proporciona al ser humano y a la gran mayoría de especies animales. No solo por medio del lenguaje, sino también a través de otros sonidos sin estructura lógica se pueden interpretar infinidad de situaciones. Por lo tanto, se pueden distinguir dos grandes categorías de sonidos; aquellos estructurados y que atienden a una serie de reglas preestablecidas como el lenguaje y la música y, por otro lado, aquellos que no atienden a ninguna regla y son conocidos como ruido.

Muchos de estos ruidos son necesarios, sobre todo en la vida de los animales, pero especialmente en núcleos urbanos e industriales, existe una cantidad desmedida de ruidos provenientes de infinidad de fuentes diferentes que convierten a estas atmósferas en lugares desagradables y dañinos para la salud. A esto se le conoce como contaminación acústica.

En la sociedad actual una gran fuente de ruido son los medios de transporte. Estos son propulsados principalmente a través de motores de combustión, que están compuestos por infinidad de partes móviles que generan un gran espectro de ruidos.

Toda esta problemática fue abordada de manera técnica y analítica en la asignatura “Vibraciones y acústica”, de 2º curso del Máster en Ingeniería Industrial (especialidad de Ingeniería Mecánica), incrementando mi interés hacia estos fenómenos. Por lo tanto, encontré en el presente título de TFM una oportunidad de aumentar mi conocimiento en este campo de la ingeniería, así como de contribuir a un planeta sostenible mediante el estudio de configuraciones de catalizadores que den lugar a una reducción de la contaminación acústica.

4. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, todos los ámbitos industriales están sujetos a unos estándares de calidad y sostenibilidad cada vez más exigentes. La conciencia con el medio ambiente es cada vez mayor, en medida que se buscan procesos más eficientes y que necesiten menos recursos naturales. Este impacto ambiental es conocido con un término muy amplio, contaminación. Este término abarca diferentes naturalezas como fuentes de dicha contaminación: atmosférica, hídrica, lumínica, visual, térmica, acústica, etc. (Pérez-Olivares, 2020).

En el presente trabajo es de especial interés lo relativo a la contaminación acústica, ya que el problema que se aborda es acústico.

Se conoce como contaminación acústica al exceso de sonido, debido a valores fuera de rango de alguna de sus propiedades (frecuencia, amplitud, timbre, velocidad o longitud de onda), provocado por actividades humanas que dan lugar a efectos negativos sobre la salud auditiva, física y mental de los seres vivos. Este exceso de sonido se conoce como ruido. (Wikipedia, 2020).

“No todo sonido es considerado contaminación sonora. La Organización Mundial de la Salud (OMS) define como ruido cualquier sonido superior a 65 decibelios (dB). En concreto, dicho ruido se vuelve dañino si supera los 75 dB y doloroso a partir de los 120 dB. En consecuencia, este estamento recomienda no superar los 65 dB durante el día e indica que para que el sueño sea reparador el ruido ambiente nocturno no debe exceder los 30 dB.” (Iberdrola, 2020).

4.1. El ruido y su control

El sonido es provocado por una perturbación de presión dentro de un medio elástico comprimible, normalmente por la vibración del propio medio. Esta perturbación es transmitida a los puntos en contacto con el punto de origen y así sucesivamente.

Debido al gran rango de presiones e intensidades de los sonidos que existen en el día a día, se utilizan escalas logarítmicas para la cuantificación, medida y control del sonido. La utilización de estas comprime los rangos de presión e intensidad y permite caracterizar los sonidos con valores numéricos manejables. Los valores proporcionados por estas escalas logarítmicas reciben el nombre de niveles sonoros y la unidad de medida es el decibelio (dB).

Existen 3 rangos de niveles sonoros:

- Nivel de intensidad sonora:

$$L_I = 10 \cdot \log\left(\frac{I}{I_{ref}}\right) [dB] \quad (1)$$

$$I_{ref} = 10^{-12} W/m^2 \quad (2)$$

- Nivel de potencia sonora:

$$L_W = 10 \cdot \log\left(\frac{Pot}{Pot_{ref}}\right) [dB] \quad (3)$$

$$Pot_{ref} = 10^{-12} W/m^2 \quad (4)$$

- Nivel de presión sonora:

$$L_p = 10 \cdot \log\left(\frac{P_{eff}}{P_{ref}}\right)^2 = 20 \cdot \log\left(\frac{P_{eff}}{P_{ref}}\right) [dB] \quad (5) \quad I_{ref} = 10^{-12} W/m^2 \quad (6)$$

En la siguiente *Imagen 1* se muestran gráficamente los niveles de intensidad sonora alcanzados por ciertas actividades, así como la presión acústica correspondiente.

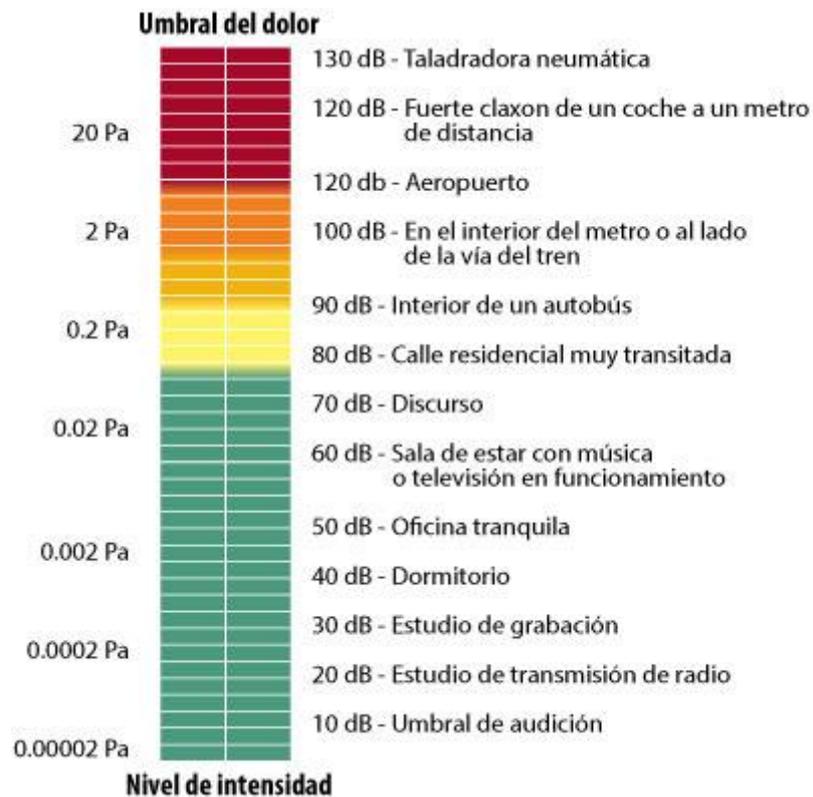


Imagen 1. Niveles de presión sonora e intensidad acústica correspondiente para una serie de espacios y aplicaciones cotidianas (<http://elfisicologo.blogspot.com/2013/02/sensacion-sonora.html>)

Puede observarse como la escala de presión sonora abarca desde los 0.00002 Pa, presión a partir de la cual el oído humano percibe sonido, hasta los 20 Pa, donde el sonido es doloroso y dañino para el organismo. 6 órdenes de magnitud, mientras que, con la utilización de la escala logarítmica, en dB, la escala se acota desde los 10 dB hasta los 130 dB, siendo mucho más manejable y práctica. Otra razón que justifica la utilización de estas escalas es que muchos estudios del oído humano han llegado a la conclusión de que este tiene un comportamiento subjetivo no lineal, guardando gran semejanza con la función logarítmica.

La principal fuente de ruido en las ciudades es el generado por el tráfico, concretamente por aquellos vehículos que utilizan como fuente de propulsión un motor de combustión interna, siendo este elemento el que mayor contribución tiene en el ruido generado. (Alfie & Salinas, 2017)

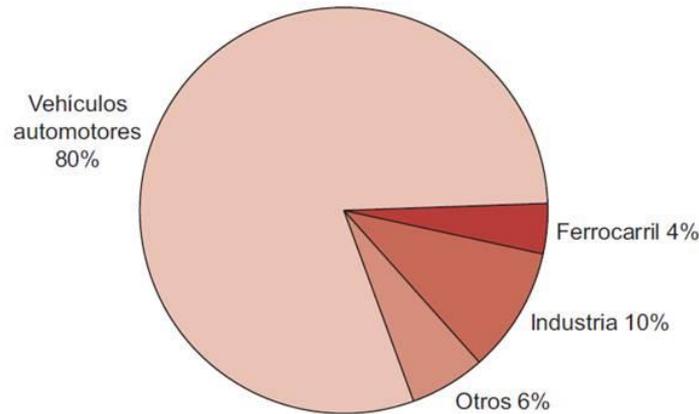


Imagen 2. Fuentes generadoras de ruido en una ciudad tipo (Alfie & Salinas, 2017)

4.2. El catalizador

Tanto los gases como los ruidos generados en el interior de un motor de combustión interna alternativo (MCIa a partir de ahora) son expulsados al exterior por medio de la línea de escape del motor. La línea de escape de un motor es un sistema muy complejo y sofisticado formado por un gran número de elementos, en la siguiente *Imagen 3* se muestra un esquema general de este sistema.

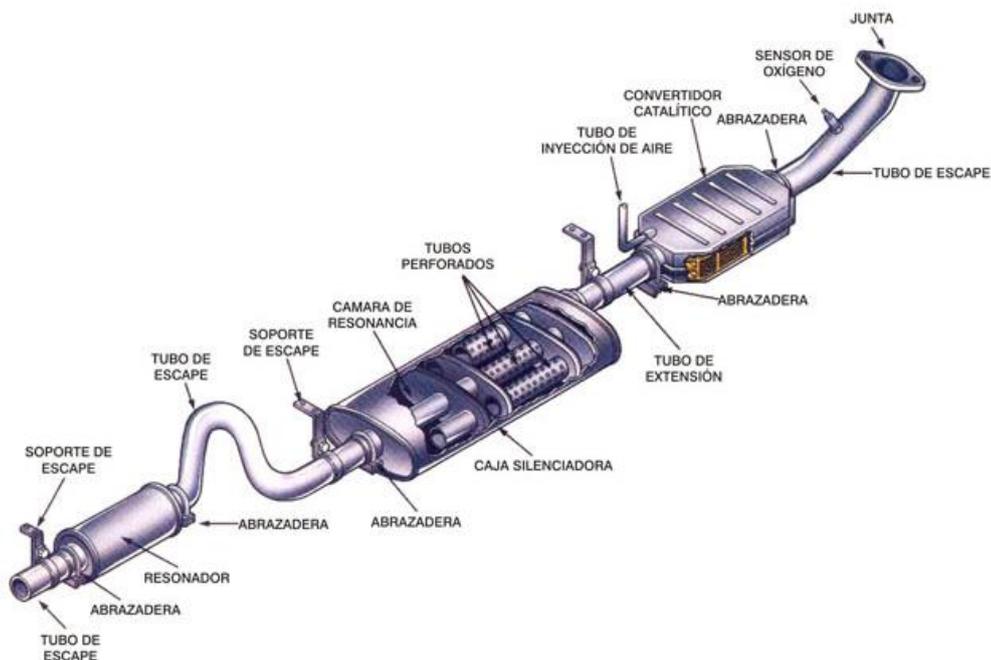


Imagen 3. Elementos de la línea de escape de un MCIa (<http://www.toyocosta.com/blog/sistema-de-escape-del-vehiculo/>)

En este trabajo se va a centrar la atención en el comportamiento (principalmente acústico) del catalizador, al que se hace referencia como “convertidor catalítico” en la *Imagen 3*.

El catalizador es un elemento que forma parte de la línea de escape de los motores de combustión interna, ya sean motores diésel o gasolina, cuyo principal objetivo es reducir la contaminación atmosférica provocada por los gases nocivos expulsados durante la combustión, utilizando para ello la técnica de la catálisis. Para que esta técnica tenga un rendimiento óptimo son necesarias temperaturas

de entre 400 y 700 °C. Esta es la justificación de que el catalizador sea el primer elemento en la línea de escape de un motor y más cercano al mismo

El principal elemento dentro de un catalizador (que en su parte exterior suele estar fabricado en acero inoxidable) es el monolito. El monolito es un relleno cerámico con una estructura formada por múltiples celdillas longitudinales, denominadas capilares, con diferentes configuraciones geométricas, es usual la de panel de abeja. La sección transversal de estos capilares es minúscula, llegando a alcanzar las 450 celdillas por pulgada cuadrada, lo que genera una superficie de contacto muy grande. Las superficies de contacto, cerámicas, son bañadas en una resina compuesta por elementos metálicos nobles, que son los catalizadores de las reacciones químicas; concretamente el Platino y el Paladio de las reacciones de oxidación y el Rodio de las reacciones de reducción. (*Mundo Motor, 2020*)

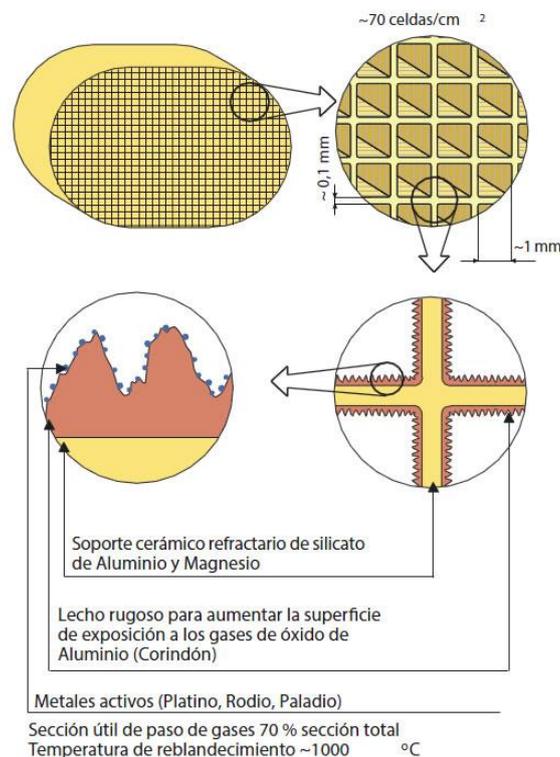


Imagen 4. Estructura interna del monolito

(http://www.guiautomotrizcr.com/Articulos/articulos_automotriz_conozca_El%20catalizador.php)

Existen tres tipos diferentes de catalizadores (*Mundo Motor, 2020*):

- **Catalizador de oxidación.** Es el más sencillo y por lo tanto más económico, pues solo realiza la reacción química de oxidación, por lo que el monolito está recubierto por Platino y Paladio. La reacción química que se lleva a cabo en su interior es la transformación del monóxido de carbono (CO) y de los hidrocarburos (HC) en CO₂ y H₂O.
- **Catalizador de dos vías.** Son los utilizados en los motores diésel, ya que estos trabajan con exceso de oxígeno, lo que da lugar a una gran presencia de óxidos de nitrógeno NO_x, necesitándose hacer mayor hincapié en la operación de reducción que transforma estos NO_x en N₂. Constan de dos monolitos, el primero encargado de realizar esta primera operación de

reducción y por lo tanto recubierto de Platino y Rodio, y un segundo, recubierto de Platino y Paladio, que realiza la operación de oxidación del CO y los HC en CO₂ y H₂O.

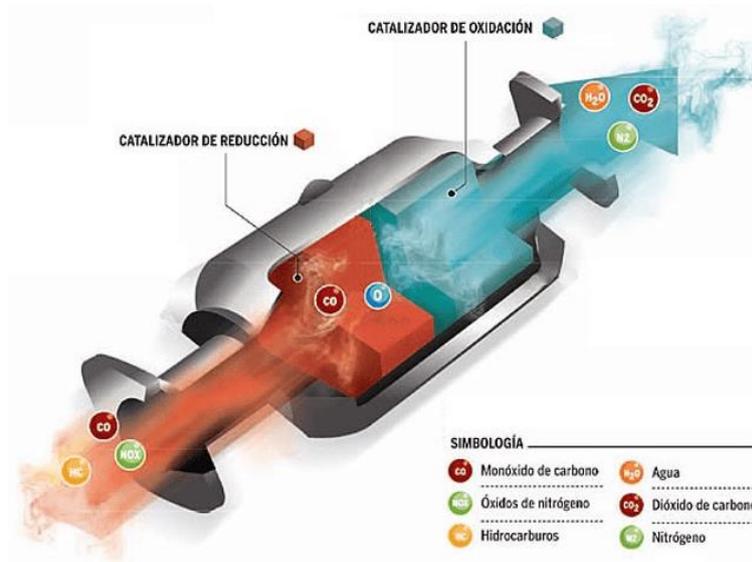


Imagen 5. Representación esquemática del funcionamiento de un catalizador de dos vías (<https://www.endado.com/blog/como-funciona-el-catalizador-del-coche/>)

- **Catalizador de tres vías.** Son los más complejos y caros del mercado, en un principio destinados a motores gasolina, caracterizados por trabajar con defecto de oxígeno, pero que en la actualidad se utilizan en motores diésel también. Constan de un único monolito, en el que se realizan simultáneamente las reacciones químicas de reducción y oxidación, por lo tanto, está recubierto por los tres metales nobles catalizadores: Platino, Rodio y Paladio.

La principal función del catalizador es esta, convertir las sustancias nocivas resultantes de la combustión interna de un motor en vapor de agua, nitrógeno y CO₂, sustancias mucho menos dañinas para el medio ambiente. Sin embargo, analizando la estructura interna de un catalizador, esa estructura cerámica compuesta por capilares es muy interesante desde el punto de vista de la disipación acústica. De esta forma, mediante una configuración adecuada y mediante el estudio de la propagación del sonido en el interior de estos conductos capilares, se puede optimizar el diseño de un catalizador para que, sin ser su función principal, complemente al silenciador y se logre una mayor disipación de ruido en la línea de escape del motor, disminuyendo así la contaminación acústica. Este segundo propósito del catalizador va a ser el que se va a estudiar y analizar en detalle en el presente trabajo.

5. FUNDAMENTOS DE ACÚSTICA EN DISPOSITIVOS DEL SISTEMA DE ESCAPE. APLICACIÓN A CATALIZADORES

5.1. Tipos de ondas

Las ondas sonoras admiten principalmente dos tipos de clasificación, en función del movimiento de sus partículas y en función de la relación entre el sentido de la propagación y la coordenada de desplazamiento. (*Denia, La ecuación de ondas, 2019*).

5.1.1. Ondas en función del movimiento de sus partículas

- **Ondas longitudinales.** El movimiento de cualquier partícula afectada por la transmisión de la vibración se efectúa en la misma dirección en la que se propaga la onda.
- **Ondas transversales.** El movimiento de la partícula es perpendicular a la dirección en la que se está propagando la onda. Este tipo de ondas solo pueden propagarse en medios que admitan tensiones tangenciales, por lo que únicamente aparecen en medios sólidos.

5.1.2. Ondas en función de la relación entre el sentido de propagación y la coordenada de desplazamiento

- **Ondas progresivas.** La propagación de la onda se da en el sentido creciente de la coordenada x . Estas ondas quedan representadas por la siguiente función f :

$$f(c \cdot t - x)$$

- **Ondas regresivas.** La propagación de la onda se da en el sentido decreciente de la coordenada x . Estas ondas quedan representadas por la siguiente función g :

$$g(c \cdot t + x)$$

El campo sonoro total es la combinación de ambas soluciones, ya que en la gran mayoría de los casos una onda progresiva va acompañada de otra regresiva. Existe un caso particular dentro de esta clasificación:

- **Ondas estacionarias.** La combinación de onda progresiva y regresiva da lugar a una onda en la que no existe transmisión neta de energía. Se trata de un caso particular de amplitud y frecuencia.

5.2. Características de la propagación de la onda sonora

La propagación de la onda sonora afecta a diversas propiedades físicas: presión, densidad, velocidad de movimiento de las partículas, etc. Esta propagación no se efectúa a una velocidad aleatoria, si no que queda definida por cada medio en particular, se denomina velocidad característica del medio y se representa mediante c . La caracterización de las principales propiedades físicas que definen la propagación sonora atiende a las siguientes expresiones (*Denia, La ecuación de ondas, 2019*):

$$p_T = p_0 + p \quad (p \ll p_0) \tag{7}$$

$$\rho_T = \rho_0 + \rho \quad (\rho \ll \rho_0) \tag{8}$$

$$u_T = u_0 + u \quad (9) \quad \text{Si no existiese flujo medio, } u_0 = 0$$

El subíndice T denota un valor total, el 0 denota el valor medio y el término sin subíndice se refiere a la perturbación acústica.

5.3. Tipos de sonidos

Los sonidos se clasifican atendiendo a dos de sus características fundamentales: la frecuencia (f) y la longitud de onda (λ). Estas dos propiedades están vinculadas matemáticamente por la siguiente expresión (Denia, La ecuación de ondas, 2019):

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (10)$$

5.3.1. Según la frecuencia

- Infrasonidos \rightarrow (0 Hz < f < 20 Hz)
- Sonidos audibles \rightarrow (20 Hz < f < 20000 Hz)
- Ultrasonidos \rightarrow (f > 20000 Hz)

5.3.2. Según la longitud de onda

Todas las longitudes de onda tomadas como referencia para esta clasificación toman como base de cálculo la velocidad característica del medio aire, $c = 340$ m/s. Los diferentes sonidos atendiendo a este criterio quedan clasificados como:

- Infrasonidos \rightarrow (17 m < λ)
- Sonidos audibles \rightarrow (0.017 m < λ < 17 m)
- Ultrasonidos \rightarrow (λ < 0.017 m)

5.4. Medios de propagación

El medio de propagación es el soporte o medio elástico que alberga la perturbación de presión provocando su vibración, dando lugar al sonido. Este medio puede ser sólido, líquido o gaseoso. En el caso de estudio del catalizador el medio es del último tipo, concretamente aire (Denia, La ecuación de ondas, 2019).

5.4.1. Aire

Los valores típicos del aire de las propiedades principales de los gases como medio de propagación son: $\rho_0 = 1.204$ kg/m³, $p_0 = p_{\text{atm}} = 101325$ Pa, $c_p = 1005$ J/(kg°C), $\mu = 1.82 \cdot 10^{-5}$ Pa · s y $k = 0.0257$ W/(°C·m).

La ecuación de estado de los gases perfectos establece la siguiente relación entre distintas propiedades fundamentales de un gas:

$$\rho_T = \frac{p_T \cdot M_m}{R \cdot T} \quad (11)$$

Con:

- $R = 8.314 \text{ J / (K} \cdot \text{mol)}$
- $M_m = 0.02897 \text{ kg/mol}$
- $p_T \approx p_0 = 101325 \text{ Pa}$

A la hora de determinar la velocidad del sonido se asume la hipótesis de que el proceso es adiabático:

$$p_T = \alpha \cdot \rho_T^\gamma \quad (12)$$

$$c^2 = \left(\frac{dp_T}{d\rho_T} \right)_{adiabat} = \frac{\gamma \cdot p_T}{\rho_T} \approx \frac{\gamma \cdot p_0}{\rho_0} \quad (13)$$

Resultando:

$$c = \sqrt{\frac{\gamma \cdot p_0}{\rho_0}} = \sqrt{\frac{\gamma \cdot R \cdot T}{M_m}} \quad (14)$$

- $\gamma = 1.4$

5.4.2. Líquidos

La velocidad del sonido en este tipo de medios queda determinada por las propiedades elásticas e inerciales del mismo:

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho_0}} \text{ siendo } K = - \frac{dp_T}{dV/V} \approx - \frac{dp_0}{d\rho_0/\rho_0} \quad (15)$$

Siendo los valores típicos para agua a 20 °C:

- $K = 2.2 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$
- $\rho_0 = 998 \text{ kg/m}^3$

5.4.3. Sólidos

En el caso particular de medios sólidos es necesario hacer una distinción entre dos ondas que se suceden en un medio homogéneo tridimensional: una onda primaria o longitudinal (c_p) y una onda secundaria o transversal (c_s). Las expresiones que caracterizan a cada una de estas ondas son las siguientes:

$$c_p = \sqrt{\frac{E \cdot (1 - \nu)}{\rho_0 \cdot (1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}} \quad (16)$$

$$c_s = \sqrt{\frac{G}{\rho_0}} \quad (17)$$

Sin embargo, si se trata de un sólido con una dimensión considerablemente mayor que las otras dos, como es el caso de cables, vigas, carriles, etc. se obtiene una expresión simplificada de la expresión de la onda primaria, ya que la secundaria o transversal no se considera al ser la dirección longitudinal la única que se tiene en cuenta:

$$c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho_0}} \quad (18)$$

5.5. Ecuación de ondas

El principal criterio para clasificar las ondas sonoras es la forma en la que se propagan estas, esta forma de propagación está directamente vinculada con el frente de onda. El frente de onda es el lugar geométrico que une todos los puntos de una excitación sonora que pertenecen al mismo estado de vibración, están en fase. Existen tres tipos diferentes de onda: ondas planas o unidimensionales, ondas cilíndricas o bidimensionales y ondas esféricas o tridimensionales (*Denia, La ecuación de ondas, 2019*).

- **Ondas planas o unidimensionales.** La onda sonora se propaga en una única dirección, dando lugar a un conjunto de frentes de onda paralelos que son perpendiculares a la dirección de propagación de la onda. Por lo tanto, la onda depende únicamente de una coordenada longitudinal (x) y del tiempo (t).
- **Ondas cilíndricas o bidimensionales.** La onda se propaga en un plano en vez de en una dirección a partir del punto origen de la perturbación, llamado foco, lo que genera ondas circulares alrededor de este punto, concéntricas. En este caso la onda depende del radio desde el foco (r) y del tiempo (t).
- **Ondas esféricas o tridimensionales.** La onda no se propaga únicamente en una dirección o en un plano, sino que lo hace en las 3 dimensiones. Esto da lugar a ondas esféricas concéntricas en el foco de la perturbación. Estas ondas dependen también del radio desde el foco (r) y del tiempo (t).

El fenómeno de la propagación de las ondas sonoras puede expresarse de forma matemática con la combinación de diferentes principios físicos que gobiernan el comportamiento de estas perturbaciones.

5.5.1. Ondas planas

Las ondas planas o unidimensionales representan el caso más sencillo y la ecuación de ondas que representa su comportamiento es el resultado de la combinación de las ecuaciones de la dinámica, la de continuidad o conservación de masa y la ley fundamental de los gases como ecuación de estado.

5.5.1.1. Deducción de la ecuación

- De la ecuación de la dinámica:

Se parte de la ecuación de Navier-Stokes (Euler):

$$-\frac{\partial p}{\partial x} dx dS = \rho_T dx dS \frac{du_T}{dt} \rightarrow -\frac{\partial p}{\partial x} = \rho_T \frac{du_T}{dt} \quad (19)$$

Que linealizada queda de la siguiente manera:

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} \quad (20)$$

- De la ecuación de continuidad:

$$\left(\left(\rho_T u + \frac{\partial \rho_T u}{\partial x} dx \right) - \rho_T u \right) dS = -\frac{\partial \rho_T}{\partial t} dx dS \quad (21)$$

Una vez linealizada:

$$\rho_0 \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{\partial p}{\partial t} \quad (22)$$

- De la ecuación de estado:

$$p_T = p_T(\rho_T) \quad (23)$$

Una vez linealizada:

$$p = \frac{d p_T}{d \rho_T} \rho = c^2 \rho \quad (24)$$

Utilizando estas 3 ecuaciones linealizadas, (25) (26) y (27) como punto de partida, se combinarán y realizarán operaciones matemáticas con la siguiente secuencia:

1. Se introduce la ecuación de estado, (28), en la ecuación de continuidad, (29), obteniéndose:

$$\rho_0 \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (30)$$

2. A continuación, se deriva la expresión obtenida, (31), respecto del tiempo:

$$\rho_0 \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (32)$$

3. El siguiente paso consiste en calcular la derivada parcial respecto de x de la ecuación de la dinámica, (33):

$$-\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \rho_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t \partial x} \quad (34)$$

4. Por último, se combinan las ecuaciones obtenidas en los pasos 2, (35), y 3, (36). La expresión obtenida es la ecuación de ondas:

$$\boxed{\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}} \quad (37)$$

En el caso de que la velocidad del medio de propagación no sea nula ($u_0 \neq 0$), se obtiene la ecuación de ondas convectiva:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{D^2 p}{Dt^2} \rightarrow \left(1 - \frac{u_0^2}{c^2} \right) \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \frac{2 u_0}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial x \partial t} \quad (38)$$

Para obtener esta expresión es necesario aplicar la derivada total o convectiva, que tiene la siguiente forma:

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u_0 \frac{\partial}{\partial x} \quad (39)$$

4.5.1.2. Solución de la ecuación

La solución de la ecuación de ondas planas, para el caso particular de $u_0 = 0$, tiene la siguiente forma:

$$p(x, t) = f(ct - x) + g(ct + x) \quad (40)$$

La solución más importante a esta ecuación es de naturaleza armónica y utiliza dos propiedades características de la acústica:

- La frecuencia angular: $\omega = 2 \pi f = \frac{2 \pi}{T} \text{ [rad/s]} \quad (41)$

- El número de onda: $k = \frac{\omega}{c} = \frac{2 \pi}{\lambda} \text{ [m}^{-1}\text{]} \quad (42)$

Y se escribe de la siguiente manera:

$$p(x, t) = A \cos(\omega t - kx + \varphi_1) + B \cos(\omega t + kx + \varphi_2) \quad (43)$$

Es más cómodo y usual utilizar esta expresión con notación compleja:

$$p(x, t) = A e^{j(\omega t - kx + \varphi_1)} + B e^{j(\omega t + kx + \varphi_2)} = \hat{A} e^{j(\omega t - kx)} + \hat{B} e^{j(\omega t + kx)} \quad (44)$$

Esta expresión se utiliza aún más simplificada, haciendo uso de las llamadas amplitudes de onda complejas: $\hat{A} = A e^{j\varphi_1}$ y $\hat{B} = B e^{j\varphi_2}$ y omitiendo la dependencia temporal. La expresión simplificada queda de la siguiente forma:

$$p(x) = \hat{A} e^{-jkx} + \hat{B} e^{jkx} \quad (45)$$

Esta expresión, en la que la ecuación de ondas está expresada en función de la presión acústica es la más usual, pero también puede encontrarse en función de otras variables características:

- **Ecuación de ondas en función de la velocidad.**

$$u(x) = \frac{1}{Z_0} (\hat{A} e^{-jkx} - \hat{B} e^{jkx}) \quad (46)$$

Donde:

- $Z_0 = \rho_0 c$ se conoce como impedancia característica del medio y se utilizará de esta forma de aquí en adelante.

- **Ecuación de ondas en función del desplazamiento.**

$$\xi(x) = \frac{1}{j \omega Z_0} (\hat{A}e^{-jkx} - \hat{B}e^{jkx}) \quad (47)$$

- **Condensación o compresión.**

$$\theta(x) = \frac{1}{\rho_0 c^2} (\hat{A}e^{-jkx} + \hat{B}e^{jkx}) \quad (48)$$

Los valores instantáneos de cada una de las variables se corresponden con la parte real de estas expresiones.

4.5.2. Ondas esféricas

En este caso se asume que la perturbación acústica se propaga en tres dimensiones. Por lo tanto, es necesario utilizar las ecuaciones de partida utilizadas en el caso de ondas planas, pero formuladas para el caso 3D. El resultado es el siguiente:

$$\Delta p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (49)$$

Tomando un sistema de coordenadas esféricas y asumiendo que el campo acústico no depende de la coordenada polar (θ) ni de la azimutal (φ), es decir, ante una fuente emisora del tipo radiador sonoro (caso más frecuente), la expresión queda de la siguiente forma:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (50)$$

Como la variable r no depende del tiempo, se puede definir una función h como: $h = p \cdot r$, resultando la expresión anterior, (51), de la siguiente manera:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial r^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 h}{\partial t^2} \quad (52)$$

Esta nueva ecuación se puede resolver de manera idéntica a la que se ha resuelto la expresión genérica de onda plana. La solución tiene una componente progresiva y otra regresiva:

$$p(r, t) \cdot r = f(ct - r) + g(ct + r) \rightarrow p(r, t) = \underbrace{\frac{1}{r} f(ct - r)}_{\text{Comp progresiva}} + \underbrace{\frac{1}{r} g(ct + r)}_{\text{Comp regresiva}} \quad (53)$$

La primera componente de la expresión (54) representa una onda generada en el origen de la perturbación y que se va alejando de la misma a la velocidad característica del medio de propagación, c . La segunda componente hace referencia a una onda que se expande aproximándose hacia el origen de la perturbación. Esta segunda componente, la regresiva, tiene poco interés desde el punto de vista de la acústica y en la gran mayoría de los problemas es omitida.

En ambas componentes de la onda esférica la amplitud de onda disminuye al aumentarse la coordenada radial, r , ya que cuanto mayor es esta dimensión mayor es la superficie en la que se distribuye la onda y la energía de esta se tiene que distribuir en mayor espacio.

4.5.2.1. Ondas esféricas armónicas

El campo de presión de una onda esférica progresiva armónica queda definido de la siguiente manera:

$$p(r, t) = \hat{p} = \frac{\hat{A}}{r} e^{j(\omega t - kr)} \quad (55)$$

Estas ondas, al igual que las planas, pueden caracterizarse también con la velocidad, el desplazamiento y la condensación:

$$u(r, t) = \hat{u} = \left(\frac{1}{r} + jk\right) \frac{\hat{p}}{j\omega\rho_0} \quad (56)$$

$$\xi(r, t) = \hat{\xi} = -\left(\frac{1}{r} + jk\right) \frac{\hat{p}}{\omega^2 \rho_0} \quad (57)$$

$$\theta(r, t) = \hat{\theta} = \frac{\hat{p}}{\rho_0 c^2} \quad (58)$$

El valor instantáneo de cada una de estas propiedades se corresponde con la parte real de las expresiones anteriores.

En las ondas esféricas la velocidad está desfasada con respecto a la presión, por lo tanto, la impedancia resulta:

$$\hat{z} = \frac{\hat{p}}{\hat{u}} = \frac{j \omega \rho_0}{\left(\frac{1}{r} + jk\right)} = \rho_0 c \frac{kr(kr + j)}{1 + k^2 r^2} = \rho_0 c \frac{kr}{\sqrt{1 + k^2 r^2}} e^{j\beta} \quad (59)$$

Descomponiendo la impedancia en parte real e imaginaria:

$$\hat{z} = \rho_0 c \frac{k^2 r^2}{1 + k^2 r^2} + j\rho_0 c \frac{kr}{1 + k^2 r^2} \quad (60)$$

- **Número de Helmholtz.** El producto $k \cdot r$ es conocido como número de Helmholtz y su uso es bastante común en acústica.

Cabe destacar que, si el número de Helmholtz es grande, la parte real de la expresión anterior tiende a $\rho_0 c$, mientras que la parte imaginaria tiende a 0. Por lo tanto, se concluye que a medida que una onda esférica se aleja de la fuente, tiende a comportarse como una onda plana. A una distancia de la fuente considerable ($k^2 r^2 \gg 1$), la presión y la velocidad quedan definidas como:

$$p(r, t) = \frac{A}{r} \cos(\omega t - kr) \quad (61)$$

$$u(r, t) \approx \frac{A}{\rho_0 c r} \cos(\omega t - kr) = \frac{p(r, t)}{\rho_0 c} \quad (62)$$

A este caso particular se le conoce como condición de campo lejano.

5.6. Intensidad y radiación de una onda

La expresión que permite calcular la intensidad de la onda sonora generada por una fuente que genera ruido de manera isótropa con una determinada potencia, Pot , es (Denia, *La ecuación de ondas*, 2019):

$$I = \frac{Pot}{S} \quad (63)$$

Donde S es la superficie del campo en el que se propaga la perturbación. Los casos más habituales son un campo libre, es decir una superficie de propagación esférica ($S = 4 \pi r^2$) y una superficie reflectante, es decir una superficie de propagación semiesférica ($S = 2 \pi r^2$).

La intensidad puede calcularse también como el producto de presión y velocidad acústicas, $I = p \cdot u$

Para una onda esférica divergente a lo largo de un periodo, la intensidad queda expresada como:

$$\bar{I} = \frac{1}{2} \frac{A^2}{\rho_0 c r^2} \quad (64)$$

El cociente entre A y r es el valor pico de presión, $P = \frac{A}{r}$, por lo que:

$$\bar{I} = \frac{P^2}{2 \rho_0 c} \quad (65)$$

Esta expresión también es utilizable en el contexto de ondas planas, con la salvedad que en este nuevo caso el valor eficaz de presión atiende a la siguiente relación:

$$P_{eff} = \frac{A}{\sqrt{2} r} = \frac{P}{\sqrt{2}} \quad (66)$$

Por lo tanto, la expresión general de la intensidad media de una onda sonora cualquiera a lo largo de un periodo queda definida como:

$$\bar{I} = \frac{1}{2} \frac{A^2}{\rho_0 c r^2} = \frac{P_{eff}^2}{\rho_0 c} \quad (67)$$

5.7. Fenómenos de propagación de ondas

Una fuente sonora emite un sonido de manera directa que, si no encuentra obstáculos en su camino (diferentes medios de propagación o discontinuidades de temperatura o geometría), llega al receptor sin alteración ninguna. Sin embargo, cuando la onda se topa con alguna de estas discontinuidades aparecen otras componentes de onda (Denia, *Fenómenos de propagación*, 2019).

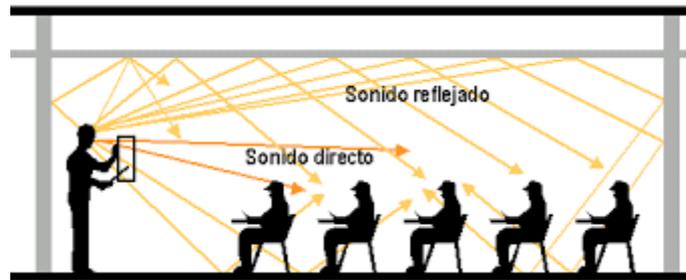


Imagen 6. Recepción de sonido directo vs sonido reflejado (<https://www.centroauditivo-valencia.es/sonido-directo-reverberaci%C3%B3n-distancia-critica/>)

Los fenómenos más comunes en acústica, y que a la vez son los que van a aparecer en el problema estudiado en el presente trabajo son los siguientes:

5.7.1. Reflexión

Este fenómeno aparece cuando una onda pasa de un medio de propagación a otro diferente. Un medio de propagación se diferencia de otro por tener diferente impedancia característica ($Z = \rho * c$), la sección en la que se produce el cambio recibe el nombre de plano de separación.

Se va a utilizar el caso de una onda progresiva para explicar el fenómeno de reflexión. La siguiente *Imagen 7*, en la que p_i representa la presión sonora de la onda incidente, p_r de la onda reflejada y p_t de la onda transmitida, representa la problemática del fenómeno:

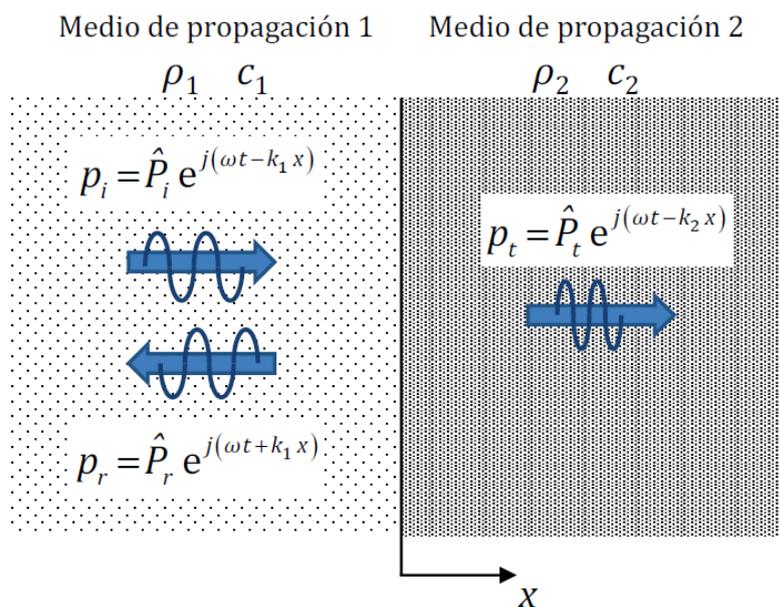


Imagen 7. Reflexión y transmisión de ondas planas al atravesar un plano de separación (Denia, Fenómenos de propagación, 2019)

Cuando una onda progresiva atraviesa un plano de separación resultan 3 ondas diferentes, la onda incidente original (progresiva), una onda reflejada que vuelve al medio 1 (regresiva) y una onda transmitida que se propaga por el medio 2 (progresiva). Las tres ondas se caracterizan por tener la misma frecuencia (ω). Sin embargo, el número de onda de la onda transmitida (k_2) es diferente del

número de onda de las ondas incidente y reflejada (k_1), al depender esta propiedad de las características del medio de propagación (concretamente de la velocidad característica).

En el plano de separación (tomado como origen de coordenadas, $x = 0$) entre el medio de propagación 1 y el medio de propagación 2 se cumplen 2 continuidades: continuidad de presión ($p_1 = p_2$) y continuidad de velocidad ($u_1 = u_2$).

Utilizando las expresiones que caracterizan la velocidad y presión acústica vistas anteriormente y aplicando las condiciones de continuidad de presión y velocidad en el plano de separación $x = 0$, se tiene:

$$p_1 = p_2 \rightarrow \hat{P}_i + \hat{P}_r = \hat{P}_t \quad (68) \quad u_1 = u_2 \rightarrow \frac{\hat{P}_i - \hat{P}_r}{Z_1} = \frac{\hat{P}_t}{Z_2} \quad (69)$$

El coeficiente de reflexión (R) queda definido como el cociente entre la presión acústica de la onda reflejada y la de la onda incidente:

$$R = \frac{\hat{P}_r}{\hat{P}_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (70)$$

Es más habitual trabajar con energía acústica. La intensidad activa media de una onda armónica viene definida por la expresión: $\bar{I} = |\hat{P}|^2 / (2\rho c)$. Esta metodología da lugar al coeficiente de reflexión de potencia α_r :

$$\alpha_r = \frac{\overline{Pot}_r}{\overline{Pot}_i} = \frac{\bar{I}_r}{\bar{I}_i} = \left| \frac{\hat{P}_r}{\hat{P}_i} \right|^2 = \left| \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right|^2 = |R|^2 \quad (71)$$

Cabe destacar que este coeficiente no depende del orden de los medios de propagación.

5.7.2. Transmisión

Este fenómeno hace referencia a la otra onda generada en la *Imagen 7*, en este caso a la onda transmitida que se propaga por el segundo medio de propagación. El coeficiente de transmisión (T) que es el cociente entre la presión acústica de la onda transmitida y la onda incidente resulta:

$$T = \frac{\hat{P}_t}{\hat{P}_i} = \frac{2 Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (72)$$

Trabajando en términos de energía acústica se tiene el coeficiente de transmisión de potencia α_t :

$$\alpha_t = \frac{\overline{Pot}_t}{\overline{Pot}_i} = \frac{\bar{I}_t}{\bar{I}_i} = \frac{|\hat{P}_t|^2 / (2\rho_2 c_2)}{|\hat{P}_i|^2 / (2\rho_1 c_1)} = |T|^2 \frac{Z_1}{Z_2} = 4 \frac{Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (73)$$

Desde el punto de vista de la conservación de la energía, la potencia refleja más la potencia transmitida debe ser igual a la potencia de la onda incidente. En términos de intensidad y de coeficientes de transmisión y reflexión se tiene:

$$\bar{I}_i = \bar{I}_r + \bar{I}_t \quad (74)$$

$$\alpha_t = 1 - \alpha_r \quad (75)$$

5.7.3. Cambios de sección

En un cambio de sección aparecen los dos fenómenos de reflexión y transmisión comentados previamente, esta discontinuidad geométrica es habitual en aplicaciones de automoción para lograr disipación acústica. Está presente en el caso de estudio del catalizador que se abordará en el transcurso de este trabajo. La siguiente *Imagen 8* representa con claridad esta problemática:

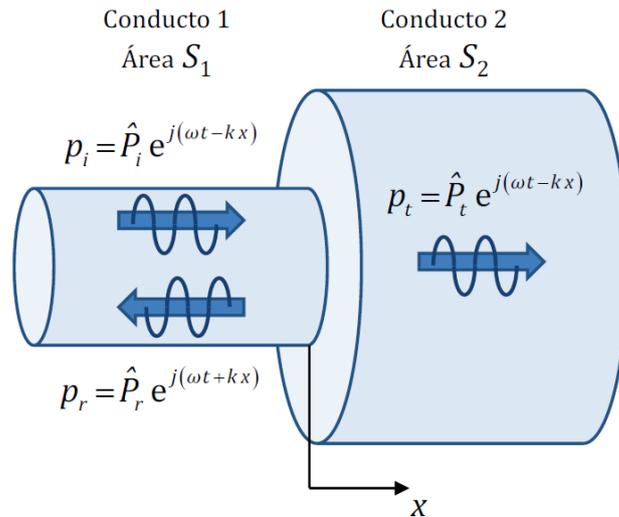


Imagen 8. Fenómenos de reflexión y transmisión en un cambio de sección (Denia, Fenómenos de propagación, 2019)

En el plano de separación (que se tomará como $x = 0$) aparece una continuidad de presión y una continuidad de flujo másico acústico:

$$p_1 = p_2 \rightarrow \hat{P}_i + \hat{P}_r = \hat{P}_t \quad (76)$$

$$\rho_0 u_1 S_1 = \rho_0 u_2 S_2 \rightarrow \rho_0 \frac{\hat{P}_i - \hat{P}_r}{Z_0} S_1 = \rho_0 \frac{\hat{P}_t}{Z_0} S_2 \rightarrow (\hat{P}_i - \hat{P}_r) S_1 = \hat{P}_t S_2 \quad (77)$$

- **Coefficiente de reflexión.** Por tanto, el coeficiente R en este caso viene dado por:

$$R = \frac{\hat{P}_r}{\hat{P}_i} = \frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} \quad (78)$$

Y el coeficiente de reflexión de potencia asociado:

$$\alpha_r = R^2 = \left(\frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} \right)^2 \quad (79)$$

- **Coefficiente de transmisión.** El coeficiente T viene dado por la expresión:

$$T = \frac{\hat{P}_t}{\hat{P}_i} = \frac{2 S_1}{S_1 + S_2} \quad (80)$$

Y el coeficiente de transmisión de potencia asociado:

$$\alpha_t = T^2 \frac{S_2}{S_1} = \frac{4 S_1 S_2}{(S_1 + S_2)^2} \quad (81)$$

5.7.4. Transmisión del sonido en particiones

Un caso de aplicación en muchas configuraciones prácticas es el de una onda sonora atravesando 3 medios de propagación diferentes. Este es el caso de la configuración que se va a estudiar en el catalizador, constituido por tres núcleos: el primero de aire, el segundo del material absorbente del monolito y el último de aire también. Al atravesar una configuración con estos tres medios diferentes se sucederán los fenómenos de reflexión y transmisión que han sido explicados en detalle previamente y que se resumen en la siguiente *Imagen 9*:

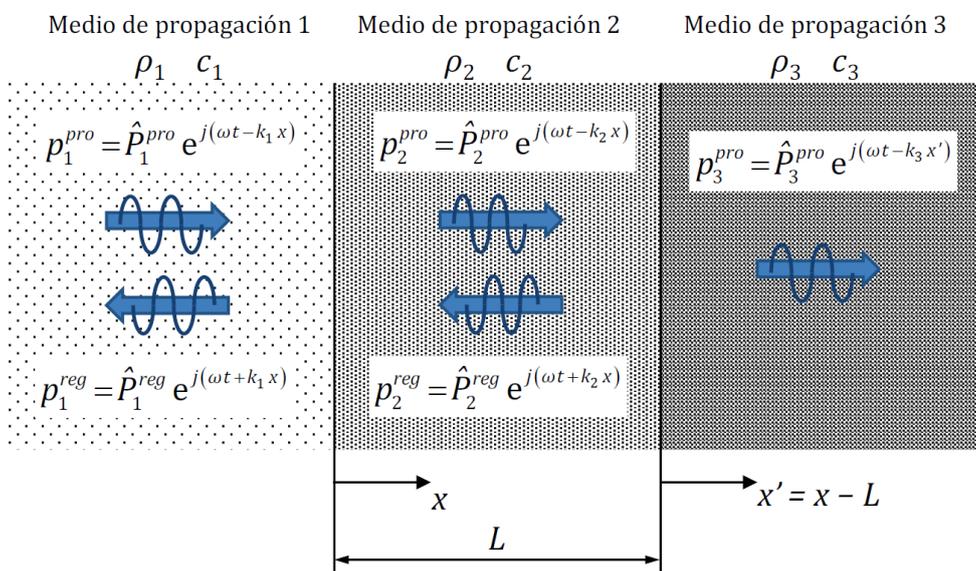


Imagen 9. Reflexión y transmisión en particiones (Denia, Fenómenos de propagación, 2019)

En esta *Imagen 9* puede apreciarse claramente el objetivo de estos dispositivos de atenuación acústica. La onda incidente se debilita notablemente al tener que atravesar primero un plano de separación que la descompondrá en una componente regresiva y otra progresiva que a su vez atraviesa un segundo plano de separación, haciendo que la onda progresiva resultante, la que se propaga por el medio 3 esté claramente atenuada con respecto a la onda incidente.

Analíticamente se tiene lo siguiente:

- **Plano de separación entre medio 1 y medio 2 (x = 0).** Se satisfacen las continuidades de presión y velocidad:

$$\widehat{p}_1^{prog} + \widehat{p}_1^{reg} = \widehat{p}_2^{prog} + \widehat{p}_2^{reg} \quad (82)$$

$$\frac{\widehat{p}_1^{prog} - \widehat{p}_1^{reg}}{Z_1} = \frac{\widehat{p}_2^{prog} - \widehat{p}_2^{reg}}{Z_2} \quad (83)$$

- **Plano de separación entre medio 2 y medio 3 ($x = L$; $x' = x - L$).** De la misma forma, se satisfacen las continuidades de presión y velocidad:

$$\widehat{p}_2^{prog} \cdot e^{-jk_2x} + \widehat{p}_2^{reg} \cdot e^{jk_2x} = \widehat{p}_3^{prog} \quad (84)$$

$$\frac{\widehat{p}_2^{prog} \cdot e^{-jk_2x} - \widehat{p}_2^{reg} \cdot e^{jk_2x}}{Z_2} = \frac{\widehat{p}_3^{prog}}{Z_3} \quad (85)$$

Combinando estas 4 expresiones anteriores, (86) (87) (88) y (89), se obtiene el coeficiente de transmisión, T, que relaciona la presión de la onda incidente (progresiva que se propaga por el medio 1) y la presión de la onda resultante (progresiva que se propaga por el medio 3):

$$T = \frac{\widehat{p}_3^{prog}}{\widehat{p}_1^{prog}} = \frac{1}{\frac{1}{2} \left(1 + \frac{Z_1}{Z_3}\right) \cos(k_2 L) + j \frac{1}{2} \left(\frac{Z_1}{Z_2} + \frac{Z_2}{Z_3}\right) \text{sen}(k_2 L)} \quad (90)$$

El coeficiente de transmisión de potencia, en el caso de que las impedancias características de los medios sean complejas, se define por la siguiente expresión:

$$\alpha_t = \frac{\overline{Pot}_3^{prog}}{\overline{Pot}_1^{prog}} = \frac{|\widehat{p}_3^{prog}|^2 \text{Re} \left(\frac{1}{Z_3^*} \right)}{|\widehat{p}_1^{prog}|^2 \text{Re} \left(\frac{1}{Z_1^*} \right)} = |T|^2 \frac{\text{Re} \left(\frac{1}{Z_3^*} \right)}{\text{Re} \left(\frac{1}{Z_1^*} \right)} \quad (91)$$

En el caso de que las impedancias sean reales, se obtiene la siguiente expresión:

$$\alpha_t = |T|^2 \frac{Z_1}{Z_3} = \frac{4 \frac{Z_1}{Z_3}}{\left(1 + \frac{Z_1}{Z_3}\right)^2 \cos^2(k_2 L) + \left(\frac{Z_1}{Z_2} + \frac{Z_2}{Z_3}\right)^2 \text{sen}^2(k_2 L)} \quad (92)$$

5.8. Índice de pérdida de transmisión TL

Para caracterizar dispositivos de atenuación acústica se utiliza el parámetro *Transmission Loss (TL)*. La unidad característica de este parámetro es el decibelio (dB) y representa los dB que disipa el dispositivo, normalmente se representa a lo largo de un rango de frecuencias. Esto permite detectar los picos y valles de atenuación y buscar la configuración óptima para el rango de frecuencias de funcionamiento de cada aplicación específica (*Denia, Fenómenos de propagación, 2019*).

El TL relaciona la potencia de la onda incidente y la potencia de la onda transmitida, su expresión es la siguiente:

$$TL = 10 \log \frac{\overline{Pot}_i}{\overline{Pot}_t} = 10 \log \frac{\overline{Pot}_i}{\overline{Pot}_i - \overline{Pot}_r} = 10 \log \frac{1}{\alpha_t} \quad (93)$$

En un cambio de sección, la expresión del TL es dependiente de las secciones de los conductos:

$$TL = 10 \log \frac{(S_1 + S_2)^2}{4 S_1 S_2} \quad (94)$$

6. CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DE CATALIZADORES MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

6.1. Introducción al MEF

La gran mayoría de los problemas físicos e ingenieriles son problemas de contorno que están gobernados por ecuaciones diferenciales o integrales dentro del dominio de estudio. Estas ecuaciones junto con las condiciones de contorno que se dan en la frontera del dominio hacen posible la resolución de este tipo de problemas.

La resolución de un problema de contorno puede ser, a grandes rasgos, de dos tipos (*Técnicas Computacionales en Ingeniería Mecánica, 2019*):

- Solución analítica. Ofrecen la solución exacta, pero no son aplicables cuando la geometría y el problema son complejos. Este tipo de resolución utiliza modelos continuos.

Un modelo continuo refleja con total precisión las propiedades físicas del problema que se está abordando, por lo tanto, la solución a la que llega es exacta. El principal inconveniente de este tipo de modelos es la necesidad de definir el dominio del problema mediante ecuaciones diferenciales en derivadas parciales. En muchas ocasiones el planteamiento es de tal dificultad que es imposible alcanzar la solución analítica, requiriendo de un elevado y no rentable coste de cálculo en aquellos problemas que sí que permiten llegar a la solución.

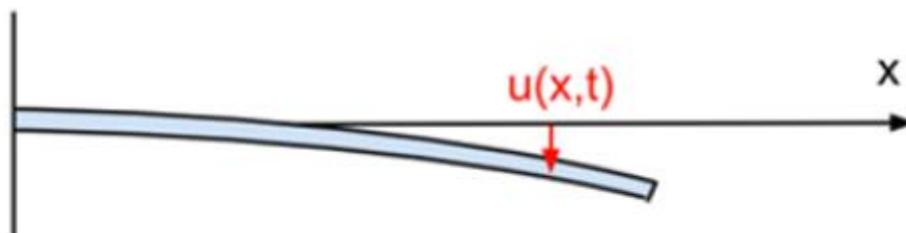


Imagen 10. Sistema continuo (Munuera, 2019)

- Solución aproximada. Simplifica el problema para hacerlo abordable desde el punto de vista del coste de cálculo. Esta simplificación lleva consigo un error, que es necesario estimar, para garantizar que los cálculos tienen un error menor que el considerado admisible. Dentro de los métodos capaces de llegar a este tipo de solución, son de especial interés los siguientes:
 - Método de las diferencias finitas.
 - Método de las funciones de prueba.
 - Método de los elementos finitos, MEF.

Todos ellos utilizan modelos discretos.

Un modelo discreto simplifica el problema, definiendo mediante ecuaciones algebraicas en vez de mediante ecuaciones diferenciales las propiedades físicas de problema. Esta simplificación está acotada, el problema necesita un número mínimo de variables discretas, a este número se le conoce como grados de libertad (gdl).



Imagen 11. Sistema discreto (Munuera, 2019)

Por lo tanto, el MEF es una técnica aproximada que permite la resolución de problemas no lineales, generalmente gobernados por ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, permitiendo incluso resolver problemas combinados de este tipo, cometiendo un error debido a la simplificación necesaria del problema para hacerlo abordable. El objetivo último del MEF es automatizar al máximo el proceso de análisis, priorizando el tiempo dedicado a la interpretación de resultados por parte del usuario.

6.2. Secuencia del MEF para realizar un cálculo

A continuación, se van a describir los pasos que sigue el MEF para realizar un cálculo, particularizando al problema de ecuación de ondas que se estudia en el presente trabajo (*Técnicas Computacionales en Ingeniería Mecánica, 2019*).

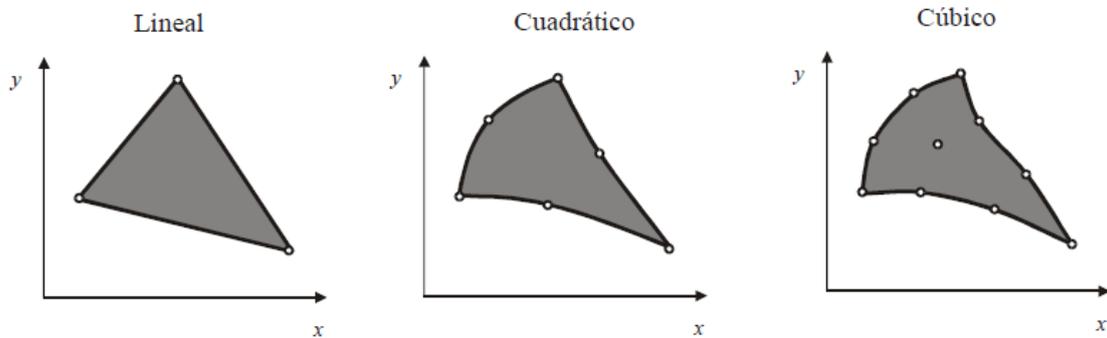
1) Discretización del dominio

El dominio de estudio se divide en subdominios, dependiendo del alcance del problema pueden ser puntos (problema unidimensional), líneas (problema bidimensional) o superficies (problema tridimensional). Todos estos subdominios son los elementos finitos y quedan definidos por sus nodos. Los nodos son los grados de libertad de cada elemento, cabe destacar que dos elementos contiguos compartirán nodos, dotando de continuidad al sistema.

Uno de los principales condicionantes del error cometido por el MEF es el tamaño de elemento. Cuanto más pequeño sea este, el problema se modelará con mayor cantidad de subdominios y como consecuencia la solución se aproximará más a la realidad. Sin embargo, a la vez que aumenta la precisión lo hará también el coste computacional, puesto que el número de cálculos será mucho mayor. Aquí reside una de las claves del MEF, la elección de un tamaño de elemento que permita alcanzar una solución con un error menor que el admisible y con un coste computacional razonable.

Estos elementos tienen geometrías básicas, los más usuales son triángulos y cuadriláteros. A su vez estos elementos pueden ser lineales o de orden superior, cuadráticos, cúbicos, etc. Estos elementos de orden superior de especial interés cuando se necesita discretizar contornos curvos o más complejos.

ELEMENTOS TRIANGULARES



ELEMENTOS CUADRILATEROS

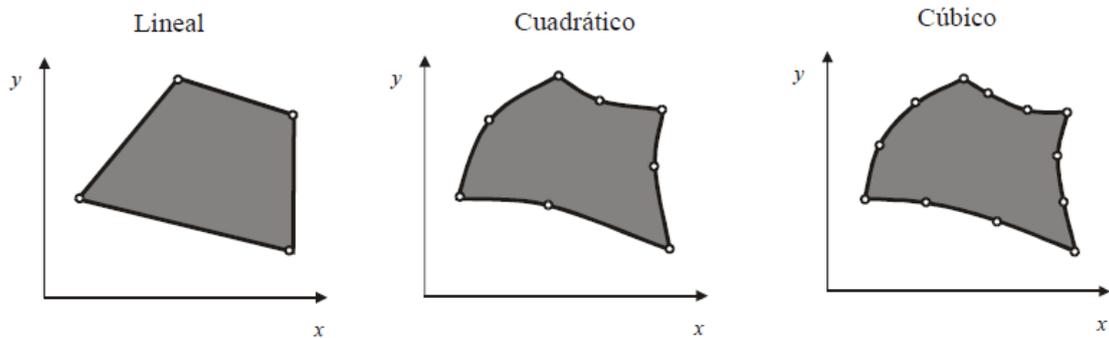


Imagen 12. Elementos bidimensionales dentro del MEF (Técnicas Computacionales en Ingeniería Mecánica, 2019)

2) Interpolación polinómica

Dentro de cada elemento, el comportamiento interior del mismo se aproxima localmente en los nodos (la interpolación nodal es la más habitual), generalmente mediante funciones polinómicas que dependerán de un conjunto de variables discretas. En el MEF la interpolación de cada elemento se lleva a cabo mediante las funciones de forma. Para una función ϕ dentro de un elemento en particular que depende del valor de esta función en cada uno de sus nodos, ϕ_i , habrá que encontrar las funciones de forma, N_i , de tal forma que:

$$\phi(x, y, z) \approx \sum N_i(x, y, z) \phi_i = N(x, y, z) \phi^e \quad (95)$$

Donde N es la matriz de funciones de forma, que dependerá de las coordenadas espaciales elegidas para resolver el problema (estas pueden ser globales o locales para cada elemento) y ϕ^e es el vector que recoge el valor que toma la función incógnita en cada uno de los nodos del elemento.

Para que se pueda representar el mismo tipo de variación de la función incógnita en cualquiera de las direcciones, es necesario que la interpolación sea idéntica en todas estas direcciones. A esta condición se le llama isotropía geométrica y viene representada gráficamente por el triángulo de Pascal:

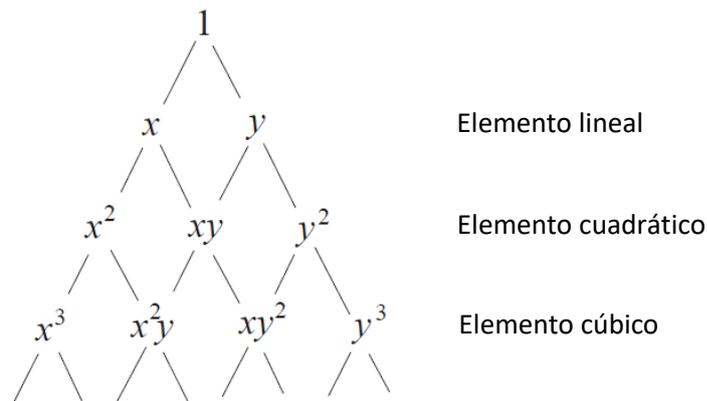


Imagen 13. Triángulo de Pascal (Técnicas Computacionales en Ingeniería Mecánica, 2019)

Para alcanzar la isotropía es necesario incluir de manera simétrica todos los elementos del triángulo de Pascal para cada nivel.

En cada frontera entre elementos, la interpolación dependerá únicamente del valor que tome la función incógnita en los nodos pertenecientes a esa frontera. De esta manera se garantiza la continuidad entre elementos, continuidad C^0 .

3) Planteamiento matricial y ensamblado

El comportamiento de cada elemento queda representado por medio de una matriz, que a su vez recogerá el comportamiento de cada uno de sus nodos.

Para representar el comportamiento global del dominio en su conjunto es necesario combinar todas las matrices de elemento, es decir, recoger el comportamiento de cada uno de los nodos del sistema en conjunto en una matriz global. Para conformar esta matriz global es necesario atender a una ley de ordenación, por la que a cada nodo de elemento le corresponderá una posición específica en esta matriz.

4) Condiciones de contorno

Es necesario acotar el problema definiendo las condiciones existentes en la frontera del dominio de estudio. En problemas de acústica las condiciones de contorno más frecuentes son las siguientes:

- Contorno abierto $\rightarrow P = 0$
- Pared rígida $\rightarrow \vec{U} = 0$
- Onda de presión armónica en la frontera $\rightarrow P = P_0$
- Onda de velocidad armónica en la frontera $\rightarrow \vec{U} = \vec{U}_m$

5) Transformación de coordenadas

Como se ha comentado en el punto 2) *Interpolación polinómica*, las coordenadas utilizadas para resolver el problema pueden ser globales, es decir unas coordenadas únicas para todo el sistema o locales, es decir unas coordenadas particulares para el estudio de cada elemento por separado.

Es usual realizar el cálculo de la matriz de cada elemento en coordenadas locales, ya que facilita este primer cálculo respecto a hacerlo en coordenadas globales.

Sin embargo, a la hora de recoger todos los elementos, es necesario realizar la transformación de coordenadas locales a coordenadas globales, para que todos los elementos y nodos estén referenciados a un sistema común.

6) Resolución

Por último, es necesario resolver el sistema de ecuaciones gobernado por la matriz global. Se calcula el valor de todos los elementos de esta matriz, es decir, se obtiene el valor de la función incógnita en todos los nodos en los que queda definido el dominio, en todos los gdl del problema. La solución puede alcanzarse mediante diferentes procedimientos, los más habituales son los siguientes:

- Método de Gauss.
- Método de la factorización de Cholesky.
- Método de Gauss-Siedel.
- Método de Jacobi.
- Método de Newton-Raphson.

6.3. Aplicación del MEF al problema de estudio

Para modelar el comportamiento acústico del catalizador monolítico se utilizará el MEF aplicado al problema particular de la ecuación de ondas. En este trabajo, se van a modelar los conductos de entrada y salida como conductos 3D, mientras que la región monolítica se va a modelar en 1D. (Pelayo, 2016) (García, 2018)

Para esta caracterización del monolito, se utilizará una matriz de transferencia que relaciona “nodo a nodo” la superficie de entrada al monolito con la superficie de salida de este (Selamet, Easwaran, Novak, & Kach, 1998) (Denia, Martínez-Casas, Baeza, & Fuenmayor, 2012) (Denia, Antebas, Martínez-Casas, & Fuenmayor, 2009).

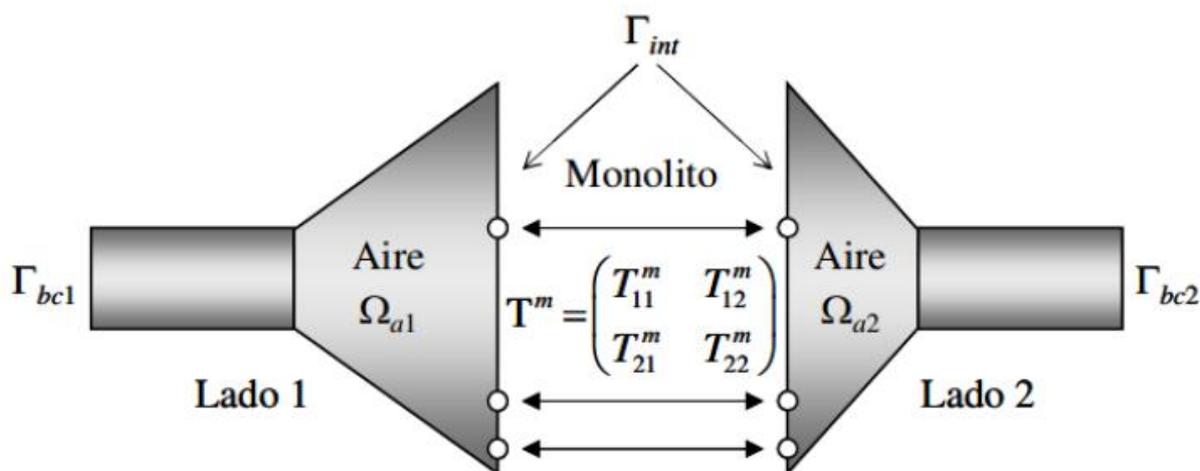


Imagen 14. Modelado 3D conductos-1D monolito del catalizador monolítico (Denia, Antebas, Martínez-Casas, & Fuenmayor, 2009)

Este modelo de caracterización escribe la ecuación de Helmholtz en las superficies de entrada y salida de la siguiente forma (Denia, Antebas, Kirby, & Fuenmayor, 2009):

$$\nabla^2 P_a + k_0^2 \cdot P_a = 0 \quad (96)$$

La interpolación de elementos finitos de un elemento e para el aire, siendo N el vector de funciones de forma, es la siguiente:

$$P_a = N \tilde{P}_a^e \quad (97)$$

Aplicando el método de los residuos ponderados con la formulación de Galerkin, se obtienen en las dos regiones de aire, Lado 1 y Lado 2, separadas por el monolito:

- Lado 1:

$$\sum_{e=1}^{N_{a1}^e} \left(\int_{\Omega_{a1}^e} \nabla^T N \nabla N \, d\Omega - k_0^2 \int_{\Omega_{a1}^e} N^T N \, d\Omega \right) \tilde{P}_{a1}^e = \quad (98)$$

$$\sum_{e=1}^{N_{a1}^e} \int_{\Gamma_{a1}^e \cap \Gamma_{int}} N^T \frac{\partial P_{a1}}{\partial n} \, d\Gamma + \sum_{e=1}^{N_{a1}^e} \int_{\Gamma_{a1}^e \cap \Gamma_{be1}} N^T \frac{\partial P_{a1}}{\partial n} \, d\Gamma$$

- Lado 2:

$$\sum_{e=1}^{N_{a2}^e} \left(\int_{\Omega_{a2}^e} \nabla^T N \nabla N \, d\Omega - k_0^2 \int_{\Omega_{a2}^e} N^T N \, d\Omega \right) \tilde{P}_{a2}^e = \quad (99)$$

$$\sum_{e=1}^{N_{a2}^e} \int_{\Gamma_{a2}^e \cap \Gamma_{int}} N^T \frac{\partial P_{a2}}{\partial n} \, d\Gamma + \sum_{e=1}^{N_{a2}^e} \int_{\Gamma_{a2}^e \cap \Gamma_{be2}} N^T \frac{\partial P_{a2}}{\partial n} \, d\Gamma$$

La región monolítica es sustituida por una matriz de transferencia de 4 polos, haciendo que la relación entre campos acústicos de presión y velocidad a ambos lados sea:

$$P_{a1} = T_{11}^m \cdot P_{a2} - T_{12}^m \left(-\frac{1}{j \omega \rho_0} \frac{\partial P_{a2}}{\partial n} \right) \quad (100)$$

$$-\frac{1}{j \omega \rho_0} \frac{\partial P_{a1}}{\partial n} = T_{21}^m \cdot P_{a2} - T_{22}^m \left(-\frac{1}{j \omega \rho_0} \frac{\partial P_{a2}}{\partial n} \right) \quad (101)$$

A partir de (102):

$$\frac{\partial P_{a2}}{\partial n} = \frac{j \omega \rho_0}{T_{12}^m} P_{a1} - \frac{j \omega \rho_0 T_{11}^m}{T_{12}^m} P_{a2} = j \omega \Pi_{21} P_{a1} - j \omega \Pi_{22} P_{a2} \quad (103)$$

Combinando (104) y (105):

$$\begin{aligned}\frac{\partial P_{a1}}{\partial n} &= -j \omega \Pi_{21} T_{12}^m P_{a1} + j \omega (\Pi_{22} T_{22}^m - \rho_0 T_{21}^m) P_{a2} \\ &= j \omega \Pi_{11} P_{a1} - j \omega \Pi_{12} P_{a2}\end{aligned}\quad (106)$$

• Lado 1:

Sustituyendo (107) en el lado derecho de (108):

$$\sum_{e=1}^{N_{a1}^e} \left(\int_{\Omega_{a1}^e} \nabla^T N \nabla N d\Omega - k_0^2 \int_{\Omega_{a1}^e} N^T N d\Omega \right) \widetilde{P}_{a1}^e = \quad (109)$$

$$\sum_{e=1}^{N_{a1}^e} \int_{\Gamma_{a1}^e \cap \Gamma_{be1}} N^T \frac{\partial P_{a1}}{\partial n} d\Gamma + \sum_{e=1}^{N_{a1}^e} \int_{\Gamma_{a1}^e \cap \Gamma_{int}} N^T (j \omega \Pi_{11} P_{a1} - j \omega \Pi_{12} P_{a2}) d\Gamma$$

Manipulando esta expresión (110):

$$\begin{aligned}\sum_{e=1}^{N_{a1}^e} \left[\left(\int_{\Omega_{a1}^e} \nabla^T N \nabla N d\Omega - k_0^2 \int_{\Omega_{a1}^e} N^T N d\Omega \right) \widetilde{P}_{a1}^e + j \omega \Pi_{11} \int_{\Gamma_{a1}^e \cap \Gamma_{int}} N^T N \widetilde{P}_{a1}^e d\Gamma \right. \\ \left. - j \omega \Pi_{12} \int_{\Gamma_{a1}^e \cap \Gamma_{int}} N^T N \widetilde{P}_{a2}^e d\Gamma \right] \quad (111)\end{aligned}$$

$$= \sum_{e=1}^{N_{a1}^e} \int_{\Gamma_{a1}^e \cap \Gamma_{be1}} N^T \frac{\partial P_{a1}}{\partial n} d\Gamma$$

Compactando esta última ecuación, (112):

$$(K_{a1} + j \omega C_{a1} - \omega^2 M_{a1}) \widetilde{P}_{a1} - j \omega C_{a1a2} \widetilde{P}_{a2} = F_{a1} \quad (113)$$

Se consideran las siguientes definiciones:

$$K_{a1} = \sum_{e=1}^{N_{a1}^e} \int_{\Omega_{a1}^e} \nabla^T N \nabla N d\Omega \quad (114)$$

$$C_{a1} = \Pi_{11} \sum_{e=1}^{N_{a1}^e} \int_{\Gamma_{a1}^e \cap \Gamma_{int}} N^T N d\Gamma \quad (115)$$

$$M_{a1} = \frac{1}{c_0^2} \sum_{e=1}^{N_{a1}^e} \int_{\Omega_{a1}^e} N N^T d\Omega \quad (116)$$

$$C_{a1a2} = \Pi_{12} \sum_{e=1}^{N_{a1}^e} \int_{\Gamma_{a1}^e \cap \Gamma_{int}} N^T N d\Gamma \quad (117)$$

$$F_{a1} = \sum_{e=1}^{N_{a1}^e} \int_{\Gamma_{a1}^e \cap \Gamma_{be1}} N^T \frac{\partial P_{a1}}{\partial n} d\Gamma \quad (118)$$

Se procede de manera similar para el Lado 2:

- Lado 2:

Sustituyendo (119) en el lado derecho de (120):

$$\sum_{e=1}^{N_{a2}^e} \left(\int_{\Omega_{a2}^e} \nabla^T N \nabla N d\Omega - k_0^2 \int_{\Omega_{a2}^e} N^T N d\Omega \right) \widetilde{P}_{a2}^e = \quad (121)$$

$$\sum_{e=1}^{N_{a2}^e} \int_{\Gamma_{a2}^e \cap \Gamma_{be2}} N^T \frac{\partial P_{a2}}{\partial n} d\Gamma + \sum_{e=1}^{N_{a2}^e} \int_{\Gamma_{a2}^e \cap \Gamma_{int}} N^T (j \omega \Pi_{21} P_{a1} - j \omega \Pi_{22} P_{a2}) d\Gamma$$

Manipulando esta expresión, (122):

$$\sum_{e=1}^{N_{a2}^e} \left[\left(\int_{\Omega_{a2}^e} \nabla^T N \nabla N d\Omega - k_0^2 \int_{\Omega_{a2}^e} N^T N d\Omega \right) \widetilde{P}_{a2}^e + j \omega \Pi_{22} \int_{\Gamma_{a2}^e \cap \Gamma_{int}} N^T N \widetilde{P}_{a2}^e d\Gamma - \right. \quad (123)$$

$$\left. - j \omega \Pi_{21} \int_{\Gamma_{a2}^e \cap \Gamma_{int}} N^T N \widetilde{P}_{a1}^e d\Gamma \right]$$

$$= \sum_{e=1}^{N_{a2}^e} \int_{\Gamma_{a2}^e \cap \Gamma_{be2}} N^T \frac{\partial P_{a2}}{\partial n} d\Gamma$$

Compactando esta última ecuación, (124):

$$(K_{a2} + j \omega C_{a2} - \omega^2 M_{a2}) \widetilde{P}_{a2} - j \omega C_{a2a1} \widetilde{P}_{a1} = F_{a2} \quad (125)$$

Se consideran las siguientes definiciones:

$$K_{a2} = \sum_{e=1}^{N_{a2}^e} \int_{\Omega_{a2}^e} \nabla^T N \nabla N d\Omega \quad (126)$$

$$C_{a2} = \Pi_{22} \sum_{e=1}^{N_{a2}^e} \int_{\Gamma_{a2}^e \cap \Gamma_{int}} N^T N d\Gamma \quad (127)$$

$$M_{a2} = \frac{1}{c_0^2} \sum_{e=1}^{N_{a2}^e} \int_{\Omega_{a2}^e} N N^T d\Omega \quad (128)$$

$$C_{a1a2} = \Pi_{21} \sum_{e=1}^{N_{a2}^e} \int_{\Gamma_{a2}^e \cap \Gamma_{int}} N^T N d\Gamma \quad (129)$$

$$F_{a2} = \sum_{e=1}^{N_{a2}^e} \int_{\Gamma_{a2}^e \cap \Gamma_{be2}} N^T \frac{\partial P_{a2}}{\partial n} d\Gamma \quad (130)$$

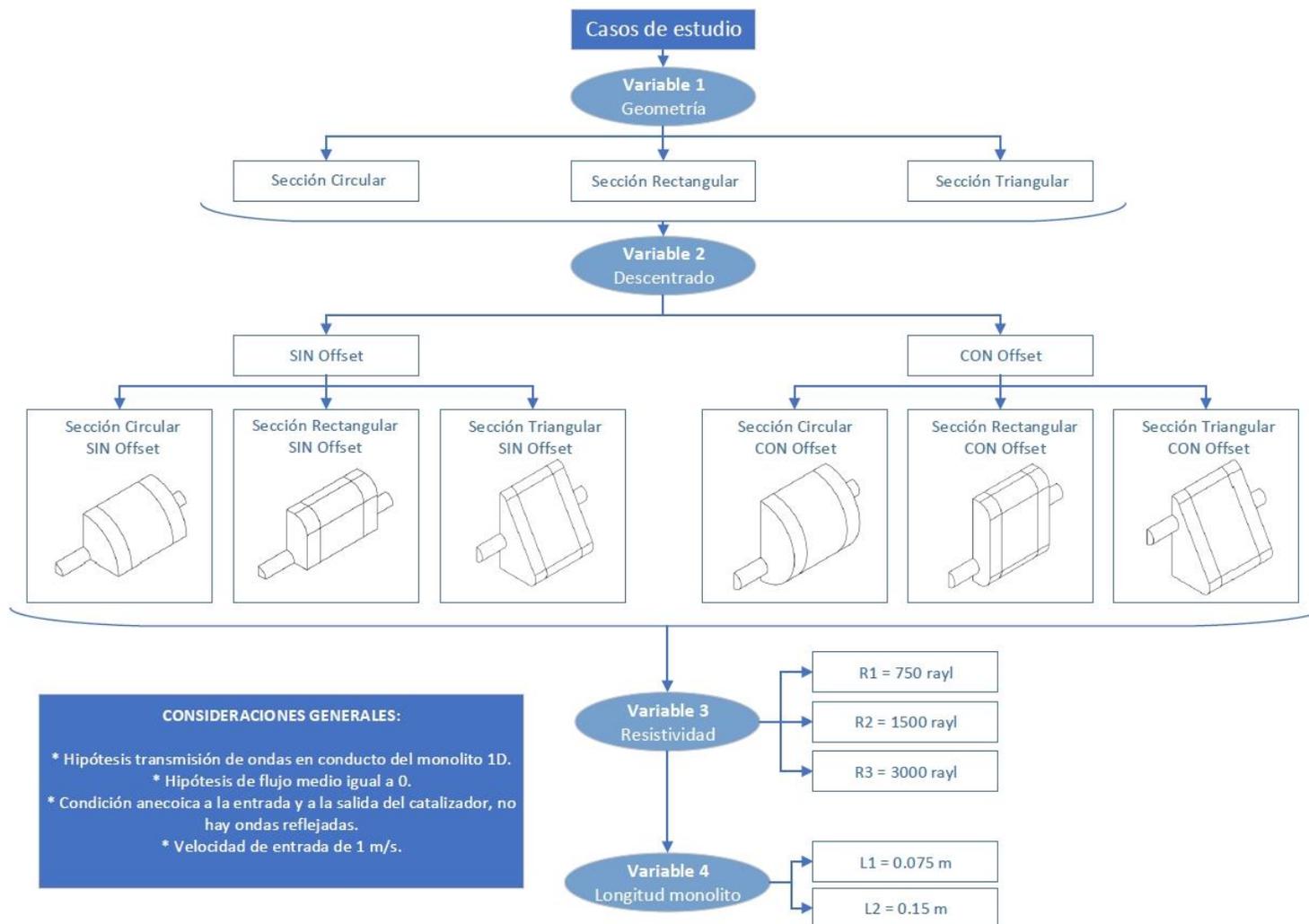
Las ecuaciones (131) y (132) componen el siguiente sistema de ecuaciones matricial:

$$\left[\begin{pmatrix} K_{a1} & 0 \\ 0 & K_{a2} \end{pmatrix} + j\omega \begin{pmatrix} C_{a1} & -C_{a1a2} \\ -C_{a2a1} & C_{a2} \end{pmatrix} - \omega^2 \begin{pmatrix} M_{a1} & 0 \\ 0 & M_{a2} \end{pmatrix} \right] \begin{Bmatrix} \widetilde{P}_{a1} \\ \widetilde{P}_{a2} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_{a1} \\ F_{a2} \end{Bmatrix} \quad (133)$$

El cual puede simplificarse de la siguiente manera:

$$(K_a + j \omega C_a) \widetilde{P}_a = F_a \quad (134)$$

7. CASOS DE ESTUDIO



8. METODOLOGÍA DE MODELIZACIÓN ACÚSTICA DE CATALIZADORES MEDIANTE ANSYS APDL Y ANSYS WORKBENCH

8.1. Introducción

Una vez conocido el funcionamiento y la composición interna de los catalizadores, así como los fundamentos principales del Método de los Elementos Finitos, concretamente al abordar el problema de la ecuación de ondas, es hora de realizar la simulación mediante un software que trabaje con el principio del MEF para estudiar la atenuación del ruido en el interior de un catalizador.

El software utilizado para modelar y simular el comportamiento del sistema será ANSYS WORKBENCH, a su vez se utilizará como referencia para validar los resultados el software ANSYS APDL. ANSYS es una compañía que ofrece software de simulación de problemas de ingeniería, asentándose como referencia en la resolución de problemas mediante el MEF. Abarca problemas de muchas naturalezas: análisis estructural, transferencia de calor, dinámica de fluidos, electromagnéticos, etc. La firma desarrolla continuamente tecnología basada en la simulación.

Este apartado del trabajo va a explicar paso a paso el proceso a seguir para realizar la simulación acústica de un catalizador, es aplicable a muchos otros elementos de la línea de escape de un motor u otros componentes de la industria haciendo las adaptaciones necesarias a cada caso particular. En el transcurso del proceso, se explicará detalladamente el funcionamiento y los diferentes módulos de ANSYS WORKBENCH que intervienen en el problema acústico. También se explicará cómo realizar una simulación similar en ANSYS APDL a partir de macros. Estas últimas no son objeto del presente trabajo, si no que han sido desarrolladas en trabajos de investigación anteriores del Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales, y facilitadas para constatar los resultados del trabajo. En el ANEXO N°2 se incluyen estas macros acompañadas de una breve descripción.

ANSYS tiene bien definido el proceso de realización de cálculo, sea cual sea la naturaleza del mismo, y mantiene esta estructura en todos sus programas. Esta secuencia consta de 3 fases:

- **Pre-proceso.** Aquí se definirán los materiales que se asignarán a cada dominio geométrico a partir de sus constantes, se construirá la geometría del problema, se añadirá a cada dominio el material que lo constituye y se generará el mallado.
- **Proceso.** En esta parte se aplicarán las condiciones de contorno del problema y se determinará la solución que se quiere obtener.
- **Post-proceso.** En esta fase se visualizarán los resultados de la simulación, tanto de manera gráfica como tabulada. También permite realizar animaciones de la evolución del problema sobre la geometría a lo largo del tiempo.

En este Trabajo de Fin de Máster se van a estudiar seis geometrías de catalizadores diferentes (*ver DOCUMENTO N°3 PLANOS*): Rectángulo, Rectángulo_offset, Triángulo, Triángulo_offset, Circulo y Circulo_offset. La diferencia entre las geometrías radica en la forma de la sección de la cámara del catalizador y en si los conductos de entrada y salida están alineados o desfasados. Para cada geometría se van a realizar seis estudios diferentes a su vez. Para longitudes de la cámara de 0.075m y 0.15m, y dentro de cada longitud se analizarán 3 resistividades diferentes: 750, 1500 y 3000 rayl/m. El proceso

es similar para todas las geometrías, por lo que se va a explicar detalladamente el caso Rectángulo, comentando en el transcurso las particularidades de las otras geometrías si las hubiese.

8.2. ANSYS APDL

ANSYS APDL va a usarse como referencia para validar los resultados obtenidos en este TFM. Todos los casos de estudio que van a modelarse, calcularse y analizar con ANSYS WORKBENCH, ya han sido desarrollados previamente por el equipo de investigación del departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales de la UPV en estudios anteriores con ANSYS APDL.

ANSYS APDL es uno de los programas pioneros en el cálculo por el Método de los Elementos Finitos, que abarca una inmensa cantidad de problemas a resolver. Se caracteriza por la potencia y precisión de su motor de cálculo. Si bien, su interfaz es un poco antigua y es necesario habituarse al trabajo en este entorno, ya que no es tan intuitivo como los softwares actuales.

Como ya se ha comentado previamente, esta herramienta ha sido utilizada únicamente como referencia para obtener unos resultados sobre los que verificar los obtenidos más tarde con ANSYS WORKBENCH. Por lo tanto, no se va a realizar una explicación detallada del procedimiento de cálculo de un problema acústico para la modelización de un catalizador como si se va a realizar con ANSYS WORKBENCH. Se va a explicar en detalle el procedimiento necesario para generar los resultados a partir de las macros y de las matrices de caracterización del monolito obtenidas por el equipo de investigación. En el *ANEXO N°2* se incluye una macro tipo acompañada de una breve descripción.

8.2.1. Procedimiento para ejecutar el cálculo acústico a partir de macros

ANSYS APDL va a necesitar únicamente de dos archivos para generar el cálculo completo del TL en el catalizador:

- **La macro.** Un fichero de extensión .txt que contiene toda la secuencia de comandos de ANSYS APDL para la definición de constantes y parámetros que intervienen en el cálculo, generación de la geometría, cálculo de propiedades del monolito (en esta parte interviene el otro archivo necesario que va a ser descrito a continuación, la matriz de transferencia) y ejecución del cálculo del TL. Una vez leída la macro, se irán ejecutando línea a línea todos los comandos de manera similar a si se fuesen introduciendo en la barra de comandos de ANSYS APDL. En el presente estudio, se tienen 6 macros diferentes, una para cada caso geométrico particular: cámara del catalizador de sección rectangular, triangular o circular, cada una de ellas con conductos de entrada alineados o con un determinado desfase. Hay que prestar especial atención al nombre del fichero.
- **La matriz de transferencia.** Un fichero de extensión .txt que contiene los valores de las distintas frecuencias a las que se realiza el cálculo, y para cada una de ellas los 4 elementos de la matriz de admitancia que simularán la composición y geometría del monolito de acuerdo con su estructura cerámica con celdillas y el comportamiento del aire en el interior del mismo, desglosados en su parte real e imaginaria. Se van a tener 6 matrices diferentes, para longitudes de monolito de 0.075 m y 0.15 m, y a su vez cada una de ellas para resistividades de 750, 1500 y 3000 rayl/m. Todas las macros tienen implementado el nombre de esta matriz como “matriz”, por lo que será necesario o bien poner este nombre a todas las matrices de

transferencia dentro de cada carpeta particular de cada caso de estudio o bien cambiar las líneas de la macro en la que se llame a este archivo.

Para cada cálculo particular (geometría, longitud de monolito y resistividad del monolito) se creará una carpeta diferente. En el interior de la misma se copiarán el archivo de la macro correspondiente a la geometría y el archivo de la matriz correspondiente a la longitud y resistividad del monolito. Una vez se tengan en la carpeta los archivos correspondientes al cálculo deseado se cambiará el nombre de la matriz a “matriz”, la extensión de ambos archivos será .txt.

Una vez preparada la carpeta de trabajo, en la que al ejecutar el cálculo ANSYS APDL creará una gran cantidad de archivos, de ahí la recomendación de crear una carpeta para cálculo, ya se puede ejecutar el programa y lanzar el cálculo.

Se ejecutará el “Mechanical APDL Product Launcher” y no el “Mechanical APDL”, ya que el primero definirá la carpeta directorio y será mucho más fácil la lectura de la macro y la matriz.



Imagen 15. Ejecución de ANSYS APDL mediante el Product Launcher

Se abrirá la siguiente ventana.

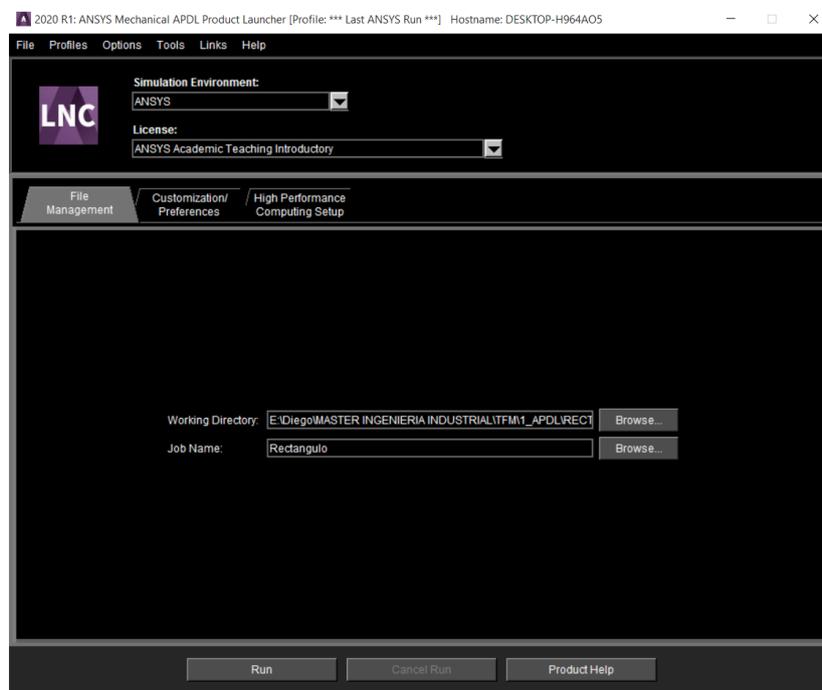


Imagen 16. Ventana de ANSYS APDL

Únicamente será necesario completar la información requerida en la pestaña “File Management”, que consta de dos apartados:

- **Working Directory.** En este apartado se introducirá la ruta de la carpeta de trabajo donde se va a realizar el cálculo. Se hará click sobre “Browse”, se buscará en el equipo la carpeta de trabajo y se seleccionará “Aceptar”.
- **Job Name.** Es el nombre del proyecto, tiene que coincidir con el nombre de la macro que se va a ejecutar, es decir el nombre de la macro que hay dentro de la carpeta seleccionada en el “Working Directory”. Importante esta coincidencia en los nombres de Job Name y de macro, ya que de lo contrario ANSYS APDL dará error.

Una vez configurada de manera adecuada la pestaña “Working Directory”, se hará click sobre “Run” y se abrirá la interfaz tradicional de ANSYS APDL.

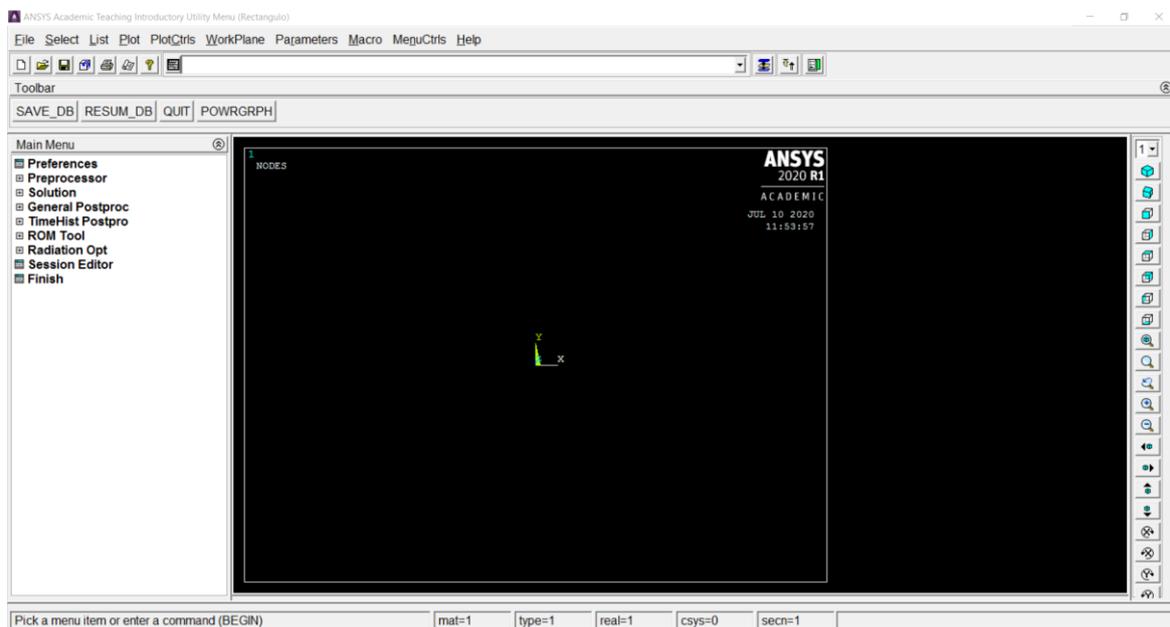


Imagen 17. Interfaz de ANSYS APDL

Al trabajar con macros, el único paso que hace falta realizar es el de la lectura de esta. Para ello se abrirá el menú de “File” y se seleccionará la opción “Read Input from...”.

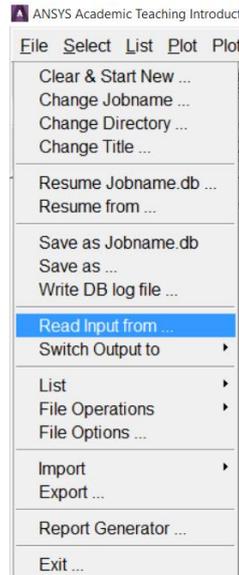


Imagen 18. Comando para la lectura de la macro

Se abrirá una ventana para selección de archivos dentro de los diferentes directorios del equipo. Como ya se ha seleccionado en la ventana de configuración de ANSYS APDL la carpeta de “Working Directory”, se mostrarán directamente los archivos de esta. Si se quiere cambiar de carpeta basta con seleccionar otra en el apartado “Directories” y en la lista de “Read input from...” aparecerán los archivos ubicados en la carpeta seleccionada. Se seleccionará el fichero *Rectangulo.txt* (nombre de la macro.txt) y se pulsa “OK”.

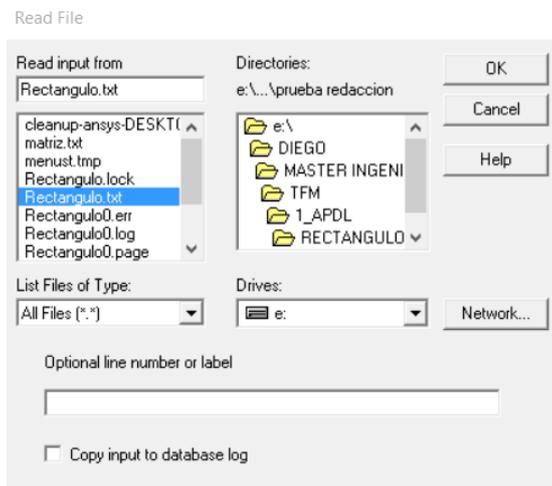


Imagen 19. Selección de la macro a ejecutar en “Read input from...”

El programa comenzará a calcular, este proceso requiere de un tiempo, dependiendo del procesador del equipo. Cuando el cálculo haya terminado, aparecerá la ventana informativa: “Solution is done!”. Se cerrará esta ventana y se visualizará la gráfica del TL, en dB, frente a la frecuencia, Hz.

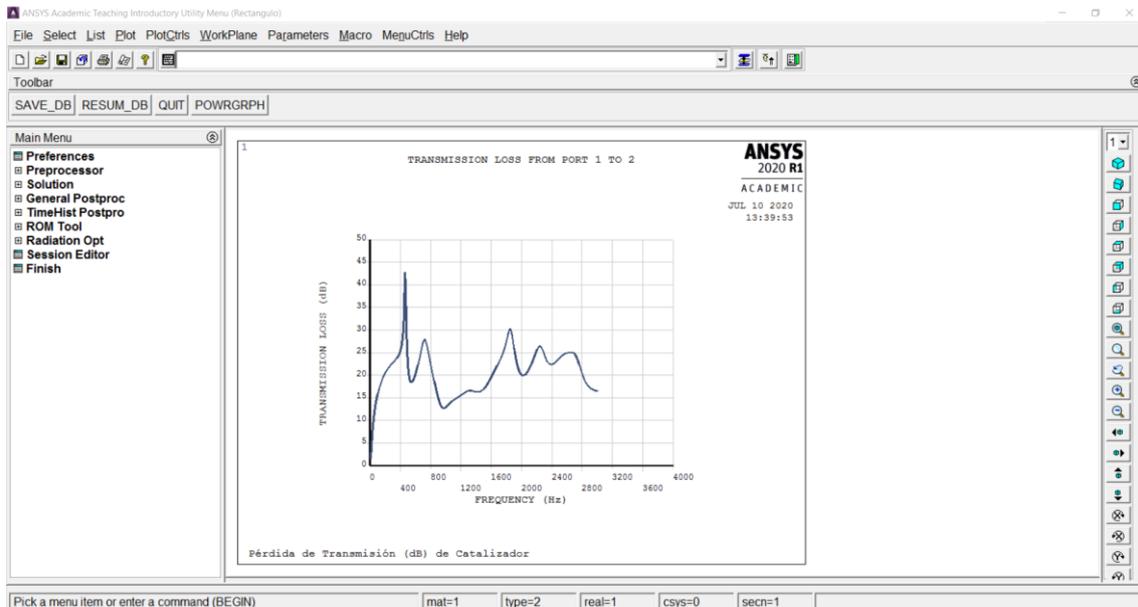


Imagen 20. Gráfica de resultados de APDL

Para visualizar el mallado del modelo, bastará con hacer click sobre “Plot” y seleccionar la opción “Elements” en la lista que se despliega.

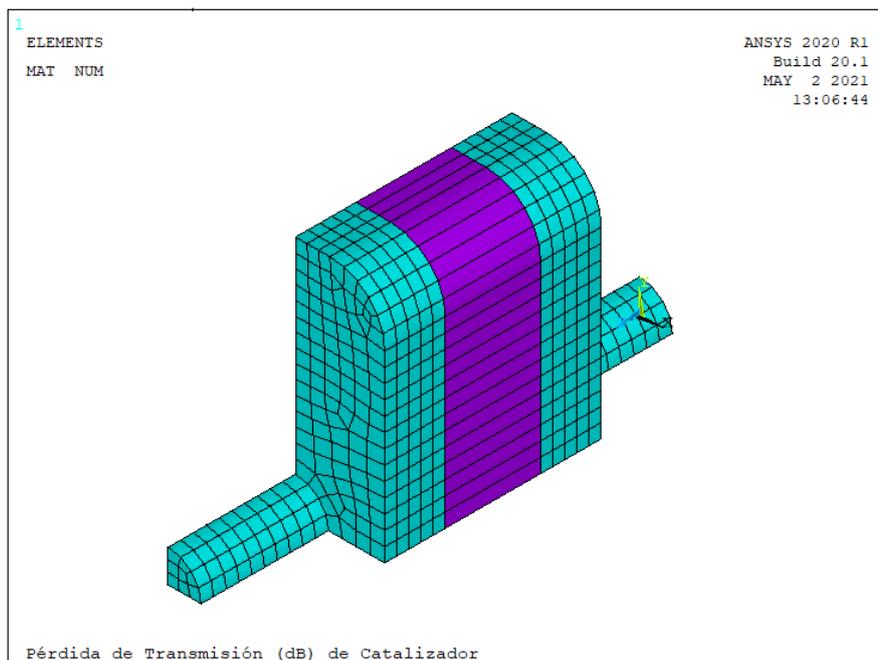


Imagen 21. Mallado del modelo con sección rectangular sin offset en APDL

La macro está implementada para mostrar después de la gráfica, pulsando “Enter”, una lista con las pérdidas de transmisión para cada frecuencia. En algunas versiones no aparecerá la lista al pulsar “Enter”. Para mostrarla, habrá que seguir el procedimiento descrito a continuación.

Es necesario estar en el postprocesador, ya que se trata de una lectura de resultados y corresponde a este módulo de ANSYS. Para ello se hará click sobre el apartado “General Postproc” dentro del “Main Menu”.

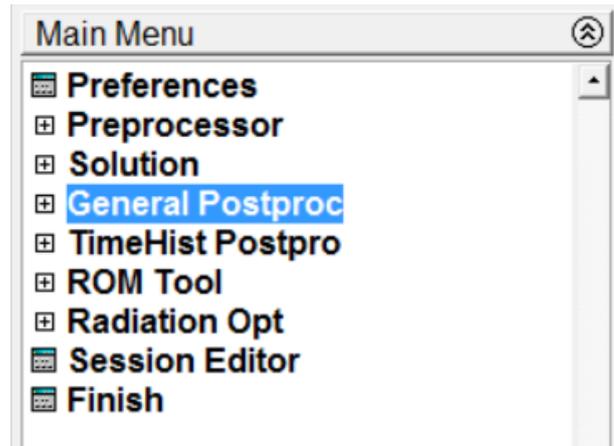


Imagen 22. Selección del módulo del postprocesador

Una vez en el módulo del postprocesador, habrá que introducir en la barra de comandos la siguiente sentencia: **plst,Rectángulo0102,a2p,tl**. Siendo la parte de la sentencia resaltada en negrita (Rectángulo en este caso) el nombre de la macro y por lo tanto del “Jobname” del proyecto.

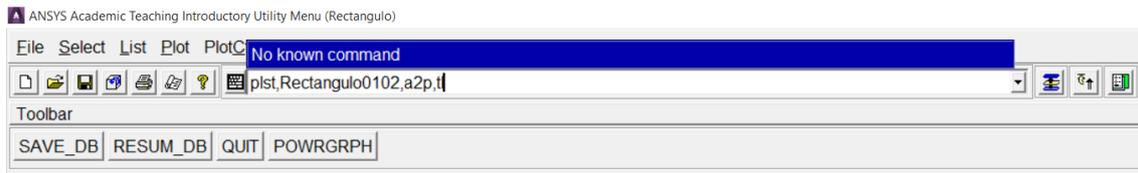


Imagen 23. Introducción de una sentencia en la barra de comandos

Se pulsará “Intro” para que se ejecute el comando, y se mostrará en pantalla una lista con el TL para cada frecuencia.

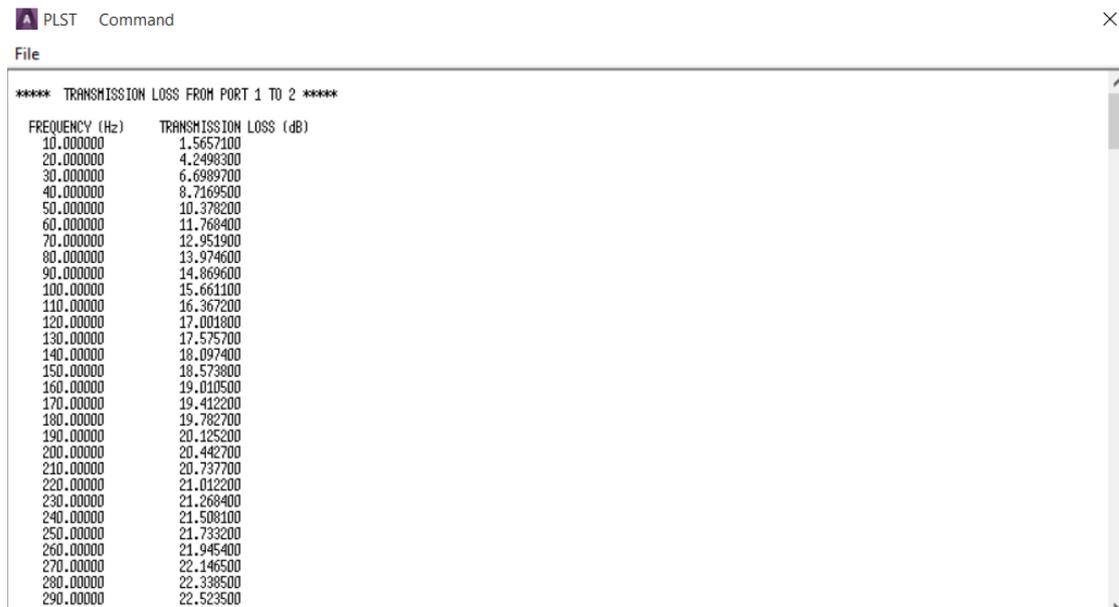


Imagen 24. Lista de resultados generada

Haciendo click sobre “File” se podrá guardar esta lista seleccionando “Save as...” como un archivo .lis, que podrá ser leído con cualquier programa similar al BLOC DE NOTAS y luego convertido a EXCEL para una mejor manipulación de datos.

8.3. ANSYS WORKBENCH

El programa de elementos finitos utilizado en el presente trabajo es ANSYS WORKBENCH, concretamente la versión 2020 R1 Académica, un software muy intuitivo que permite la realización íntegra del problema acústico a estudiar, tanto la generación de geometría, como del mallado y el cálculo acústico.

ANSYS WORKBENCH es una evolución del programa base de elementos finitos de ANSYS, ANSYS Mechanical APDL. Este último es muy potente y preciso a la hora de calcular, pero tiene una interfaz un tanto difícil de interpretar y la creación de la geometría resulta bastante laboriosa.

ANSYS WORKBENCH tiene el mismo principio de trabajo y la secuencia de cálculo y de entrada de datos es prácticamente similar a la de Mechanical APDL, si bien tiene una interfaz mucho más intuitiva, más ordenada y, probablemente la mayor diferencia con APDL, el módulo de generación de geometría está mucho más avanzado. Los dos submódulos que ofrece WORKBENCH para la generación de geometría, “Space Claim” y “Design Modeler” tienen un mecanismo de trabajo muy similar a los programas de modelado 3D punteros en la industria, como por ejemplo CATIA o SOLIDWORKS. Si bien las posibilidades son mucho más limitadas que estos programas específicos, cuenta con operaciones prácticamente similares, apenas difiriendo en pequeños aspectos, lo que hace muy fácil la adaptación a este módulo de geometría si se han utilizado programas como los comentados previamente. También ofrece la opción de importar el modelo geométrico (APDL también tiene esta alternativa) y utilizar WORKBENCH para los aspectos específicos del MEF, como son el mallado, las condiciones de contorno y trabajo y el posterior cálculo.

Al abrir el programa se muestra la pantalla de inicio. Esta tiene dos espacios de trabajo principales, “Toolbox” y “Project Schematic”. Además, en la parte superior se encuentra una barra de menú, prácticamente idéntica a la de cualquier programa de cualquier tipo que permite administrar los archivos, cambiar las vistas, etc. Y justo debajo de esta, se encuentra una barra de funciones, que permite importar archivos, reconectar diferentes elementos, así como actualizar el proyecto.

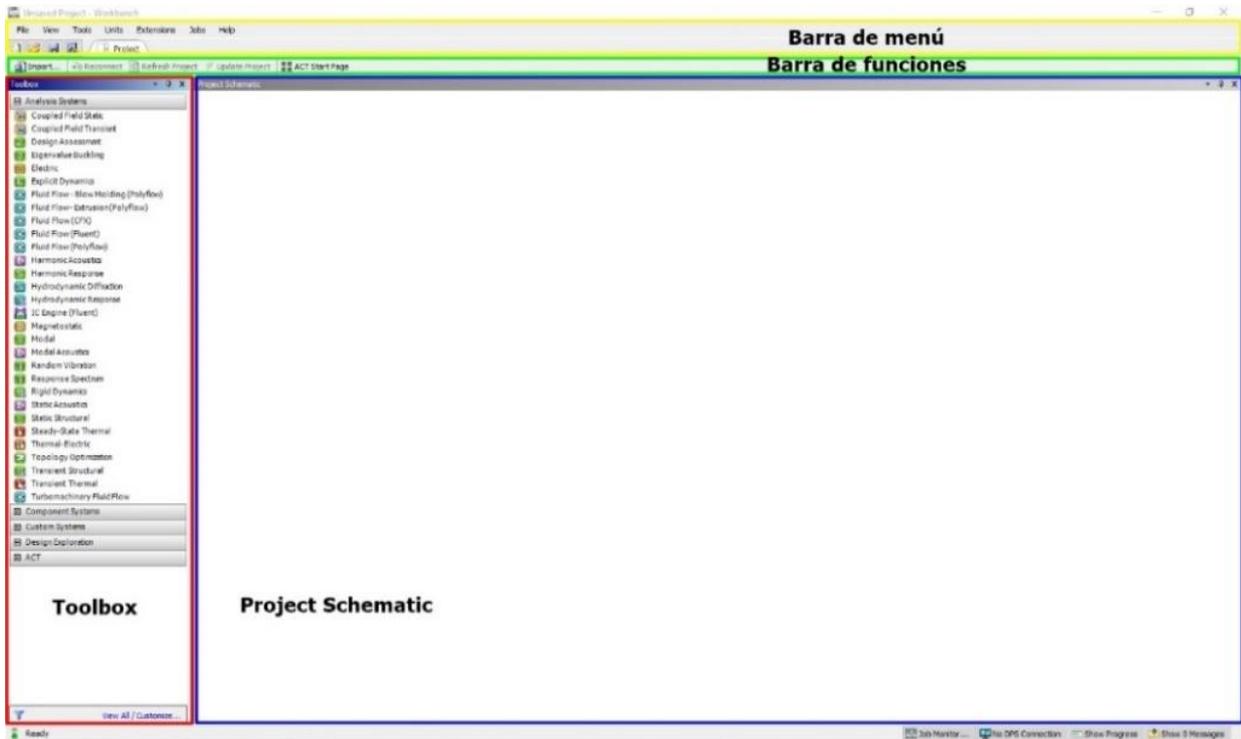


Imagen 25. Entorno de ANSYS WORKBENCH

A continuación, se describen brevemente las dos áreas principales:

- **Toolbox.** Contiene la pestaña “Analysis Systems”, donde aparecen los diferentes tipos de estudio que permite realizar el programa:



Imagen 26. Componentes del Toolbox

Existen más tipos de estudio ocultos, que podemos hacer visibles haciendo click en la ruta “View All/Customize...” situada en la parte inferior derecha de la pestaña “Toolbox”.

Para comenzar un estudio del tipo deseado, bastará con clickar sobre el tipo de éste o arrastrarlo hacia el espacio correspondiente a “Project Schematic”.

- **Project Schematic.** Una vez seleccionado el tipo de estudio que se quiere llevar a cabo, aparece de la siguiente forma en el espacio “Project Schematic”. En este caso se ha iniciado un estudio del tipo “Harmonic Acoustics”, que es el que va a permitir modelar el catalizador con monolito que se quiere estudiar.



Imagen 27. Espacio de trabajo "Project Schematic"

Se abre un bloque de trabajo, a su vez formado por diferentes módulos. Estos están ordenados de manera que para poder pasar al siguiente módulo debe estar definido el colocado por encima del mismo. Para saber si un módulo está correctamente definido y por lo tanto es posible pasar al siguiente paso, ANSYS usa el código que se describe a continuación. El tick verde (✓) indica que el módulo contiene la información requerida y de la manera adecuada, por lo que se puede pasar a configurar el siguiente; la interrogación azul (?) indica que los módulos anteriores a éste contienen la información necesaria, y por lo tanto éste módulo ya puede ser definido; la interrogación sin relleno (?) indica que el módulo al que se refiere todavía no puede ser definido, debido a que alguno de sus predecesores no tienen todavía la información necesaria; las dos flechas en disposición circular (↻) indican que es necesario clicar sobre la opción "Refresh Project" de la barra de funciones, cada vez que se complete un módulo y se salga a la ventana principal es adecuado clicar sobre esta función para poder trabajar en el siguiente; el rayo (⚡) indica que se ha modificado la configuración anterior en alguno de los módulos, y es necesario actualizar el proyecto haciendo click sobre la función "Update Project" de la barra de funciones.

La información y operaciones realizadas en los diferentes módulos del tipo de estudio "Harmonic Acoustics" pueden intuirse fácilmente tanto por el nombre del mismo como del icono que lo acompaña. En la descripción detallada de los pasos para realizar el estudio acústico se explican en detenimiento. Si bien es necesario aclarar que el módulo "Model" abarca el resto de los módulos que lo suceden: "Setup", "Solution" y "Results", por lo que no es necesario salir del mismo para configurar el cálculo y mostrar los resultados deseados.

Es importante antes de comenzar a definir los módulos, seleccionar el sistema de unidades deseado. Para ello, bastará con hacer click en la pestaña "Units" de la barra de menú y seleccionar el sistema de unidades, en este estudio se va a utilizar el Sistema Internacional (SI):

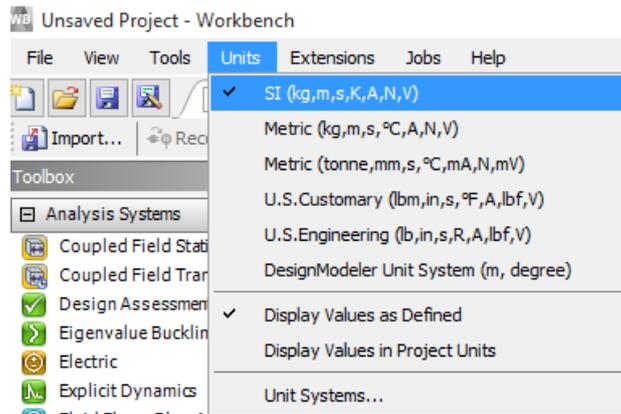


Imagen 28. Elección de las unidades de medida

8.3.1. Engineering Data

Como puede observarse en la *Imagen 27*, el primer módulo dentro de “Harmonic Acoustics” es el llamado “Engineering Data”. En este componente se definirán las propiedades de todo aquel material involucrado en el fenómeno a modelar y analizar. Para entrar a este módulo, al igual que al resto, bastará con hacer doble click sobre él.

El programa tiene en su base de datos tres materiales por defecto, aire, acero y agua. Aunque el material de este estudio es el aire, ya que es el medio de propagación de las ondas acústicas en el interior del catalizador, se va a crear un nuevo material, para introducir las propiedades deseadas y no se va a utilizar el material “Air” que tiene el programa por defecto.

Para crear este nuevo material, se hace click en la ventana “Click here to add a new material” que se encuentra debajo de los tres materiales previamente mencionados y se introduce el nombre deseado, en este caso “Aire”:

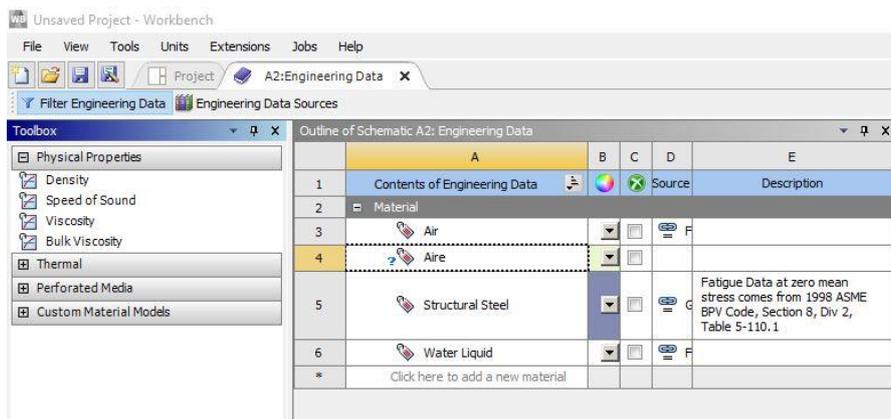


Imagen 29. Lista de materiales en Engineering Data

Para caracterizar de manera adecuada el nuevo material, hay que introducir sus propiedades características. Para definir el comportamiento acústico del aire, es suficiente con especificar su densidad y la velocidad del sonido en el aire. Para ello, dentro de la pestaña “Physical Properties” del “Toolbox”, se arrastrarán las propiedades “Density” y “Speed of Sound” al cuadrado generado con el nombre del nuevo material.

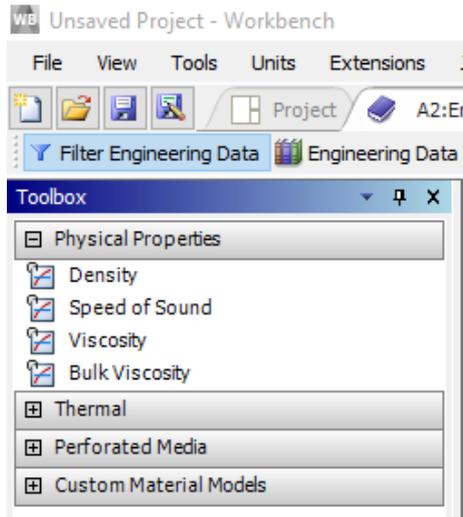


Imagen 30. Propiedades de los materiales en Engineering Data

Las propiedades asignadas al material aparecerán en el apartado inferior al que contiene la lista de materiales, como se puede observar en la siguiente *Imagen 31*, en la que ya están introducidos los valores correspondientes a la densidad (1.225 kg/m^3) y a la velocidad del sonido (340.225 m/s) a temperatura ambiente (15°C) que se ha tomado como referencia para este estudio.

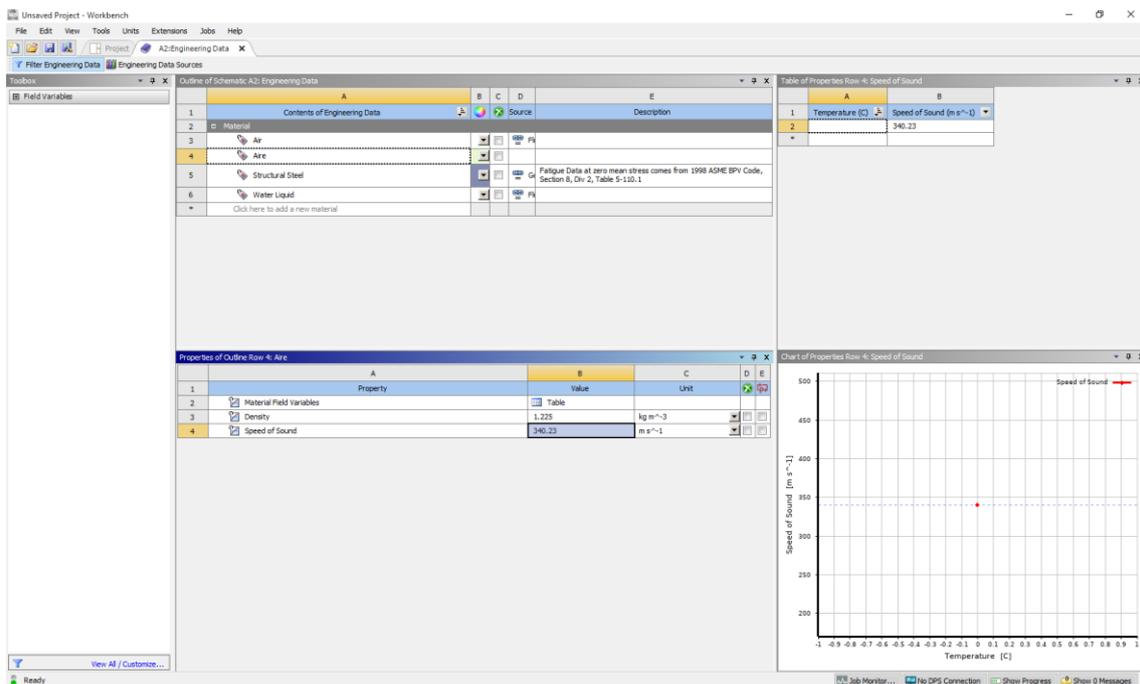


Imagen 31. Interfaz completa de Engineering Data

Ya definido el material “Aire”, se cerrará la pestaña “Engineering Data” y se volverá a la pestaña principal “Project”. Una vez en esta última se refrescará el proyecto haciendo click sobre “Refresh Project”.

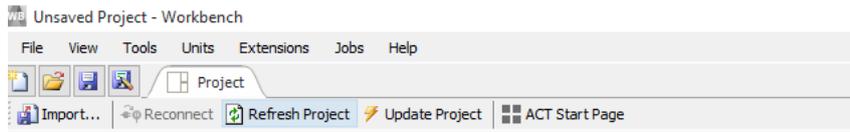


Imagen 32. Refresh project

8.3.2. Geometry

Como ya se ha comentado previamente, este módulo es una de las mejoras que presenta WORKBENCH frente a APDL. Existen básicamente 3 formas de generar la geometría del modelo a estudiar: importar dicha geometría mediante ficheros generados con programas específicos de diseño 3D, esta opción es la idónea si se trata de geometrías muy complejas, y pueden existir errores de compatibilidad; “SpaceClaim” y “DesignModeler”. Estas dos últimas son propias de WORKBENCH, que nos permiten generar la geometría dentro del propio programa. Son una buena opción cuando la geometría no es muy compleja, en el caso del estudio del catalizador, la geometría cumple con este requisito, por lo que se va a utilizar uno de estos módulos internos de WORKBENCH, concretamente “DesignModeler”. Ambos módulos son bastante similares.

Para abrir el generador de geometría, basta con hacer click con el botón derecho del ratón sobre el módulo “Geometry” y elegir la opción “New DesignModeler Geometry...”.

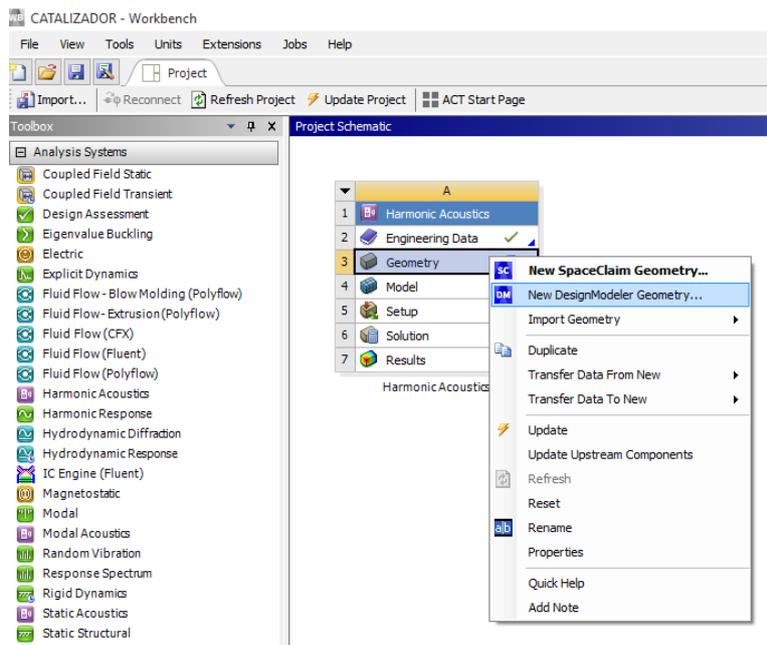


Imagen 33. Selección del generador de geometría deseado desde la ventana de proyecto

El espacio de trabajo de “DesignModeler” es el siguiente:

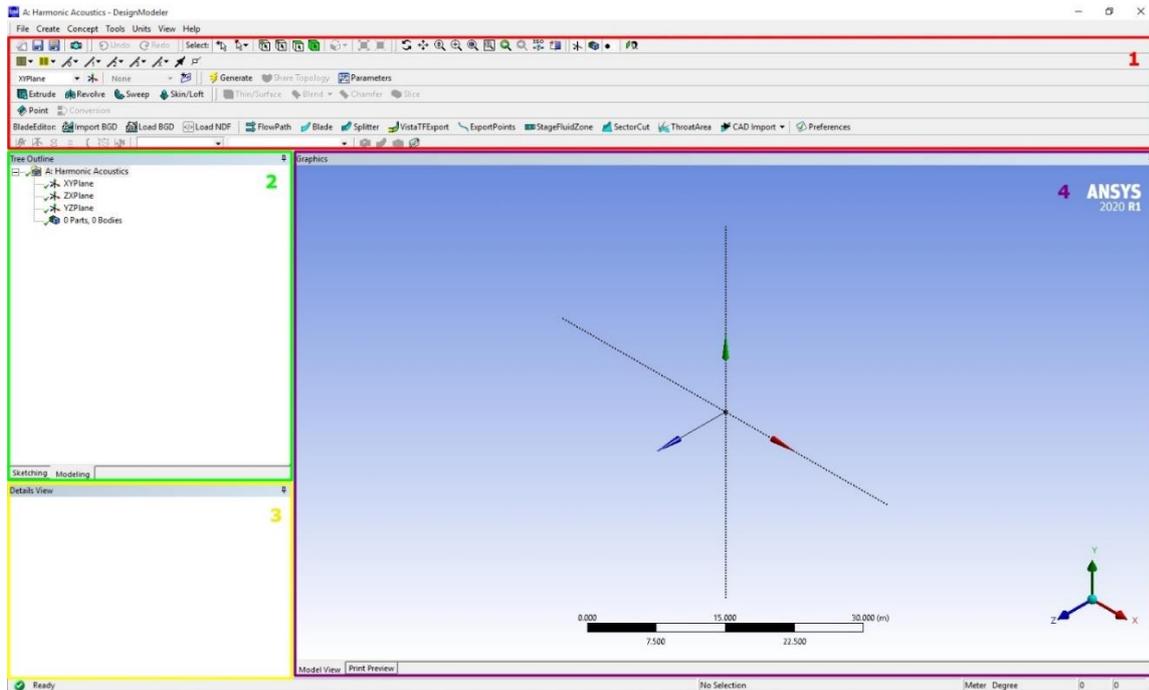


Imagen 34. Espacio de trabajo de Design Modeler

Consta básicamente de 4 espacios de trabajo, que son descritos brevemente a continuación:

1. (En **Rojo** en la *Imagen 34*) Contiene las herramientas de creación de geometría 3D (extrude, revolve, sweep...) y las de modificación de la geometría 3D (Blade, splitter...). Cabe destacar que estas operaciones pueden encontrarse de la misma forma en la pestaña "Create" de la barra de herramientas que se encuentra por encima de esta área en la *Imagen 34*. También se encuentran en esta zona la opción de importar archivos CAD, el comando "Generate" que permite actualizar el modelo y el gestor de parámetros entre otras funciones.
2. (En **Verde** en la *Imagen 34*) Tiene dos pestañas: "Modeling", donde se visualiza el árbol de trabajo, con los planos, parts y bodys del dibujo, cada sketch o boceto que se genere y las operaciones de creación de geometría 3D se dispondrán aquí según el orden en que se vayan creando; y "Sketching" donde se crea, modifica, dimensiona y restringe la geometría 2D a la que se aplicarán las operaciones para crear la geometría 3D.
3. (En **Amarillo** en la *Imagen 34*) Es la ventana de detalles de vista, muestra los detalles de las diferentes operaciones y sketches, permitiendo cambiar las dimensiones de las líneas o profundidades que los definen.
4. (En **Violeta** en la *Imagen 34*) Es la ventana gráfica, donde se visualizarán los croquis a medida que se van construyendo, así como el resto de operaciones y el propio modelo.

A partir de ahora se va a detallar el proceso de construcción de la geometría del caso de estudio, concretamente se va a describir el caso de cámara del catalizador de sección rectangular con chaflanes redondeados sin descentrado en el conducto de salida (sin offset). Se comentarán los principales aspectos a tener en cuenta en la generación del resto de geometrías.

Dado que los modelos a ensayar no pueden ser revolucionados, a excepción del caso de cámara del catalizador circular sin offset, ya que las secciones son rectangulares y triangulares, es necesario

realizar una sucesión de extrusiones de los 5 cuerpos que forman el catalizador: conducto circular de entrada, entrada a la cámara del catalizador, cámara del catalizador, salida de la cámara del catalizador y conducto circular de salida. La cámara del catalizador está dividida en estas tres partes, porque se quiere modelar sólo en su parte central el monolito, dejando una parte de entrada y de salida únicamente con aire.

Antes de comenzar a dibujar, es conveniente asegurarse, ya dentro del módulo “DesignModeler” de “Geometry”, que la unidad de medida lineal son metros y la angular grados. Para ello dentro de la pestaña “Units” de la barra de herramientas, se deberá comprobar que está seleccionada la opción “Meter” y “Degree”:

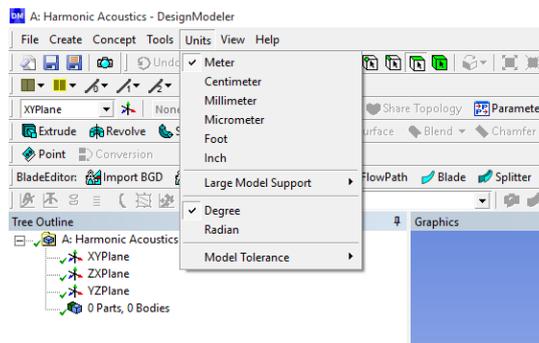


Imagen 35. Definición de unidad de medida en Design Modeler

Se va a comenzar creando un boceto (“sketch”) que contenga la sección circular, que luego será extruida para generar el conducto de entrada. Para ello, se va a posicionar el sketch en el plano “YZ”. Existen dos formas de crear el sketch orientado: haciendo click en el árbol sobre el plano en el que se quiere ubicar dicho sketch y posteriormente en el comando “New Sketch”, se vinculará el nuevo sketch al plano que se haya seleccionado:

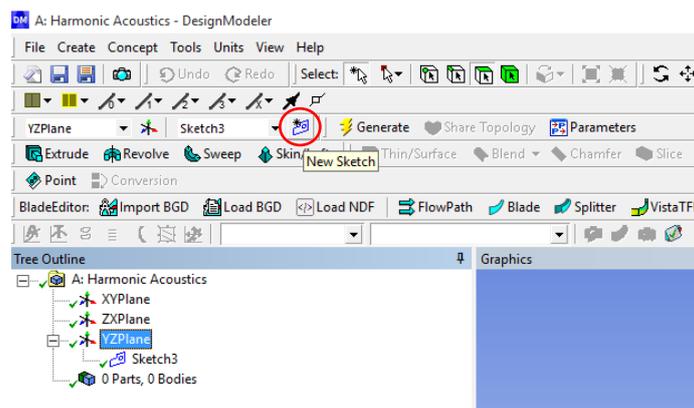


Imagen 36. Comando “New Sketch”

La segunda, consiste en hacer click sobre el eje normal al plano que se quiera utilizar como base del sketch en el compás de ejes coordenados que aparece en la parte inferior derecha de la zona gráfica, en este caso el eje “X”, y luego seleccionar el comando de “New Sketch” como en el caso anterior. La representación gráfica en el árbol quedará de la misma forma que en el caso anterior.

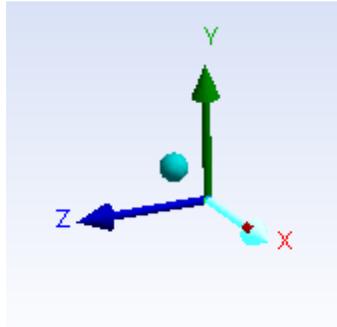


Imagen 37. Compás o sistema de ejes coordenados

Para trabajar de manera normal al plano y dibujar de manera más cómoda, se hará click en el eje normal al plano de trabajo como se ha descrito anteriormente, o se seleccionará el sketch en el árbol y se hará click sobre el comando “Look at Face/Plane/Sketch”.

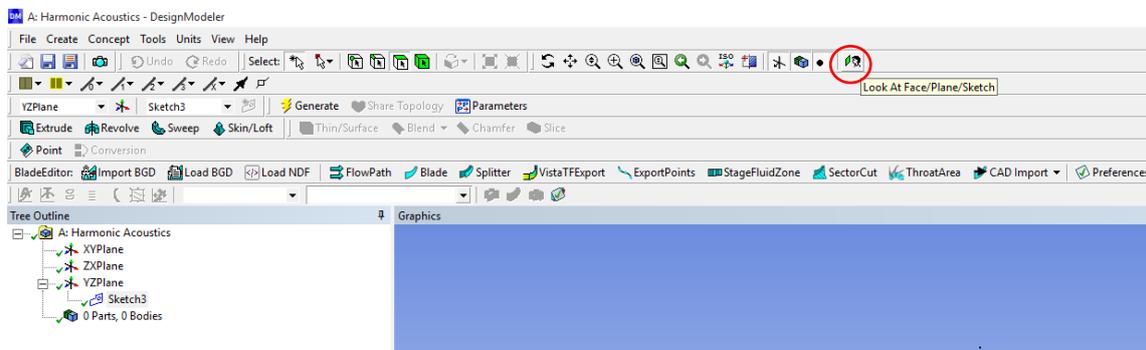


Imagen 38. Comando "Look at Face/Plane/Sketch" para trabajar de forma normal al elemento de trabajo

Ahora se creará una forma geométrica tipo “Circle”. Se encuentra dentro de la pestaña “Sketching” en la lista “Draw”. Una vez seleccionada esta forma geométrica, se desplaza el cursor hacia la zona gráfica y con objeto de centrar la circunferencia con el origen del sistema de coordenadas, se aproximará este hacia el centro, en un determinado momento aparece una “P”, esto simboliza que existe un punto, el punto de origen de coordenadas, ya que no se ha creado ningún otro.

Desarrollo e implementación de metodologías numéricas de caracterización del comportamiento acústico de catalizadores de MCIA mediante elementos finitos

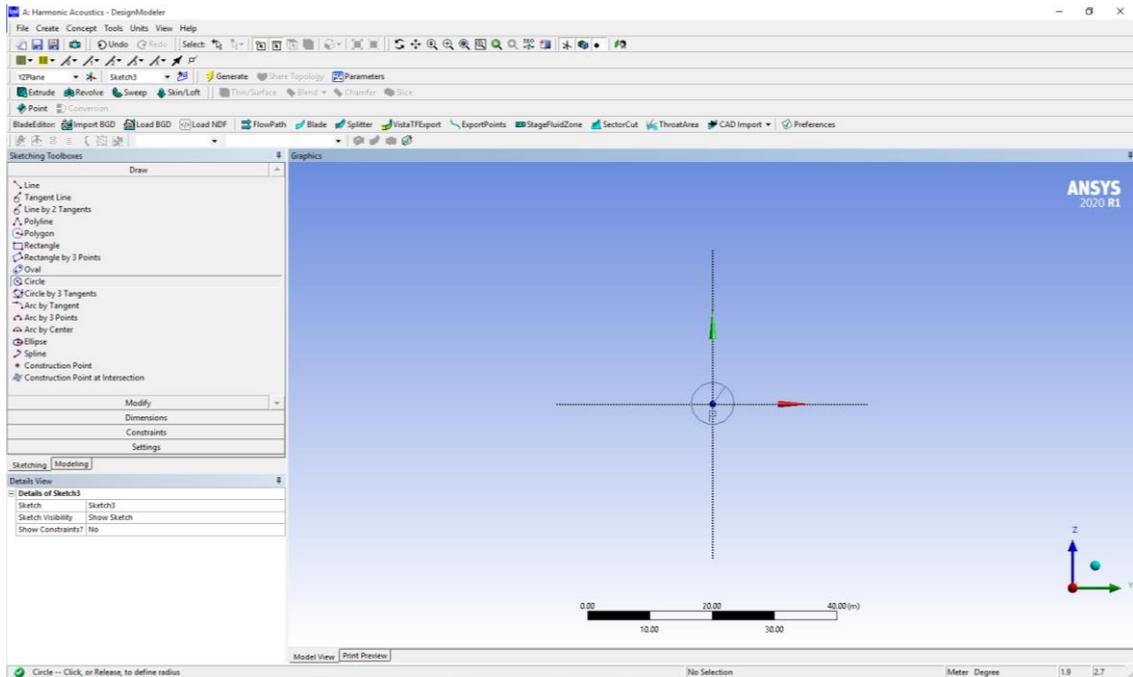


Imagen 39. Generación de circunferencia centrada en el origen de coordenadas en Design Modeler

Se hace click en cualquier punto de la zona de trabajo y la circunferencia es creada. Para definirla, es necesario acotar su radio. Para ello, se selecciona la lista “Dimensions” dentro de “Sketching” y se pincha sobre la opción “Radius”. Se pasa a la ventana gráfica y se hace click sobre el contorno de la circunferencia, apareciendo una línea de cota con un nombre característico en la zona gráfica y una nueva dimensión en los detalles del sketch en el que se está trabajando. Para asignar al radio el valor deseado, se hará click en el cuadrado que contiene el valor del mismo, al lado de su nombre y se introducirá el valor deseado.

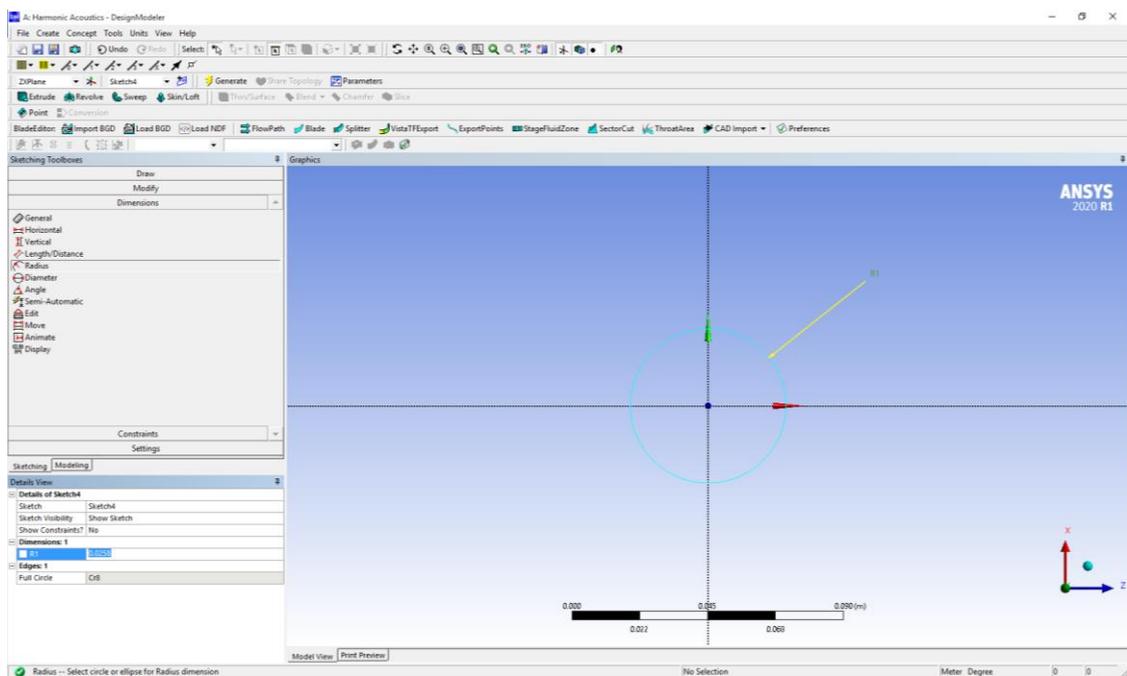


Imagen 40. Creación de cotas y definición de geometría

El color del contorno de la geometría dará información acerca de si la misma está completamente definida (contorno de color azul) o si, por el contrario, falta de definir alguna medida o restricción y la geometría no está definida (contorno de color gris verdoso). Es importante asegurarse de que los sketches están completamente definidos antes de aplicar operaciones de creación de geometría 3D.

Con el objetivo de parametrizar el diseño, de manera que, si se quiere modificar el valor de alguna medida no tener que volver a construir de nuevo el dibujo, se creará un parámetro para cada cota. Para ello, se hace click sobre la caja existente al lado del nombre de la cota en “Details View” y se le otorga el nombre deseado, en este caso “R1”. Al hacer click sobre “OK”, la caja que acompaña al nombre de la cota, estará ahora rellena con una “P” que indicará que esa medida está parametrizada.

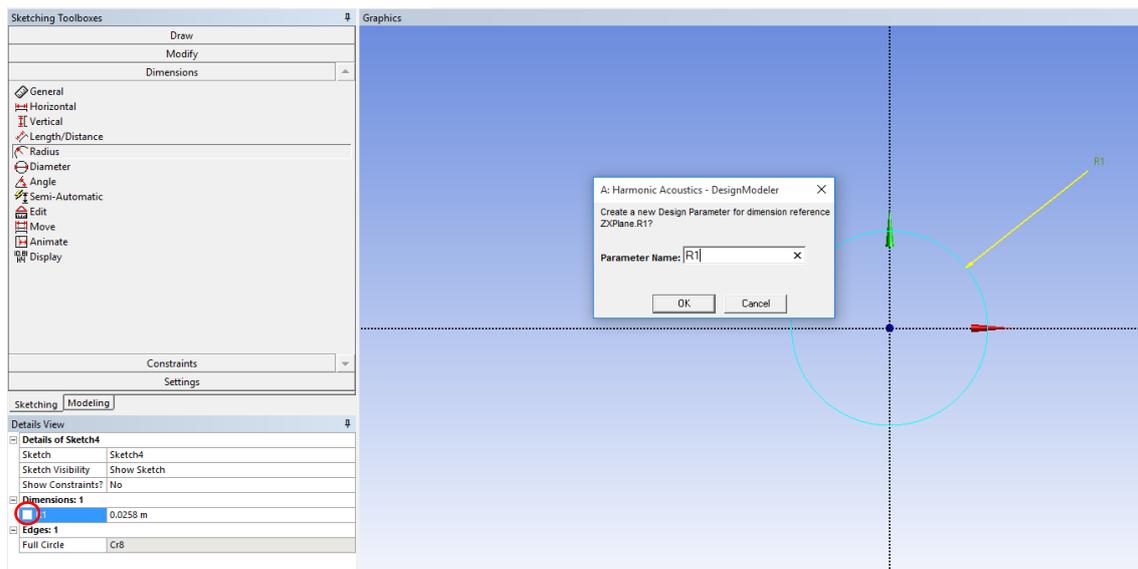


Imagen 41. Parametrización de cotas

Trabajando de esta manera, si se quiere modificar el valor de cualquier medida, bastará con hacer click sobre “Parameters”. Entonces, se abrirá una ventana debajo de la ventana gráfica con una lista de todos los parámetros del modelo. Para cambiar el valor de uno, bastará con hacer click encima del valor actual e introducir el nuevo valor y pulsar intro. Al hacerlo, aparecerá el icono de un rayo a la izquierda del nombre del parámetro, que indicará que el modelo no está actualizado. Por lo tanto, es necesario hacer click sobre “Generate” y el valor modificado, en este caso el del radio “R1” se actualizará a su nuevo valor.

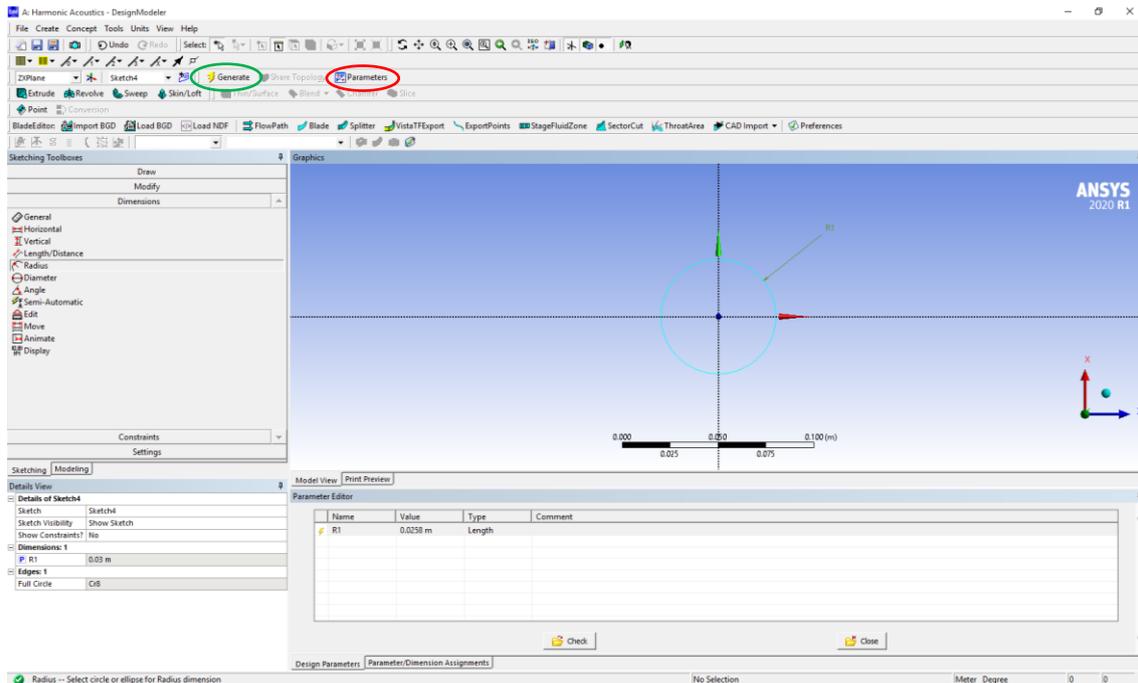


Imagen 42. Procedimiento para la variación de parámetros y actualización de bocetos

Debido a la simetría con respecto al plano central longitudinal de todos los casos de estudio, se va a dibujar únicamente la mitad de la geometría.

Por lo tanto, es necesario convertir la circunferencia creada en una semicircunferencia. Para ello, en primer lugar, se creará una línea ("Line"), dentro de "Sketching" y en la lista "Draw". Esta línea debe ser coincidente con el eje vertical del sistema de coordenadas, para asegurar que la línea se crea sobre este eje al acercar el cursor a él, llega un momento en el que aparece una "C" que indicará que existe esta coincidencia. Se pincha en cualquier punto del eje y se arrastra hacia abajo el cursor creando una línea, esta debe de ser vertical, por lo que es necesario que aparezca la letra "V" en la línea. Se hace click sobre cualquier otro punto del eje vertical y la línea es creada.

Desarrollo e implementación de metodologías numéricas de caracterización del comportamiento acústico de catalizadores de MCIA mediante elementos finitos

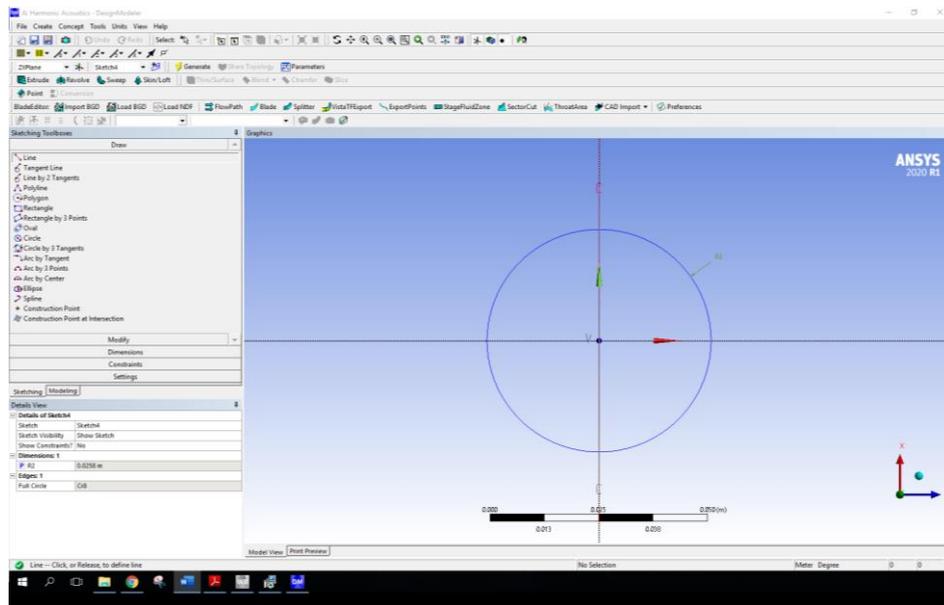


Imagen 43. Creación de línea recta coincidente con el eje vertical

Ahora es necesario hacer coincidir los puntos de esta línea con el contorno de la circunferencia. Para ello, se abre la lista “Constraints” dentro de “Sketching” y se selecciona la opción “Coincident”. Se acercará el cursor a cada uno de los puntos y un icono mostrará que el cursor está situado sobre el punto, se hace click y se hace un nuevo click sobre el contorno de la circunferencia. El punto pasa a ser coincidente con esta última.

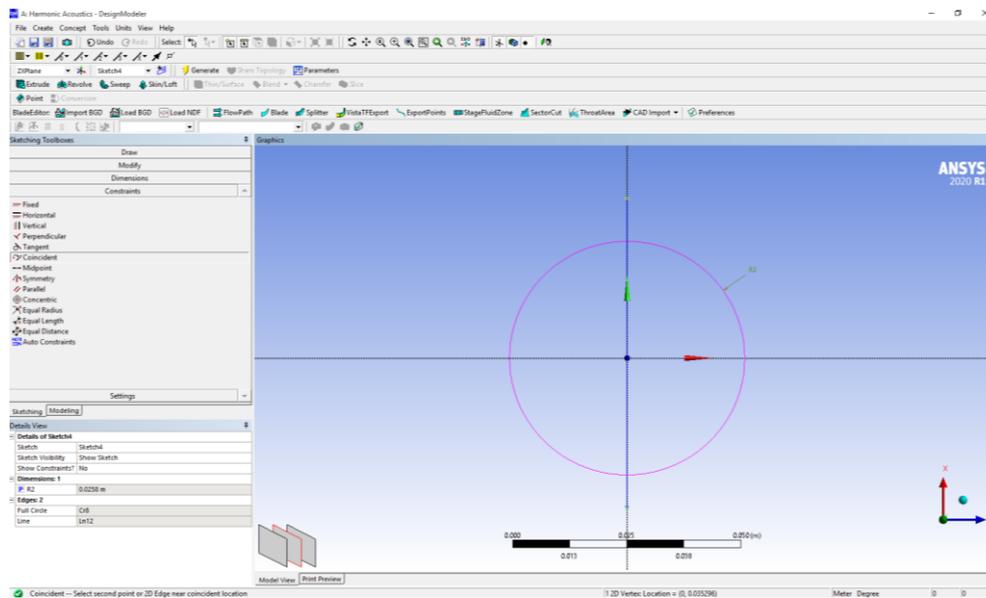


Imagen 44. Creación de restricciones de coincidencia

El último paso consiste en cortar el contorno no necesario. Para ello se selecciona la herramienta “Trim” dentro de la lista “Modify” de “Sketching”. Y se hace click sobre cada uno de los dos cuartos de circunferencia que se quieren borrar.

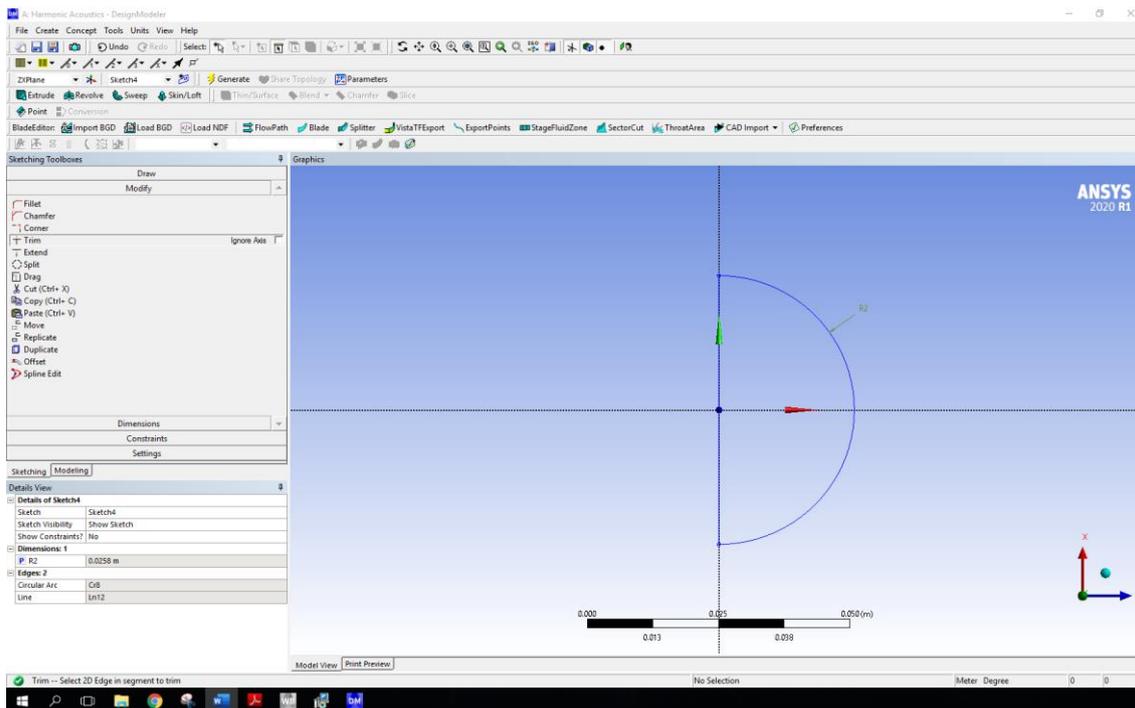


Imagen 45. Resultado de la sección semicircular completamente definida

Creado y definido el sketch (contorno de color azul oscuro), ya se puede extruir. Para ello, se hará click sobre el comando “Extrude” y este, en la ventana “Details View”, pedirá una geometría para extruir en el apartado “Geometry”. Se seleccionará el sketch que se desea extruir en el árbol y se hace click sobre “Apply”. En “Operation”, se seleccionará la opción “Add Frozen”, con esta opción se crean sólidos independientes. Por último, falta determinar la profundidad de la extrusión, en el apartado “Depth”. Se introduce el valor deseado como en cualquier otra cota y se parametriza esta dimensión como “L1”.

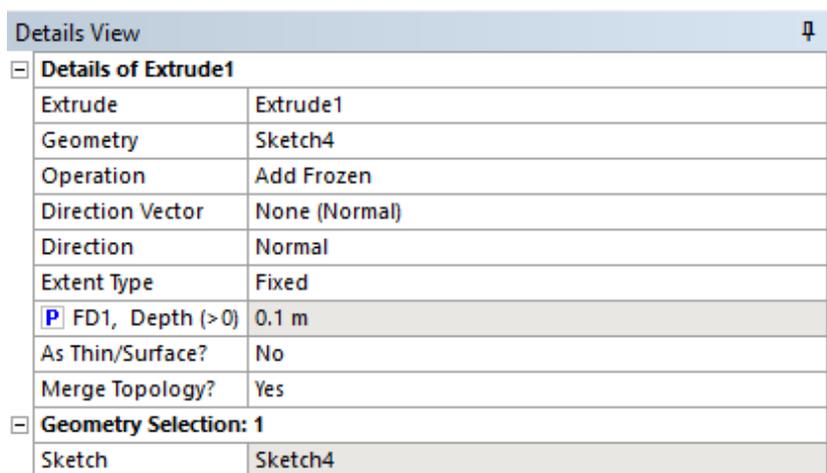


Imagen 46. Ventana de detalles de la extrusión

Una vez definida la extrusión, esta aparece en el árbol acompañada del símbolo del rayo, lo que quiere decir que el programa está esperando una actualización del proyecto. Se hará click sobre “Generate” y la extrusión correspondiente al conducto de entrada queda representada en la ventana gráfica.

A continuación del conducto de entrada, se encuentra la cámara del catalizador, con su sección rectangular achaflanada. Para asegurar la continuidad del modelo, es necesario crear el sketch que defina esta sección sobre la superficie final del conducto de entrada. Para ello, lo primero es definir un plano sobre el que poder crear el sketch en dicha superficie. Para ello se selecciona el comando “Selection Filter: Faces” y se hace click sobre dicha cara.

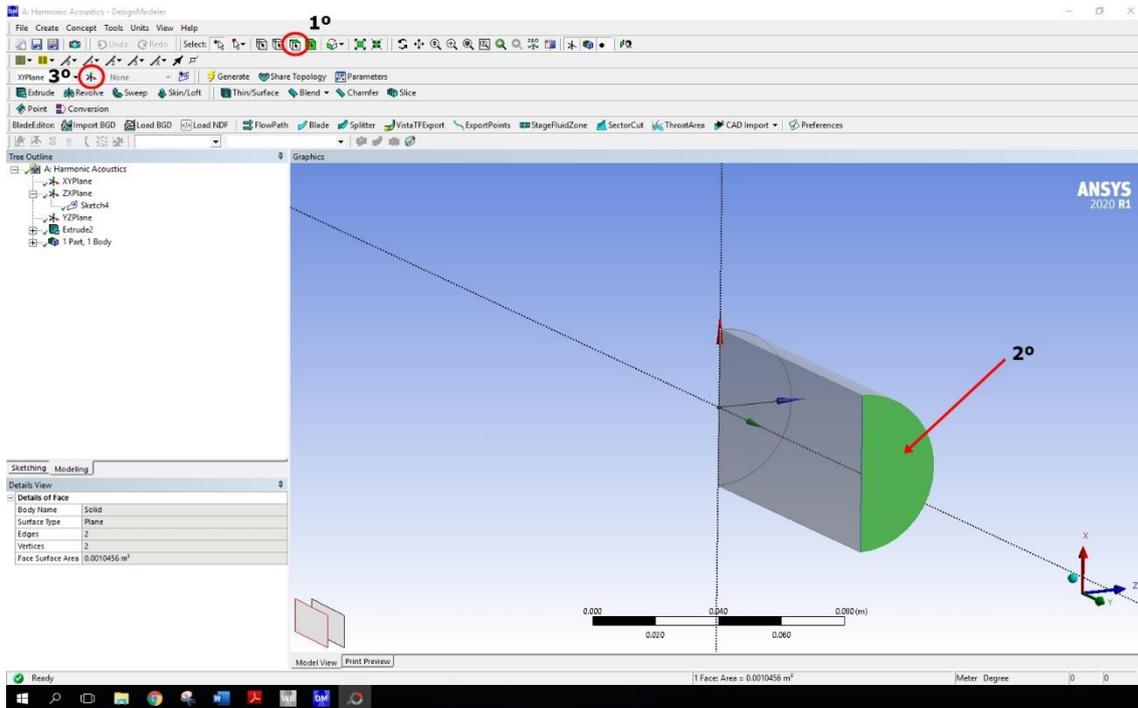


Imagen 47. Procedimiento para crear un nuevo plano sobre una cara ya existente

A continuación, se hace click sobre el comando “New Plane” y se creará un nuevo plano en el árbol, a continuación de la última operación. Se hace click sobre “Generate” y el plano ya puede ser utilizado.

Se vuelve a poner una vista normal al plano para trabajar de manera más cómoda y se genera el sketch que definirá la sección (en este caso rectangular con chaflanes circulares) de la cámara del catalizador.

Una vez creado un nuevo sketch en este nuevo plano, se selecciona la pestaña “Sketching” para dibujar la sección. Dentro de “Draw” se selecciona la opción “Rectangle”. En la ventana gráfica, con “Rectangle” seleccionado, se aproxima el cursor al eje vertical hasta encontrar coincidencia “C”, entonces se pincha y se genera un rectángulo cualquiera.

Para definir este rectángulo, se comenzará aplicando una simetría con respecto al eje horizontal. Para ello se selecciona la opción “Symmetry” dentro de la lista “Constraints”. Una vez pinchada la condición que se quiere aplicar, en la zona inferior de la interfaz del programa se indica lo que está esperando el comando seleccionado. El comando está esperando una línea o eje que sirva como referencia para aplicar la condición de simetría.

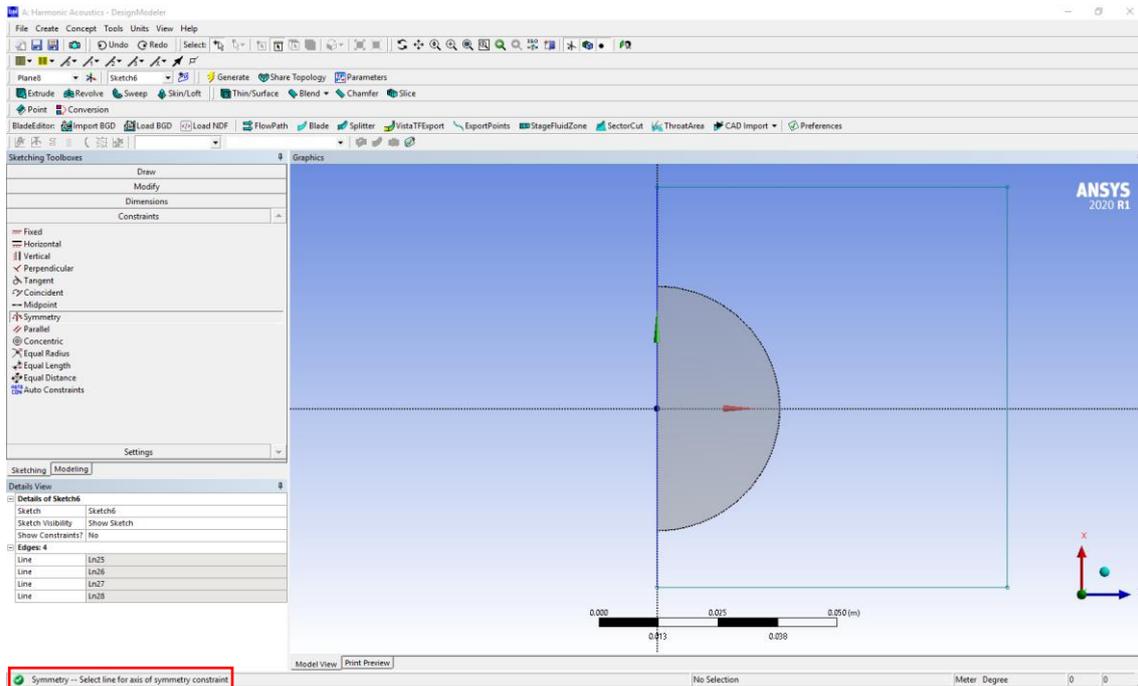


Imagen 48. Texto informativo sobre la información que necesita un comando para modificar la geometría de la manera deseada

Se pincha el eje horizontal (en este caso eje Z). Se puede observar como la ventana de información del comando ha cambiado pidiendo ahora la selección del primer punto de la simetría. Se selecciona uno de los puntos de la línea del rectángulo sobre el eje vertical (si se seleccionan los puntos que no están sobre el eje vertical, posteriormente al aplicar el chaflán, al desaparecer estos puntos, desaparecerá la condición de simetría) y posteriormente el opuesto.

Solo queda asignar las dimensiones del rectángulo, para ello se generarán dos cotas, una para la altura y otra para la semianchura. Puede usarse para ambas el comando “Length/Distance” dentro de “Dimensions”. Se introducen los valores correspondientes de ambas dimensiones y se parametrizan.

Únicamente falta realizar el chaflán circular. Para ello en la herramienta “Fillet” dentro de “Modify” se introduce el valor del radio antes de pinchar en el comando “Fillet”.

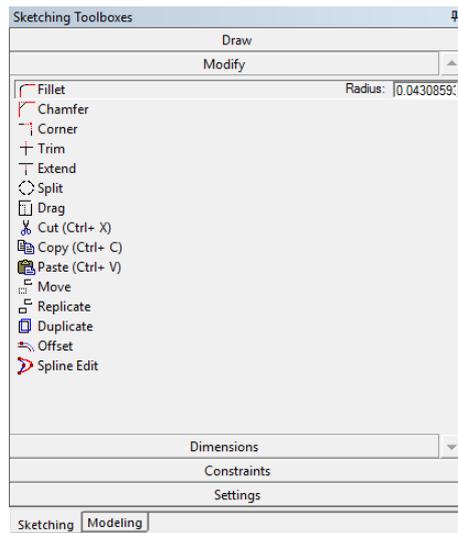


Imagen 49. Selección del comando "Fillet" y especificación del radio de redondeo

Se pincha sobre la operación "Fillet" y el comando pide una línea o punto cercana al chaflán que se quiere definir. Se puede pinchar sobre cada uno de los vértices que se quieren eliminar para crear el chaflán o sobre las dos líneas entre las que se quiere insertar el mismo. Puede observarse como el boceto ha pasado no estar completamente definido, arco de los chaflanes y líneas horizontales en color gris verdoso. Es necesario acotar el radio de uno de los chaflanes, en "Dimensions" seleccionando la opción "Radius" y pinchando en el contorno de uno de los arcos, con acotar uno es suficiente, ya que el otro está vinculado. El valor del radio que se muestra en la ventana "Details View" es el correcto, ya que se ha definido en la herramienta "Fillet", por lo que se parametriza este valor de radio. En el caso de que la simetría respecto al eje horizontal se haya creado tomando los puntos de los vértices del rectángulo como referencia, se observará que el boceto sigue sin estar definido, debido a que al aplicar el chaflán (fillet) estos puntos han desaparecido, y con ellos la condición de simetría. Bastará con aplicar de nuevo la simetría entre los puntos interiores del rectángulo, los coincidentes con el eje vertical. Se observa como el sketch está ahora completamente definido (contorno en azul oscuro).

Para generar la segunda extrusión, se cambia a la pestaña "Modeling" y se selecciona la herramienta "Extrude", se selecciona el sketch del perfil rectangular en el apartado "Geometry" de los detalles de vista de la nueva extrusión, "Add Frozen" en "Operation" y la longitud de la entrada a la cámara del catalizador en "Depth", esta longitud será parametrizada. Una vez definida la extrusión, bastará con hacer click sobre "Generate" y se observará en la ventana gráfica.

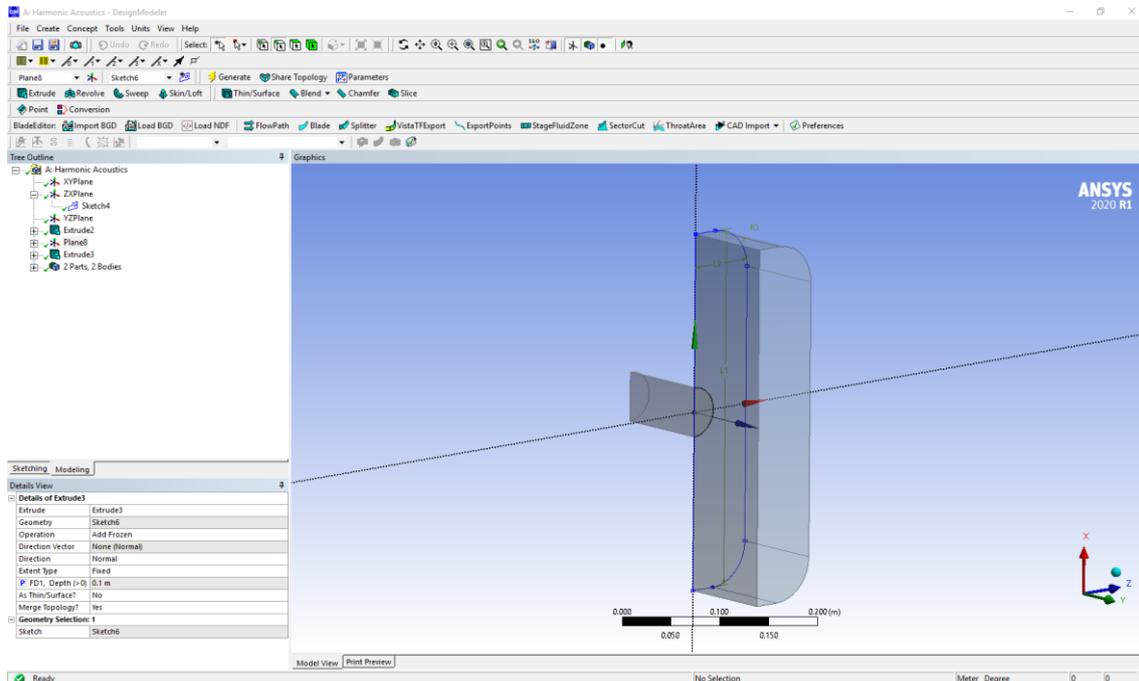


Imagen 50. Generación de la segunda extrusión correspondiente a la entrada a la cámara del catalizador

Ahora es el momento de generar la extrusión correspondiente a la parte central de la cámara del catalizador, donde se albergará el monolito. Dado que la sección es similar a la de la extrusión anterior, no es necesario generar otro sketch. Se vuelve a seleccionar el comando “Selection Filter: Faces”, se hace click sobre la superficie final de la extrusión anterior y se selecciona el comando “Extrude”. En la ventana de detalles de la extrusión, se pide una geometría, se hace click directamente sobre “Apply” ya que está seleccionada la cara final de la extrusión anterior. A continuación, se selecciona la opción “Add Frozen”. Se selecciona el apartado de “Direction Vector”, se pincha sobre cualquiera de los planos coordenados mostrado en el árbol para que aparezcan en la ventana gráfica todos los ejes coordenados, y se pincha sobre el eje normal a la extrusión (en este caso el eje Y) y se hace click en “Apply”. Por último, se introduce la profundidad de la extrusión en “Depth” y se parametriza el valor. Al hacer click sobre “Generate” se representa esta nueva extrusión.

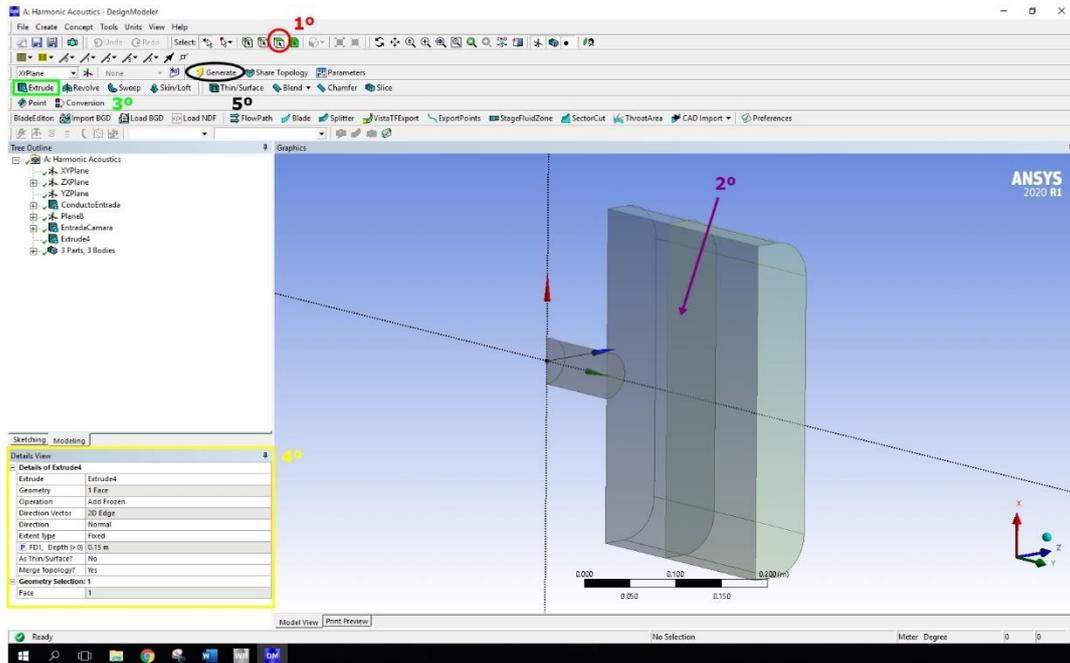


Imagen 51. Extrusión a partir de una geometría ya creada

Se procede de manera similar para la extrusión de la salida de la cámara del catalizador, seleccionando como geometría de referencia la cara final de la parte central de la cámara.

Sólo queda por generar la extrusión correspondiente al conducto de salida. Es necesario crear un nuevo plano, donde dibujar nuevamente el sketch de la semicircunferencia que definirá este conducto. Para ello se crea un plano con la herramienta “New Plane” en la cara final de la cámara del catalizador, para así garantizar la continuidad en la geometría 3D. Se crea un “Sketch” en ese plano y se dibuja la sección del conducto de manera similar a como se ha hecho en el conducto de entrada. Una vez creado y restringido el sketch, se aplica la extrusión, parametrizando todas aquellas dimensiones necesarias (radio de la semicircunferencia y profundidad de la extrusión). El modelo 3D queda de la siguiente forma:

Desarrollo e implementación de metodologías numéricas de caracterización del comportamiento acústico de catalizadores de MCIA mediante elementos finitos

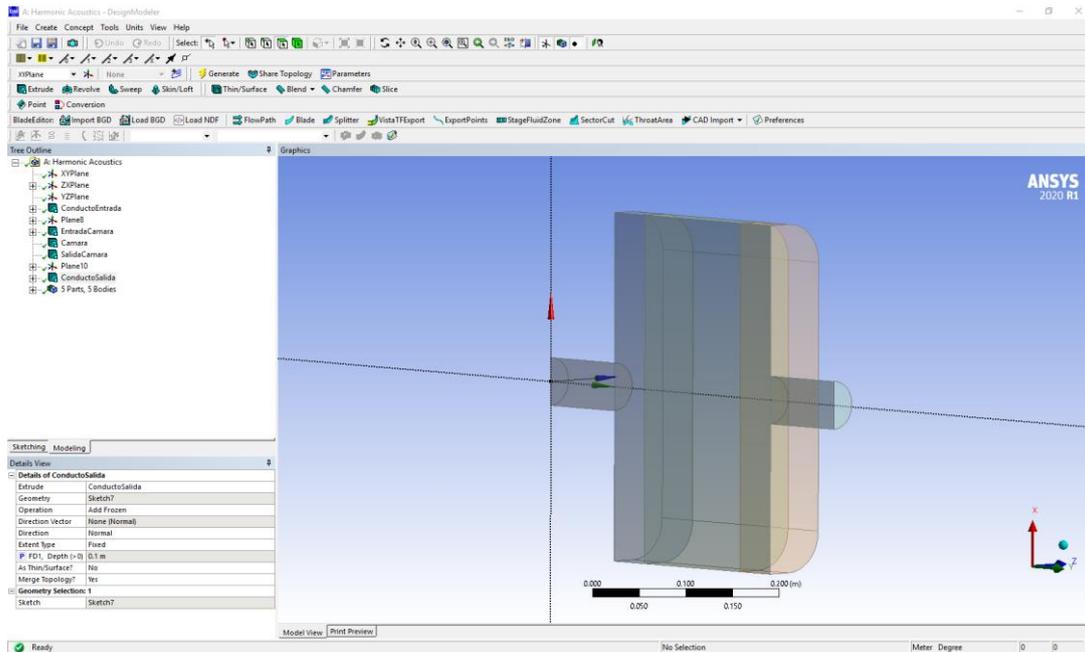


Imagen 52. Modelo 3D primitivo constituido por las cinco extrusiones que lo definen

La lista de parámetros queda de la siguiente manera:

Name	Value	Type	Comment
✓ R1	0.0258 m	Length	
✓ L1	0.1 m	Length	
✓ ALTURA_SECCION_RECT	0.37617 m	Length	
✓ SEMIANCHURA_SECCION_RECT	0.07 m	Length	
✓ RFILLET	0.043086 m	Length	
✓ L2	0.0475 m	Length	
✓ L3	0.15 m	Length	
✓ L4	0.0475 m	Length	
✓ R2	0.0258 m	Length	
✓ L5	0.1 m	Length	

Imagen 53. Lista de parámetros del modelo 3D (Catalizador con sección rectangular y 0.15 m de longitud de monolito)

La creación del resto de geometrías de cámara es similar a la anterior. Si bien la de la sección triangular puede ser algo más compleja, a continuación, se adjunta el sketch para crear dicha geometría:

Desarrollo e implementación de metodologías numéricas de caracterización del comportamiento acústico de catalizadores de MCIA mediante elementos finitos

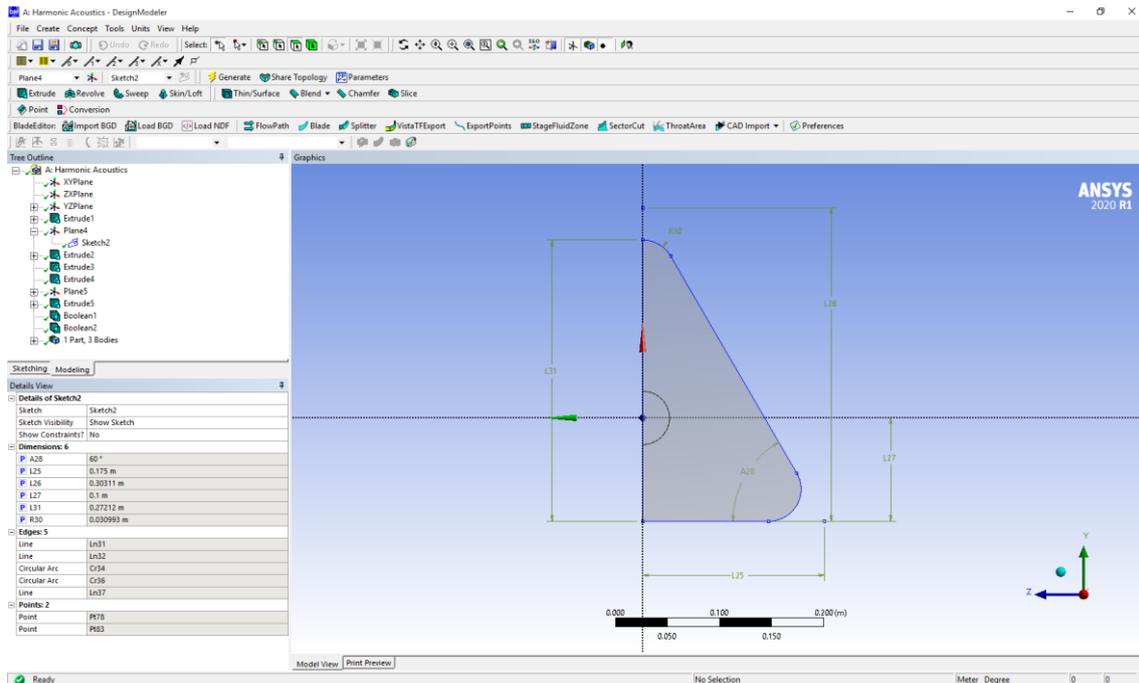


Imagen 54. Detalles del boceto que define la sección triangular de cámara del catalizador

Para generar los modelos con el conducto de salida descentrado (con offset), ANSYS no permite la creación de una cota con valor 0, por lo que no se puede crear una cota desde el centro del origen de coordenadas al centro del conducto de salida y parametrizarlo, ya que cuando se vaya a representar un modelo de catalizador sin offset, al actualizar el valor de esta cota a 0, ANSYS va a dar un error.

Por tanto, en estos casos con offset, lo único que hay que modificar es el último sketch, correspondiente a la sección del conducto de salida. A la hora de dibujar la forma "Circle", en vez de buscar la coincidencia de su centro con el origen de coordenadas, "P", se buscará únicamente la coincidencia de este centro con el eje vertical "C" y se dibujará la circunferencia. Se cortará de manera similar a lo descrito en la primera extrusión para generar la semicircunferencia y se acotará. En este caso, no solo hace falta la cota del radio de la semicircunferencia, sino que también hará falta la distancia vertical desde el eje horizontal hasta el centro de la semicircunferencia. Ambas dimensiones serán parametrizadas.

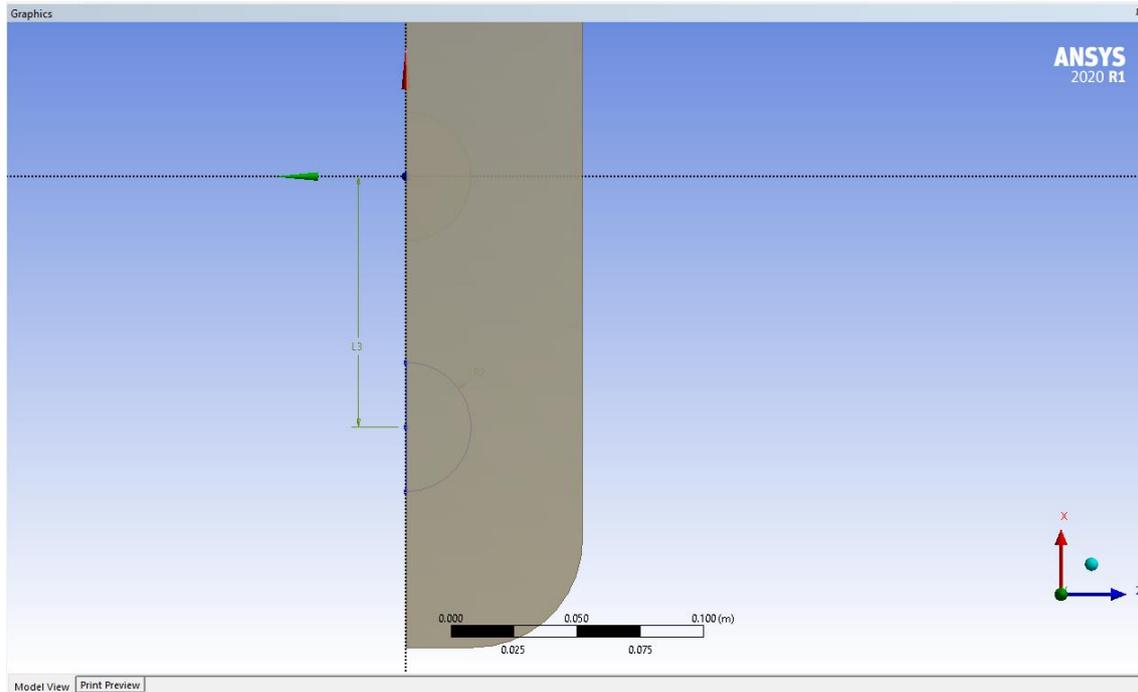


Imagen 55. Generación de offset o descentrado de los conductos de entrada y salida

Ya está generada toda la geometría 3D que modela el catalizador. Sin embargo, el modelo tiene 5 cuerpos totalmente independientes, es decir, 5 regiones diferentes en cuanto a comportamiento acústico. En realidad, únicamente existen 3 regiones diferenciadas, ya que el catalizador se va a modelar con respecto a su comportamiento acústico de la forma: aire-monolito-aire. La primera región de aire será la correspondiente a la unión de las extrusiones que generan el conducto circular de entrada y la entrada de la cámara. La región del monolito será la correspondiente al cuerpo central. Mientras que la segunda región de aire será la correspondiente a la unión de las extrusiones que generan la salida de la cámara y el conducto circular de salida. Para unir los diferentes cuerpos o extrusiones en WORKBENCH se procede de la siguiente forma.

En la pestaña “Create” se selecciona la opción “Boolean”.

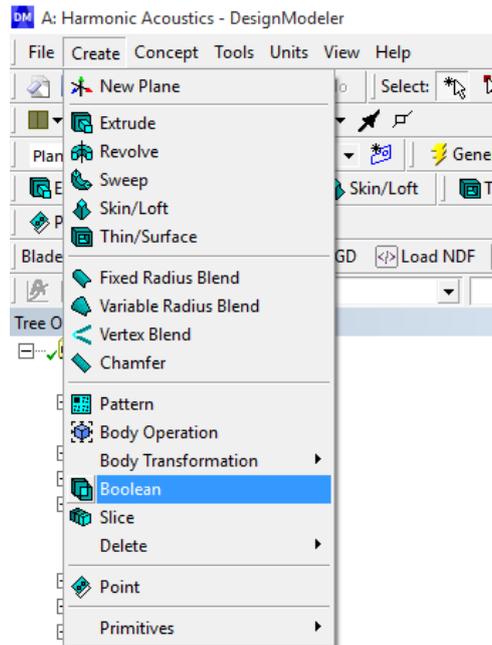


Imagen 56. Operación "Boolean" que permite unir varias extrusiones en un único cuerpo

Por defecto la "Operation" de la herramienta "Boolean" es "Unite", que es la requerida para el propósito de unir los diferentes cuerpos en uno mismo. En el caso que esté marcada por defecto otra opción en "Operation", se seleccionará "Unite".



Imagen 57. Ventana de detalles de la operación "Boolean" para la definición de esta operación

Por tanto, únicamente falta por introducir al comando los cuerpos a los que se quiere aplicar esa operación. Se hace click sobre "Tool Bodies" y se procede a seleccionar los cuerpos que se quieren unir. Se selecciona el primero (en este caso el conducto circular de entrada) se pulsa "Ctrl" para realizar una selección múltiple, y sin soltar esta tecla se selecciona el segundo cuerpo (en este caso la entrada a la cámara del catalizador).

Desarrollo e implementación de metodologías numéricas de caracterización del comportamiento acústico de catalizadores de MCIA mediante elementos finitos

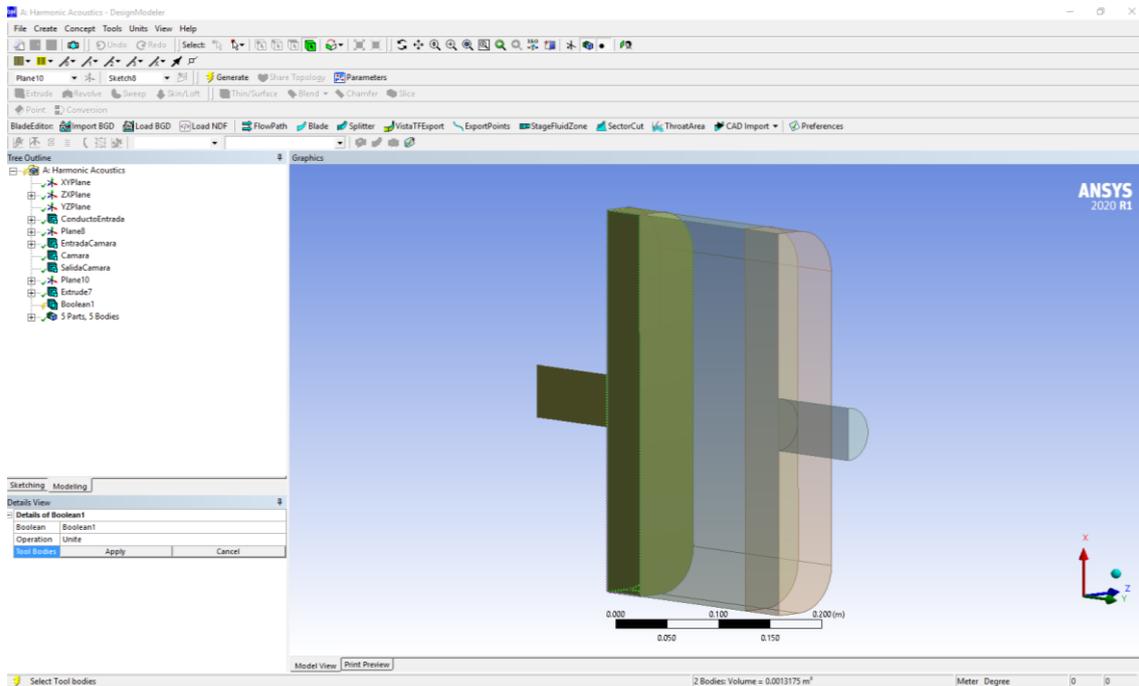


Imagen 58. Selección de las diferentes extrusiones que quieren agruparse en un único cuerpo mediante "Boolean"

Se hace click sobre "Apply" y a continuación sobre "Generate" y la operación booleana de unión de cuerpos será generada.

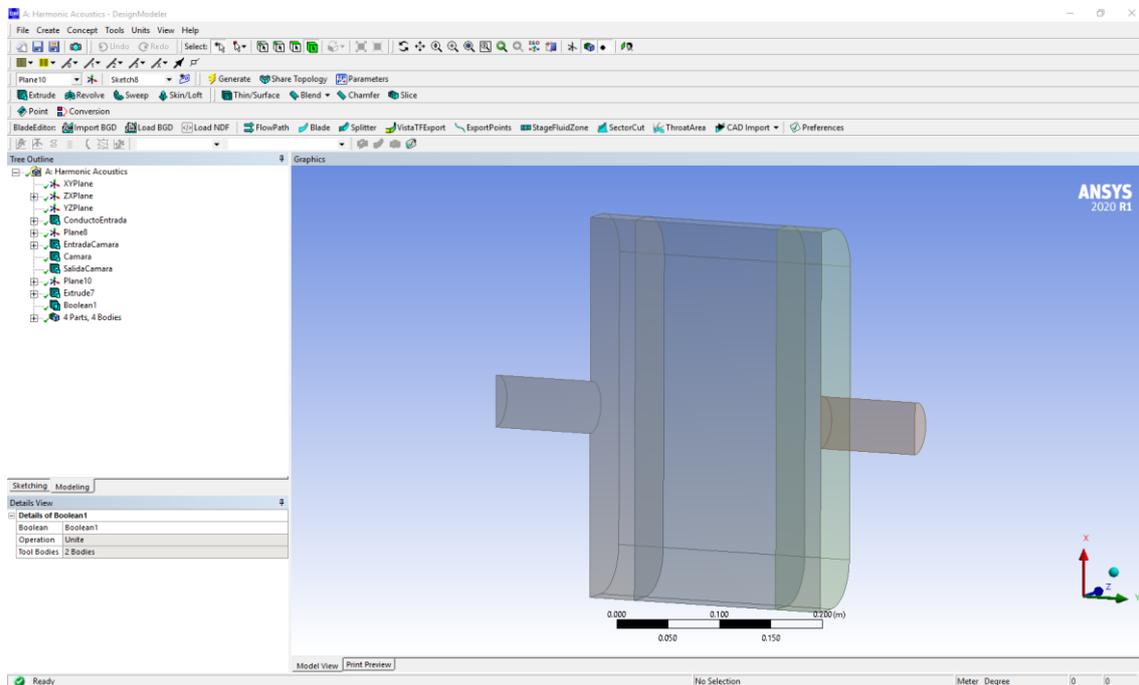


Imagen 59. Modelo con conducto de entrada y entrada al catalizador unidos

Se puede observar en el árbol que indica que el modelo está formado ahora por 4 cuerpos. De la misma forma en la ventana gráfica se ve como se ha realizado la unión.

Se procede de manera similar a unir con la operación booleana los cuerpos de salida de la cámara del catalizador y de conducto de salida.

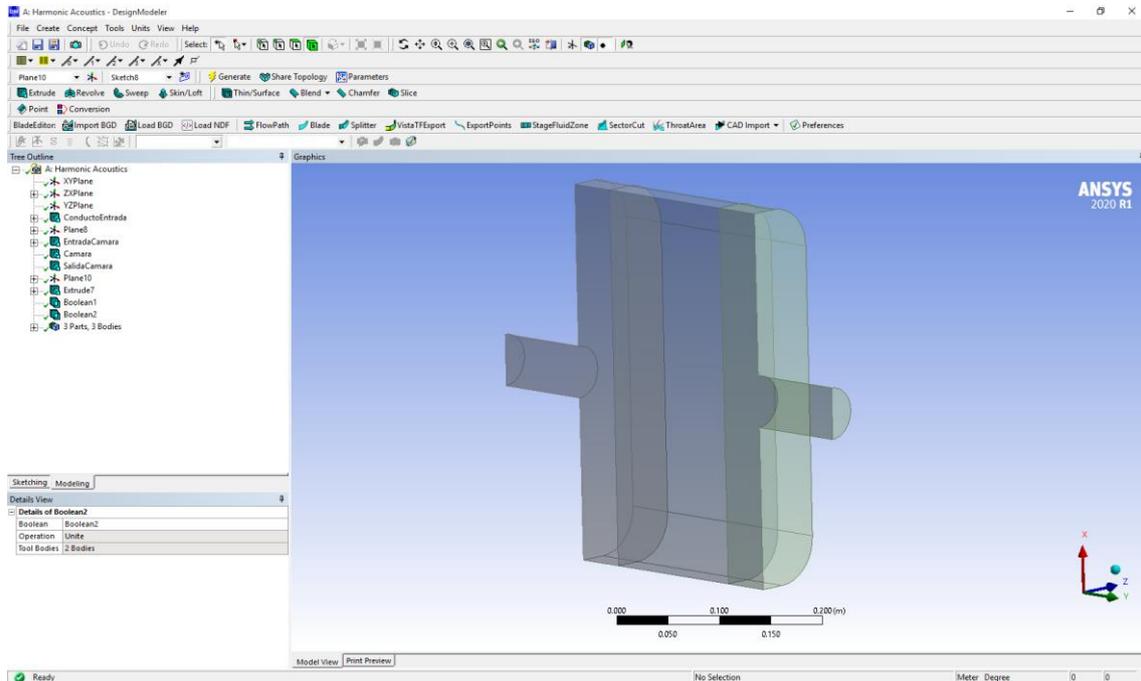


Imagen 60. Modelo con las extrusiones agrupadas en tres cuerpos

Para que el mallado sea continuo entre los diferentes cuerpos, se expandirán en el árbol los 3 parts o bodies que constituyen el modelo. A continuación, se pinchará sobre el primero (denominados como "Solid"), se pulsará la tecla "Ctrl" y manteniendo esta se seleccionarán los otros dos. Se hará click con el botón derecho del ratón sobre cualquiera de los "Solid" seleccionados y se seleccionará la opción "Form New Part". Ahora todos los cuerpos formarán parte de un único "Part"

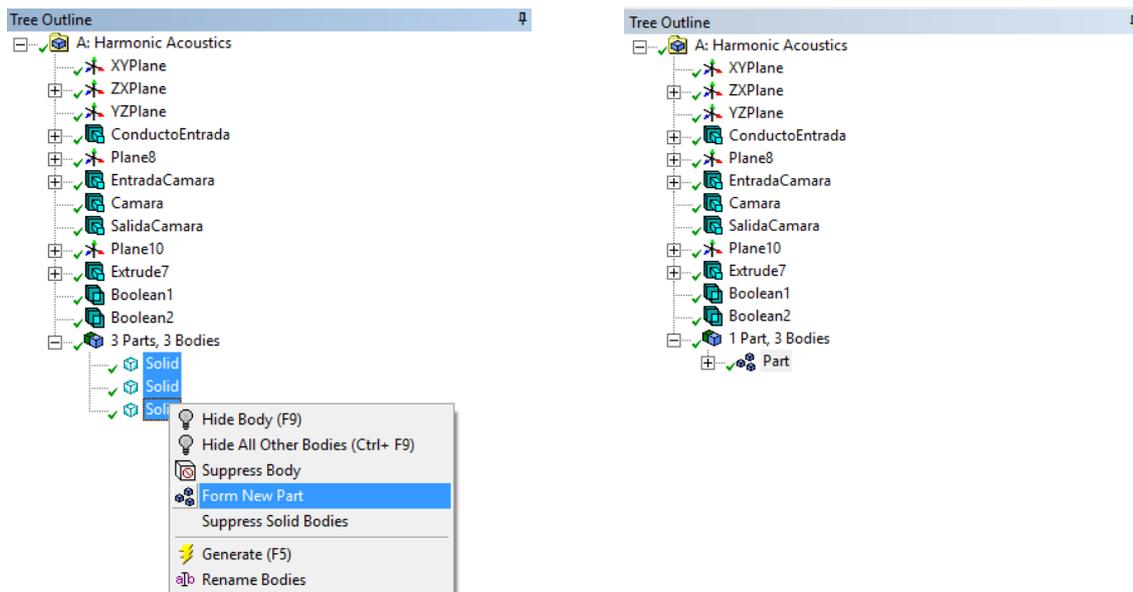


Imagen 61. Unión de los cuerpos en un único "Part" para conseguir un mallado continuo

Esta operación se realizará únicamente en los modelos con los conductos de entrada y salida alineados, sin offset. Ya que, en los modelos con offset, vincula los dos conductos, tanto de entrada como de salida deformando el mallado.

Aquí termina la generación de la geometría. Se cerrará la ventana del “Design Modeler”, volviendo así a la ventana principal de WORKBENCH.

4.2.3. Model

Siguiendo el esquema de proyecto del tipo “Harmonic Acoustics”, el siguiente bloque a definir es el denominado “Model”.

Como se ha comentado previamente, este bloque está destinado originalmente a definir el mallado. Sin embargo, permite sin salir del mismo, definir las condiciones de contorno del problema, establecer el cálculo particular que se quiere realizar y acotar la solución, así como los detalles del cálculo, y por último visualizar los resultados obtenidos. Ante esta posibilidad, se va a realizar todo el procedimiento restante sin salir del módulo “Model”.

Se entrará en dicho módulo haciendo doble click sobre su apartado en el árbol de proyecto. La interface de este módulo es de la siguiente forma:

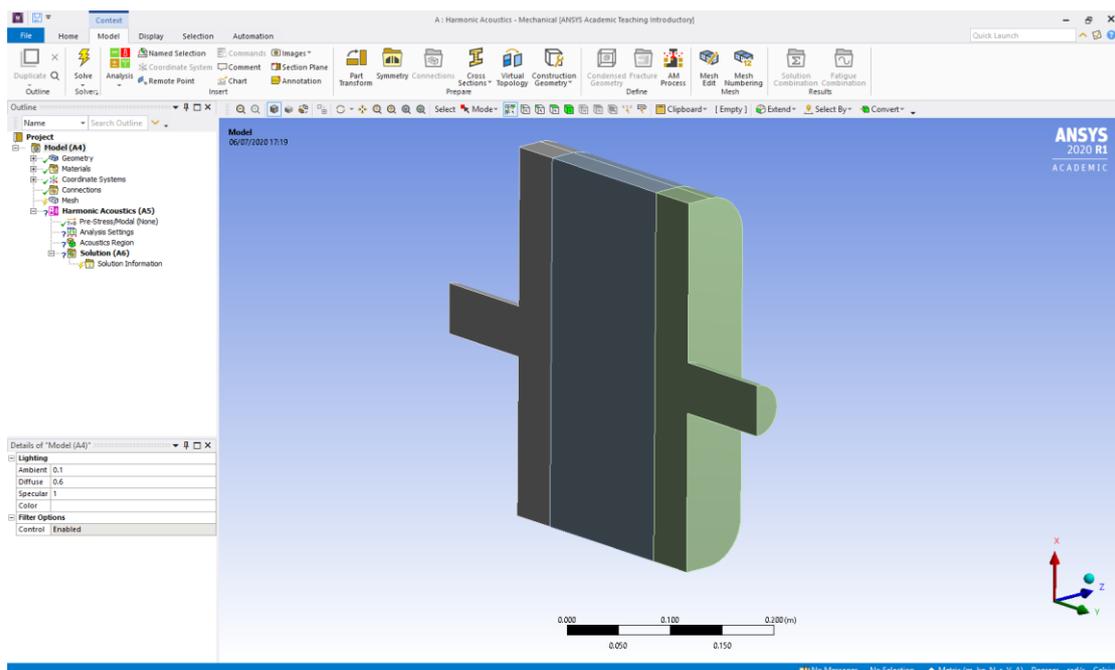


Imagen 62. Interfaz del módulo “Model”

Observando el árbol, se puede apreciar cómo están definidos todos los componentes hasta “Mesh”. A partir de este, se definirán desde este mismo módulo “Model”. Puede observarse como el entorno del módulo es similar al de “Geometry”, cambiando la barra de herramientas, que será particular para cada componente “Mesh”, “Harmonic Acoustics” y “Solution”. Detallándose cada una más adelante.

Antes de generar el mallado, es necesario aplicar a cada cuerpo el material que lo constituye. Para ello se expandirá la componente “Geometry” dentro del árbol y se volverá a expandir el “Part”, quedando visibles todos los sólidos que forman parte del modelo.

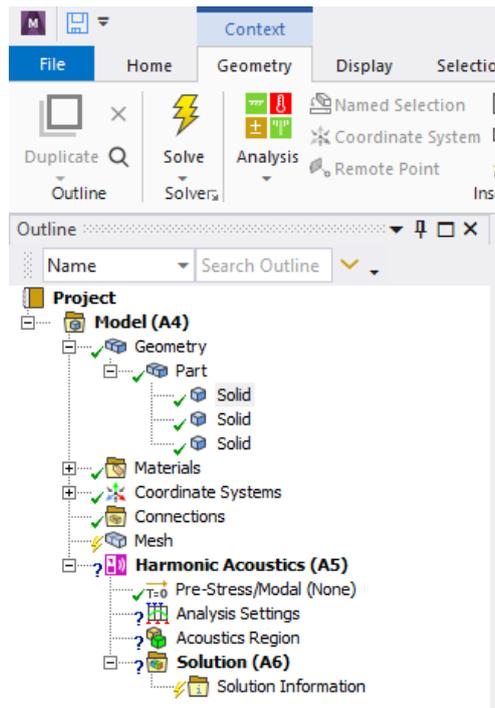


Imagen 63. Árbol del módulo "Model"

Para aplicar los materiales, se seleccionará cada sólido en el árbol, y se observará como la ventana de detalles (situada justo debajo del árbol) cambia y muestra ahora los detalles del sólido seleccionado. En el apartado "Material", concretamente en la opción "Assignment" se elegirá el material constituyente de ese sólido. En este caso se seleccionará el material "Aire" creado previamente a los 3 sólidos.

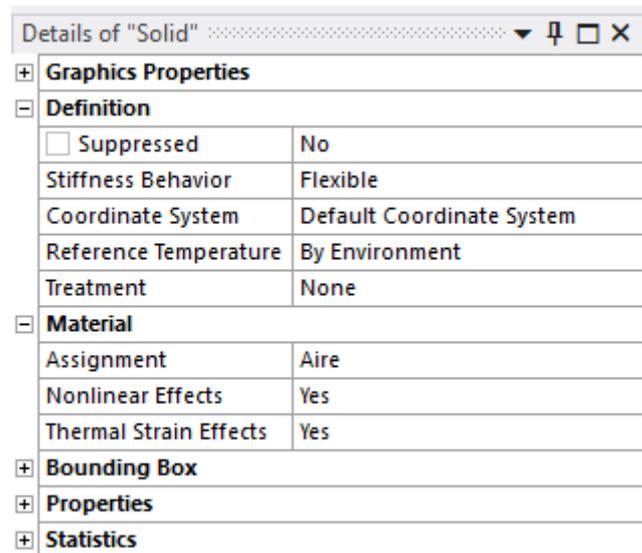


Imagen 64. Definición del material constituyente de cada "Solid"

Al "Solid" correspondiente al dominio del monolito también se le ha aplicado material aire, cuando en realidad no es así, ya que el material del mismo es el propio monolito con su estructura capilar. El material asignado aquí no va a influir en el resultado, ya que no se va a tener en cuenta, porque como

se explicará posteriormente, se va a modelar este dominio con una matriz de transferencia, que tendrá las características del material monolítico. Por lo que el material asignado en este sólido puede ser cualquiera, ya que va a ser reemplazado por la matriz de transferencia que simulará el comportamiento en la región del monolito.

Una vez asignado el material, se está en condiciones de definir el mallado del modelo.

4.2.3.1. Mesh

Haciendo click sobre el componente del árbol “Mesh”, se observará como la barra de herramientas cambia, estando formada ahora por todos los comandos que permiten configurar la malla.

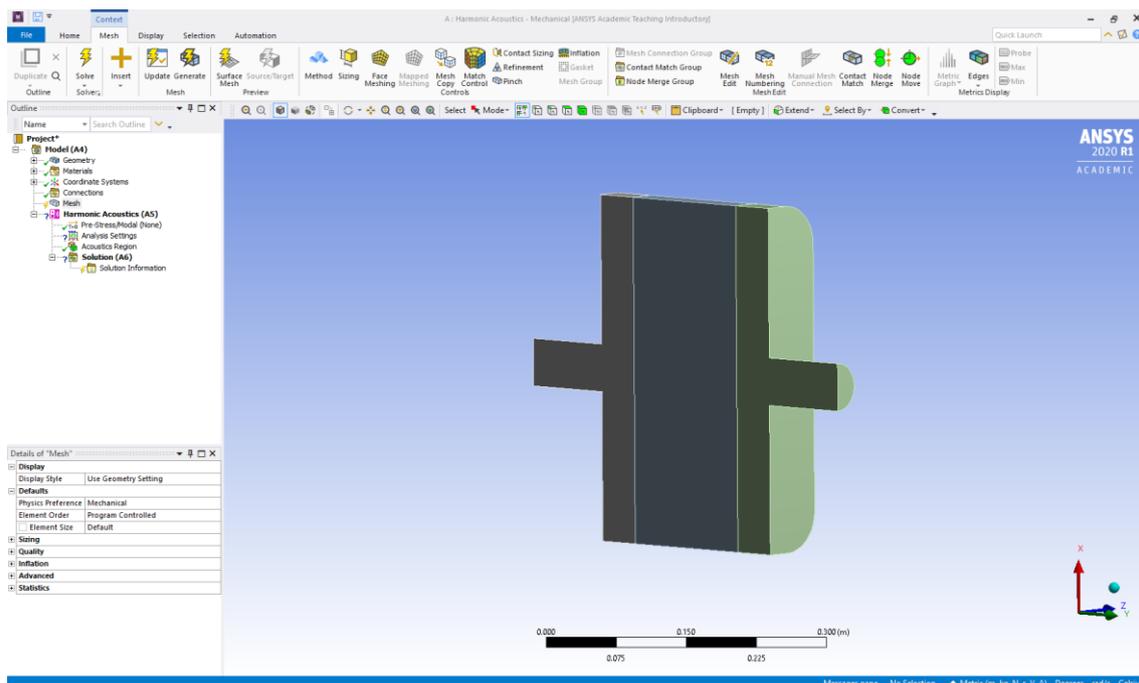
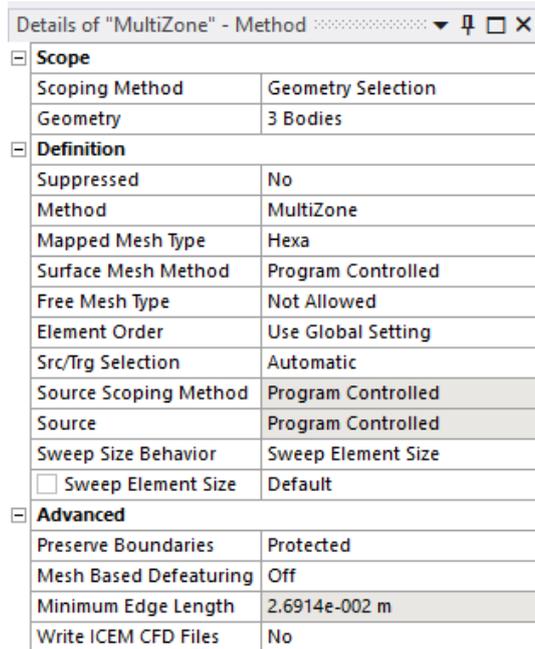


Imagen 65. Interfaz del módulo "Model" con el submódulo "Mesh" seleccionado

Se hará click sobre “Method”, herramienta que va a permitir definir el método de mallado. Esta herramienta necesita la entrada de la geometría que se quiere mallar, en el apartado “Geometry” de los detalles del método de mallado. Se seleccionarán los 3 cuerpos del catalizador y se hace click sobre “Apply”. En el apartado “Method”, se va a escoger la opción “MultiZone”, ya que es la que mejor mallado genera. El resto de apartados se dejan con la configuración por defecto.



Details of "MultiZone" - Method	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	3 Bodies
Definition	
Suppressed	No
Method	MultiZone
Mapped Mesh Type	Hexa
Surface Mesh Method	Program Controlled
Free Mesh Type	Not Allowed
Element Order	Use Global Setting
Src/Trg Selection	Automatic
Source Scoping Method	Program Controlled
Source	Program Controlled
Sweep Size Behavior	Sweep Element Size
<input type="checkbox"/> Sweep Element Size	Default
Advanced	
Preserve Boundaries	Protected
Mesh Based Defeaturing	Off
Minimum Edge Length	2.6914e-002 m
Write ICEM CFD Files	No

Imagen 66. Detalles del método de mallado

La siguiente acción que se va a realizar, consiste en generar una condición que seccione el dominio correspondiente al monolito en un único elemento longitudinal. Esto lo exige ANSYS WORKBENCH, y también ANSYS APDL, a la hora de modelar un dominio con una matriz de transferencia, ya que como se ha explicado en el *Apartado 6.3*, este procedimiento conecta las dos secciones entre las que está el monolito, aplicando ecuaciones matemáticas. Por lo tanto, sólo pueden estar formados por un elemento en la dirección longitudinal.

Para ello se hará click sobre "Select Edge" (). A continuación, se acercará el cursor sobre una arista longitudinal perteneciente al monolito, y después de seleccionarla haciendo click izquierdo sobre ella, se hará click con el botón derecho. En el menú que se despliega, se seleccionará la opción "Insert" y dentro de ella la opción "Sizing".

Desarrollo e implementación de metodologías numéricas de caracterización del comportamiento acústico de catalizadores de MCIA mediante elementos finitos

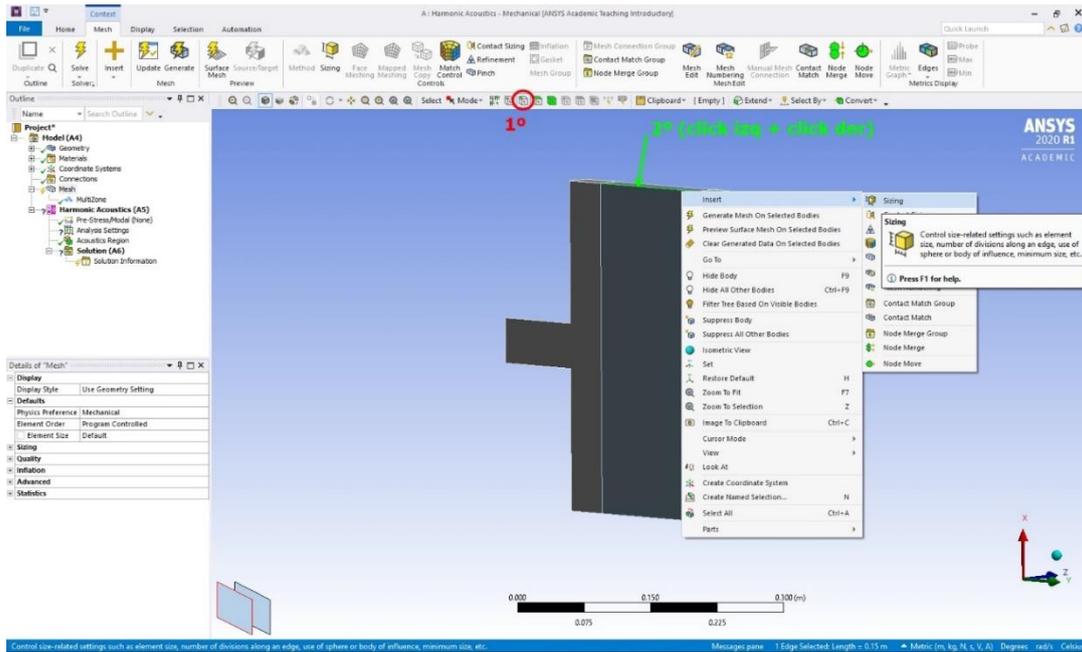


Imagen 67. Procedimiento para crear un "Sizing" en una dirección determinada

En la definición del "Edge Sizing", se seleccionará en "Type" la opción "Number of Divisions" y en el apartado "Number of Divisions" se introducirá 1. El resto de los apartados se dejarán con la configuración por defecto.

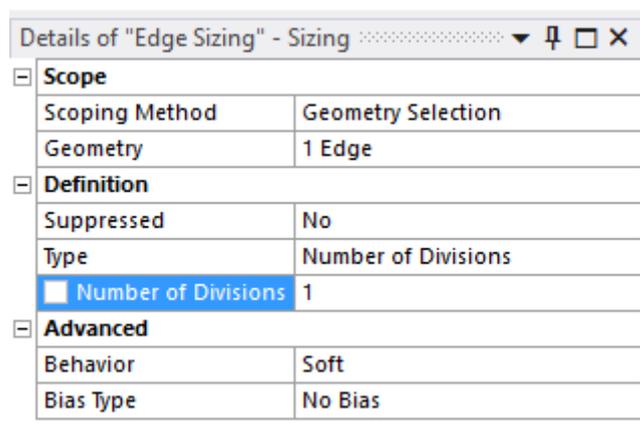


Imagen 68. Definición del "Sizing" que permita crear un único elemento longitudinal en la cámara del catalizador

Únicamente falta por definir el tamaño del elemento. Para ello, se hará click sobre el elemento del árbol "Mesh" y en los detalles de este elemento, dentro de la pestaña "Defaults", en el apartado "Element Size", se introducirá el tamaño deseado.

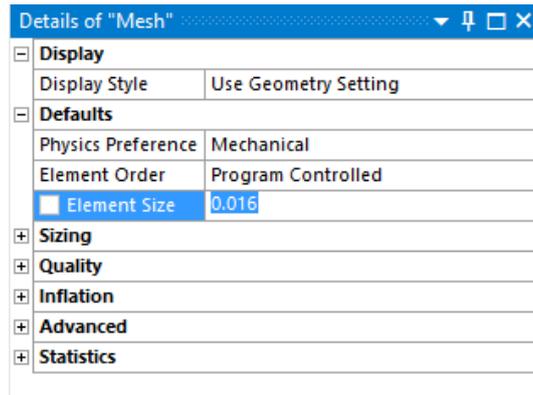


Imagen 69. Definición del tamaño de elemento de malla

El mallado está definido. Para generarle, bastará con hacer click sobre el comando "Generate", dentro del apartado "Mesh".

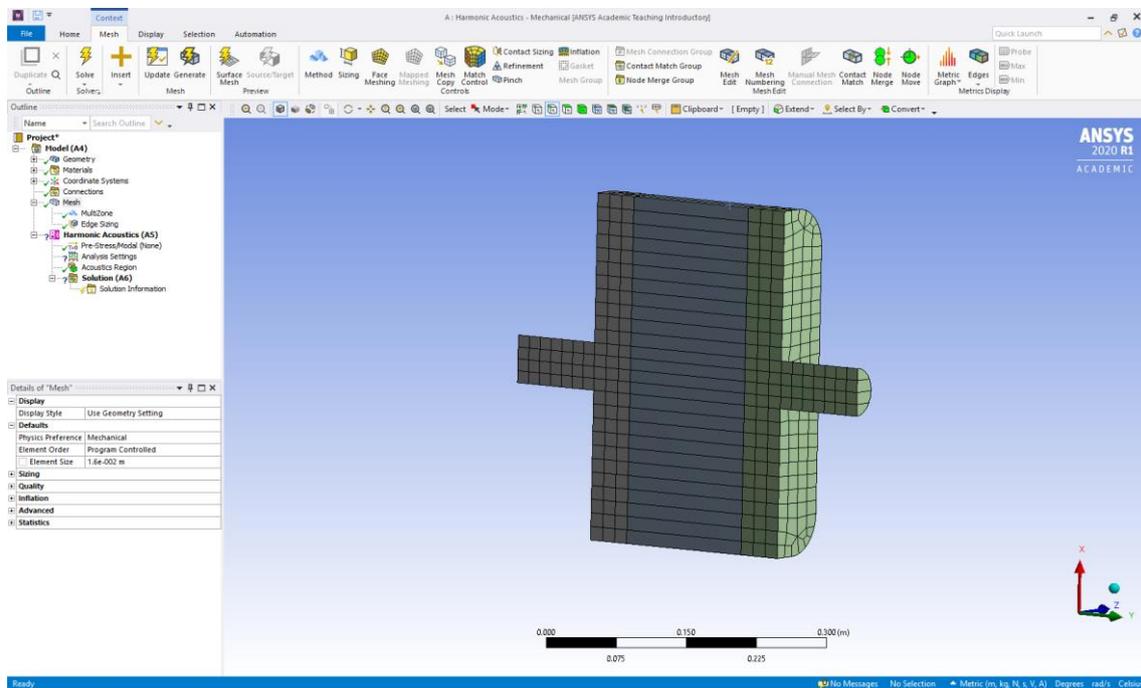


Imagen 70. Malla generada

Puede observarse como se ha generado una malla continua y de bastante buena calidad.

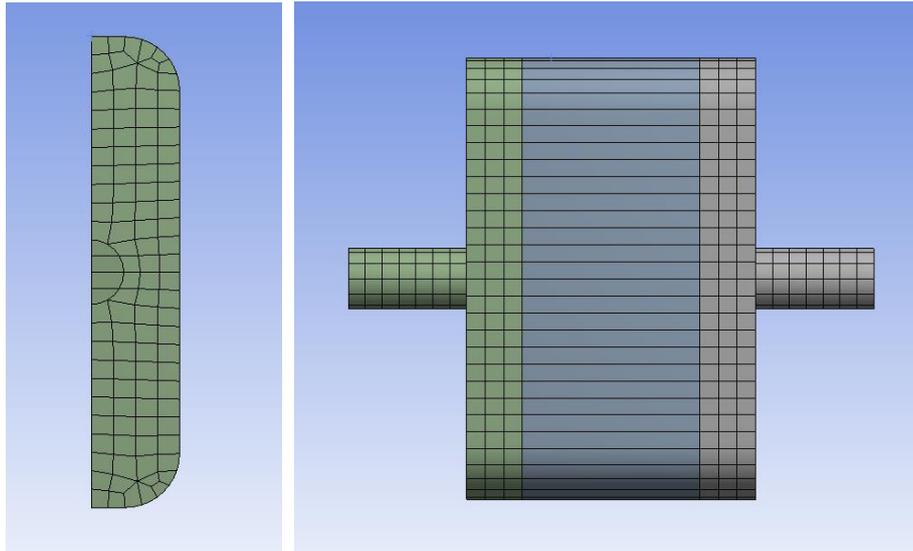


Imagen 71. Detalles de la malla generada

4.2.3.2. Condiciones de contorno

Una vez generado el modelo del catalizador, con la geometría y el mallado, es momento de aplicar las condiciones de contorno que tendrá el problema. Estas condiciones tendrán como objeto simular de la manera más fiel posible el entorno en el que trabajará el catalizador en la realidad. Como ya se ha comentado, esto se va a realizar desde el módulo “Model”. Concretamente se trabajará dentro del componente del árbol “Harmonic Acoustics”, esto es equivalente a utilizar el módulo del esquema de proyecto que propone WORKBENCH en su ventana principal de “Set-Up”.

El primer paso consiste en definir la región acústica del problema. Para ello se seleccionará el componente “Acoustic Region”, que cuelga de “Harmonic Acoustics”. Se expandirá la pestaña “Scope” y se seleccionará la opción “Geometry”. Se seleccionan los 3 cuerpos que constituyen el modelo y se hace click sobre “Apply”.

Ya definida la región acústica de estudio, es hora de caracterizar las diferentes superficies. En este estudio acústico, se va a distinguir entre dos tipos de superficie: los puertos (secciones de entrada y salida del fluido) y paredes rígidas. Los puertos permitirán la propagación de la perturbación acústica, mientras que las paredes rígidas tendrán un coeficiente de transmisión de sonido igual a 0, impidiendo la propagación de las ondas sonoras.

Para definir los puertos, es necesario seleccionar el componente del árbol “Harmonic Acoustics”, con ello la barra de herramientas cambiará a la posición “Environment”, si no es así seleccionar esta última después de pinchar sobre “Harmonic Acoustics”. A continuación, se hará click sobre “Acoustic Boundary Conditions” y en el desplegable se seleccionará la opción “Port”.

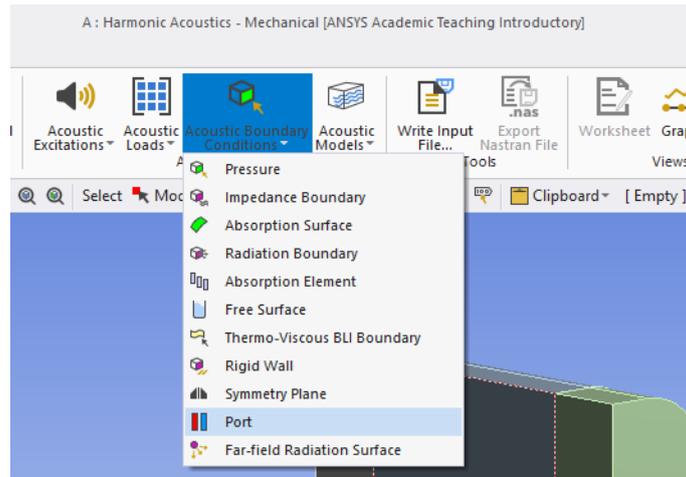


Imagen 72. Creación de puertos

Observando los requisitos necesarios para la definición del puerto en los detalles del mismo, en “Port Surface” se seleccionará la cara que definirá el puerto. En este caso, al ser el puerto de entrada se selecciona la sección semicircular correspondiente al conducto de entrada. Para ello debe estar activada la herramienta “Select Face” (). También es necesario definir la región interna correspondiente a este puerto, para ello dentro de los detalles del puerto y en “Inside Surface Bodies” se seleccionará como “Geometry” el cuerpo al que hace referencia este puerto, en este caso el cuerpo correspondiente a la unión del conducto de entrada y la entrada al monolito.

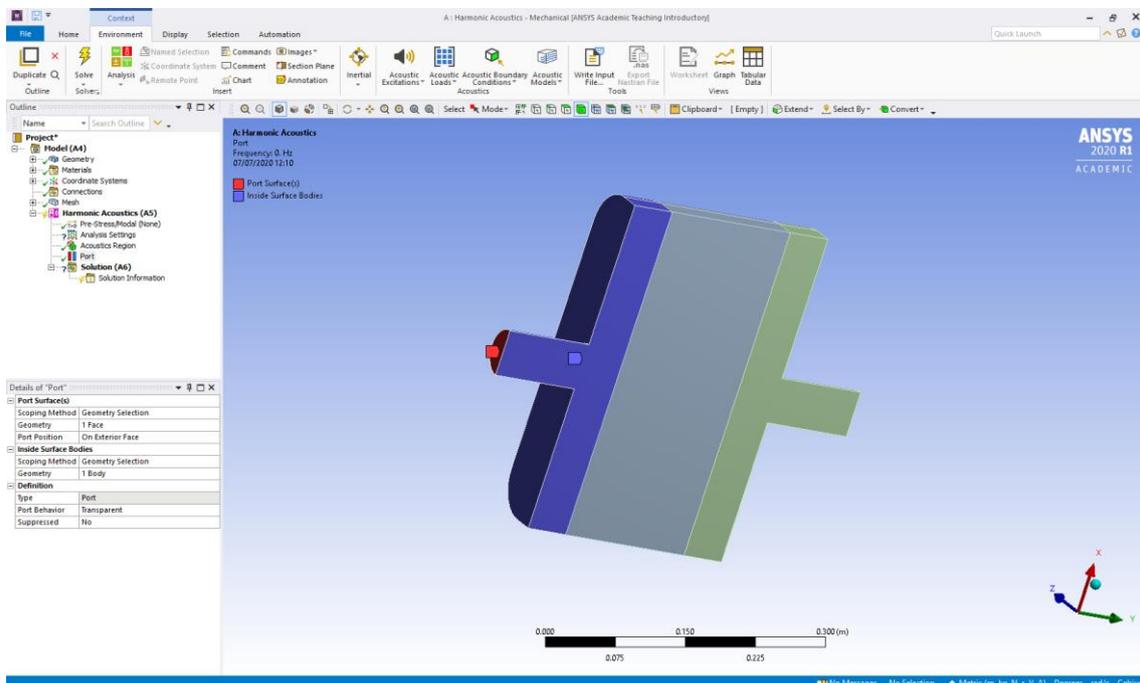


Imagen 73. Definición de un puerto

Para definir el puerto de salida, se procederá de manera similar, seleccionando la superficie y el cuerpo correspondiente a esta sección de salida. Es aconsejable cambiar el nombre de los puertos, para mejorar la comprensión del árbol y facilitar operaciones posteriores.

No hace falta la definición específica de las paredes rígidas comentadas previamente, ya que WORKBENCH considerará las superficies no definidas como puertos paredes rígidas automáticamente. Podrían definirse abriendo el menú desplegable de “Acoustic Boundary Conditions”, seleccionando la opción “Rigid Wall” y definiendo como geometría todas aquellas superficies que no son puertos. En este caso, no va a realizarse este procedimiento, dejando que WORKBENCH automáticamente trate estas superficies como rígidas.

El siguiente paso consiste en definir la excitación que caracteriza a la onda acústica. La excitación del problema consistirá en una onda armónica con velocidad máxima igual a 1 m/s en el sentido longitudinal positivo del catalizador. Para ello se desplegará ahora el menú de “Acoustic Excitations” y se seleccionará la opción “Surface Velocity”.

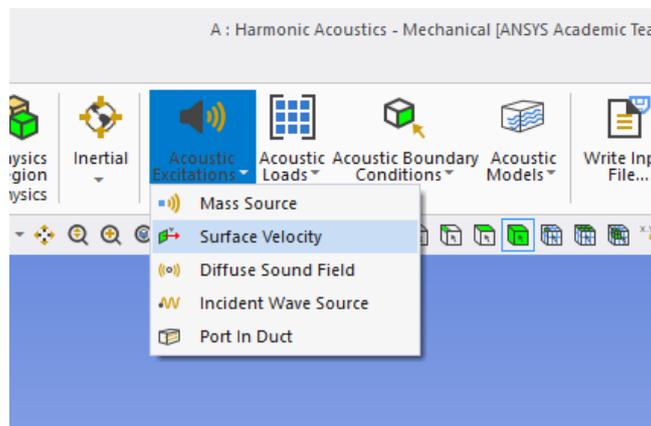


Imagen 74. Creación de la excitación acústica del tipo “Surface Velocity”

Este comando, requiere únicamente de una superficie (que corresponderá a la cara en la que se aplica esta condición de velocidad) y una magnitud de velocidad. Se seleccionará la superficie semicircular correspondiente al conducto de entrada y como “Magnitude” se introducirá -1 m/s. Este signo negativo se debe a que toma como referencia la normal a la superficie seleccionada, y como la velocidad es entrante y no saliente como lo es la normal, es necesario cambiar el signo.

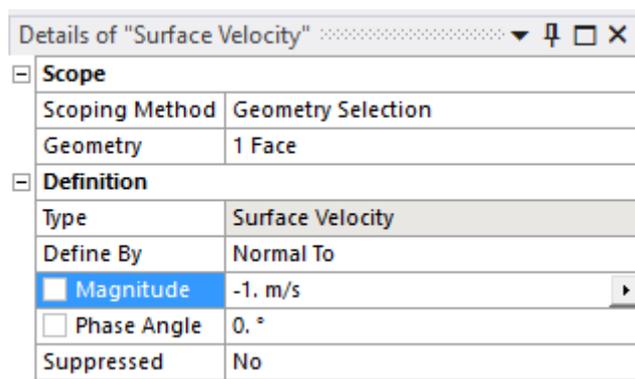


Imagen 75. Definición de la excitación acústica del tipo “Surface Velocity”

Por último, hay que aplicar la condición de “Radiation Boundary”. Esta condición evitará la aparición de ondas reflejadas del exterior, tanto en el conducto de entrada como en el de salida. Para aplicar esta condición, se desplegará el menú de “Acoustic Boundary Conditions” y se seleccionará la opción

“Radiation Boundary”. En su ventana de detalles en “Geometry”, se seleccionarán con “Ctrl” las dos caras, tanto de entrada como de salida del catalizador y se aplicará.

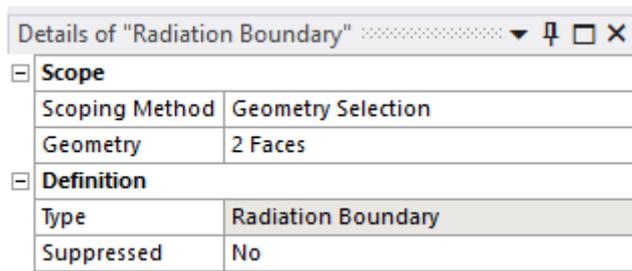


Imagen 76. Definición del "Radiation Boundary"

De esta manera quedan definidas todas las condiciones de contorno necesarias para simular el problema acústico objeto de este trabajo. El árbol queda de la siguiente manera:

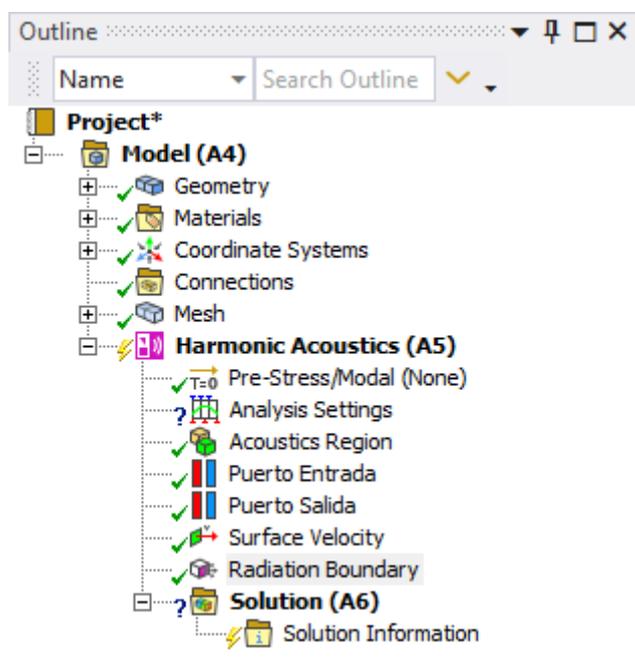


Imagen 77. Árbol del módulo "Model" después de definir las condiciones de contorno

4.2.3.3. Introducción de la matriz de admitancia para simular el monolito

Como se ha comentado previamente, el material asignado a la región correspondiente al monolito es indiferente, ya que su comportamiento se va a caracterizar mediante una matriz de transferencia.

La generación de esta matriz de admitancia es descrita en detalle en el ANEXO N°1, pero principalmente consiste en una matriz entre dos caras, que vincula los nodos de ambas caras y por tanto simula su comportamiento atendiendo a una ecuación matricial de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} V_{n1} \\ V_{n2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \infty_1 \\ \infty_2 \end{bmatrix} \quad (135)$$

- 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 (n° complejo)
- ∞_1, ∞_2 = Coeficientes de término fuente (n° complejo)

La matriz de admitancias dependerá de la longitud del monolito y de la resistividad de este, teniendo por tanto en este trabajo 6 matrices de admitancia diferentes.

Para introducir la matriz de transferencia que simulará el comportamiento del monolito, se va a utilizar el comando “Transfer Admittance Matrix”. Antes de definir la propia matriz con este comando, es necesario crear dos puertos que se corresponderán con las superficies de entrada y salida del monolito. Para ello, se ocultarán todos los cuerpos a excepción del cuerpo central (monolito), es condición necesaria del comando “Transfer Admittance Matrix” que los puertos entre los que es definido pertenezcan al mismo cuerpo. Esto se consigue eligiendo primeramente el comando “Select Body”, seleccionando el cuerpo central y, una vez resaltado este, haciendo click sobre el botón derecho. Se seleccionará la opción “Hide all other bodies”. Ahora se procederá de la misma manera que en la definición de los puertos de entrada y salida del monolito descrita previamente.

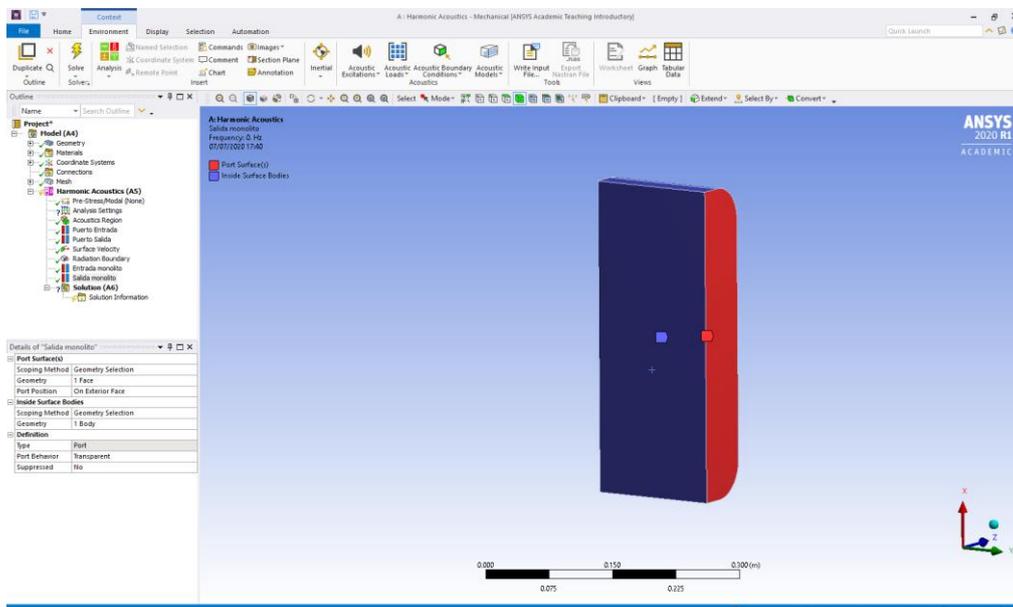


Imagen 78. Creación de los puertos para definir la matriz de admitancia

Se volverá a seleccionar el cuerpo central con el comando “Select Body” activado y se hará click derecho para seleccionar la opción “Show all bodies”.

Para introducir la matriz de transferencia, se deberá estar sobre el componente del árbol “Harmonic Acoustics”. Se abrirá el menú de la opción “Acoustic Models” y se seleccionará “Transfer Admittance Matrix”.

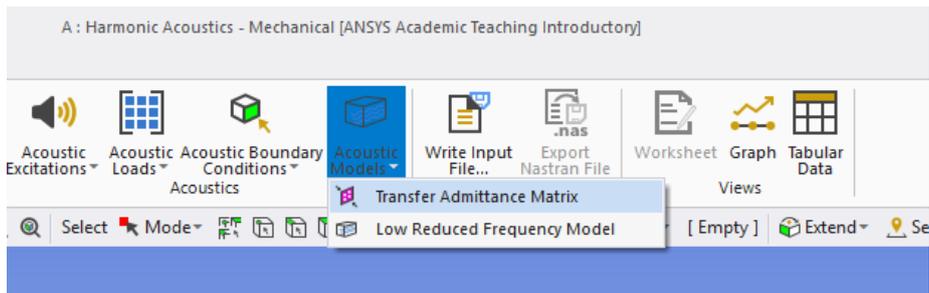


Imagen 79. Creación de la matriz de admitancia

Este comando requiere de dos puertos, "Port 1", que será el puerto de entrada, por lo que se seleccionará aquí el puerto "Entrada Monolito", y "Port 2", que será el puerto de salida, se seleccionará aquí el puerto "Salida Monolito".

La otra entrada que está esperando este comando es la de los valores que definen la matriz. ANSYS WORKBENCH permite la introducción de los mismos de manera tabulada, para ello se hará click sobre cualquier valor de la matriz y en la flecha desplegable que aparece se seleccionará la opción "Tabular (Frequency)".

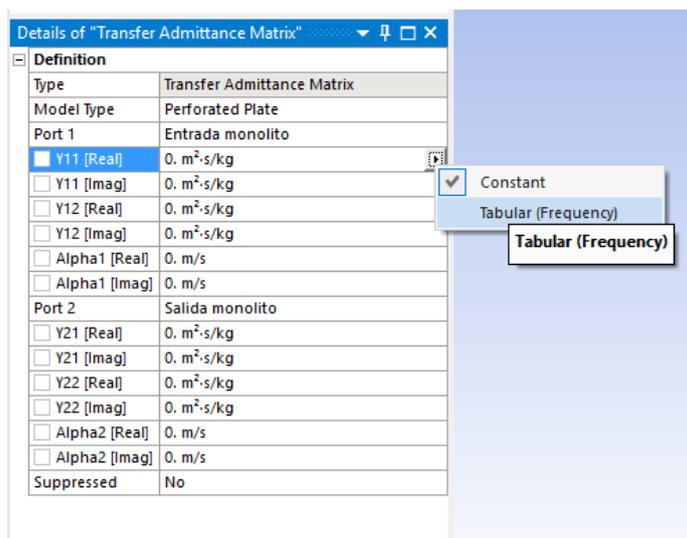


Imagen 80. Definición de los puertos de la matriz de admitancia y selección de entrada de datos tabulada

Con esta opción se puede introducir los diferentes valores de manera tabulada, pero es necesario crear con anterioridad estas matrices. La creación de este fichero se realizará con MATLAB, como se describe en el ANEXO N^o1. La introducción de datos a WORKBENCH puede realizarse directamente desde el fichero de texto generado por MATLAB o bien transformar este a EXCEL para facilitar el proceso de introducción de datos. Se introducirán columna a columna los valores de la frecuencia y admitancias (Y11, Y12, Y21, Y22), de estas últimas tanto su parte imaginaria como su parte real.

Desarrollo e implementación de metodologías numéricas de caracterización del comportamiento acústico de catalizadores de MCIA mediante elementos finitos

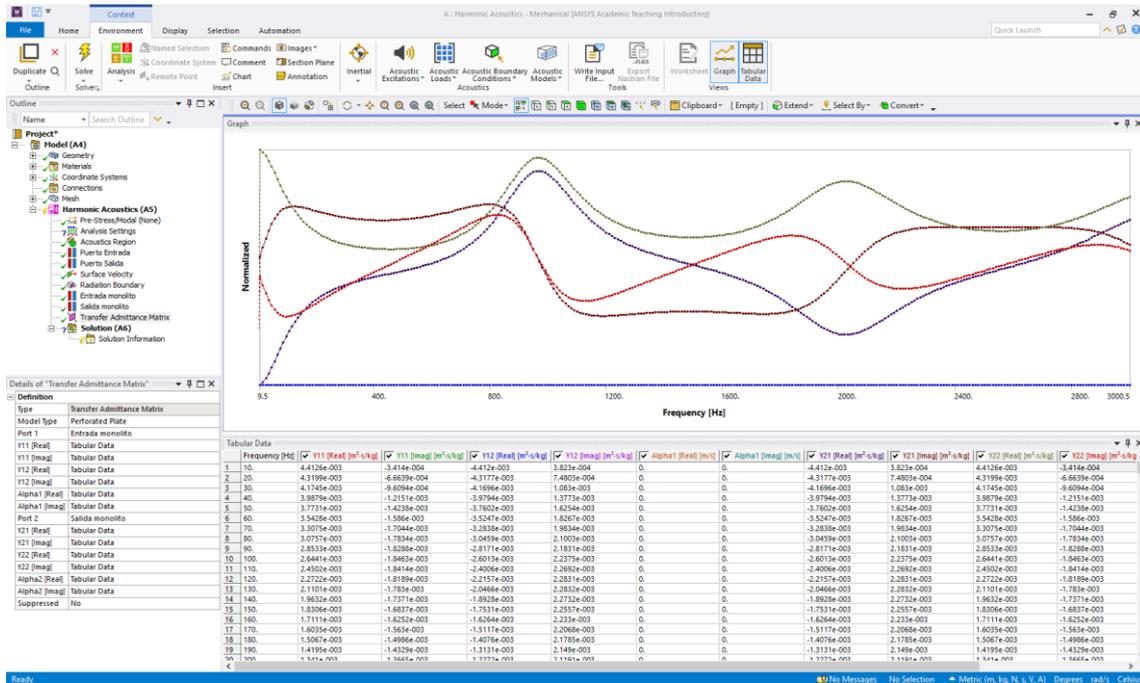


Imagen 81. Elementos de la matriz de admittancias introducidos

4.2.4. Simulación y resultados

En este punto el modelo está completamente definido, por lo que el pre-proceso habrá llegado a su fin, a partir de ahora se comienza la etapa de procesamiento de la solución. El primer paso será definir el rango de frecuencias en el que se quiere realizar el estudio acústico y los intervalos de este, para después seleccionar el tipo de estudio que se quiere realizar.

Como puede observarse en el árbol, de la pestaña "Harmonic Acoustics", el único elemento que queda sin definir (con símbolo de interrogación en vez de tick verde) es "Analysis Settings". Se hace click sobre este elemento y se introducen los valores mínimo y máximo de frecuencia, así como los intervalos de la solución. El resto de los campos se dejan con su configuración por defecto.

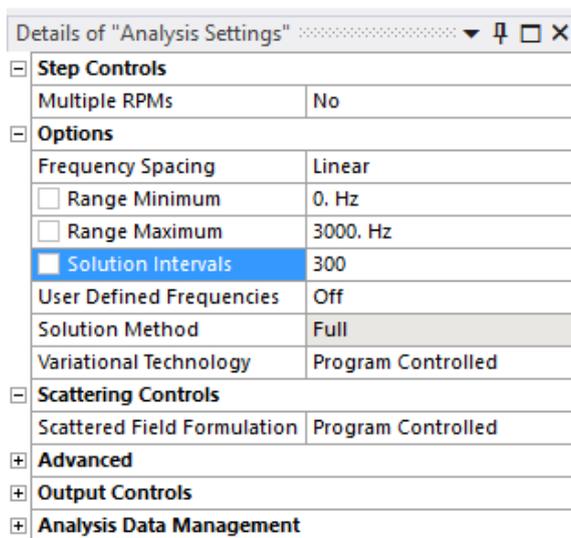


Imagen 82. Definición de los ajustes del análisis

Una vez establecidas las propiedades del análisis, se entra en el apartado “Solution”. Se notará como la interfaz cambia. El objeto del presente estudio es la gráfica de las pérdidas de transmisión acústica (TL) para las diferentes frecuencias, ya que esta gráfica caracterizará acústicamente al catalizador. Para ello se hace click sobre “Acoustics” y en el menú desplegable se selecciona la opción “Transmission Loss”.

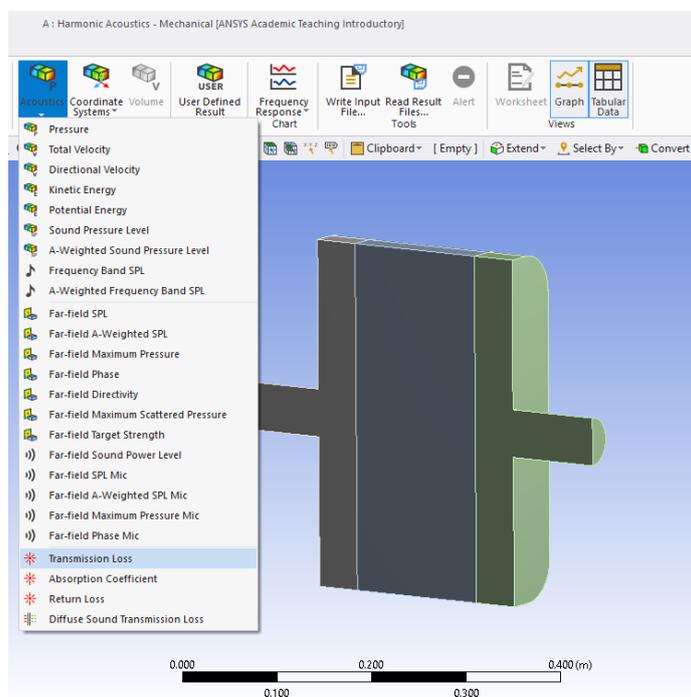


Imagen 83. Selección del cálculo a realizar

Se abrirá la pestaña de detalles de la solución tipo “Transmission Loss” y esta únicamente necesita la definición de los puertos de entrada y salida del modelo, ya que el rango de frecuencias ha sido definido previamente. Se introduce el “Puerto de Entrada” como “Input Port” y el “Puerto de Salida” como “Output Port”.

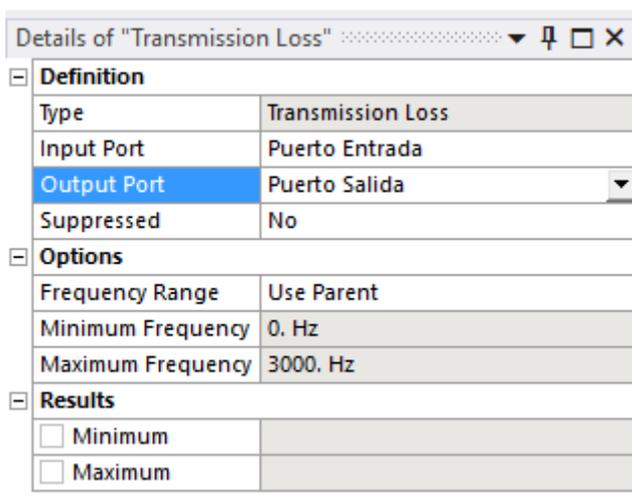


Imagen 84. Definición de los puertos entre los que se debe realizar el cálculo

Una vez está todo configurado se hace click en “Solve”, dentro del apartado “Solution”. Cuando el programa termina de calcular, la ventana gráfica muestra la gráfica del TL, a su vez debajo de ella en el apartado “Tabular Data” se muestra la solución analítica con los valores del TL en dB para cada frecuencia de estudio. Estos datos tabulados pueden copiarse pinchando y arrastrando las columnas y filas que sea desee para exportarlos. Para esto únicamente hace falta hacer click derecho sobre los datos seleccionados y elegir la opción “Export”.

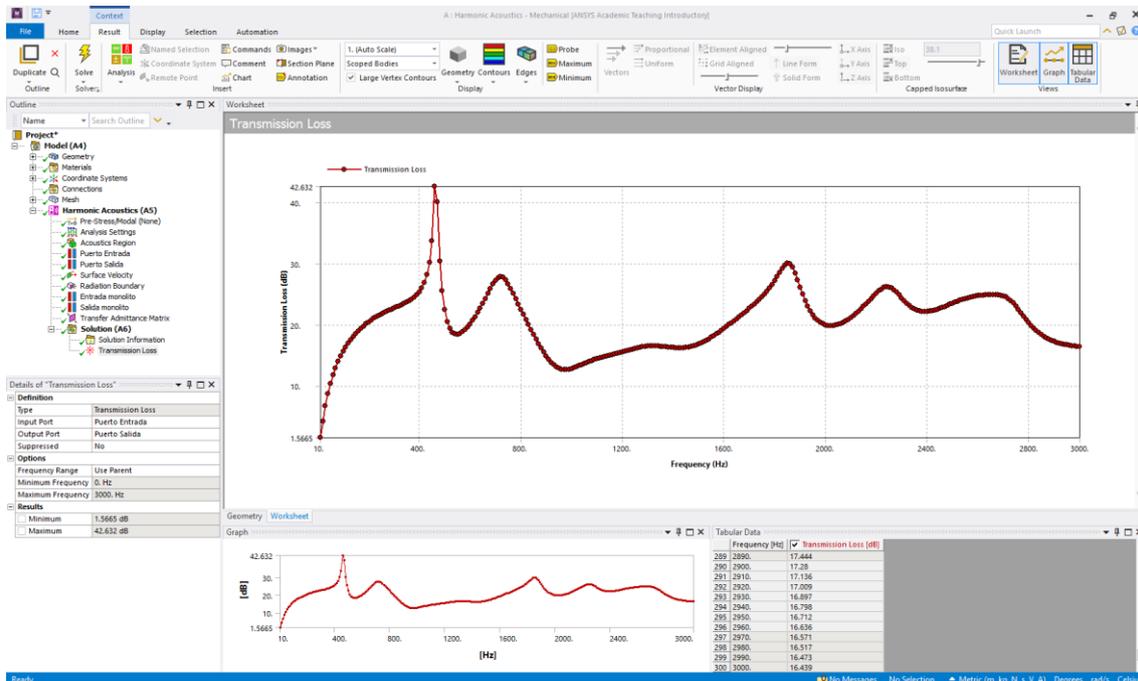
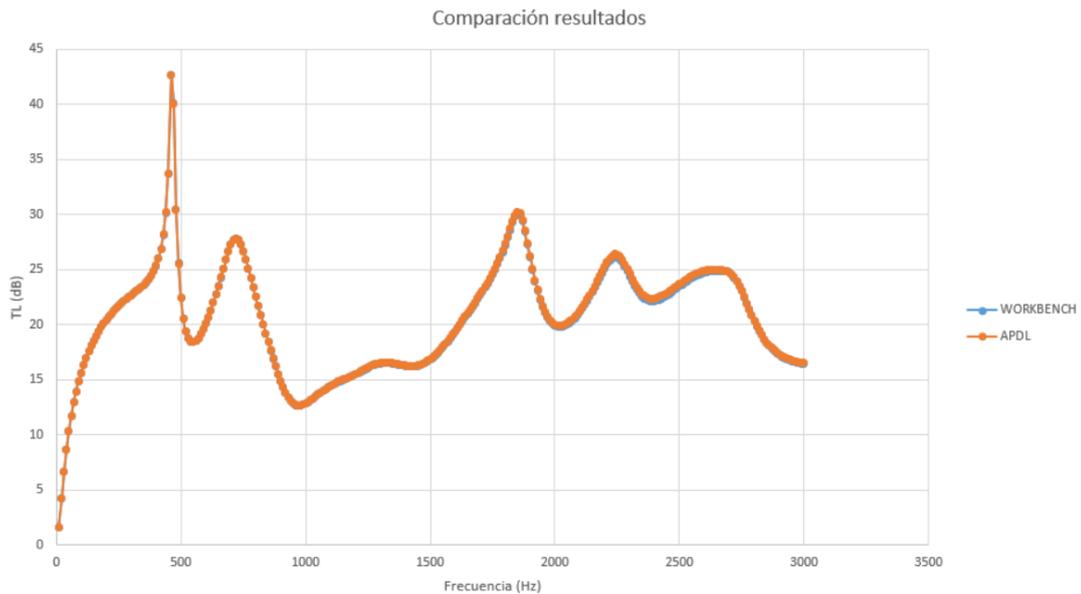


Imagen 85. Interfaz de "Model" con los resultados obtenidos

8.4. Comparación de resultados entre ANSYS APDL y ANSYS WORKBENCH

Los resultados de este estudio han sido obtenidos en colaboración con el equipo de investigación del Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales de la UPV con el programa ANSYS APDL. Por lo tanto, esta es la referencia para determinar si el modelo generado y el estudio realizado con WORKBENCH es correcto.

Para ello se van a exportar los resultados del TL para cada una de las frecuencias de ambos programas a una tabla de EXCEL y se representarán la una frente a la otra para ver si existe concordancia o no entre los resultados.



Gráfica 1. Comparación de los resultados obtenidos mediante APDL y WORKBENCH

El resultado es el mostrado en la *Gráfica 1* anterior. Puede observarse como la solución es prácticamente idéntica, ya que las curvas obtenidas con WORKBENCH y con APDL apenas difieren. Se ha obtenido el error de la solución y, en este caso particular de catalizador con 0.15 m de longitud de monolito y 1500 rayl/m de resistividad para la configuración rectangular sin offset, el error máximo es de un 1%.

8.5. Comparación entre resultados obtenidos con el MEF y experimentales

Con el objetivo de validar la metodología desarrollada en el presente TFM, se han comparado los resultados de TL obtenidos mediante el MEF con los medidos experimentalmente en el banco de ensayos del Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales de la UPV.

Los valores de los parámetros geométricos y del monolito del prototipo ensayado, así como de las propiedades del aire en el momento del ensayo se recogen en la siguiente *Tabla 1*:

Aspectos geométricos del catalizador			
Sección	Radio conductos E/S	Radio cámara expansión	Longitud E/S cámara
Circular	0.0258 m	0.1275 m	0.0475 m
Propiedades del monolito			
Longitud	Resistividad	Porosidad	Factor geométrico
0.075 m	1500 rayl/m	0.88	1.14
Propiedades del aire			
Velocidad		Densidad	
346.11 m/s		1.1842 kg/m ³	

Tabla 1. Parámetros asociados a la medida experimental en banco de ensayos

Por lo que el prototipo ensayado puede compararse con el modelo de geometría circular sin offset (Plano N°1), $R=1500$ rayl/m y longitud de monolito 0.075 m.

A continuación, se adjuntan unas imágenes del prototipo en el banco de ensayos:

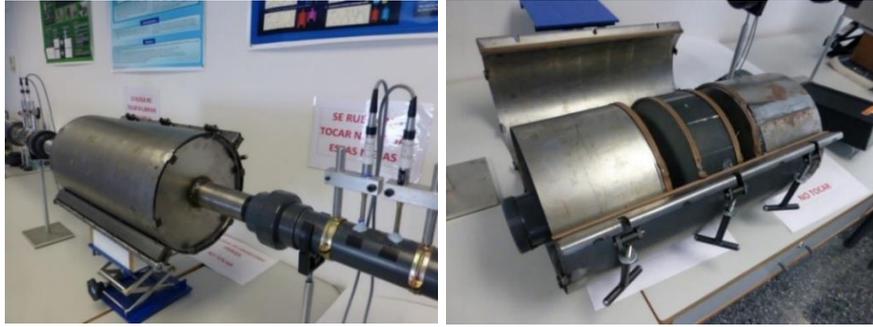
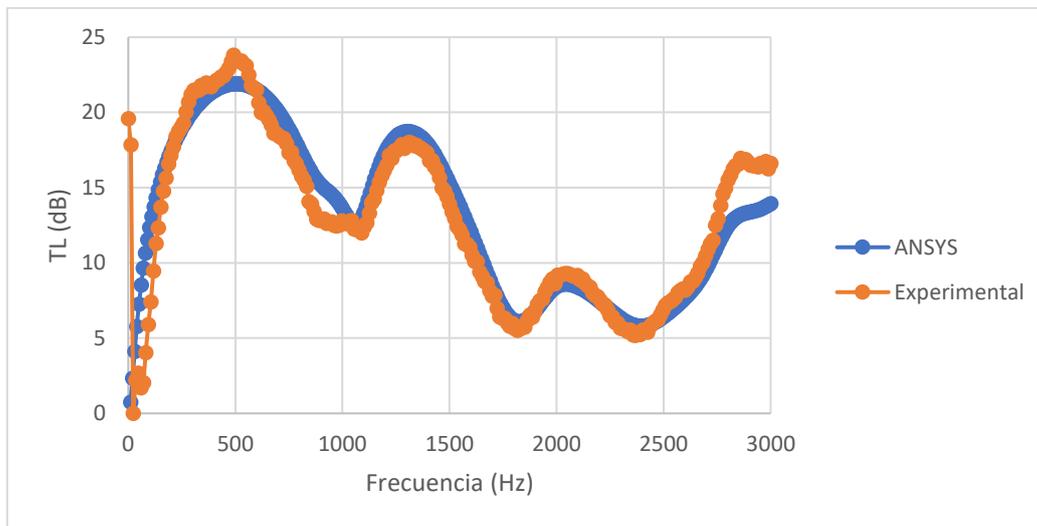


Imagen 86. Prototipo de catalizador en el banco de ensayos

En la siguiente *Gráfica 2* se representa el resultado obtenido de la comparación experimental-MEF:



Gráfica 2. Comparativa entre MEF y medidas experimentales

8.6. Conclusiones

- A la vista de la *Gráfica 1*, se puede afirmar que los resultados obtenidos con los dos programas son prácticamente idénticos. Por lo tanto, las dos metodologías desarrolladas son válidas para el estudio de la atenuación sonora en el interior de un catalizador.
- La concordancia entre modelización mediante el MEF y experimentación es también excelente, como puede observarse en la *Gráfica 2*.
- Es necesario elegir un tamaño de elemento para el mallado que ofrezca un resultado preciso con un coste computacional razonable. Cuanto más pequeño sea el tamaño de elemento, más preciso va a ser el resultado, pero el equipo va a tardar mucho más en realizar los cálculos correspondientes. Este tiempo extra, a la hora de simular diferentes configuraciones, puede resultar en horas. Por lo tanto, es necesario optimizar el coste computacional.
- ANSYS WORKBENCH ofrece un entorno bastante intuitivo. Tanto el árbol de proyecto como el árbol particular de cada módulo dan una idea bastante clara del proceso a seguir, si bien es cierto que es necesario conocer particularidades del programa, ya que ofrece infinidad de opciones. También ofrece una buena compatibilidad con otras herramientas informáticas, permitiendo la importación de geometrías a partir de ficheros CAD o STEP, la importación y exportación de datos tabulados a partir de ficheros EXCEL o del BLOC DE NOTAS, etc.

9. ANÁLISIS ACÚSTICO DE CATALIZADORES MEDIANTE LAS METODOLOGÍAS IMPLEMENTADAS

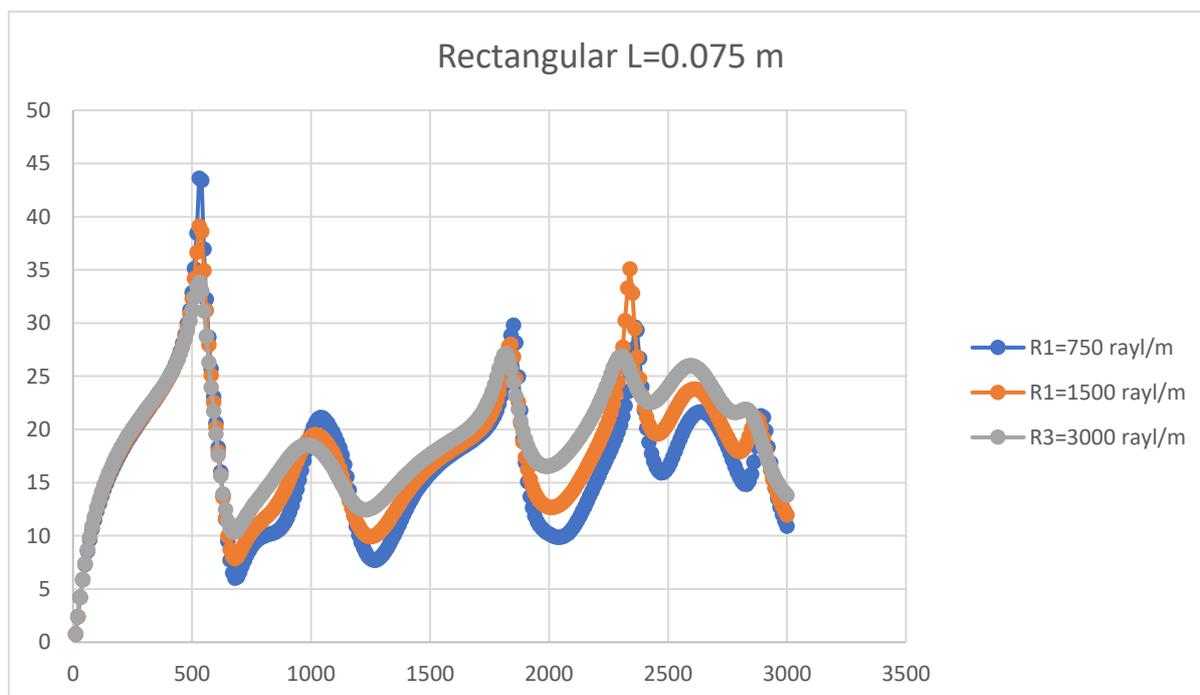
9.1. Introducción

En este apartado se va a llevar a cabo un análisis comparativo de los resultados obtenidos en todos los estudios realizados con el programa de elementos finitos. Las variables de estudio son: la geometría de la sección de la cámara del catalizador (rectangular, triangular o circular), la longitud de la cámara del catalizador (0.075 m o 0.15 m), la resistividad del monolito (750, 1500 o 3000 rayl/m) y la posición del conducto de salida con respecto al de entrada (sin offset o con offset). Se han realizado todos los estudios que abarcan estas variables, obteniéndose por lo tanto un total de 36 casos diferentes.

En trabajos desarrollados previamente, se estudiaba la propagación del campo acústico dentro del monolito de dos maneras diferentes: modelando el monolito como un cuerpo 3D al igual que los conductos y asignándole propiedades calculadas previamente, o sustituyendo el monolito por una matriz de transferencia que relacionase los nodos de la cara de entrada al monolito con la cara de salida del monolito. En el desarrollo de estos trabajos previos se llegó a la conclusión de que mediante la utilización de la matriz de transferencia se obtenían unos resultados más fieles a la realidad. Por lo tanto, en el presente Trabajo de Fin de Máster se ha adoptado directamente esta metodología de trabajo.

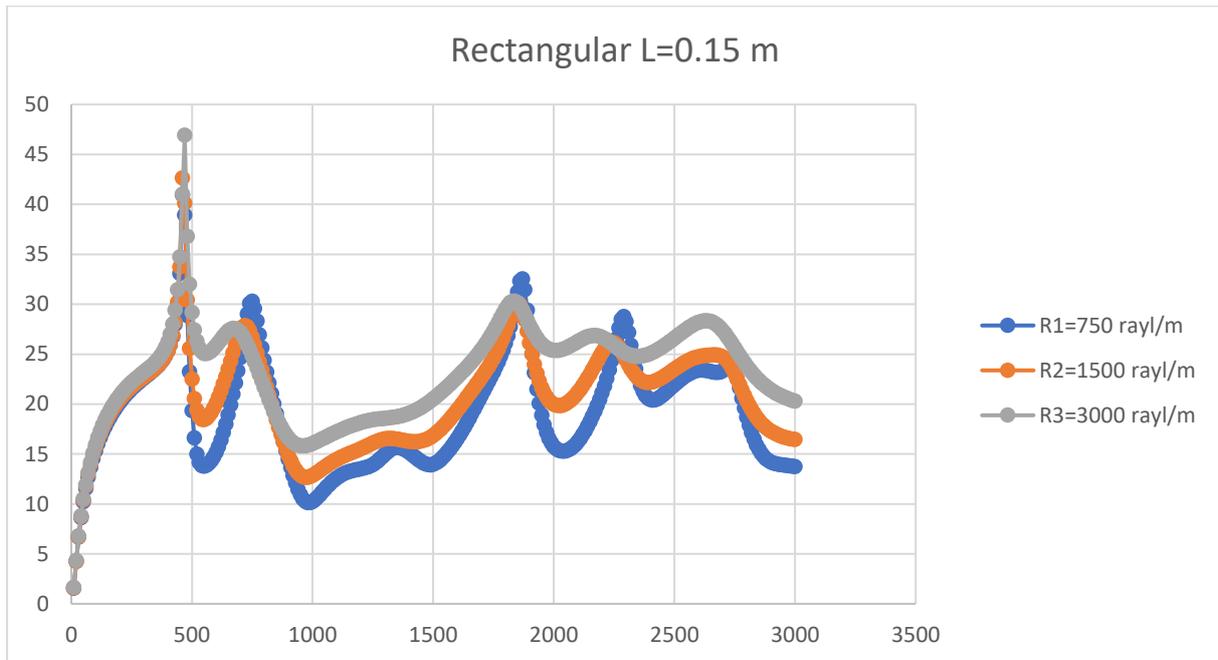
Para el análisis de resultados, se van a utilizar exclusivamente los resultados obtenidos mediante ANSYS WORKBENCH. Los resultados obtenidos con ANSYS APDL han servido para validar los modelos generados con WORKBENCH, ya que las gráficas de todos los casos de estudio se solapan y el error máximo está en torno al 1%, como se ha comentado previamente.

9.2. Efecto de la resistividad



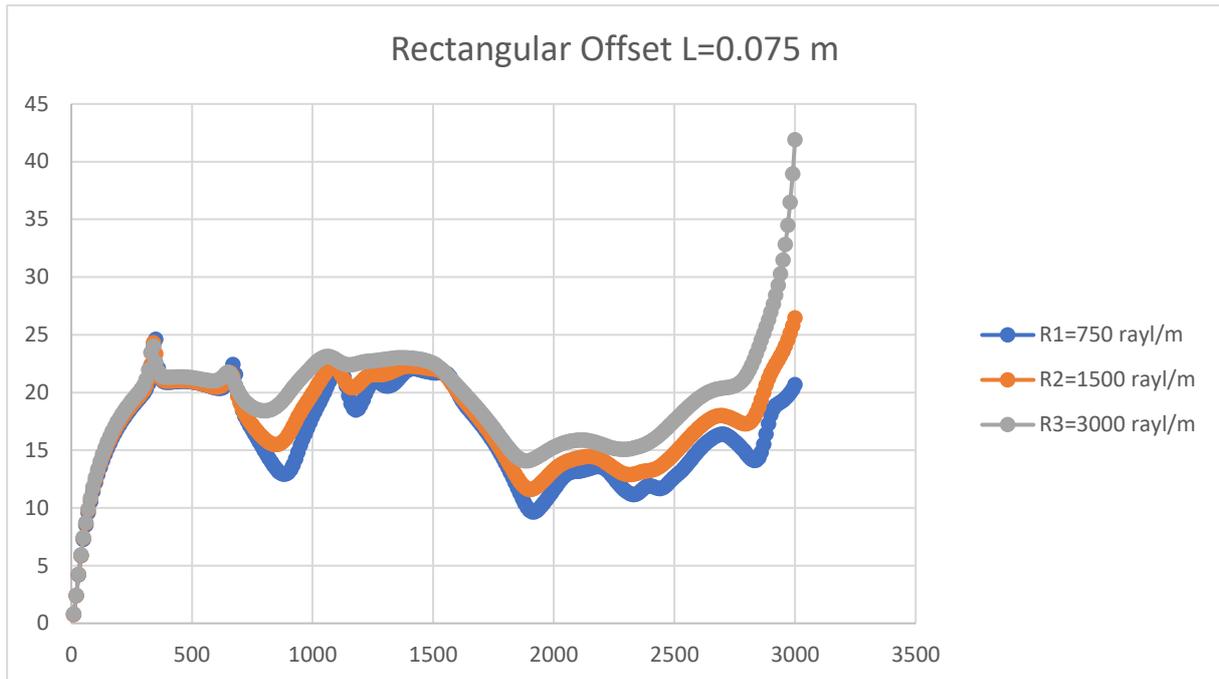
Gráfica 3. Efecto de las distintas resistividades para la sección rectangular con L=0.075 m

En la *Gráfica 3* anterior pueden observarse dos aspectos principalmente. En primer lugar, que el modelo con menor resistividad, $R1=750$ rayl/m, presenta los picos tanto máximos como mínimos mucho más acentuados que los otros modelos en frecuencias de hasta 2000 Hz. De manera inversa, el modelo con mayor resistividad mantiene los picos mucho menos acentuados hasta estas frecuencias. Sin embargo, desde el punto de vista de la disipación de ruido, la configuración que mejor comportamiento ofrece en este aspecto es la de mayor resistividad, ya que la componente media del TL es mucho mayor que la de las otras dos configuraciones.



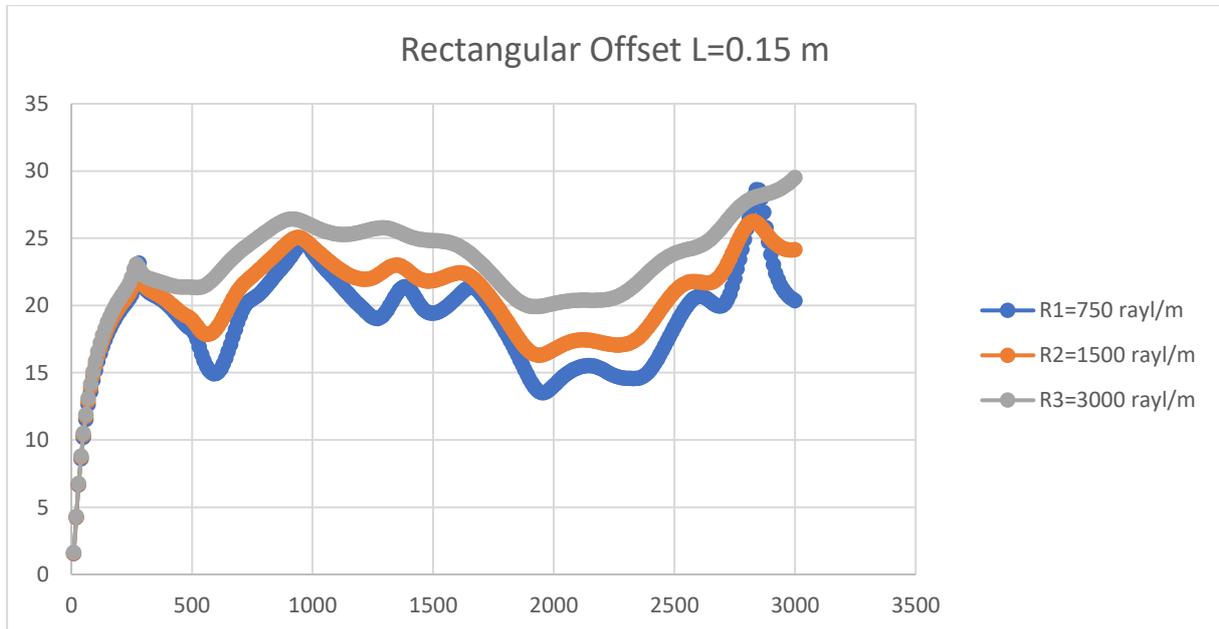
Gráfica 4. Efecto de las distintas resistividades para la sección rectangular con $L=0.15$ m

Aquí la distribución de picos no sigue ningún patrón claro. Si bien, la geometría con el monolito con mayor resistividad tiene una componente media de TL mucho mayor que el resto de las modelos con esta configuración, siendo la de menor resistividad la de menor componente media.



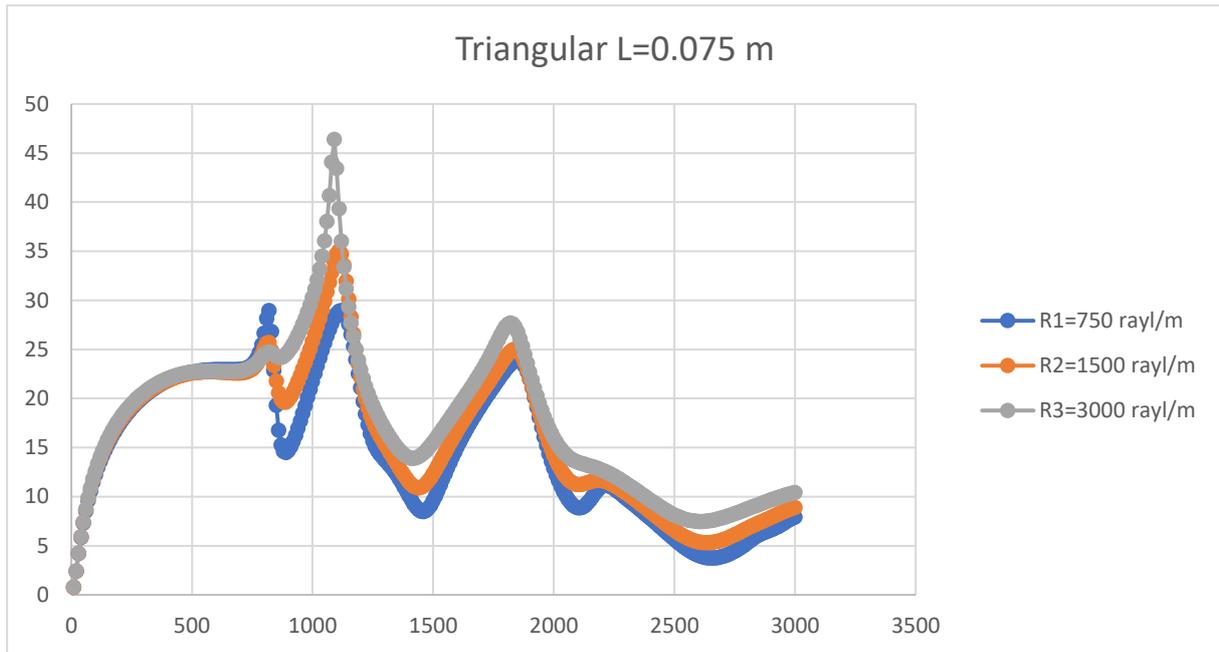
Gráfica 5. Efecto de las distintas resistividades para la sección rectangular con Offset con L=0.075 m

En esta configuración, el modelo con mayor resistividad de monolito tiene tanto los mayores picos máximos como la mayor componente media. Ambas características disminuyen al ir disminuyendo la resistividad del monolito.

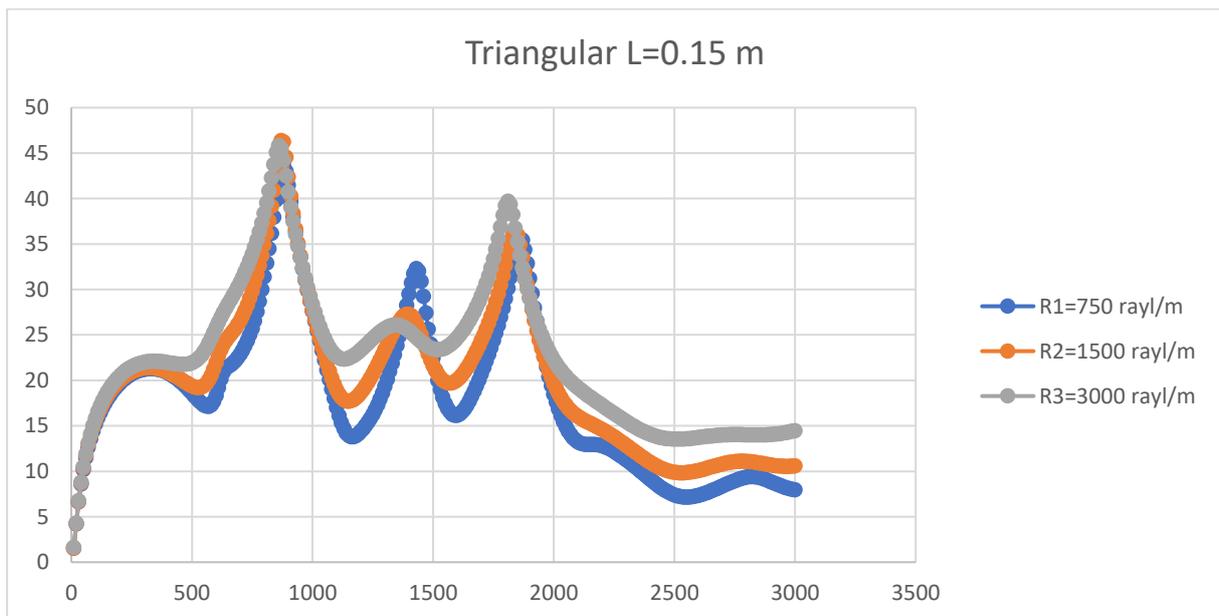


Gráfica 6. Efecto de las distintas resistividades para la sección rectangular con Offset con L=0.15 m

Al igual que con la otra longitud de monolito, se observa un comportamiento mucho mejor desde el punto de vista de la disipación de ruido del modelo con mayor resistividad de monolito

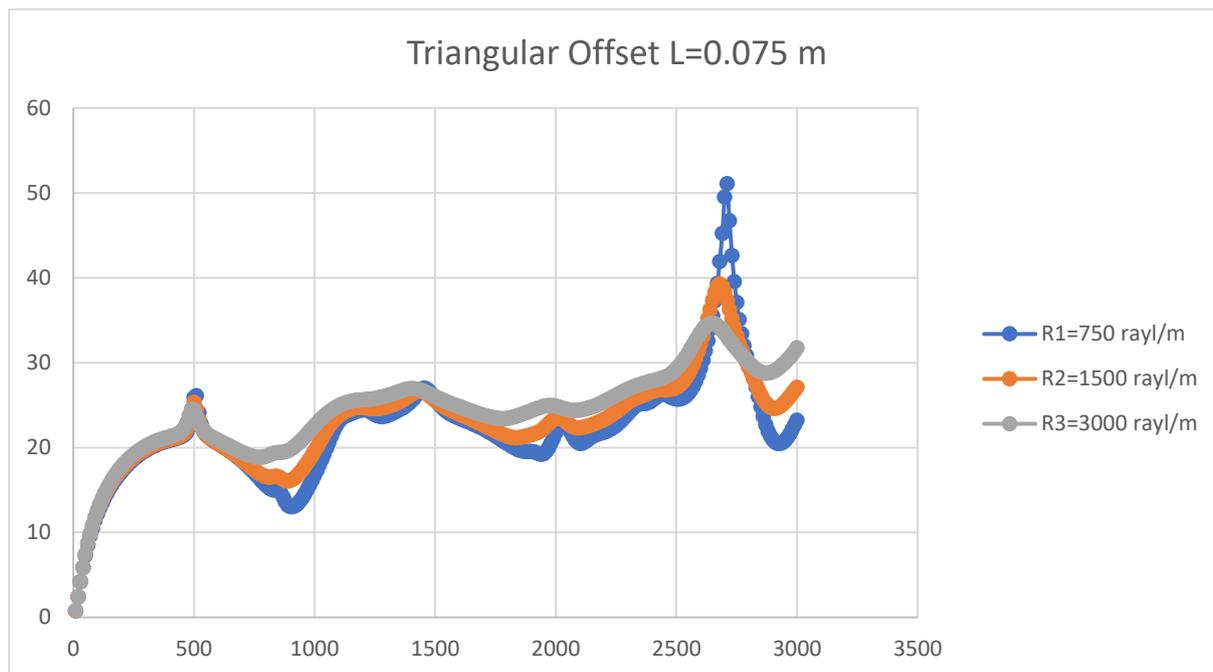


Gráfica 7. Efecto de las distintas resistividades para la sección triangular con L=0.075 m



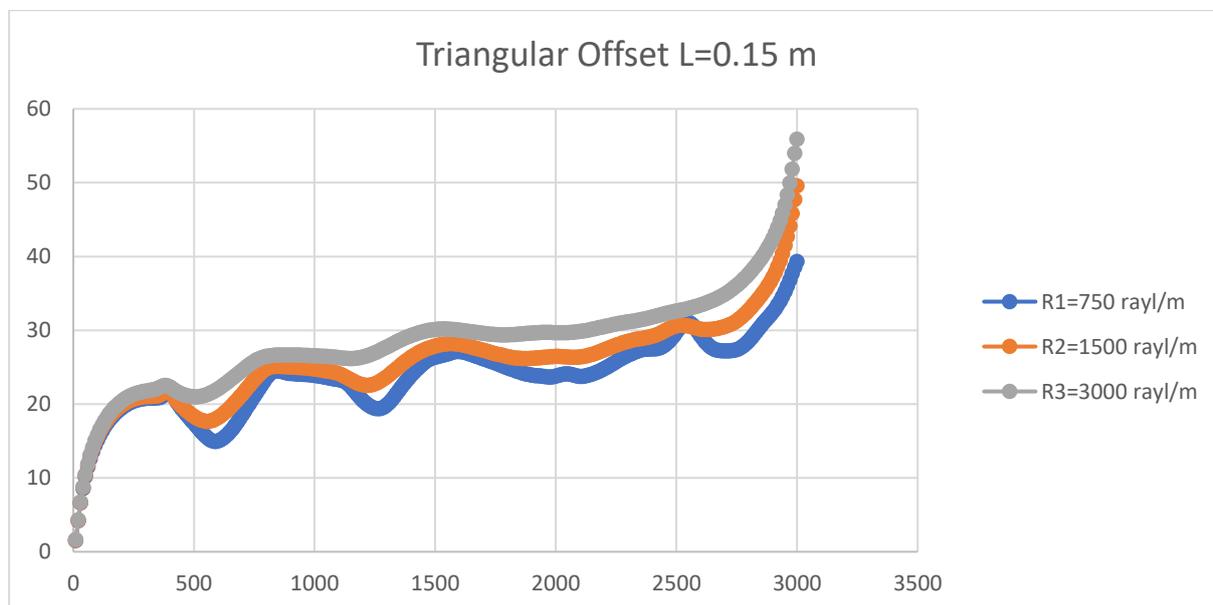
Gráfica 8. Efecto de las distintas resistividades para la sección triangular con L=0.15 m

En la configuración geométrica triangular sin descentrado, se observa un efecto similar de la influencia de la resistividad, independientemente de la longitud del monolito. El modelo con mayor resistividad provoca unas mayores pérdidas de transmisión en prácticamente todo el rango de frecuencias. Es destacable la presencia en la *Gráfica 8* de un pico máximo del modelo con R1 muy por encima del de R3, pero se advierte que en R1 el pico máximo está rodeado de otros dos picos mínimos mucho más prominentes que los de R3. Teniendo en cuenta que un MCIa suele trabajar en un rango de frecuencias y no en frecuencias aisladas, interesa el comportamiento del modelo con R3.



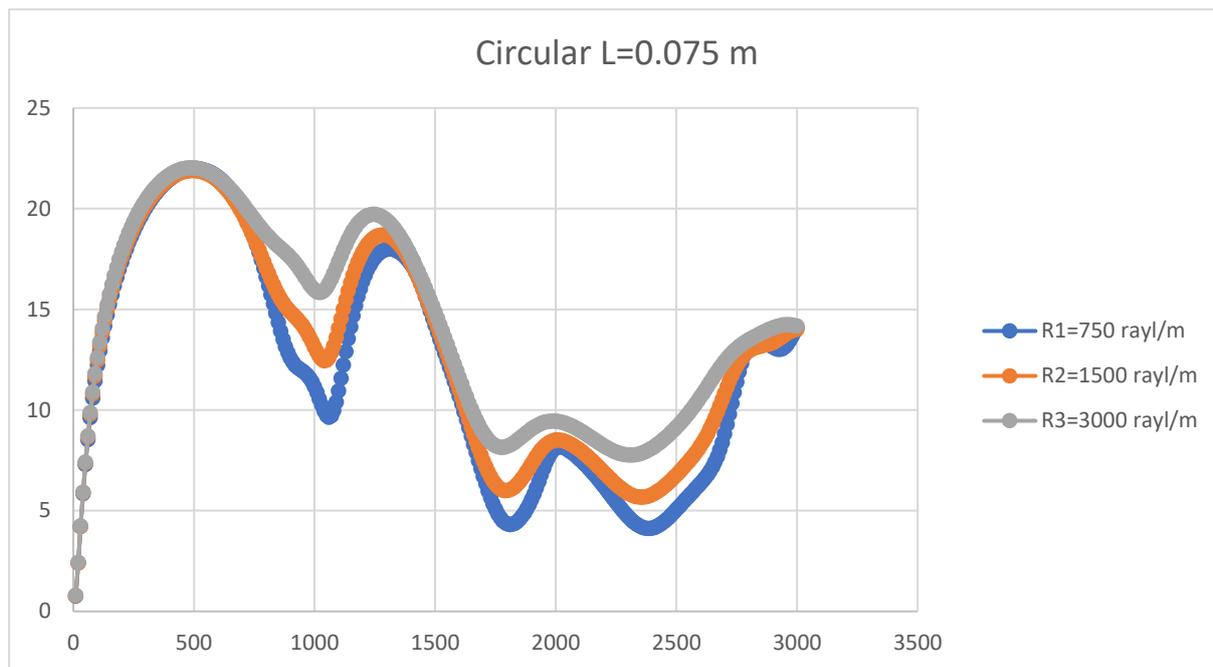
Gráfica 9. Efecto de las distintas resistividades para la sección triangular con Offset con L=0.075 m

El modelo con menor resistividad del monolito presenta picos más pronunciados, tanto en valores máximos como mínimos. A medida que aumenta la resistividad, estos picos son menos pronunciados, pero la componente media aumenta, consiguiéndose para el caso R3=3000 rayl/m la mejor disipación acústica.



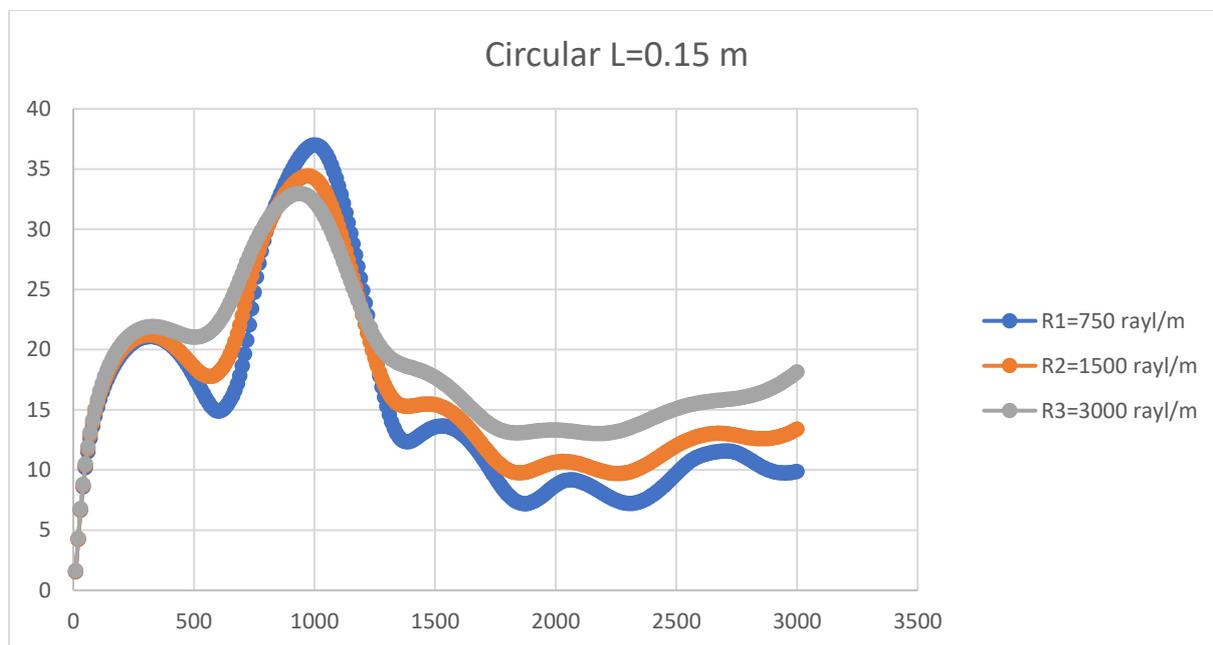
Gráfica 10. Efecto de las distintas resistividades para la sección triangular con Offset con L=0.15 m

En el caso triangular descentrado, el comportamiento del monolito con mayor resistividad es claramente mejor a la hora de conseguir unas mayores pérdidas de transmisión en todo el rango de frecuencias.



Gráfica 11. Efecto de las distintas resistividades para la sección circular con $L=0.075$ m

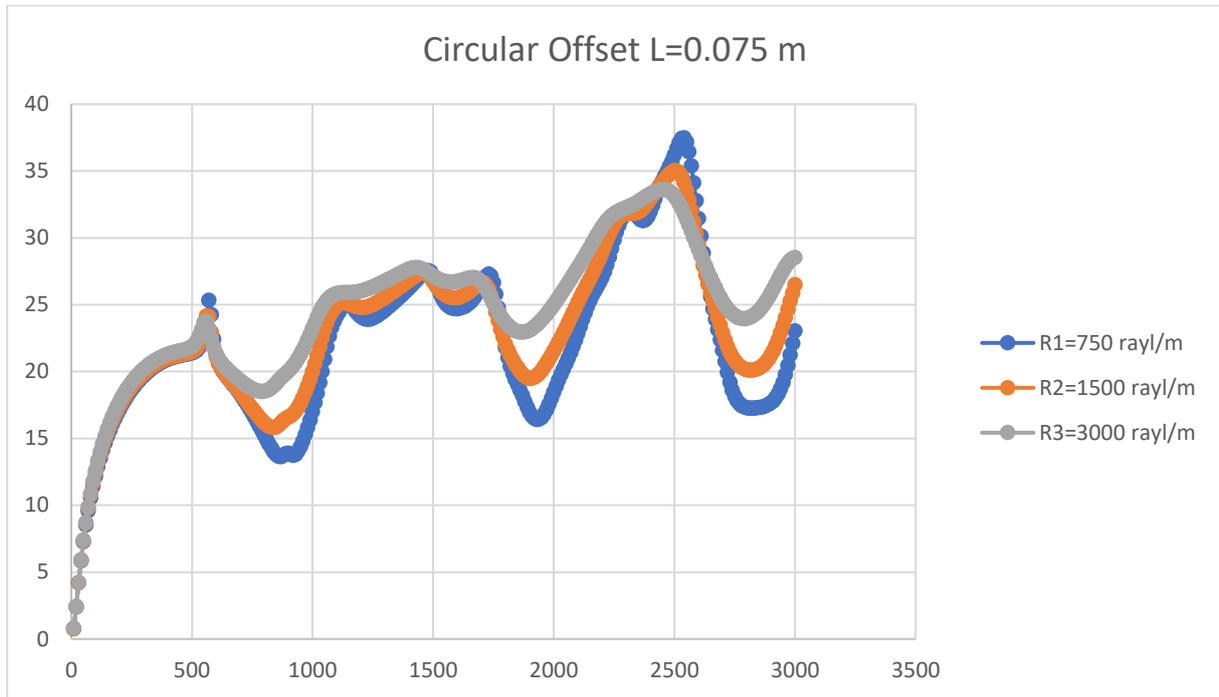
El monolito con resistividad de 3000 rayl/m es el que mejor disipación acústica ofrece. Con resistividades menores se puede observar una componente media de TL cada vez menor, así como unos picos alcanzando menores valores de TL tanto en los máximos como en los mínimos.



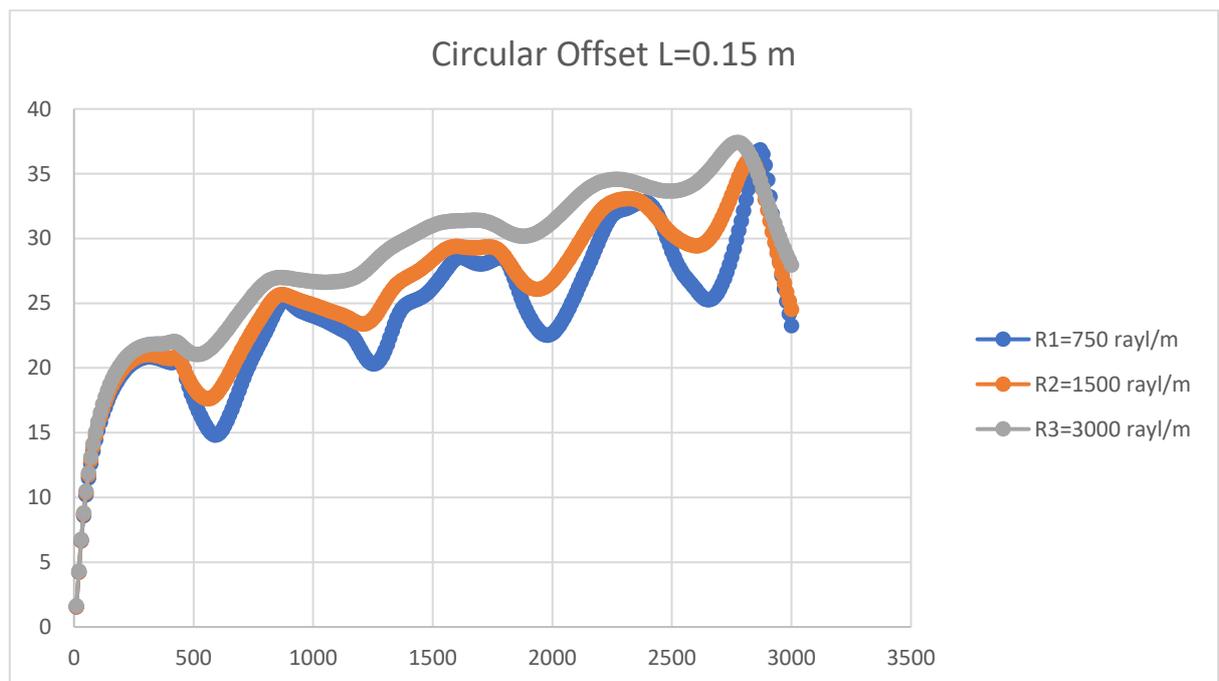
Gráfica 12. Efecto de las distintas resistividades para la sección circular con $L=0.15$ m

El monolito con menor resistividad es el que mayor TL presenta a una frecuencia de unos 1000 Hz, de aproximadamente 37 dB. La diferencia con el monolito con mayor resistividad en este punto (máximo absoluto para esta configuración) es de casi 5 dB, pero la configuración de menor resistividad también es la que alcanza picos más bajos y resulta tener una componente media menor. Si se garantizase que

el motor fuese a funcionar en todo momento en torno a frecuencias de 1000 Hz, la mejor elección sería la de R1, pero como va a moverse en un amplio rango de frecuencias, es más efectivo el monolito con R3=3000 rayl/m.



De manera similar a la *Gráfica 12* anterior, se observa como el monolito con menor resistividad alcanza el máximo absoluto de TL, pero a su vez los picos mínimos son los más acentuados. De nuevo para trabajar en un amplio rango de frecuencias, la opción más interesante es la de un monolito con R3

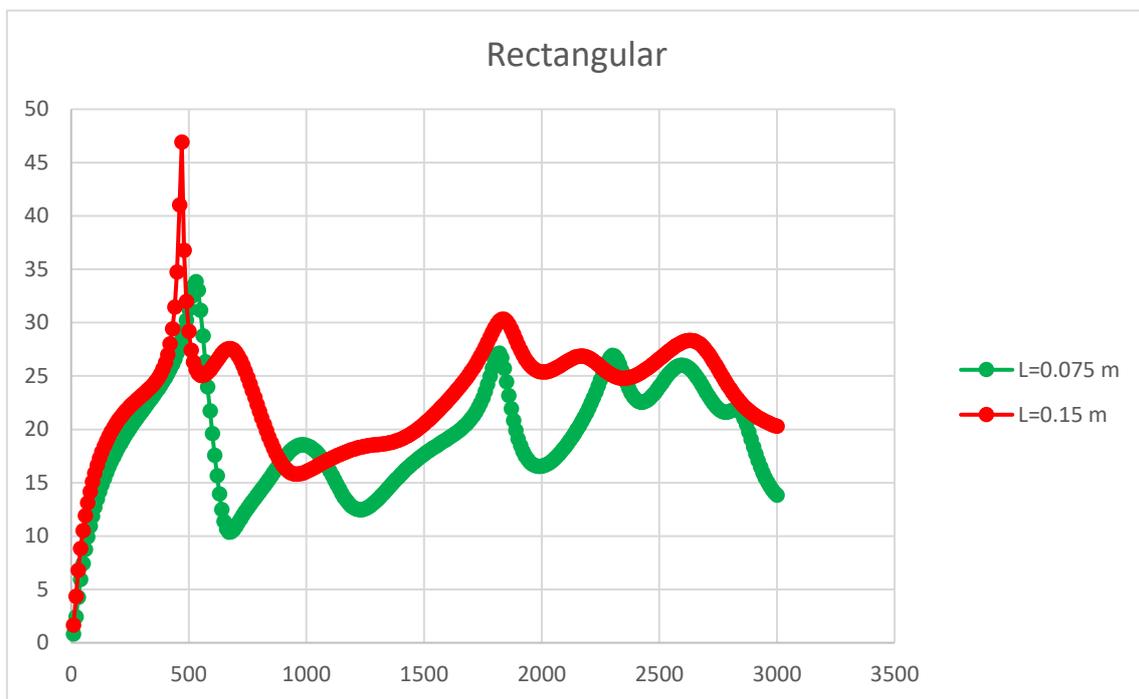


Como en todas las configuraciones anteriores con descentrado del conducto de salida con respecto al de entrada y para la mayor longitud del monolito, 0.15 m, se observa una mayor componente media y unos mayores máximos para el monolito con mayor resistividad. Se observa un comportamiento cada vez peor a medida que se disminuye la resistividad del monolito.

Contrastando los resultados obtenidos en este estudio del efecto de la resistividad del monolito, se observa una clara tendencia, que el aumento de la resistividad del monolito provoca una mayor disipación de energía acústica. Este comportamiento se acentúa en altas frecuencias.

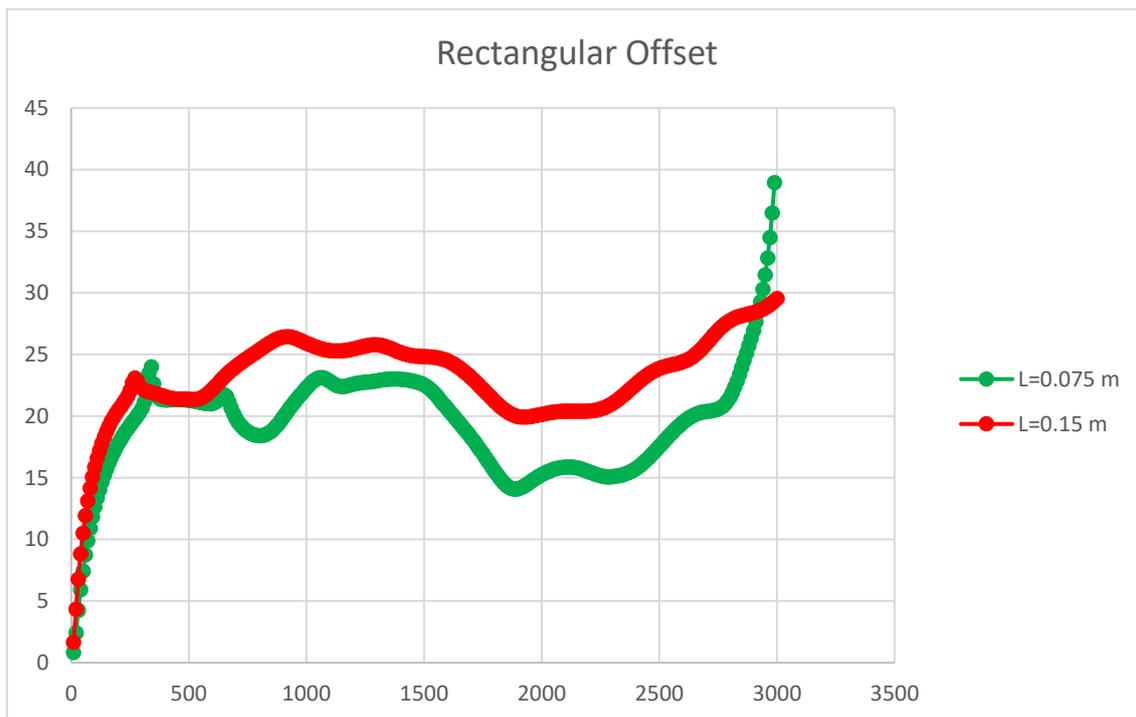
Después de este estudio y para ir acotando los posteriores a la búsqueda de las configuraciones óptimas, se van a estudiar el efecto del resto de variables en el TL teniendo como referencia el monolito con mayor resistividad, 3000 rayl/m.

9.3. Efecto de la longitud del monolito



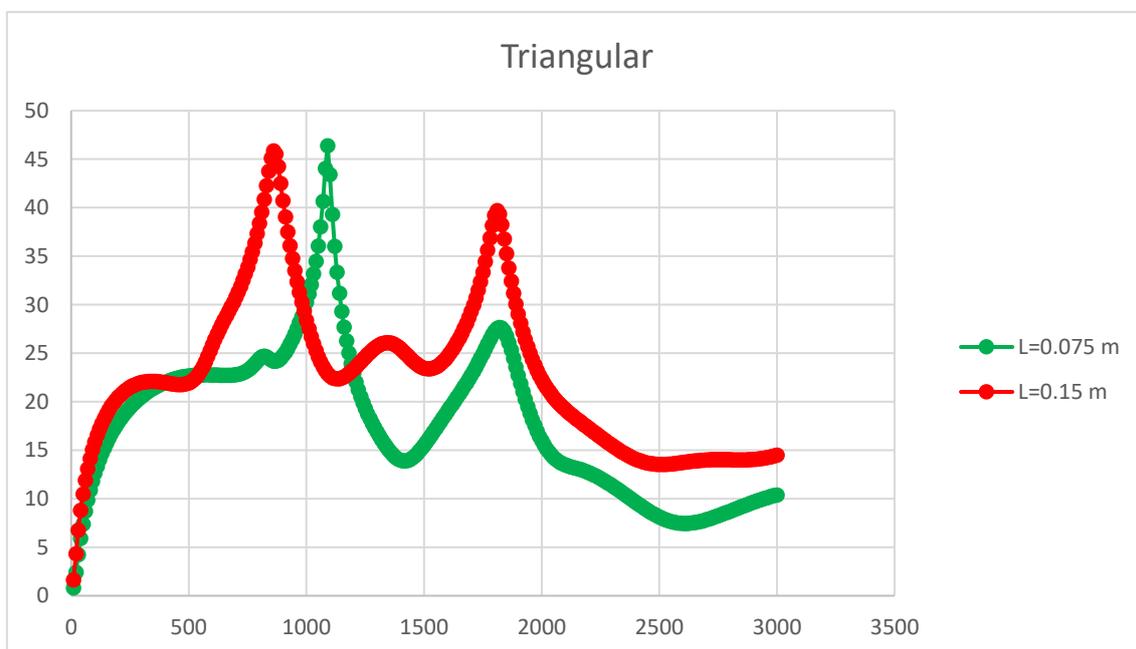
Gráfica 15. Efecto de la longitud del monolito para la sección Rectangular

La configuración con mayor longitud del monolito presenta los picos en valores mayores que la configuración con 0.075 m, también los valles del monolito más largo se sitúan en valores superiores a los del monolito de 0.075 m. Esto hace que la componente media de la cámara del catalizador más larga tenga una componente media mucho mayor que de la cámara más corta, proporcionando una mejor disipación acústica. Puede observarse como al cambiar la longitud del monolito se pueden desplazar los máximos de la gráfica del TL a diferentes frecuencias, por lo que se podría jugar con la longitud del monolito para ubicar los máximos de atenuación en las frecuencias de funcionamiento del motor.



Gráfica 16. Efecto de la longitud del monolito para la sección Rectangular con Offset

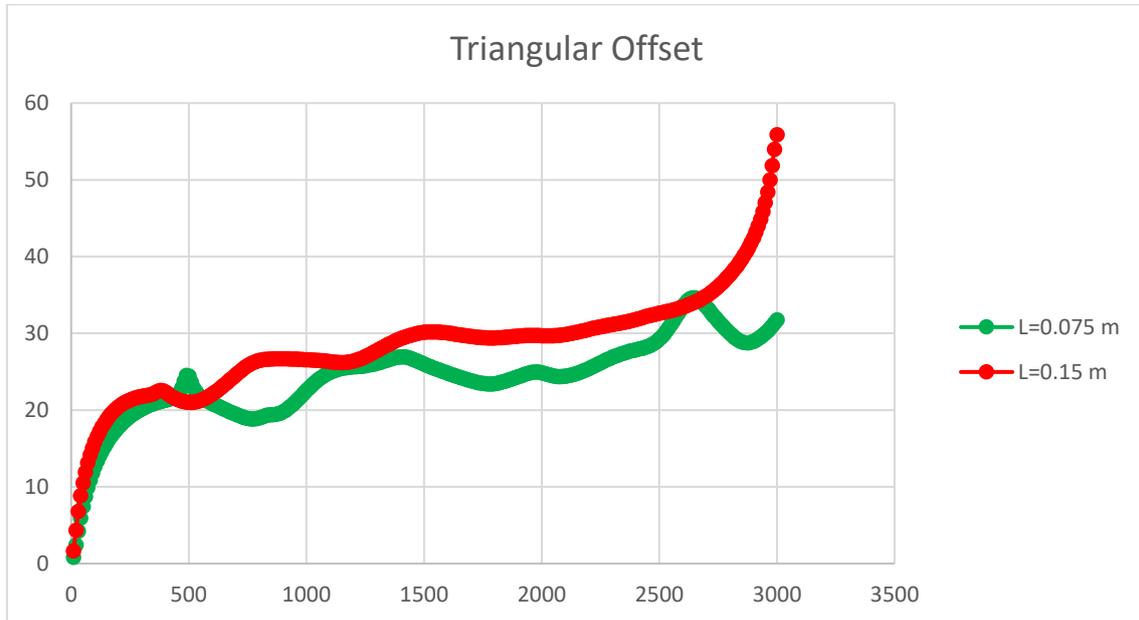
Claramente la configuración con una mayor longitud de la cámara del monolito ofrece una mejor disipación acústica. Al igual que en la gráfica anterior, se puede observar cómo los máximos cambian ligeramente de posición al cambiar la longitud de la cámara monolítica.



Gráfica 17. Efecto de la longitud del monolito para la sección Triangular

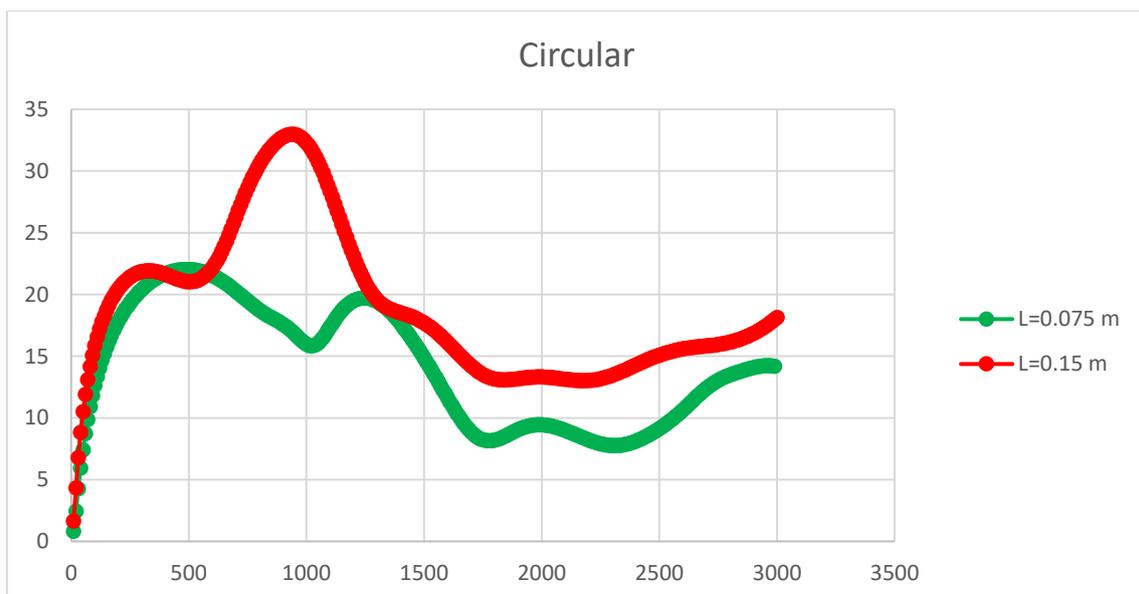
En esta Gráfica 17 se observa claramente lo comentado en las comparaciones anteriores, ya que, sobre todo a bajas frecuencias de hasta unos 1500 Hz, con distintas longitudes de monolito se consigue situar el máximo de atenuación en frecuencias diferentes. Así mismo se constata que la configuración con

mayor longitud, 0.15 m, proporciona una mayor componente media de atenuación de ruido en todo el rango de frecuencias.



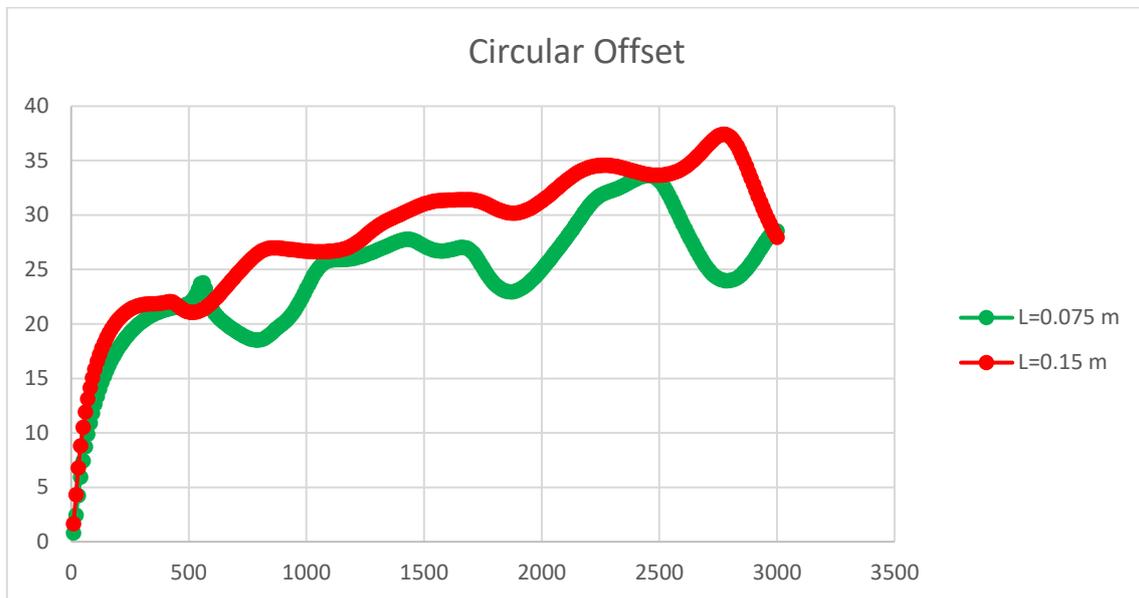
Gráfica 18. Efecto de la longitud del monolito para la sección Triangular con Offset

En esta configuración se obtiene una gráfica del TL frente a la frecuencia bastante más plana que en otras configuraciones, sin la existencia de picos ni valles prominentes. Destaca el crecimiento de la gráfica del TL para la $L=0.15$ m en frecuencias cercanas a los 3000 Hz, pero en la aplicación de un MCIa raramente se van a alcanzar dichas frecuencias de trabajo, por lo que no es necesario darle mucha importancia. Vuelve a presentar mejores propiedades disipativas el modelo con mayor longitud de monolito.



Gráfica 19. Efecto de la longitud del monolito para la sección Circular

Se vuelve a evidenciar que con distintas longitudes de monolito los máximos de atenuación se sitúan en diferentes frecuencias. Así mismo se obtiene una atenuación claramente mejor con la longitud de monolito más grande.



Gráfica 20. Efecto de la longitud del monolito para la sección Circular con Offset

De manera similar a la geometría circular sin descentrado, al cambiar la longitud de la cámara del monolito los picos y valles cambian de ubicación, de la misma forma, la configuración con un monolito más largo ofrece las mejores características disipativas de ruido.

En el estudio del efecto de la longitud del monolito, tras comparar ambas longitudes de estudio para cada una de las geometrías de la sección transversal del monolito, quedan claros los dos aspectos que se han ido comentando previamente en el análisis particular de cada caso:

- En primer lugar, de manera similar a lo que ocurre con la resistividad del monolito, el aumento de la longitud de la cámara del monolito provoca una mayor disipación de energía acústica, haciéndose este efecto más notable incluso a altas frecuencias. Por tanto, la longitud de $L=0.15$ m da un mejor TL para todas las configuraciones geométricas.
- En segundo lugar, la variación de la longitud del monolito permite cambiar la posición de los picos de atenuación (también la de los valles). Este comportamiento es interesante si se está diseñando una aplicación en la que la frecuencia de trabajo se encuentra en un rango muy reducido, ya que se puede jugar con distintas longitudes de monolito hasta ubicar los máximos en las frecuencias de trabajo.

Por lo tanto, en el estudio del efecto de la longitud del monolito, seleccionamos la longitud mayor, en este caso 0.15 m, en la búsqueda de la configuración óptima.

Por lo tanto, los efectos del resto de variables que intervienen en la disipación acústica van a compararse tomando como referencia los valores que mejor comportamiento proporcionan en términos de resistividad y longitud del monolito, esto es 3000 rayl/m y 0.15 m respectivamente.

9.4. Efecto del descentrado

Todas las geometrías de la sección transversal del monolito, rectangular, triangular y circular, se han estudiado para el caso en el que los conductos de entrada y salida estén alineados, y de la misma forma para el caso en el que el conducto de salida esté descentrado con respecto al de entrada.

Este descentrado en todas las configuraciones es en la dirección vertical y en cada una de las geometrías de un valor diferente, pero este valor no es un valor cualquiera, sino que tiene justificación técnica.

La distancia de descentrado (offset) ha sido calculada para que el centro del conducto circular de salida del catalizador caiga sobre la línea nodal donde exista presión nula. En cada geometría particular, esta línea nodal de presión nula se corresponderá con un modo distinto, si bien es cierto que todos ellos son modos de orden superior. Cabe destacar que estos modos de orden superior son modos tridimensionales y no de onda plana, y aparecen cuando la frecuencia va aumentando. De esta manera se consigue un nivel razonable de TL al tener ubicado el conducto de salida en una zona de baja presión acústica.

La distancia de descentrado y el modo para cada una de las diferentes geometrías se especifican a continuación:

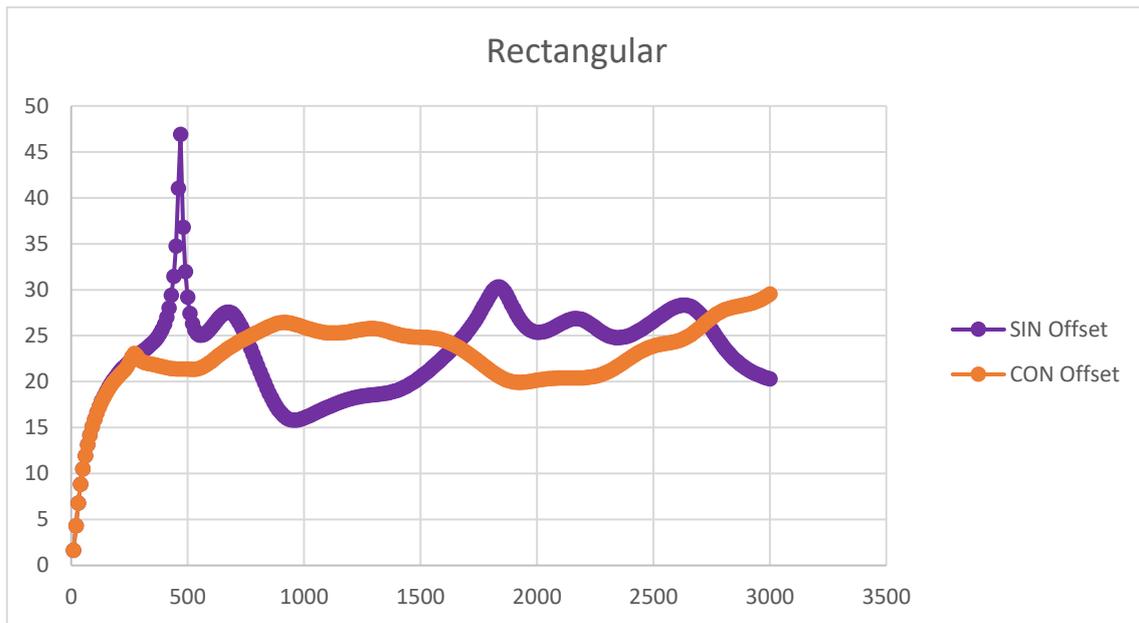
- **Sección rectangular.** La distancia de descentrado se ha calculado para que el conducto de salida caiga sobre la línea nodal de presión nula del segundo modo de orden superior. Dicho modo tiene una frecuencia natural a los 15°C de cálculo de unos 930 Hz. Para que el conducto de salida caiga sobre esta línea nodal, la distancia de descentrado debe de ser de 0.0913 m.
- **Sección triangular.** La distancia de descentrado se ha calculado para que el conducto de salida caiga sobre la línea nodal de presión nula correspondiente al tercer modo de orden superior, en el segundo modo, la zona de presión nula cae en el centro del triángulo y el resultado es similar al caso sin offset. Dicho modo tiene una frecuencia natural a los 15°C de cálculo de unos 1288.1 Hz. Para que el conducto de salida caiga sobre esta línea nodal, la distancia de descentrado debe de ser de 0.1824 m.
- **Sección circular.** La distancia de descentrado se ha calculado para que el conducto de salida caiga sobre la línea nodal de presión nula del primer modo radial de orden superior. Para el caso de sección circular, existe una fórmula que da la posición de la línea nodal comentada:

$$Offset = 0.6276 \cdot R \quad (136)$$

Siendo R el radio del círculo, que en este caso es de 0.1275 m.

Por lo tanto, la distancia de descentrado es de 0.08 m desde el centro de la circunferencia.

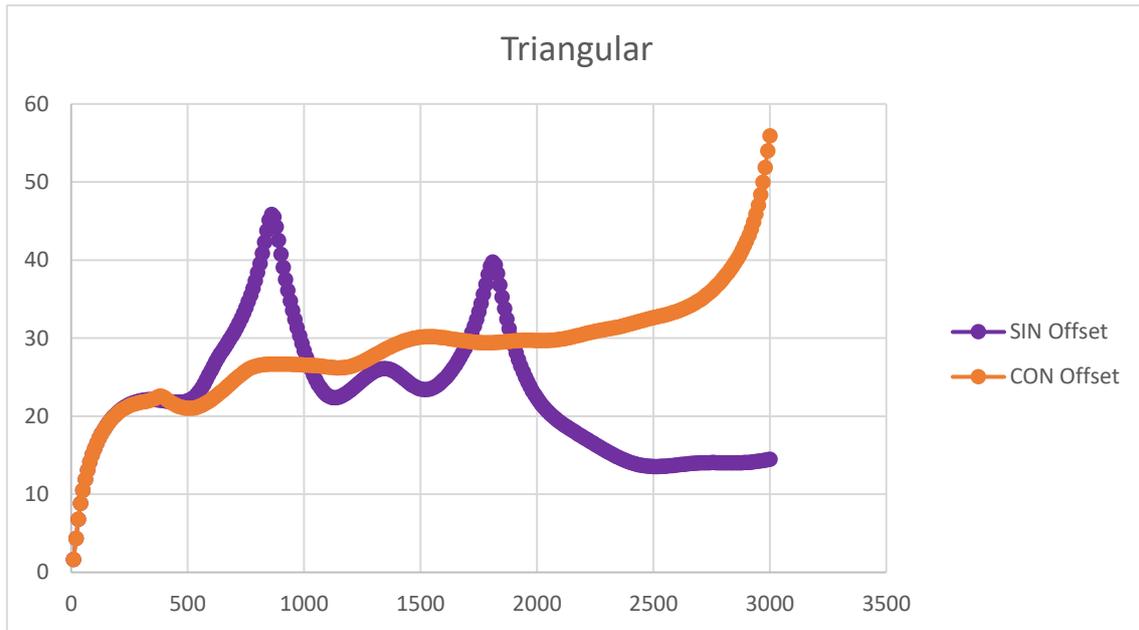
Los efectos del descentrado para cada caso geométrico se presentan a continuación. Cabe mencionar que el resto de las variables, resistividad del monolito y longitud del mismo, son 3000 rayl/m y 0.15 m respectivamente, ya que en los análisis anteriores se ha determinado que estos parámetros son los óptimos desde el punto de vista de la disipación de ruido.



Gráfica 21. Efecto del descentrado (Offset) para la sección Rectangular

Se puede observar como la *Gráfica 21* tiene 4 partes claramente diferenciadas. La primera abarca las bajas frecuencias hasta unos 250 Hz, donde ambas configuraciones presentan un TL prácticamente similar. Desde los 250 Hz hasta los 750 Hz aproximadamente, se observa una mejor disipación acústica del modelo sin descentrado, que a su vez presenta en este rango y a unos 500 Hz su pico de atenuación, si bien este pico es muy acentuado y solo interesante si se va a trabajar en un pequeño rango de frecuencias en torno a este valor. Desde los 750 hasta los 1600 Hz, el modelo con descentrado ofrece un comportamiento disipativo mucho mejor que el modelo sin descentrado, ubicándose en esta zona su pico de atenuación, este pico no es tan pronunciado como el del otro modelo y presenta una solución muy interesante si el MCIA va a trabajar en este rango, ya que presenta un TL medio de 25 Hz en todo el mismo. A altas frecuencias, entre 1600 y 2750 Hz la tendencia del tramo anterior se invierte, mostrando el modelo sin descentrado una mejor disipación acústica. En el tramo final de la *Gráfica 21* se observa una crecida bastante interesante del TL para el modelo con descentrado que contrasta con la caída del TL para el modelo sin descentrado a frecuencias cercanas a los 3000 Hz.

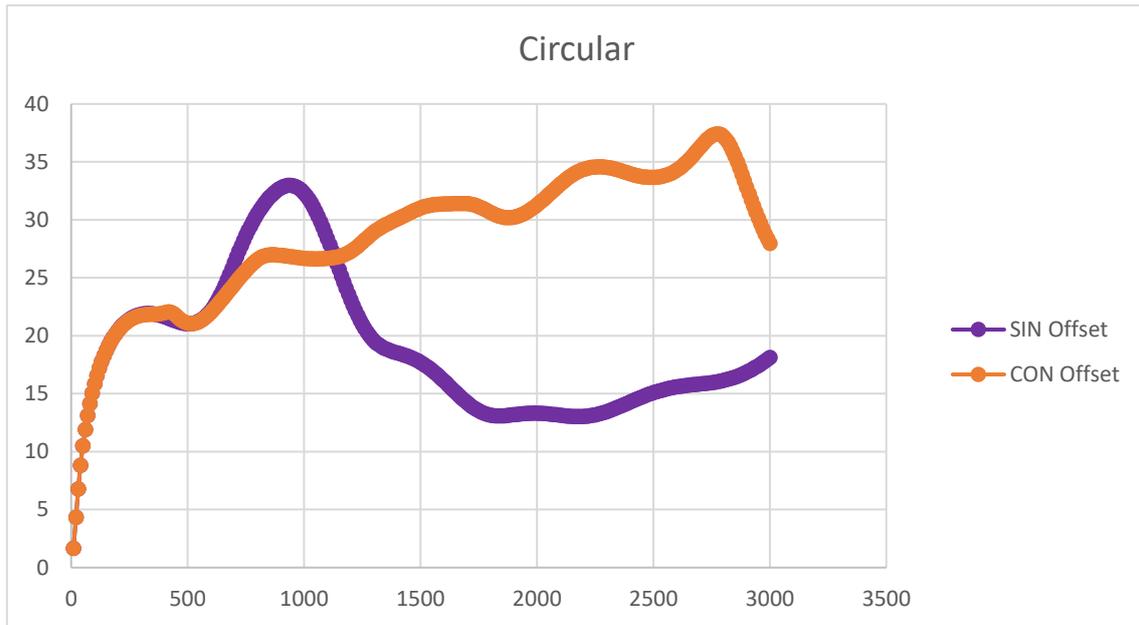
Queda claro que para la geometría rectangular, a menos de que el MCIA trabaje en frecuencias medias (entre 750 y 1600 Hz), la mejor disipación de ruido la ofrece el modelo con conductos de entrada y salida concéntricos. Como se ha explicado previamente, el offset ha sido calculado para que el conducto de salida caiga sobre la línea nodal del segundo modo de orden superior, por lo que en base a los rangos de funcionamiento del MCIA puede calcularse para caer sobre otro modo.



Gráfica 22. Efecto del descentrado (Offset) para la sección Triangular

De manera similar a como ocurre en el caso de sección geométrica transversal rectangular, se puede observar cómo en frecuencias de hasta 500 Hz en este caso el comportamiento de ambos modelos es similar. Si bien a frecuencias medias, desde los 500 hasta los 2000 Hz aproximadamente, se observa una clara diferencia de comportamiento entre las dos configuraciones; el modelo con Offset presenta un TL cada vez mayor con el aumento de la frecuencia sin presentar grandes picos ni valles, mientras que el modelo sin descentrado presenta un comportamiento muy irregular, con dos grandes picos (a 850 Hz y 1820 Hz) interesantes si el trabajo se va a enfocar en estas frecuencias particulares, pero muestra también dos picos en los que la diferencia de TL con la configuración con descentrado es bastante notable. A altas frecuencias, desde los 2000 Hz en adelante, el TL del modelo con descentrado es mucho mejor, logrando niveles de disipación acústica muy altos.

Por lo tanto, el modelo con descentrado óptimo presenta una mejor disipación acústica en todo el rango de frecuencias a excepción de en frecuencias puntuales alrededor de los dos picos de 850 y 1820 donde sería interesante el modelo sin offset ya que ubica en esas frecuencias picos muy altos de TL y bastante mayores a los del modelo con Offset.

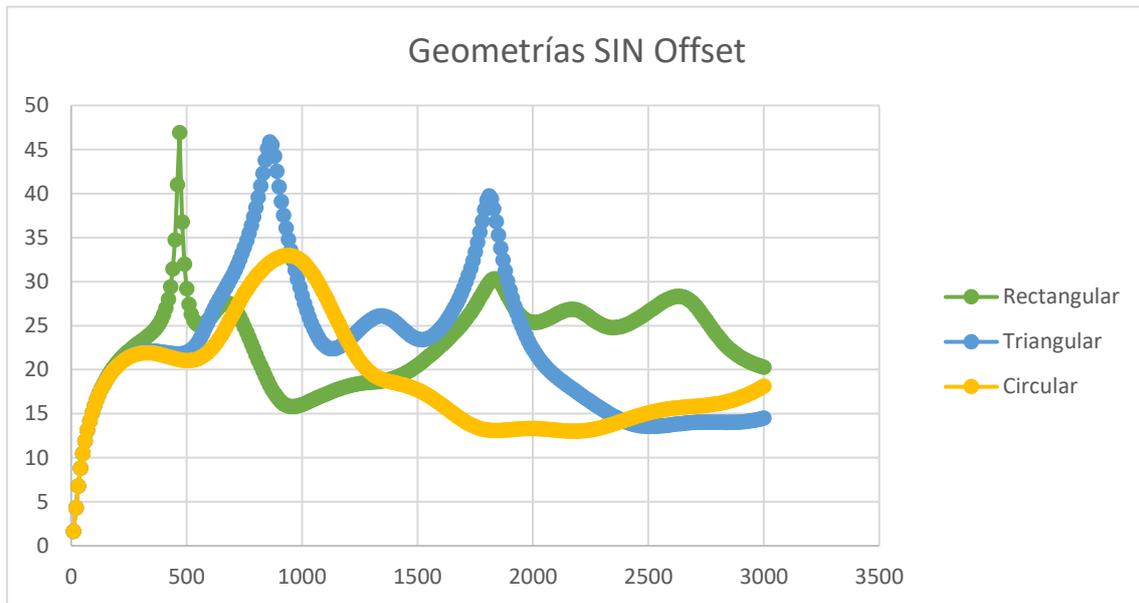


Gráfica 23. Efecto del descentrado (Offset) para la sección Circular

Se vuelve a observar un comportamiento similar de los dos modelos a frecuencias de hasta 500 Hz. En frecuencias de en torno a los 1000 Hz destaca el máximo absoluto de la gráfica del modelo sin descentrado, ofreciendo una disipación acústica notablemente superior al modelo con Offset, además se trata de un máximo que abarca un rango considerable en torno a los 1000 Hz, por lo que si el motor de estudio se va a mover en estas frecuencias su elección es muy interesante. Sin embargo, a partir de los 1200 Hz, es decir para frecuencias medias y altas, el comportamiento del modelo con Offset es mucho mejor que el modelo sin Offset desde el punto de vista del TL, las diferencias llegan a superar los 20 dB para algunas frecuencias concretas.

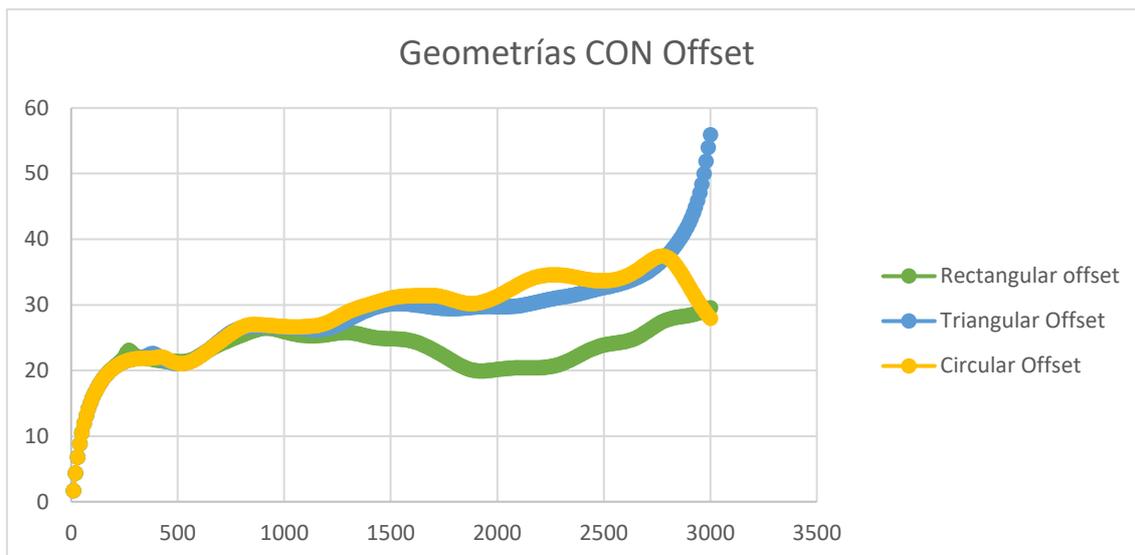
El descentrado del conducto de salida con respecto al de entrada desplaza o retrasa la aparición de modos de orden superior a altas frecuencias, favoreciendo una mejor atenuación en un rango de frecuencias mayor.

9.5. Efecto de la geometría



Gráfica 24. Comparación de las distintas geometrías sin Offset

La curva de TL es idéntica para las tres geometrías a bajas frecuencias, hasta 250 Hz. A partir de este punto, cada una de las geometrías ofrece un comportamiento totalmente diferente. A medias frecuencias (entre 500 y 2000 Hz) la curva disipativa más interesante es la de la sección triangular, ubicando en este intervalo sus dos máximos y teniendo la mayor componente media de TL. A altas frecuencias, más de 2000 Hz, se observa el mejor comportamiento de la sección rectangular, con una disipación bastante superior a la de las otras dos geometrías. En lo que respecta a la sección circular, tiene el peor comportamiento a partir de los 1200 Hz, disipando una media de 15 dB a partir de este valor. Sin embargo, existe una región en la que el catalizador con cámara de sección circular es la opción más interesante, esta región es la que rodea a los 1000 Hz, donde muestra su máximo absoluto. Por lo tanto, si la frecuencia de trabajo del MCIA de estudio va a oscilar siempre alrededor de los 1000 Hz (concretamente entre los 750 y los 1200 Hz) la instalación del catalizador con sección de cámara circular es la más adecuada.



Gráfica 25. Comparación de las distintas geometrías con Offset

En este caso, se distinguen dos regiones claramente diferenciadas. La primera, de bajas frecuencias, hasta 1000 Hz aproximadamente, en la que el comportamiento de las 3 geometrías con descentrado de sus conductos de entrada y salida ofrecen un comportamiento similar. Es especialmente buena la disipación acústica en esta región en las frecuencias alrededor de los 1000 Hz, con una disipación de unos 27 dB. A partir de los 1000 Hz y para frecuencias medias-altas destaca el mal comportamiento de la sección rectangular con descentrado con respecto a las otras dos, especialmente en el rango de los 2000 Hz donde se ubica el valle de su gráfica con un TL aproximado de 20 dB. Por el contrario, las geometrías triangulares y circular con descentrado mejoran su comportamiento a medias y altas frecuencias, con curvas claramente ascendentes. Ambas gráficas son bastante parecidas, pero existen dos detalles que las diferencian; en primer lugar la sección circular tiene un pico en frecuencias alrededor de los 2250 Hz que la convierten en una mejor opción que la sección triangular en frecuencias de ese orden, por último, en la parte final del rango de estudio, en frecuencias cercanas a los 3000 Hz, se detecta un descenso bastante acentuado en la gráfica de TL de la sección circular que contrasta con un ascenso notable de la gráfica de la sección triangular.

En cuanto al efecto de la geometría en la disipación acústica del catalizador, no se observa ningún comportamiento claramente mejor de una geometría frente al resto, si no que todas las geometrías, tanto en el caso con offset como en el de sin offset, tienen rangos de frecuencia en los que su instalación es más interesante y efectiva que las otras, por lo que dependerá de las frecuencias de trabajo del MCIa en particular. Si bien es cierto, que en el caso de las geometrías con Offset es descartable la configuración con sección geométrica rectangular, ya que a bajas frecuencias se comporta de manera similar a las otras dos geometrías, pero en frecuencias mayores su comportamiento es claramente peor.

10. CONCLUSIONES

Desde un punto de vista global, se considera necesario desarrollar la mentalidad de sostenibilidad y respeto al medio ambiente, sobre todo en una forma de contaminación a la que quizás muchas veces no se le dé la importancia que requiere, pero con un impacto notable en el planeta: la contaminación acústica. En muchas ocasiones, a la reducción de esta contaminación pueden contribuir equipos y dispositivos diseñados inicialmente con otros fines. Aunque en un principio pueden ignorarse propiedades interesantes de su configuración o naturaleza, tras un estudio y una correcta implantación, pueden lograrse mejoras notables en aspectos, a priori, ajenos a la funcionalidad de este equipo.

Como contribución fundamental de este TFM, cabe señalar que se ha desarrollado e implementado una metodología numérica de caracterización del comportamiento acústico del catalizador de un motor de combustión interna alternativo. Como herramienta de modelización, simulación y análisis se ha utilizado el Método de los Elementos Finitos, en concreto el programa comercial Ansys en sus versiones APDL y Workbench 2020 R1. Los resultados obtenidos numéricamente se han contrastado satisfactoriamente con medidas experimentales en el laboratorio realizadas por el equipo investigador en el cual se ha integrado este TFM.

Una vez implementada la metodología de trabajo para el problema bajo estudio y después de analizar y contrastar los resultados, algunas conclusiones específicas de este TFM son las siguientes:

- El desarrollo de este trabajo ha necesitado de la aplicación de conocimientos adquiridos en diversas asignaturas cursadas durante el grado y el Máster de Ingeniería Industrial, si bien cabe destacar los relacionados con la asignatura Vibraciones y acústica.
- A la hora de realizar un estudio basado en la modificación de los valores de los parámetros representativos de un problema (en este caso geometría, descentrado de conductos, longitud del monolito y resistividad del monolito) para ver el efecto de cada uno de estos en el comportamiento, es necesario encontrar una metodología, en este caso el MEF, y tratar la información de entrada y la configuración de la misma para hacer el cálculo viable, en este caso desde el punto de vista del coste computacional. Cabe destacar que el presente trabajo analiza 36 casos diferentes de configuración de catalizador, por lo que es necesario encontrar una configuración que permita reducir el tiempo dedicado al cálculo, para emplear el mayor tiempo posible al análisis y a la comparación de los resultados obtenidos.
- Una hipótesis asumida en los cálculos ha sido la de modelar la región monolítica como una región de propagación de ondas sonoras en 1D. Esta hipótesis no solo ayuda a mejorar el coste computacional, ya que supone una gran disminución en la cantidad de elementos finitos para realizar el cálculo al ser sustituida esta región por una matriz, sino que como se ha constatado en trabajos previos, muestra un comportamiento mejor que un modelado 3D de esta región monolítica.
- La curva de TL obtenida en modelos con resistividades mayores sigue un patrón bastante similar a los modelos con menores resistividades, pero un aumento de la resistividad del monolito da lugar a la obtención de una componente media de TL mayor. También cabe mencionar un mejor comportamiento de los modelos con mayor resistividad desde el punto de vista del índice de transmisión acústica para altas frecuencias.

- Aunque el efecto de la longitud del monolito queda atenuado por la sustitución de este por una matriz de transferencia, se advierte una mayor disipación de energía acústica en conductos largos para todas las geometrías. El aspecto más interesante de esta variable es que permite controlar la posición de los picos y valles del TL, siendo muy útil en aplicaciones donde la frecuencia de trabajo sea muy constante.
- El offset o descentrado de conductos, calculado de tal forma que los conductos de salida coincidan con líneas nodales de presión nula, da lugar a comportamientos notablemente favorables a partir de los 1000 Hz con respecto a las configuraciones sin descentrado.
- Tomando como referencia la geometría de la cámara del monolito, se extraen diferentes conclusiones utilizando descentrado o sin él entre el conducto de entrada y de salida. Para las configuraciones en las que estos conductos están alineados, se advierte un comportamiento mejor para la sección circular en frecuencias alrededor de los 1000 Hz. Sin embargo, para altas frecuencias el mejor comportamiento lo ofrece la sección rectangular. La sección triangular logra los mayores picos de atenuación, por lo que su aplicación es muy interesante para configuraciones de trabajo en torno a altas frecuencias.
- Siguiendo con lo expuesto en el punto anterior, comparando las distintas geometrías, pero esta vez en configuraciones con descentrado entre el conducto de entrada y el de salida, se observa un comportamiento prácticamente similar de las tres geometrías a bajas frecuencias dado que todas tienen el mismo valor de sección transversal. Según va aumentando la frecuencia, se advierte un descenso en el rendimiento de la sección rectangular (al revés de lo que ocurría sin descentrado) con respecto al comportamiento de las secciones triangular y circular, ambas con comportamientos bastante similares a frecuencias medias-altas. Esto se debe a la propagación prematura de modos de orden superior (no planos) en la sección rectangular, que tiene un efecto negativo en las prestaciones de atenuación sonora.

11. DESARROLLOS FUTUROS

Finalizado este Trabajo de Fin de Máster y a la vista de los resultados obtenidos y de la aplicabilidad de los mismos en vehículos propulsados mediante MCIA, se proponen unas líneas futuras de investigación de este fenómeno acústico:

- En primer lugar, en este trabajo se ha estudiado el comportamiento acústico de un catalizador, por lo que sería interesante realizar un estudio similar del resto de elementos de la línea de escape de un vehículo (silenciadores, filtro de partículas, etc.) o incluso de la línea de escape completa, integrando todos estos elementos y obteniendo conclusiones y ratios de mejora globales.
- Este trabajo se ha implementado íntegramente mediante ANSYS APDL y Workbench, pero el catálogo de programas de cálculo mediante el MEF es muy amplio, por lo que podría ser interesante realizar estudios similares con otros programas, por ejemplo, Comsol, y comparar los resultados obtenidos. De esta manera podría cuantificarse la precisión de uno y otro programa, teniendo como referencia datos obtenidos en el laboratorio, y extraer conclusiones de la forma de trabajar de cada uno de los programas, algoritmos de mallado, de acotación del error, etc.
- De la misma forma, como se ha visto en el “Capítulo 6. Caracterización acústica de catalizadores mediante el método de los elementos finitos”, el MEF está gobernado por una formulación claramente definida, a la que hay que acoplar las ecuaciones particulares del problema de estudio, en este caso principalmente las correspondientes al fenómeno de propagación sonora (ecuación de ondas). El grupo de investigación tiene varias décadas de experiencia en la implementación de todas estas ecuaciones en programas propios como Matlab, Mathcad, etc. y sería interesante continuar las actividades en este sentido para abarcar casos de diseño más generales.
- Por último, dentro del elemento de estudio, el catalizador, se ha acotado el análisis a las configuraciones comentadas durante todo el transcurso del trabajo, que han dado lugar a un total de 36 casos diferentes. Sin embargo, las posibles configuraciones de catalizador son muy amplias. Sería interesante el análisis de otras líneas nodales donde ubicar el conducto descentrado y ver su efecto. También se han asumido varias hipótesis, como la de modelado del monolito como conducto de propagación de ondas sonoras en 1D, ausencia del flujo medio y baja temperatura. Sería interesante realizar el estudio asumiendo hipótesis diferentes a estas.

12. BIBLIOGRAFÍA

- Albelda, J., Denia, F.D., Torres, M., & Fuenmayor, F.J. (2007). A transversal substructuring mode matching method applied to the acoustic analysis of dissipative mufflers. *Journal of Sound and Vibration*, 303, 614-631.
- Alfie, M., & Salinas, O. (2017). Ruido en la ciudad. Contaminación auditiva y ciudad caminable. *Estudios demográficos urbanos*, 65-96.
- Antebas, A., Denia, F.D., Pedrosa, A.M., & Fuenmayor, F.J. (2013). A finite element approach for the acoustic modelling of perforated dissipative mufflers with non-homogeneous properties. *Mathematical and Computer Modelling*, 57, 1970-1978.
- Denia, F.D. (2019). Fenómenos de propagación. *Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales UPV*.
- Denia, F.D. (2019). La ecuación de ondas. *Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales UPV*.
- Denia, F.D., Albelda, J., Fuenmayor, F.J., & Torregrosa, A.J. (2001). Acoustic behaviour of elliptical chamber mufflers. *Journal of Sound and Vibration*, 241, 401-421.
- Denia, F.D., Antebas, A.G., Kirby, R., & Fuenmayor, F.J. (2009). Multidimensional acoustic modelling of catalytic converters. *16th International Congress of Sound and Vibration*. Cracovia.
- Denia, F.D., Antebas, A.J., Martínez-Casas, J., & Fuenmayor, F.J. (2009). Modelado numérico del comportamiento acústico de catalizadores. Influencia de la técnica de acoplamiento conducto/monolito en la predicción de la atenuación sonora. *Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería, Barcelona*.
- Denia, F.D., Antebas, A., Selamet, A., & Pedrosa, A.M. (2011). Acoustic characteristics of circular dissipative reversing chamber mufflers. *Noise Control Engineering Journal*, 59, 234-246.
- Denia, F.D., Ferrándiz, B., Martínez-Casas, J., Baeza, L., & Sánchez-Organ, E.M. (2021). Sound propagation in after-treatment devices with arbitrary cross section. Modelling and acoustic performance optimization. *27th International Congress of Sound and Vibration*. online.
- Denia, F.D., Martínez-Casas, J., Baeza, L., & Fuenmayor, F.J. (2012). Acoustic modelling of exhaust devices with non-conforming finite element meshes and transfer matrices. *Applied Acoustics*, 713-722.
- García, R. (2018). *Contribución al modelado y simulación acústica mediante elementos finitos de dispositivos con monolito en sistemas de escape de vehículos*. Trabajo Fin de Máster, UPV, Valencia.
- Iberdrola. (Diciembre de 2020). Obtenido de <https://www.iberdrola.com/medio-ambiente/que-es-contaminacion-acustica-causas-efectos-soluciones>
- Juárez, P. (2020). *Diseño de una metodología para la modelización acústica 3D mediante elementos finitos de dispositivos con monolito en sistemas de escape de vehículos. Aplicación a filtros de partículas diésel*. Trabajo Fin de Máster, UPV, Valencia.
- Mundo Motor. (Diciembre de 2020). Obtenido de <https://www.mundodelmotor.net/catalizadores/>

- Munuera, P. (2019). *Desarrollo e implementación de una metodología de caracterización del comportamiento acústico de silenciadores reactivos y disipativos mediante Ansys Workbench*. Trabajo Fin de Máster, UPV, Valencia.
- Pelayo, C. (2016). *Modelado y simulación acústica 3D mediante Comsol de dispositivos de la línea de escape en vehículos. Aplicación a catalizadores*. Trabajo Fin de Máster, UPV, Valencia.
- Pérez-Olivares, M. (18 de Marzo de 2020). *Ayuda en Acción*. Obtenido de <https://ayudaenaccion.org/ong/blog/sostenibilidad/tipos-contaminacion-ambiental/>
- Sánchez-Orgaz, E.M., Denia, F.D., Martínez-Casas, J., & Baeza, L. (2014). 3D acoustic modelling of dissipative silencers with non-homogeneous properties and mean flow. *Advances in Mechanical Engineering*.
- Selamet, A., Easwaran, V., Novak, J., & Kach, R. (1998). Wave attenuation in catalytic converters: Reactive versus dissipative effects. *Acoustic Society of America*.
- Técnicas Computacionales en Ingeniería Mecánica*. (2019). Valencia: Área de conocimiento de Ingeniería Mecánica UPV.
- Wikipedia. (Diciembre de 2020). Obtenido de https://es.wikipedia.org/wiki/Contaminaci%C3%B3n_ac%C3%A1stica

DOCUMENTO N° 2:

PRESUPUESTO

1.1. Secciones del trabajo

A la hora de abordar el presupuesto del presente Trabajo de Fin de Máster, se ha dividido el mismo en secciones cuantificables de trabajo. Cada una de estas secciones ha requerido de un tiempo que se recoge en la siguiente *Tabla 2*:

Número	Descripción	Tiempo (h)
1	Lectura de bibliografía relacionada y estudios previos	25
2	Elaboración de modelos mediante el MEF y obtención de resultados	130
3	Redacción del documento y generación de planos	100
4	Reuniones de seguimiento, dudas y revisiones	45
TOTAL		300

Tabla 2. Desglose de tiempos del TFM

1.2. Amortización de los equipos utilizados

Dada la naturaleza analítica de este Trabajo de Fin de Máster, este se ha realizado íntegramente con uso de ordenador y material informático. Debido a las características de los activos utilizados en todas las fases del trabajo, se ha recurrido al cálculo de amortizaciones mediante las siguientes expresiones:

$$a = \frac{V_c - V_r}{t} \quad (137)$$

Dónde:

- a: amortización (€/año)
- V_c : valor de compra (€)
- V_r : valor residual (€)
- t: tiempo de amortización (h)

Una vez calculada la amortización de cada activo, se calculará la tasa horaria de cada uno de ellos utilizando la siguiente expresión:

$$T_h = \frac{a + m}{h} \quad (138)$$

Dónde:

- T_h : tasa horaria (€/h)
- a: amortización (€/año)
- m: coste de mantenimiento (€/año)
- h: horas de utilización (h/año) *

*Para esta medida se han considerado 253 días laborales al año con 8 horas laborales cada día.

Aplicando las expresiones descritas, los valores de amortización y tasa horaria de los activos utilizados en la realización del presente Trabajo de Fin de Máster son los siguientes:

Descripción equipo	Vc	Vr	t	a	m	Th
Ordenador	1200	150	10	105	30	0.067
Tablet	350	50	10	30	0	0.015
Ratón	40	5	5	7	0	0.003
Monitor	200	50	10	15	0	0.007
Silla de escritorio	75	10	10	6.5	0	0.003
Mesa de escritorio	150	50	10	10	0	0.005
Flexo	25	0	10	2.5	0	0.001
Microsoft Office 365	69	0	1	69	0	0.034
Matlab	800	0	1	800	0	0.395
Ansys	26400	0	1	26400	0	13.043
Solidworks Standard	8100	0	1	8100	0	4.002

Tabla 3. Tasa horaria y amortización de equipos

El valor de cada uno de los softwares utilizados ha sido extraído de sus respectivas páginas web.

Cabe destacar que únicamente se ha considerado mantenimiento para el activo “ordenador” haciendo referencia a las revisiones bianuales del mismo y la sustitución de componentes en caso de ser necesario.

1.3. Coste desglosado por secciones

Para cada una de las secciones recogidas en el *Apartado 1.1* de este *DOCUMENTO Nº2 PRESUPUESTO*, se calcula el presupuesto de ejecución teniendo en cuenta los activos utilizados en cada fase.

También se ha calculado el coste de electricidad correspondiente a cada sección, ya que como se ha comentado previamente, este trabajo ha sido desarrollado íntegramente mediante el uso de ordenador y es por tanto la electricidad un gasto significativo.

Por último, para tener en cuenta gastos adicionales más difíciles de cuantificar y categorizar y a modo de coeficiente de seguridad, al presupuesto de cada sección se le ha aplicado un coeficiente de mayoración del 5%.

- **Sección Nº1: Lectura de bibliografía relacionada y estudios previos:**

	Descripción	Unidad medida	Medición	Precio unitario (€/h)	Importe (€)
SECCION Nº1	Lectura de bibliografía relacionada y estudios previos				
1.1	Ingeniero industrial	h	25	25.5	637.500
1.2	Ordenador	h	25	0.067	1.667
1.3	Tablet	h	25	0.015	0.371
1.4	Ratón	h	25	0.003	0.086
1.5	Monitor	h	25	0.007	0.185
1.6	Silla de escritorio	h	25	0.003	0.080
1.7	Mesa de escritorio	h	25	0.005	0.124
1.8	Flexo	h	10	0.001	0.012

Desarrollo e implementación de metodologías numéricas de caracterización del comportamiento acústico de catalizadores de MCIA mediante elementos finitos

1.9	Electricidad				1.634
TOTAL					641.660
	Mayoración costes complementarios	%	5	641.660	32.083
TOTAL					673.743

Tabla 4. Costes Sección Nº 1

Descripción	Potencia (kW)	Tiempo (h)	Consumo (kWh)	Precio unitario (€/kWh)	Importe (€)
Ordenador	0.4	25	10	0.091804	0.91804
Tablet	0.01	5	0.05	0.091804	0.0045902
Monitor	0.25	25	6.25	0.091804	0.573775
Flexo	0.15	10	1.5	0.091804	0.137706
TOTAL					1.6341112

Tabla 5. Costes de electricidad Sección Nº1

- **Sección Nº2: Elaboración de modelos mediante el MEF y obtención de resultados:**

	Descripción	Unidad medida	Medición	Precio unitario (€/h)	Importe (€)
SECCION Nº2	Elaboración de modelos mediante el MEF y obtención de resultados				
2.1	Ingeniero industrial	h	130	25.5	3315.000
2.2	Ordenador	h	130	0.067	8.710
2.3	Ratón	h	130	0.003	0.390
2.4	Monitor	h	130	0.007	0.910
2.5	Silla de escritorio	h	130	0.003	0.390
2.6	Mesa de escritorio	h	130	0.005	0.650
2.7	Flexo	h	60	0.001	0.060
2.8	Microsoft Office 365	h	30	0.034	1.020
2.9	Matlab	h	10	0.395	3.950
2.10	Ansys	h	100	13.043	1304.300
2.11	Electricidad				8.584
TOTAL					4643.964
	Mayoración costes complementarios	%	5	4643.964	232.198
TOTAL					4876.162

Tabla 6. Costes Sección Nº2

Descripción	Potencia (kW)	Tiempo (h)	Consumo (kWh)	Precio unitario (€/kWh)	Importe (€)
Ordenador	0.4	130	52	0.091804	4.773808
Monitor	0.25	130	32.5	0.091804	2.98363
Flexo	0.15	60	9	0.091804	0.826236
TOTAL					8.583674

Tabla 7. Costes de electricidad Sección Nº2

• **Sección Nº3: Redacción del documento y generación de planos:**

	Descripción	Unidad medida	Tiempo	Precio unitario (€/h)	Importe (€)
SECCION Nº3	Redacción del documento y generación de planos				
3.1	Ingeniero industrial	h	100	25.5	2550.000
3.2	Ordenador	h	100	0.067	6.700
3.3	Ratón	h	100	0.003	0.300
3.4	Monitor	h	100	0.007	0.700
3.5	Silla de escritorio	h	100	0.003	0.300
3.6	Mesa de escritorio	h	100	0.005	0.500
3.7	Flexo	h	40	0.001	0.040
3.8	Microsoft Office 365	h	80	0.034	2.720
3.9	Solidworks Standard	h	15	4.002	60.030
3.10	Electricidad				6.518
TOTAL					2627.808
	Mayoración costes complementarios	%	5	2627.808	131.390
TOTAL					2759.198

Tabla 8. Costes Sección Nº3

Descripción	Potencia (kW)	Tiempo (h)	Consumo (kWh)	Precio unitario (€/kWh)	Importe (€)
Ordenador	0.4	100	40	0.091804	3.67216
Monitor	0.25	100	25	0.091804	2.2951
Flexo	0.15	40	6	0.091804	0.550824
TOTAL					6.518084

Tabla 9. Costes de electricidad Sección Nº3

• **Sección Nº4: Reuniones de seguimiento, dudas y revisiones:**

	Descripción	Unidad medida	Tiempo	Precio unitario (€/h)	Importe (€)
SECCION Nº4	Reuniones de seguimiento, dudas y revisiones				
4.1	Ingeniero sénior	h	45	25.5	1147.500
4.2	Catedrático de universidad	h	45	55.5	2497.500
4.3	Ordenador	h	45	0.067	3.015
4.4	Ratón	h	45	0.003	0.135
4.5	Monitor	h	45	0.007	0.315
4.6	Silla de escritorio	h	45	0.003	0.135
4.7	Mesa de escritorio	h	45	0.005	0.225
4.8	Flexo	h	25	0.001	0.025
4.9	Microsoft Office 365	h	10	0.034	0.340
4.10	Ansys	h	30	13.043	391.290
4.11	Solidworks Standard	h	5	4.002	20.010

4.12	Electricidad				3.030
TOTAL					4063.520
	Mayoración costes complementarios	%	5	4063.520	203.176
TOTAL					4266.696

Tabla 10. Costes Sección N^o4

Descripción	Potencia (kW)	Tiempo (h)	Consumo (kWh)	Precio unitario (€/kWh)	Importe (€)
Ordenador	0.4	45	18	0.091804	1.652472
Monitor	0.25	45	11.25	0.091804	1.032795
Flexo	0.15	25	3.75	0.091804	0.344265
TOTAL					3.029532

Tabla 11. Costes de electricidad Sección N^o4

1.4. Coste total de ejecución del trabajo

Finalmente se recoge el coste de cada una de las secciones del trabajo, y a su cómputo total se le aplica el IVA, obteniendo así el presupuesto total del trabajo:

Descripción	Importe (€)
S1: Lectura de bibliografía relacionada y estudios previos	673.74
S2: Elaboración de modelos mediante el MEF y obtención de resultados	4876.16
S3: Redacción del documento y generación de planos	2759.20
S4: Reuniones de seguimiento, dudas y revisiones	4266.70
Total ejecución secciones	12575.80
IVA (21%)	2640.92
Presupuesto total	15216.72

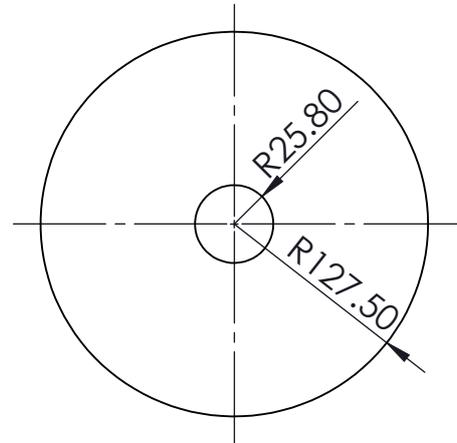
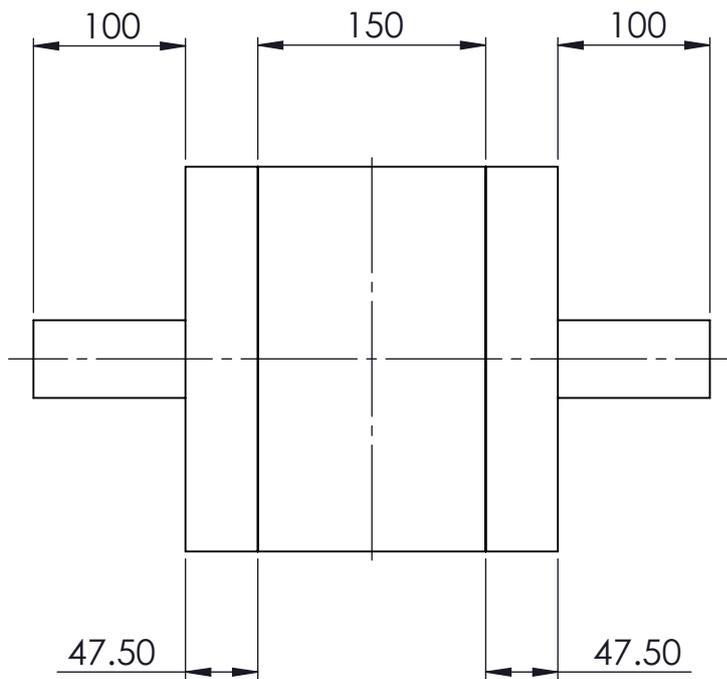
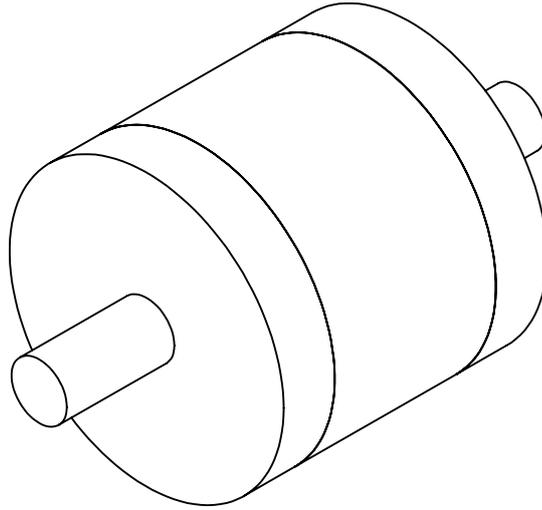
Tabla 12. Coste total del TFM

El presupuesto del presente Trabajo de Fin de Máster asciende a la cifra de:

QUINCE MIL DOSCIENTOS DIECISÉIS EUROS CON SETENTA Y DOS CÉNTIMOS

DOCUMENTO N° 3:

PLANOS



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 CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ACÚSTICO DE CATALIZADORES DE MCIA MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS**

Plano: **Sección circular sin Offset**

Escala: **1:5**

Nº Plano:

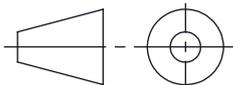
Creado por: **Diego Revilla Romero**

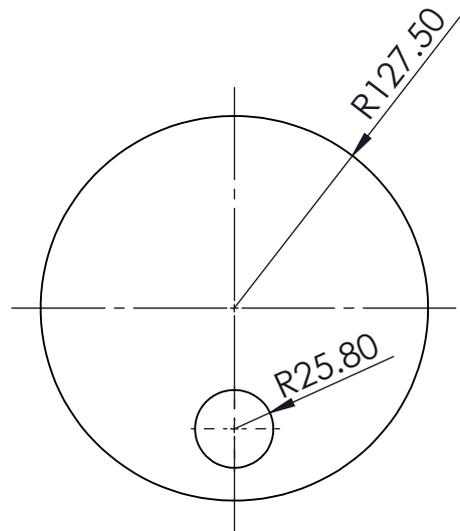
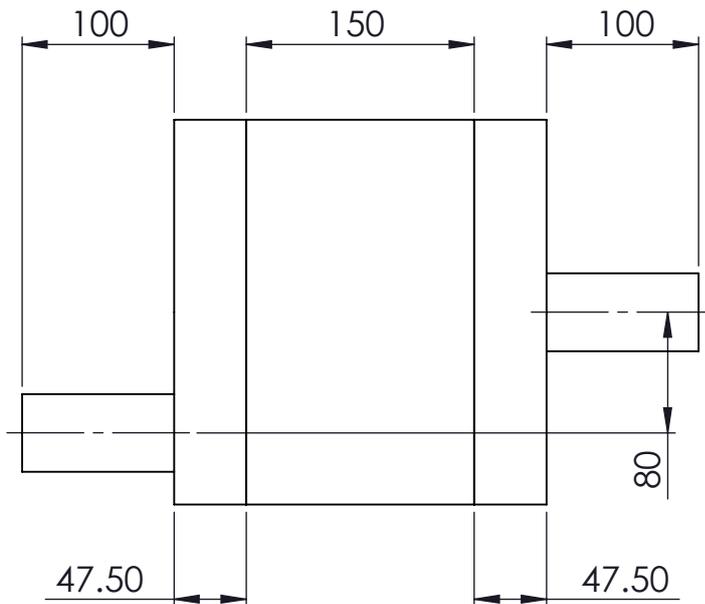
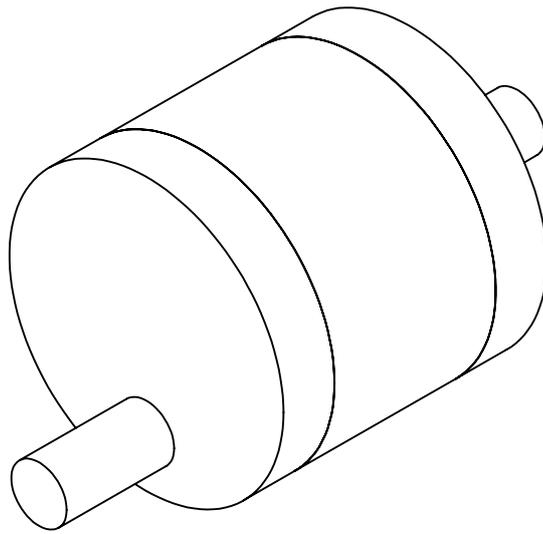
Fecha: **Mayo 2021**

Aprobado por: **Francisco David Denia Guzmán**

Fecha: **Mayo 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 CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ACÚSTICO DE CATALIZADORES DE MCIA MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS**

Plano: **Sección circular con Offset**

Escala: **1:5**

Nº Plano:

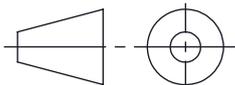
Creado por: **Diego Revilla Romero**

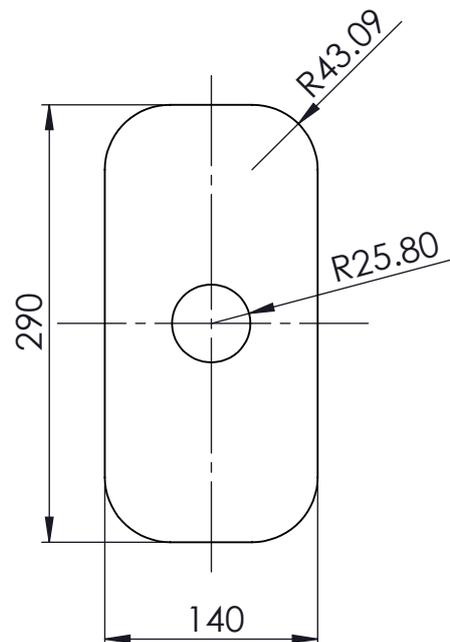
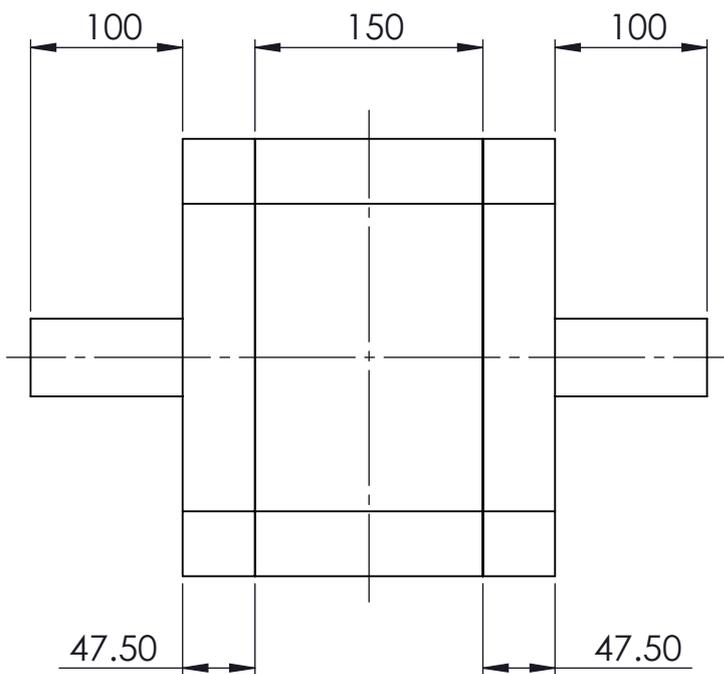
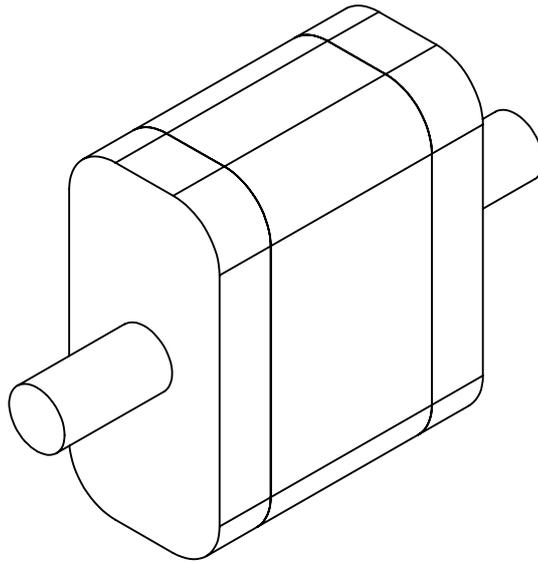
Fecha: **Mayo 2021**

Aprobado por: **Francisco David Denia Guzmán**

Fecha: **Mayo 2021**

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 CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ACÚSTICO DE CATALIZADORES DE MCIA MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS**

Plano: **Sección rectangular sin Offset**

Escala: **1:5**

Nº Plano:

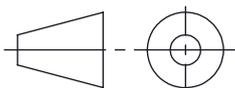
Creado por: **Diego Revilla Romero**

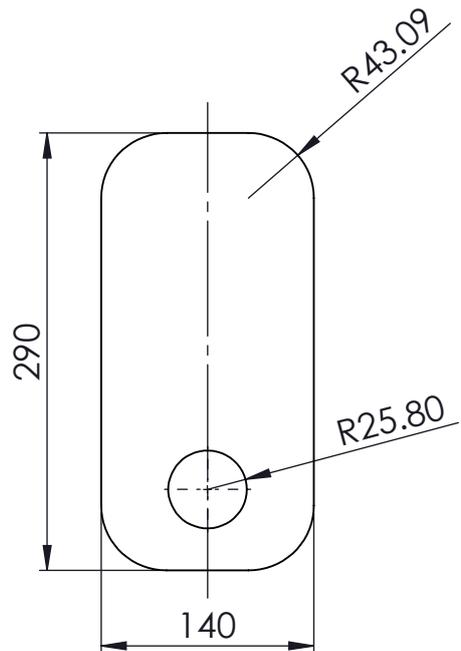
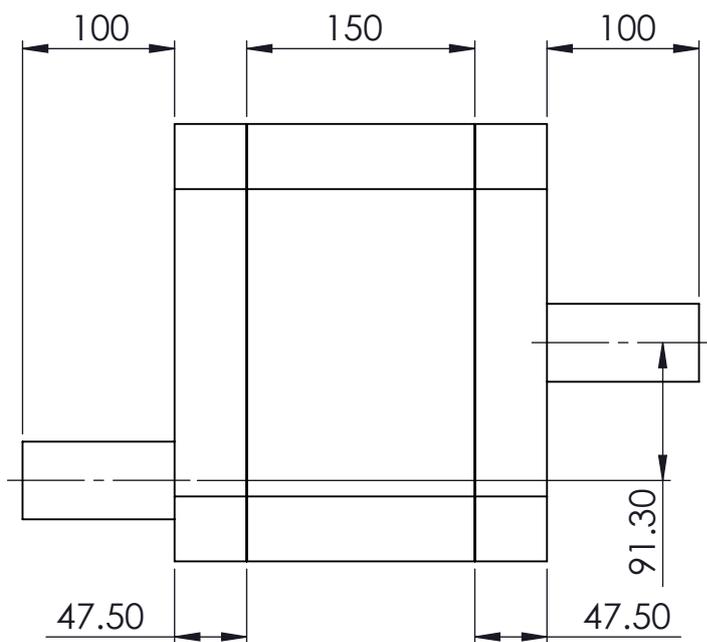
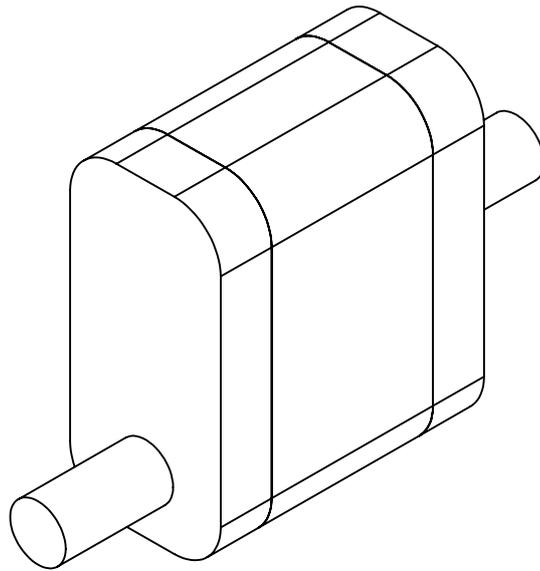
Fecha: **Mayo 2021**

Aprobado por: **Francisco David Denia Guzmán**

Fecha: **Mayo 2021**

3





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 CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ACÚSTICO DE CATALIZADORES DE MCIA MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS**

Plano: **Sección rectangular con Offset**

Escala: **1:5**

Nº Plano:

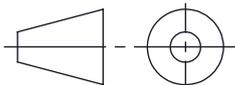
Creado por: **Diego Revilla Romero**

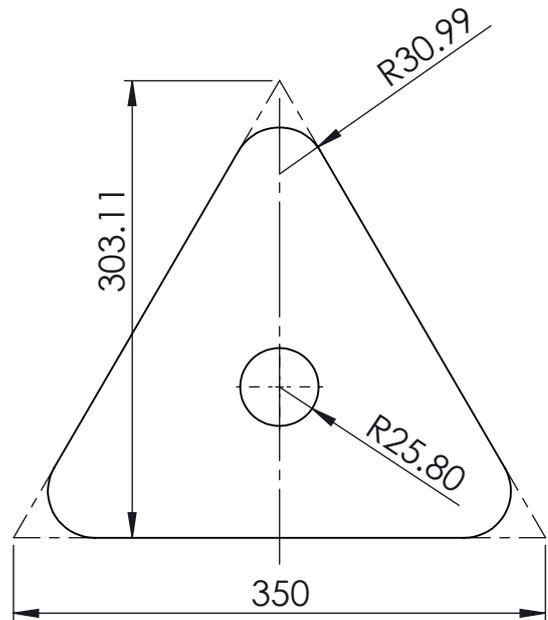
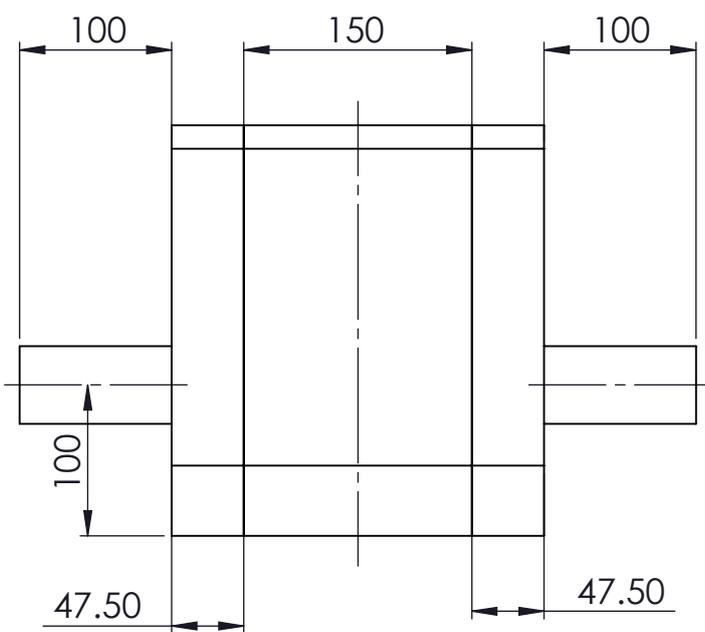
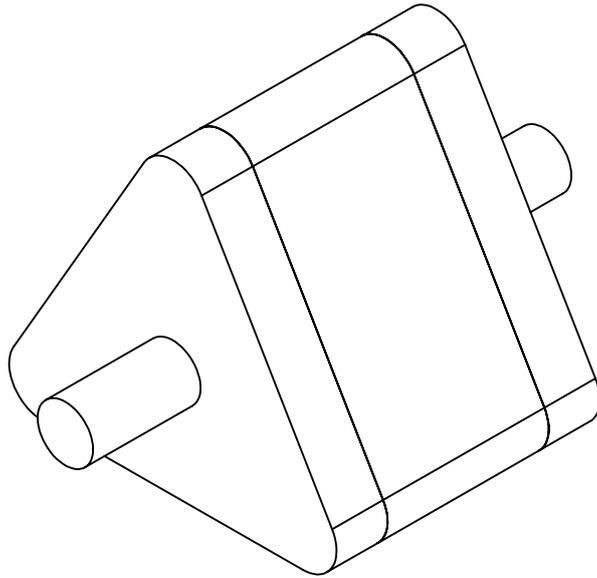
Fecha: **Mayo 2021**

Aprobado por: **Francisco David Denia Guzmán**

Fecha: **Mayo 2021**

4





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 CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO
ACÚSTICO DE CATALIZADORES DE MCIA MEDIANTE
ELEMENTOS FINITOS

Plano:

Sección triangular sin Offset

Escala:

1:5

Nº Plano:

5

Creado por:

Diego Revilla Romero

Fecha:

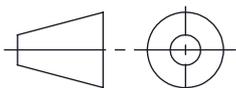
Mayo 2021

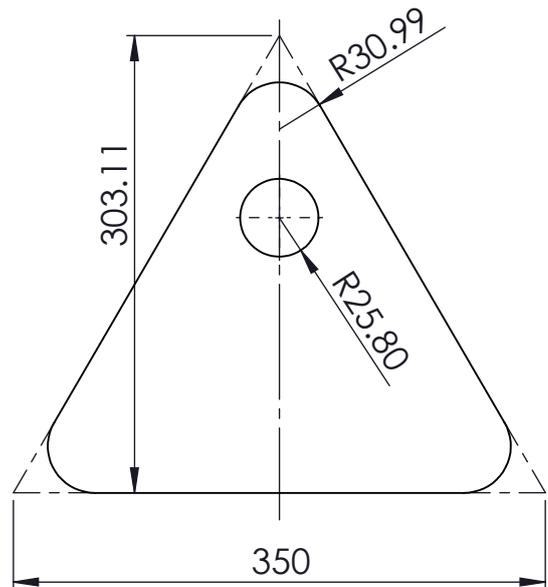
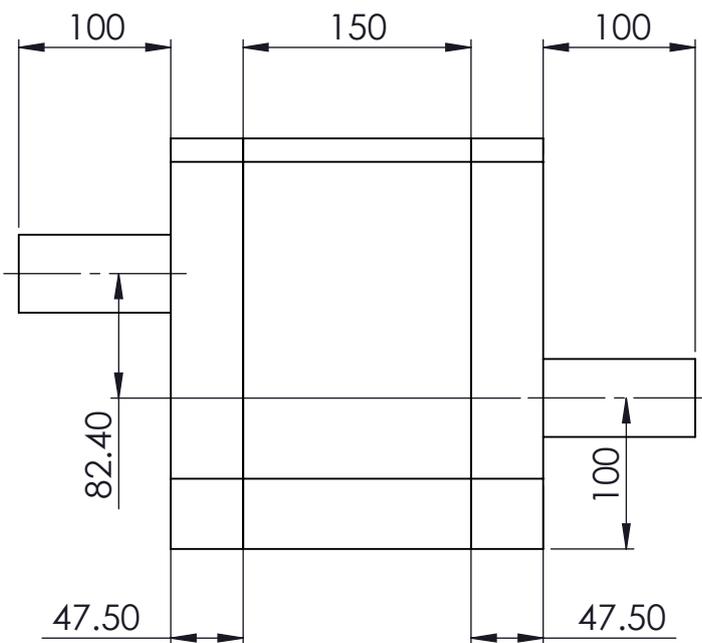
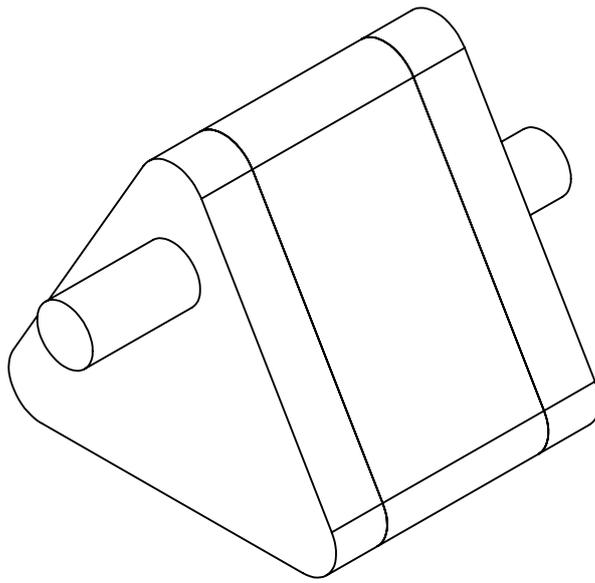
Aprobado por:

Francisco David Denia Guzmán

Fecha:

Mayo 2021





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 CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO
ACÚSTICO DE CATALIZADORES DE MCIA MEDIANTE
ELEMENTOS FINITOS

Plano:

Sección triangular con Offset

Escala:

1:5

Nº Plano:

6

Creado por:

Diego Revilla Romero

Fecha:

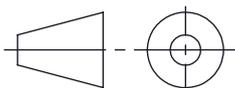
Mayo 2021

Aprobado por:

Francisco David Denia Guzmán

Fecha:

Mayo 2021



DOCUMENTO N° 4:

ANEXOS

ANEXO N° 1: CÁLCULO DE LA MATRIZ DE TRANSFERENCIA MEDIANTE MATLAB

En este anexo se explica con detalle el proceso con el que se ha creado la matriz de transferencia que se introduce en ANSYS APDL y WORKBENCH para simular el comportamiento del monolito.

Como se ha comentado en el desarrollo del presente trabajo, se ha utilizado un modelado 3D conductos-1D monolito para la caracterización del catalizador. El monolito ha sido sustituido por una matriz de transferencia que relaciona nodo a nodo la presión y la velocidad en la entrada y en la salida. Matricialmente queda expresado de la siguiente manera:

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ v_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} p_2 \\ v_2 \end{pmatrix} \quad (139)$$

Los componentes de la matriz de 4 polos dependen de las propiedades del monolito. Sus expresiones se obtienen a partir de las ecuaciones desarrolladas en el *Apartado 6.3* del *DOCUMENTO N°1 MEMORIA*. La matriz queda definida como:

$$T_m = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(k_m \cdot L_m) & \frac{j \rho_m c_m \sin(k_m \cdot L_m)}{\phi} \\ \frac{j \phi \sin(k_m \cdot L_m)}{\rho_m c_m} & \cos(k_m \cdot L_m) \end{pmatrix} \quad (140)$$

Siendo:

L_m : longitud del monolito

$k_m = \frac{\omega}{c_m}$: número de onda equivalente del monolito

$\rho_m = \rho_0 \cdot \left(1 + \frac{R \cdot \phi}{j \cdot \omega \cdot \rho_0} \cdot G_c(s) \right)$: densidad equivalente

$c_m = \frac{c_0}{\sqrt{\left(1 + \frac{R \cdot \phi}{j \cdot \omega \cdot \rho_0} \cdot G_c(s) \right) \cdot (\gamma - (\gamma - 1) \cdot F)}}$: velocidad equivalente

Donde:

- R: resistividad del monolito.
- ω : frecuencia angular.
- ϕ : porosidad del monolito.
- c_0 : 340 m/s ($T_{ref} = 15^\circ\text{C}$)
- ρ_0 : 1.225 kg/m³ ($T_{ref} = 15^\circ\text{C}$)
- γ : relación de calores específicos.

Estas propiedades del monolito se calculan mediante el modelo de Allard.

La función $G_c(s)$ atiende a la siguiente expresión:

$$G_c(s) = \frac{-\frac{s}{4} \cdot \sqrt{-j} \cdot \frac{J_1 \cdot (s \cdot \sqrt{-j})}{J_0 \cdot (s \cdot \sqrt{-j})}}{1 - \frac{2}{s \cdot \sqrt{-j}} \cdot \frac{J_1 \cdot (s \cdot \sqrt{-j})}{J_0 \cdot (s \cdot \sqrt{-j})}} \quad (141)$$

Que depende de las funciones de primera especie de Bessel; tanto de orden 0, J_0 , como de orden 1, J_1 . s hace referencia al número de onda tangencial, que se define mediante la siguiente expresión:

$$s = \alpha \cdot \sqrt{\frac{8 \cdot \omega \cdot \rho_0}{R \cdot \phi}} \quad (142)$$

Donde:

- $\alpha = 1.14$: factor de forma para sección transversal del capilar triangular.

El factor F , necesario para calcular c_m , se calcula mediante la siguiente expresión:

$$F = \frac{1}{1 + \frac{R \cdot \phi}{j \cdot \omega \cdot \rho_0} \cdot G_c(s) \cdot (\sqrt{Pr} \cdot s)} \quad (143)$$

Por último, el número de Prandtl, Pr , queda definido como:

$$Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{\kappa} \quad (144)$$

A continuación, se adjunta el código implementado en el programa Matlab para el cálculo de esta matriz de transferencia. Se trata de la matriz de transferencia para una longitud de monolito de 0.075 m y una resistividad de 750 rayl/m. El resto de las matrices se calculan de manera similar a esta, cambiando los valores mencionados previamente de resistividad y longitud.

```
clear all
load variab

% Monolito de catalizador (modelo 3D conductos/1D monolito).
%=====

lc=variab(6); % Longitud del monolito

% Frecuencias de análisis
%=====

fini=variab(1); % frecuencia inicial
ffin=variab(2); % frecuencia final
deltaf=variab(3); % Incremento de frecuencia

%=====
% Propiedades del aire
%=====
temp=variab(13); % Temperatura (°C)
if temp== -1 % Se introducen los valores directamente
    caire=variab(4); % Velocidad del sonido en el aire
    rhoaire=variab(5); % Densidad del aire
end
if temp~= -1 % Se calculan en función de la temperatura
    caire = (1.4*8.314*(temp+273.15)/0.02897)^0.5;
    rhoaire = 101325*0.02897/(8.314*(temp+273.15));
end

%=====
% Propiedades del monolito. Modelo de Allard
%=====
resis=variab(7); % Resistividad del monolito
poro=variab(8); % Porosidad del monolito
alpha=variab(9); % Factor geométrico del capilar
if temp== -1 % Se introducen los valores directamente
    visco=variab(10); % Viscosidad
    kappa=variab(11); % Conductividad térmica
    Cp=variab(12); % Calor específico a presión constante
end
if temp~= -1 % Se calculan en función de la temperatura
    visco = 1.458e-6*(temp+273.15)^1.5/(temp+273.15+110.4) ; % Ecuación de Sutherland; viscosidad
    dinámica
    kappa = 0.023635+7.562892e-5*temp-2.523277e-8*temp^2+4.648739e-12*temp^3; %
    Conductividad térmica. Ajuste con Mathcad entre 0°C y 1000 °C
    Cp = 1.00734e3-0.059809*temp+8.879379e-4*temp^2-1.055691e-6*temp^3+4.044381e-
    10*temp^4; % Calor específico a presión constante. Ajuste con Mathcad entre 0°C y 1000 °C
end
prandtl=visco*Cp/kappa; % Número de Prandtl
```

```

% Barrido en frecuencia
% =====

monolito=fopen('matriz.txt','w');

NB=(ffin-fini)/deltaf+1;

for nf=1:NB

    frec=deltaf*(nf-1)+fini;
    w=2*pi*frec;
    'Frecuencia ='
    frec
    kaire=w/caire; % Número de onda del aire

    % ---- Caracterización del monolito. Modelo de Allard

    rj=(-1j)^0.5;
    ss=alpha*(8*w*rhoaire/(resis*poro))^0.5;
    gc1=(-ss/4*rj*besselj(1,ss*rj)/besselj(0,ss*rj))/(1-2/(ss*rj)*besselj(1,ss*rj)/besselj(0,ss*rj));
    rhom=rhoaire+resis*poro*gc1/(1j*w); % Densidad acústica equivalente del monolito
    sss=ss*(prandtl)^0.5;
    gc2=(-sss/4*rj*besselj(1,sss*rj)/besselj(0,sss*rj))/(1-2/(sss*rj)*besselj(1,sss*rj)/besselj(0,sss*rj));
    denomin=((1+poro*resis*gc1/(1j*w*rhoaire))*(1.4-(1.4-
1)/(1+poro*resis*gc2/(1j*w*rhoaire*prandtl))))^0.5;
    cm=caire/denomin; % Velocidad del sonido equivalente del monolito
    km=w/cm; % Número de onda equivalente del monolito

    % ---- Cuatro polos de la matriz de transferencia para conectar las dos caras del monolito

    T11=cos(km*lc);
    T12=1j*rhom*cm*sin(km*lc)/poro;
    T21=1j*poro*sin(km*lc)/(rhom*cm);
    T22=cos(km*lc);

    % ---- Cálculo de matriz de admitancia
    %
    % u1=T21*p2+T22*u2=T22/T12*p1+(T21-T22*T11/T12)*p2
    % u2=p1/T12-T11/T12*p2
    % u2=(-1/T12)*p1+(T11/T12)*p2 % Cambio de signo

    y11r=real(T22/T12);
    y11i=imag(T22/T12);
    y12r=real(T21-T22*T11/T12);
    y12i=imag(T21-T22*T11/T12);
    y21r=real(-1/T12);
    y21i=imag(-1/T12);
    y22r=real(T11/T12);
    y22i=imag(T11/T12);

```

```
% Escritura de fichero para Ansys
%
% tb,perf,2,,,ymat
% tbfield,freq,freq
% tbddata,1,y11r,y11i,y12r,y12i,y21r,y21i
% tbddata,7,y22r,y22i
%

%fprintf(monolito,'%s','tbfield,freq,');
%fprintf(monolito,'%i\r\n',frec);
%fprintf(monolito,'%s','tbddata,1,');
fprintf(monolito,'%i',frec); fprintf(monolito,'%s',' ', ' '); fprintf(monolito,'%10e',y11r);
fprintf(monolito,'%s',' ', ' '); fprintf(monolito,'%10e',y11i); fprintf(monolito,'%s',' ', ' ');
');
fprintf(monolito,'%10e',y12r); fprintf(monolito,'%s',' ', ' '); fprintf(monolito,'%10e',y12i);
fprintf(monolito,'%s',' ', ' ');
fprintf(monolito,'%10e',y21r); fprintf(monolito,'%s',' ', ' '); fprintf(monolito,'%10e',y21i);
fprintf(monolito,'%s',' ', ' ');
% Continúa
%fprintf(monolito,'%s','tbddata,7,');
fprintf(monolito,'%10e',y22r); fprintf(monolito,'%s',' ', ' ');
fprintf(monolito,'%10e\r\n',y22i);

end % Fin del barrido en frecuencia

fclose(monolito);
```

ANEXO Nº 2: MACROS APDL

En este anexo se adjunta el código de una macro utilizada para realizar el modelado, mallado y cálculo con ANSYS APDL. Concretamente es la macro que permite calcular el caso de sección transversal rectangular sin descentrado en sus conductos de entrada y salida. El resto de macros son similares, cambiando los parámetros característicos del problema.

```
! Geometría de sección transversal rectangular con chaflán
! Conductos concéntricos
! *****

/title, Pérdida de Transmisión (dB) de Catalizador
/PREP7
/view,1,1,1,1
rho=1.225      ! Densidad del aire (debe ser consistente con los datos utilizados en el monolito)
c0=340.255    ! Velocidad del sonido (debe ser consistente con los datos utilizados en el
monolito)
z0=rho*c0     ! Impedancia característica del aire (se utiliza para imponer impedancia anecoica)
freqE=3000    ! Máxima frecuencia de cálculo)
f_ini=10      ! Frecuencia inicial (la final ya está arriba)
deltaf=10     ! Incremento de frecuencia
Nfrec=(freqE-f_ini)/deltaf+1
wave=c0/freqE ! Mínima longitud de onda a la máxima frecuencia
p=1           ! Excitación en sección de entrada. Se puede poner otro valor. Lo hace bien
igualmente.
vn=-p/(rho*c0) ! Velocidad normal de excitación
              ! Definición de elementos y materiales
et,1,183      ! Cuadrilátero cuadrático estructural 2D (solamente para mallar secciones
transversales y extruir)
et,2,220,,1   ! Hexaedro acústico de 20 nodos (interpolación cuadrática)
mp,dens,1,rho ! Material (regiones de aire)
mp,sonc,1,c0
!
! *****
! Cálculo de propiedades de monolito de catalizador (modelo de Allard)
```

```
! Se lee la matriz de transferencia (calculada con Matlab como matriz de admitancias) para reemplazar
monolito de catalizador

! En Matlab se deben utilizar las mismas propiedades, datos, frecuencias, etc. que en el cálculo
armónico de Ansys

!

! El modelo de matriz de transferencia en Ansys solamente admite hexaedros y prismas
mp,dens,2,rho      ! Aire en los capilares
mp,sonc,2,c0
!
tb,perf,2,,,ymat  ! Matriz de admitancias
!
/INPUT,'matriz','txt'  ! Lectura de fichero creado por Matlab
!
! *****
! Creación de modelo sólido
rinlet=0.0258      ! Conducto de entrada
linlet=0.1
! Cámaras de expansión, monolito y contracción
achamb=0.14       ! Anchura de sección rectangular
bchamb=0.29       ! Altura de sección (aparte se le suma el chaflán)
rchaf=0.0430859315 ! Radio de chaflán

lchamb1=0.0475
lmonolit=0.075    ! Longitud ficticia, se reemplaza por matriz
lchamb2=0.0475
! Conducto de salida
routlet=0.0258
loutlet=0.1
!
! Secciones transversales
!
! Keypoints
```

```
distancia=0.1      ! Distancia a origen de áreas transversales para posterior extrusión (para evitar
solapes)
!
k,1,,,-distancia
k,2,rinlet,,,-distancia
k,3,achamb/2,,,-distancia
k,4,achamb/2,bchamb/2,-distancia
k,5,achamb/2-rchaf,bchamb/2+rchaf,-distancia
k,6,,bchamb/2+rchaf,-distancia
k,7,,rinlet,-distancia
!
! Líneas
!
l,1,2
l,2,3
l,3,4
larc,4,5,1,rchaf
l,5,6
l,6,7
l,7,1
larc,2,7,1,rinlet
!
! Áreas: entrada y salida
!
al,1,7,8
!
! Área: cámara
!
al,2,3,4,5,6,8
!
type,1
```

```
mat,1
      ! Mallado de geometría transversal
h=wave/10      ! 10 elementos por (mínima) longitud de onda (refinar para obtener mayor
precisión)
esize,h
amesh,all
!
! Copia de áreas para extrusión posterior
agen,2,1,,,,,distancia
agen,2,1,2,1,,,distancia+linlet
agen,2,1,2,1,,,distancia+linlet+lchamb1
agen,2,1,2,1,,,distancia+linlet+lchamb1+lmonolit
agen,2,1,,,,,distancia+linlet+lchamb1+lmonolit+lchamb2
!
! Extrusión
type,2
extopt,esize,linlet*100  ! Conducto de entrada
extopt,aclear,1
VEXT,3,,,,,linlet

extopt,esize,lchamb1*100  ! Cámara 1
extopt,aclear,1
VEXT,4,5,1,,,lchamb1

mat,2
extopt,esize,1      ! Monolito
extopt,aclear,1
VEXT,6,7,1,,,lmonolit

mat,1
extopt,esize,lchamb2*100  ! Cámara 2
```

```
extopt,aclear,1
VEXT,8,9,1,,,lchamb2

extopt,esize,loutlet*100 ! Conducto de salida
extopt,aclear,1
VEXT,10,,,,,loutlet

aclear,1,2,1 ! Borrado de resto de malla con elemento 183
adel,1,2,1,1 ! Borrado de resto de áreas, líneas y keypoints utilizadas en extrusión

nummrg,all ! Fusión de entidades solapadas y compresión de numeración
numcmp,all
eplot
!
! *****
!
! Monolito. Definición de puertos para conexión con matriz de admitancia
esel,s,mat,,2
nsle,s
nsel,s,loc,z,linlet+lchamb1
sf,all,port,3 ! Puerto de entrada al monolito
nsel,s,loc,z,linlet+lchamb1+lmonolit
sf,all,port,4 ! Puerto de salida del monolito
alls
!
! *****
!
nsel,s,loc,z,0 ! Nodos en la sección de entrada
sf,all,port,1 ! Puerto de entrada del catalizador
!
! 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,linlet+lchamb1+lmonolit+lchamb2+loutlet ! Nodos en la sección de salida  
sf,all,port,2      ! Puerto de salida del catalizador  
sf,all,inf         ! Radiación en la salida. Impedancia anecoica en la salida (no vuelve energía al  
catalizador)  
alls  
fini  
                ! Cálculo de solución  
/solu  
antype,harmic  
hropt,auto  
kbc,1  
harf,0,freqE  
nsub,Nfrec        ! Frecuencias de cálculo especificadas al inicio  
solve  
finish  
! post-processing  
/post1  
spower,1,2        ! Cálculo de potencia sonora (puertos 1 y 2: entrada y salida del catalizador)  
plst,Rectangulo0102,a2p,tl    ! TL - pérdida de transmisión  
fini
```