

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales



Trabajo Fin de Máster en Ingeniería Mecánica

“MODELADO ANALÍTICO Y NUMÉRICO DEL COMPORTAMIENTO ACÚSTICO DE
DISPOSITIVOS DE LA LÍNEA DE ESCAPE EN VEHÍCULOS. APLICACIÓN A SISTEMAS
CATALIZADOR/TRAMPA DE PARTÍCULAS”

Presentado por: D. Guillermo Tortosa Martínez

Dirigido por: Dr. D. Francisco David Denia Guzmán

Valencia, septiembre de 2020



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Dedicado a todas esas personas que han sufrido y salido hacia delante este difícil año.



RESUMEN

Este Trabajo Fin de Máster desarrolla e implementa una metodología numérica, basada en el método de los elementos finitos, integrada en el programa comercial Comsol Multiphysics. En éste se modela el comportamiento acústico de dispositivos postratamiento con monolito utilizados en el sistema de escape de motores de combustión.

Se ha prestado especial atención a dispositivos que incluyen catalizador y trampa de partículas diésel (DPF), tanto individual como simultáneamente utilizados. Dicha metodología permite el cálculo del índice de Pérdidas de Transmisión (TL) para determinar las prestaciones acústicas de los dispositivos postratamiento indicados.

Adicionalmente, se ha analizado la influencia de las diferentes variables que tiene un problema de esta índole: resistividad, presencia de hollín o características geométricas, entre las que cabe incluir el centrado/descentrado de los conductos del dispositivo postratamiento y la longitud de cámaras contiguas al monolito, entre otros.

Por último, la metodología ha sido validada a través de la técnica de ajuste modal.

Palabras clave: Elementos Finitos, Matlab, Comsol, Catalizador, Línea de Escape, Trampa de Partículas, Acústica, DIMM.



RESUM

En aquest Treball Fi de Màster es desenvolupa i implementa una metodologia numèrica, basada en el mètode dels elements finits, integrada al programa comercial Comsol Multiphysics. En aquest, es modela el comportament acústic de dispositius post-tractament amb monòlit utilitzats al sistema d'escapament per a motors de combustió.

S'ha prestat especial atenció a dispositius que inclouen catalitzador i trampa de partícules dièsel (DPF), tant individual com simultàniament usats. Aquesta metodologia permet el càlcul de l'índex de Pèrdues de Transmissió (TL) per determinar les prestacions acústiques dels dispositius post-tractament indicats.

Així mateix, s'ha analitzat la influència de les diferents variables que té un problema d'aquesta índole: resistivitat, presència de sutge o característiques geomètriques, entre les quals cal incloure el centrat/descentrat dels conductes del dispositiu de post-tractament i la longitud de les càmeres contigües al monòlit, entre d'altres.

Finalment, la metodologia ha estat validada mitjançant la tècnica d'ajust modal.

Paraules Clau: Elements Finites, Matlab, Comsol, Catalitzador, Línia d'Escapament, Trampa de Partícules, Acústica, DIMM.



ABSTRACT

In the context of this Master's Final Project, a numerical methodology based on the finite element method (FEM) has been developed and implemented. The methodology is integrated in the commercial program Comsol Multiphysics. As far as the acoustic behaviour of after-treatment devices is concerned, it is modelled with monoliths installed in exhaust systems of internal combustion engines.

Special attention has been provided to the catalyst and diesel particulate filter (DPF) both individually and considered together in the exhaust line. With the proposed methodology, the Transmission Loss index (TL) is calculated to determine the acoustic performance from the indicated after-treatment devices.

In addition, an analysis of the influence of variables with potential impact in the performance of such systems has been conducted. These features include resistivity, presence of soot or geometric characteristics such as the duct alignment/misalignment from the after-treatment devices and the length of the adjacent chambers to the monolith, among others.

Finally, the methodology has been validated through the modal adjustment technique.

Key Words: Finite Elements, Matlab, Comsol, Catalyst, Exhaust Line, Diesel Particulate Filter, Acoustics, DIMM.

AGRADECIMIENTOS

En este trabajo quiero expresar mi agradecimiento a la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (ETSI) y al Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales (DIMM) por brindarme la oportunidad de seguir formándome y aprendiendo.

También quisiera destacar el apoyo y entendimiento de Francisco Denia (director) a la hora de realizar este Trabajo Fin de Máster, pues ha comprendido perfectamente las circunstancias y ha proporcionado una ayuda ejemplar.



CONTENIDO

1	OBJETO Y ALCANCE DEL TRABAJO	10
1.1	OBJETO DEL TRABAJO.....	10
1.2	ALCANCE DEL TRABAJO.....	10
1.3	MOTIVACIÓN	10
2	JUSTIFICACIÓN Y ANTECEDENTES DEL TRABAJO	11
2.1	JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO.....	11
2.2	ANTECEDENTES DEL TRABAJO	11
3	ACÚSTICA DE LA LÍNEA DE ESCAPE.....	12
3.1	CONTROL DE RUIDO.....	12
3.1.1	<i>Niveles sonoros: decibelios</i>	<i>12</i>
3.2	CATALIZADORES.....	13
3.3	TRAMPA DE PARTÍCULAS.....	14
3.4	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	16
3.4.1	<i>Modelo de ondas: principios físicos</i>	<i>16</i>
3.4.2	<i>Modelos acústicos del catalizador y trampa de partículas.....</i>	<i>17</i>
4	METODOLOGÍA DE TRABAJO	19
4.1	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
4.1.1	<i>Geometrías generales.....</i>	<i>20</i>
4.2	MODELIZACIÓN CON SOFTWARE	21
4.2.1	<i>Modelado de geometría circular 3D1D para trampa de partículas.....</i>	<i>22</i>
4.2.2	<i>Modelado de geometría de sección transversal rectangular con chaflán 3D1D para trampa de partículas</i>	<i>29</i>
4.2.3	<i>Modelado 3D1D con dos monolitos: catalizador y trampa de partículas.....</i>	<i>34</i>
4.3	OBTENCIÓN DE RESULTADOS CON MATLAB	44
4.3.1	<i>Monolito de catalizador para geometría circular axisimétrica.....</i>	<i>44</i>
4.3.2	<i>Modelo de catalizador para geometría con sección transversal rectangular con chaflán ...</i>	<i>46</i>
4.3.3	<i>Modelo trampa de partículas para geometría circular y con sección transversal rectangular con chaflán</i>	<i>47</i>
4.3.4	<i>Modelo trampa de partículas con entrada y salida descentradas.....</i>	<i>48</i>
5	RESULTADOS	49
5.1	LÍNEAS DE ESCAPE CON MONOLITO DE CATALIZADOR	49
5.1.1	<i>Catalizador con geometría circular.....</i>	<i>49</i>
5.1.2	<i>Catalizador de sección transversal rectangular con chaflán</i>	<i>52</i>
5.1.3	<i>Influencia de la geometría en un monolito de catalizador</i>	<i>55</i>



5.2	LÍNEAS DE ESCAPE CON MONOLITO DE TRAMPA DE PARTÍCULAS	56
5.2.1	<i>Trampa de partículas con geometría circular y longitudes de cámara diferentes</i>	<i>56</i>
5.2.2	<i>Diferencias entre monolitos de DPF y catalizador para la geometría de sección transversal rectangular con chaflán</i>	<i>60</i>
5.3	LÍNEA DE ESCAPE CON CONDUCTOS DESCENTRADOS CON DPF	61
5.3.1	<i>Geometría circular</i>	<i>62</i>
5.3.2	<i>Geometría de sección transversal rectangular con chaflán</i>	<i>65</i>
5.4	LÍNEA DE ESCAPE CON DOS MONOLITOS: CATALIZADOR Y TRAMPA DE PARTÍCULAS	68
5.4.1	<i>Geometría circular</i>	<i>68</i>
5.4.2	<i>Geometría de sección transversal rectangular con chaflán</i>	<i>70</i>
5.4.3	<i>Influencia en la geometría para casos de dos monolitos</i>	<i>71</i>
6	CONCLUSIONES	73
6.1	FUTUROS PASOS	75
7	ANEXOS	76
7.1	MATCAD: MONOLITO DE CATALIZADOR	76
7.2	MATCAD: MONOLITO DE TRAMPA DE PARTÍCULAS	80
8	BIBLIOGRAFÍA	86



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores de las variables pertenecientes a las geometrías	21
Tabla 2. Configuración de la geometría circular centrada	24
Tabla 3. Configuración de la geometría circular descentrada.....	24
Tabla 4. Nomenclatura de las interpolaciones en COMSOL.....	38
Tabla 5. Nombre del operador para los casos DPF y Catalizador.....	41
Tabla 6. Nombre, sección y ecuación de comportamiento de las "Normal Velocity" ...	44



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Intensidad sonora [dB] con ejemplos prácticos	12
Figura 2. Cómo es un catalizador	13
Figura 3. Trampa de partículas usada vs recién montada.....	14
Figura 4. Disposición de catalizador más trampa de partículas	15
Figura 5. Funcionamiento de la trampa de partículas.....	15
Figura 6. Longitud de onda y su definición.....	16
Figura 7. Ondas progresivas y regresivas	17
Figura 8. Esquema de un escape de un automóvil con un monolito.	18
Figura 9. Corte sección de geometría circular con sus dimensiones	20
Figura 10. Características de la cámara en la geometría de sección transversal rectangular con chaflán.....	20
Figura 11. Creación del componente 3D	22
Figura 12. Creación de los cilindros 3D	22
Figura 13. Propiedades de los cilindros.....	23
Figura 14. Parámetros del modelo circular y chaflán.....	23
Figura 15. Geometría circular centrada.....	25
Figura 16. Cuarto de geometría circular centrada.	25
Figura 17. Geometría circular descentrada.....	25
Figura 18. Geometría circular descentrada. Simetría.	26
Figura 19. Archivo Mathcad para cálculo monolito DPF	26
Figura 20. Variable modificable para generación de capa de hollín	27
Figura 21. Archivos generados tras lanzar el script de Mathcad	27
Figura 22. Mallado con copia de dominio para geometría perfectamente simétrica ...	28
Figura 23. Resultado de las caras Inlet-Outlet malladas, respectivamente.....	28
Figura 24. Similitud máxima posible entre caras Inlet-Outlet.....	29
Figura 25. Creación Working Plane para geometría de chaflán.....	30
Figura 26. Creación forma del chaflán.....	30
Figura 27. Dimensiones del rectángulo para geometría chaflán	31
Figura 28. Dimensión del radio geometría chaflán	31



Figura 29. Geometría de sección transversal rectangular con chaflán	32
Figura 30. Geometría de sección transversal rectangular con chaflán recortada por 2 planos de simetría	32
Figura 31. Configuración descentrada 0.0913 m para la geometría transversal rectangular con chaflán	33
Figura 32. Geometría rectangular con chaflán descentrado.....	33
Figura 33. Geometría rectangular con chaflán seccionada por plano vertical	34
Figura 34. Distribución geométrica del modelo 3D1D con dos monolitos	35
Figura 35. Parámetros para la geometría 3D1D con dos monolitos	35
Figura 36. Pieza completa 3D1D para dos monolitos: ejemplo circular	36
Figura 37. Pieza 3D1D para dos monolitos cortada por planos de simetría	36
Figura 38. Distribución de las secciones explícitas en COMSOL.....	37
Figura 39. Creación de la sección explícita en COMSOL.....	37
Figura 40. Opciones dentro de la sección	37
Figura 41. Cambios en el código de Mathcad para catalizador	39
Figura 42. Matrices de cuatro polos cambiadas de nombre en Mathcad	39
Figura 43. Archivos generados de las matrices de 4 polos cambiando el nombre de las matrices	39
Figura 44. Creación de la interpolación.....	40
Figura 45. Creación y asignación de nombre a las interpolaciones	40
Figura 46. Configuración de la Boundary Similarity	41
Figura 47. Creación del Operador promedio para calcular la TL.....	42
Figura 48. Variables del modelo	43
Figura 49. Creación de las velocidades de los monolitos.....	43
Figura 50. Propiedades modificables del archivo "datos".....	45
Figura 51. Propiedades modificables del archivo "variab"	46
Figura 52. Funciones y archivos utilizados por el código "Principal.m"	47
Figura 53. Funciones y archivos usados para el código "Principal.m" con monolito DPF	47
Figura 54. Variable extra modificable en el caso del DPF: presencia de hollín.....	48
Figura 55. Resultados de Matlab y Comsol 750 rayl/m con cámaras iguales	50



Figura 56. Comparación Matlab vs COMSOL en 750 rayl/m y cámaras iguales.....	50
Figura 57. Resultados de Matlab y Comsol a 3000 rayl/m con cámaras diferentes.....	50
Figura 58. Comparación de Matlab vs COMSOL 3000 rayl/m con cámaras diferentes .	51
Figura 59. Resultado de la comparación 750 vs 3000 rayl/m	51
Figura 60. Malla en Matlab de la entrada y salida, Lb y Ld, respectivamente. Caso de geometría de sección rectangular con chaflán	52
Figura 61. Malla de la geometría de sección rectangular con chaflán.....	52
Figura 62. Resultado de modos en Matlab y COMSOL a 750 rayl/m con cámaras iguales	53
Figura 63. Comparación de Matlab vs COMSOL 750 rayl/m y cámaras iguales para geometría de sección transversal rectangular con chaflán	53
Figura 64. Resultado de modos en Matlab y COMSOL a 3000 rayl/m y cámaras diferentes	54
Figura 65. Comparación Matlab vs COMSOL 3000 rayl/m con cámaras diferentes	54
Figura 66. Comparación 750 vs 3000 rayl/m para la geometría de sección rectangular con chaflán	55
Figura 67. Comparación Circular vs Chaflán 750 rayl/m con cámaras de igual longitud55	
Figura 68. Comparación Circular vs Chaflán 3000 rayl/m con cámaras diferentes	56
Figura 69. Malla del modelo de geometría circular en el Inlet y Outlet de las cámaras	57
Figura 70. Ejemplo de mallado en COMSOL de geometría circular con longitud de cámaras diferente.....	57
Figura 71. Resultado de la TL en Matlab y Comsol para geometría circular de cámaras diferentes sin hollín	57
Figura 72. Comparación Matlab vs Comsol con geometría circular sin hollín y cámaras diferentes.....	58
Figura 73. Resultados en Matlab y Comsol con geometría circular con hollín y cámaras diferentes.....	58
Figura 74. Comparación de Matlab vs COMSOL de geometría circular con hollín	58
Figura 75. Comparación de geometría circular: sin hollín vs con hollín.....	59
Figura 76. Resultados Matlab y COMSOL de geometría de sección rectangular con chaflán, sin hollín y de cámaras de longitud iguales, respectivamente	59
Figura 77. Comparación Matlab vs COMSOL sin hollín	60



Figura 78. Comparación Matlab vs COMSOL geometría transversal rectangular con chaflán con hollín y $L_b = L_d$	60
Figura 79. Comparativa modelo chaflán: catalizador 750 rayl/m vs DPF	61
Figura 80. Comparativa modelo chaflán: catalizador 3000 rayl/m vs DPF	61
Figura 81. Malla Matlab geometría circular descentrada	62
Figura 82. Malla geometría circular con entrada y salida descentrada con cámaras de igual longitud en Comsol	63
Figura 83. Resultados geometría circular descentrada, sin hollín, con cámaras de igual y diferente longitud, respectivamente.	63
Figura 84. Resultados geometría circular descentrada, con hollín, con cámaras de igual y diferente longitud, respectivamente.....	64
Figura 85. Influencia de la centralidad de la relación entrada-salida en conductos para cámaras de diferente longitud	64
Figura 86. Malla Matlab geometría chaflán descentrada	65
Figura 87. Malla de geometría de sección rectangular con chaflán descentrada en Comsol, con longitudes de cámara diferentes	66
Figura 88. Resultados geometría chaflán sin hollín, con cámaras de igual y diferente longitud, respectivamente.	66
Figura 89. Resultados geometría chaflán con hollín, con cámaras de igual y diferente longitud, respectivamente.	67
Figura 90. Comparativa geometría chaflán con hollín centrado vs descentrado. Cámaras iguales.....	67
Figura 91. Malla en Comsol de geometría circular centrada con dos monolitos.....	68
Figura 92. Malla en Comol de geometría circular descentrada con dos monolitos	69
Figura 93. Línea de escape con catalizador y DPF con geometría circular de salida centrada y descentrada, respectivamente.....	69
Figura 94. Comparativa de líneas de escape circulares con dos monolitos y salidas diferentes.....	70
Figura 95. Mallas de las geometrías de sección rectangular con chaflán centrada y descentrada con dos monolitos, respectivamente	70
Figura 96. Línea de escape con catalizador y DPF con geometría rectangular con chaflán de salida centrada y descentrada, respectivamente.....	71
Figura 97. Comparativa de líneas de escape de geometría de sección transversal rectangular con chaflán con dos monolitos y salidas diferentes	71



Figura 98. Comparativa de TL entre geometrías centradas: circular vs sección transversal rectangular con chaflán 72

Figura 99. Comparativa de TL entre geometrías descentradas: circular vs sección transversal rectangular con chaflán 72



1 OBJETO Y ALCANCE DEL TRABAJO

1.1 OBJETO DEL TRABAJO

En el presente Trabajo Fin de Máster se pretende utilizar el programa comercial de elementos finitos Comsol[®] y la técnica de ajuste modal en Matlab[®] para desarrollar e implementar metodologías analíticas y numéricas que permitan la simulación del comportamiento acústico de dispositivos de la línea de escape de vehículos que incorporan dos monolitos en su interior: catalizador y trampa de partículas. Dichos dispositivos tienen un impacto acústico considerable desde el punto de vista del control de las emisiones sonoras y deben ser tenidos en cuenta en el diseño integral de la línea de escape de motores de combustión. Los modelos por implementar deben permitir el acoplamiento de regiones de aire mediante monolitos cerámicos formados por tubos capilares que tienen características acústicas disipativas.

1.2 ALCANCE DEL TRABAJO

Los programas que se han requerido para la elaboración de este Trabajo Fin de Máster son Comsol[®] Multiphysics 5.2 Client, Mathcad[®] 15 y Matlab[®] 18b. El uso de estos programas es gracias al Departamento de Ingeniería Mecánica y Materiales (DIMM) de la Universidad Politécnica de Valencia, pues han sido los que han cedido las licencias y el código de tipo numérico y analítico desarrollados por su grupo de investigación.

Con las herramientas desarrolladas, se realizará un estudio de la influencia en la atenuación acústica de parámetros de diseño como la resistividad, geometrías constantes y variables en los tubos de escape, diferencias entre catalizadores y trampas de partículas, etc.

1.3 MOTIVACIÓN

Cursar este máster ha brindado al autor un incremento en conocimientos técnicos y teóricos sobre el campo de la ingeniería mecánica, siendo uno de estos la acústica.

Dado que el Departamento de Ingeniería Mecánica y Materiales de la UPV, lugar donde se imparte el máster, lleva durante los últimos años experimentando y desarrollado técnicas de modelado y caracterización en el ámbito acústico se decide escoger el título de Trabajo Fin de Máster aquí presente.



2 JUSTIFICACIÓN Y ANTECEDENTES DEL TRABAJO

2.1 JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO

Durante los últimos años, el DIMM, con su grupo de investigación, ha realizado una gran cantidad de trabajos y proyectos en lo que a simulación por elementos finitos se refiere. Es por ello por lo que el grupo que respalda el presente Trabajo Fin de Máster posee una amplia experiencia en caracterización experimental del comportamiento acústico de sistemas de escape en motores de combustión interna alternativos y también en su modelado analítico y numérico. [1][2][3]

Durante las últimas dos décadas han basado su esfuerzo en desarrollar, validar e implementar herramientas de computación asentadas en la resolución de la ecuación de ondas tridimensional para reducir el coste computacional.

2.2 ANTECEDENTES DEL TRABAJO

Este Trabajo Fin de Máster es una continuación de varios trabajos iniciados por antiguos compañeros que han realizado el Máster de Ingeniería Mecánica, en el que, una vez finalizados sus proyectos, se han llegado a vislumbrar nuevos horizontes.

Por este motivo, aspectos como la teoría de elementos finitos o fundamentos teóricos sobre tipos de ondas y su comportamiento serán pasados por alto y dados por sentado. Sin embargo, sí que habrá una ligera introducción.

3 ACÚSTICA DE LA LÍNEA DE ESCAPE

3.1 CONTROL DE RUIDO

Entendiendo ruido como un sonido acústico no deseado, excesivo y molesto que interfiere en la actividad humana, es bien sabido que puede causar severos efectos tanto a nivel fisiológico como psicológico en las personas. Claros ejemplos de estos sucesos son tales como aceleraciones del ritmo cardiaco o respiratorio, además de pérdidas de capacidad auditiva. A raíz de esto, gran parte de gobiernos han empezado a legislar con respecto al control del ruido y la imposición de límites para su emisión. [4]



Figura 1. Intensidad sonora [dB] con ejemplos prácticos¹

Hay diferentes maneras de discernir unos ruidos de otros: intensidad, composición en frecuencias, ritmo, variación temporal, etc.

3.1.1 NIVELES SONOROS: DECIBELIOS

El oído humano es capaz de percibir un rango enorme en lo que a presiones acústicas se refiere, siendo la mínima de $2 \cdot 10^{-5}$ Pa y la máxima de 20 Pa. Tratar con valores en un campo tan extenso no resulta muy cómodo, es por ello por lo que se utiliza la escala logarítmica y la unidad llamada decibelio.

¹ <http://www.cochlea.org/es/ruido> visto en 11/02/2020

Por consiguiente, se define el valor de presión sonora (en dB) como:

	$Lp = 10 \cdot \log \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \cdot \log \frac{p}{p_0}$	(1)
--	--	-----

Siendo p_0 el valor de referencia de presión acústica para un oído humano ($2 \cdot 10^{-5}$ Pa) y p la presión acústica eficaz.

El oído humano es capaz de soportar niveles sonoros entre 0 y 120 dB, donde los valores superiores a este último pueden llegar a producir roturas de tímpano o pérdidas en la capacidad auditiva.

3.2 CATALIZADORES

Los catalizadores, usados en los tubos de escape de los motores de combustión interna alternativa (MCIA), están constituidos por monolitos. Estos son unas estructuras cerámicas que poseen elevadas cantidades de conductos o capilares revestidos de materiales que reducen las emisiones tóxicas como el titanio o el rodio. Es decir, materiales con muy buenas propiedades y, por ende, caros.

Como se puede observar en la siguiente imagen, se aprecia que el monolito queda aislado de forma térmica en la caja metálica (tubo de escape), siendo en este lugar donde se producen las reacciones químicas que logran reducir las emisiones contaminantes a la atmósfera.

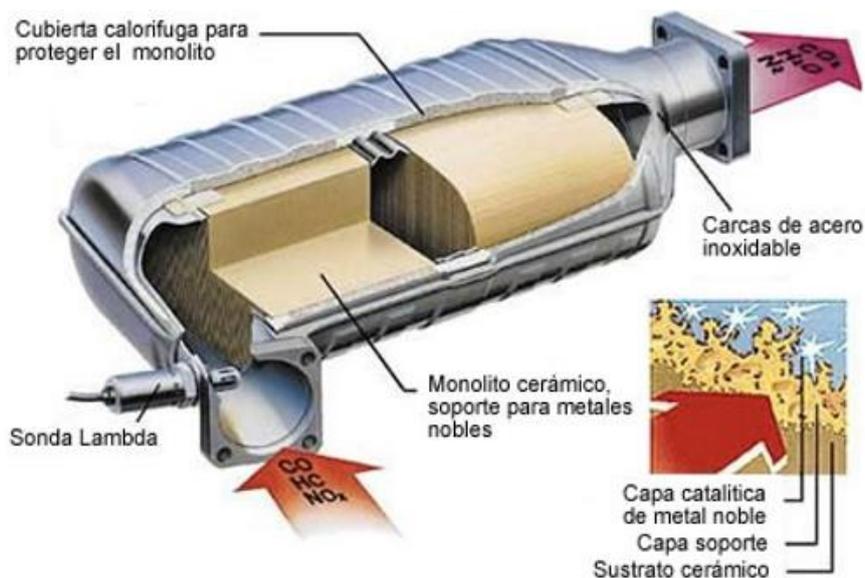


Figura 2. Cómo es un catalizador

Por consiguiente, las emisiones que han sido resultado de la combustión en el motor (hidrocarburos, monóxido de carbono y NOx) una vez llegan al catalizador pasan por el

primer monolito, el cual rompe las moléculas de NOx a N. El segundo hace que los CO y HC se transformen en CO₂ y vapor de agua, siendo así los gases que finalmente se expulsan por el tubo de escape. Por lo tanto, hay un proceso de reducción-oxidación en el proceso de los capilares.

A pesar de ser un tema muy relevante hoy en día, este trabajo fin de máster se enfoca en la atenuación sonora que los catalizadores producen.

3.3 TRAMPA DE PARTÍCULAS

La trampa de partículas, más conocida como “*diesel particulate filter*” (DPF), o “*filtro anti partículas*” (FAP), es un filtro para reducir la emisión de partículas en los motores diésel[5]. Fue creada con la intención de reducir las emisiones generadas durante la combustión de gasóleo en los vehículos diésel, pues éstas son cancerígenas, según aclaran estudios realizados por la OMS[6].

Este filtro quema la mayoría de los agentes contaminantes, aunque siempre quedan resquicios no quemados en los tubos que lo conforman, perdiendo así eficiencia. Para estos casos, algunos vehículos disponen de sistemas electrónicos que regulan la combustión del motor y limpian los filtros a través de un excedente de combustible inyectado.

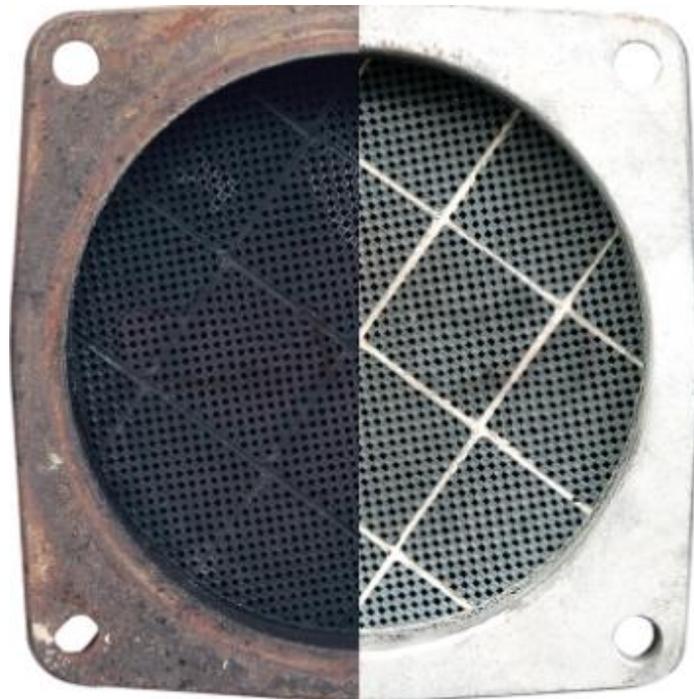


Figura 3. Trampa de partículas usada vs recién montada²

² Imagen extraída el 07/06/2020 de: <https://vortexexhaust.com/applications/dpf-cleaning/>

Es interesante mencionar también que, dado que recientemente hay gran conciencia con el tema de las emisiones y contaminación, cada vez es más usual encontrar sistemas de escape con ambos dispositivos incluidos (catalizador y trampa de partículas):

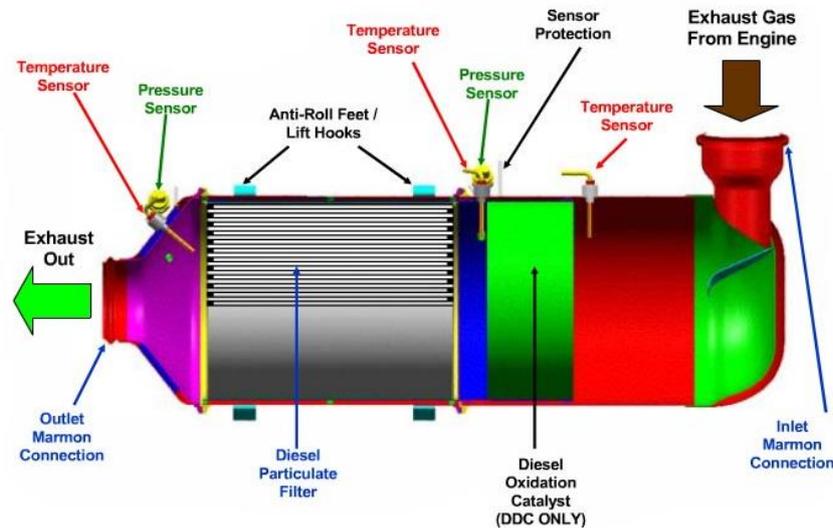


Figura 4. Disposición de catalizador más trampa de partículas

El principio de funcionamiento físico por el cual se rige la trampa de partículas es algo curioso. El monolito consta de unos orificios de entrada y otros de salida, pero estos no son coincidentes. Es decir, el tubo de la entrada se introduce hasta una determinada longitud en el monolito y se cierra, mientras tanto está en contacto con el tubo de la salida. Aprovechando la porosidad y permeabilidad de las paredes, las partículas son intercambiadas y se facilita el trasiego de éstas.

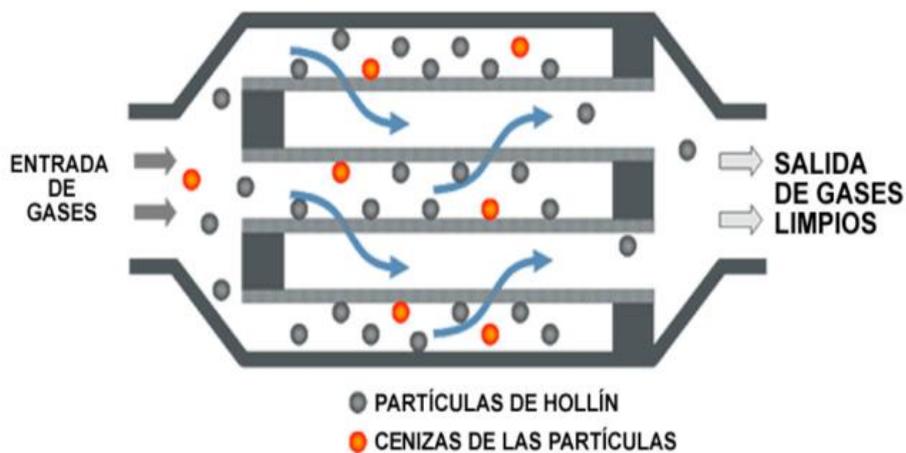


Figura 5. Funcionamiento de la trampa de partículas³

³ Sacado en 28/06/2020 de <https://www.catalizadores.eu/content/23-que-es-un-filtro-de-particulas>

Para mayor profundidad de detalle respecto a información de la propagación en monolitos aplicados a filtros de partículas diésel, se recomienda al presente lector que consulte los artículos elaborados por Mats Åbom [7],[8].

3.4 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En el presente Trabajo Fin de Máster, en aras a la brevedad y a que es una continuación de trabajos desempeñados anteriormente, no se explicarán conceptos como el de los elementos finitos o detalles profundos sobre teoría de ondas. Para ello, se ruega al lector que acceda a los trabajos de Ricardo García y Ben Jordan [9], [10].

3.4.1 MODELO DE ONDAS: PRINCIPIOS FÍSICOS

Para comenzar a introducir la física que interviene en el desarrollo de este trabajo, hay que aclarar que la base de este estudio se cierne sobre la acústica, la propagación de ondas, trampa de partículas y catalizadores, por lo que se considera interesante incluir ligeramente la física que hay detrás de estos fenómenos.

La acústica es la ciencia que estudia el sonido, sus causas, consecuencias, fuentes y formas de propagación a través de cualquier medio. El sonido, originado en una fuente, es debido a perturbaciones de presión en un medio elástico con capacidad de comprimirse, lo cual hace que los átomos adyacentes vibren. Estas perturbaciones duran hasta que la energía llega a cero. En la siguiente imagen, la longitud de onda es λ , c es la velocidad de propagación y f la frecuencia.

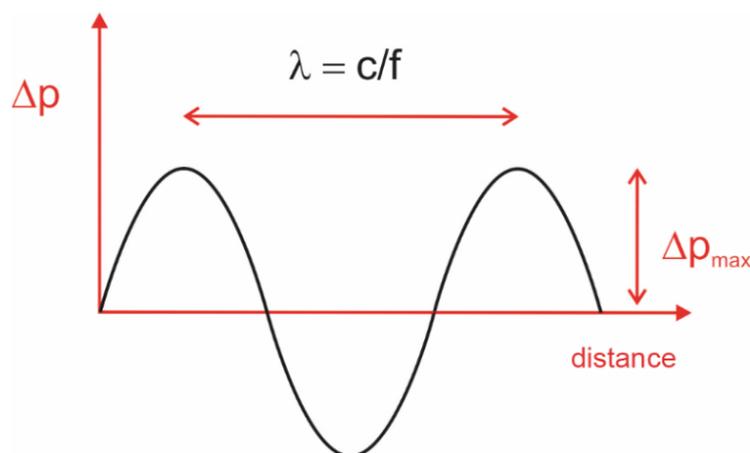


Figura 6. Longitud de onda y su definición

Básicamente, hay dos maneras de clasificar las formas que tiene una partícula para moverse:

- Longitudinales: son aquellas ondas cuya propagación tiene lugar en la misma dirección en que la partícula se mueve.

- Transversales: al contrario que las anteriores, la dirección de propagación es perpendicular a la del movimiento.

Las ondas pueden ser tanto regresivas como progresivas, cuya suma se conoce como el campo sonoro. Una onda progresiva es aquella que se propaga en el sentido creciente de la coordenada estudiada, al contrario que en las regresivas, donde se propagan en sentido contrario. Las ecuaciones que rigen estos comportamientos, progresivos y regresivos son, respectivamente:

	$f(ct - x)$	(2)
--	-------------	-----

	$g(ct + x)$	(3)
--	-------------	-----

En algunos casos, al combinar ondas progresivas y regresivas se puede producir una resultante nula en la energía de transporte, lo cual se suele llamar como onda estacionaria.

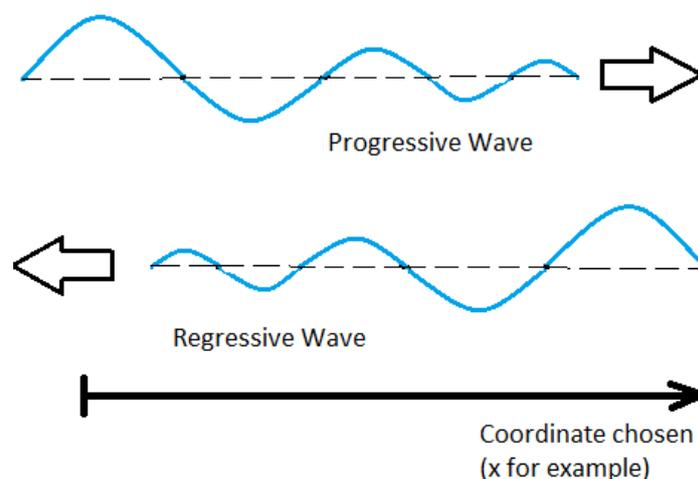


Figura 7. Ondas progresivas y regresivas

3.4.2 MODELOS ACÚSTICOS DEL CATALIZADOR Y TRAMPA DE PARTÍCULAS

En cuanto a las geometrías, éstas van a constar de un conducto de entrada que se conecta con una cámara, la cual está acoplada a un monolito, cuyo final, a su vez, está anexo a una cámara y conducto de salida. En el caso de haber dos monolitos, entre estos hay otra cámara. Los conductos y las cámaras tienen una sección axial uniforme y

la caracterización del medio (aire) se realiza a través de la velocidad del sonido y densidad, c_0 y ρ_0 , respectivamente.

Es interesante destacar los diferentes enfoques de cálculo que se hacen a lo largo del proyecto. Por un lado, con Matlab® los planteamientos son puramente analíticos gracias al uso de la técnica de ajuste modal[11]. Es a través de esta herramienta (script) desarrollada por el DIMM que se pueden validar los resultados obtenidos en Comsol® para los casos de un monolito.

Por otro lado, el tratamiento que se hace en Comsol es totalmente numérico (método de los elementos finitos). Sin embargo, y esto es de lo más importante en este Trabajo Fin de Máster, los modelos analizados con este programa son 3D1D. Esto significa que, como los monolitos, formados por conductos capilares, tienen una sección muy pequeña respecto a su longitud, se conjetura que su comportamiento es 1D, facilitando notoriamente el tiempo y complejidad del cálculo.

Cuando se está resolviendo en Comsol y llega a la zona entre B^\pm y *monolito*, se llama a una subrutina generada con Mathcad® donde se ha caracterizado el comportamiento de los conductos capilares con una matriz de cuatro polos⁴ con términos complejos y dependientes en frecuencia, equivalentes a c_m y ρ_m . El software recoge los valores calculados y los interpola para la continuidad del siguiente dominio: cámara D^\pm y conducto E^\pm .

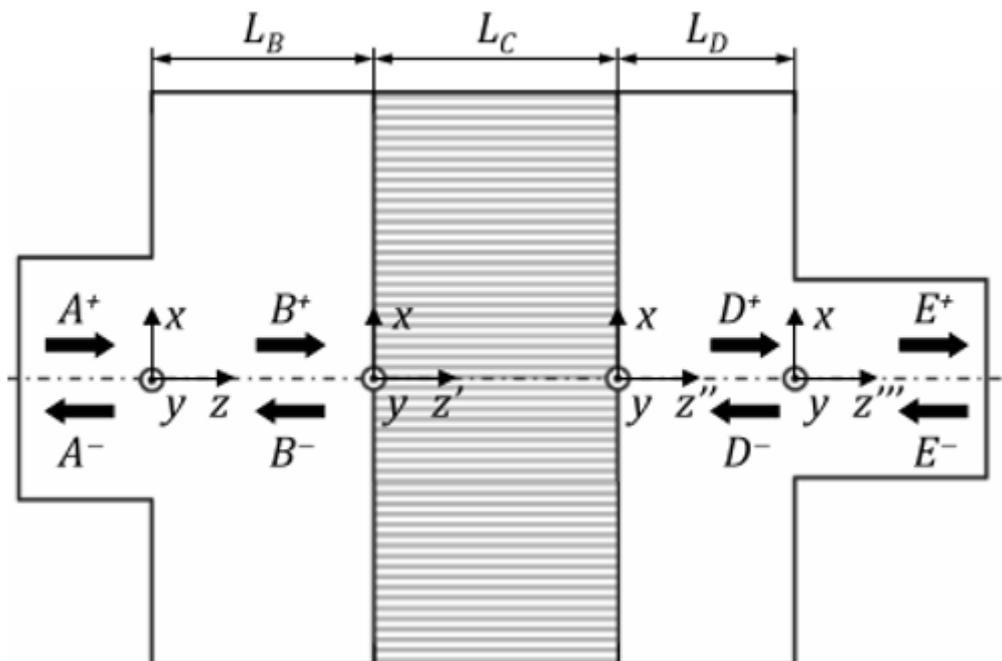


Figura 8. Esquema de un escape de un automóvil con un monolito⁵.

⁴ Los códigos utilizados en Mathcad serán proporcionados en el Anexo.

⁵ Imagen sacada del artículo de revista [11]



4 METODOLOGÍA DE TRABAJO

4.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La finalidad del proyecto es desarrollar un método de modelado con dos monolitos (catalizador y trampa de partículas) en la misma distribución de escape mediante el programa Comsol, al cual se le añade una subrutina de Mathcad y es donde se realiza realmente el cálculo del monolito, pues es donde está caracterizado. Además, las geometrías podrán tener una configuración circular en sus cámaras, o bien una sección transversal rectangular con chaflán y, por último, los conductos de salida podrán estar coaxialmente alineados, o no, respecto al eje central.

El método de validación se centra en ir superando problemas cada vez más complejos, hasta saber que se pueden tener en cuenta todas las variables analizadas. Para ello, los siguientes hitos son los planteados a superar:

- **Monolito de catalizador:**
 - a. Cámaras de entrada-salida con dimensiones iguales o diferentes
 - b. Geometría circular o con sección transversal rectangular con chaflán
 - c. Conductos de entrada y salida centrados
 - d. La resistividad puede tener un valor de 750 ó 3000 rayl/m

- **Monolito de trampa de partículas:**
 - a. Cámaras de entrada-salida con dimensiones iguales o diferentes
 - b. Geometría circular o con sección transversal rectangular con chaflán
 - c. Conductos de entrada y salida centrados
 - i. Variante con conductos descentrados
 - d. Influencia de la capa de hollín almacenada en los capilares

Una vez certificados y contrastados los pasos anteriores, y suponiendo así que todo el modelado es correcto, se procederá a plantear la línea de escape con dos monolitos. Asimismo, se van a realizar unos cálculos con las siguientes características, cuya finalidad es que el equipo de investigadores del DIMM, una vez desarrolle la herramienta analítica, tenga algo con lo que comparar:

- **Monolitos catalizador y trampa de partículas:**
 - a. Cámaras de entrada-salida iguales
 - b. Geometría circular o con sección transversal rectangular con chaflán
 - c. Conductos de entrada y salida centrados
 - i. Variante con conductos descentrados
 - d. Catalizador con 3000 rayl/m y la trampa de partículas sin hollín

4.1.1 GEOMETRÍAS GENERALES

A pesar de haber tener dos geometrías bastante diferentes, es cierto que ambas contienen unas dimensiones longitudinales en común. Los radios de los conductos, dimensiones de estos o de las cámaras son variables comunes

Sin embargo, en concreto hay dos variables dimensionales bastante importantes en el desarrollo del proyecto: L_b y L_d , siendo éstas la longitud de cámara de entrada y cámara de salida, respectivamente. A continuación, se muestra una vista de la sección en 2D de la geometría circular:

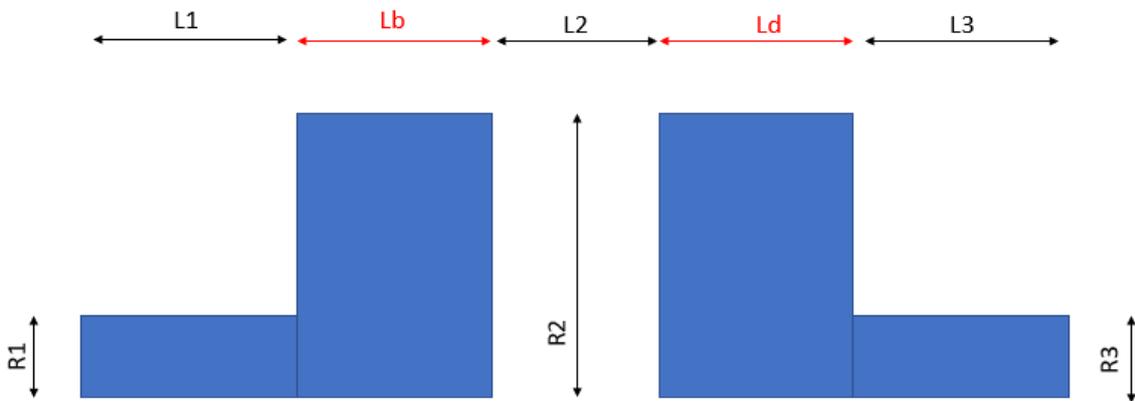


Figura 9. Corte sección de geometría circular con sus dimensiones

En el caso de la geometría de sección transversal rectangular con chaflán, la forma de la cámara es dependiente de las variables a , b y r_{chaf} , donde éstas hacen referencia a su anchura, altura y radio del chaflán, respectivamente.

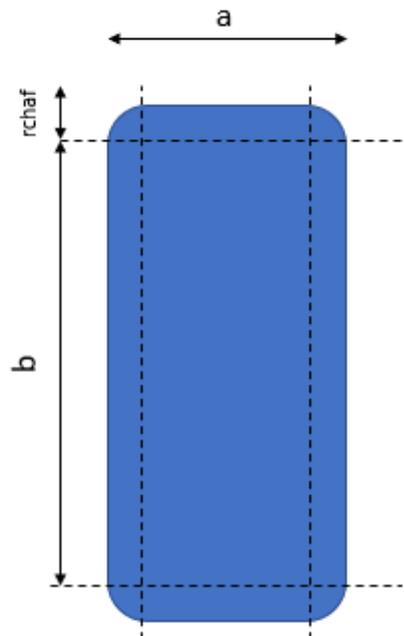


Figura 10. Características de la cámara en la geometría de sección transversal rectangular con chaflán



Todas estas variables son constantes a excepción de las longitudes de las cámaras (Lb y Ld), he ahí la relevancia de éstas y de su influencia. Las medidas son:

Tabla 1. Valores de las variables pertenecientes a las geometrías

VARIABLE	DIMENSIÓN [m]
L1	0.1
L2	0.075
L3	0.1
Lb	0.1 ó 0.15
Ld	0.05 ó 0.1
R1	0.0258
R2	0.1275
R3	0.0258
a	0.14
b	0.29
r_{chaf}	0.0430859315

4.2 MODELIZACIÓN CON SOFTWARE

Para la iniciación al uso del software Comsol Mutiphysics® se remite al lector a las referencias [9] y [10] nuevamente, ya que en éstas se precisa cómo comenzar y modelar correctamente.

Se efectuarán dos modelados distintos con el software. Primeramente, se realizará el del monolito de la trampa de partículas, pues en los trabajos anteriormente llevados a cabo ya se explica cómo hacer el del catalizador. Una vez se halla descrito todo con gran cantidad de detalle, se procederá con la configuración de los dos monolitos, que tendrá tanto la explicación del catalizador como de la trampa de partículas, evadiendo los puntos que ya se hayan visto y resaltando los más críticos, ya que es la parte más vital de todo el desarrollo del proyecto.

Durante la creación y definición de los modelos, es bastante importante poner correctamente, desde inicio a fin, todos los parámetros y variables a introducir (especialmente las condiciones de contorno), pues de otra forma el programa no podrá siquiera comenzar a calcular. Por consiguiente, la metodología implementada pretende

centrarse en cuatro grandes bloques, intentando así abarcar lo máximo posible y proveer de la información suficiente al lector:

- Definición del tipo de estudio y del problema
- Definición de variables globales y parámetros
- Creación de la geometría
- Mallado y puntos críticos

4.2.1 MODELADO DE GEOMETRÍA CIRCULAR 3D1D PARA TRAMPA DE PARTÍCULAS

4.2.1.1 CREACIÓN DE LA GEOMETRÍA

Primeramente, hay que indicarle al programa que se quiere trabajar con un componente 3D. Para ello, se va a la pestaña superior *Home* y se añade un componente 3D.

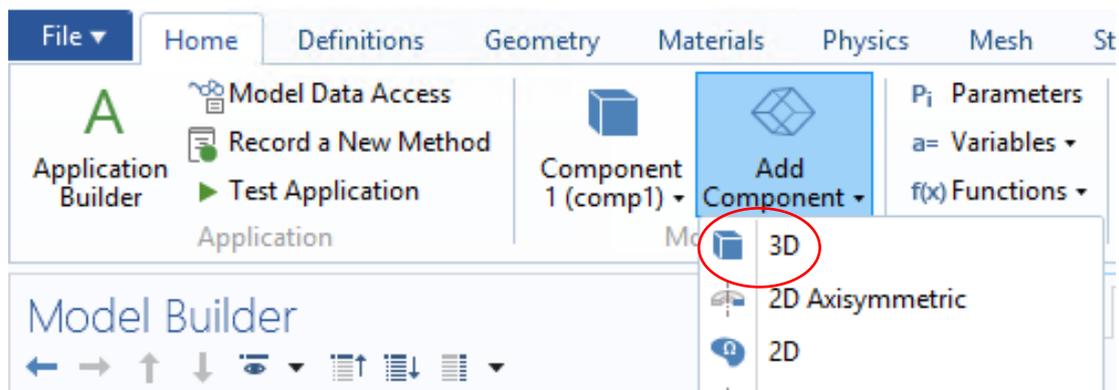


Figura 11. Creación del componente 3D

Seguidamente, hay que crear la geometría como tal. Por suerte, para el caso de la geometría circular se pueden hacer 4 cilindros. En la pestaña *Geometry* se selecciona el bloque *Cylinder*, el cual posteriormente se extruirá.

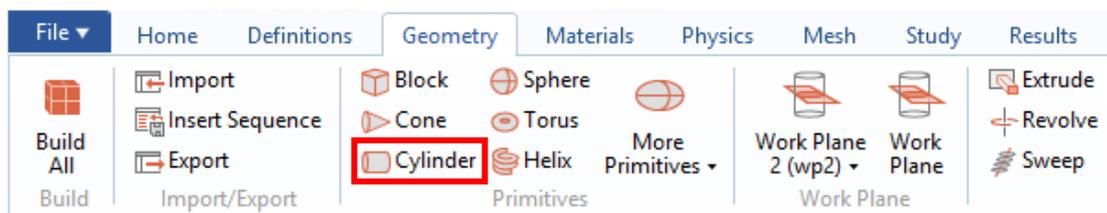


Figura 12. Creación de los cilindros 3D

Luego, cada cilindro tiene asignado el radio, la longitud total y la posición en la que está. Estas incógnitas hacen referencia a las variables vistas anteriormente en la *Tabla 1. Valores de las variables pertenecientes a las geometrías*:

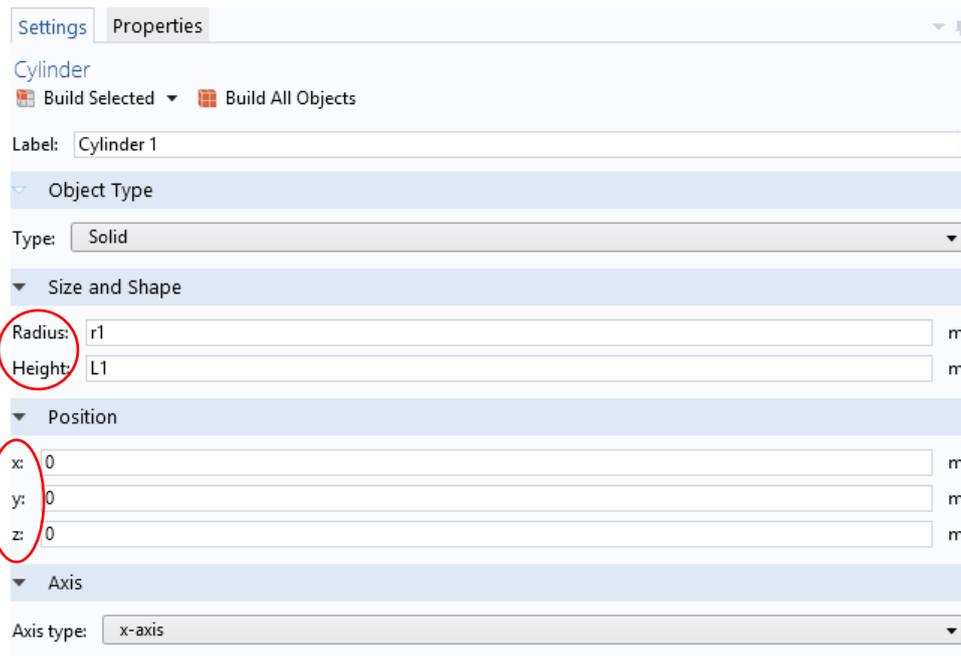


Figura 13. Propiedades de los cilindros

Previamente a diseñar nada, es necesario escribir el nombre de los parámetros que van a regir el modelo (es muy relevante poner bien las unidades también). Para ello, se añaden en el *Model Builder* a través de la opción *Parameters*:

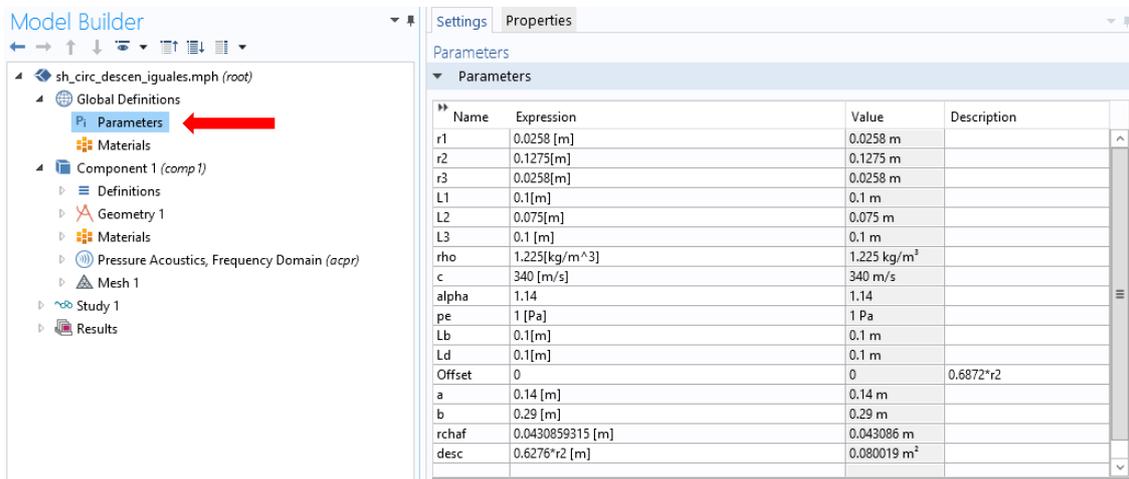


Figura 14. Parámetros del modelo circular y chaflán

Es interesante destacar que todas las medidas se van a realizar a lo largo de la posición 'X', salvo para los casos descentrados, que se moverán a lo largo de 'X' e 'Y'. Para obtener la figura deseada, los cilindros deben tener la siguiente configuración:



Tabla 2. Configuración de la geometría circular centrada

Label	Radius (m)	Height (m)	Position 'X' (m)
Cilindro 1	R1	L1	0
Cilindro 2	R2	Lb	L1
Cilindro 3	R2	Ld	L1+Lb+L2
Cilindro 4	R3	L3	L1+Lb+L2+Ld

En el caso de la geometría circular descentrada, el valor de dónde colocar el conducto de salida (0.08 m) ha sido facilitado por el director del presente Trabajo Fin de Máster. La distancia de descentrado ha sido calculada para que el conducto de salida caiga sobre la línea nodal (presión nula) del primer modo radial de orden superior. Esto permite mantener un nivel razonable de TL al haber ubicado el conducto de salida en una zona de baja presión acústica. Nuevamente, para el caso circular existe una fórmula que da la posición de la línea nodal comentada, la cual es $0.6276 * R$, donde R es el radio del círculo. A este resultado, en Comsol se le asigna con el nombre de la variable 'desc'.

Tabla 3. Configuración de la geometría circular descentrada

Label	Radius (m)	Height (m)	Position 'X' (m)	Position 'Y' (m)
Cilindro 1	R1	L1	0	0
Cilindro 2	R2	Lb	L1	0
Cilindro 3	R2	Ld	L1+Lb+L2	0
Cilindro 4	R3	L3	L1+Lb+L2+Ld	desc

Lo bueno de hacer toda la geometría paramétrica es que en cuanto se modifican los valores asignados en la tabla de las variables, toda la geometría cambia, por lo que se ahorra una cantidad asombrosa de tiempo.

Una vez completada la información con lo que se ha visto en las tablas anteriores, dentro del apartado *Geometry* se clica en *Build All Objects* y se generará el 3D. En el caso de la geometría con la entrada y salida centradas, el resultado debe ser como aparece en la siguiente figura:

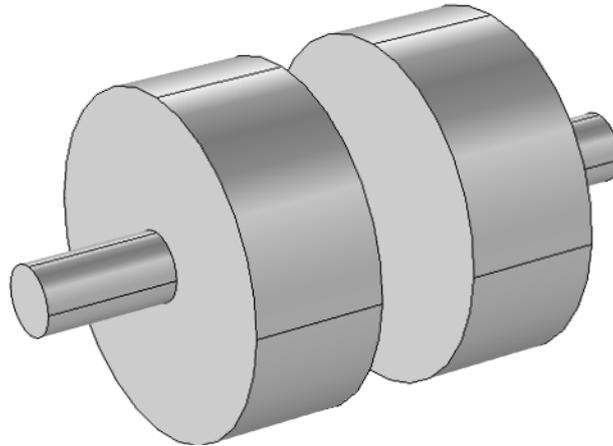


Figura 15. Geometría circular centrada.

Sin embargo, ya que se presenta simetría en los dos planos principales, el resultado final puede ser un cuarto del total⁶ (agilizando así el tiempo de cálculo).

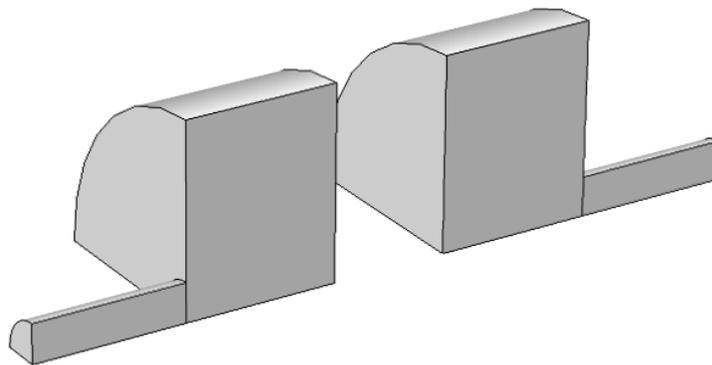


Figura 16. Cuarto de geometría circular centrada.

Eligiendo la opción descentrada, en pantalla debe aparecer lo siguiente:

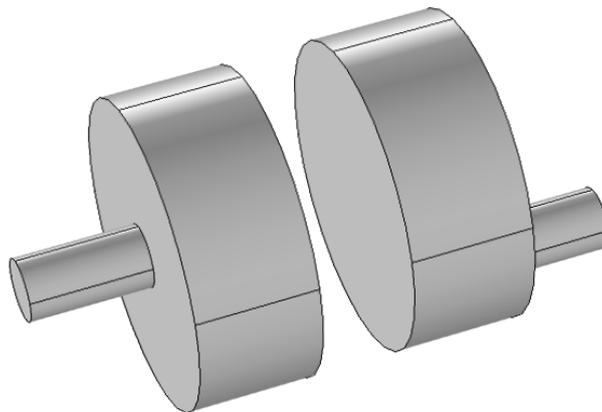


Figura 17. Geometría circular descentrada.

⁶ Para este caso concreto, también se podría realizar un análisis 2D axisimétrico, pero habría que plantear un componente 2D axisimétrico.

Como está descentrado, en este caso no se puede dividir en un cuarto, pero sí en un medio, ya que al menos sí tiene un plano de simetría. Lo que se queda en la mitad del componente:

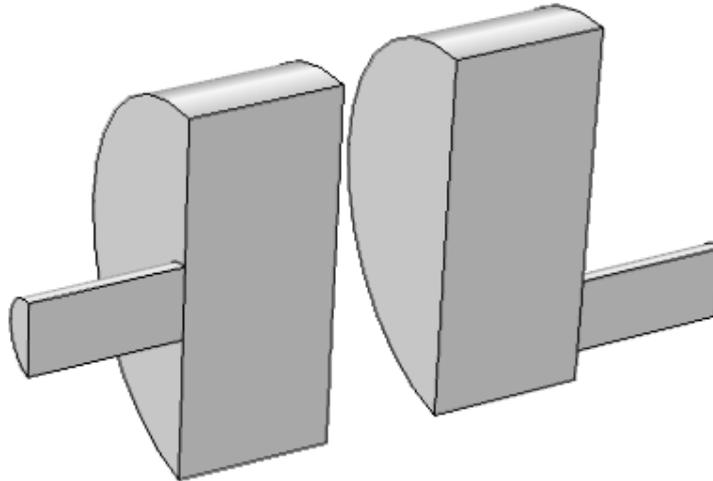


Figura 18. Geometría circular descentrada. Simetría.

4.2.1.2 CONDICIONES DE CONTORNO: CARACTERIZACIÓN DEL MONOLITO TRAMPA DE PARTÍCULAS

En este apartado, se implementa la rutina generada con Mathcad® donde se tiene caracterizado el monolito con la matriz de cuatro polos. Por un lado, hay que generar los archivos sin tener en cuenta la capa de hollín. Y por otro, sí teniéndola en cuenta.

Como ya se ha visto en los trabajos anteriores para el caso del catalizador [9], [10], se debe ejecutar el archivo de Mathcad facilitado por el DIMM para generar los archivos que va a leer Comsol®. En esta ocasión, éste se llama “*dpf_v2.xmc*”.

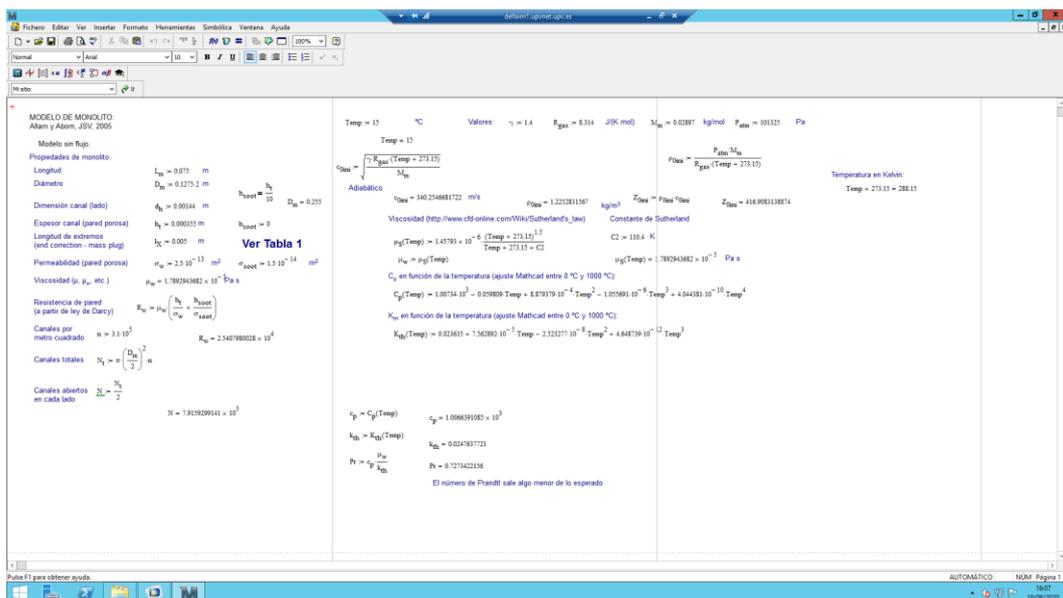


Figura 19. Archivo Mathcad para cálculo monolito DPF

Para generar los resultados sin hollín, la variable h_{shoot} debe tener un valor de 0. Para generarlos con hollín, ésta debe tener un valor de $\frac{h_t}{10}$, donde h_t hace referencia al espesor del canal de la pared porosa (0.000355 m).

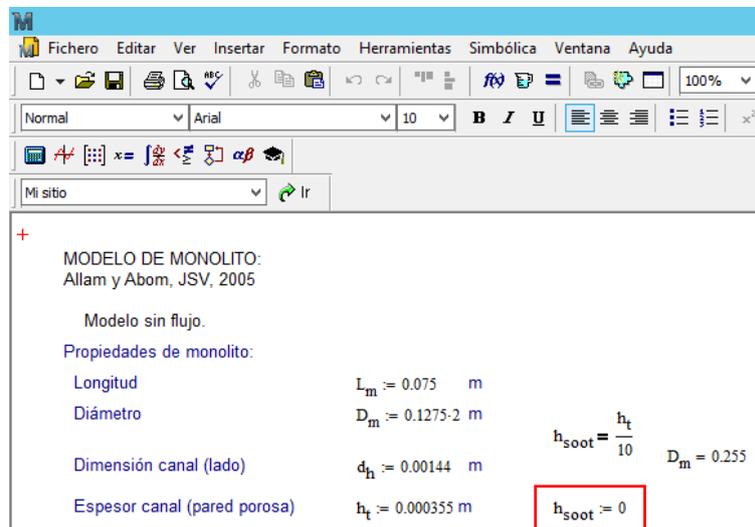


Figura 20. Variable modificable para generación de capa de hollín

En la carpeta raíz donde está el script se generan los siguientes archivos al ejecutarlo:

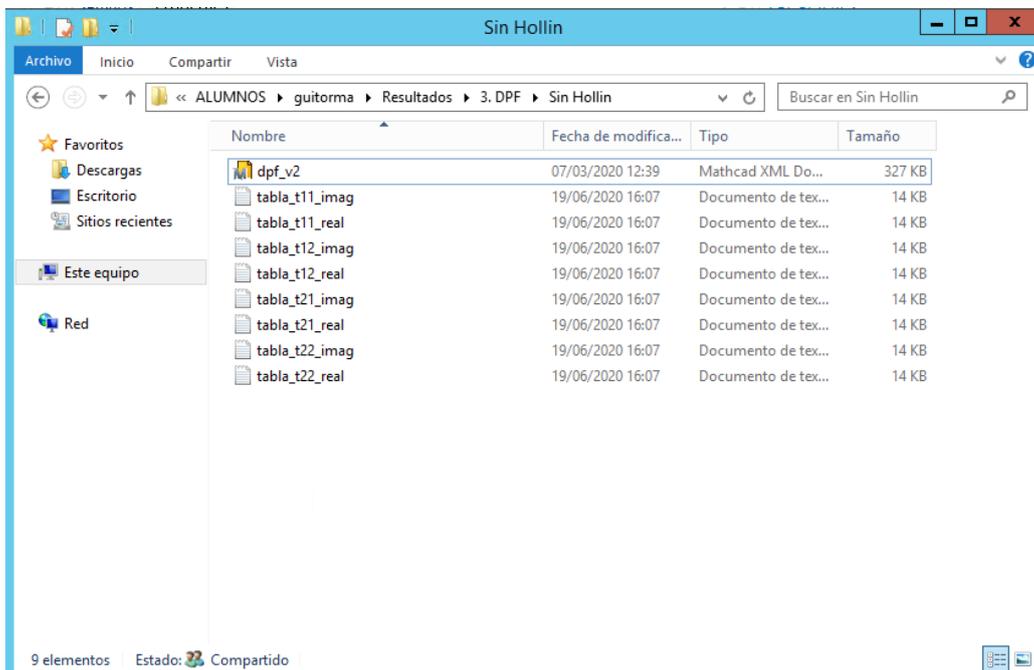


Figura 21. Archivos generados tras lanzar el script de Mathcad

Dado que el procedimiento de implementación está explicado en trabajos anteriores, en este apartado no se revela. A pesar de ello, en apartados posteriores para el caso de dos monolitos (4.2.3.2) se explica con gran detalle cómo se implementa y la relevancia que tiene, lo cual se puede extrapolar y aplicar para el caso de un monolito DPF.

4.2.1.3 MALLADO

La discretización de los dominios es una de las tareas más importantes de todo el proceso. Es vital generar una malla de buena calidad, ya que los resultados pueden variar de forma notoria con respecto a la realidad. Se quiere destacar este hecho debido a que, durante la realización de este proyecto, ha habido varios puntos de estancamiento e inflexión en los que no se encontraba cuál era el problema, entrando en bucle.

Finalmente, se observó que había una disconformidad en la malla entre la cara del *Inlet* y la del *Outlet*, de forma que Comsol® cogía los resultados obtenidos en la rutina de Mathcad e interpolaba de forma errónea los resultados.

Para geometrías que sonlo más simétricas posibles ($L_b=L_d$ y salida centrada), se realicen copias de los dominios mallados, como se muestra en el siguiente ejemplo:

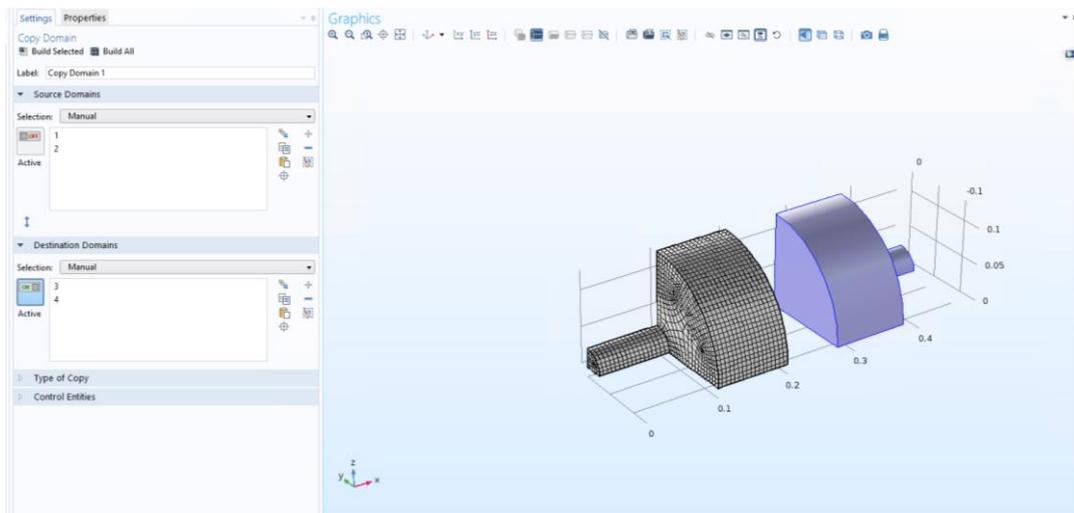


Figura 22. Mallado con copia de dominio para geometría perfectamente simétrica

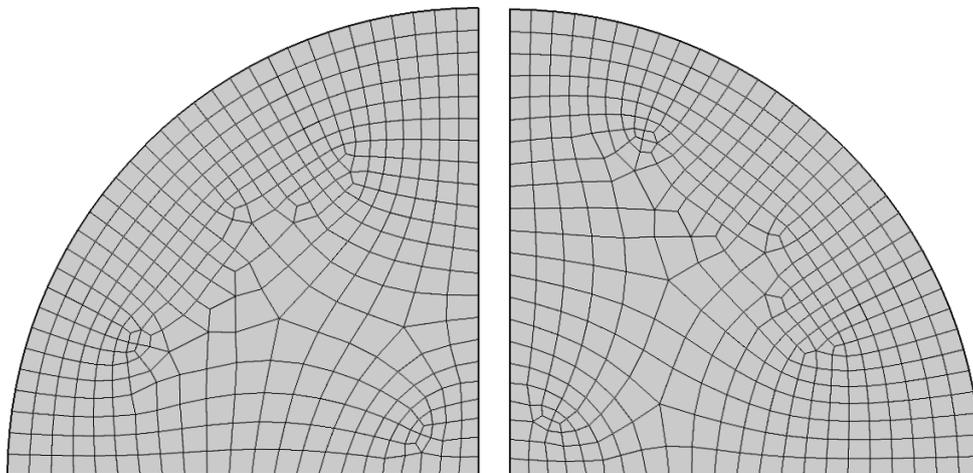


Figura 23. Resultado de las caras *Inlet-Outlet* malladas, respectivamente

Mientras tanto, en los modelos que no sean tan simétricos, se recomienda que las caras *Inlet-Outlet* tengan la mayor similitud posible a través de mallados *Swept*. Al final, esto encarecerá notoriamente el número de elementos, pero es un sacrificio a realizar con la intención de garantizar unos resultados de calidad:

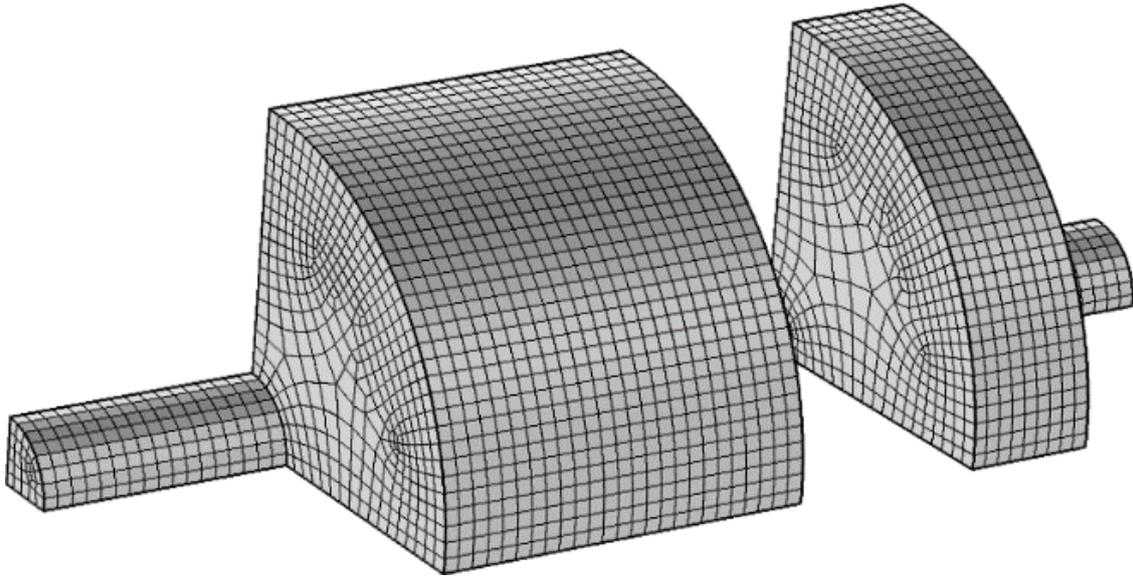


Figura 24. Similitud máxima posible entre caras *Inlet-Outlet*

4.2.2 MODELADO DE GEOMETRÍA DE SECCIÓN TRANSVERSAL RECTANGULAR CON CHAFLÁN 3D1D PARA TRAMPA DE PARTÍCULAS

4.2.2.1 CREACIÓN DE LA GEOMETRÍA

Para el caso del modelo de sección transversal rectangular con chaflán, la principal diferencia con respecto al modelo circular es la geometría de las cámaras L_b y L_d , como ya se ha mencionado en casos anteriores.

Los conductos de entrada y salida se realizarían tal y como se ha explicado para la geometría anterior. En cuanto a las cámaras, las medidas vienen impuestas por las variables: a , b y r_{chaf} (ver ejemplo en *Figura 14. Parámetros del modelo circular y chaflán*). El modelado es similar, pero en esta ocasión hay que crear un *Work Plane* y establecer dónde empieza éste. Haciendo doble clic en *Geometry* o bien en los menús de la parte superior, se puede escoger crearlo:

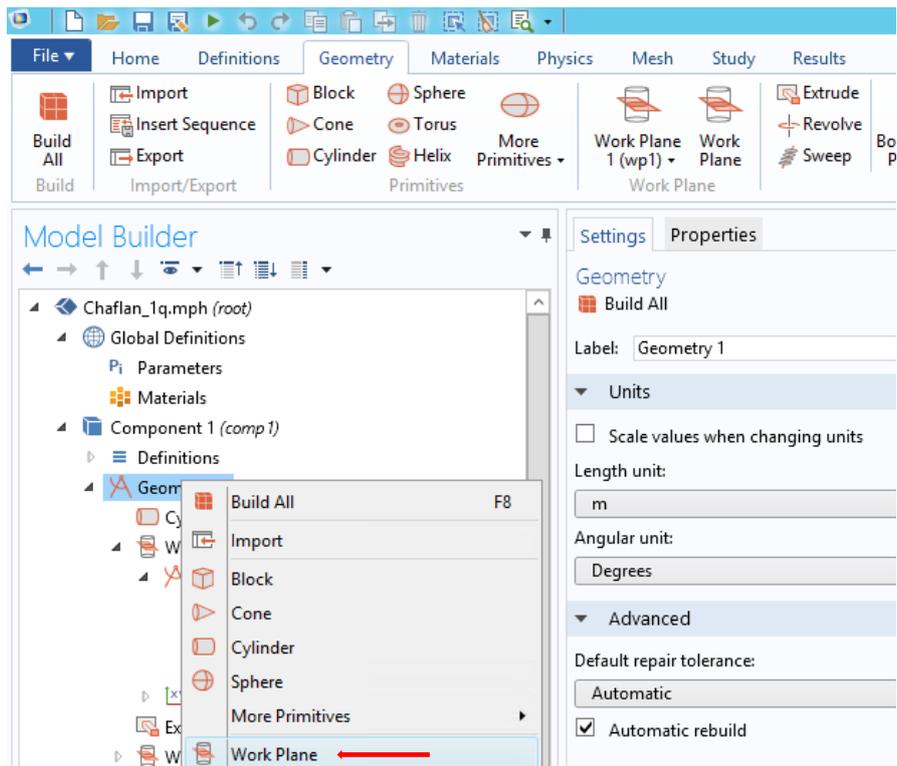


Figura 25. Creación Working Plane para geometría de chaflán

Una vez generado el *Work Plane*, hay que meter un rectángulo y luego la opción de radio (*Rectangle & Fillet*). Esto se puede hacer de la misma forma que antes, con clic derecho sobre *Plane Geometry* o en la parte superior:

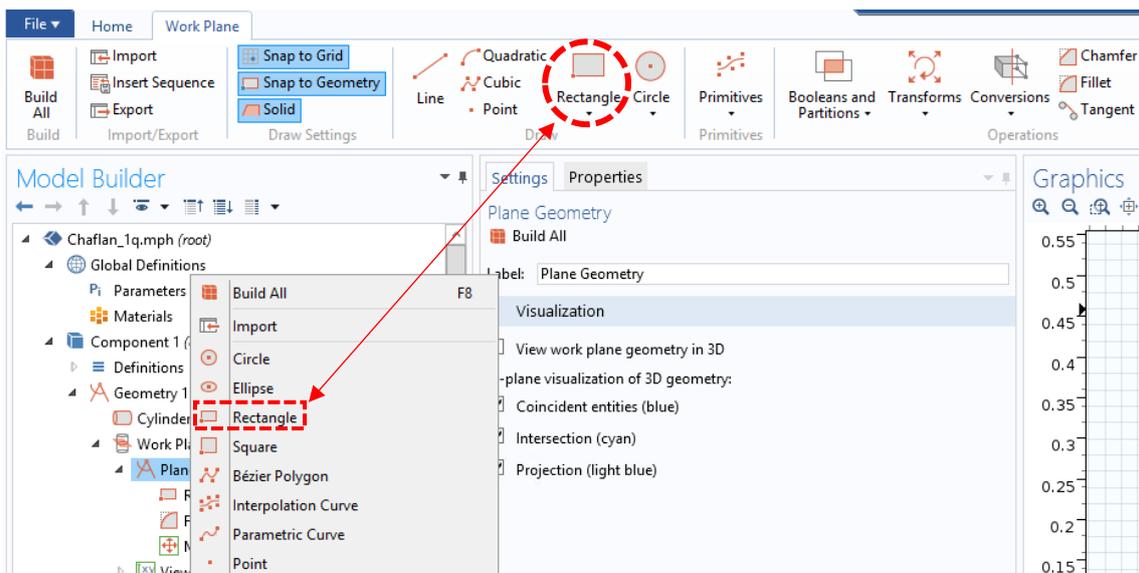


Figura 26. Creación forma del chaflán

Dentro del menú de *Rectangle*, en *Width* y *Height* se pondrían los valores a y $b+r_{chaf}*2$, respectivamente:

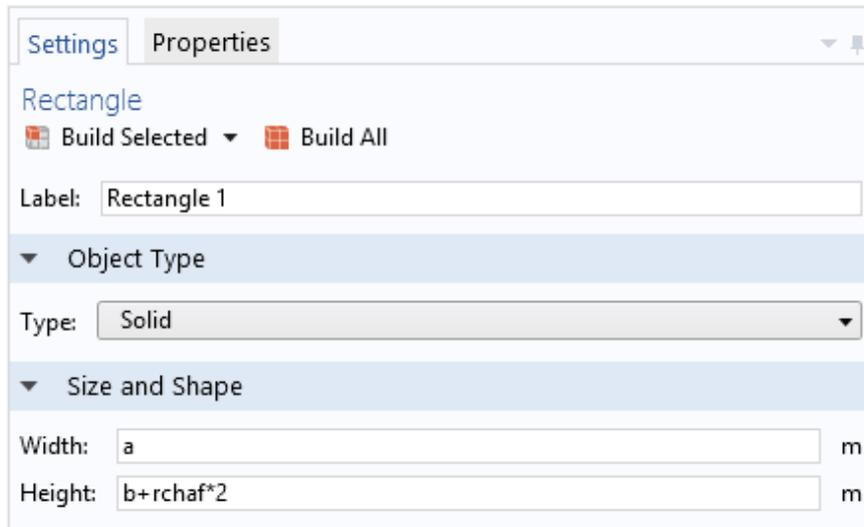


Figura 27. Dimensiones del rectángulo para geometría chaflán

Por último, se le aplica la operación *Fillet*:

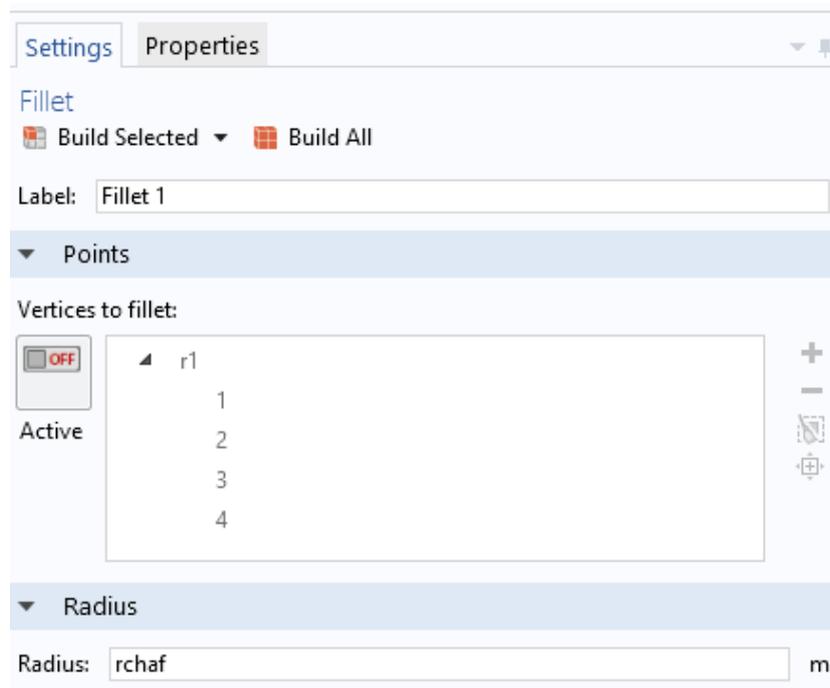


Figura 28. Dimensión del radio geometría chaflán

A continuación, se extruye tal y como se ha explicado con la geometría anterior. Las posiciones de dónde empieza cada cilindro o plano, son las mismas que aparecen en la "Posición 'X'" de la tabla *Tabla 2. Configuración de la geometría circular centrada*. Finalmente, la pieza mostrada en el visor debe resultar como en la figura siguiente:

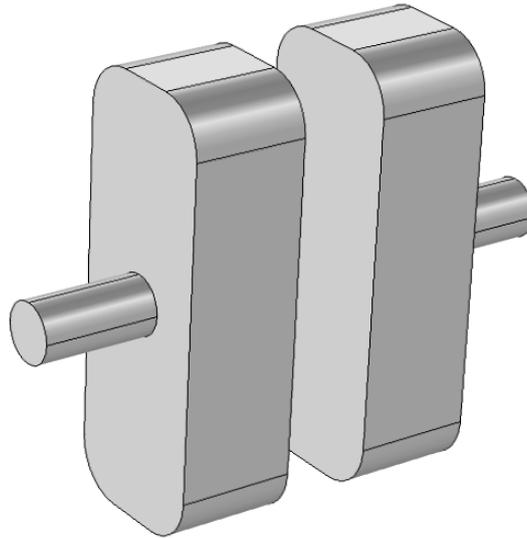


Figura 29. Geometría de sección transversal rectangular con chaflán

Al igual que en el caso anterior, la pieza se puede cortar en 2 planos de simetría, quedándose en un cuarto de lo que ésta es para ahorrar coste computacional. De modo que, se puede reducir a lo siguiente:

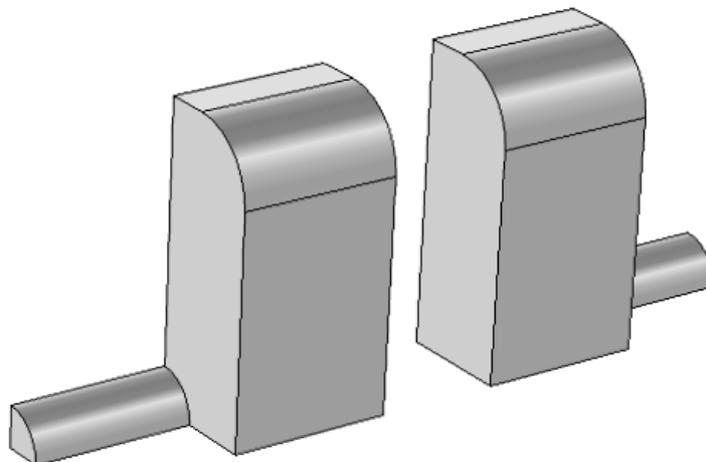


Figura 30. Geometría de sección transversal rectangular con chaflán recortada por 2 planos de simetría

En el caso de querer realizar esta geometría con la salida descentrada, el origen del cilindro de ésta debe estar desplazado en el plano vertical 0.0913 m, de forma que el conducto de salida caiga sobre la línea nodal del segundo modo de orden superior, manteniendo así un nivel razonable de TL al haber ubicado el conducto de salida en una zona de baja presión acústica⁷.

⁷ Información proporcionada por el director del Trabajo Fin de Máster (Francisco Denia)

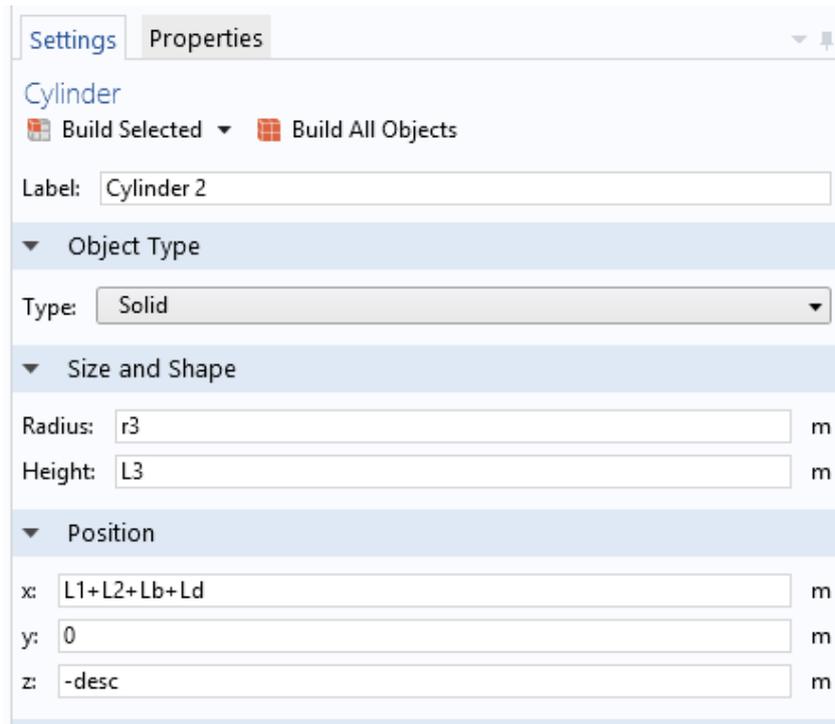


Figura 31. Configuración descentrada 0.0913 m para la geometría transversal rectangular con chaflán

Una vez todo extruido, en el visualizador de Comsol mostrarse la siguiente geometría:

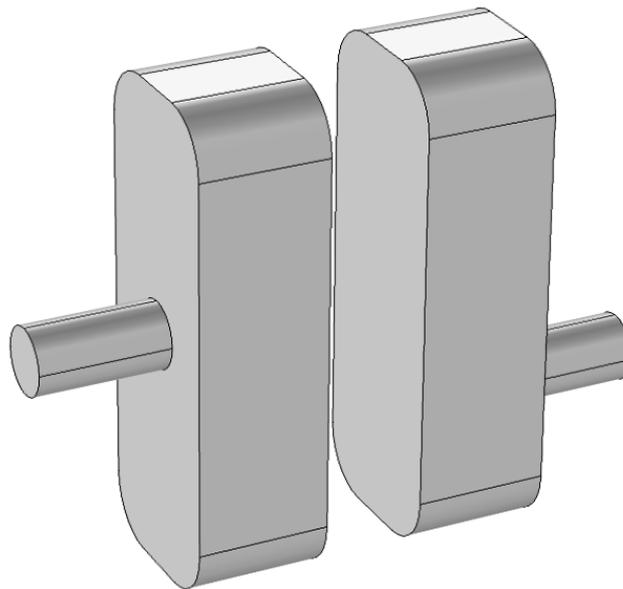


Figura 32. Geometría rectangular con chaflán descentrado

En esta ocasión también se puede dividir la pieza por el plano vertical para reducir el coste computacional:

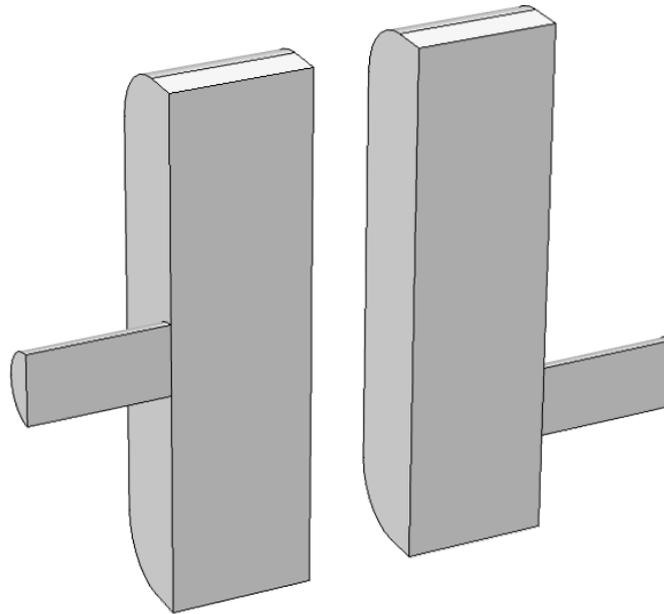


Figura 33. Geometría rectangular con chaflán seccionada por plano vertical

4.2.2.2 CONDICIONES DE CONTORNO

Las condiciones de contorno a aplicar para este modelo son las mismas que para el modelo circular. Por ello, se ruega al lector su lectura si fuere necesario (4.2.1.2).

4.2.2.3 MALLADO

En cuanto a calidad de mallado y consejos, los aplicados en el apartado del modelo circular son análogos a éste. Por consiguiente, se aplica el mismo consejo que en el apartado anterior (4.2.1.3).

4.2.3 MODELADO 3D1D CON DOS MONOLITOS: CATALIZADOR Y TRAMPA DE PARTÍCULAS

A continuación, se van a explicar los pasos a seguir para efectuar con Comsol el modelado con dos monolitos en la misma configuración de escape, habiendo un total de cuatro casos diferentes⁸:

- Geometría circular sin hollín
 - Entrada-Salida centrada
 - Entrada-Salida descentrada
- Geometría de sección transversal rectangular con chaflán sin hollín
 - Entrada-Salida centrada
 - Entrada-Salida descentrada

⁸ Se puede ver con más detalle en el apartado 4.1

No obstante, y éste es un punto importante, dado que la diferencia entre geometrías se ha explicado anteriormente, tan solo se ejemplificará el modelado a través de la geometría circular, ya que lo que se quiere explicar es el desarrollo del modelo para que otra persona sea capaz de replicarlo. Igualmente, los puntos críticos serán resaltados.

4.2.3.1 GEOMETRÍA

Para este caso, a diferencia de los modelados anteriormente, se ha añadido una cámara intermedia y, después de ésta, el segundo monolito, tal y como muestra la figura siguiente:

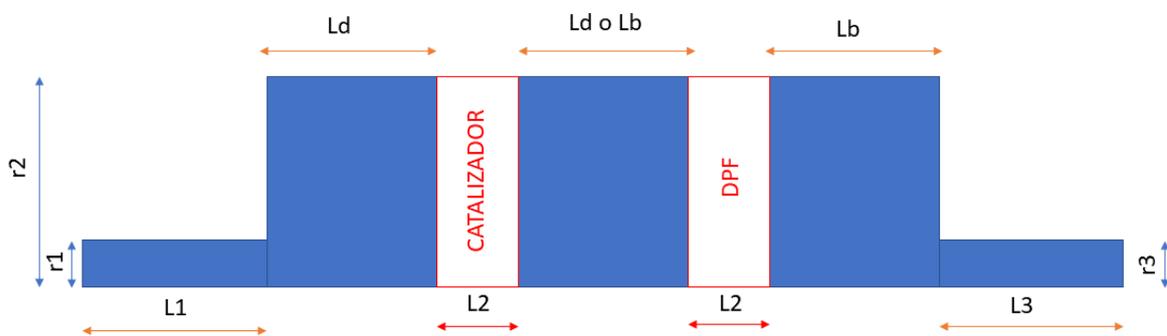


Figura 34. Distribución geométrica del modelo 3D1D con dos monolitos

Para generar la geometría, primero es importante establecer bien los parámetros que van a regir ésta. Hay que destacar que estos son para el caso de la forma puramente circular. En caso de tener la de chaflán u otra diferente, es el apartado de *Parameters*, nuevamente, donde hay que plasmar sus características:

Settings		Properties	
Parameters			
Parameters			
Name	Expression	Value	Description
r1	0.0258 [m]	0.0258 m	
r2	0.1275[m]	0.1275 m	
r3	0.0258[m]	0.0258 m	
L1	0.1[m]	0.1 m	
L2	0.075[m]	0.075 m	
L3	0.1 [m]	0.1 m	
rho	1.225[kg/m^3]	1.225 kg/m ³	
c	340 [m/s]	340 m/s	
alpha	1.14	1.14	
pe	1 [Pa]	1 Pa	
Lb	0.1[m]	0.1 m	
Ld	0.1[m]	0.1 m	
desc_circ	0.6276*r2 [m]	0.080019 m ²	

Figura 35. Parámetros para la geometría 3D1D con dos monolitos

Haciendo los mismos ejercicios de modelado vistos anteriormente (4.2.1.1) y teniendo en cuenta las consideraciones dimensionales pertinentes, éste debería ser el resultado visto una vez se extruye la pieza:

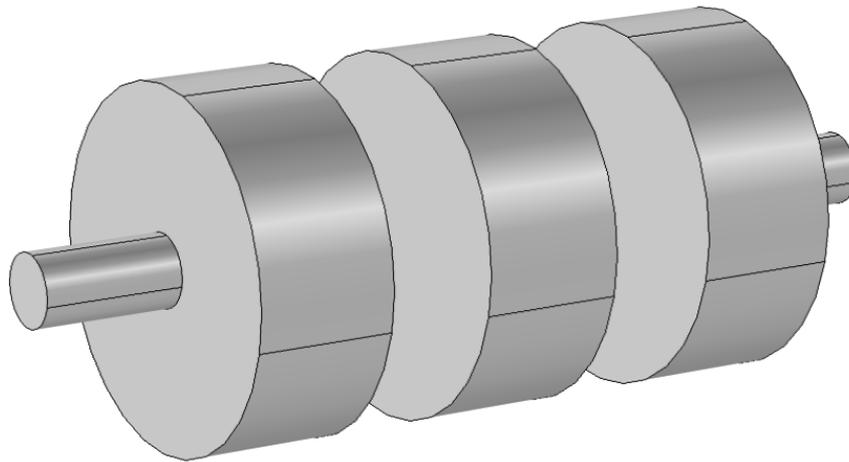


Figura 36. Pieza completa 3D1D para dos monolitos: ejemplo circular

Al igual que se ha visto anteriormente, en caso de haber planos de simetría, hay que recordar que el componente se puede recortar, tanto como si el conducto de salida está o no centrado. Eso se puede realizar con las herramientas que Comsol te ofrece fácilmente.

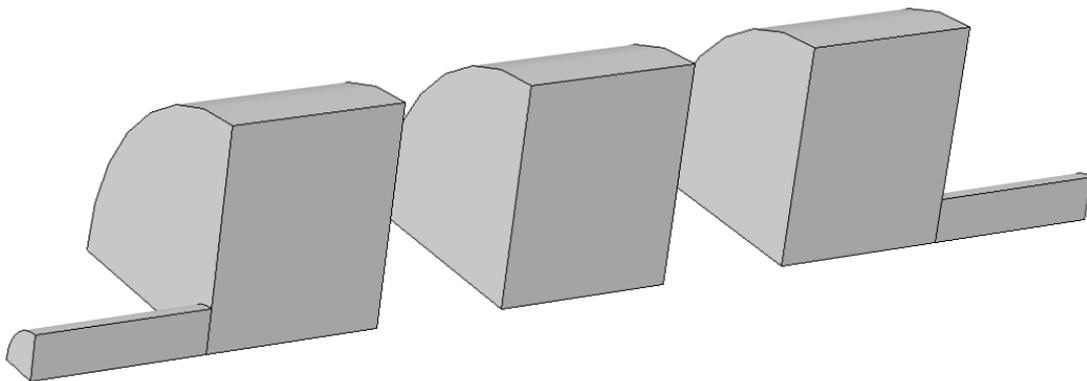


Figura 37. Pieza 3D1D para dos monolitos cortada por planos de simetría

4.2.3.2 CONDICIONES DE CONTORNO

Éste es uno de los apartados en los que más hace falta haber leído y entendido los trabajos de Ben y Ricardo, por lo que se ruega al lector hacerlo (si no lo ha hecho ya) para no perderse en los siguientes pasos[9], [10].

4.2.3.2.1 CREACIÓN DE SECCIONES EXPLÍCITAS

Una sección explícita en Comsol es como si crearas una etiqueta con un nombre concreto y se le asignara a un dominio, cara o geometría. Esto favorece la labor realizada posteriormente, pues no hará falta hacer clic en cada cara y se seleccionará a través de un desplegable. Las partes a crear serían: Entry, Inlet-Outlet (catalizador), Inlet-Outlet (DPF) y Exit.

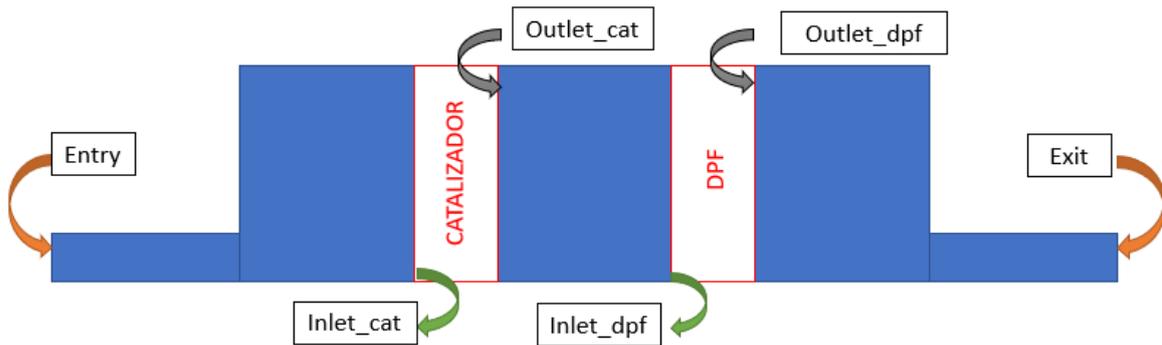


Figura 38. Distribución de las secciones explícitas en COMSOL

Para crearlas, hay que ir al apartado *Definitions* y ahí seleccionar *Explicit*. Acto seguido, darle un nombre y elegir el nivel de la entidad como *Boundary*.

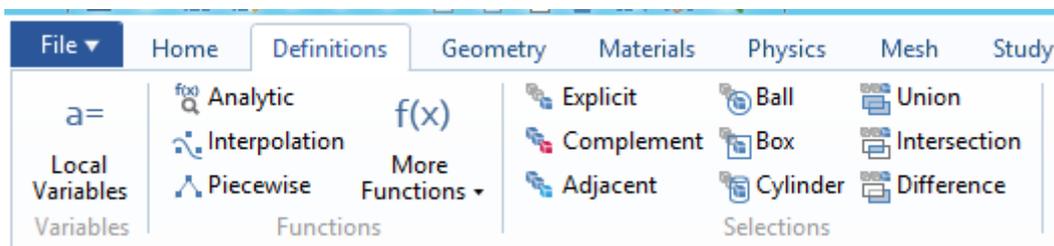


Figura 39. Creación de la sección explícita en COMSOL

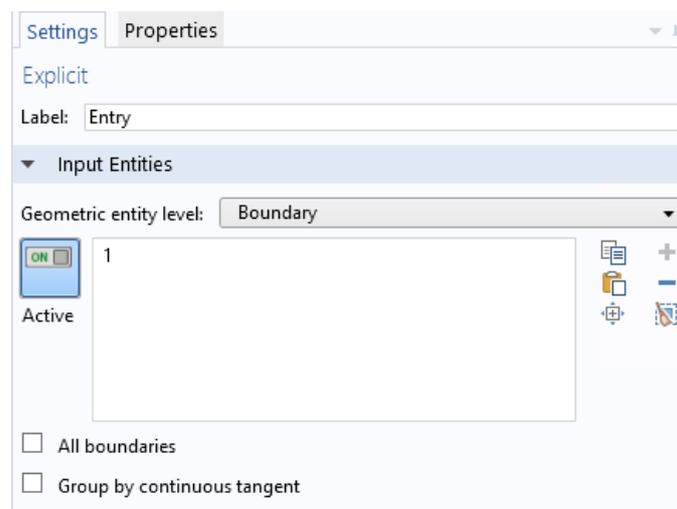


Figura 40. Opciones dentro de la sección

Es importante poner bien la nomenclatura a estas secciones. Finalmente, habrá un total de seis nombres:

- Entry
- Inlet_cat
- Outlet_cat
- Inlet_dpf
- Outlet_dpf
- Exit

4.2.3.2.2 INTERPOLACIONES: RUTINA DE MATHCAD

En el siguiente paso es necesario ejecutar las rutinas de Mathcad® e importar los archivos a COMSOL®. Es interesante cambiar el nombre de los archivos devueltos por esta rutina para evitar posibles futuras confusiones, ya que ambas rutinas retornan ficheros con mismo nombre.

En este caso la nomenclatura para el catalizador y el DPF se ha decidido dejar de la siguiente forma:

Tabla 4. Nomenclatura de las interpolaciones en COMSOL

DPF		CATALIZADOR	
T11_im	T11_real	T31_im	T31_real
T12_im	T12_real	T32_im	T32_real
T21_im	T21_real	T41_im	T41_real
T22_im	T22_real	T42_im	T42_real

Para cambiar el nombre de los ficheros, hay que acceder al archivo "Monolito_3000rayl.xmc". Una vez abierto Mathcad®, al final del archivo está la exportación de datos de matrices de cuatro polos del monolito. Aquí se ven los scripts que generan los archivos de texto, de modo que hay que variar, por un lado, el término a la izquierda de la ecuación por el número que toque, más luego cambiar el valor dentro de la función *WRITEPRN* y su nombre final.

Esto último mencionado se puede ver bastante más claro en la siguiente figura (los términos cambiados están redondeados en rojo):

Término t31, parte real (en función de la frecuencia)

$$t31_real_{kk,0} := frec_{kk}$$

$$t31_real_{kk,1} := \text{Re}\left[T_{\text{monolit}}_{kk,0,0}\right] \quad \text{WRITEPRN("tabla_t31_real.txt")} := t31_real$$

Figura 41. Cambios en el código de Mathcad para catalizador

Este ejercicio hay que hacerlo para todas las matrices generadas, de forma que éste sería el desenlace:

Término t31, parte real (en función de la frecuencia)

$$t31_real_{kk,0} := frec_{kk}$$

$$t31_real_{kk,1} := \text{Re}\left[T_{\text{monolit}}_{kk,0,0}\right] \quad \text{WRITEPRN("tabla_t31_real.txt")} := t31_real$$

Término t31, parte imaginaria (en función de la frecuencia)

$$t31_imag_{kk,0} := frec_{kk}$$

$$t31_imag_{kk,1} := \text{Im}\left[T_{\text{monolit}}_{kk,0,0}\right] \quad \text{WRITEPRN("tabla_t31_imag.txt")} := t31_imag$$

Término t41, parte real (en función de la frecuencia)

$$t41_real_{kk,0} := frec_{kk}$$

$$t41_real_{kk,1} := \text{Re}\left[T_{\text{monolit}}_{kk,1,0}\right] \quad \text{WRITEPRN("tabla_t41_real.txt")} := t41_real$$

Término t41, parte imaginaria (en función de la frecuencia)

$$t41_imag_{kk,0} := frec_{kk}$$

$$t41_imag_{kk,1} := \text{Im}\left[T_{\text{monolit}}_{kk,1,0}\right] \quad \text{WRITEPRN("tabla_t41_imag.txt")} := t41_imag$$

Término t32, parte real (en función de la frecuencia)

$$t32_real_{kk,0} := frec_{kk}$$

$$t32_real_{kk,1} := \text{Re}\left[T_{\text{monolit}}_{kk,0,1}\right] \quad \text{WRITEPRN("tabla_t32_real.txt")} := t32_real$$

Término t32, parte imaginaria (en función de la frecuencia)

$$t32_imag_{kk,0} := frec_{kk}$$

$$t32_imag_{kk,1} := \text{Im}\left[T_{\text{monolit}}_{kk,0,1}\right] \quad \text{WRITEPRN("tabla_t32_imag.txt")} := t32_imag$$

Término t42, parte real (en función de la frecuencia)

$$t42_real_{kk,0} := frec_{kk}$$

$$t42_real_{kk,1} := \text{Re}\left[T_{\text{monolit}}_{kk,1,1}\right] \quad \text{WRITEPRN("tabla_t42_real.txt")} := t42_real$$

Término t42, parte imaginaria (en función de la frecuencia)

$$t42_imag_{kk,0} := frec_{kk}$$

$$t42_imag_{kk,1} := \text{Im}\left[T_{\text{monolit}}_{kk,1,1}\right] \quad \text{WRITEPRN("tabla_t42_imag.txt")} := t42_imag$$

Figura 42. Matrices de cuatro polos cambiadas de nombre en Mathcad

Ejecutando el programa y habiendo realizado este cambio, se obtiene lo siguiente:

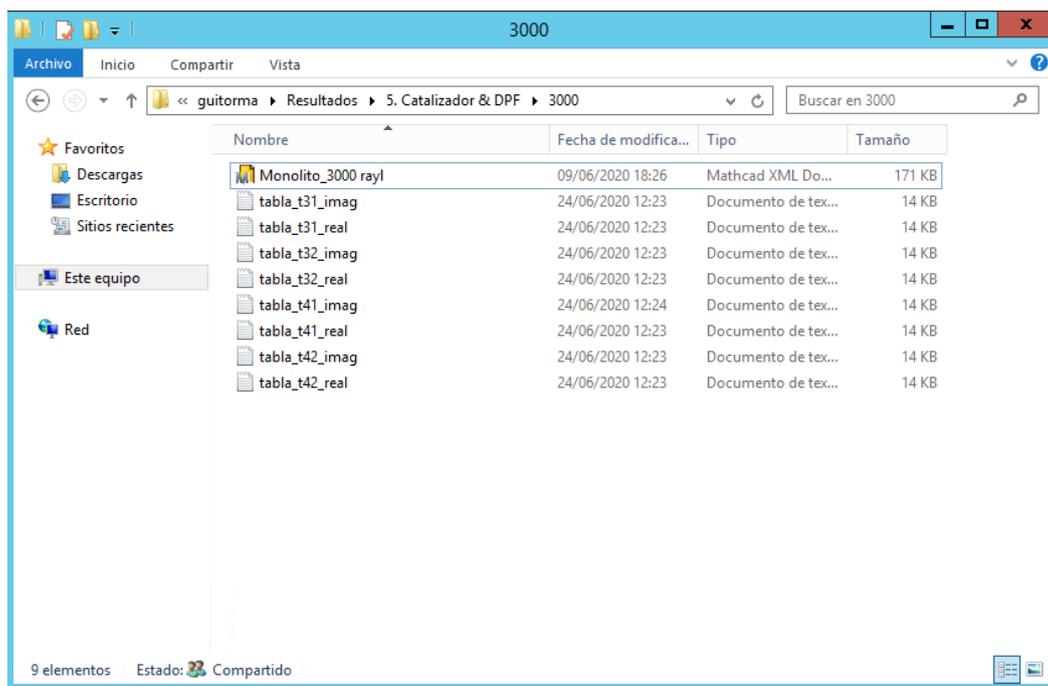


Figura 43. Archivos generados de las matrices de 4 polos cambiando el nombre de las matrices

Después, hay que cargar dentro de COMSOL® todos los archivos creados (tanto del catalizador como del DPF). Para ello, en la misma pestaña de *Definitions* se clicla la opción de *Interpolation*.

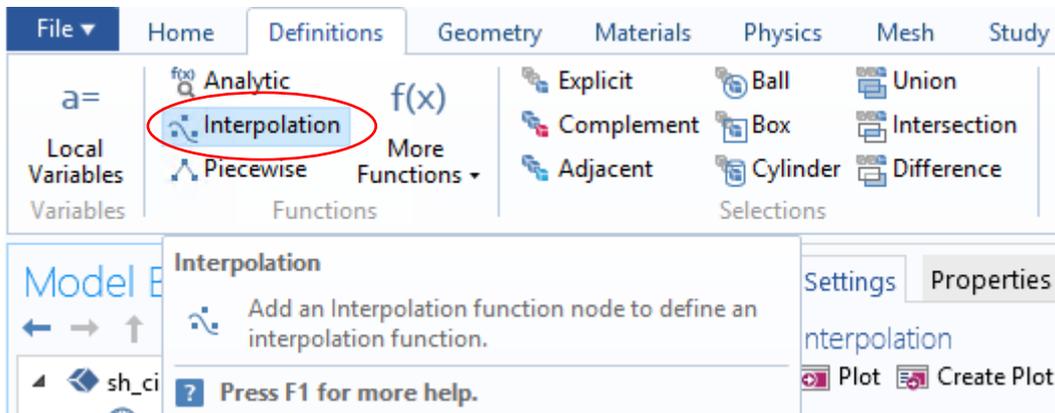


Figura 44. Creación de la interpolación

Hay que crear un total de 16 interpolaciones (8 para cada caso), cuyos nombres se han especificado en la *Tabla 4. Nomenclatura de las interpolaciones en COMSOL*. Para importarlo, dentro de la configuración de la interpolación, hay que seleccionar la fuente de datos *File* y buscar el archivo deseado. Una vez importado, en la *Function name* se le asigna el nombre requerido.

Esto es de vital importancia, ya que posteriormente se utilizarán todos estos términos para establecer realmente dónde están los monolitos y cuál es cada uno, por lo que cualquier desliz a la hora de escribir o confundirse de archivo, provocará un resultado no realista en la simulación.

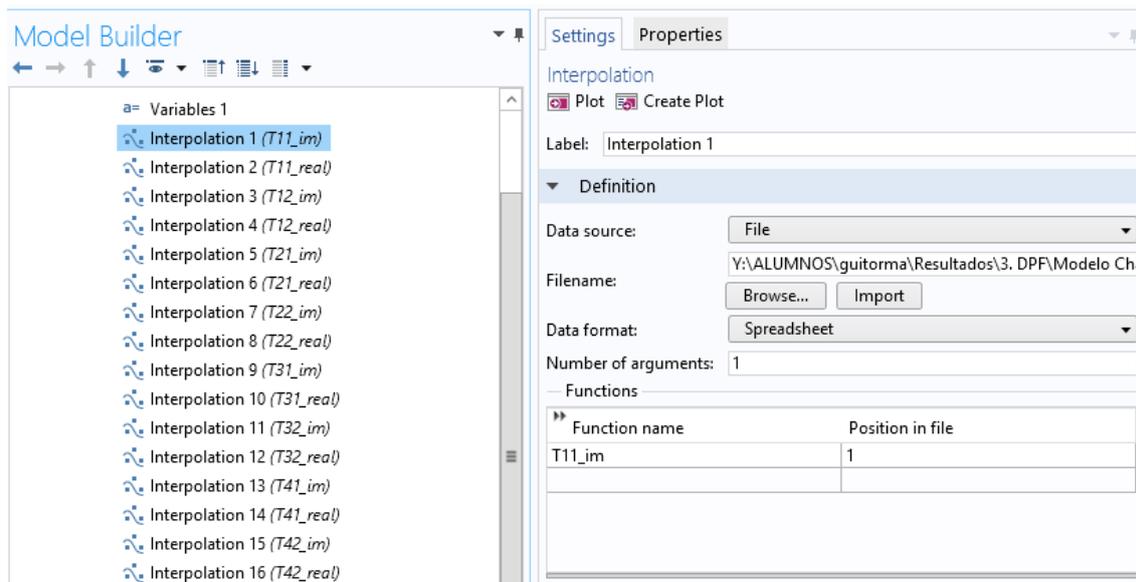


Figura 45. Creación y asignación de nombre a las interpolaciones

4.2.3.2.3 SIMILITUD DE LOS LÍMITES

En este apartado se va a especificar al programa que las caras de Inlet-Outlet están conectadas entre sí, de forma que una los resultados obtenidos en el dominio anterior al monolito, coja la matriz de cuatro polos hecha en Mathcad, y la conecte con el siguiente dominio, es decir, anexionar el Lb con el mazacote del medio y éste último con el Ld.

Para ello, en la misma pestaña de *Definitions* hay que buscar el desplegable *Component Couplings* y aquí seleccionar *Boundary Similarity*. Se necesitarán un total de 4 diferentes, ya que hay que relacionar el Inlet con Outlet y el Outlet con el Inlet para ambos monolitos, es decir: hay que unir el Inlet del catalizador con su Outlet y viceversa lo mismo para el DPF.

Dentro de la configuración del *Boundary Similarity* hay que elegir la fuente y el destino. La primera se puede elegir a través de la sección explícita generada anteriormente y la segunda hay que elegirla de forma manual. El criterio de elección es: primero establecer el Inlet-Outlet y luego el Outlet-Inlet. También es importante destacar la importancia del *Operator Name*, cuya designación interna es *bndsimX*, donde la 'X' hace referencia al código diferenciador con el que se calcularán cosas a posteriori.

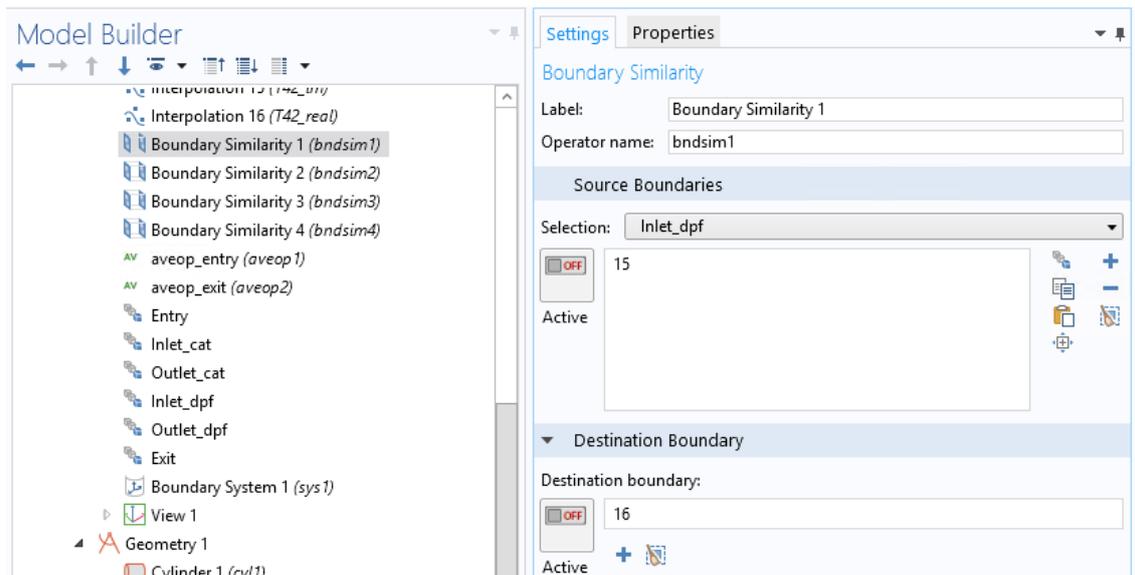


Figura 46. Configuración de la Boundary Similarity

De esta forma, la configuración para el DPF y el catalizador queda:

Tabla 5. Nombre del operador para los casos DPF y Catalizador

	DPF	CATALIZADOR
Inlet-Outlet	bndsim1	bndsim3
Outlet-Inlet	bndsim2	bndsim4

4.2.3.2.4 OPERADORES PROMEDIO

El próximo paso es la creación de los operadores promedio, que van a permitir calcular la *Transmission Loss* (TL). Para ello, se vuelve a ir a *Definitions*, desplegable de *Component Couplings* y se elige *Average*. Es importante nombrar *aveop1* para la condición de contorno de *Entry* y *aveop2* para la *Exit*, pues se usarán en futuros pasos.

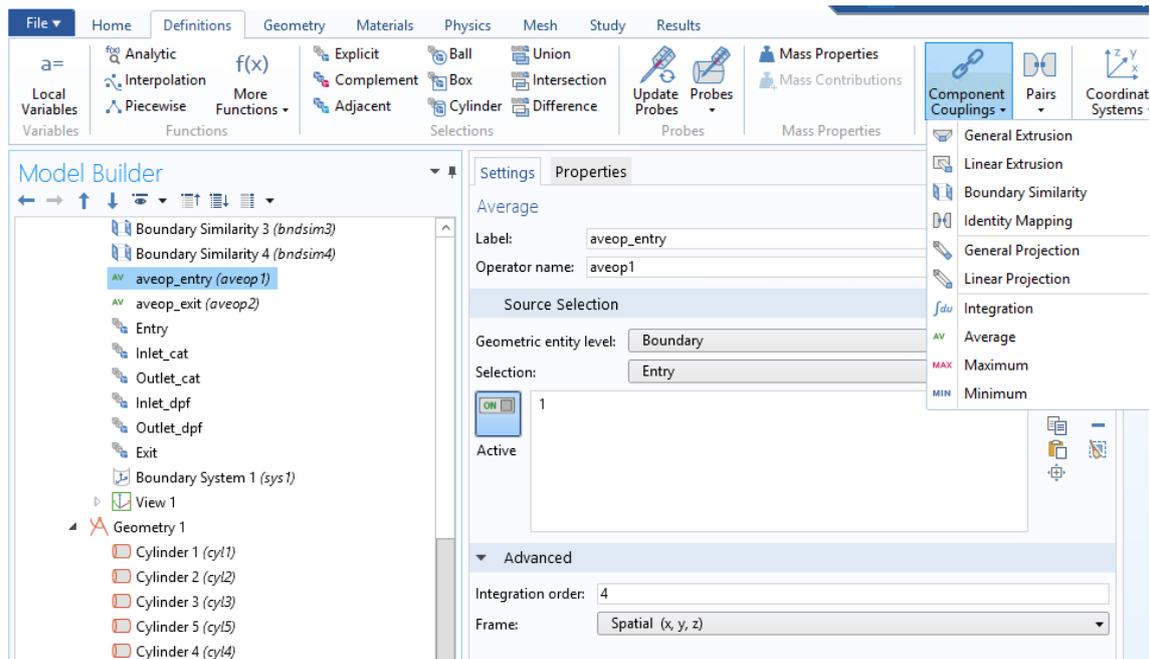


Figura 47. Creación del Operador promedio para calcular la TL

4.2.3.2.5 VARIABLES

Por último, la creación de las variables, el paso más importante que termina de conectar todos los pasos previos y permite obtener la TL. La justificación de nomenclatura y por qué esas variables tienen esa expresión está bien detallado en el Trabajo Fin de Máster de Ben Jordan [10], por lo que se va a obviar en esta explicación.

Lo que sí es relevante mencionar es que las variables p_i , s_i , p_o y s_o hacen alusión al DPF, mientras que las p_{i_cat} , s_{i_cat} , p_{o_cat} y s_{o_cat} (como se puede intuir) al catalizador.

Name	Expression	Unit	Description
TL	$20 \cdot \log_{10}(\text{abs}((pe)/\text{aveop2}(p)))$		Transmission Loss
p_i	bndsim1(acpr.p_t)	Pa	DPF
s_i	bndsim1(acpr.vx)	m/s	DPF
p_o	bndsim2(acpr.p_t)	Pa	DPF
s_o	bndsim2(acpr.vx)	m/s	DPF
p_i_cat	bndsim3(acpr.p_t)	Pa	CATALIZADOR
s_i_cat	bndsim3(acpr.vx)	m/s	CATALIZADOR
p_o_cat	bndsim4(acpr.p_t)	Pa	CATALIZADOR
s_o_cat	bndsim4(acpr.vx)	m/s	CATALIZADOR
T11	$T11_real(\text{freq}) + i \cdot T11_im(\text{freq})$		
T12	$T12_real(\text{freq}) + i \cdot T12_im(\text{freq})$ [Pa*s/m]	Pa*s/m	
T21	$T21_real(\text{freq}) + i \cdot T21_im(\text{freq})$ [m/(Pa*s)]	m ² *s/kg	
T22	$T22_real(\text{freq}) + i \cdot T22_im(\text{freq})$		
T31	$T31_real(\text{freq}) + i \cdot T31_im(\text{freq})$		
T32	$T32_real(\text{freq}) + i \cdot T32_im(\text{freq})$ [Pa*s/m]	Pa*s/m	
T41	$T41_real(\text{freq}) + i \cdot T41_im(\text{freq})$ [m/(Pa*s)]	m ² *s/kg	
T42	$T42_real(\text{freq}) + i \cdot T42_im(\text{freq})$		

Figura 48. Variables del modelo

4.2.3.2.6 CONFIGURACIÓN DE LAS FÍSICAS IMPLICADAS

Por último, hay que determinar las físicas del problema. Los primeros pasos, tales como establecer la temperatura del modelo, la velocidad de referencia, impedancia a la salida o establecer la onda plana y sus características están, de nuevo, bien explicadas en los trabajos de Ben y Ricardo [9], [10].

Sin embargo, para esta ocasión, como se ha añadido un monolito más hay una ligera diferencia. En la física del problema hay que definir la velocidad del *Inlet* y del *Outlet* de cada monolito. Para ello, hay que crear en la pestaña de *Physics*, en el desplegable de *Boundaries*, la opción *Normal Velocity*.

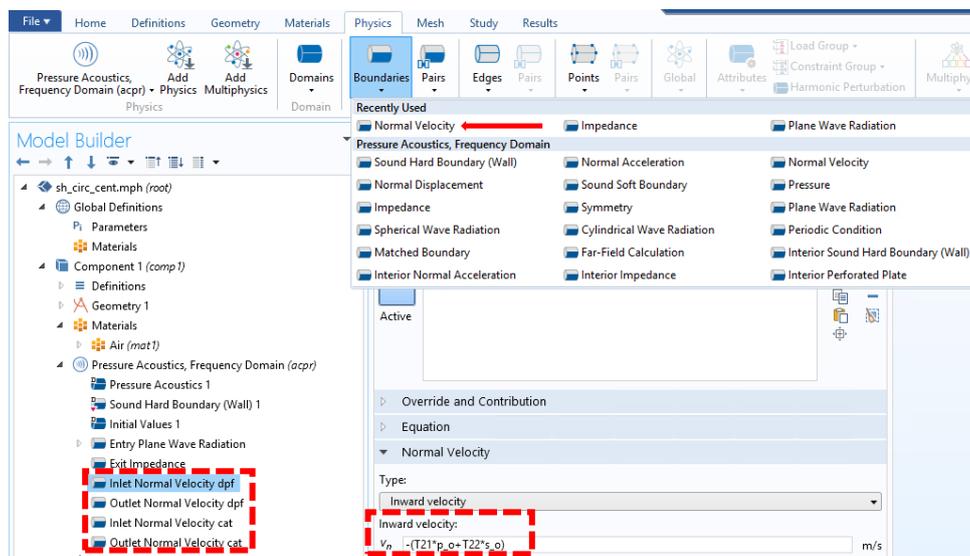


Figura 49. Creación de las velocidades de los monolitos



Como se puede apreciar en la imagen anterior, a cada *Normal Velocity* que se ha creado, hay que asignarle una sección de entrada y, a su vez, una ecuación que determina el comportamiento de ésta, relacionando las interpolaciones hechas en los monolitos con las presiones y velocidades de estos:

Tabla 6. Nombre, sección y ecuación de comportamiento de las "Normal Velocity"

Nombre	Sección	Ecuación [m/s]
Inlet Normal Velocity dpf	Inlet_dpf	$-(T21*p_o+T22*s_o)$
Outlet Normal Velocity dpf	Outlet_dpf	$-T21*p_i+T11*s_i$
Inlet Normal Velocity cat	Inlet_cat	$-(T41*p_o_{cat}+T42*s_o_{cat})$
Outlet Normal Velocity cat	Outlet_cat	$-T41*p_i_{cat}+T31*s_i_{cat}$

Finalmente, tan solo quedaría mallar (ya desarrollado anteriormente) y establecer el dominio de la frecuencia a querer estudiar (visto en referencias a trabajos anteriores).

4.3 OBTENCIÓN DE RESULTADOS CON MATLAB

Para cada modelo, el DIMM ha facilitado una serie de scripts en los que es posible calcular la *Transmission Loss* (TL) de una línea de escape con un monolito catalizador o trampa de partículas. Para ello, hay que introducir en cada código parámetros como la resistividad, número de modos, dimensiones de las cámaras Lb-Ld, si hay o no hollín, etc.

Sin embargo, la finalidad de este apartado es explicar cómo obtener estos resultados con Matlab y no explicar la física que hay detrás de estos, pues para ello se debe recurrir a la bibliografía facilitada al final de este documento.

4.3.1 MONOLITO DE CATALIZADOR PARA GEOMETRÍA CIRCULAR AXISIMÉTRICA

Para el caso específico de la geometría circular con catalizador con entrada y salida centradas, el departamento posee un método analítico que, mediante funciones de Bessel[11], calcula la TL. De este modo, el coste computacional es realmente reducido, ya que está bastante optimizado, y difiere de los que se mostrarán posteriormente. La entrada y salida están centradas.



Comenzando por el archivo, éste se llama “*Calcula_v1.m*”. Es un código de cerca de 270 líneas donde en su interior se van llamando a los archivos: *datos*, *parte 1.1*, *parte 1.2* y *raicescir*.

Antes de lanzar ningún cálculo, hay que abrir el archivo *datos* con un lector de texto cualquiera⁹ y modificar las variables que se desean para el cálculo. Éstas serán:

- Longitud subcámara entrada Lb
- Longitud subcámara salida Ld
- Número máximo de modos para ajuste modal
- Resistividad

```
1 % Catalizador circular
2 %
3 %
4 % Datos geométricos
5 %
6 0.0258 % Radio de tubo de entrada r1
7 %
8 0.1275 % Radio de cámara r2
9 %
10 0.0258 % Radio de tubo de salida r3
11 %
12 0.1 % Longitud de subcámara de entrada lb
13 0.075 % Longitud de cámara central lc (monolito)
14 0.1 % Longitud de subcámara de salida ld
15 %
16 %
17 % Datos de cálculo
18 %
19 20 % Número máximo de modos para ajuste modal
20 %
21 10 % Frecuencia inicial
22 3200 % Frecuencia final
23 10 % Incremento de frecuencia
24 %
25 %
26 % Propiedades del aire
27 %
28 15 % Temperatura (-1 ==> se meten los valores directamente; Distinto de -1 ==> se calculan con la ley de gas perfecto)
29 %
30 340 % Velocidad del sonido (Sólo se lee si temperatura es igual a -1)
31 1.225 % Densidad del aire (Sólo se lee si temperatura es igual a -1)
32 %
33 %
34 %
35 % Propiedades del monolito. Modelo de Allard sin flujo
36 %
37 750 % Resistividad (debería se función de la temperatura)
38 0.8 % Porosidad
39 1.14 % Factor geométrico (1 para capilar circular; 1.07 para capilar cuadrado; 1.14 para capilar triangular)
40 %
41 % Resto de propiedades ( Si temperatura es -1 ==> se meten los valores directamente abajo)
42 % ( Si temperatura no es -1 ==> se calculan en función de T² y no se lee lo de abajo. No está acabado.)
43 0.00001802 % Viscosidad dinámica // ejemplo ant: 0.0000178938
44 0.02476 % Conductividad térmica // ejemplo ant: 0.024763772116244
45 1007 % Calor específico a presión constante // ejemplo ant: 1006.6391
46 %
47 %
```

Figura 50. Propiedades modificables del archivo “datos”

Una vez con todo esto claro, se guardan los cambios en el archivo y se lanza el código de Matlab.

⁹ En este caso se ha usado Notepad++

4.3.2 MODELO DE CATALIZADOR PARA GEOMETRÍA CON SECCIÓN TRANSVERSAL RECTANGULAR CON CHAFLÁN

Como se puede intuir, con esta geometría no se puede realizar lo mismo que en el apartado anterior, por lo que se tuvo que desarrollar un código diferente y más complejo. En esta ocasión, hay mayor cantidad de funciones y archivos que lee el script principal, llamado "Principal.m". El *modus operandi* es el mismo que en el ejemplo anterior, solo que el archivo a modificar esta vez se llama "variab". Se deben modificar, nuevamente: longitud subcámara entrada Lb, longitud subcámara salida Ld, número máximo de modos para ajuste modal y la resistividad. No obstante, entrada y salida están centradas.

```
C:\Users\User\Desktop\UNIVERSIDAD\Master Ingenieria Mecanica\TFM\Code 2\Sección_arbitraria\variab...
File Edit Search View Encoding Language Settings Tools Macro Run Plugins Window ?
variab
1 % Fichero con las variables del problema de catalizador
2 %
3 %
4 %
5 % Frecuencias de análisis
6 %
7 %
8 10 % frecuencia inicial
9 3200 % frecuencia final
10 10 % Incremento de frecuencia
11 %
12 %
13 % Propiedades del aire (ver temperatura al final del fichero)
14 %
15 %
16 340.0 % Velocidad del sonido en el aire
17 1.225 % Densidad del aire
18 %
19 %
20 % Número de Modos
21 %
22 %
23 10
24 %
25 %
26 % Longitudes de la cámara y el monolito
27 %
28 %
29 0.15 % Longitud del tramo de expansión de la cámara 0.0475m antes
30 0.075 % Longitud del monolito
31 0.05 % Longitud del tramo de contracción de la cámara
32 %
33 %
34 % Propiedades del monolito (ver temperatura al final del fichero)
35 %
36 %
37 3000 % Resistividad (debería se función de la temperatura)
38 0.88 % Porosidad
39 1.14 % Factor geométrico (1 para capilar circular; 1.07 para capilar cuadrado; 1.14 para capilar
40 0.00001834 % Viscosidad dinámica
41 0.02534 % Conductividad térmica
42 1005 % Calor específico a presión constante
43 %
44 %
45 % Temperatura (propiedades del aire y del monolito)
46 %
47 %
48 15 %-1 % Temperatura (-1 ==> se meten los valores de arriba directamente; distinto de -1 ==> se c
49 %
50 %
51 % Secciones de entrada/salida para cálculo de TL y adaptación de número de modos en cada conducto
52 %
53 0.0005227924 % Sección del conducto de entrada
54 0.0005227924 % Sección del conducto de salida
length: 2216 lines: 54 Ln: 1 Col: 1 Sel: 0|0 Windows (CR LF) ANSI INS
```

Figura 51. Propiedades modificables del archivo "variab"



Las funciones y archivos utilizadas por Matlab son los siguientes:

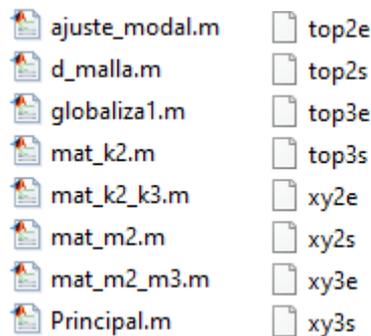


Figura 52. Funciones y archivos utilizados por el código "Principal.m"

Es destacable que los archivos con la nomenclatura "top" y "xy" son extraídos con Ansys APDL® para saber los nodos donde se sacan n modos de frecuencia y se extrapolan a lo largo de la geometría. Además, son estos los que dan realmente la geometría de la malla que Matlab analiza.

4.3.3 MODELO TRAMPA DE PARTÍCULAS PARA GEOMETRÍA CIRCULAR Y CON SECCIÓN TRANSVERSAL RECTANGULAR CON CHAFLÁN

En el caso de la trampa de partículas, con entrada y salida centradas, se repite la metodología de cálculo vista en el ejemplo anterior, solo que con un mayor número de variables para tener en cuenta. A continuación, se muestran las funciones y archivos usados:

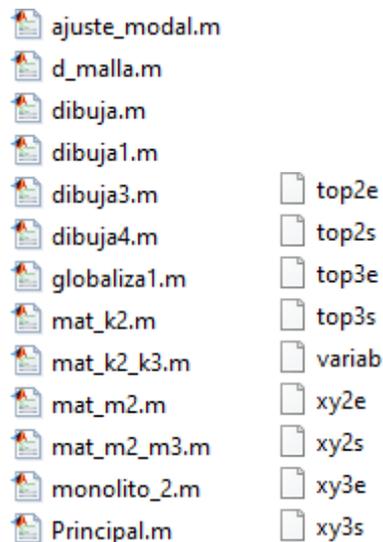


Figura 53. Funciones y archivos usados para el código "Principal.m" con monolito DPF

Nuevamente, dado que aquí hay dos geometrías diferentes, los archivos "top" y "xy" han de ser diferentes para cada caso (circular o sección transversal rectangular con chaflán).

En cuanto a los parámetros a modificar en el archivo “*variab*”, se le añade la presencia de hollín o no. También se podría modificar el número de Mach para hacer notar el efecto local en la entrada y salida de capilares, pero se descarta.

```
36 %=====  
37 % Número de Mach (solamente efecto local en entrada y salida de capilares)  
38 %=====  
39 %  
40 0.0  
41 %  
42 %=====  
43 % Propiedades del monolito (ver temperatura al final del fichero)  
44 %=====  
45 %  
46 1 % Hay cuatro modelos disponibles en monolito_2.m correspondientes a los del artículo de Sabr  
47 0.012767628893730 % Sección (área transversal) del monolito (para obtener número total de can  
48 0 % ;Hay hollín? No ==> 0; Sí ==>1  
49 0.00001783 % Viscosidad dinámica  
50 0.02534 % Conductividad térmica  
51 1005 % Calor específico a presión constante  
52 %  
53 %=====  
54 % Temperatura °C (propiedades del aire y del monolito)  
55 %=====  
56 %  
57 15 % Temperatura °C (-1 ==> se meten los valores de arriba directamente; distinto de -1 ==> se  
58 %  
59 %=====  
60 % Secciones de entrada/salida para cálculo de TL y adaptación de número de modos en cada conduc  
61 %=====  
62 0.0005227924334838775 % Sección del conducto de entrada  
63 0.0005227924334838775 % Sección del conducto de salida
```

Figura 54. Variable extra modificable en el caso del DPF: presencia de hollín

4.3.4 MODELO TRAMPA DE PARTÍCULAS CON ENTRADA Y SALIDA DESCENTRADAS

Para poder analizar la influencia de la entrada y salida descentradas es necesario generar un modelo como tal. El DIMM, nuevamente, facilita un código cuyos archivos “*top*” y “*xy*” ya tienen incluidos tales características. Por ende, tan solo hay que repetir lo mismo del apartado anterior y calcular. Es destacable el incremento de tiempo de cálculo al respecto de los computados anteriormente.



5 RESULTADOS

El procedimiento para validar, tal y como se ha explicado en anteriores ocasiones, está basado en obtener los resultados analíticos de Matlab con el script facilitado por el DIMM para luego cotejarlos con los numéricos de Comsol y Mathcad. De esta forma, si ambos son prácticamente iguales, el método de cálculo a través de elementos finitos queda validado.

De este modo, se pretende obtener una fiable y validada metodología de diseño de una línea de escape con dos monolitos con Comsol, ayudando así al DIMM a la hora de contrastar los resultados que ellos obtengan a través de los scripts futuros que realicen en Matlab donde contemplen dos monolitos.

A modo recordatorio, hay tres grandes hitos a superar para validar la metodología empleada final:

- **Monolito catalizador**
- **Monolito trampa de partículas**
- **Monolitos catalizador y trampa de partículas**

También hay que añadir que la modelización llevada a cabo en este Trabajo Fin de Máster se ha hecho a una temperatura de 15°C (hipótesis de flujo frío), algo frecuente en la bibliografía ya que así resulta más sencillo llevar a cabo la validación experimental en laboratorio, si así fuere necesario.

Por último, antes de comenzar a mostrar resultados, se quiere destacar que, pese a que cada modelo tiene una gran cantidad de variables que pueden ser modificadas, tan solo se van a mostrar unas determinadas configuraciones de cada una, contribuyendo así a la validación y explicación de lo obtenido, para no hacer eterno este apartado.

5.1 LÍNEAS DE ESCAPE CON MONOLITO DE CATALIZADOR

5.1.1 CATALIZADOR CON GEOMETRÍA CIRCULAR

La obtención de los datos validados con Matlab para este análisis se realiza con los archivos vistos en el apartado 4.3.1, pues consta de una geometría puramente circular y se puede utilizar un modelo axisimétrico de cálculo.

Acto seguido, se muestran los resultados obtenidos para Matlab y Comsol con las características de: resistividad 750 rayl/m y cámaras de igual dimensión ($L_b = L_d$).

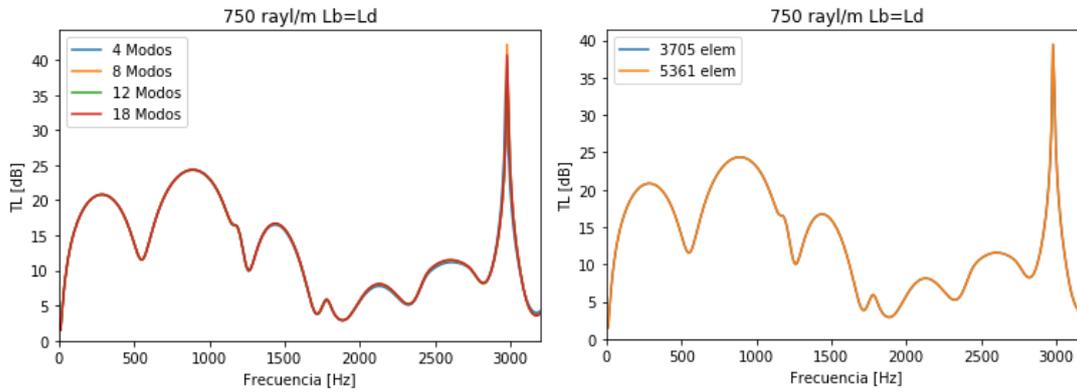


Figura 55. Resultados de Matlab y Comsol 750 rayl/m con cámaras iguales

Comparando ambas gráficas de forma superpuesta con el máximo número de modos y la mayor cantidad de elementos, se puede vislumbrar que la similitud en éstas es prácticamente perfecta.

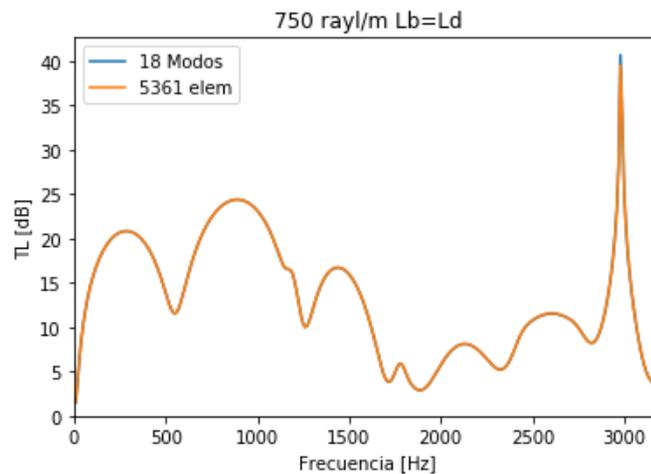


Figura 56. Comparación Matlab vs COMSOL en 750 rayl/m y cámaras iguales

También se ha hecho el estudio mismo tipo de estudio, pero con las condiciones de resistividad a 3000 rayl/m y cámaras de diferente longitud ($L_b \neq L_d$).

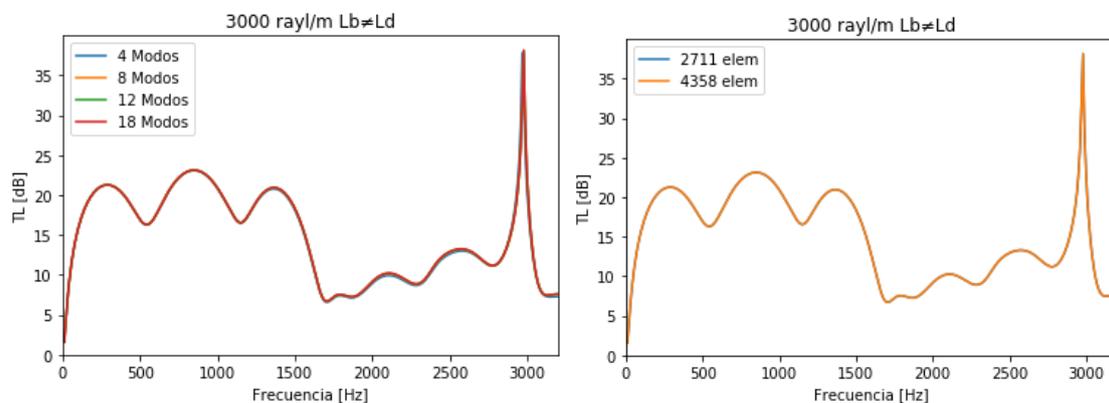


Figura 57. Resultados de Matlab y Comsol a 3000 rayl/m con cámaras diferentes

Nuevamente, haciendo la comparación entre el mayor número de modos y elementos, se observa una afinidad asombrosa.

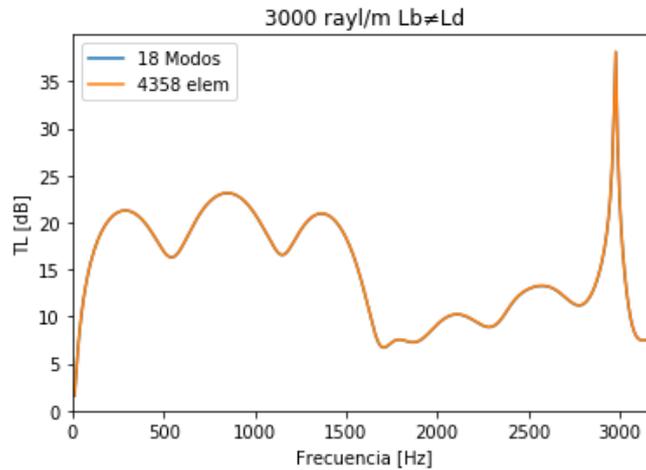


Figura 58. Comparación de Matlab vs COMSOL 3000 rayl/m con cámaras diferentes

Por consiguiente, se considera que el modelo en Comsol queda validado.

5.1.1.1 INFLUENCIA DE LA RESISTIVIDAD Y LONGITUD DE LAS CÁMARAS EN UNA GEOMETRÍA CIRCULAR

Equiparando los resultados obtenidos de ambas configuraciones, la de 750 rayl/m con cámaras iguales y la de 3000 rayl/m con cámaras diferentes, se puede ver que a inferior resistividad la TL tiende a ser menor en todo el rango de frecuencias, salvo a muy bajas (0-250 Hz), donde parece estabilizarse más. Respecto a la longitud, la de cámaras diferentes denota un mejor comportamiento pues entre valles hay un menor delta de TL, lo cual es interesante, ya que, normalmente, es sensato mantener un nivel de TL constante. Esto se puede observar en los 500Hz, donde el pico de bajada entre modelos es perceptiblemente disímil.

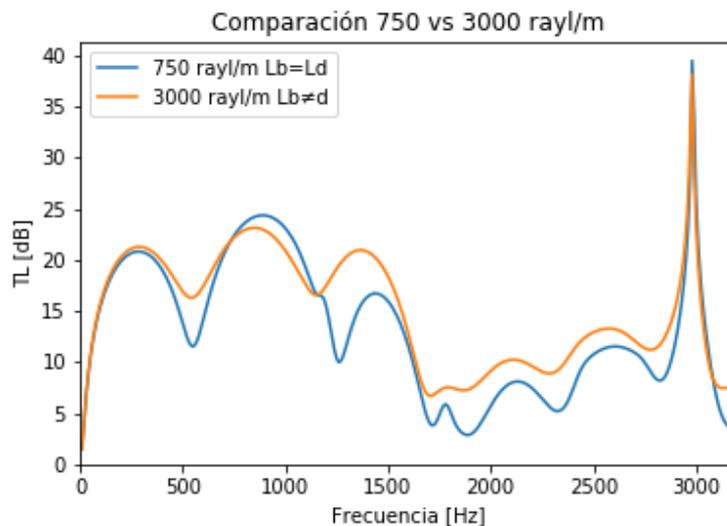


Figura 59. Resultado de la comparación 750 vs 3000 rayl/m

5.1.2 CATALIZADOR DE SECCIÓ TRANSVERSAL RECTANGULAR CON CHAFLÁN

Para este modelo se han usado los archivos del apartado 4.3.2, con los archivos “top” y “xy” pertenecientes a la geometría de sección transversal rectangular con chaflán.

En esta ocasión, el modelo analítico de Matlab presenta un mallado en la entrada y salida de estas cámaras, de modo que se realiza una superposición modal y calcula para el resto de la sección. Es interesante ver cómo queda destacada la zona de los cilindros de entrada y salida respecto a las cámaras Lb y Ld, pues se trata de dos procesos de mallado diferentes:

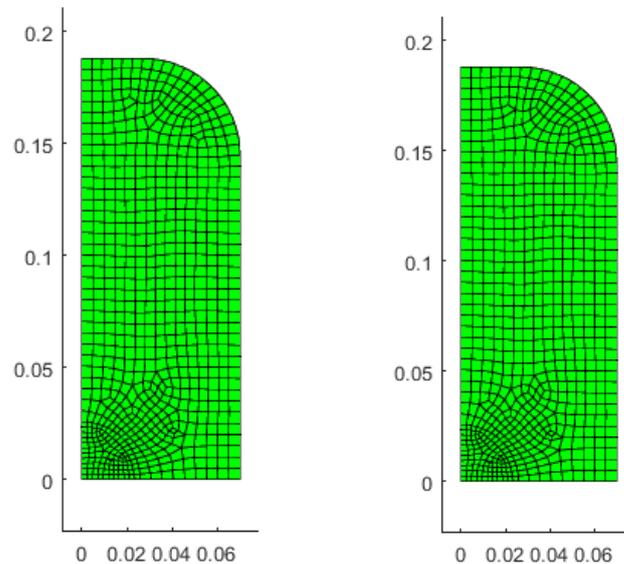


Figura 60. Malla en Matlab de la entrada y salida, Lb y Ld, respectivamente. Caso de geometría de sección rectangular con chaflán

En cuanto al modelo mallado en COMSOL®, su ejemplo sería como la siguiente figura muestra:

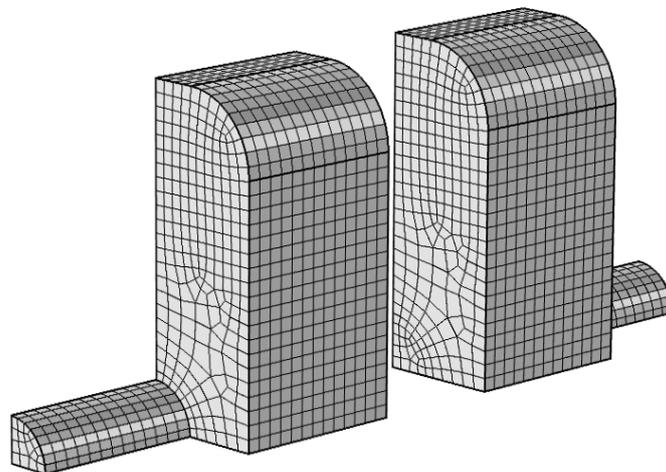


Figura 61. Malla de la geometría de sección rectangular con chaflán

Una vez más, se muestran los resultados obtenidos para Matlab y Comsol con las características de resistividad 750 rayl/m y cámaras de igual dimensión ($L_b = L_d$).

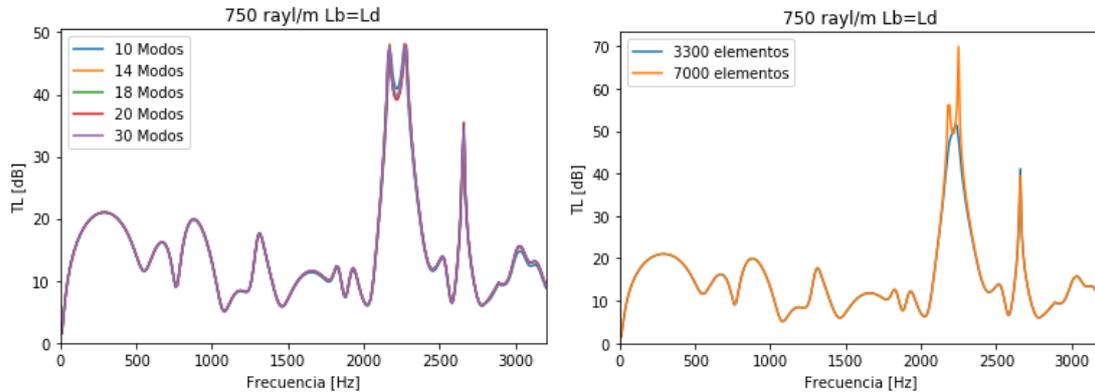


Figura 62. Resultado de modos en Matlab y COMSOL a 750 rayl/m con cámaras iguales

Nuevamente se ven resultados muy parejos. Sin embargo, entre los rangos de 2000 a 2500 Hz se puede ver una ligera diferencia entre los picos observados. Esto es debido a que en el enfoque analítico (Matlab) estos cambios más abruptos de la función son atenuados, mientras que en el numérico (Comsol) se pueden dar puntos de computación especiales llamados “singularidades”, hecho que ocurre más comúnmente en los cálculos estructurales, donde es más sencillo ver un “concentrador de tensiones”. Entre el rango de 2500 a 2700 Hz ocurre el mismo efecto.

Quizá con una simulación con mayor cantidad de elementos se podría vislumbrar una mejor correlación en esas zonas, pues como se puede apreciar en la figura anterior, con 3300 elementos parece no ser suficiente para modelar el comportamiento de la onda.

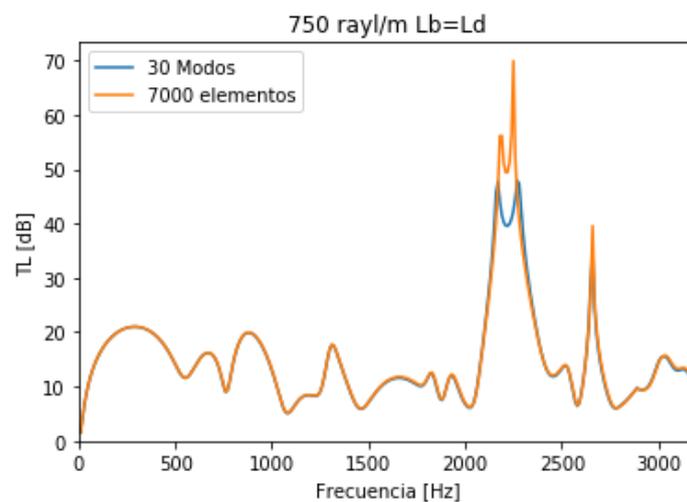


Figura 63. Comparación de Matlab vs COMSOL 750 rayl/m y cámaras iguales para geometría de sección transversal rectangular con chaflán

De nuevo, se ha elaborado el estudio con resistividad a 3000 rayl/m y cámaras de diferente longitud ($L_b \neq L_d$).

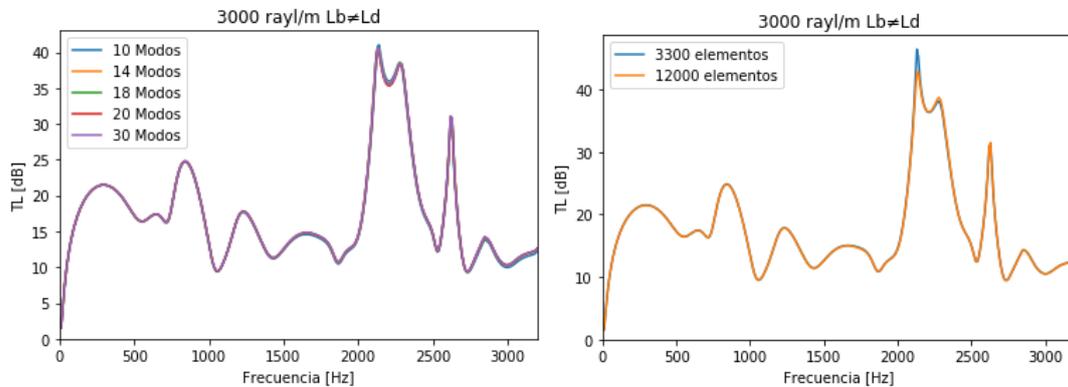


Figura 64. Resultado de modos en Matlab y COMSOL a 3000 rayl/m y cámaras diferentes

En la imagen siguiente se puede apreciar cómo de iguales llegan a ser los modelos de Matlab® y Comsol®.

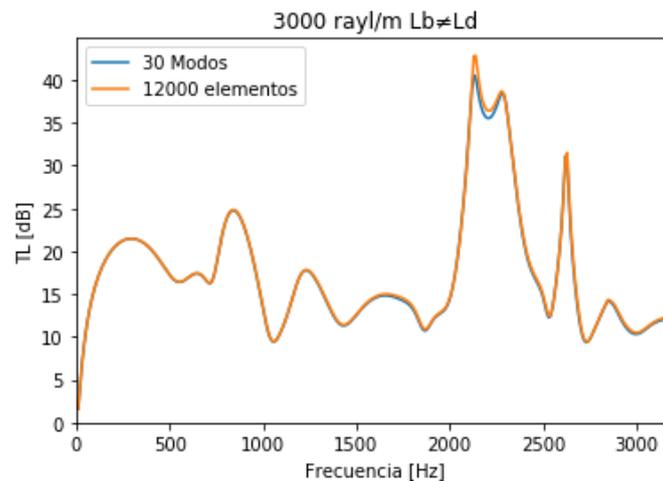


Figura 65. Comparación Matlab vs COMSOL 3000 rayl/m con cámaras diferentes

Analizando las exactitudes que ambas configuraciones tienen con sus respectivos modelos de validación, queda determinado que éstas son válidas.

5.1.2.1 INFLUENCIA DE LA RESISTIVIDAD Y LONGITUD DE LAS CÁMARAS EN UNA GEOMETRÍA DE SECCIÓN RECTANGULAR CON CHAFLÁN

En la siguiente figura, se muestra la comparación entre diferentes resistividades e influencia de tener cámaras de entrada y salida de diferentes longitudes. A diferencia de la geometría circular, en esta ocasión el hecho de tener diferentes longitudes muestra una TL más atenuada y menos ruidosa, además de mostrar que los picos que ocurren van desfasados un ligeramente respecto al caso de cámaras de igual longitud.

En cuanto a la influencia de la resistividad, se capta otra vez que a mayor resistividad mayor TL es atenuada de forma general en todo el rango de frecuencias.

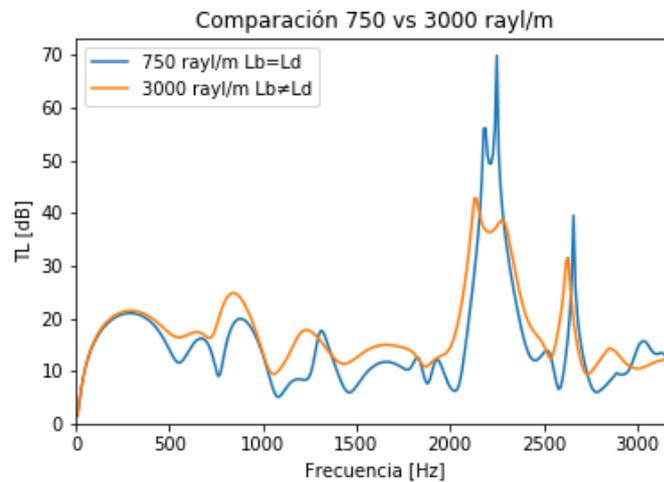


Figura 66. Comparación 750 vs 3000 rayl/m para la geometría de sección rectangular con chaflán

5.1.3 INFLUENCIA DE LA GEOMETRÍA EN UN MONOLITO DE CATALIZADOR

Una vez se han obtenido resultados en modelos de diferente geometría, se puede hacer una comparativa para ver cómo ésta afecta a la TL de un monolito catalizador.

Para el caso de los 750 rayl/m e iguales longitudes de cámara, en los rangos de 0 a 550Hz la TL es prácticamente igual, no obstante, a partir de ese punto hay un claro ejemplo influenciado por la geometría de las cámaras. Por un lado, la circular tiene como tres saltos de TL hasta que decae durante las frecuencias 1700-2700 Hz. Una vez se acerca a los 3000Hz, vuelve a despuntar. Por otro lado, en la geometría de sección transversal rectangular con chaflán se aprecia una irregularidad continua hasta los rangos de 2000-2700 Hz, donde la TL alcanza valores mucho más altos en comparación con la geometría circular.

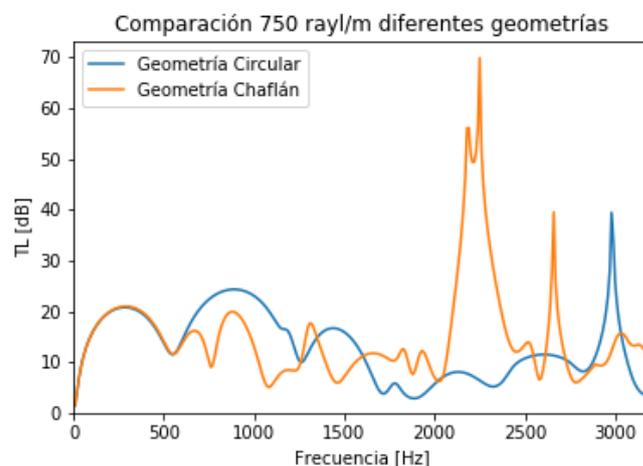


Figura 67. Comparación Circular vs Chaflán 750 rayl/m con cámaras de igual longitud

Respecto a las geometrías con resistividad 3000 rayl/m con longitudes de cámara diferentes, el régimen de comportamiento es bastante parecido al caso anterior.

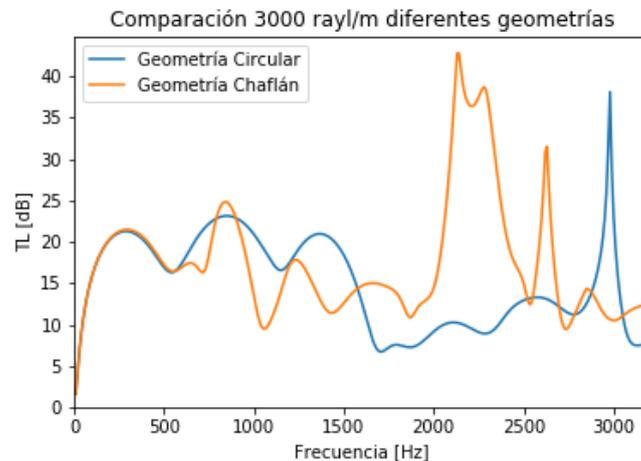


Figura 68. Comparación Circular vs Chaflán 3000 rayl/m con cámaras diferentes

A modo de conclusión, en la geometría de sección rectangular con chaflán hay una dimensión transversal muy larga que favorece la propagación de modos de orden superior (no planos) a frecuencias menores en comparación con la circular, produciendo un efecto desfavorable en la TL, que es lo que se puede apreciar en la comparativa entre modelos.

5.2 LÍNEAS DE ESCAPE CON MONOLITO DE TRAMPA DE PARTÍCULAS

5.2.1 TRAMPA DE PARTÍCULAS CON GEOMETRÍA CIRCULAR Y LONGITUDES DE CÁMARA DIFERENTES

La obtención de los datos validados para esta ocasión se realiza con los archivos del apartado 4.3.3, ya que se emplean ambos tipos de geometría y el monolito con trampa de partículas.

Además de las variables modificables anteriores como el número de modos o longitud de las cámaras, hay otras dos propiedades que se pueden elegir: el número de Mach (tomado como 0 para anular el efecto local en entrada y salida de los capilares) y si hay, o no, hollín en el monolito.

5.2.1.1 GEOMETRÍA CIRCULAR

La malla calculada por Matlab® para la entrada y salida es igual tanto para la entrada como para la salida, mejorando los resultados finales.

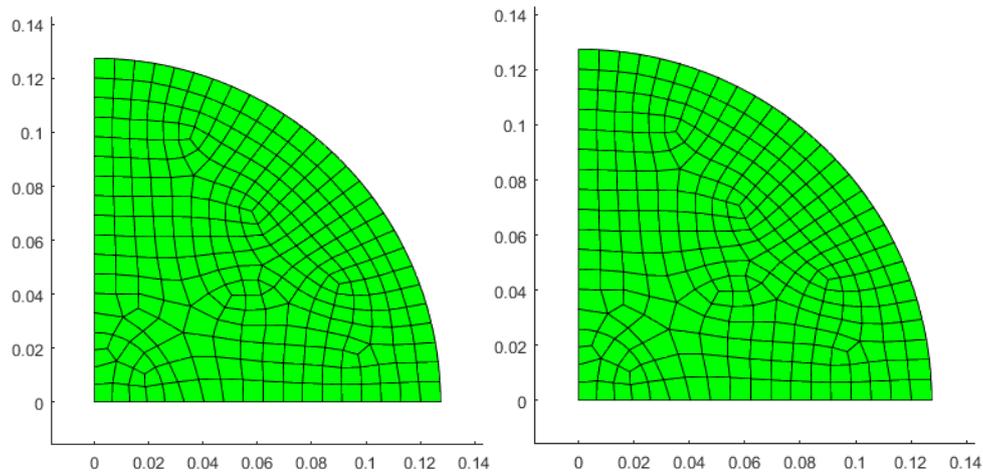


Figura 69. Malla del modelo de geometría circular en el Inlet y Outlet de las cámaras

En cuanto a la malla en generada en Comsol, ésta queda de la siguiente forma:

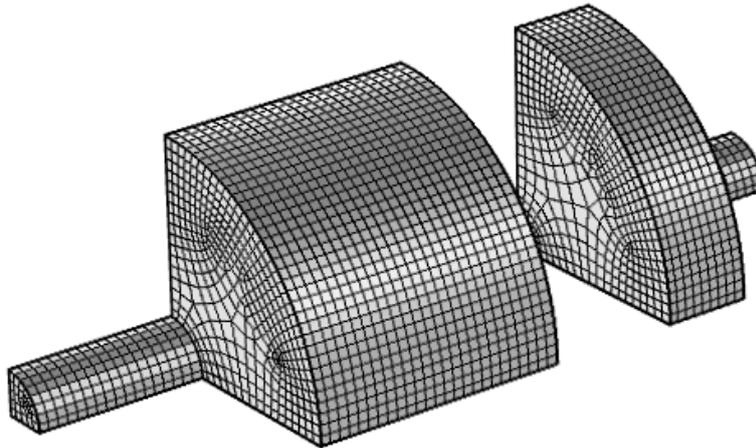


Figura 70. Ejemplo de mallado en COMSOL de geometría circular con longitud de cámaras diferente

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para Matlab y Comsol con las características de cámaras con longitudes diferentes y sin presencia de hollín:

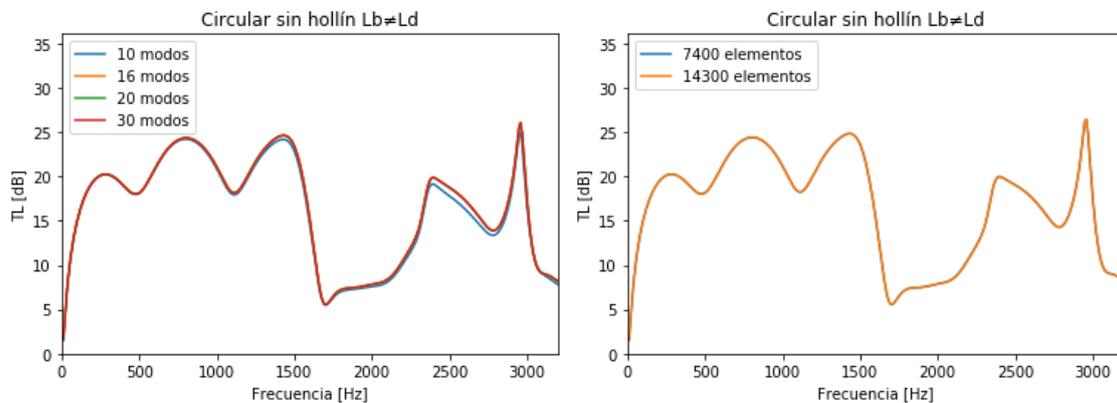


Figura 71. Resultado de la TL en Matlab y Comsol para geometría circular de cámaras diferentes sin hollín

Comparando ambas gráficas de forma superpuesta, se aprecia una gran similitud. Sí que es cierto que en el rango de la TL entre 2300 y 2750 Hz hay cierta diferencia en ambas líneas, pero esto no supone un gran problema pues se considera que el causante es que la malla debería haber sido más fina. Por consiguiente, queda validado.

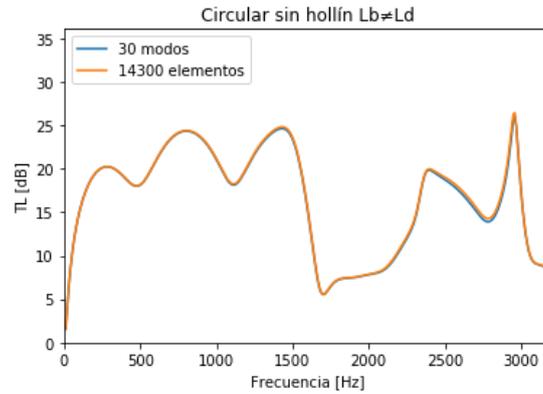


Figura 72. Comparación Matlab vs Comsol con geometría circular sin hollín y cámaras diferentes

En el siguiente modelo es prácticamente igual, salvo que ahora sí que hay hollín:

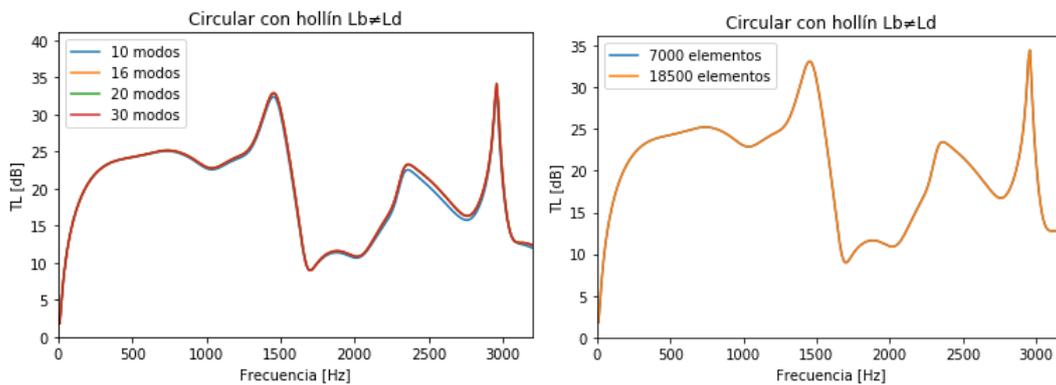


Figura 73. Resultados en Matlab y Comsol con geometría circular con hollín y cámaras diferentes

La siguiente gráfica posee las mismas características que el caso anterior, de modo que queda, otra vez, validado.

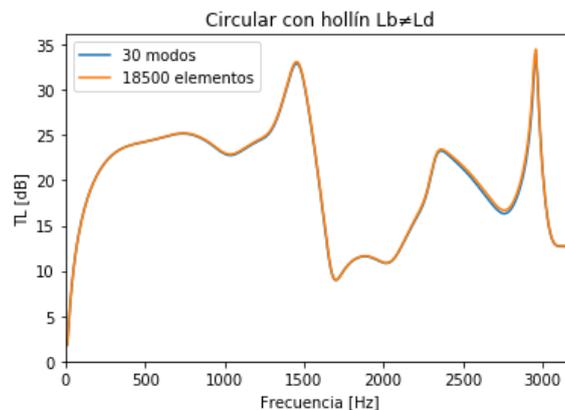


Figura 74. Comparación de Matlab vs COMSOL de geometría circular con hollín

5.2.1.1.1 COMPARACIÓN SIN HOLLÍN VS CON HOLLÍN

A modo de aporte final, es interesante destacar la relevancia de la presencia del hollín, pues éste reduce la permeabilidad de las paredes porosas, provocando una mayor disipación de energía acústica y generando un aumento generalizado de la TL. Igualmente, la regeneración periódica del DPF (tal y como se explica en 3.3) hace que dicho efecto desaparezca y se tengan unas condiciones relativamente similares a las iniciales, es decir, sin hollín.

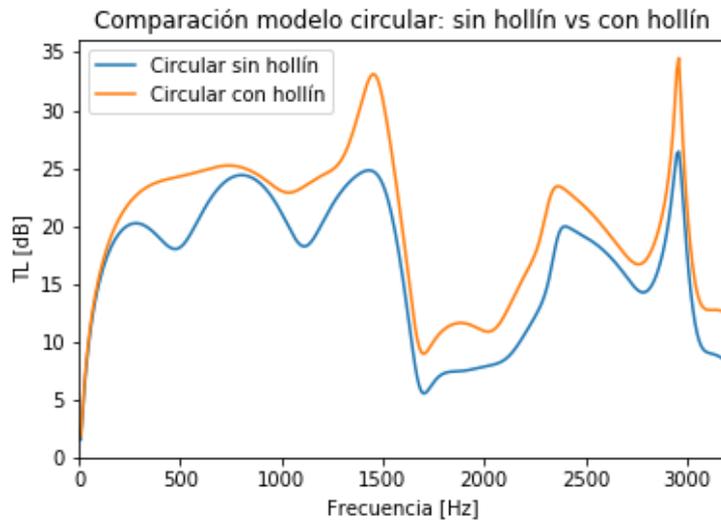


Figura 75. Comparación de geometría circular: sin hollín vs con hollín

5.2.1.2 GEOMETRÍA DE SECCIÓN RECTANGULAR CON CHAFLÁN

La malla calculada en Matlab es idéntica a la vista en *Figura 60*. *Malla en Matlab de la entrada y salida, L_b y L_d , respectivamente*, del mismo modo que la generada en Comsol en *Figura 61*. *Malla de la geometría de sección rectangular con chaflán*. En esta ocasión, las características del modelo son tener cámaras de igual longitud y sin presencia de hollín:

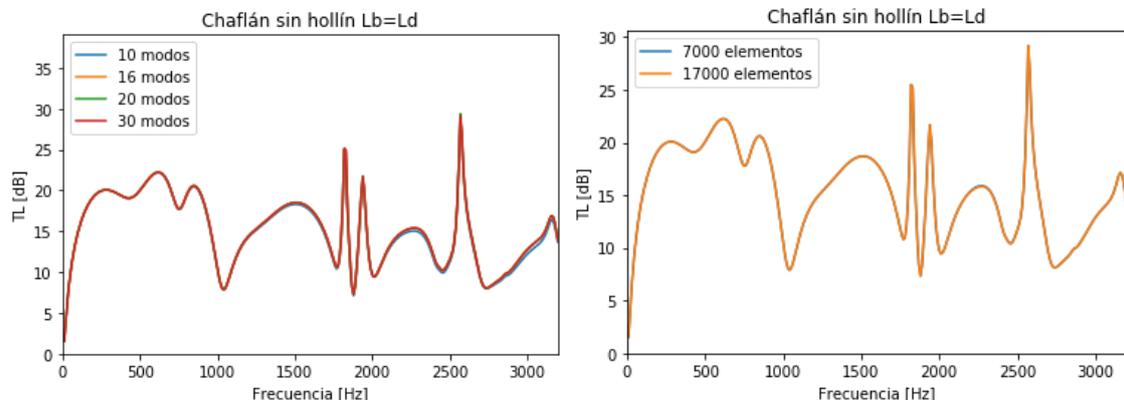


Figura 76. Resultados Matlab y COMSOL de geometría de sección rectangular con chaflán, sin hollín y de cámaras de longitud iguales, respectivamente

Comparando ambos modelos, al igual que en las ocasiones anteriores, la semejanza entre ambas líneas del gráfico es muy elevada. No obstante, entre los rangos de 2000 y 2500 Hz hay una ligera disconformidad, habiendo diferencias de ± 1 dB, pero nuevamente se atribuye a que la malla podría haber estado más fina.

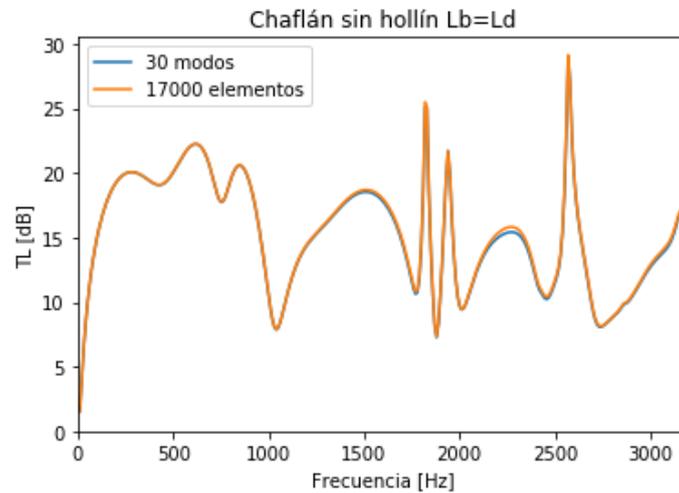


Figura 77. Comparación Matlab vs COMSOL sin hollín

Realizando el mismo ejercicio, pero con la presencia de hollín y manteniendo la característica de las longitudes de cámara iguales, se obtiene lo siguiente:

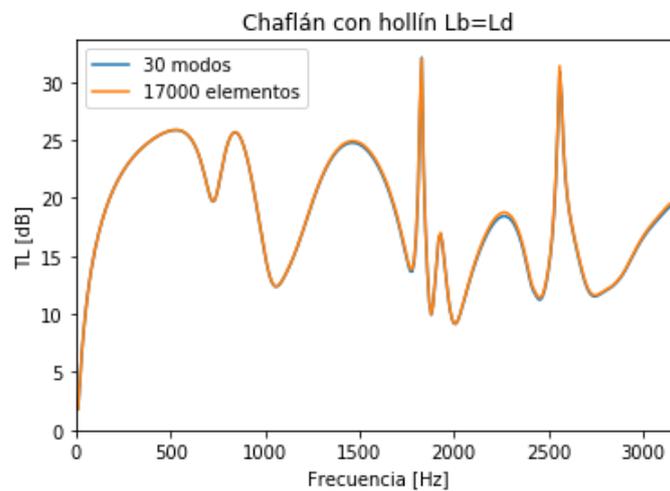


Figura 78. Comparación Matlab vs COMSOL geometría transversal rectangular con chaflán con hollín y $L_b = L_d$

La similitud entre ambos resultados es nuevamente abrumadoramente alta y, por consiguiente, queda el modelo validado.

5.2.2 DIFERENCIAS ENTRE MONOLITOS DE DPF Y CATALIZADOR PARA LA GEOMETRÍA DE SECCIÓN TRANSVERSAL RECTANGULAR CON CHAFLÁN

Dado que se tienen ejemplos de cálculo para la geometría del chaflán con monolito catalizador y DPF, es interesante ver el efecto que tienen y sus diferencias.

Por un lado, comparando ambos DPF con el catalizador a 750 rayl/m, en los rangos de 0 a 1000 Hz es donde tanto la tendencia como la TL conseguida es ciertamente similar. No obstante, cuando la tendencia es alcista o bajista, ambos monolitos suelen parecerse más. A pesar de ello, el DPF tiende a mantener una TL más alta por norma general, mientras que el catalizador se lleva el pico de TL generado en la comparación en los rangos de 2000 a 2500 Hz.

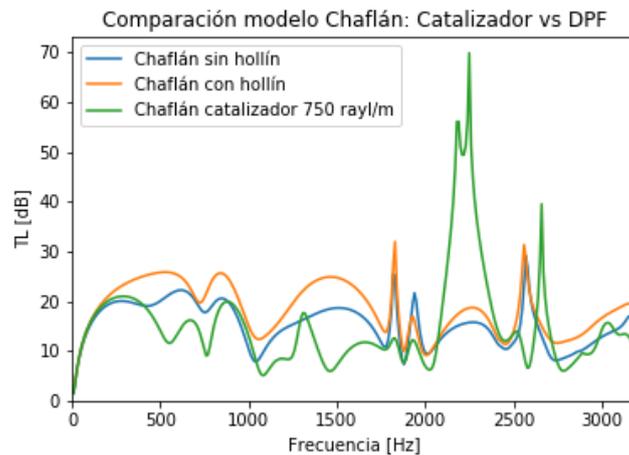


Figura 79. Comparativa modelo chaflán: catalizador 750 rayl/m vs DPF

Si se compara con el catalizador a 3000 rayl/m, se vuelven a notar las mismas tendencias que con el caso anterior. Sin embargo, es posible vislumbrar mayor similitud en el comportamiento entre diferentes monolitos. De nuevo, el pico de TL se lo lleva el catalizador.

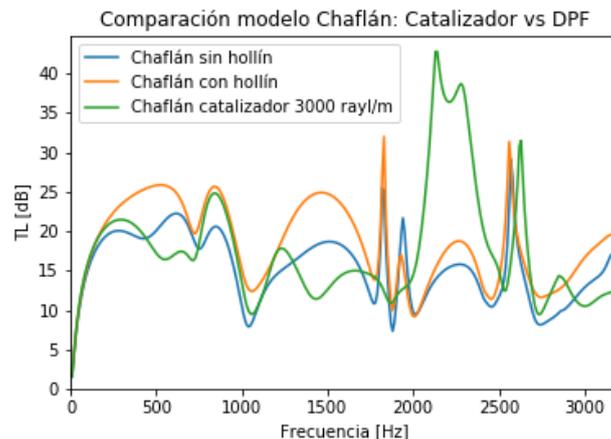


Figura 80. Comparativa modelo chaflán: catalizador 3000 rayl/m vs DPF

5.3 LÍNEA DE ESCAPE CON CONDUCTOS DESCENTRADOS CON DPF

Se quiere analizar también la influencia que tienen las salidas descentradas con respecto a las entradas en los sistemas de escape tanto para la geometría circular como para la de sección rectangular con chaflán. Para esto se necesitaba una modificación de los

scripts utilizados hasta el momento, por lo que en esta ocasión se usarán los del apartado 4.3.4.

5.3.1 GEOMETRÍA CIRCULAR

La distancia del descentrado es de 0.08m con respecto al eje central. Está calculada para que la salida caiga sobre la línea nodal del primer modo radial de orden superior (para tener presión nula). Este hecho permite mantener un nivel razonable de TL al haber ubicado el conducto de salida en una zona de baja presión acústica. Igualmente, para la geometría circular hay una fórmula que calcula la distancia de descentrado dando el radio de la cámara en cuestión:

	$\text{Descentrado} = 0.6276 * R$	(4)
--	-----------------------------------	-----

En esta ocasión el tiempo de cálculo es bastante más amplio, pues la malla generada en Matlab® está compuesta de elementos cuadriláteros (8 nodos) y algunos triangulares (6 nodos). El tamaño promedio de elemento es de 0.003m en la zona correspondiente a los conductos de salida-entrada y de 0.006m en la sección de la cámara. Es realmente una malla bastante refinada, aunque algo menos que las anteriormente vistas en apartados anteriores para no tardar tanto en tiempo de cálculo.

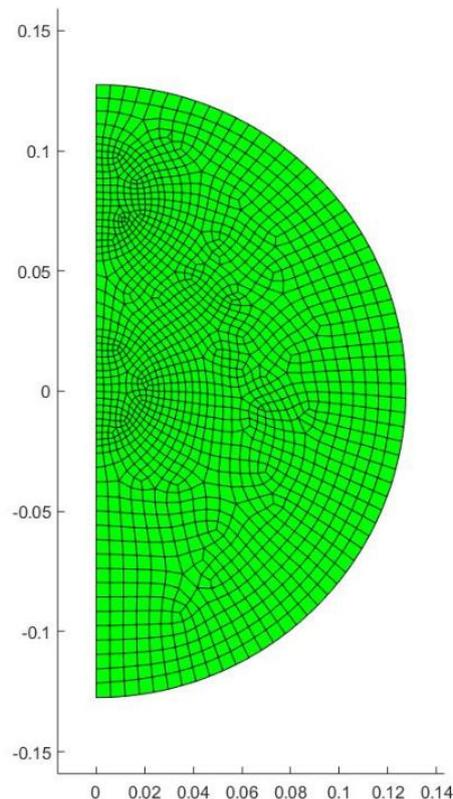


Figura 81. Malla Matlab geometría circular descentrada

La malla de Comsol quedaría de la siguiente forma:

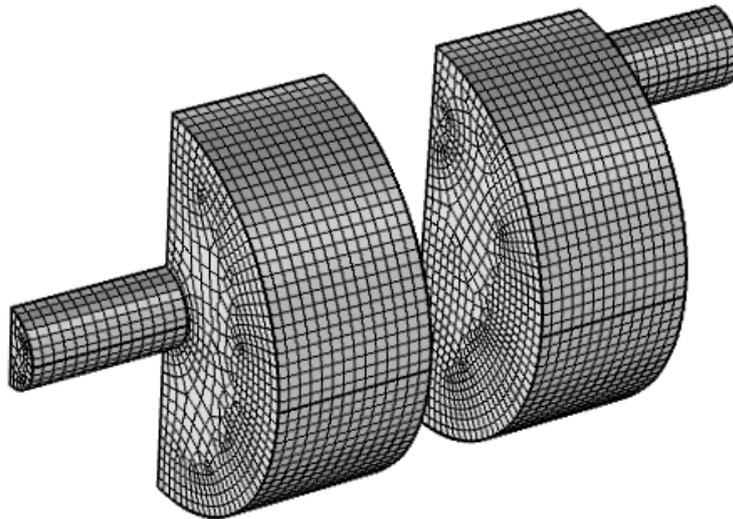


Figura 82. Malla geometría circular con entrada y salida descentrada con cámaras de igual longitud en Comsol

En este modelo, además de la característica principal de descentrado, se ha tenido en cuenta la ausencia de hollín. A continuación, se muestran los resultados para los casos con cámaras de igual y de diferente longitud:

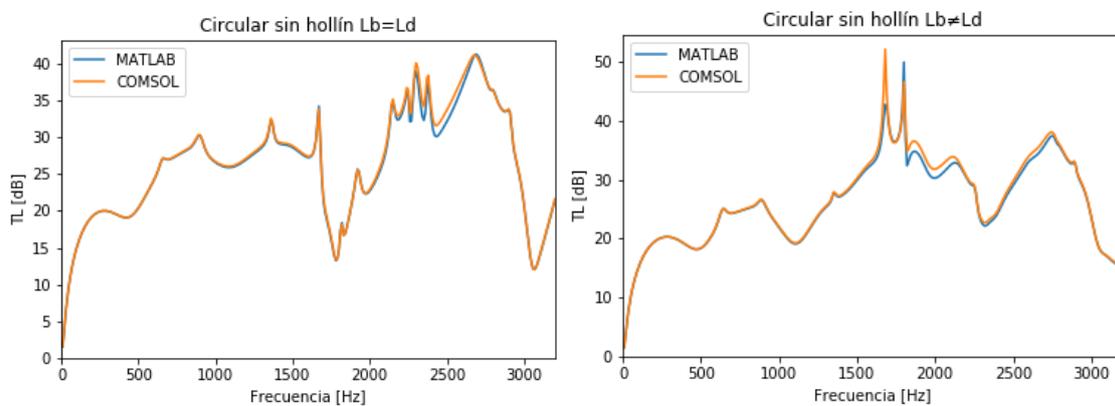


Figura 83. Resultados geometría circular descentrada, sin hollín, con cámaras de igual y diferente longitud, respectivamente.

En ambos casos la similitud es espléndida. No obstante, en el caso de cámaras iguales, se observa que entre 2300-2700 Hz hay cierta disconformidad, del mismo modo que en la de cámaras diferentes se aprecia entre los rangos 1700-2000 Hz. El motivo puede ser la malla, que para frecuencias más altas quizá es interesante que ésta sea más fina, pues ha de detectar mejor la onda.

En la geometría circular con hollín se aprecia el mismo tipo de comportamiento que el caso sin hollín. Incluso se vuelve a ver que la TL de cada caso vuelve a subir otra vez debido a la pérdida de permeabilidad que la generación de capas de hollín en el monolito genera.

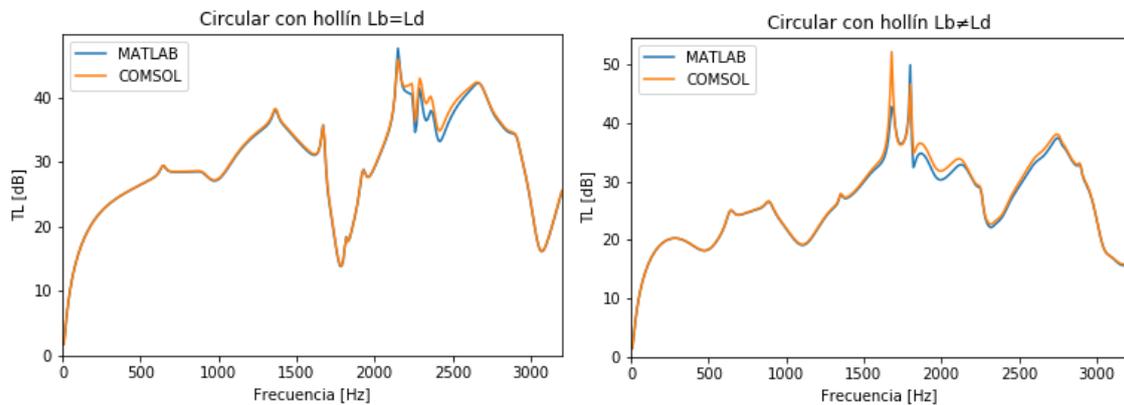


Figura 84. Resultados geometría circular descentrada, con hollín, con cámaras de igual y diferente longitud, respectivamente

5.3.1.1 CENTRADO VS DESCENTRADO PARA GEOMETRÍA CIRCULAR

Ahora bien, para ver el efecto del centrado/descentrado en la geometría circular, se decide ver el enfoque para longitudes de cámara diferentes ($L_b \neq L_d$).

En esta comparativa hay varios puntos destacables interesantes:

- De 0 a 1250 Hz la TL es prácticamente igual, por lo que el efecto del descentrado empieza a surtir efecto a partir de medias frecuencias
- Desde los 1500 a 2300 Hz se ve un comportamiento totalmente diferente. Mientras que el descentrado sube hasta llegar a TLs máximas, el centrado obtiene mínimos totales de todo el rango de frecuencias.
- Entre los 2400 y los 3000 Hz se vuelve a distinguir una respuesta antagónica entre geometrías con salida diferente.

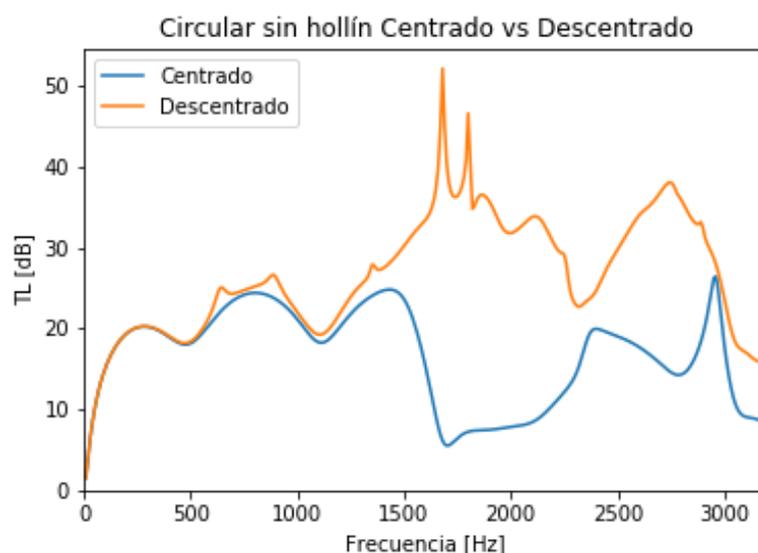


Figura 85. Influencia de la centralidad de la relación entrada-salida en conductos para cámaras de diferente longitud



A modo de conclusión, la geometría descentrada mantiene a 15°C una TL equiparable respecto con la centrada en rangos de frecuencia entre 0 y 1250 Hz. Sin embargo, hay una gran diferencia a la hora de confrontar las TLs en rangos de media y alta frecuencia, pues la descentrada tiene picos y tendencias de mucha mayor TL que la centrada, lo que puede ser elegido por el/la diseñador/ora pertinente.

5.3.2 GEOMETRÍA DE SECCIÓN TRANSVERSAL RECTANGULAR CON CHAFLÁN

La distancia del descentrado es de 0.0913 m con respecto al eje central. Está calculada para que la salida caiga sobre la línea nodal del segundo modo de orden superior (para tener presión nula). Este hecho permite mantener un nivel razonable de TL al haber ubicado el conducto de salida en una zona de baja presión acústica¹⁰. Igualmente, para la geometría circular hay una fórmula que calcula la distancia de descentrado dando el radio de la cámara en cuestión:

En esta ocasión, el coste computacional de Matlab® vuelve a ser bastante alto. La malla está compuesta por elementos cuadriláteros (8 nodos) y triangulares (6 nodos) de segundo orden. El tamaño promedio de los elementos cuadriláteros es de 0.0025 m en la sección correspondiente a los conductos y de 0.005 m en la sección correspondiente a la cámara. Nuevamente, es una malla bastante refinada.

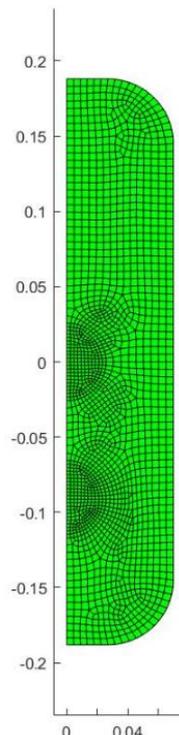


Figura 86. Malla Matlab geometría chaflán descentrada

¹⁰ Información facilitada por el director Francisco Denia

En cuanto al mallado en Comsol®, similar a lo siguiente debería aparecer:

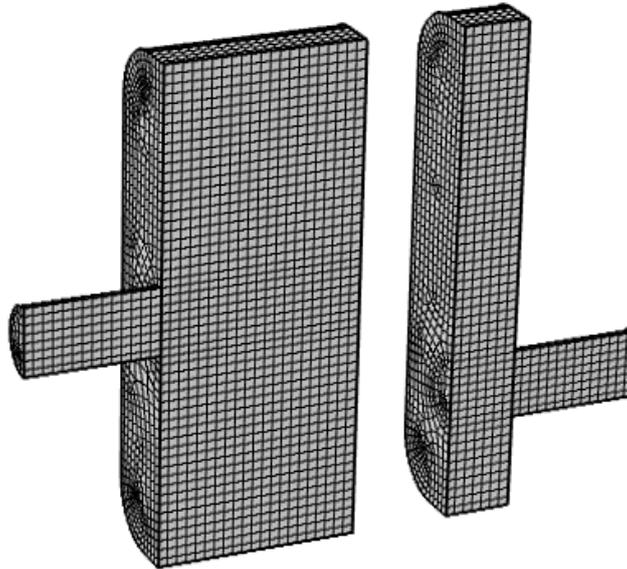


Figura 87. Malla de geometría de sección rectangular con chaflán descentrada en Comsol, con longitudes de cámara diferentes

A continuación, se puede ver otra vez la gran semejanza entre modelos de Matlab y Comsol, aunque es cierto que a partir de los 2000 Hz se pueden vislumbrar algunas disconformidades entre modelos de ± 2 dB, pero nada raro con respecto comparativas anteriores.

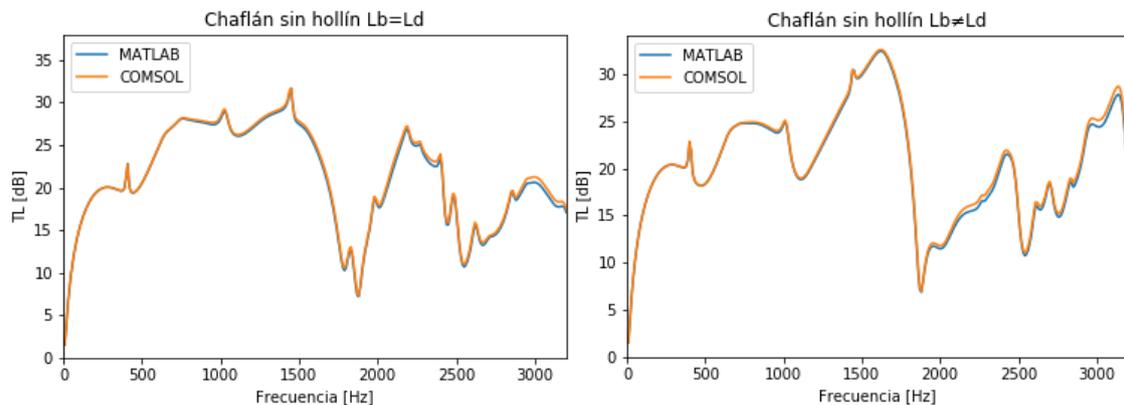


Figura 88. Resultados geometría chaflán sin hollín, con cámaras de igual y diferente longitud, respectivamente.

Como visto en casos anteriores, las TL con la capa de hollín suben por norma general en todo el rango de frecuencias. Sin embargo, es notorio ver cómo en esta ocasión, la geometría de cámaras diferentes es prácticamente la misma TL mientras que la de cámaras iguales en el rango de 0 a 1250Hz varía notoriamente la tendencia con respecto a su homónima en el caso de sin hollín.

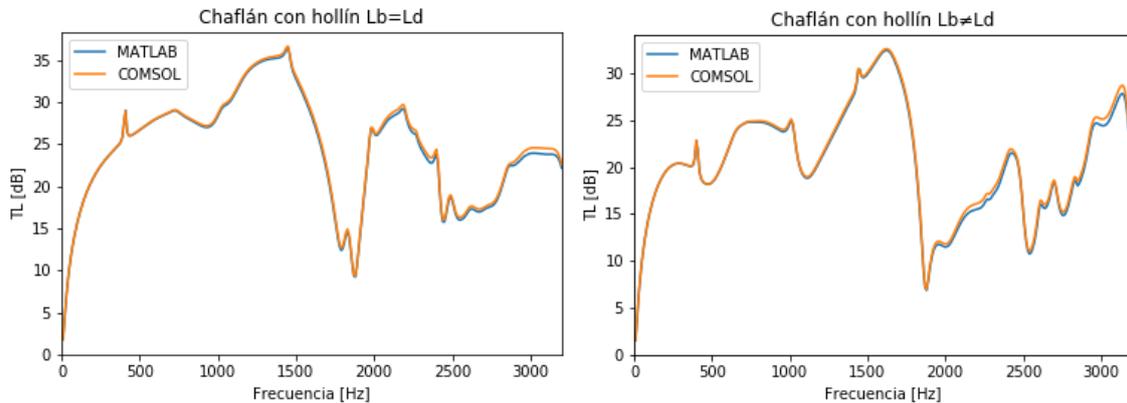


Figura 89. Resultados geometría chamflán con hollín, con cámaras de igual y diferente longitud, respectivamente.

Finalmente, se demuestra que indistintamente de las variables que cambien, inclusive la geometría, el modelo en Comsol presenta unos resultados fidedignos.

5.3.2.1 CENTRADO VS DESCENTRADO PARA GEOMETRÍA DE SECCIÓN TRANSVERSAL RECTANGULAR CON CHAFLÁN

Para ver los efectos del centrado/descentrado en esta ocasión, se han escogido los casos con hollín y de cámaras de igual longitud ($L_b = L_d$).

De la imagen se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- Comportamiento similar a bajas frecuencias (de 0 a 350 Hz).
- Comparten bajada cerca de los 1800 Hz. Ambas líneas mostradas comparten la misma pendiente tanto para la bajada como para la subida en esa frecuencia.
- El comportamiento general es bastante diferente, aunque mucho más fluctuante para la salida centrada que la descentrada.

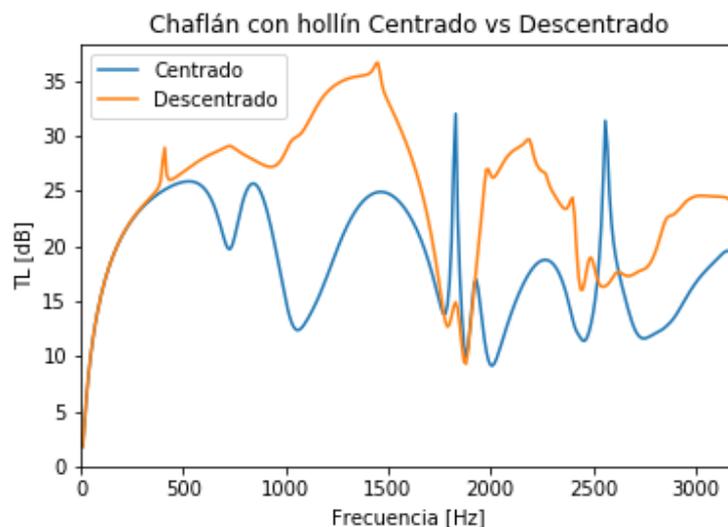


Figura 90. Comparativa geometría chamflán con hollín centrado vs descentrado. Cámaras iguales.



5.4 LÍNEA DE ESCAPE CON DOS MONOLITOS: CATALIZADOR Y TRAMPA DE PARTÍCULAS

Nuevamente, es interesante destacar que toda la validación que ha habido en anteriores apartados ha sido para llegar a este punto, en donde se va a desarrollar una herramienta de cálculo con dos monolitos para el DIMM, cuya intención es modelar el comportamiento analítico que éste tiene. De este modo, tienen un utensilio para contrastar resultados que obtengan entre los diferentes enfoques.

Para todos los casos en este apartado, se tienen en cuenta las siguientes premisas:

- Monolito catalizador con 3000 rayl/m
- Monolito DPF sin hollín
- Cámaras de igual longitud ($L_b=L_d$)

5.4.1 GEOMETRÍA CIRCULAR

Los modelos geométricos actuales se diferencian en gran medida de los anteriores por el añadido de la cámara intermedia para poder hacer la fase entre catalizador-cámara-DPF.

A continuación, se muestra por un lado la geometría circular centrada desarrollada en Comsol:

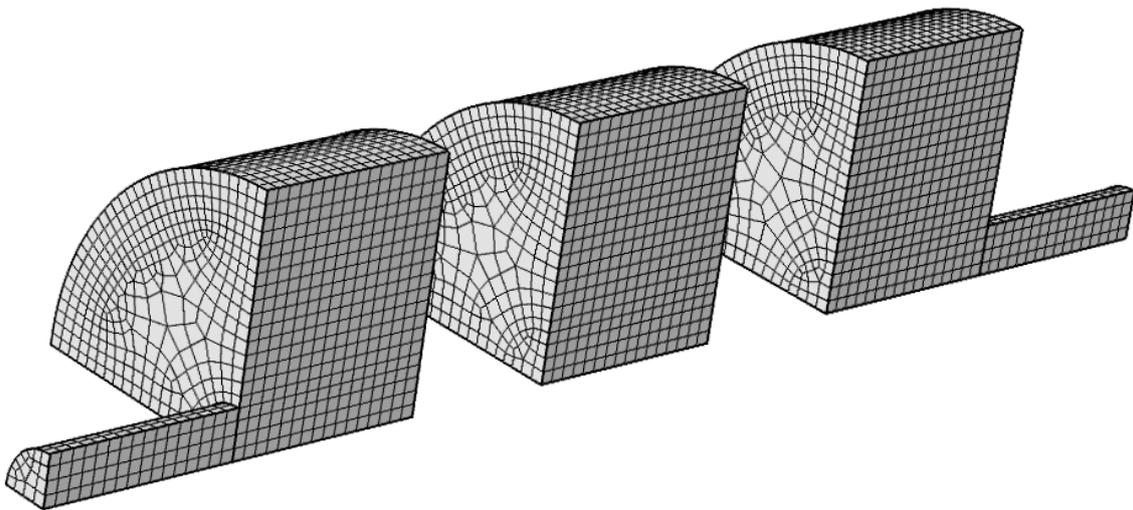


Figura 91. Malla en Comsol de geometría circular centrada con dos monolitos

Y, por otro lado, se muestra el resultado de la geometría circular descentrada mallada con el mismo software:

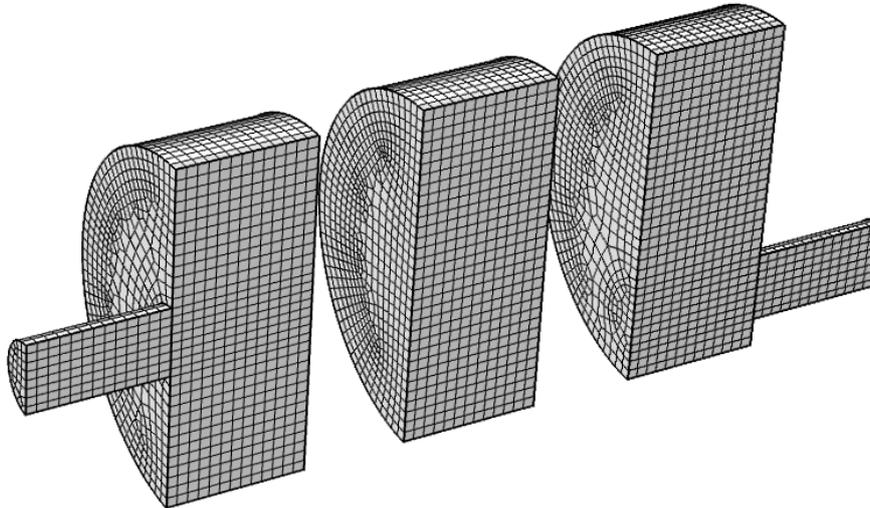


Figura 92. Malla en Comol de geometría circular descentrada con dos monolitos

Resolviendo el problema acústico, la TL de la línea de escape de salida centrada mantiene una tendencia al alza hasta llegar a los 1600 Hz, donde sufre una caída abismal hasta los 1750 Hz, donde vuelve a remontar poco a poco. Respecto a la línea descentrada, se ve una TL permanentemente al alza hasta llegar a muy alta frecuencia, donde hay una caída de tendencia.

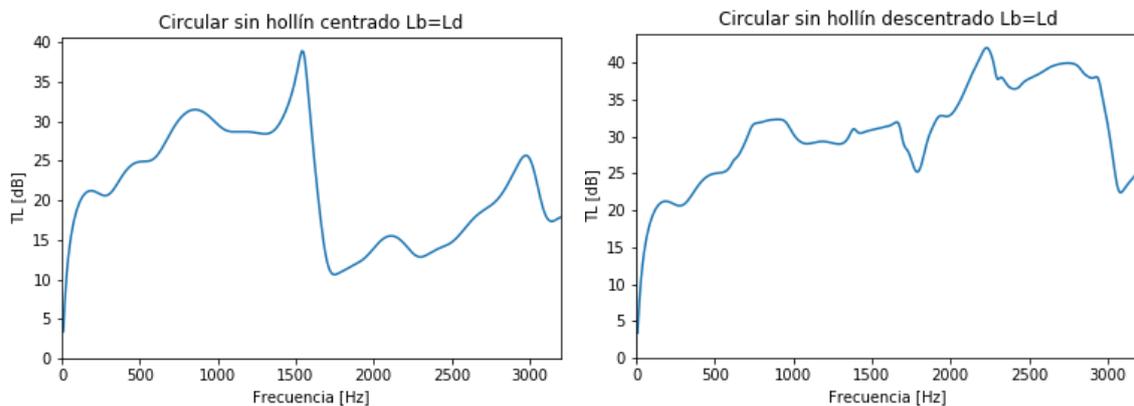


Figura 93. Línea de escape con catalizador y DPF con geometría circular de salida centrada y descentrada, respectivamente

Comparando ambas TLs de 0 a 1300 Hz se puede ver un comportamiento prácticamente similar, especialmente hasta los 600 Hz, siendo idénticas. En cuanto a comparativas más generales, de 1700 Hz hasta los 3200 Hz la geometría con salida descentrada duplica la TL a la centrada, por lo que se puede concluir que descentrar la salida afecta positivamente a la TL, pues lo que se busca es que ésta sea alta y constante durante todo el rango de frecuencias.

Es cierto también que a lo mejor no interesa llegar a niveles tan altos por excedentes de ruido, como puede llegar a para con la famosa normativa EURO6 a la que los automóviles nuevos de hoy en día se tienen que enfrentar.

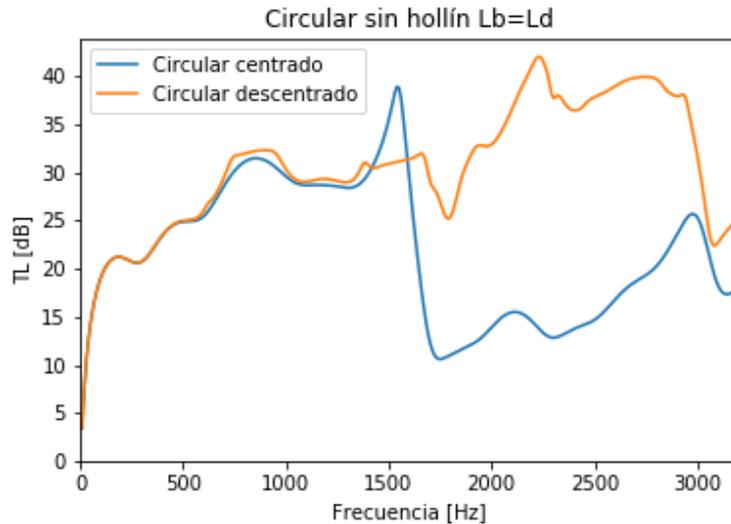


Figura 94. Comparativa de líneas de escape circulares con dos monolitos y salidas diferentes

5.4.2 GEOMETRÍA DE SECCIÓN TRANSVERSAL RECTANGULAR CON CHAFLÁN

En cuanto a las geometrías rectangulares (centradas y descentradas), sus mallas se ven de la siguiente forma:

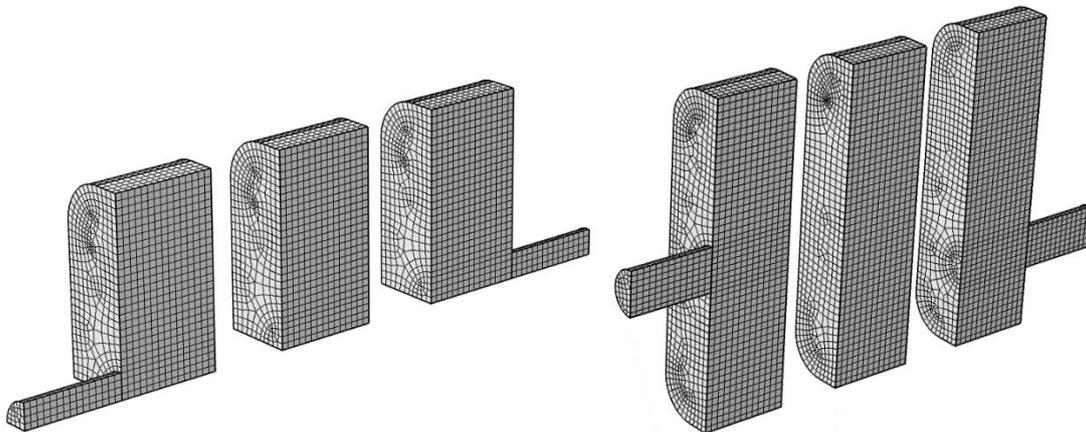


Figura 95. Mallas de las geometrías de sección rectangular con chaflán centrada y descentrada con dos monolitos, respectivamente

Analizando los resultados de la geometría, en cuanto a la centrada, se aprecia una tendencia repetitiva entre los 1000 y 3200 Hz. Tiene valores estables entre los 15 y 30 dB de forma general. En cuanto a la descentrada, hay una tendencia alcista hasta los 1500 Hz, en donde baja y vuelve a subir sin estabilizarse, siendo bastante oscilante.

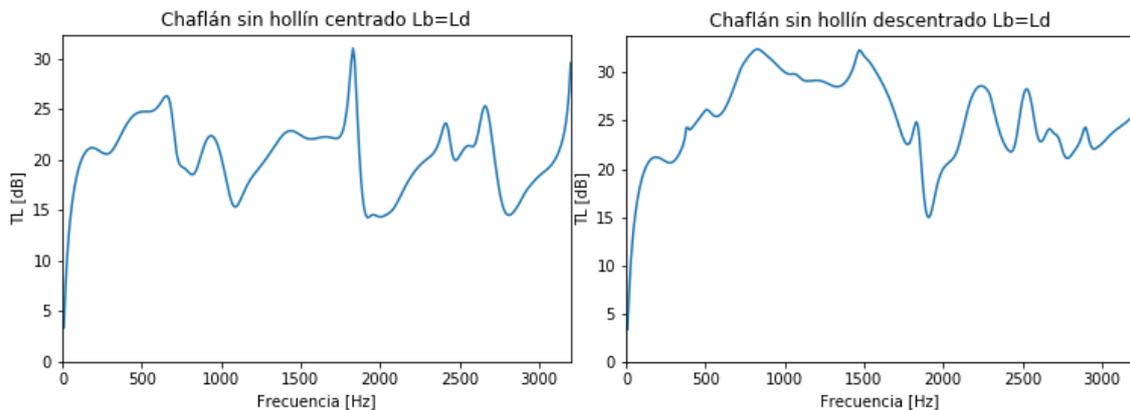


Figura 96. Línea de escape con catalizador y DPF con geometría rectangular con chaflán de salida centrada y descentrada, respectivamente

Comparando las dos TLs de las geometrías de diferente salida, nuevamente hasta los 500 Hz son prácticamente iguales. Sin embargo, entre los 500-1750 Hz y los 2000-3200 Hz los comportamientos son bastante diferentes. La TL del chaflán descentrado es incuestionablemente superior durante estos intervalos respecto con el caso centrado. Por último, es interesante destacar que la bajada y la pendiente originadas en 1800 Hz son iguales, como se puede apreciar.

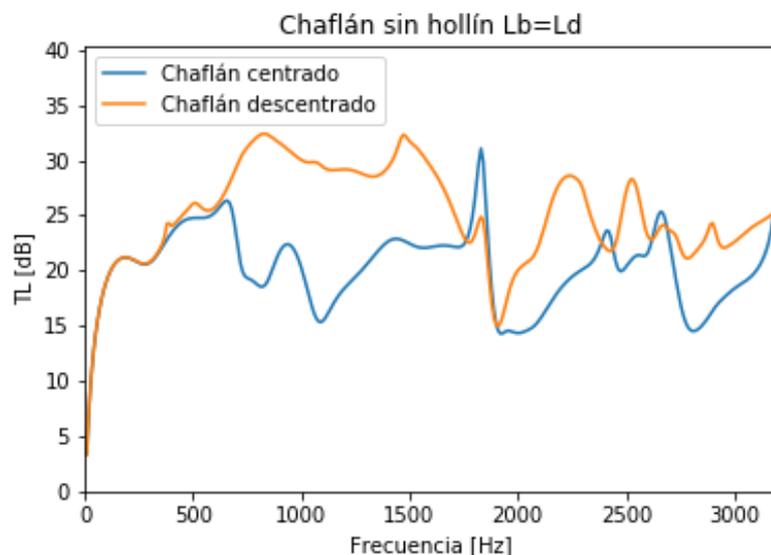


Figura 97. Comparativa de líneas de escape de geometría de sección transversal rectangular con chaflán con dos monolitos y salidas diferentes

5.4.3 INFLUENCIA EN LA GEOMETRÍA PARA CASOS DE DOS MONOLITOS

Dadas las circunstancias, es posible comparar diferentes geometrías para las mismas condiciones ocasionadas.

Respecto a las geometrías circulares y de sección transversal con chaflán y salida centrada, es curioso ver cómo de 0 a 700 Hz las TL son prácticamente iguales. Sin

embargo, a partir de esta frecuencia las TL comienzan a diferenciarse. Es llamativo que desde los 700 hasta los 2000 Hz la TL de la geometría chaflán va desfasada respecto a la circular, además de ésta última ser superior en esta franja. En contraposición, desde los 2000 hasta los 3200 Hz la geometría con chaflán de salida centrada tiene una TL más alta, generalmente hablando.

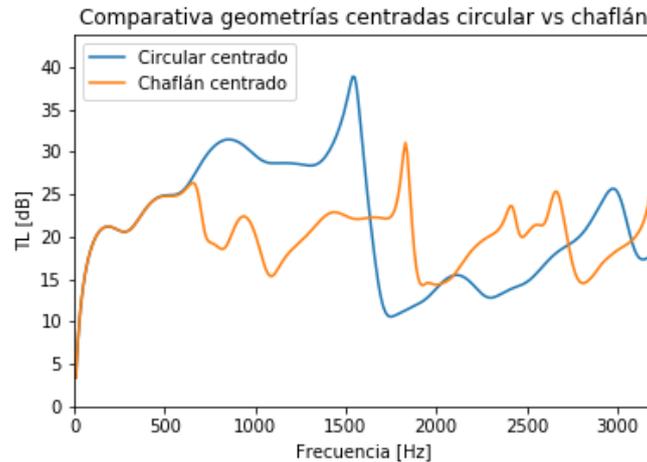


Figura 98. Comparativa de TL entre geometrías centradas: circular vs sección transversal rectangular con chaflán

En cuanto a las salidas descentradas, la similitud de la TL desde 0 hasta 1500 Hz es asombrosa. No obstante, a partir de este punto la circular, nuevamente, consigue una TL bastante superior en comparación con la del chaflán, habiendo diferencias cercanas a los 20 dB. Por consiguiente, únicamente se observan grandes diferencias entre geometrías desde medias a altas frecuencias.

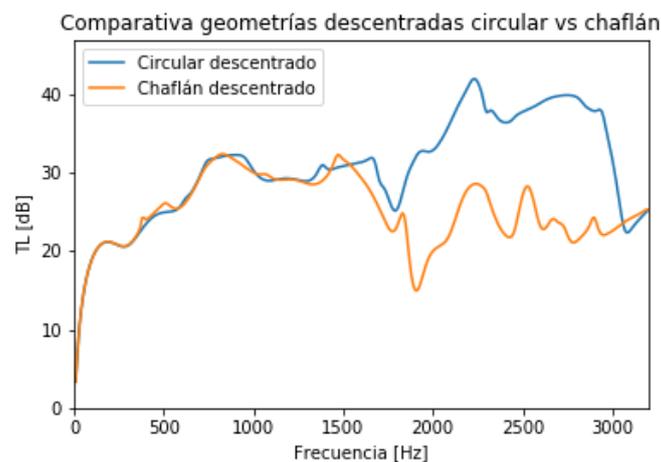


Figura 99. Comparativa de TL entre geometrías descentradas: circular vs sección transversal rectangular con chaflán

Una cosa es clara, y es que en ambos casos la geometría circular posee una TL superior en cuanto las líneas dejan de estar parejas. Del mismo modo, el efecto del descentrado sube la TL tanto para el caso de uno como el de dos monolitos, al igual que un comportamiento más irregular y tosco con respecto al centrado.



6 CONCLUSIONES

En este Trabajo Fin de Máster se ha desarrollado e implementado con éxito una metodología numérica basada en elementos finitos mediante el programa comercial Comsol Multiphysics® para modelizar el comportamiento acústico de dispositivos postratamiento con monolito utilizados en el sistema de escape de motores de combustión. Se ha prestado especial atención a dispositivos que incluyen catalizador y trampa de partículas diésel, tanto separados como utilizados simultáneamente. Dicha metodología permite el cálculo del índice de pérdidas de transmisión (TL) para determinar las prestaciones acústicas de los dispositivos postratamiento indicados.

En la metodología aquí presentada, se ha hecho especial hincapié en la parte asociada al monolito, para el cual se ha escogido un modelo 1D que se introduce mediante una matriz de cuatro polos que relaciona las presiones y velocidades acústicas en las secciones de entrada y salida de los conductos capilares que integran el monolito. La propagación de ondas en el resto de conductos y cámaras (expansión y contracción) que forman parte del dispositivo postratamiento ha sido modelizada en base a un enfoque 3D, es decir, las ondas pueden ser tridimensionales.

La metodología implementada en Comsol Multiphysics ha sido debidamente validada mediante la técnica de ajuste modal, previamente desarrollada por el equipo investigador del DIMM en el que se integra este proyecto.

El método de validación se ha focalizado en ir superando pequeños hitos hasta lograr enfrentar el problema propuesto como título de tesis. Para ello, se ha comenzado con un monolito catalizador con diferentes cámaras de entrada-salida, geometrías y resistividad, pero con conductos centrados. Acto seguido, se ha certificado el monolito trampa de partículas, pero añadiendo la influencia de la capa de hollín generada en los capilares y la característica de conductos de entrada-salida descentrados. Hasta que esto no se ha tenido bien contrastado no se ha podido proceder al cálculo de la línea de escape con los dos monolitos.

En cuanto a la modelización con Comsol, se ha creado una exhaustiva guía para dos geometrías diferentes con un monolito en la que se explica desde la generación éstas, cómo imponer las condiciones de contorno bien, cómo conectar con los resultados de Mathcad, consejos de mallado e incluso cosas críticas para tener en cuenta, entre otros.

Igualmente, para el caso de dos monolitos también se han explicado las pautas a seguir con bastante detalle, donde en esta ocasión la complejidad es superior por la duplicidad de los pasos y es más fácil errar.

También se ha escrito sobre la generación de resultados con Matlab para la homologación posterior de lo obtenido en Comsol, de la cantidad de variables que se pueden modificar para cada caso o de la relevancia de los archivos que son los que generan la malla y son importados de Ansys, cuya nomenclatura comienza por "top" y "xy".



A nivel general, todos los modelos vistos en Matlab en comparación con los resultados alcanzados en Comsol han manifestado una correlación asombrosa, tal y como se puede ver en las comparativas mostradas a lo largo del estudio.

Respecto a la influencia de las variables analizadas en un monolito catalizador, el aumento de la resistividad para una misma geometría origina que la tendencia de la TL sea más alta a lo largo de todo el barrido de frecuencias. Además, en una misma geometría con diferentes longitudes de cámara se puede observar cómo la TL tiene una atenuación más suave en comparación con una de longitudes de cámara iguales, al contrario de lo que lógicamente pueda parecer. Es interesante destacar la poca influencia que tiene la geometría general a baja frecuencia, ya que, como se ha visto en la comparación entre la geometría circular y la de sección transversal rectangular con chaflán, entre los 0 y 500 Hz la TL es prácticamente igual, mientras que a partir de aquí se obtienen resultados totalmente diferentes.

En la configuración con monolito trampa de partículas, de manera análoga a la influencia de la resistividad más o menos alta, está la presencia del hollín, la cual al existir reduce la permeabilidad de las paredes porosas y provoca una mayor disipación de energía acústica, lo cual genera un aumento de la TL.

Comparando entre el resultado de la TL en geometrías de mismas características, pero con diferente monolito, la configuración con trampa de partículas mantiene una TL más alta durante todo el barrido de frecuencias a excepción del rango 2000-2500 Hz, donde el catalizador encuentra su pico, muy diferenciado del resto. Además, indistintamente del monolito analizado, se puede concluir que la geometría de sección rectangular con chaflán, a diferencia de la circular, tiene una dimensión transversal muy larga que favorece la propagación de modos de orden superior (no planos) a frecuencias menores, produciendo un efecto desfavorable en la TL.

En cuanto a la última característica a comparar entre modelos, el descentrado entre conductos de entrada y salida origina una diferencia en la TL muy notoria, donde el caso descentrado posee mucha mayor atenuación en todo el rango de frecuencias salvo contados casos, donde el centrado contiene picos.

Por lo que concierne a los resultados obtenidos en las configuraciones con dos monolitos, las variables vistas en los casos de un solo monolito generan la misma influencia en esta ocasión. Es decir, el descentrado de los conductos, la presencia de hollín o el aumento de la resistividad generan, nuevamente, un aumento de la TL, entre otros.

Finalmente, hay que destacar el buen trabajo que ha realizado el equipo de investigación del DIMM a la hora de realizar los códigos en Matlab® y Mathcad®, pues la rapidez de cálculo y precisión que estos poseen son realmente buenos. La futura línea de investigación del departamento parte de la base del resultado obtenido en este Trabajo



Fin de Máster para la obtención de un modelo analítico fiable que represente una línea de escape con dos monolitos.

6.1 FUTUROS PASOS

Tras realizar este Trabajo Fin de Máster, se quieren dejar unas directrices o posibles nuevas vías de estudio para futuros alumnos:

En cuanto a condiciones de contorno constantes, la modelización llevada a cabo en este TFM se ha hecho a baja temperatura (hipótesis de flujo frío), algo frecuente en la bibliografía ya que así resulta más sencillo llevar a cabo la validación experimental en laboratorio. Un posible trabajo futuro podría estar relacionado con el estudio de la influencia de la temperatura en las prestaciones acústicas del catalizador/trampa de partículas, para disponer de resultados más realistas.

Adicionalmente, sería interesante llevar a cabo la modelización acústica de la línea de escape completa, incluyendo, además de los dispositivos postratamientos considerados aquí, la presencia de silenciadores reactivos y disipativos.



7 ANEXOS

7.1 MATHCAD: MONOLITO DE CATALIZADOR

MODELO ACÚSTICO DE MONOLITO. 1. PROPIEDADES PARA CÁLCULO 3D-1D.

(Se supone temperatura de 15 °C)

Velocidad del sonido

$$c_0 := 340 \text{ (m/s)}$$

Densidad del aire

$$\rho_0 := 1.225 \text{ kg/m}^3$$

DENSIDAD EQUIVALENTE:

$$\rho_m = \rho_0 + \frac{R \cdot \phi \cdot G_c(s)}{j \cdot \omega}$$

R resistividad a flujo estacionario (Pa/(m²/s))

ϕ relación de superficie poro/total

$$G_c(s) = \frac{\frac{s}{4} \cdot \sqrt{-j} \cdot \frac{J_n(1, s \cdot \sqrt{-j})}{J_n(0, s \cdot \sqrt{-j})}}{1 - \frac{2}{s \cdot \sqrt{-j}} \cdot \frac{J_n(1, s \cdot \sqrt{-j})}{J_n(0, s \cdot \sqrt{-j})}}$$

con

$$s = \alpha \cdot \sqrt{\frac{8 \cdot \omega \cdot \rho_0}{R \cdot \phi}}$$

α depende de la geometría del capilar

$\alpha = 1.14$ capilares cuadrados

VELOCIDAD DEL SONIDO EQUIVALENTE:

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

γ Relación de calores específicos

$$\gamma = 1.4$$

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\kappa}$$

Número de Prandtl

μ Viscosidad dinámica

$$\mu = 1.80210^{-5} \text{ Pa s}$$

κ Conductividad térmica

$$\kappa = 0.0247 \text{ W/(m K)}$$

c_p Calor específico a presión constante

$$c_p = 1007 \text{ J/(kg K)}$$



BARRIDO EN FRECUENCIA

$$kk := 0..31 \quad \text{frec}_{kk} := 10 \cdot (kk + 1) \quad \omega_{kk} := 2 \cdot \pi \cdot \text{frec}_{kk}$$

$$c_0 = 340 \quad \rho_0 = 1.225 \quad k_{0_{kk}} := \frac{\omega_{kk}}{c_0} \quad \rho_0 \cdot c_0 = 416.5$$

$$R := 75 \quad \phi := 0.8 \quad \alpha := 1.1 \quad s_{kk} := \alpha \cdot \sqrt{\frac{8 \cdot \omega_{kk} \cdot \rho_0}{R \cdot \phi}}$$

$$G_c(x) := \frac{-\frac{x}{4} \cdot \sqrt{-j} \cdot \frac{J_n(1, x \cdot \sqrt{-j})}{J_n(0, x \cdot \sqrt{-j})}}{1 - \frac{2}{x \cdot \sqrt{-j}} \cdot \frac{J_n(1, x \cdot \sqrt{-j})}{J_n(0, x \cdot \sqrt{-j})}}$$

$$G_{c1_{kk}} := G_c(s_{kk})$$

DENSIDAD EQUIVALENTE

$$\rho_{m_{kk}} := \rho_0 + \frac{R \cdot \phi \cdot G_{c1_{kk}}}{j \cdot \omega_{kk}}$$

$$\mu := 1.80210^{-5} \quad \kappa := 0.0247 \quad c_p := 100 \quad Pr := \frac{\mu \cdot c_p}{\kappa} \quad Pr = 0.732881260 \quad \gamma := 1.4$$

$$G_{c2_{kk}} := G_c(s_{kk} \cdot \sqrt{Pr})$$

VELOCIDAD EQUIVALENTE

$$c_{m_{kk}} := \frac{c_0}{\sqrt{\left(1 + \frac{\phi \cdot R}{j \cdot \omega_{kk} \cdot \rho_0} \cdot G_{c1_{kk}}\right) \cdot \left(\gamma - \frac{\gamma - 1}{1 + \frac{\phi \cdot R}{j \cdot \omega_{kk} \cdot \rho_0 \cdot Pr} \cdot G_{c2_{kk}}}\right)}}$$

NÚMERO DE ONDA

$$k_{m_{kk}} := \frac{\omega_{kk}}{c_{m_{kk}}}$$



EXPORTACIÓN DE DATOS: MATRIZ DE CUATRO POLOS DEL MONOLITO

$L_2 := 0.07$: Longitud del monolito

$$T_{\text{monolit}} := \begin{pmatrix} \cos(k_{kk} \cdot L_2) & j \cdot \rho_{kk} \cdot c_{kk} \cdot \frac{\sin(k_{kk} \cdot L_2)}{\phi} \\ \frac{j \cdot \phi}{\rho_{kk} \cdot c_{kk}} \cdot \sin(k_{kk} \cdot L_2) & \cos(k_{kk} \cdot L_2) \end{pmatrix}$$

Término t11, parte real (en función de la frecuencia)

$$t11_real_{kk,0} := \text{frec}_{kk}$$

$$t11_real_{kk,1} := \text{Re} \left[\left(T_{\text{monolit}} \right)_{0,0} \right] \quad \text{WRITEPRN}(\text{"tabla_t11_real.txt"}) := t11_rea$$

Término t11, parte imaginaria (en función de la frecuencia)

$$t11_imag_{kk,0} := \text{frec}_{kk}$$

$$t11_imag_{kk,1} := \text{Im} \left[\left(T_{\text{monolit}} \right)_{0,0} \right] \quad \text{WRITEPRN}(\text{"tabla_t11_imag.txt"}) := t11_ima$$

Término t12, parte real (en función de la frecuencia)

$$t12_real_{kk,0} := \text{frec}_{kk}$$

$$t12_real_{kk,1} := \text{Re} \left[\left(T_{\text{monolit}} \right)_{0,1} \right] \quad \text{WRITEPRN}(\text{"tabla_t12_real.txt"}) := t12_rea$$

Término t12, parte imaginaria (en función de la frecuencia)

$$t12_imag_{kk,0} := \text{frec}_{kk}$$

$$t12_imag_{kk,1} := \text{Im} \left[\left(T_{\text{monolit}} \right)_{0,1} \right] \quad \text{WRITEPRN}(\text{"tabla_t12_imag.txt"}) := t12_ima$$



Término t21, parte real (en función de la frecuencia)

$$t21_real_{kk,0} := frec_{kk}$$

$$t21_real_{kk,1} := \operatorname{Re}\left[\left(T_{\text{monolit}}\right)_{1,0}\right] \quad \text{WRITEPRN("tabla_t21_real.txt")} := t21_rea$$

Término t21, parte imaginaria (en función de la frecuencia)

$$t21_imag_{kk,0} := frec_{kk}$$

$$t21_imag_{kk,1} := \operatorname{Im}\left[\left(T_{\text{monolit}}\right)_{1,0}\right] \quad \text{WRITEPRN("tabla_t21_imag.txt")} := t21_ima;$$

Término t22, parte real (en función de la frecuencia)

$$t22_real_{kk,0} := frec_{kk}$$

$$t22_real_{kk,1} := \operatorname{Re}\left[\left(T_{\text{monolit}}\right)_{1,1}\right] \quad \text{WRITEPRN("tabla_t22_real.txt")} := t22_rea$$

Término t22, parte imaginaria (en función de la frecuencia)

$$t22_imag_{kk,0} := frec_{kk}$$

$$t22_imag_{kk,1} := \operatorname{Im}\left[\left(T_{\text{monolit}}\right)_{1,1}\right] \quad \text{WRITEPRN("tabla_t22_imag.txt")} := t22_ima;$$



7.2 MATHCAD: MONOLITO DE TRAMPA DE PARTÍCULAS

MODELO DE MONOLITO:
Allam y Abom, JSV, 2005

Modelo sin flujo.

Propiedades de monolito:

Longitud	$L_m := 0.07$	m	
Diámetro	$D_m := 0.12752$	m	
Dimensión canal (lado)	$d_h := 0.0014$	m	$h_{soot} = \frac{h_t}{10}$ $D_m = 0.255$
Espesor canal (pared porosa)	$h_t := 0.00035$	m	$h_{soot} := \frac{h_t}{10}$
Longitud de extremos (end correction - mass plug)	$l_X := 0.00$	m	Ver Tabla 1
Permeabilidad (pared porosa)	$\sigma_w := 2.5 \cdot 10^{-13}$	m ²	$\sigma_{soot} := 1.5 \cdot 10^{-14}$ m ²
Viscosidad (μ , μ_w , etc.)	$\mu_w = 1.7892943682 \cdot 10^{-5}$ Pa s		

Resistencia de pared
(a partir de ley de Darcy)

$$R_w := \mu_w \cdot \left(\frac{h_t}{\sigma_w} + \frac{h_{soot}}{\sigma_{soot}} \right)$$

Canales por
metro cuadrado

$$n := 3.1 \cdot 10^5$$

$$R_w = 6.7754613409 \cdot 10^4$$

Canales totales

$$N_t := \pi \cdot \left(\frac{D_m}{2} \right)^2 \cdot n$$

Canales abiertos
en cada lado

$$N := \frac{N_t}{2}$$

$$N = 7.915929914 \cdot 10^3$$

Temp := 15 °C

Valores: $\gamma := 1.4$ $R_{gas} := 8.31$ J/(K mol) $M_m := 0.0289$ kg/mol $P_{atm} := 10132$ Pa

$$\rho_{0ini} := \frac{P_{atm} \cdot M_m}{R_{gas} \cdot (Temp + 273.15)}$$

$$c_{0ini} := \sqrt{\frac{\gamma \cdot R_{gas} \cdot (Temp + 273.15)}{M_m}}$$

Adiabático

$$c_{0ini} = 340.254668172 \text{ m/s}$$

$$Z_{0ini} := \rho_{0ini} \cdot c_{0ini}$$

$$Z_{0ini} = 416.908313887$$

$$\rho_{0ini} = 1.225283156 \text{ kg/m}^3$$



Constante de Sutherland

Viscosidad (http://www.cfd-online.com/Wiki/Sutherland's_law)

$$\mu_S(\text{Temp}) := 1.45793 \times 10^{-6} \cdot \frac{(\text{Temp} + 273.15)^{1.5}}{\text{Temp} + 273.15 + C2}$$

$$C2 := 110 \cdot K$$

$$\mu_w := \mu_S(\text{Temp})$$

$$\mu_S(\text{Temp}) = 1.7892943682 \cdot 10^{-5} \text{ Pa s}$$

C_p en función de la temperatura (ajuste Mathcad entre 0 °C y 1000 °C):

$$C_p(\text{Temp}) := 1.0073410^3 - 0.059809 \cdot \text{Temp} + 8.879379 \cdot 10^{-4} \cdot \text{Temp}^2 - 1.05569110^{-6} \cdot \text{Temp}^3 + 4.04438110^{-10} \cdot \text{Temp}^4$$

K_{th} en función de la temperatura (ajuste Mathcad entre 0 °C y 1000 °C):

$$K_{th}(\text{Temp}) := 0.023635 - 7.562892 \cdot 10^{-5} \cdot \text{Temp} - 2.523277 \cdot 10^{-8} \cdot \text{Temp}^2 + 4.648739 \cdot 10^{-12} \cdot \text{Temp}^3$$

$$c_p := C_p(\text{Temp})$$

$$c_p = 1.0066391085 \cdot 10^3$$

$$k_{th} := K_{th}(\text{Temp})$$

$$k_{th} = 0.024763772$$

$$Pr := c_p \cdot \frac{\mu_w}{k_{th}}$$

$$Pr = 0.727342215$$

El número de Prandtl sale algo menor de lo esperado

Artículo de Abom (JSV 2006)

Frecuencias de cálculo:

$$j := 1..320$$

$$\Delta f := 10 \text{ Hz}$$

$$\text{Hz}$$

$$\text{frec}_j := j \cdot \Delta f$$

$$\omega_j := 2 \cdot \pi \cdot \text{frec}_j$$

$$s_j := \frac{d_h}{2} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{0ini} \omega_j}{\mu_w}}$$

$$\xi := \sqrt{Pr}$$

$$Fs_j := \frac{2}{s_j \cdot \sqrt{-i}} \cdot \frac{J_1(s_j \cdot \sqrt{-i})}{J_0(s_j \cdot \sqrt{-i})}$$

$$FPs_j := \frac{2}{\xi \cdot s_j \cdot \sqrt{-i}} \cdot \frac{J_1(\xi \cdot s_j \cdot \sqrt{-i})}{J_0(\xi \cdot s_j \cdot \sqrt{-i})}$$

$$k_{0j} := \frac{\omega_j}{c_{0j}}$$

$$c_{0j} := c_{0ini} \cdot \frac{\sqrt{(1 - Fs_j)}}{\sqrt{1 + (\gamma - 1) \cdot FPs_j}}$$

$$k_{0ini_j} := \frac{\omega_j}{c_{0ini}} \quad \rho_{0j} := \frac{\rho_{0ini}}{1 - Fs_j}$$

$$k_{0primaj} := k_{0j}$$

$$Z_{0j} := \rho_{0j} \cdot c_{0j}$$



Resultados analíticos de Allam y Abom (ecuación 23, JSV 2005 DPF):

$$e_1 := \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad e_2 := e_1 \quad e_3 := \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix} \quad e_4 := e_3 \quad K_{1j} := k_{0j} \quad K_{2j} := -K_{1j}$$

$$e_{1\text{prima}j} := e_1 \cdot \frac{d_h^2}{Z_{0j} \cdot \frac{k_{0\text{prima}j}}{K_{1j}}} \quad e_{2\text{prima}j} := e_2 \cdot \frac{d_h^2}{Z_{0j} \cdot \frac{k_{0\text{prima}j}}{K_{2j}}} \quad B_j := \frac{c_{0j} \cdot \rho_{0j}}{d_h \cdot R_w}$$

$$e_{3\text{prima}j} := e_3 \cdot \frac{d_h^2}{Z_{0j} \cdot \frac{k_{0\text{prima}j}}{K_{3j}}} \quad e_{4\text{prima}j} := e_4 \cdot \frac{d_h^2}{Z_{0j} \cdot \frac{k_{0\text{prima}j}}{K_{4j}}} \quad K_{3j} := k_{0j} \cdot \sqrt{1 - 8 \cdot i \cdot \frac{B_j}{k_{0j}}} \quad K_{4j} := -K_{3j}$$

Matriz H

$$H_{0j} := \begin{bmatrix} e_{1_1} & e_{2_1} & e_{3_1} & e_{4_1} \\ e_{1_2} & e_{2_2} & e_{3_2} & e_{4_2} \\ (e_{1\text{prima}j})_1 & (e_{2\text{prima}j})_1 & (e_{3\text{prima}j})_1 & (e_{4\text{prima}j})_1 \\ (e_{1\text{prima}j})_2 & (e_{2\text{prima}j})_2 & (e_{3\text{prima}j})_2 & (e_{4\text{prima}j})_2 \end{bmatrix}$$

$$H_{Lj} := \begin{bmatrix} -i \cdot K_{1j} \cdot L_m & -i \cdot K_{2j} \cdot L_m & -i \cdot K_{3j} \cdot L_m & -i \cdot K_{4j} \cdot L_m \\ e_{1_1} \cdot e & e_{2_1} \cdot e & e_{3_1} \cdot e & e_{4_1} \cdot e \\ -i \cdot K_{1j} \cdot L_m & -i \cdot K_{2j} \cdot L_m & -i \cdot K_{3j} \cdot L_m & -i \cdot K_{4j} \cdot L_m \\ e_{1_2} \cdot e & e_{2_2} \cdot e & e_{3_2} \cdot e & e_{4_2} \cdot e \\ (e_{1\text{prima}j})_1 \cdot e & (e_{2\text{prima}j})_1 \cdot e & (e_{3\text{prima}j})_1 \cdot e & (e_{4\text{prima}j})_1 \cdot e \\ -i \cdot K_{1j} \cdot L_m & -i \cdot K_{2j} \cdot L_m & -i \cdot K_{3j} \cdot L_m & -i \cdot K_{4j} \cdot L_m \\ (e_{1\text{prima}j})_2 \cdot e & (e_{2\text{prima}j})_2 \cdot e & (e_{3\text{prima}j})_2 \cdot e & (e_{4\text{prima}j})_2 \cdot e \end{bmatrix}$$



Matriz S

$$SS_j := H0_j \cdot (HL_j)^{-1}$$

Matriz T

$$TT_j := \begin{bmatrix} (SS_j)_{1,2} - \frac{(SS_j)_{4,2} \cdot (SS_j)_{1,1}}{(SS_j)_{4,1}} & (SS_j)_{1,4} - \frac{(SS_j)_{4,4} \cdot (SS_j)_{1,1}}{(SS_j)_{4,1}} \\ (SS_j)_{3,2} - \frac{(SS_j)_{4,2} \cdot (SS_j)_{3,1}}{(SS_j)_{4,1}} & (SS_j)_{3,4} - \frac{(SS_j)_{4,4} \cdot (SS_j)_{3,1}}{(SS_j)_{4,1}} \end{bmatrix}$$

Matriz TII

$$TII_j := \begin{bmatrix} (TT_j)_{1,1} & \frac{(TT_j)_{1,2}}{N} \\ N \cdot (TT_j)_{2,1} & (TT_j)_{2,2} \end{bmatrix}$$

Matriz final - relación presión/velocidad externas a ambos lados del filtro. Pérdidas en cambios de sección debido a flujo

$$M_{IN} := 0.0 \quad M_{OUT} := M_{IN} \quad m_{IN} := \frac{(N \cdot d_h^2)}{\left[\pi \cdot \left(\frac{D_m}{2} \right)^2 \right]}$$

$$Z_{IN} := \rho_0 ini \frac{c_0 ini}{\pi \cdot \left(\frac{D_m}{2} \right)^2} \quad Z_{OUT} := Z_{IN}$$

$$m_{OUT} := m_{IN}$$

$$r_{IN} := Z_{IN} M_{IN} \left(\frac{1}{m_{IN}^2} - 1 \right) \quad r_{OUT} := 2 \cdot Z_{OUT} M_{OUT} \left(1 - \frac{1}{m_{OUT}} \right)$$



Matriz final - relación presión/velocidad externas a ambos lados del filtro

$$T_{DPF_j} := \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\pi \cdot \left(\frac{D_m}{2}\right)^2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & r_{IN} + \frac{(i \cdot \rho_0 \cdot i \omega_j \cdot l_X)}{N \cdot d_h^2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot T_{II_j} \cdot \begin{bmatrix} 1 & r_{OUT} + \frac{(i \cdot \rho_0 \cdot i \omega_j \cdot l_X)}{N \cdot d_h^2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \pi \cdot \left(\frac{D_m}{2}\right)^2 \end{bmatrix}$$

kk := j

$$T_{monolit} := T_{DPF}$$

Término t11, parte real (en función de la frecuencia)

$$t11_real_{kk,1} := \text{frec}_{kk}$$

$$t11_real_{kk,2} := \text{Re} \left[\left(T_{monolit}_{kk} \right)_{1,1} \right] \quad \text{WRITEPRN}("tabla_t11_real.txt") := t11_real$$

Término t11, parte imaginaria (en función de la frecuencia)

$$t11_imag_{kk,1} := \text{frec}_{kk}$$

$$t11_imag_{kk,2} := \text{Im} \left[\left(T_{monolit}_{kk} \right)_{1,1} \right] \quad \text{WRITEPRN}("tabla_t11_imag.txt") := t11_imag$$

Término t12, parte real (en función de la frecuencia)

$$t12_real_{kk,1} := \text{frec}_{kk}$$

$$t12_real_{kk,2} := \text{Re} \left[\left(T_{monolit}_{kk} \right)_{1,2} \right] \quad \text{WRITEPRN}("tabla_t12_real.txt") := t12_real$$

Término t12, parte imaginaria (en función de la frecuencia)

$$t12_imag_{kk,1} := \text{frec}_{kk}$$

$$t12_imag_{kk,2} := \text{Im} \left[\left(T_{monolit}_{kk} \right)_{1,2} \right] \quad \text{WRITEPRN}("tabla_t12_imag.txt") := t12_imag$$



Término t21, parte real (en función de la frecuencia)

$$t21_real_{kk,1} := \text{frec}_{kk}$$

$$t21_real_{kk,2} := \text{Re} \left[\left(T_{\text{monolit}_{kk}} \right)_{2,1} \right] \quad \text{WRITEPRN}("tabla_t21_real.txt") := t21_rea$$

Término t21, parte imaginaria (en función de la frecuencia)

$$t21_imag_{kk,1} := \text{frec}_{kk}$$

$$t21_imag_{kk,2} := \text{Im} \left[\left(T_{\text{monolit}_{kk}} \right)_{2,1} \right] \quad \text{WRITEPRN}("tabla_t21_imag.txt") := t21_ima;$$

Término t22, parte real (en función de la frecuencia)

$$t22_real_{kk,1} := \text{frec}_{kk}$$

$$t22_real_{kk,2} := \text{Re} \left[\left(T_{\text{monolit}_{kk}} \right)_{2,2} \right] \quad \text{WRITEPRN}("tabla_t22_real.txt") := t22_rea$$

Término t22, parte imaginaria (en función de la frecuencia)

$$t22_imag_{kk,1} := \text{frec}_{kk}$$

$$t22_imag_{kk,2} := \text{Im} \left[\left(T_{\text{monolit}_{kk}} \right)_{2,2} \right] \quad \text{WRITEPRN}("tabla_t22_imag.txt") := t22_ima;$$



8 BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. D. Denia, A. G. Antebas, A. Selamet, and A. M. Pedrosa, "Acoustic characteristics of circular dissipative reversing chamber mufflers," *Noise Control Eng. J.*, 2011.
- [2] F. D. Denia, A. Selamet, F. J. Fuenmayor, and R. Kirby, "Acoustic attenuation performance of perforated dissipative mufflers with empty inlet/outlet extensions," *J. Sound Vib.*, vol. 302, no. 4–5, pp. 1000–1017, May 2007.
- [3] J. Albelda, F. D. Denia, M. I. Torres, and F. J. Fuenmayor, "A transversal substructuring mode matching method applied to the acoustic analysis of dissipative mufflers," *J. Sound Vib.*, vol. 303, no. 3–5, pp. 614–631, Jun. 2007.
- [4] "Conceptos básicos del ruido ambiental," 2020. [Online]. Available: https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/contaminacion_acustica_tcm30-185098.pdf. [Accessed: 11-Feb-2020].
- [5] Z. Meng *et al.*, "Particle emission characteristics of DPF regeneration from DPF regeneration bench and diesel engine bench measurements," *Fuel*, vol. 262, p. 116589, 2020.
- [6] J. Lewtas, "Air pollution combustion emissions: Characterization of causative agents and mechanisms associated with cancer, reproductive, and cardiovascular effects," *Mutat. Res. Mutat. Res.*, vol. 636, no. 1, pp. 95–133, 2007.
- [7] S. Allam and M. Åbom, "Acoustic modelling and testing of diesel particulate filters," *J. Sound Vib.*, vol. 288, no. 1–2, pp. 255–273, 2005.
- [8] S. Allam and M. Åbom, "Sound propagation in an array of narrow porous channels with application to diesel particulate filters," *J. Sound Vib.*, vol. 291, no. 3–5, pp. 882–901, 2006.
- [9] R. G. S. de Larrea, "Contribución al modelado y simulación acústica mediante elementos finitos de dispositivos con monolito en sistemas de escape de vehículos," MSc Thesis, Universidad Politécnica de Valencia, 2018.
- [10] B. J. Baxter, "Numerical and experimental characterization of the acoustic behaviour of exhaust devices with monolith," MSc Thesis, Universidad Politécnica de Valencia, 2018.
- [11] F. D. Denia, J. Martínez-Casas, J. Carballeira, E. Nadal, and F. J. Fuenmayor, "Computational performance of analytical methods for the acoustic modelling of automotive exhaust devices incorporating monoliths," *J. Comput. Appl. Math.*, vol. 330, pp. 995–1006, 2018.