



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIERÍA
INDUSTRIAL VALENCIA

TRABAJO FIN DE MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

**DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA PRECISA
Y DE BAJO COSTE COMPUTACIONAL
PARA LA OPTIMIZACIÓN ACÚSTICA DE
FILTROS DE PARTÍCULAS DIÉSEL UTILIZADOS
EN LA LÍNEA DE ESCAPE DE MOTORES DE
COMBUSTIÓN**

AUTOR: ÁLVARO GARRIDO GUILLAMÓN

TUTOR: FRANCISCO DAVID DENIA GUZMÁN

Curso Académico: 2020-21

AGRADECIMIENTOS

Quiero aprovechar la ocasión para agradecer a toda la gente que me ha apoyado durante todo este tiempo. Ya no solo durante el desarrollo de este Trabajo Fin de Máster, sino durante toda mi andadura académica.

En primer lugar, me gustaría agradecerle a mi tutor del proyecto, Paco Denia, su enorme trabajo para hacer que sea muy fácil estar mano a mano con él debido a su facilidad para trabajar con una sonrisa. Además, también agradecerle su constante disponibilidad tanto para aspectos del TFM como de las prácticas como de cualquier otra cosa, académica o no.

También agradezco a mis compañeros a lo largo de toda mi carrera por el apoyo, reconocimiento de mi trabajo, colaboración constante... No podría nombrarlos a todos, pero algunos nombres más destacados podrían ser Juanito, Aldara, Jesús, Ana, Serrano, Emilio... Gracias

Como no, gratificar a mis amigos de siempre, que en todo momento han confiado y apostado por mí para cualquier cosa, Pablo, Judit, Iván...

Y, por último, y para nada menos importante, a mi familia, mis seres queridos, sin ellos no hubiera sido capaz de llegar donde estoy, tanto a nivel personal, como económico, cotidiano, culinario, académico...

Gracias

RESUMEN

En este Trabajo Fin de Máster se desarrolla e implementa una metodología precisa y de bajo coste computacional para la optimización acústica de filtros de partículas diésel (DPF-Diésel Particulate Filter en inglés) utilizados en la línea de escape de motores de combustión. El objetivo es obtener la máxima atenuación sonora en los rangos de frecuencia de interés, habitualmente aquellos en los que la fuente sonora (motor en este caso) emite mayores niveles de ruido. Para ello, se aborda el problema mediante dos etapas globales:

1. Cálculo de las propiedades acústicas modales (frecuencias naturales y modos de presión) de las secciones transversales de los conductos implicados y obtención de la solución global de la ecuación de ondas dentro del dispositivo mediante la técnica de ajuste modal.
2. Aplicación de técnicas de optimización basadas en algoritmos genéticos y en gradiente para mejorar las prestaciones de atenuación sonora.

La combinación del método de elementos finitos 3D con algoritmos de optimización geométrica y topológica se ha convertido en una práctica común en múltiples ramas de la ingeniería. El coste computacional asociado, sin embargo, sigue siendo prohibitivo en multitud de problemas (en ocasiones, dependiendo del número de grados de libertad del problema, las simulaciones pueden requerir días o incluso semanas). Uno de los motivos fundamentales es la necesidad de aplicar el algoritmo (iterativo) de optimización cientos o miles de veces, lo cual a su vez implica la resolución del problema mediante elementos finitos 3D en cada una de las iteraciones. Para evitar estos inconvenientes en un problema de interés para el grupo de investigación en el que se enmarca el TFM, se desarrolla e implementa una metodología eficiente, precisa y de bajo coste computacional, que combina soluciones 2D de elementos finitos, ajuste modal y algoritmos de optimización disponibles en programas comerciales como Matlab. En concreto, la metodología desarrollada se detalla a continuación:

1. Ajuste modal analítico-numérico para la caracterización acústica del filtro de partículas diésel. En primer lugar, se resuelve numéricamente mediante elementos finitos 2D un problema de autovalores asociado a la ecuación de ondas en la sección transversal de los conductos que integran el dispositivo postratamiento. Para ello se utiliza una malla 2D de dicha sección, con lo que el coste computacional es bajo. Con dicha malla se obtienen los modos de presión (autovectores) y frecuencias naturales (autovalores) de la sección transversal del DPF. En segundo lugar, esta solución numérica se combina, mediante superposición modal, con la solución analítica de la ecuación de ondas a lo largo de la dimensión longitudinal (perpendicular a la sección transversal) de los conductos que forman el DPF. El resultado de aplicar estas técnicas es un método tan preciso como elementos finitos en 3D, pero con un coste computacional mucho menor.
2. Optimización basada en algoritmos genéticos, con un coste computacional en ocasiones considerable, pero con mayores posibilidades de proporcionar óptimos globales.
3. Optimización mediante algoritmos basados en gradiente, más eficientes desde un punto de vista computacional, pero con un mayor riesgo de converger a óptimos locales.

La integración de las técnicas descritas anteriormente da como resultado final la consecución de los objetivos buscados. Una vez validadas las herramientas desarrolladas mediante comparación con el software comercial ANSYS, se lleva a cabo un estudio detallado para la obtención de los parámetros óptimos de diseño desde un punto de vista acústico (longitudes de conductos, localización de conductos de entrada y salida, tipo de DPF, presencia de hollín, etc.) en función del intervalo de frecuencias de interés.

Palabras Clave: DPF filtro de partículas diésel, acústica, atenuación sonora, TL, ajuste modal, elementos finitos, optimización, monolito, Matlab.

RESUM

En aquest Treball Fi de Màster es desenvolupa i implementa una metodologia precisa i de baix cost computacional per a l'optimització acústica de filtres de partícules diésel (DPF-Diésel Particulate Filter en anglés) utilitzats en la línia d'escapament de motors de combustió. L'objectiu és obtenir la màxima atenuació sonora en els rangs de freqüència d'interés, habitualment aquells en els quals la font sonora (motor en aquest cas) emet majors nivells de soroll. Per a això, s'aborda el problema mitjançant dues etapes globals:

1. Càlcul de les propietats acústiques modals (freqüències naturals i modes de pressió) de les seccions transversals dels conductes implicats i obtenció de la solució global de l'equació d'ones dins del dispositiu mitjançant la tècnica d'ajust modal.
2. Aplicació de tècniques d'optimització basades en algoritmes genètics i en gradient per a millorar les prestacions d'atenuació sonora.

La combinació del mètode d'elements finits 3D amb algoritmes d'optimització geomètrica i topològica s'ha convertit en una pràctica comuna en múltiples branques de l'enginyeria. El cost computacional associat, no obstant això, continua sent prohibitiu en multitud de problemes (a vegades, depenent del nombre de graus de llibertat del problema, les simulacions poden requerir dies o fins i tot setmanes). Un dels motius fonamentals és la necessitat d'aplicar l'algoritme (iteratiu) d'optimització centenars o milers de vegades, la qual cosa al seu torn implica la resolució del problema mitjançant elements finits 3D en cadascuna de les iteracions. Per a evitar aquests inconvenients en un problema d'interés per al grup d'investigació en el qual s'emmarca el TFM, es desenvolupa i implementa una metodologia eficient, precisa i de baix cost computacional, que combina solucions 2D d'elements finits, ajust modal i algoritmes d'optimització disponibles en programes comercials com Matlab. En concret, la metodologia desenvolupada es detalla a continuació:

1. Ajust modal analític-numèric per a la caracterització acústica del filtre de partícules diésel. En primer lloc, es resol numèricament mitjançant elements finits 2D un problema d'autovalors associat a l'equació d'ones en la secció transversal dels conductes que integren el dispositiu post-tractament. Per a això s'utilitza una malla 2D d'aquesta secció, amb el que el cost computacional és baix. Amb aquesta malla s'obtenen els modes de pressió (autovectors) i freqüències naturals (autovalors) de la secció transversal del DPF. En segon lloc, aquesta solució numèrica es combina, mitjançant superposició modal, amb la solució analítica de l'equació d'ones al llarg de la dimensió longitudinal (perpendicular a la secció transversal) dels conductes que formen el DPF. El resultat d'aplicar aquestes tècniques és un mètode tan precís com elements finits en 3D, però amb un cost computacional molt menor.
2. Optimització basada en algoritmes genètics, amb un cost computacional a vegades considerable, però amb majors possibilitats de proporcionar òptims globals.
3. Optimització mitjançant algoritmes basats en gradient, més eficients des d'un punt de vista computacional, però amb un major risc de convergir a òptims locals.

La integració de les tècniques descrites anteriorment dona com a resultat final la consecució dels objectius buscats. Una vegada validades les eines desenvolupades mitjançant comparació amb el programa comercial ANSYS, es duu a terme un estudi detallat per a l'obtenció dels paràmetres òptims de disseny des d'un punt de vista acústic (longituds de conductes, localització de conductes d'entrada i eixida, tipus de DPF, presència de sutge, etc.) en funció de l'interval de freqüències d'interés.

Paraules clau: DPF filtre de partícules dièsel, acústica, atenuació sonora, TL, ajust modal, elements finits, optimització, monòlit, Matlab.

ABSTRACT

In this Master's Thesis, an accurate and low computational cost methodology is developed and implemented for the acoustic optimization of diesel particulate filters (DPF) used in the exhaust system of combustion engines. The objective is to obtain the maximum sound attenuation in the frequency ranges of interest, usually those in which the sound source (engine in this case) emits higher noise levels. To do this, the problem is addressed through two global steps:

1. Calculation of the modal acoustic properties (natural frequencies and pressure modes) of the cross sections of the involved ducts and obtaining the global solution of the wave equation within the device by means of the model matching technique
2. Application of optimization techniques based on genetic and gradient algorithms for improving sound attenuation performance.

The combination of the 3D finite element method with geometric and topological optimization algorithms has become a common practice in multiple branches of engineering. The associated computational cost, however, remains prohibitive in many problems (sometimes, depending on the number of degrees of freedom in the problem, simulations can take days or even weeks). One of the main reasons is the need to apply the optimization (iterative) algorithm hundreds or thousands of times, which in turn implies solving the problem using 3D finite elements in each iteration. To avoid these drawbacks in a problem of interest to the research group in which the TFM is framed, an efficient, accurate and low computational cost methodology is developed and implemented, which combines 2D finite element solutions, mode matching and optimization algorithms available in commercial programs such as Matlab. Specifically, the methodology developed is detailed below:

1. Analytical-numerical mode matching for the acoustic characterization of the diesel particulate filter. First, an eigenvalue problem associated with the wave equation in the cross section of the ducts forming the after-treatment device is solved numerically using 2D finite elements. For this, a 2D mesh of the aforementioned section is used, for which the computational cost is very low. With this mesh the pressure modes (eigenvectors) and natural frequencies (eigenvalues) of the DPF cross section are obtained. Second, this numerical solution is combined, by modal superposition, with the analytical solution of the wave equation along the longitudinal dimension (perpendicular to the cross section) of the ducts forming the DPF. The result of applying these techniques is a method as accurate as the 3D finite element method, but with a much lower computational cost.
2. Optimization based on genetic algorithms, with a considerable computational cost but with greater possibilities of obtaining global optimum.
3. Optimization using gradient-based algorithms, more efficient from a computational point of view, but with a higher risk of converging to local optimum.

The integration of the techniques described above leads to the achievement of the objectives sought. Once the developed tools have been validated by comparison with the commercial software ANSYS, a detailed study is carried out to obtain the optimal design parameters from an acoustic point of view (duct lengths, location of inlet and outlet ducts, DPF type, presence of soot, etc.) depending on the frequency range of interest.

Keywords: DPF diesel particulate filter, acoustics, sound attenuation, TL, mode matching, finite elements, optimization, monolith, Matlab.

ÍNDICE GENERAL

MEMORIA.....	1
CAPÍTULO 1: Introducción.....	9
CAPÍTULO 2: Fundamentos de filtros de partículas diésel (DPF).	11
CAPÍTULO 3: Acústica aplicada a elementos del sistema de escape. Filtros de partículas diésel (DPF).	14
CAPÍTULO 4: Caracterización acústica de filtros de partículas mediante la técnica de ajuste modal.....	24
CAPÍTULO 5: Optimización del comportamiento acústico de filtros de partículas mediante algoritmos basados en gradiente y algoritmos genéticos.....	40
CAPÍTULO 6: Estudio y análisis acústico de filtros de partículas (DPF) mediante la metodología desarrollada.....	52
CAPÍTULO 7: Conclusiones	68
CAPÍTULO 8: Desarrollos futuros.....	71
CAPÍTULO 9: Bibliografía	72
PRESUPUESTO	75
1- Presupuesto	79
2- Desglose del presupuesto	80
3- Resumen del presupuesto	85
PLANOS.....	87
1- Geometrías óptimas.....	89
ANEXOS	99
1- Códigos programas matlab	102



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

MEMORIA

ÍNDICE DE LA MEMORIA

CAPÍTULO 1: Introducción.....	9
1.1. Objetivos y objeto de estudio del TFM.	9
1.2. Justificación y motivación del TFM.....	9
1.3. Metodología empleada.	10
CAPÍTULO 2: Fundamentos de filtros de partículas diésel (DPF).	11
2.1. Funcionamiento de filtros de partículas diésel.	11
2.2. Constitución de los DPF.....	12
CAPÍTULO 3: Acústica aplicada a elementos del sistema de escape. Filtros de partículas diésel (DPF).	14
3.1. Teoría acústica.....	14
3.2. EL SONIDO EN CONDUCTOS CAPILARES. MODELADO DEL MONOLITO 3D-1D.....	20
CAPÍTULO 4: Caracterización acústica de filtros de partículas mediante la técnica de ajuste modal.....	24
4.1. Descripción del problema a tratar.....	24
4.2. Geometrías y malla de referencia.	24
4.3. Variables de estudio.	30
4.4. Planteamiento y desarrollo de la técnica de ajuste modal.	31
4.5. Implementación de la técnica de ajuste modal.	32
4.6. Validación de la técnica de ajuste modal con ANSYS.	33
4.7. Algunos resultados.	38
CAPÍTULO 5: Optimización del comportamiento acústico de filtros de partículas mediante algoritmos basados en gradiente y algoritmos genéticos.....	40
5.1. Generalidades.....	40
5.2. Algoritmos basados en gradiente. Algoritmo “fmincon” de Matlab.....	41
5.3. Algoritmos genéticos. Algoritmo “GA” de Matlab.	44
5.4. Integración de herramientas computacionales desarrolladas: Técnica de ajuste modal y algoritmos de optimización.	48
5.5. Función objetivo.....	48
5.6. Algunos resultados.	49
5.7. Conclusiones.....	51
CAPÍTULO 6: Estudio y análisis acústico de filtros de partículas (DPF) mediante la metodología desarrollada.....	52
6.1. Estudio y análisis de la variabilidad de los parámetros de la técnica ajuste modal.....	52
6.2. Estudio y análisis de la optimización desarrollada.	66
CAPÍTULO 7: Conclusiones	68
CAPÍTULO 8: Desarrollos futuros.....	71
CAPÍTULO 9: Bibliografía	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de un DPF (Allam & Åbom, 2005).....	12
Figura 2. Recorrido de los gases en un DPF (Allam & Åbom, 2005).....	12
Figura 3. Esquema de ondas en un cambio de medio de propagación.	17
Figura 4. Fenómeno de transmisión y reflexión en un cambio de sección.....	19
Figura 5. Fenómeno de transmisión y reflexión en un cambio de sección doble.....	20
Figura 6. Modelado de monolito 3D-3D.....	21
Figura 7. Modelado de monolito 3D-1D.....	21
Figura 8. Modelado 3D de la geometría 1.....	25
Figura 9. Mallado de referencia de la geometría 1.....	25
Figura 10. Modelado 3D de la geometría 2.....	26
Figura 11. Mallado de referencia de la geometría 2.....	27
Figura 12. Modelado 3D de la geometría 3.....	27
Figura 13. Mallado de referencia de la geometría 3.....	28
Figura 14. Distribución de la presión transversal en el segundo modo de orden superior para la geometría rectangular.....	28
Figura 15. Modelado 3D de la geometría 4.....	29
Figura 16. Mallado de referencia de la geometría 4.....	29
Figura 17. "TL3_Malla1" con EF en ANSYS APDL.....	34
Figura 18. "TL15_Malla2" con EF en ANSYS APDL.....	34
Figura 19. "TL27_Malla3" con EF en ANSYS APDL.....	34
Figura 20. "TL39_Malla4" con EF en ANSYS APDL.....	34
Figura 21. TL3_Malla1 con ANSYS APDL (azul) y Ajuste Modal (naranja).....	35
Figura 22. TL15_Malla2 con ANSYS APDL (azul) y Ajuste Modal (naranja).....	35
Figura 23. TL27_Malla3 con ANSYS APDL (azul) y Ajuste Modal (naranja).....	36
Figura 24. TL39_Malla4 con ANSYS APDL (azul) y Ajuste Modal (naranja).....	37
Figura 25. TL's calculados para la Malla 1 con Ajuste Modal.....	38
Figura 27. TL's calculados para la Malla 3 con Ajuste Modal.....	39
Figura 28. TL's calculados para la Malla 4 con Ajuste Modal.....	39
Figura 29. Diagrama de flujo de la metodología de optimización. (Paredes, 2016).....	40
Figura 30. Problema de programación lineal a resolver por "fmincon".	42
Figura 31. Diagrama de flujo desarrollado por el algoritmo genético.	45

Figura 32. Gráfica del tiempo computacional con algoritmo "fmincon" .	51
Figura 33. Gráfica del tiempo computacional con algoritmo "ga".....	51
Figura 34. C7.1 Conductos circulares centrados L1, C1 con y sin hollín.....	52
Figura 35. C7.2 Conductos circulares centrados L3, C1 con y sin hollín.....	53
Figura 36. C7.3 Conductos circulares descentrados L1, C1 con y sin hollín.	53
Figura 37. C7.1 Conductos circulares descentrados L3, C1 con y sin hollín.	53
Figura 38. C8.1 Conductos rectangulares centrados L1, C1 con y sin hollín.....	54
Figura 39. C8.2 Conductos rectangulares centrados L3, C1 con y sin hollín.....	54
Figura 40. C8.3 Conductos rectangulares descentrados L1, C1 con y sin hollín.	54
Figura 41. C8.4 Conductos rectangulares descentrados L3, C1 con y sin hollín.	55
Figura 42. C5.1 Conductos circulares L1, C1, H1.	56
Figura 43. C5.2 Conductos circulares L2, C1, H1.	56
Figura 44. C5.3 Conductos circulares L3, C1, H1.	56
Figura 45. C6.1 Conductos rectangulares L1, C1, H1.	57
Figura 46. C6.2 Conductos rectangulares L2, C1, H1.	57
Figura 47. C6.3 Conductos rectangulares L3, C1, H1.	57
Figura 48. C9.1 Conductos circulares centrados C1.	58
Figura 49. C9.2 Conductos circulares centrados C2.	58
Figura 50. C9.3 Conductos circulares descentrados C1.	59
Figura 51. C9.4 Conductos circulares descentrados C2.	59
Figura 52. C10.1 Conductos rectangulares centrados C1.	59
Figura 53. C10.2 Conductos rectangulares centrados C2.	60
Figura 54. C10.3 Conductos rectangulares descentrados C1.....	60
Figura 55. C10.4 Conductos rectangulares descentrados C2.....	60
Figura 56. C1.1 Conductos centrados con C1 y L1-L3 sin hollín.....	61
Figura 57. C2.1 Conductos descentrados con C1 y L1-L3 sin hollín.	62
Figura 58. C3.1 Conductos centrados con C1 y L1-L3 con hollín.....	62
Figura 59. C4.1 Conductos descentrados con C1 y L1-L3 con hollín.	62
Figura 60. C1.2 Conductos centrados con C2, L1 y sin hollín.	63
Figura 61. C2.2 Conductos descentrados con C2, L1 y sin hollín.	64
Figura 62. C3.2 Conductos centrados con C2, L1 y con hollín.....	64
Figura 63. C4.2 Conductos descentrados con C2, L1 y con hollín.	64

Figura 64. Tiempo computacional y valor medio de TL según valores optimizados con hollín.. 66

Figura 65. Tiempo computacional y valor medio de TL según valores optimizados sin hollín. ..67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Dimensiones de geometría rectangular.	25
Tabla 2. Parámetros del mallado de referencia 1.	26
Tabla 3. Parámetros del mallado de referencia 2.	27
Tabla 4. Parámetros del mallado de referencia 3.	28
Tabla 5. Parámetros del mallado de referencia 4.	29
Tabla 6. Nomenclatura y parámetros de todos los ensayos a contemplar (I).	31
Tabla 7. Nomenclatura y parámetros de todos los ensayos a contemplar (II).	31
Tabla 8. Error relativo del cálculo de TL con Ajuste Modal respecto EF con ANSYS APDL.....	37
Tabla 9. Parámetros de la función "fmincon" en Matlab (<i>Busque El Mínimo de Función Multivariable No Lineal Restringida - MATLAB Fmincon - MathWorks España, n.d.</i>)	43
Tabla 10. Parámetros de la función "ga" en Matlab (<i>Find Minimum of Function Using Genetic Algorithm - MATLAB Ga - MathWorks España, n.d.</i>)	47
Tabla 11. Resultados de optimización utilizando "fmincon" con hollín.....	49
Tabla 12. Resultados de optimización utilizando "fmincon" sin hollín.	49
Tabla 13. Resultados de optimización utilizando "ga" con hollín.	50
Tabla 14. Resultados de optimización utilizando "ga" sin hollín.....	50
Tabla 15. Tiempos computacionales para todos los ensayos optimizados.	50
Tabla 16. Tiempos computacionales de todos los ensayos ejecutados (I).	65
Tabla 17. Tiempos computacionales de todos los ensayos ejecutados (II).	65
Tabla 18. Resultados optimización con hollín.	67

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. OBJETIVOS Y OBJETO DE ESTUDIO DEL TFM.

El principal objetivo de este Trabajo Fin de Máster se basa en el diseño, desarrollo y validación de un método que permita la optimización acústica de un filtro de partículas diésel (DPF). Este proceso suele ser un proceso de elevado coste computacional aplicando métodos llevados a cabo hasta ahora como podrían ser el cálculo por Elementos Finitos. Es por esto mismo, que la premisa que se seguirá será la de reducir el tiempo de computación lo máximo posible, con la intención de obtener una secuencia de comandos que permita optimizar dicho elemento utilizando los menores recursos posibles.

Esto se llevará a cabo tomando cuatro configuraciones diferentes, diferenciándose entre ellas por la geometría de la estructura completa, y la variación de la localización del conducto de salida de la trampa de partículas como se explicará más adelante.

Además de esto, otro de los objetivos planteados es el de establecer cuál de los dos algoritmos de optimización, “fmincon” o “ga”, basados en técnicas distintas es más eficiente computacionalmente hablando, y estableciendo diferencias entre ellos en situaciones en las que sus resultados sean dispares.

1.2. JUSTIFICACIÓN Y MOTIVACIÓN DEL TFM.

En los tiempos actuales, los plazos, el tiempo de desarrollo y los aspectos temporales en general, tienen gran importancia aún más si cabe en el mundo de la ingeniería. En este mundo, la mayor parte de la etapa de cálculo y productiva, recae sobre ordenadores que, por muy potentes que sean, disponen de una capacidad computacional. Es por esto que se trata de un bien muy a tener en cuenta y el cual se debe optimizar en la mayor medida posible.

Es por esto que la motivación del presente Trabajo Final de Máster viene generada por la aportación de una reducción en cuanto al coste computacional de los procesos de optimización, los cuales suelen ser los más costosos en este sentido.

Además, se intenta aplicar esta premisa a un aspecto tan intrínseco a un motor de combustión interna como es el ruido. Es por esto, que se pretende aplicar esta nueva técnica con menor coste computacional, para caracterizar y optimizar las dimensiones de una trampa de partículas diésel desde un punto de vista más eficiente.

Esto continúa con la línea de investigación de un grupo del Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales de la Universitat Politècnica de València, el cual ha llevado a cabo numerosos estudios sobre ruido en elementos de escape dentro del sector de automoción. Para ampliar información en este tema, se remite al lector a las referencias (Denia et al., 2009)(Denia et al., 2012)(Denia et al., 2018)(Sánchez-Orgaz et al., 2017)

1.3. METODOLOGÍA EMPLEADA.

Para llevar a cabo esta investigación, se va a hacer referencia a una técnica denominada como ajuste modal, mediante la cual se caracterizará la acústica que ocurre dentro de los filtros de partículas de diésel (DPF).

Dicha caracterización, se establecerá en base al coeficiente de pérdida de transmisión acústica, denominado como TL. Este coeficiente se explicará en detalle en la sección 2 siguiente.

Una vez caracterizado cada uno de los elementos de trabajo a través de este método, se procederá a optimizarlos. Para ello se hará uso de unos algoritmos de optimización definidos teniendo dos variantes dentro de los mismos.

La primera de las variantes que sería aplicada es la típica en un proceso de optimización basado en gradientes. Por otro lado, la segunda variante se fundamenta en la analogía de la replicación genética humana aplicada aquí a un elemento físico dado que se optimizarán sus propiedades físicas.

Para llevar a cabo este proyecto, se utilizarán algoritmos implementados en MATLAB como programa de cálculo. Por otro lado, se utilizará ANSYS APDL para desarrollar alguna validación necesaria debido a que la técnica de Elementos Finitos es la que viene siendo usada recientemente para el cálculo de este tipo de elementos.

CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS DE FILTROS DE PARTÍCULAS DIÉSEL (DPF).

2.1. FUNCIONAMIENTO DE FILTROS DE PARTÍCULAS DIÉSEL.

En los últimos años, la raza humana ha comenzado a darse cuenta de la importancia que tiene el medio ambiente y el planeta para que pueda ser viable la vida en él tal y como se conoce, con recursos y materias primas en equilibrio con la vida.

Ligado con esto, los automóviles, a pesar de ser una herramienta diaria de trabajo ya sea laboral o de desplazamiento, son uno de los principales contaminantes atmosféricos que se tienen, tanto a nivel de partículas a la atmósfera como de manera acústica.

Es por esto que hace unos años, entorno a la aprobación de la norma medioambiental para automoción Euro 5, se comenzó a exigir que todos los coches diésel, dispusieran de este componente en el sistema de expulsión de gases, ya que hasta ese momento era una característica adicional que suponía un sobrecoste.

Se utilizan para retener las partículas de hollín que salen de la combustión generada en el motor, como consecuencia de una combustión incompleta del combustible. Estas partículas de hollín son retenidas en una membrana que deja pasar los gases de combustión que han sido previamente catalizados. Hay estudios que afirman que se puede llegar a retener entre el 85 y 100 por ciento de las partículas de hollín generadas. Los DPF más utilizados son los que no llevan aditivos, pero también los hay con aditivos que ayudan a la combustión del hollín, pero debido a ese aditivo extra, son menos utilizados.

Puesto que no es más que una membrana que deja pasar los gases reteniendo las partículas sólidas, el principal problema que tienen es que se van colmatando conforme se va acumulando el hollín. Para evitar esto, se produce un fenómeno que se denomina como regeneración. Esta regeneración se puede dar de varias maneras:

- » Regeneración pasiva: Es la más recomendable y es la que se produce de manera normal en el sistema de extracción de gases cuando la temperatura que se alcanza es superior a los 550°C ya que es el entorno de la temperatura de autoignición del carbono, lo cual hace que el hollín no quemado, se queme. Para que se produzca este tipo de regeneración, es necesario que se circule a una velocidad superior a los 60-70 km/h durante al menos 20 minutos. Ya que esto hará que se alcancen dichas temperaturas. Este proceso de regeneración no se produce cuando se realizan trayectos cortos, con tráfico lento, en ciudad o en ambientes muy fríos. Es por este motivo que se recomienda realizar un trayecto de al menos 20 minutos a dicha velocidad para producir dicha limpieza del filtro.
- » Regeneración activa: La propia centralita que comanda todos los parámetros del coche, detecta a través de dos sondas de presión instaladas antes y después del DPF que se está colmatando el filtro debido a que la caída de presión es elevada. Por tanto, en ese momento, se inyecta una pequeña cantidad de combustible que es quemada en el filtro para alcanzar de manera forzada las temperaturas comentadas anteriormente que acaben con el hollín almacenado.

La pérdida de presión que se produce en la sección del filtro, denominada también como presión de retorno, viene dada por:

$$p_2 - p_1 = R_w \cdot u_w \quad (\text{Ec 1})$$

2.2. CONSTITUCIÓN DE LOS DPF.

El filtro de partículas diésel se divide en 5 partes diferenciadas según ciertas bibliografías tales como (Allam & Åbom, 2005)(Allam & Åbom, 2006):

- » Sección transversal de entrada: Perteneciente a la línea de extracción de gases es lo que forma la entrada al propio DPF.
- » Tubo corto y estrecho con partes duras e impermeables: Ya perteneciente al sistema DPF, se trata de las secciones de acceso a la zona de expansión antes del monolito.
- » Sección de filtro formado por muchos capilares con paredes porosas: Denominada también como monolito, es donde se produce realmente el fenómeno de retención del hollín. Es la parte crítica pero más importante.
- » Tubo corto y estrecho con paredes duras e impermeables: Análogo al segundo punto, es el tubo que hace de salida del DPF después de producirse a contracción del sistema.
- » Sección transversal de salida: Zona de conexión aguas abajo con el resto del sistema de extracción de gases de combustión.

Si se pone atención en la sección del filtro (II), también denominada como monolito, de manera esquemática tiene una forma tal como la siguiente:

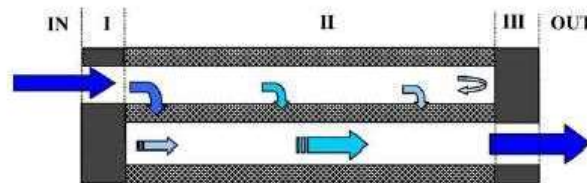


Figura 1. Esquema de un DPF (Allam & Åbom, 2005).

Teniendo por tanto un flujo de los gases:

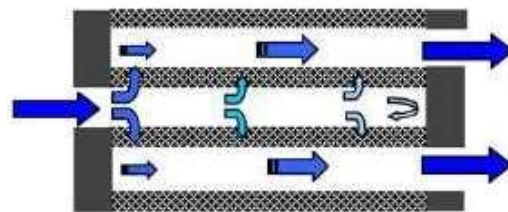


Figura 2. Recorrido de los gases en un DPF (Allam & Åbom, 2005).

Cada uno de estos conductos pertenecientes al filtro, suele tener una dimensión transversal de 1-2 mm. En el límite de esos conductos y bajas frecuencias, se puede asumir un flujo laminar con un factor de pérdida de presión

$$\alpha = \frac{\mu \varepsilon}{d_h^2} \quad (\text{Ec 2})$$

donde μ es la viscosidad dinámica, ε es el factor de caída del canal tomándolo normalmente como 28.45 debido a la relación de flujo que atraviesa el filtro respecto a la que realmente circula por el interior de este y d_h es la anchura del canal.

El acoplamiento de los conductos a través de las paredes porosas puede ser descrito a través de la ley de Darcy. El modelo presentado en la referencia (Allam & Åbom, 2005, 2006) aporta un coeficiente de pérdida por transmisión dependiente de la frecuencia y confirma que por dichos capilares se puede aceptar el modelo de onda plana.

Esta sección del filtro, normalmente se encuentra construida en carburo de silicio impregnado con platino y paladio para favorecer la oxidación y quemar la carbonilla produciendo por tanto un proceso más rápido y eficiente.

Si se realiza una comparación con los conductos de un catalizador, existen diferencias y similitudes. En cuanto a las similitudes se puede encontrar que en ellos las ondas se propagan mediante un flujo laminar debido a la capilaridad de los conductos, teniendo ondas planas. Sin embargo, en el caso del catalizador, lo que se tienen son numerosos conductos abiertos por ambos lados que lo que hacen es dividir el flujo total en muchos individuales aumentando así la reactividad de la reacción y quemando los compuestos inquemados.

CAPÍTULO 3: ACÚSTICA APLICADA A ELEMENTOS DEL SISTEMA DE ESCAPE. FILTROS DE PARTÍCULAS DIÉSEL (DPF).

3.1. TEORÍA ACÚSTICA.

3.1.1. La acústica, el sonido y el ruido.

En cuanto a la acústica, es definida como una rama de las ciencias, enmarcada dentro del ámbito físico que estudia el sonido por medio de modelos físico-matemáticos. En ella se estudian aspectos tales como propagación, transmisión, etc.

Es a través de esta ciencia por la cual se tiene en cuenta al sonido como una vibración mecánica que es capaz de propagarse por diferentes medios. El más común en el entorno que rodea al ser humano es el aire, por el cual el sonido se mueve a una velocidad de 340 m/s en c.n.

El sonido está presente, en mayor o menor medida, en todas las acciones cotidianas de los seres vivos. Es por esto que es tan importante estudiarlo, investigar sobre ello y tratar de mejorar las condiciones al respecto. Solo existe una franja de frecuencias sonoras donde el oído humano es capaz de detectar dicho sonido, esa es entre 20 Hz y 20.000 Hz.

Sin embargo, cuando la fuente que emite el sonido, lo hace a niveles muy altos, con una frecuencia determinada, etc., se denomina ruido. Esto también se le atribuye la contaminación acústica, ruidos sin un patrón que resulte agradable a los oídos, etc.

3.1.2. Tipos de ondas.

Existen diferentes clasificaciones bibliográficas para catalogar las ondas acústicas. Una de las más utilizadas cuando a análisis se refiere son:

- » Ondas progresivas: Son aquellas que se propagan en el sentido creciente de la coordenada espacial, siguen una función del tipo:

$$f(ct - x) \quad (\text{Ec 3})$$

- » Ondas regresivas: Son aquellas que se propagan en el sentido decreciente de la coordenada espacial, siguen una función del tipo:

$$f(ct + x) \quad (\text{Ec 4})$$

- » Ondas estacionarias: Estas son las que no tienen ningún flujo de carga y por tanto no transmiten energía a lo largo de ellas.

3.1.3. Deducción de la ecuación de ondas.

Para conseguir la ecuación de ondas, se necesita partir de otras tres ecuaciones del ámbito de la mecánica de fluidos y termodinámica. Estas ecuaciones son: Ecuación dinámica, ecuación de continuidad y ecuación de estado.

Además, se necesitan unas hipótesis basadas en la definición de las perturbaciones sonoras en cuanto a la presión, velocidad y densidad del medio, siendo las siguientes:

- $P_T = P_{acust} + P_{0media}$ con $P \lll P_0$
- $\rho_T = \rho_{acust} + \rho_{0media}$ con $\rho \lll \rho_0$
- $u_T = u + u_0$ donde $u_0 = 0$ por no existir flujo medio y encontrarse el medio de propagación en reposo.

Utilizando la ecuación dinámica, se puede llegar a:

$$-\frac{\partial P}{\partial x} = \rho_0 \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \quad (\text{Ec 5})$$

Si se utiliza ahora la ecuación de continuidad, se puede llegar a:

$$\rho_0 \cdot \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (\text{Ec 6})$$

Desarrollando la ecuación de estado, se puede llegar a:

$$\begin{aligned} P_{acust} &= \frac{\partial P_T}{\partial \rho_T} \cdot \rho_{acust} \rightarrow P_{acust} \\ &= c^2 \cdot \rho_{acust} \end{aligned} \quad (\text{Ec 7})$$

Sustituyendo la ecuación de estado en la de continuidad, derivándolas respecto del tiempo, derivando la ecuación dinámica y desarrollándolas, se obtiene la ecuación general de ondas:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 P_T}{\partial x^2} &= \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 P_T}{\partial t^2}; \text{ sin flujo medio} \\ u_0 &= 0 \end{aligned} \quad (\text{Ec 8})$$

Si existiera flujo medio, el proceso a seguir sería el mismo, pero considerando $u_0 \neq 0$, lo cual llevaría a la ecuación de ondas convectiva:

$$\left(1 - \frac{u_0^2}{c^2}\right) \cdot \frac{\partial^2 P_T}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P_T}{\partial t^2} + \frac{2u_0}{c} \cdot \frac{\partial P_T}{\partial x \partial t} \quad (\text{Ec 9})$$

Proponiendo una solución genérica para la Ec 8:

$$P(x, t) = f(ct - x) + g(ct + x) \quad (\text{Ec 10})$$

Se va a comprobar que las Ec 3 y Ec 4, son soluciones para la ecuación de ondas.

Desarrollando dicha solución se llega a:

$$p(x, t) = A \cos(\omega t - kx + \varphi_1) + B \cos(\omega t - kx + \varphi_2) \quad (\text{Ec 11})$$

La cual, escribiéndolo en modo de notación compleja, se obtiene:

$$p(x, t) = \hat{A} e^{-j\omega t} + \hat{B} e^{j\omega t} \quad (\text{Ec 12})$$

Derivándola respecto de la coordenada espacial y arreglando los coeficientes finales, se puede obtener el campo de velocidades de dicha onda, que resulta tal como:

$$u(x, t) = \frac{1}{Z_0} (\hat{A} e^{-j\omega t} - \hat{B} e^{j\omega t}) \quad (\text{Ec 13})$$

3.1.4. El medio de propagación.

Se determina medio de propagación a todo aquel sólido, líquido o gas que es capaz de permitir la propagación de una onda mecánica a través de él. En cuanto a las velocidades de propagación de las ondas sonoras, hay que puntualizar que es más elevada cuanto más compactas están las estructuras. Es por esto que el medio sólido es el que mayor velocidad de propagación presenta ante una perturbación sonora.

Sin embargo, comúnmente, el medio que propaga mayor cantidad de sonidos audibles por el oído humano es el aire. En este caso, dentro de los filtros de partículas DPF encontramos gases que pasan a través de un sólido, por tanto, se puede nombrar como una combinación de medios de propagación, siendo dominante espacialmente el aire.

En base a esto, las propiedades del aire como densidad o velocidad, serán utilizadas a través de las ecuaciones de gas perfecto, obteniendo:

$$\rho_T = \frac{P_T \cdot M_m}{R \cdot T} \quad (\text{Ec 14})$$

$$c = \sqrt{\frac{\gamma \cdot P_T}{\rho_T}} \quad (\text{Ec 15})$$

3.1.5. Impedancia acústica.

En general es un cociente entre presión y velocidad acústica, y su significado físico depende del contexto. De forma simple, en algunos casos representa la “oposición” del medio a transmitir la onda acústica.

En el caso de la impedancia característica del medio, se define como:

$$Z = \rho_0 \cdot c \quad (\text{Ec 16})$$

3.1.6. Fenómenos presentes en la propagación del sonido (transmisión, TL, cambio sección, absorción, materiales absorbentes...)

3.1.6.1. Cambio de medio de propagación. Reflexión.

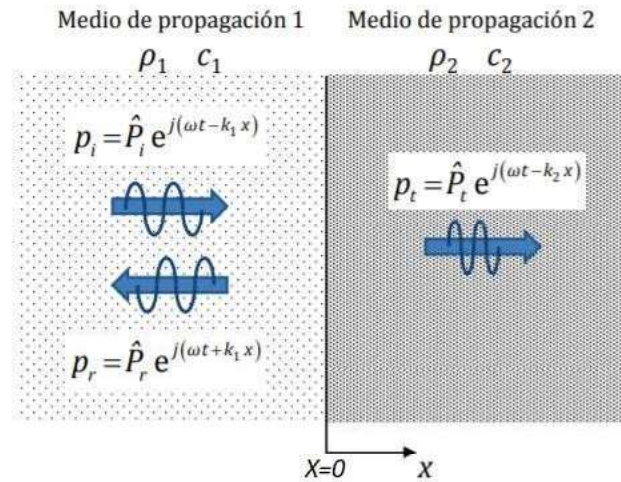


Figura 3. Esquema de ondas en un cambio de medio de propagación.

Algo muy común en la propagación del sonido es el hecho de que una onda atraviese varios medios diferentes. En la interfase de estos medios, uno de los fenómenos que ocurre es el de reflexión. Éste, se encuentra representado con un coeficiente que se deducirá a continuación:

Para ello vamos a hacer uso de la continuidad de presión (en $x=0$) y la continuidad de velocidad (en $x=0$) las cuales se ven en las ecuaciones siguientes:

$$P_1 = P_2 \rightarrow P_i + P_r = P_t \quad (\text{Ec } 17)$$

$$u_1 = u_2 \rightarrow u_i + u_r = u_t \quad (\text{Ec } 18)$$

Donde se representan las ondas incidentes, reflejadas y la transmitida en un cambio de medio.

Trabajando y desarrollando con ellas en $x=0$, se llega al coeficiente de reflexión de una onda en base a la impedancia de cada medio:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (\text{Ec } 19)$$

La cual si se expresa en términos de potencia:

$$\alpha_r = |R|^2 \quad (\text{Ec } 20)$$

Siendo estas, formulas generales aplicables tanto para impedancias reales como complejas.

Si se dan valores a las ecuaciones anteriores, fácilmente se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- » Los valores posibles para el coeficiente R pertenecen al intervalo [-1,1] donde el valor 1 se obtiene cuando el medio de origen tiene una impedancia mucho mayor que el segundo medio y el valor -1 en el caso contrario. Cuando ambas impedancias son iguales, se tiene un valor de R=0.
- » En el caso del parámetro R el orden de los materiales de origen-destino, influye en el valor final. Al contrario, ocurre con el parámetro basado en potencias, donde el orden de los materiales no varía el resultado final.

3.1.6.2. Cambio de medio de propagación. Transmisión.

Análogamente a la manera de trabajar y las ecuaciones de partida para obtener el coeficiente de reflexión, se puede trabajar para obtener el coeficiente de transmisión que quedaría como:

$$T = \frac{2 \cdot Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (\text{Ec 20})$$

$$\alpha_t = \frac{4 \cdot Z_1 \cdot Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (\text{Ec 21})$$

Sin embargo, en este caso, la basada en potencias no es válida cuando las impedancias son complejas, solo cuando sean reales.

Si se dan valores a las ecuaciones anteriores, fácilmente se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- » Los valores posibles para el coeficiente T pertenecen al intervalo [0,2] donde el valor nulo se obtiene cuando el medio de origen tiene una impedancia mucho mayor que el segundo medio y el valor 2 en el caso contrario. Cuando ambas impedancias son iguales, se tiene un valor de T=1.
- » En el caso del parámetro T el orden de los materiales de origen-destino, influye en el valor final. Al contrario ocurre con el parámetro basado en potencias, donde el orden de los materiales no varía el resultado final.

3.1.6.3. Pérdidas por transmisión TL.

Un parámetro muy común en el argot técnico para referirse a la pérdida de potencia sonora cuando se produce la transmisión de una onda entre dos medios diferentes es el Coeficiente de pérdidas de transmisión (Transmission Loss, TL) que se define de como una simple diferencia de los niveles de potencia sonora:

$$TL = L_{W_i} + L_{W_t} = 10 \cdot \log\left(\frac{Pot_i}{Pot_t}\right) = 10 \cdot \log\left(\frac{1}{\alpha_t}\right) \quad (\text{Ec 22})$$

Este coeficiente es un aspecto muy a tener en cuenta en los elementos de los sistemas de escape de los motores de combustión interna, entre los que se encuentra el filtro

DPF que es objeto de este proyecto ya que no solo tiene funcionalidades de reducción de efectos nocivos de los gases de escape.

Es por esto, que como se verá más adelante, este coeficiente será lo que se quiera optimizar con los algoritmos utilizados más adelante.

3.1.6.4. Cambio de sección.

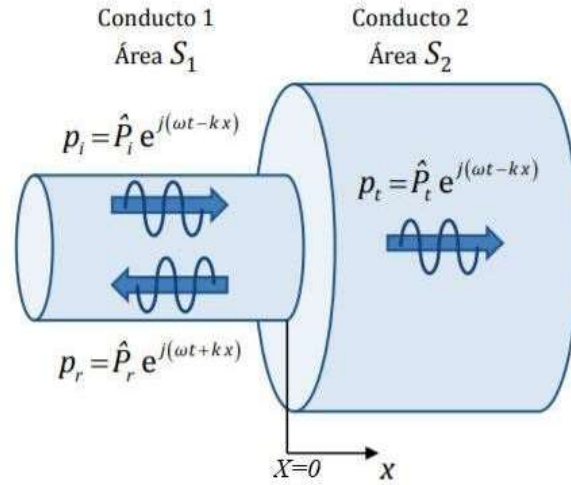


Figura 4. Fenómeno de transmisión y reflexión en un cambio de sección.

Llegado a este punto, se lleva a cabo un procedimiento similar al visto en el 3.1.6.1 y 3.1.6.2 pero sin embargo en este caso, se desarrollan las expresiones con la intención de obtener relaciones de superficies en la expresión final. De esta manera las expresiones obtenidas son las siguientes:

$$R = \frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} \quad (\text{Ec 23})$$

$$\alpha_r = R^2 = \left(\frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} \right)^2 \quad (\text{Ec 24})$$

$$T = \frac{2 \cdot S_1}{S_1 + S_2} \quad (\text{Ec 25})$$

$$\alpha_t = |T|^2 \cdot \frac{S_2}{S_1} = \frac{4 \cdot S_1 \cdot S_2}{(S_1 + S_2)^2} \quad (\text{Ec 26})$$

En el caso de los elementos de escape tales como puede ser el propio DPF, un silenciador, etc. Lo que se tiene son 3 cambios de sección en serie como se aprecia en la Figura 5. En este caso se puede definir un coeficiente de pérdida como:

$$TL = 10 \cdot \log \left(\frac{Pot_1^{pro}}{Pot_3^{pro}} \right) \quad (\text{Ec 27})$$

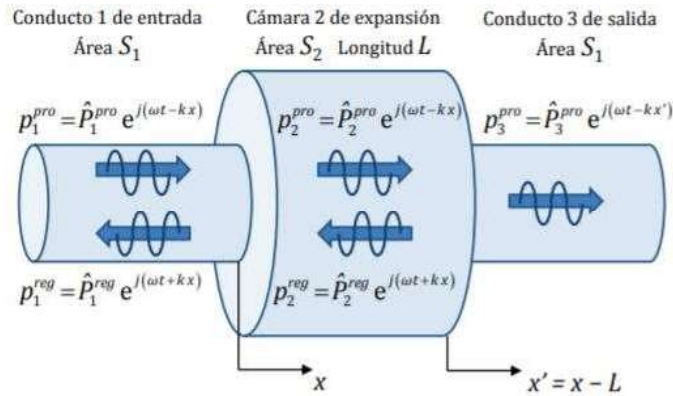


Figura 5. Fenómeno de transmisión y reflexión en un cambio de sección doble.

3.1.7. Medición del sonido. Niveles.

Este fenómeno, al igual que la mayoría de los estudiados por la ciencia tienen una forma de medirlo. En este caso, la magnitud que se utiliza para medir es el Decibelio [dB]. Esta unidad no es más que el logaritmo de la presión acústica. Esto se hace ya que así se compacta la escala sonora y, además, esta escala logarítmica que asemeja más a la del oído humano ya que no presenta un comportamiento lineal.

Dentro de esto, los niveles auditivos se pueden medir en base a tres conceptos: intensidad, potencia y presión sonora, los cuales se definen de la siguiente manera:

» Nivel de intensidad sonora:

$$L_I = 10 \cdot \log\left(\frac{I}{I_{ref}}\right) [dB] \text{ donde } I_{ref} = \frac{10^{-12} W}{m^2} \quad (Ec 28)$$

» Nivel de potencia sonora:

$$L_W = 10 \cdot \log\left(\frac{Pot}{Pot_{ref}}\right) [dB] \text{ donde } Pot_{ref} = 10^{-12} W \quad (Ec 29)$$

» Nivel de presión sonora:

$$L_P = 10 \cdot \log\left(\frac{P_{eff}^2}{P_{ref}^2}\right) [dB] \text{ donde } P_{ref} = 20 \cdot 10^{-6} Pa \text{ y } P_{eff} = \frac{P_{pico}}{\sqrt{2}} \quad (Ec 30)$$

3.2. EL SONIDO EN CONDUCTOS CAPILARES. MODELADO DEL MONOLITO 3D-1D

Desde el punto de vista del comportamiento del monolito existente entre ambos lados del filtro de partículas, y donde realmente se produce el filtrado, se puede hacer dos enfoques. El primero de ellos se trataría de establecer un modelo 3D que se equipara más con el aspecto físico del elemento. Sin embargo, últimas investigaciones llevadas a cabo por diferentes líneas, entre ellas la desarrollada en el Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales de la UPV, han demostrado que realmente se puede llevar a cabo a través de un modelado mucho más sencillo, combinando geometrías 3D con aspectos de transferencia 1D. El aspecto final de ambos casos, puede observarse en las siguientes figuras:

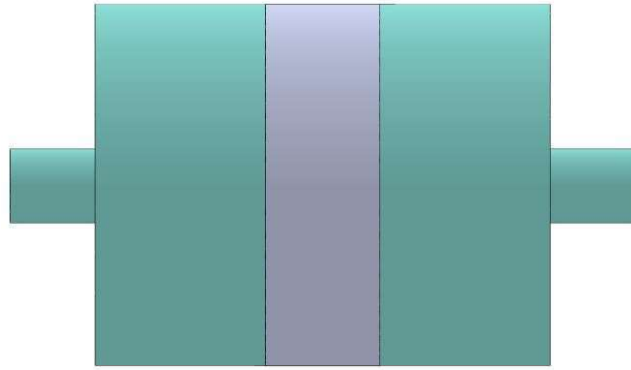


Figura 6. Modelado de monolito 3D-3D.

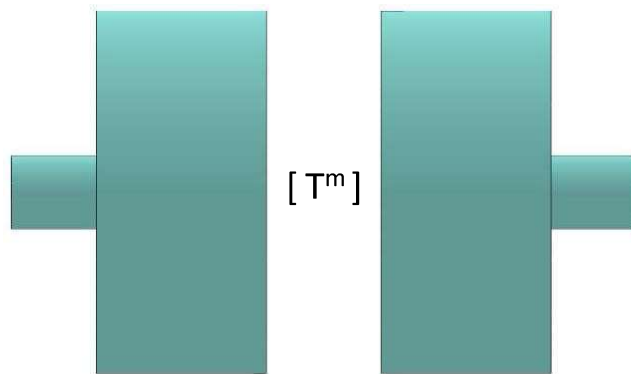


Figura 7. Modelado de monolito 3D-1D

Este último modelo (3D-1D) es el objetivo en el presente proyecto debido a que la finalidad del mismo es reducir el coste computacional a la hora de resolver el problema acústico a través de simulaciones. Por tanto, de esta manera, se evitaría el trabajar con un modelo 3D más complejo, y que, al tratar con Elementos Finitos, todavía incrementaría más ese coste computacional.

3.1.8. Modelado 3D-1D. Matriz de transferencia.

En el citado modelo, dicha reducción del coste computacional y de la simplicidad del modelado, viene marcado porque se trata de un modelo que establece una matriz de transferencia entre la entrada y salida del monolito, pertenecientes al elemento físico 3D.

Esto se denomina como un método nodo a nodo. Ya que particularmente cada punto de entrada al monolito, tiene un punto de salida asociado.

Esto recientemente se había estudiado a través del Método de los Elementos Finitos, cuyas ecuaciones que rigen su modelaje y su comportamiento, se comentan a continuación. Parte de esta información ha sido adquirida del artículo de investigación (Denia, 2018), tutor del presente trabajo, en su epígrafe 3.1.2 de dicho documento:

Es evidente que, en este caso, se tienen dos zonas diferenciadas siendo estas la entrada y salida del monolito. Es debido a esto, que se tendrá una duplicidad de ecuaciones ya que se debe particularizar la entrada y salida del monolito.

Combinando las ecuaciones de Selamet, Helmholtz y Galerkin (Denia, 2018), se puede llegar a una ecuación para la sección de entrada como la siguiente:

$$\sum_{e=1}^{N_{a1}^e} \left(\int \nabla^T \mathbf{N} \nabla \mathbf{N} \, d\Omega - k_0^2 \int \mathbf{N}^T \mathbf{N} \, d\Omega \right) P_{a1}^e = \sum_{e=1}^{N_{a1}^e} \int \mathbf{N}^T \frac{\partial P_{a1}}{\partial n} \, d\Gamma \quad (\text{Ec 31})$$

Siendo \mathbf{N} el vector que representa las funciones de forma y P_{a1}^e el vector que representa los valores nodales

Debido a que no existe una continuidad del campo de presiones, ambas se representan utilizando la matriz de transferencia de la forma:

$$P_{a1} = T_{11}^{DPF} P_{a2} - T_{12}^{DPF} \left(-\frac{1}{j \omega \rho_0} \frac{\partial P_{a2}}{\partial n} \right) \quad (\text{Ec 32})$$

$$-\frac{1}{j \omega \rho_0} \frac{\partial P_{a1}}{\partial n} = T_{21}^{DPF} P_{a2} - T_{22}^{DPF} \left(-\frac{1}{j \omega \rho_0} \frac{\partial P_{a2}}{\partial n} \right) \quad (\text{Ec 33})$$

Sustituyendo una en la otra y desarrollando la ecuación, se llega a:

$$\frac{\partial P_{a1}}{\partial n} = -j \omega \Pi_{21} T_{22}^{DPF} P_{a1} + j \omega (\Pi_{22} T_{22}^{DPF} - \rho_0 T_{21}^{DPF}) P_{a2} = j \omega \Pi_{11} P_{a1} - j \omega \Pi_{12} P_{a2} \quad (\text{Ec 34})$$

Ahora se va a establecer el modelo para la sección de entrada, siendo análogo para la sección de salida. Trabajando con las ecuaciones anteriores, se llega a la siguiente:

$$\sum_{e=1}^{N_{a1}^e} \left[\left(\int \nabla^T \mathbf{N} \nabla \mathbf{N} \, d\Omega - k_0^2 \int \mathbf{N}^T \mathbf{N} \, d\Omega \right) P_{a1}^e + j \omega \Pi_{11} \int \mathbf{N}^T \mathbf{N} P_{a1}^e \, d\Gamma - \right. \\ \left. - j \omega \Pi_{12} \int \mathbf{N}^T \mathbf{N} P_{a2}^e \, d\Gamma \right] = \sum_{e=1}^{N_{a1}^e} \int \mathbf{N}^T \frac{\partial P_{a1}}{\partial n} \, d\Gamma \quad (\text{Ec 35})$$

Sin embargo, esto computacionalmente es muy costoso y, por tanto, al tratar con expresiones muy complejas, se necesitan tiempos de cálculo muy elevados. Es por esto que estudios como los comentados anteriormente, han cambiado la línea de investigación en torno al uso de una matriz de transferencia.

Esta aproximación arroja un buen resultado debido a que el monolito no es una parte con longitud dominante dentro del conjunto, por tanto, se puede sustituir por esta matriz. Esta relación entre nodos, se representa a través de la matriz de transferencia 2x2 siguiente:

$$T^{DPF} = \begin{bmatrix} T_{11}^{DPF} & T_{12}^{DPF} \\ T_{21}^{DPF} & T_{22}^{DPF} \end{bmatrix} \quad (\text{Ec 36})$$

Debida a esta matriz de transferencia se pueden saber los valores de las presiones y velocidades en la sección de entrada sabiendo las de salida y viceversa a través de la expresión:

$$\begin{Bmatrix} P_{entrada} \\ U_{entrada} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11}^{DPF} & T_{12}^{DPF} S_{salida} \\ T_{21}^{DPF} & T_{22}^{DPF} S_{salida} \\ S_{entrada} & S_{entrada} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_{salida} \\ U_{salida} \end{Bmatrix} \quad (Ec 37)$$

Siendo esta matriz, un producto de las cuatro partes que forman el filtro de partículas, como se explica en la Figura 1 se tiene lo siguiente:

$$T_{DPF} = T_{entrada} T_I T_{II} T_{III} T_{salida} \quad (Ec 38)$$

Esta matriz de transferencia es la que se utiliza en el código de ajuste modal implementado en Matlab para modelizar el comportamiento acústico del monolito. Para llevar a cabo la obtención de T_{II} , se puede encontrar mayor información sobre el modelo en las referencias (Allam & Åbom, 2005) y (Allam & Åbom, 2006). Por otro lado, en cuanto a las matrices de T_I y T_{III} , considerando cada uno de los conductos (capilares) de los cuales se compone la membrana del DPF, se puede obtener que:

$$T_{I_cap} = T_{III_cap} = \begin{bmatrix} 1 & j \frac{\omega l}{S_{cap}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (Ec 39)$$

Estos valores cambiarán desde la regeneración de la trampa donde se puede considerar que $S_{cap,I} = S_{cap,III}$ debido a que se tiene un filtro limpio donde no existe la presencia de hollín. Conforme se vaya colmatando de partículas de inquemados, se decantará hacia $S_{cap,I} < S_{cap,III}$.

Definiendo esto, se pueden unificar en dos matrices de transferencia, cuya expresión general sería:

$$T_i = \begin{bmatrix} 1 & Z_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (Ec 40)$$

Continuando le desarrollo, la expresión cuando $i = \text{entrada} + I$ sería:

$$Z_i = \frac{\rho_{entr} c_{entr}}{S_{entr}} M_{entr} \left(\frac{1}{m_{entr}^2} - 1 \right) + j \frac{\rho_{entr} \omega l}{S_{cap,I} N_{cap}} \quad \text{con} \quad \left(m_{entr} = \frac{S_{cap,I} N_{cap}}{S_{entr}} \right) \quad (Ec 41)$$

Mientras que, cuando $i = \text{salida} + III$ sería:

$$Z_i = 2 \frac{\rho_{sal} c_{sal}}{S_{sal}} M_{sal} \left(1 - \frac{1}{m_{sal}} \right) + j \frac{\rho_{sal} \omega l}{S_{cap,III} N_{cap}} \quad \text{con} \quad \left(m_{sal} = \frac{S_{cap,III} N_{cap}}{S_{sal}} \right) \quad (Ec 42)$$

En las ecuaciones anteriores, es de notar que el producto de $S_i \cdot N_i$ tanto para I como para III adaptan la impedancia acústica de las masas de aire en cada sección. Esto es debido a que en los textos de Allam y Åbom (Allam & Åbom, 2005) y (Allam & Åbom, 2006) se trabaja con flujo volumétrico obteniendo T_{II} cuando por el contrario, el modelo de Matlab hace uso de la velocidad en términos acústicos.

CAPÍTULO 4: CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DE FILTROS DE PARTÍCULAS MEDIANTE LA TÉCNICA DE AJUSTE MODAL

La técnica se trata de un procedimiento novedoso desarrollado por numerosos investigadores del sector. En documentos y artículos de esos mismos autores, se ha basado la búsqueda de las ecuaciones y modelos necesarios para la implementación de esta técnica. Esos documentos son algunos de los indicados en la bibliografía como (Denia et al., 2018) y resto de documentos relacionados con el grupo de investigación de la UPV del Departamento de Mecánica y de Materiales.

4.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA A TRATAR.

Como se ha comentado en apartados anteriores, la principal función de este sistema DPF es el filtrado de partículas inquemadas para evitar que se expulsen al ambiente cumpliendo la norma Euro 6 vigente para el sector de automoción. Además, ya no solo por cumplimiento de normativa, sino por el propio cuidado de algo tan importante como el medioambiente que nos rodea, deben ser aspectos en los cuales mantener una investigación y desarrollo constante.

Sin embargo, además de esta función de filtrado, se ha demostrado a lo largo de los últimos años, que, debido a las características geométricas y la naturaleza disipativa del monolito en cuestión, también este elemento tiene un efecto importante en la reducción de las emisiones sonoras. Formando este efecto también parte de una contaminación ambiental y acústica que perjudica al entorno en el que existe vida.

Por esto mismo, es necesario evaluar y determinar el comportamiento acústico del sistema de escape completo, introduciendo dispositivos como filtros, catalizadores, conductos, etcétera y no solo los silenciadores.

Es por esto mismo que en el presente proyecto se va a modificar los diferentes parámetros geométricos del DPF para optimizar esa atenuación sonora debido a que se maximice el TL del sistema.

4.2. GEOMETRÍAS Y MALLA DE REFERENCIA.

Para aplicar la metodología comentada anteriormente, se va a establecer cuatro geometrías generales para el filtro de partículas diésel. Estas geometrías van a ser: dos de sección circular y dos de sección rectangular.

Antes de hablar más en detalle de cada geometría, hay que puntualizar que las dimensiones de los conductos de entrada y salida, son circulares en todo caso y tienen un $R = 0,0258$ m. Por otro lado, para el caso circular, el radio de la cámara es $R = 0,1275$ m. En el caso rectangular, claramente no se puede establecer este parámetro representativo para caracterizarlo, pero queda decir que el área equivalente que forma dicho elemento es igual a un círculo de radio anterior ($R = 0,1275$ m). De esta manera, las dimensiones de la cámara rectangular se han establecido en:

Parámetro	Valor
Conducto entrada R1	0,0258 m
Anchura a	0,14 m
Altura b	0,29 m
Radio chaflán	0,0431 m
Conducto salida R2	0,0258 m

Tabla 1. Dimensiones de geometría rectangular.

En cuanto a los elementos de mallado elegidos, en todo caso se han elegido elementos basados en interpolación cuadrática ya que se sabe que arrojan resultados más afines ya que se adaptan mejor a las deformaciones debido a tener nodos de interpolación en el punto medio de los lados del elemento. Dentro de los elementos cuadráticos, se ha usado en su mayoría los de tipo cuadrilátero de 8 nodos, aunque en algún momento se han tenido que utilizar triángulos de 6 nodos.

Ahora se continua con el detalle de cada una de las geometrías y mallas desarrolladas:

4.2.1. Geometría 1: Sección circular con entrada y salida alineadas.

Esta podría ser considerada la malla más básica y estandarizada que se va a analizar. En este caso se tiene el conducto de entrada y salida alineados entre sí.

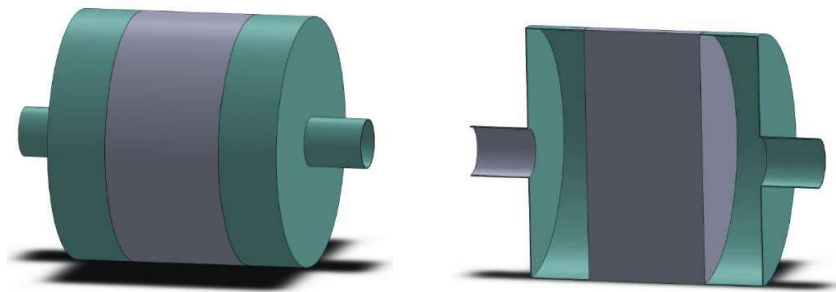


Figura 8. Modelado 3D de la geometría 1.

Debido a la doble simetría existente en los ejes longitudinal y transversal, se modelará en Matlab para el análisis tan solo un cuarto de la geometría total.

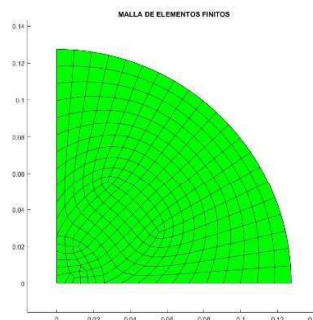


Figura 9. Mallado de referencia de la geometría 1.

En cuanto a las características de tamaño de la malla de referencia, se va a establecer 2 tamaños de elementos. Un primer tamaño que dará lugar a una malla más fina en la zona del tubo, donde se produce una parte más crítica de entrada al sistema. Un

segundo tamaño en el interior de la cámara que dará lugar a una malla más gruesa. A modo de detalle, se tabula el valor de los parámetros de esta malla:

Parámetro	Valor	
Tamaño de elemento	En el tubo	0,005 m
	En la cámara	0,01 m
Nº Elementos	315	
Nº Nodos	1000	

Tabla 2. Parámetros del mallado de referencia 1.

4.2.2. Geometría 2: Sección circular con salida desfasada.

La decisión de establecer una geometría donde uno de los conductos se encuentre descentrado respecto al eje longitudinal del DPF es para intentar demostrar si el hecho de forzar a los gases a un cambio de sección asimétrico, ayuda en cuanto a la atenuación acústica se refiere.

El criterio para establecer el desfase entre la posición centrada del conducto y la presente ha sido, forzando que el propio conducto de salida se establezca sobre la línea nodal del primer modo radial de orden superior. Esto es debido a que los modos de orden superior son modos tridimensionales, por tanto, no son de onda plana. Estos modos, como se puede ver en algunos artículos recogidos en la bibliografía, se dan conforme se eleva la frecuencia.

Cumpliendo con esta característica, se tiene el conducto en una zona de baja presión acústica. Debido a esto, el TL se va a mantener en un nivel razonable.

Para el caso circular, como es el presente, existe una fórmula que arroja la línea nodal comentada en función del radio de la cámara circular ($R = 0,1275 \text{ m}$):

$$Offset_{L_{nodal}} = 0,6276 \cdot R \quad (\text{Ec } 43)$$

Aplicando esta fórmula, se obtiene que dicha línea nodal donde se debe colocar el conducto de salida se encuentra a **0,08 m** desde el centro.

Comentado esto, en las siguientes figuras se puede apreciar el DPF en cuestión y la malla de referencia establecida.

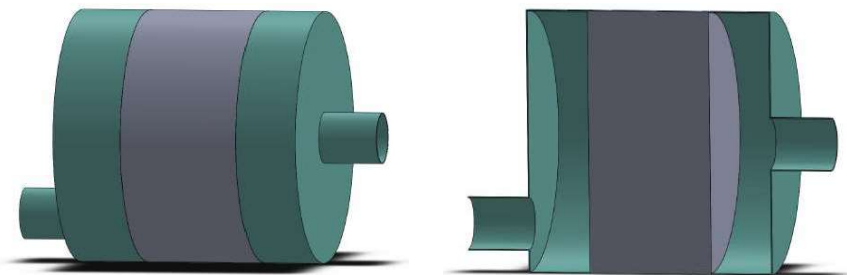


Figura 10. Modelado 3D de la geometría 2.

En este caso, la malla no modela una cuarta parte de la geometría sino la mitad ya que en ese caso no existen dos ejes de simetría.

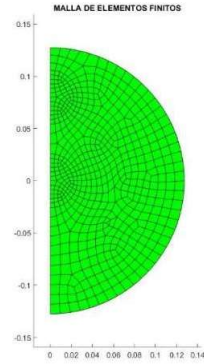


Figura 11. Mallado de referencia de la geometría 2.

Por último, se mantiene la metodología de establecer una malla más fina en la zona de los conductos que en la cámara en cuestión como se puede ver en la Figura X. Cuyos parámetros son:

Parámetro	Valor	
Tamaño de elemento	En el tubo	0,005 m
	En la cámara	0,01 m
Nº Elementos	579	
Nº Nodos	1820	

Tabla 3. Parámetros del mallado de referencia 2.

4.2.3. Geometría 3: Sección rectangular con entrada y salida alineadas.

Esta geometría es la primera variación de la sección cuadrada. Recoge las esquinas en chaflán evitando así zonas de discontinuidades y altas concentraciones mecánicas. En este primer caso, se tienen nuevamente los dos conductos alineados, siendo similar al caso de la geometría 1 salvo por la obviedad del cambio de sección.

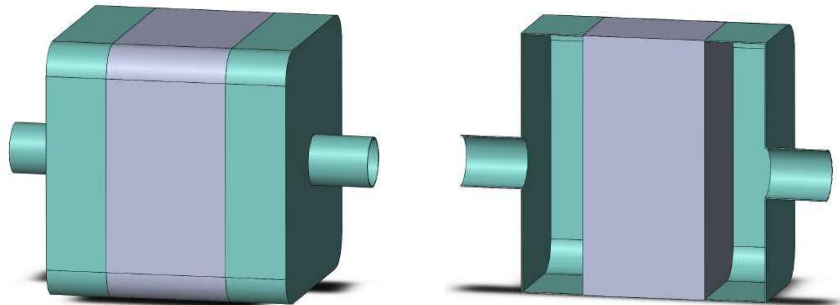


Figura 12. Modelado 3D de la geometría 3.

Al igual que ocurre con la geometría 1, se modela solamente una cuarta parte, reduciendo así el coste computacional:

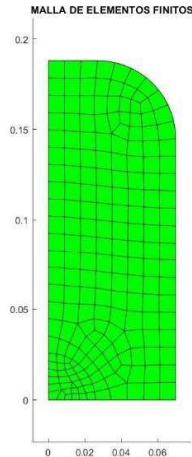


Figura 13. Mallado de referencia de la geometría 3.

En cuanto a los parámetros de la malla:

Parámetro	Valor	
Tamaño de elemento	En el tubo	0,005 m
	En la cámara	0,01 m
Nº Elementos	194	
Nº Nodos	641	

Tabla 4. Parámetros del mallado de referencia 3.

4.2.4. Geometría 4: Sección rectangular con salida desfasada.

Por último, quedaría por comentar el desfase del conducto de salida de la geometría rectangular. La justificación es similar a la hecha para la geometría 2 ya que esa distancia de descentrado se ha calculado para que el conducto caiga sobre la línea nodal, con la intención de que se encuentre en una situación de presión nula.

Si se simula la distribución de presión transversal dentro de este segundo modo de orden superior, se obtiene lo siguiente:

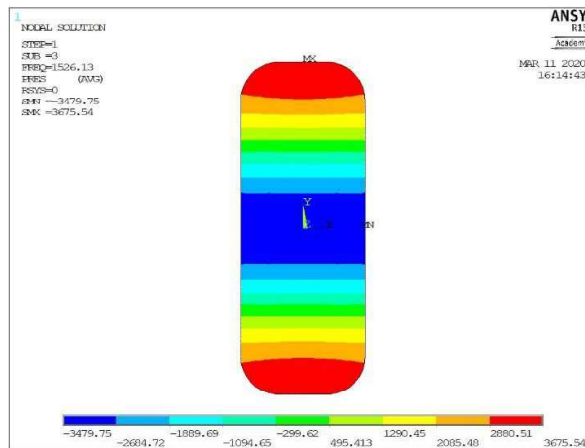


Figura 14. Distribución de la presión transversal en el segundo modo de orden superior para la geometría rectangular.

Como se aprecia en la Figura 14, dicha línea nodal de presión nula está representada por la zona verde, por tanto, se podría desfasar tanto hacia arriba como hacia abajo. En particular este ensayo se ha hecho a una temperatura de operación (500°C) obteniendo una frecuencia de dicho modo de 1526,13 Hz. Manteniendo las condiciones de flujo frío (15°C) que se van a utilizar en el presente proyecto, la frecuencia que se obtiene es de 929 Hz.

En base a esto, se calcula el offset necesario para que el conducto recaiga en esa zona, obteniendo una distancia de **0,0913 m** desde el centro. Esta variación se aprecia en el modelado siguiente:

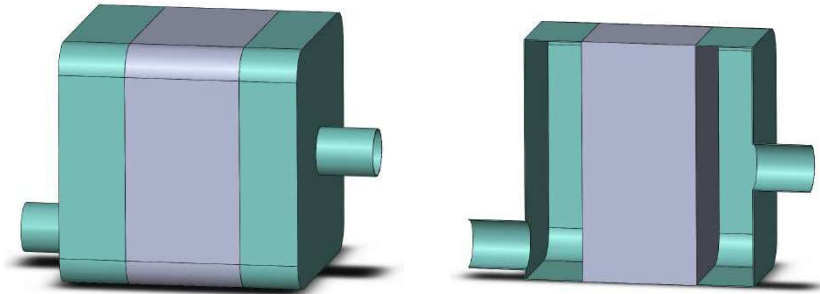


Figura 15. Modelado 3D de la geometría 4.

En este caso, debida a la falta de un segundo eje de simetría de lleva a cabo el mallado de la mitad de la pieza:

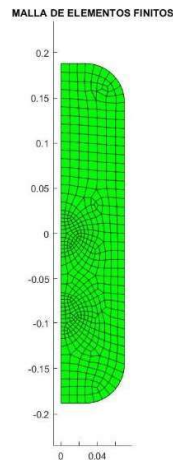


Figura 16. Mallado de referencia de la geometría 4.

Teniendo los siguientes parámetros de mallado, con la morfología comentada al inicio de esta sección:

Parámetro	Valor	
Tamaño de elemento	En el tubo	0,005 m
	En la cámara	0,01 m
Nº Elementos	501	
Nº Nodos	1606	

Tabla 5. Parámetros del mallado de referencia 4.

4.3. VARIABLES DE ESTUDIO.

Una vez comentadas estas cuatro geometrías y sus mallas de referencia, se va a comentar las variables que van a servir de estudio. En el problema, existen ciertos parámetros acotados que deben permanecer invariables durante el proceso de optimización del sistema como pueden ser los radios, entradas y salidas, materiales...

Pero aparte de ellos, se establecen unos ensayos específicos basados en unos valores acotados para las variables elegidas para estudio. Dichas variables son las siguientes:

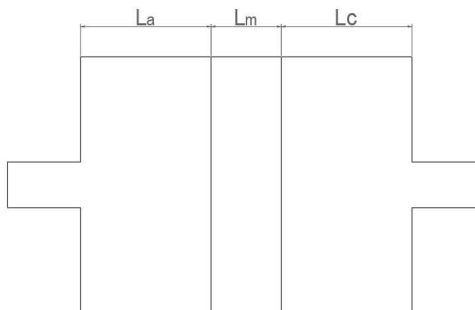
- » Longitud del monolito: Esta variable, se va a representar a lo largo de la presente memoria con el parámetro L_i donde $i = 1, 2$ o 3 . Cada uno de los coeficientes hará referencia a una longitud que se identificará de la siguiente manera, teniendo 3 posibilidades:

- $L_1 = 0,05$ m
- $L_2 = 0,10$ m
- $L_3 = 0,15$ m

- » Longitudes de expansión-contracción de la cámara: En este caso se van a estipular dos posibles configuraciones representadas con el parámetro C_j donde $j = 1$ o 2 . Cada uno de los coeficientes establecerá la paridad de la zona de expansión o contracción teniendo un primer valor para la zona de expansión y un segundo valor para la zona de contracción, por tanto:

- $C_1 = 0,10 - 0,10$ m
- $C_2 = 0,15 - 0,05$ m

Esta característica junto con la longitud del monolito serán los parámetros L_a , L_m , L_c que se optimizarán con el uso de los diferentes algoritmos.



- » Presencia o no de hollín en el filtro: El tercer factor variable en el estudio, es la influencia de la presencia de hollín o no en el monolito/filtro. Esto se representará con el parámetro H_k donde $k = 0$ o 1 . Teniendo las siguientes opciones:

- $H = 0 \rightarrow$ No hay presencia de hollín en el monolito.
- $H = 1 \rightarrow$ Hay presencia de hollín en el monolito.

Teniendo por tanto las cuatro geometrías que arrojarían cuatro mallas diferentes, y además considerando las 3 variables a modificar y sus posibles valores, se detalla a continuación los diferentes casos que pueden ser objeto de ensayo dentro del presente proyecto. En dichas tablas se especifica también la nomenclatura para cada uno de ellos.

	L_{monolito} [m]	$L_{\text{exp-contr}}$ [m]	H	Nombre ensayo
GEOMETRÍA 1	L ₁	C ₁	1	TL1_Malla1
	L ₁	C ₁	0	TL2_Malla1
	L ₁	C ₂	1	TL3_Malla1
	L ₁	C ₂	0	TL4_Malla1
	L ₂	C ₁	1	TL5_Malla1
	L ₂	C ₁	0	TL6_Malla1
	L ₂	C ₂	1	TL7_Malla1
	L ₂	C ₂	0	TL8_Malla1
	L ₃	C ₁	1	TL9_Malla1
	L ₃	C ₁	0	TL10_Malla1
	L ₃	C ₂	1	TL11_Malla1
	L ₃	C ₂	0	TL12_Malla1
GEOMETRÍA 2	L ₁	C ₁	1	TL13_Malla2
	L ₁	C ₁	0	TL14_Malla2
	L ₁	C ₂	1	TL15_Malla2
	L ₁	C ₂	0	TL16_Malla2
	L ₂	C ₁	1	TL17_Malla2
	L ₂	C ₁	0	TL18_Malla2
	L ₂	C ₂	1	TL19_Malla2
	L ₂	C ₂	0	TL20_Malla2
	L ₃	C ₁	1	TL21_Malla2
	L ₃	C ₁	0	TL22_Malla2
	L ₃	C ₂	1	TL23_Malla2
	L ₃	C ₂	0	TL24_Malla2

Tabla 6. Nomenclatura y parámetros de todos los ensayos a contemplar (I).

	L_{monolito} [m]	$L_{\text{exp-contr}}$ [m]	H	Nombre ensayo
GEOMETRÍA 3	L ₁	C ₁	1	TL25_Malla3
	L ₁	C ₁	0	TL26_Malla3
	L ₁	C ₂	1	TL27_Malla3
	L ₁	C ₂	0	TL28_Malla3
	L ₂	C ₁	1	TL29_Malla3
	L ₂	C ₁	0	TL30_Malla3
	L ₂	C ₂	1	TL31_Malla3
	L ₂	C ₂	0	TL32_Malla3
	L ₃	C ₁	1	TL33_Malla3
	L ₃	C ₁	0	TL34_Malla3
	L ₃	C ₂	1	TL35_Malla3
	L ₃	C ₂	0	TL36_Malla3
GEOMETRÍA 4	L ₁	C ₁	1	TL37_Malla4
	L ₁	C ₁	0	TL38_Malla4
	L ₁	C ₂	1	TL39_Malla4
	L ₁	C ₂	0	TL40_Malla4
	L ₂	C ₁	1	TL41_Malla4
	L ₂	C ₁	0	TL42_Malla4
	L ₂	C ₂	1	TL43_Malla4
	L ₂	C ₂	0	TL44_Malla4
	L ₃	C ₁	1	TL45_Malla4
	L ₃	C ₁	0	TL46_Malla4
	L ₃	C ₂	1	TL47_Malla4
	L ₃	C ₂	0	TL48_Malla4

Tabla 7. Nomenclatura y parámetros de todos los ensayos a contemplar (II).

4.4. PLANTEAMIENTO Y DESARROLLO DE LA TÉCNICA DE AJUSTE MODAL.

Como se ha ido viendo a lo largo del presente documento, la técnica 3D-1D en cuanto al modelado del monolito en cuestión, consiste en la variación del monolito que modela la zona del filtro DPF por una matriz de transferencia que imita el comportamiento acústico unidimensional. Este comportamiento se sabe que es único y de onda plana para cada uno de los nodos de conexión. Es por ello que cuanto mayor número de nodos exista, mejor será esta aproximación. Teniendo que este tipo de monolito, es semi abierto por una cara ya que existe la mitad de capilares abiertos y la mitad no, para obligar así a los gases a pasar de uno a otro en la zona interna de ellos.

En este modelado analítico modal, los conductos de entrada y salida del sistema DPF quedarían caracterizados acústicamente por la densidad inicial de los gases y su velocidad. Dicho modelado inicial puede verse en detalle en la referencia (Denia, 2018) dentro del epígrafe 3.3.2.

4.5. IMPLEMENTACIÓN DE LA TÉCNICA DE AJUSTE MODAL.

4.5.1. Descripción de la implementación

Esta técnica se ejecuta para cada frecuencia y calcula el valor del TL también a cada frecuencia. Internamente, evalúa las propiedades acústicas del monolito (aquellas que son dependientes de la frecuencia), y calcula las amplitudes modales de todas las ondas progresivas y regresivas de todos los conductos. Para ello, combina la solución del problema de autovalores anterior (modos de presión o autovectores y frecuencias naturales o autovalores) con las condiciones de continuidad de los campos acústicos de presión y velocidad en las discontinuidades geométricas (expansión de entrada, contracción de salida, así como entrada y salida del monolito). Al forzar las ecuaciones de continuidad y aplicar una técnica similar a residuos ponderados, donde las funciones de ponderación son los propios modos de presión de los conductos, se genera un sistema de ecuaciones algebraico. Su solución proporciona las amplitudes modales de todas las ondas progresivas y regresivas de todos los conductos, a partir de las cuales se obtiene fácilmente el TL. Para más información del nivel III, puede consultarse la información disponible en la referencia (Denia et al., 2018).

4.5.2. Estructura del código en Matlab.

El código de esta técnica, se puede ver integro en el Anexo 1.1 que se encuentra en la parte final del presente documento.

La base de su estructura se establece en un barrido en frecuencias del sistema para ello:

- » Se establecen las constantes del sistema:
- » Se inicia el barrido en frecuencia estableciendo el modelo del monolito marcado por el artículo que se puede observar en las referencias (Allam & Åbom, 2005) y (Allam & Åbom, 2006).
- » Llevado a cabo esto donde se definen impedancias, cambios de velocidad, leyes de conservación de energía y momento... Se lleva a cabo la definición de la matriz de transferencia de cuatro polos que conecta las dos caras del monolito denominada como TDPF.
- » Se establecen los números de onda axiales en conductos y cámaras en función del modo en que se encuentre y del valor de la k_{aire} .
- » Se procede al ensamblado de las ecuaciones y a la resolución del sistema de ecuaciones de ajuste modal como se puede apreciar en la referencia (Denia et al., 2018). En este apartado se procede a ensamblar presiones, velocidades, cambios de sección...
- » Sigue con el acoplamiento de la presión y la velocidad a ambos lados del monolito.
- » Por último, se procede a resolver el método calculando el TL en base a la matriz obtenida teniendo en cuenta la parte regresiva y progresiva de la onda sonora.

4.5.3. Descripción de programas implicados.

Dentro del desarrollo de este programa, no se hace referencia a programas externos que resulten elaborados en exceso o que sean propios de un argot determinado. Simplemente se van desarrollando bucles que van generando vectores y matrices a través de los operadores matemáticos básicos.

4.6. VALIDACIÓN DE LA TÉCNICA DE AJUSTE MODAL CON ANSYS.

Una de las cosas más importantes cuando se lleva a cabo el uso de una técnica generalmente novedosa para la realización de una investigación, es proceder a la validación del método utilizado.

Para eso, en el presente proyecto, se procede a validar la técnica de ajuste modal desarrollada con Matlab para la caracterización acústica del DPF con una caracterización acústica llevada a cabo a través de un software de Elementos Finitos (EF) como es ANSYS APDL. Se elige esta opción debido a que el propio grupo de investigación de la UPV del Departamento de Mecánica y de Materiales ya publicó resultados que avalan que ambas técnicas son válidas para este tipo de caracterizaciones. De estos aspectos, se puede ampliar consultando las publicaciones (Denia et al., 2018)(Denia et al., 2012).

El proceso a seguir será el de generar los coeficientes TL de uno de los casos recogidos en las Tablas 6 y 7 para cada una de las mallas que son objeto de estudio. Esto se llevará a cabo tanto a través de Matlab utilizando un código implementado usando la técnica de Ajuste Modal, el cual se detalla en el Anexo 1 de este documento. Además, se procederá a ejecutar un análisis por EF utilizando el programa nombrado anteriormente.

A modo de mantener las mismas condiciones para cada una de las validaciones, se ha decidido elegir un caso de condiciones análogas dentro de cada malla. Dicho ensayo elegido tiene las características de:

- » Presencia de hollín: **H1**
- » Longitud de monolito corta: **L1**
- » Configuración expansión-contracción 0,05-0,15m: **C2**

Si se buscan esos casos en las Tablas 6 y 7 para cada una de las mallas, se puede apreciar que se encuentran con la nomenclatura:

- TL3_Malla1
- TL15_Malla2
- TL27_Malla3
- TL39_Malla4

Teniendo elegidos los casos a utilizar para la validación del método, las mallas desarrolladas a través del programa de Matlab se pueden apreciar en la Figura 9, 11, 13, 16. Definidas estas, se procede a la generación de las mallas utilizando el programa de EF que resultan de la siguiente manera:

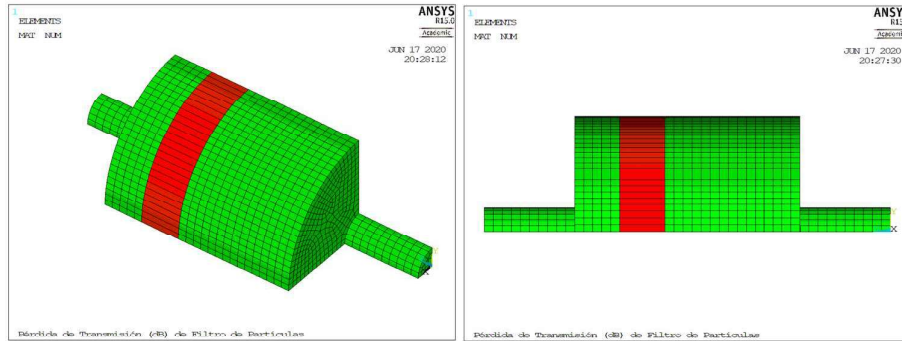


Figura 17. "TL3_Malla1" con EF en ANSYS APDL.

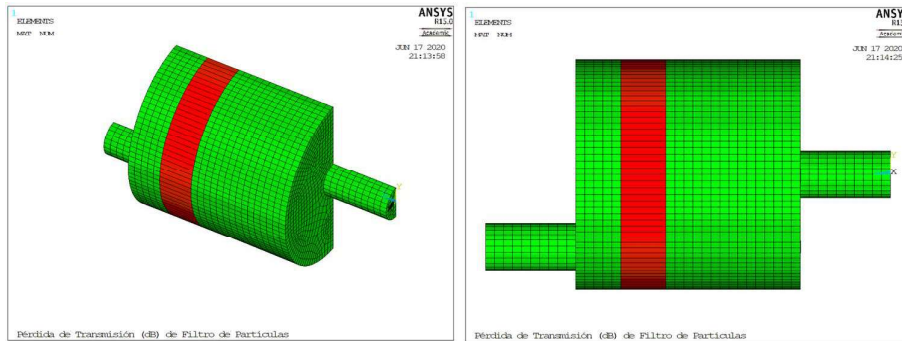


Figura 18. "TL15_Malla2" con EF en ANSYS APDL.

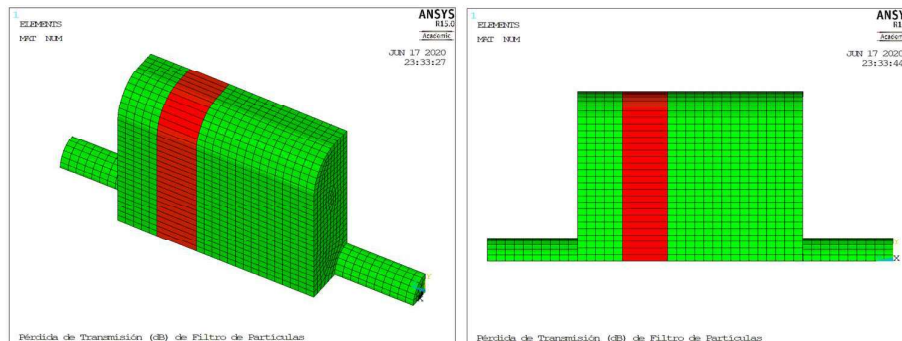


Figura 19. "TL27_Malla3" con EF en ANSYS APDL.

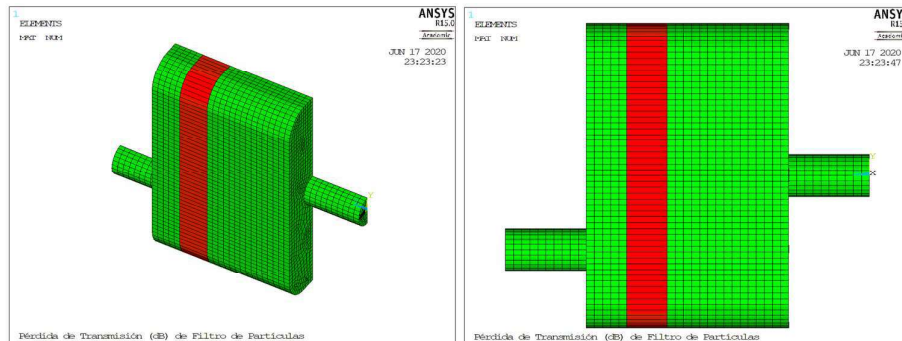


Figura 20. "TL39_Malla4" con EF en ANSYS APDL.

Una vez creadas las mallas, pasamos a lanzar los respectivos programas, obteniendo:

4.6.1. Malla 1: Sección circular con entrada y salida alineadas.

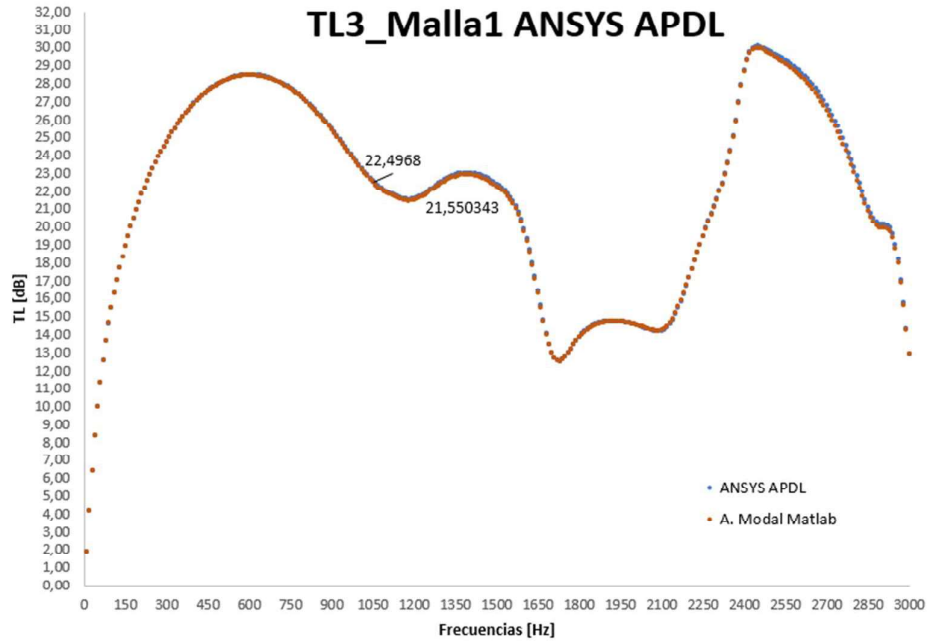


Figura 21. TL3_Malla1 con ANSYS APDL (azul) y Ajuste Modal (naranja).

Como se puede apreciar en base a las representaciones recogidas en Figura 21, los resultados obtenidos del TL para TL3_Malla1 son prácticamente idénticos ya que no se aprecian discrepancias significativas entre ellos.

4.6.2. Malla 2: Sección circular con salida desfasada.

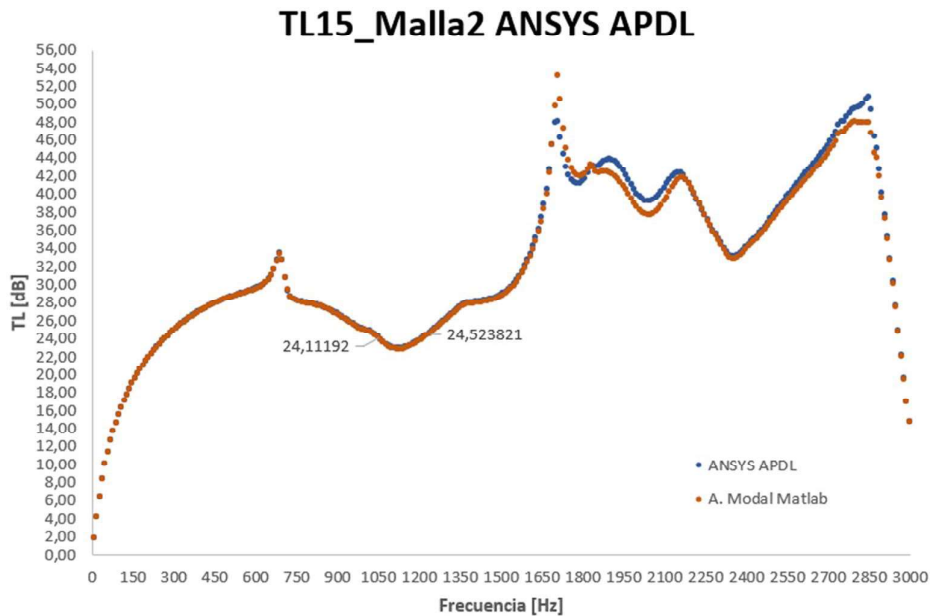


Figura 22. TL15_Malla2 con ANSYS APDL (azul) y Ajuste Modal (naranja).

En este segundo caso, se pueden apreciar mayores discrepancias. Aparentemente de manera general, los resultados obtenidos a través de ANSYS APDL arrojan valores levemente superiores cuando se tienen frecuencias más altas. Sin embargo, dichas discrepancias no son nada significativas.

4.6.3. Malla 3: Sección rectangular con entrada y salida alineadas.

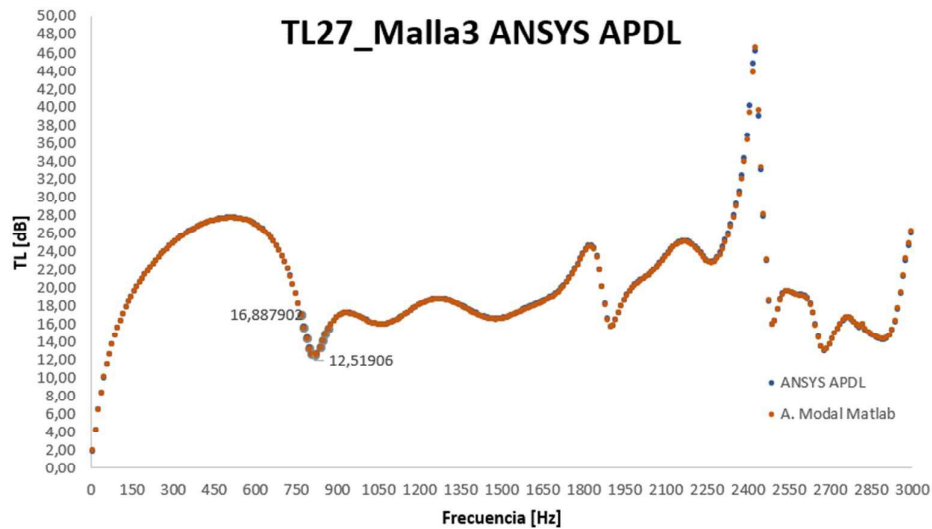


Figura 23. TL27_Malla3 con ANSYS APDL (azul) y Ajuste Modal (naranja).

En lo referido a esta malla rectangular con la entrada y salida alineada, se aprecia claramente que ambas curvas prácticamente se solapan y no dejan distinguir a la de un color más claro. Esto es señal de que el ajuste es muy bueno y, por tanto, no existen discrepancias entre ellas.

4.6.4. *Malla 4: Sección rectangular con salida desfasada.*

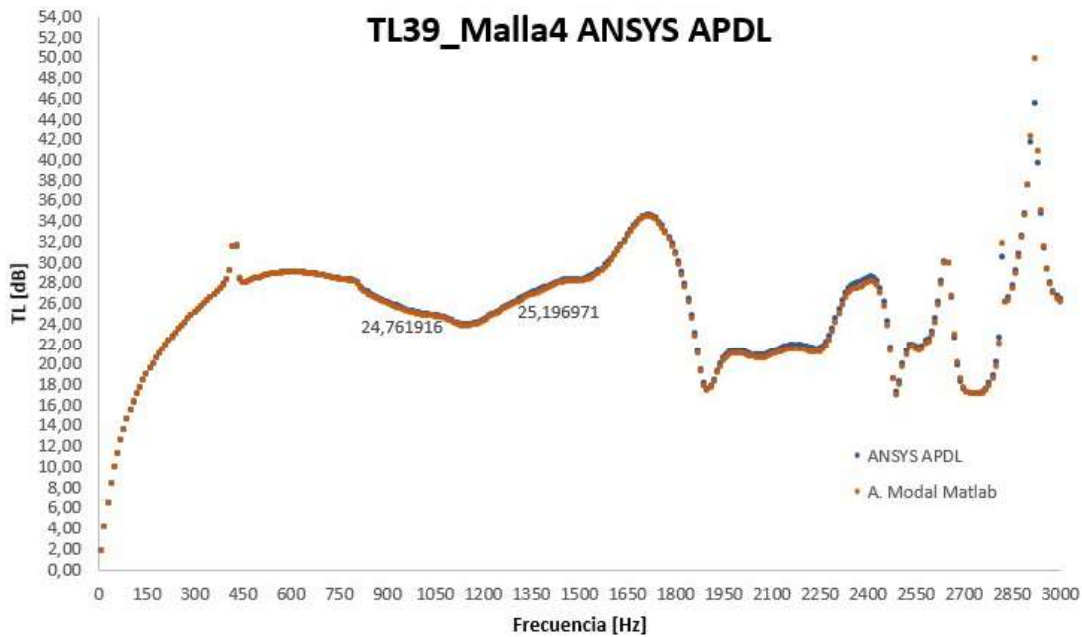


Figura 24. TL39_Malla4 con ANSYS APDL (azul) y Ajuste Modal (naranja).

En este último caso, se aprecia algo similar al caso de la malla 3. Esto es que los resultados son sumamente buenos en ambos casos, coincidiendo en su mayoría los resultados de uno con los de otro. Por tanto, se puede asumir que no hay discrepancias entre ambos.

A la vista de las comparaciones establecidas en los puntos anteriores para cada una de las mallas, el método queda validado como se quería demostrar. Esto se puede concluir debido a que en ninguno de los casos hay discrepancias significativas.

Además de esto, se ha calculado el error de los valores de TL calculados por Ajuste Modal en Matlab respecto a los calculados por el método tradicional de EF en ANSYS APDL considerado en este caso como “exacto”. Dicho error ha sido calculado a través de la fórmula del error relativo tradicional:

$$E_{relat} (\%) = \frac{|Valor_{exacto} - Valor_{calculado}|}{Valor_{exacto}} \cdot 100 = \frac{|Valor_{ANSYS\ APDL} - Valor_{A.Modal}|}{Valor_{ANSYS\ APDL}} \cdot 100 \quad (Ec\ 44)$$

A continuación, se tabulan los resultados del error relativo calculado para cada una de las mallas:

Ensayo	Error relativo [%]
TL3_Malla1	0,3422
TL15_Malla2	1,0874
TL27_Malla3	0,3076
TL29_Malla4	0,7556

Tabla 8. Error relativo del cálculo de TL con Ajuste Modal respecto EF con ANSYS APDL.

Como se aprecia claramente en la tabla anterior, el error relativo en todos los casos es muy inferior a un 5%, siendo esto el límite que se establece normalmente como error aceptable. Esto confirma la validación del método de Ajuste Modal, como un método fiable para el cálculo del TL y caracterización acústica de elementos, en este caso de un filtro de partículas diésel DPF.

4.7. ALGUNOS RESULTADOS.

A continuación, se presentan todos los TL calculados para cada uno de los 48 casos de que se pueden apreciar en las Tablas 25, 26, 27 y 28 según las mallas 1, 2, 3 y 4 respectivamente

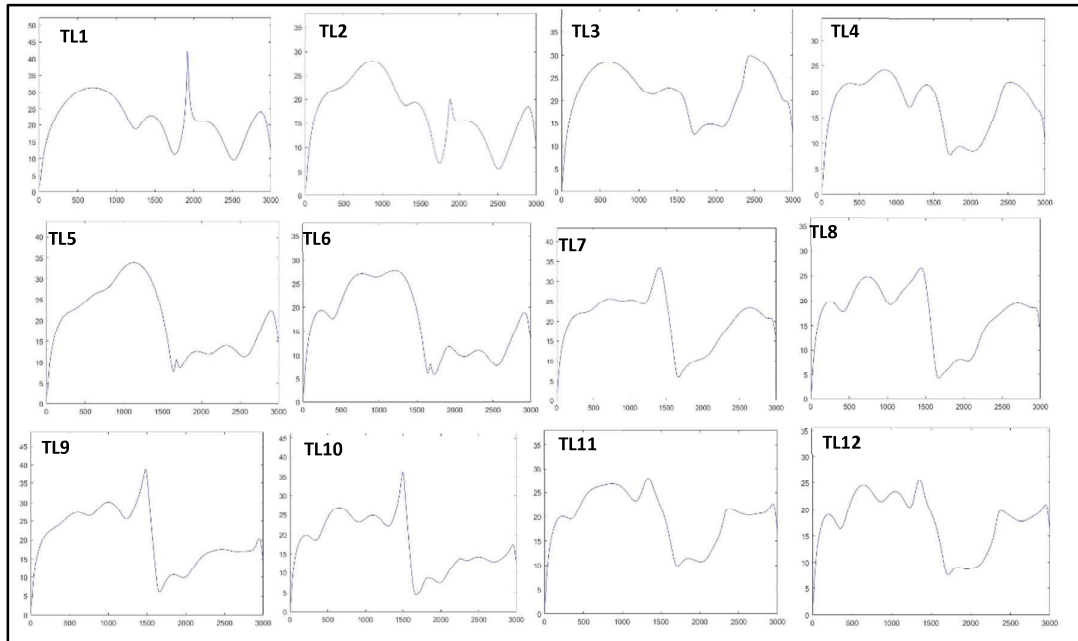


Figura 25. TL's calculados para la Malla 1 con Ajuste Modal.

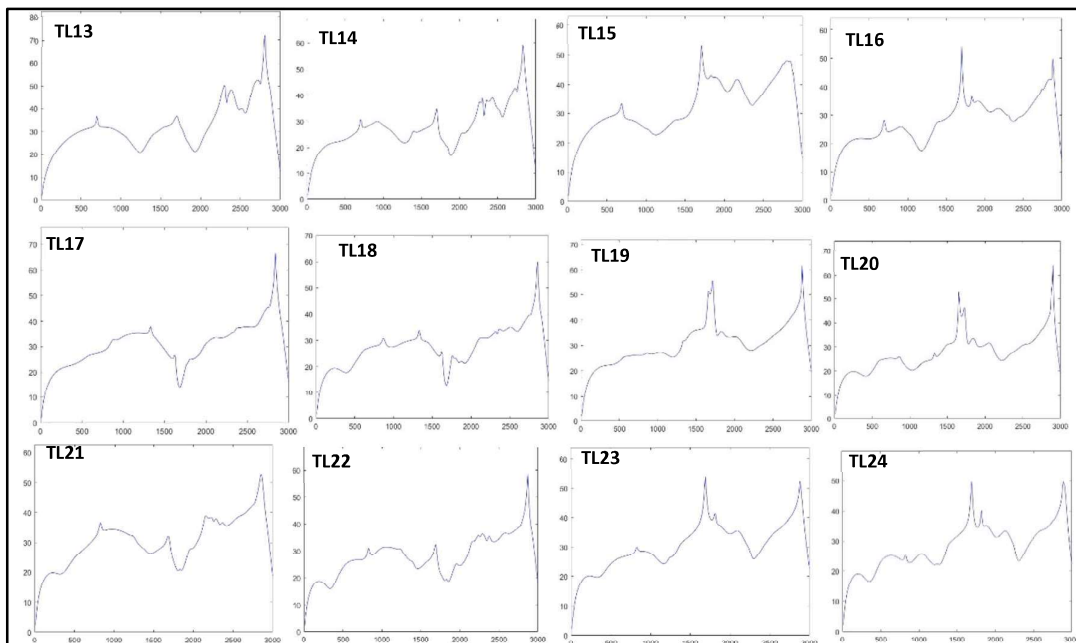


Figura 26. TL's calculados para la Malla 2 con Ajuste Modal.

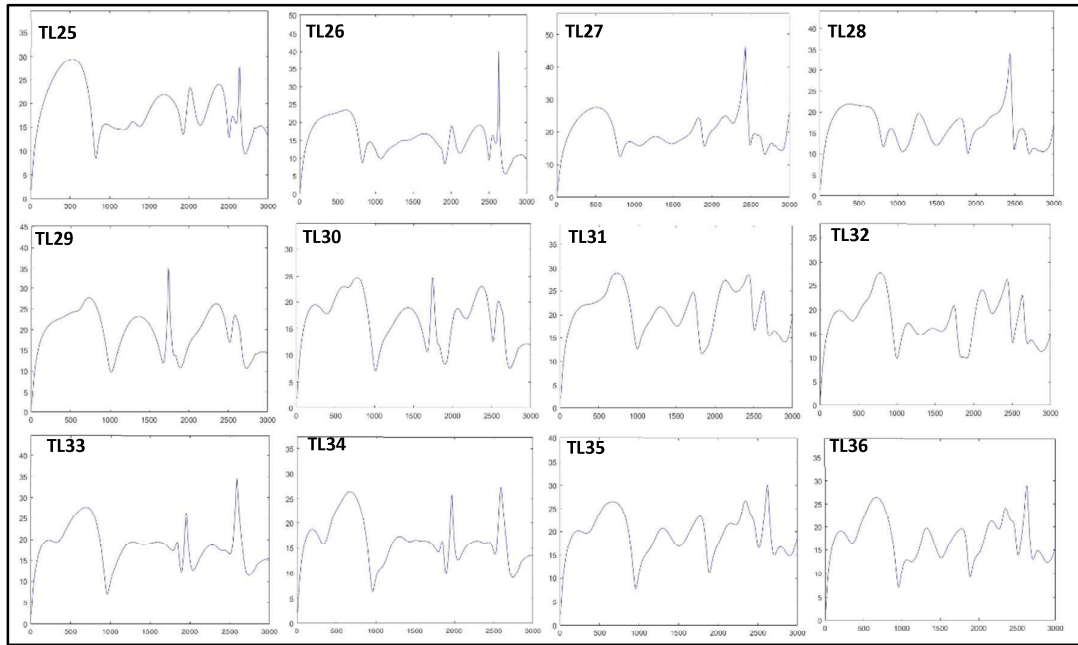


Figura 27. TL's calculados para la Malla 3 con Ajuste Modal.

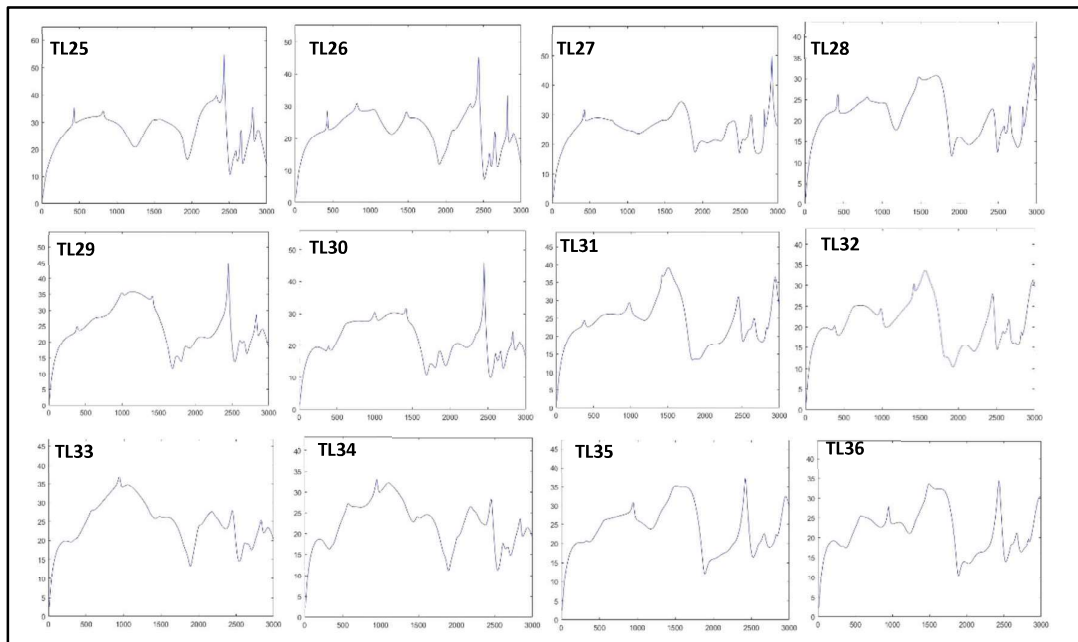


Figura 28. TL's calculados para la Malla 4 con Ajuste Modal.

Como se puede apreciar en cada una de las figuras, los patrones generales de los TL dentro de cada malla son similares, sin embargo, entre cada una de las mallas sí que la forma varía significativamente.

Expuestos estos resultados, en la sección 6.1 se procederá a estudiar a fondo las distintas influencias de los parámetros a modificar.

CAPÍTULO 5: OPTIMIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ACÚSTICO DE FILTROS DE PARTÍCULAS MEDIANTE ALGORITMOS BASADOS EN GRADIENTE Y ALGORITMOS GENÉTICOS.

5.1. GENERALIDADES.

Tradicionalmente, la única forma de optimizar cualquier cosa, ya fuera algo físico, un proceso, algo intangible o lo que se pueda imaginar, era llevando a cabo lo que se conoce como el “Ensayo prueba-error” tras un estudio exhaustivo de todas las variables influyentes en ello. Esto era cambiar pequeñas cosas del sistema en cuestión y comprobar si esto producía una mejora o no en el resultado final. Si existía una mejora, se procedía a establecer ese como nuevo punto de partida sobre el que aplicar nuevos cambios y un nuevo ensayo. Si no existía tal mejora, se volvía al paso anterior. Este proceso se podía llevar a cabo de manea real o a través de una simulación en el mejor de los casos.

Como se puede ver en la Figura 29, los flujos de información y las maneras de tratar la información han cambiado mucho a lo largo del tiempo. La metodología tradicional es mucho más lineal y “controlada” por el operario que los modelos actuales ya que ahora se basan en modelos y algoritmos que son capaces de realizar miles de iteraciones en un espacio temporal muy corto para arrojar una solución óptima al problema planteado.

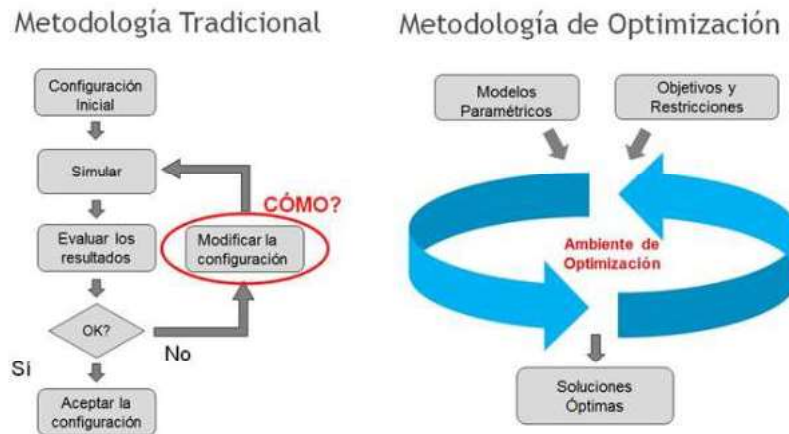


Figura 29. Diagrama de flujo de la metodología de optimización. (Paredes, 2016)

Para aplicar esta nueva metodología, son necesarios recursos computacionales, los cuales son muy preciados en este tipo de trabajos y por tanto es imprescindible optimizarlos, reduciendo su coste y siendo esto el objetivo de este proyecto.

Las formas que se pueden encontrar para llevar a cabo una optimización son muy elevadas. Existen algoritmos, métodos iterativos, heurísticas, etc. En cuanto a los algoritmos, la propia persona que se dedica o pertenece a algún departamento o proceso de optimización, puede llegar a crear su propio algoritmo personalizado. Un algoritmo suele ser determinista, teniendo un esquema a seguir sin dejar cabida para la aleatoriedad, y comprobando que la solución obtenida tiene las propiedades que se especifican.

Por otro lado, se tienen diferentes heurísticas como pueden ser los algoritmos genéticos, la evolución diferencial, la optimización por enjambre de partículas... Estos no tienen pruebas de corrección como tal y no siempre son elementos establecidos, sino que a menudo involucran elementos aleatorios.

En cuanto a los métodos iterativos, serían los algoritmos más similares a un proceso de optimización tradicional, ya que se basa en la prueba y error estableciendo un lazo de control que restituye los valores que aportan algún progreso en el proceso. Sin embargo, por lo general, la convergencia de estos métodos puede ser muy lenta e incluso no existir, dependiendo también mucho del punto inicial del que se comienza la iteración. Algunos de estos tipos más conocidos son los basados en gradientes (máximo gradiente, BFGS...), siendo estos últimos bastante limitados debido a las grandes necesidades de memoria que tienen.

5.2. ALGORITMOS BASADOS EN GRADIENTE. ALGORITMO "FMINCON" DE MATLAB.

Los algoritmos más utilizados históricamente para encontrar máximos y/o mínimos de una función objetivo determinada han sido los basados en gradiente. Estos se tratan de algoritmos deterministas de tipo iterativo.

5.2.1. Características.

Este procedimiento se basa, como su nombre indica, en los gradientes de una función determinada. Es por tanto que se hace uso de las derivadas de la propia función.

El gradiente como concepto, solo puede ser aplicado por tanto a una expresión $h(z)$ diferenciable en un punto. Esto es debido a que, para calcular dicho concepto, se deben de calcular sus derivadas primeras en un punto. Esto arrojará una movilidad sobre la tendencia o la pendiente de la curva en busca de ese máximo o mínimo buscando el mayor incremento.

$$grad(z) = \nabla h(z) = \left[\frac{\partial h(z)}{\partial h(z_1)}, \frac{\partial h(z)}{\partial h(z_2)}, \dots, \frac{\partial h(z)}{\partial h(z_n)} \right] \quad (Ec 45)$$

Existiendo tantas componentes como variables existan dentro de dicha función.

Para encontrar dicho punto característico siguiente de iteración (Z_{sig}), es necesario que se cumpla que el gradiente tenga un valor nulo en dicho punto, para ello, es necesario que se cumpla:

$$grad(z_{sig}) = \left[\frac{\partial h(z)}{\partial z} \right]_{z=z_{sig}} = 0 \quad (Ec 46)$$

El principal inconveniente de estos algoritmos, aparte del coste computacional que acarrea el tener que ir calculando derivadas parciales y comprobando su valor, es que se obtienen mínimos o máximos locales. Como bien se sabe por teoría matemática, un máximo o mínimo local, puede ser o no el global de la función, por tanto, es un factor que hay que tener en cuenta al utilizar este tipo de algoritmos. Para comprobar si el

mínimo obtenido es local o global, se debería hacer uso de la matriz Hessiana y comprobar si esta es definida positiva.

5.2.2. Algoritmo “fmincon” en Matlab.

El algoritmo implementado en las bibliotecas de Matlab para desarrollar este procedimiento basado en gradientes se denomina como “fmincon”. Este se define como “Función que busca el mínimo de una función multivariable no lineal restringida” (*Busque El Mínimo de Función Multivariable No Lineal Restringida - MATLAB Fmincon - MathWorks España, n.d.*)

A través de este algoritmo, se pueden minimizar problemas de programación lineal donde se tiene una expresión con unas restricciones que pueden ser en forma de desigualdades, igualdades y/o límites de la forma:

$$\min_x f(x) \text{ such that } \begin{cases} c(x) \leq 0 \\ ceq(x) = 0 \\ A \cdot x \leq b \\ Aeq \cdot x = beq \\ lb \leq x \leq ub, \end{cases}$$

Figura 30. Problema de programación lineal a resolver por "fmincon".

Dentro de esta función, existen múltiples formas de ejecutarla, en función de los datos de los que se dispongan sobre el problema para ello. Algunas de las más utilizadas son:

$$x = \text{fmincon}(\text{fun}, x0, A, b) \quad (\text{Ec } 47)$$

$$x = \text{fmincon}(\text{fun}, x0, A, b, Aeq, beq) \quad (\text{Ec } 48)$$

$$x = \text{fmincon}(\text{fun}, x0, A, b, Aeq, beq, lb, ub) \quad (\text{Ec } 49)$$

$$x = \text{fmincon}(\text{fun}, x0, A, b, Aeq, beq, lb, ub, \text{nonlcon}) \quad (\text{Ec } 50)$$

$$x = \text{fmincon}(\text{fun}, x0, A, b, Aeq, beq, lb, ub, \text{nonlcon}, \text{options}) \quad (\text{Ec } 51)$$

$$[x, fval] = \text{fmincon}(_) \quad (\text{Ec } 52)$$

$$[x, fval, \text{exitflag}, \text{output}, \text{lambda}, \text{grad}, \text{hessian}] = \text{fmincon}(_) \quad (\text{Ec } 53)$$

Como se puede apreciar, se trata de una función bastante versátil, con capacidad para resolver un problema muy básico con solo un tipo de restricciones, hasta un problema muy complejo con todo tipo de restricciones, incluso con opciones definidas por el usuario. Además, con el uso de (Ec 8) y (Ec 9), aparte de obtener el mínimo deseado, se pueden obtener otra información de interés como el valor de la función, el hessiano...

Los parámetros necesarios para entender el correcto desarrollo de esta función se explican en la siguiente sección. Pero a modo de adelanto, comentar que en cualquier caso se puede usar una expresión más compleja de lo necesario para el problema en cuestión. La forma de adecuar la formulación al objetivo es colocar “[]” en las posiciones donde no se disponga de restricciones.

5.2.3. Especificación de opciones.

Para comentar los diferentes parámetros a introducir en la formulación del comando para el correcto funcionamiento del algoritmo, se va a tomar de partida la (Ec 7) dado que se trata de la más completa en cuanto a parámetros se refiere. En base a ella, se procede a explicar el significado de cada uno de los parámetros.

Parámetro	Significado/Usó
fun	Se introduce la función objetivo identificada por su nombre asignado y precedido del operador llamada Ej: objetivo = x^2+x+1 → fun = @objetivo
x0	Punto inicial de iteración. Se introduce un vector o matriz real. La solución puede variar dependiendo del valor asignado a este parámetro
A	Vector indicativo de los coeficientes <u>dependientes de las variables de las desigualdades</u> . Si hay varias desigualdades → $A = [A_{11}, A_{12}; A_{21}, A_{22}; \dots]$
b	Vector indicativo de los términos <u>independientes de las desigualdades</u> . Si hay varias desigualdades → $b = [b_{11}, b_{12}; b_{21}, b_{22}; \dots]$
Aeq	Vector indicativo de los coeficientes <u>dependientes de las variables de las igualdades</u> . Si hay varias desigualdades → $Aeq = [Aeq_{11}, Aeq_{12}; Aeq_{21}, Aeq_{22}; \dots]$
beq	Vector indicativo de los términos <u>independientes de las igualdades</u> . Si hay varias desigualdades → $beq = [beq_{11}, beq_{12}; beq_{21}, Beq_{22}; \dots]$
lb	Representa el límite inferior para las variables. Puede ser un vector si se dispone de más de una variable.
ub	Representa el límite superior para las variables. Puede ser un vector si se dispone de más de una variable.
nonlcon	Este parámetro está relacionado con las restricciones no lineales. En su lugar se coloca un vector de la forma [c, ceq] que recogen las restricciones de la forma: - $c = g(x) \leq 0$ - $ceq = h(x) = 0$
options	Se trata de 47 opciones adicionales de optimización. Algunas se aplican siempre, otras en casos especiales. Aportan una mayor personalización y control del algoritmo en cuestión.
Salidas	Significado/Usó
x	Solución para el valor buscado. Devuelto como un vector real o una matriz real.
fval	Valor de la función objetivo en la solución. Número real.
exitflag	Indica e motivo por el cuál se ha detenido la ejecución del algoritmo. Con un dominio perteneciente al intervalo [-3, 5].
output	Información adicional sobre el proceso de optimización tales como iteraciones, algoritmo utilizado, longitud del paso, mensaje de salida...
lambda	Recoge los multiplicadores de Lagrange en la solución.
grad	Arroja el gradiente de la solución como un vector real.
hessian	Arroja la matriz hessiana aproximada como una matriz real.

Tabla 9. Parámetros de la función "fmincon" en Matlab (Busque El Mínimo de Función Multivariable No Lineal Restringida - MATLAB Fmincon - MathWorks España, n.d.)

Si en algún caso no aplica utilizar alguno de esos parámetros debido a que no existen restricciones de dicha tipología, la manera de solucionarlo es colocar “[]” en el lugar correspondiente.

5.3. ALGORÍTMOS GENÉTICOS. ALGORITMO “GA” DE MATLAB.

Por una rama diferente de los algoritmos deterministas como los comentados anteriormente basados en gradiente, se pueden encontrar los denominados estocásticos. En estos, existe un factor muy importante como es la introducción de una aleatoriedad en el desarrollo del programa. Esto hace que se den circunstancias en las cuales, para un mismo programa, aparecen soluciones diferentes.

Una de las tipologías más importantes dentro de esta rama estocástica, son los algoritmos genéticos, que son un fruto bastante reciente de la denominada ahora “inteligencia artificial”. Estos algoritmos se comenzaron a utilizar en torno a 1970 basándose en los conocimientos de John Henry Holland siguiendo esa línea dentro de la IA.

Aparte de estos algoritmos genéticos, existen otros muy famosos dentro de esta tipología estocástica como son los de enjambre de partículas, que se basan en el comportamiento de las partículas en la naturaleza.

Estos algoritmos tienen la ventaja de que no están restringidos por el tipo de función, sino que son capaces de operar con funciones no derivables, lineales, no lineales... Al contrario que ocurre en el caso de los algoritmos basados en gradiente.

5.3.1. *Características.* (Sánchez Orqaz, 2011)

Como se puede intuir debido a su nomenclatura, los algoritmos genéticos se basan en la evolución biológica de los seres vivos. Esto es similar a una analogía con la genética humana en la cual existe una evolución y finalmente va sobreviviendo la raza más fuerte.

Por norma general, estos algoritmos buscan la minimización de la solución, por tanto, en ese caso, la función objetivo se debería de introducir con signo contrario a lo que realmente significa.

Se rigen por la resolución del problema cuya unidad resolutive más pequeña son los denominados individuos. Estos individuos no son más que una analogía con la raza humana, ya que en términos de optimización no son más que posibles soluciones que arrojen un resultado óptimo o al menos mejor que algún otro. Estos individuos pueden ser representados de varias maneras: binaria, continua...

En base a esto, se puede decir que en este proceso existe una población inicial a partir de la cual se crea el algoritmo. Por lo general, se debe perseguir que en dicha población coexistan individuos de todas las tipologías y variables posibles dentro del problema. De esta manera, tras recombinaciones y mutaciones, todos los aspectos posibles a tener en cuenta, serán considerados.

Creada esa población inicial, se da inicio al bucle de optimización en el cual se producen los siguientes fenómenos:

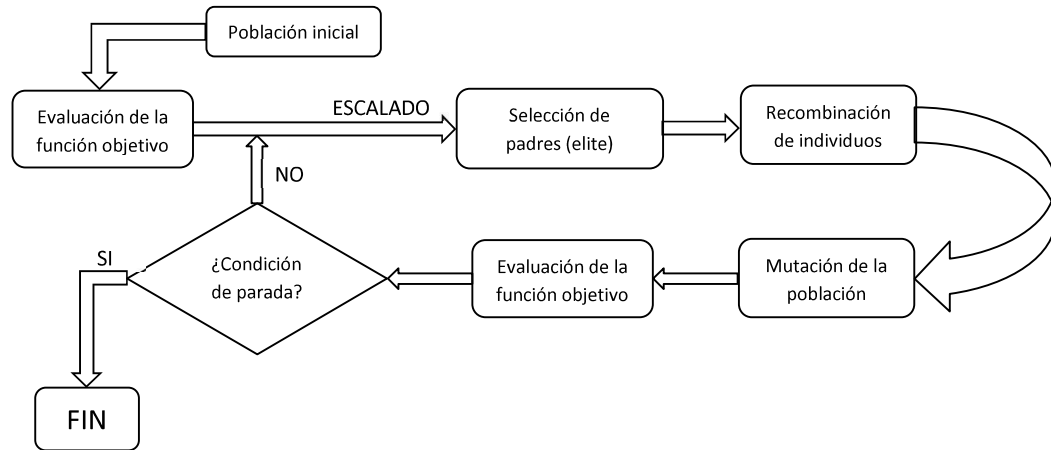


Figura 31. Diagrama de flujo desarrollado por el algoritmo genético.

A modo explicativo de cada uno de los procesos del flujograma, se procede a comentar los principales aspectos de cada uno de los estados:

- » Población inicial: Como se ha recogido anteriormente, debe de tener características lo más variadas posibles, contemplando todos los valores que tras las recombinaciones den lugar a todas las posibles opciones de solución.
- » Evaluación de la función objetivo: Como su nombre indica, en este paso, el algoritmo procede a probar cada uno de los individuos dentro de la función a optimizar.
- » Escalado y ordenación de los resultados: Teniendo los resultados de la evaluación, éstos se escalan a una magnitud más manejable y comparable con la intención de poder proceder a la selección de los mejores candidatos. Para ello, posteriormente se procede a ordenar los datos de menor a mayor en ese proceso de minimización.
- » Selección de los padres: Estos, también denominados como individuos de “élite” son los que, una vez ordenados, obtienen los mejores resultados. La cantidad a seleccionar puede variar en función de los parámetros de control. Sin embargo, una buena práctica es escoger entorno al 50% de estos individuos “élite”.
- » Generación de individuos (hijos): Seleccionados los “padres”, a partir de ellos se procede a recombinar su contenido, formando así los hijos que completarán la siguiente población. Existen varios procedimientos para generar nuevos individuos, algunos de los más importantes son:
 - Permutación/Inversión: A través de la cual se permutan valores de algunos parámetros de los padres. Esto se puede hacer manteniendo el orden o invirtiéndolo.
 - Recombinación: A su vez puede ser dividido en varios métodos, sin embargo, los más básicos son los “métodos de cruce” y los “métodos de medias ponderadas”
- » Mutación de la población: Debido a que se trata de un procedimiento estocástico, influye la aleatoriedad. Este factor aplica aquí en cuanto a la probabilidad de mutación de un individuo, al igual que existen mutaciones en los seres vivos. Cuando esta mutación se genera, lo que se lleva a cabo es algún

cambio aleatorio no controlado ni contemplado. Gracias a esto, se consigue elevar los niveles de cumplimiento de todo el abanico de posibles soluciones para el problema.

- » Evaluación de la función objetivo: Teniendo esta nueva población elitista, recombinada y mutada, se procede nuevamente a la evaluación de estas soluciones dentro del problema en cuestión.
- » Condición de parada: Se trata de una variable necesaria para detener el algoritmo en algún momento. Esta condición influye con carácter elevado en el tiempo de computación del programa. Además, esto se comprueba cada vez que se hace pasar una población a través de la evaluación del problema. Se puede establecer varios requisitos de parada:
 - Acertar con la solución que arroja el óptimo absoluto.
 - Completar la búsqueda de un número de individuos factibles.
 - Encontrar un individuo que arroje una solución factible lo más próximo al óptimo como sea posible, por tanto, con un error menor al definido.
 - Establecer un número máximo de pasos para el algoritmo a la hora de lanzarlo.

5.3.2. Algoritmo “ga” en Matlab.

Al igual que para los algoritmos de optimización basados en gradientes, las bibliotecas de Matlab también tienen implementada una función a través de la cual se lanza un algoritmo genético. Esta función se denomina “ga”. Esta se define como “Encuentra el mínimo de una función usando un algoritmo genético”.(Esparcia García, 2014)

Dada su naturaleza y su “modus operandi”, esta función se puede aplicar a cualquier tipo de función. Independientemente de que sea o no derivable, que tenga mucho o poco carácter no lineal...

Dentro de Matlab, algunas formulaciones del comando son:

$$x = ga(fun, nvars) \quad (Ec 54)$$

$$x = ga(fun, nvars, A, b) \quad (Ec 55)$$

$$x = ga(fun, nvars, A, b, Aeq, beq) \quad (Ec 56)$$

$$x = ga(fun, nvars, A, b, Aeq, beq, lb, ub) \quad (Ec 57)$$

$$x = ga(fun, nvars, A, b, Aeq, beq, lb, ub, nonlcon) \quad (Ec 58)$$

$$x = ga(fun, nvars, A, b, Aeq, beq, lb, ub, nonlcon, options) \quad (Ec 59)$$

$$x = ga(fun, nvars, A, b, [], [], lb, ub, nonlcon, IntCon, options) \quad (Ec 60)$$

$$[x, fval] = ga(_) \quad (Ec 61)$$

$$[x, fval, exitflag, output, population, scores] = ga(_) \quad (Ec 62)$$

5.3.3. *Especificación de opciones.*

Parámetro	Significado/Uso
fun	Se introduce la función objetivo identificada por su nombre asignado y precedido del operador llamada Ej: objetivo = x^2+x+1 → fun = @objetivo
nvars	Número de variables de las que consta la función objetivo introducidas como un entero positivo.
A	Vector indicativo de los coeficientes <u>dependientes de las variables de las desigualdades</u> del tipo $A*x \leq b$. Si hay varias desigualdades → $A = [A_{11}, A_{12}; A_{21}, A_{22}; \dots]$
b	Vector indicativo de los términos <u>independientes de las desigualdades</u> . Si hay varias desigualdades → $b = [b_{11}, b_{12}; b_{21}, b_{22}; \dots]$
Aeq	Vector indicativo de los coeficientes <u>dependientes de las variables de las igualdades</u> del tipo $Aeq*x = beq$. Si hay varias desigualdades → $Aeq = [Aeq_{11}, Aeq_{12}; Aeq_{21}, Aeq_{22}; \dots]$
beq	Vector indicativo de los términos <u>independientes de las igualdades</u> . Si hay varias desigualdades → $beq = [beq_{11}, beq_{12}; beq_{21}, beq_{22}; \dots]$
lb	Representa el límite inferior para las variables. Puede ser un vector si se dispone de más de una variable.
ub	Representa el límite superior para las variables. Puede ser un vector si se dispone de más de una variable.
nonlcon	Este parámetro está relacionado con las restricciones no lineales. En su lugar se coloca un vector de la forma [c, ceq] que recogen las restricciones de la forma: - $c = g(x) \leq 0$ - $ceq = h(x) = 0$
options	Se trata de 35 opciones adicionales de optimización. Algunas se aplican siempre, otras en casos especiales. Aportan una mayor personalización y control del algoritmo en cuestión.
IntCon	Se trata de un vector de variables que aportan un valor característico a alguna de las variables. Cuando este parámetro no es nulo, Aeq y beq deben ser "[]".
Salidas	Significado/Uso
x	Solución para el valor buscado. Devuelto como un vector real o una matriz real.
fval	Valor de la función objetivo en la solución. Número real.
exitflag	Indica el motivo por el cual se ha detenido la ejecución del algoritmo. Con un dominio perteneciente al intervalo [-3, 5].
output	Información adicional sobre el proceso de optimización tales como iteraciones, algoritmo utilizado, longitud del paso, mensaje de salida...
population	Arroja la matriz de la población final. Las filas de dicha matriz corresponden con los individuos.
scores	Se trata de un vector que recoge la "puntuación" de un individuo en función del resultado óptimo.

Tabla 10. Parámetros de la función "ga" en Matlab (*Find Minimum of Function Using Genetic Algorithm - MATLAB Ga - MathWorks España, n.d.*)

5.4. INTEGRACIÓN DE HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES DESARROLLADAS: TÉCNICA DE AJUSTE MODAL Y ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN.

En cuanto a la estructura utilizada para llevar a cabo la optimización del TL del filtro de partículas diésel es bastante similar. La diferencia como se puede apreciar en los epígrafes 5.2 y 5.3 de la presente memoria es el procedimiento a seguir, ya que en el caso de los algoritmos basados en gradientes utilizan métodos derivativos para intentar obtener una solución que no para todos los tipos de funciones es posible a través de este proceso. Sin embargo, los algoritmos genéticos, como ya se ha comentado, se encuentran basados en una imitación de la replicación genética donde se consideran mutaciones, recombinaciones, etc.

Independientemente de esto, la técnica de ajuste modal se integra en estos procesos de la misma manera. Para ello, como se puede observar en los códigos de Matlab del ANEXO X, se llaman a varios programas. Estos programas son “previo_ajuste_modal.m” y “fmincon” o “ga”.

El segundo y tercero de ellos es el comentado en el epígrafe 5.2 y 5.3 anteriores y es la parte pura de optimización del programa, sin tener apenas influencia en la técnica de ajuste modal.

Por el contrario “previo_ajuste_modal.m” es el programa donde se realizan todos los cálculos que no depende la frecuencia y deben quedar fuera por tanto del bucle de cálculo de respuesta en frecuencia (con el objetivo de reducir el coste computacional). La subrutina “previo_ajuste_modal.m” carga toda la información relativa a propiedades de aire y calcula las propiedades del monolito de la trampa de partículas que no dependen de la frecuencia (monolito_2.m). También carga la topología de las mallas 2D de elementos finitos correspondientes a las secciones transversales de los conductos implicados. Después ensambla las matrices de masa (subrutinas que comienzan por mat_m2...) y rigideces acústicas (subrutinas que comienzan por mat_k2...) de dichas secciones y resuelve numéricamente un problema de autovalores asociado a la ecuación de ondas en la sección transversal de los conductos. Como se ha indicado, para ello se utilizan mallas 2D de dichas secciones, con lo que el coste computacional es bajo (las mallas disponibles y sus características se detallan a lo largo de la memoria del TFM). Resuelto el problema de autovalores, se dispone de los modos de presión (autovectores) y frecuencias naturales (autovalores) de la sección transversal.

5.5. FUNCIÓN OBJETIVO.

Tras lo expuesto anteriormente, queda claro que realmente lo que se quiere optimizar en este caso es el coeficiente de pérdida en transmisión del sonido a través del DPF. Es por esto que la ecuación a maximizar es la reflejada en la Ec. 23 y que se representa nuevamente a continuación:

$$TL = L_{W_i} + L_{W_t} = 10 \cdot \log \left(\frac{Pot_i}{Pot_t} \right) = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{\alpha_t} \right) \quad (Ec 63)$$

Debido a que los criterios seguidos por los algoritmos implantados en Matlab, se enfocan todos en la minimización de funciones, lo que se va a hacer es tomar el valor de signo contrario al verdadero que se quiere optimizar.

De esta manera, el programa arrojará un valor negativo expresado en valor absoluto como f_{val} optimizado, que, siguiendo las Tablas 11, 12, 13 y 14, se puede apreciar de que se trata del valor de la solución óptima a priori sustituyendo en la función objetivo.

Es por esto que el valor que se utilizará como valor optimizado será:

$$abs|TL_{optimiz}| \quad (Ec\ 64)$$

En una situación práctica, este valor optimizado, interesaría que fuera máximo en el rango de funcionamiento típico de un motor de combustión a partir del cual se monte este DPF. Sin embargo, como en este caso estamos tratando un tema analítico, el criterio va a ser el de optimizar las franjas donde menor TL haya dentro del rango estudiado.

Es por esto mismo que fijando la atención en las gráficas de las Figuras 25, 26, 27 y 28, se puede identificar de manera genérica un rango sensible de optimización. Este rango sería de [1050,1250] Hz en el caso de las mallas 1, 2, 4 mientras que en el caso de la malla 3, el rango de optimización sería [770,870] Hz.

Definido esto, se procede a la ejecución de ambos algoritmos ("ga" y "fmincon") para obtener los resultados a continuación expuestos. Para ambos programas, se ha considerado los casos con y sin hollín para apreciar la influencia de este.

5.6. ALGUNOS RESULTADOS.

5.6.1. Optimización a través de algoritmo basado en gradientes "fmincon"

En cuanto a los casos con hollín se han obtenido los siguientes resultados:

	¿Hollín?	La [m]	Lm [m]	Lc [m]	TL (fval) [dB]
Malla 1	SÍ	0,0964	0,1006	0,0982	33,6170
Malla 2	SÍ	0,0842	0,1057	0,0838	36,0257
Malla 3	SÍ	0,1473	0,0819	0,0500	31,1826
Malla 4	SÍ	0,0777	0,1066	0,0834	36,6027

Tabla 11. Resultados de optimización utilizando "fmincon" con hollín.

Por otro lado, para los casos sin hollín los resultados son los siguientes:

	¿Hollín?	La [m]	Lm [m]	Lc [m]	TL (fval) [dB]
Malla 1	NO	0,0972	0,1411	0,0978	29,2449
Malla 2	NO	0,0837	0,1500	0,0813	32,1948
Malla 3	NO	0,1500	0,0993	0,0500	26,8449
Malla 4	NO	0,0806	0,1500	0,0830	32,5388

Tabla 12. Resultados de optimización utilizando "fmincon" sin hollín.

5.6.2. Optimización a través de algoritmo genético "ga"

En cuanto a los casos con hollín se han obtenido los siguientes resultados:

	¿Hollín?	La [m]	Lm [m]	Lc [m]	TL (fval) [dB]
Malla 1	SÍ	0,0964	0,1006	0,0982	33,6170
Malla 2	SÍ	0,0842	0,1057	0,0837	36,0257
Malla 3	SÍ	0,1473	0,0819	0,0500	31,1813
Malla 4	SÍ	0,0777	0,1066	0,0833	36,6027

Tabla 13. Resultados de optimización utilizando "ga" con hollín.

Por otro lado, para los casos sin hollín los resultados son los siguientes:

	¿Hollín?	La [m]	Lm [m]	Lc [m]	TL (fval) [dB]
Malla 1	NO	0,0972	0,1411	0,0978	29,2449
Malla 2	NO	0,0837	0,1500	0,0813	32,1948
Malla 3	NO	0,0500	0,1022	0,1486	25,8288
Malla 4	NO	0,0806	0,1500	0,0830	32,5388

Tabla 14. Resultados de optimización utilizando "ga" sin hollín.

Como se puede apreciar en las tablas anteriores, tanto para un tipo de algoritmo como para otro, los resultados obtenidos son los mismos (salvo las centésimas y milésimas de la malla 3 sin ser estas significativas), por tanto, basando el estudio en estos resultados, no se podría sacar ningún resultado.

Sin embargo, los tiempos computacionales empleados para cada uno de los ensayos es distinto para cada uno de los programas. Si se tabulan y grafican, se obtiene lo siguiente:

	¿Hollín?	Algoritmo	Tiempo Computacional [s]
Malla 1	SÍ	<i>fmincon</i>	12,16
Malla 1	SÍ	<i>ga</i>	4509,37
Malla 1	NO	<i>fmincon</i>	101,68
Malla 1	NO	<i>ga</i>	4205,77
Malla 2	SÍ	<i>fmincon</i>	848,58
Malla 2	SÍ	<i>ga</i>	23998,63
Malla 2	NO	<i>fmincon</i>	645,37
Malla 2	NO	<i>ga</i>	32074,06
Malla 3	SÍ	<i>fmincon</i>	47,45
Malla 3	SÍ	<i>ga</i>	3558,79
Malla 3	NO	<i>fmincon</i>	40,65
Malla 3	NO	<i>ga</i>	3559,54
Malla 4	SÍ	<i>fmincon</i>	262,33
Malla 4	SÍ	<i>ga</i>	10290,78
Malla 4	NO	<i>fmincon</i>	225,61
Malla 4	NO	<i>ga</i>	11941,93

Tabla 15. Tiempos computacionales para todos los ensayos optimizados.

Hay que remarcar que todos estos tiempos computacionales recogidos en la Tabla 15 y que han sido empleados por el programa para optimizar las funciones, han sido

obtenidos siempre en el mismo equipo y con los mismos recursos computacionales, aportando así valor a la comparativa.

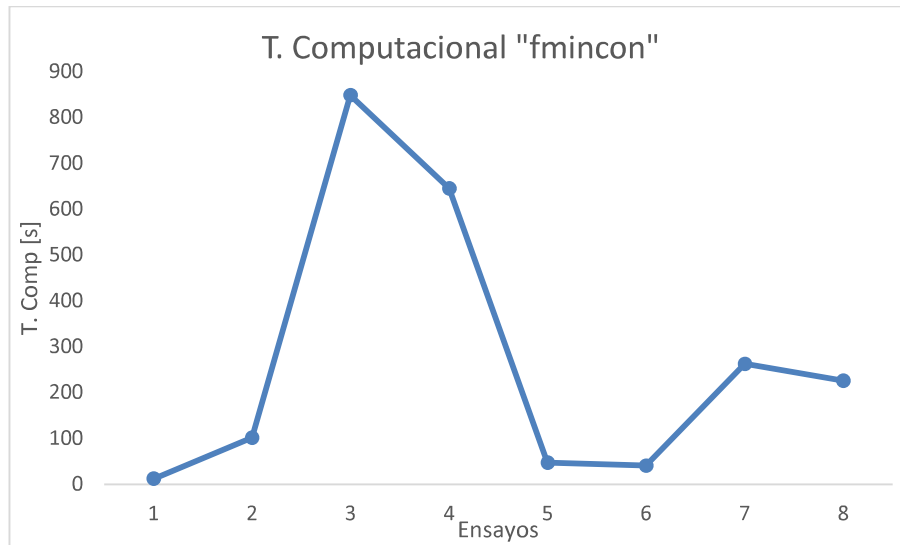


Figura 32. Gráfica del tiempo computacional con algoritmo "fmincon".

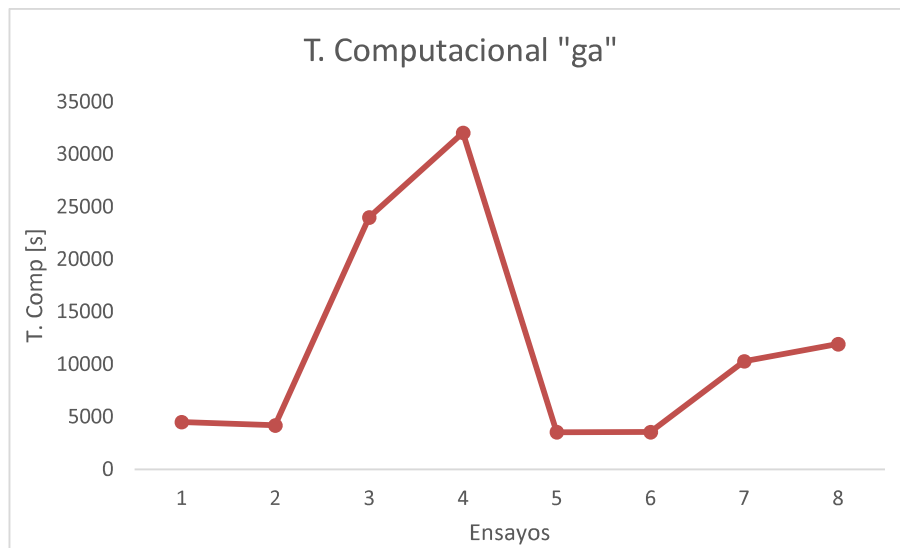


Figura 33. Gráfica del tiempo computacional con algoritmo "ga".

5.7. CONCLUSIONES.

A la vista de las gráficas del tiempo computacional empleado, se puede ver que la tendencia indica que ambos algoritmos encuentran mayor dificultad en las mallas 2 y 4 por tener los conductos descentrados. Este efecto es mayor en los ensayos 3 y 4 (Malla 2) siendo la geometría circular.

Comparando el tiempo computacional entre ambos algoritmos, se puede ver que el basado en gradientes es mucho más rápido que el basado en genética. Esto es debido al número de iteraciones empleadas.

CAPÍTULO 6: ESTUDIO Y ANÁLISIS ACÚSTICO DE FILTROS DE PARTICULAS (DPF) MEDIANTE LA METODOLOGÍA DESARROLLADA

6.1. ESTUDIO Y ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD DE LOS PARÁMETROS DE LA TÉCNICA AJUSTE MODAL.

Teniendo en cuenta todas las características dentro de lo DPF utilizados que se pueden variar, las combinaciones que se podrían obtener para observar la variabilidad de dichos parámetros serían muy grandes.

Es por eso que en este caso se ha optado por llevar a cabo una serie de comparaciones las cuales se basan en los aspectos más llamativos dentro del análisis en cuestión.

6.1.1. Variabilidad del TL en función de la presencia de hollín en el DPF

Como caso representativo, se ha tomado el ensayo en el que la longitud tiene la configuración C1 (0,10–0,10 m). Dentro de esto se ha desglosado en 4 comparaciones, teniendo en cuenta las combinaciones posibles de L_m , siendo estas: L1 (0,05m) y L3 (0,15m) contemplando estos como valores extremos de este parámetro. Además, dicha comparación se ha llevado a cabo para el caso de conductos centrados y descentrados tanto para sección circular como rectangular. Los resultados se muestran a continuación:

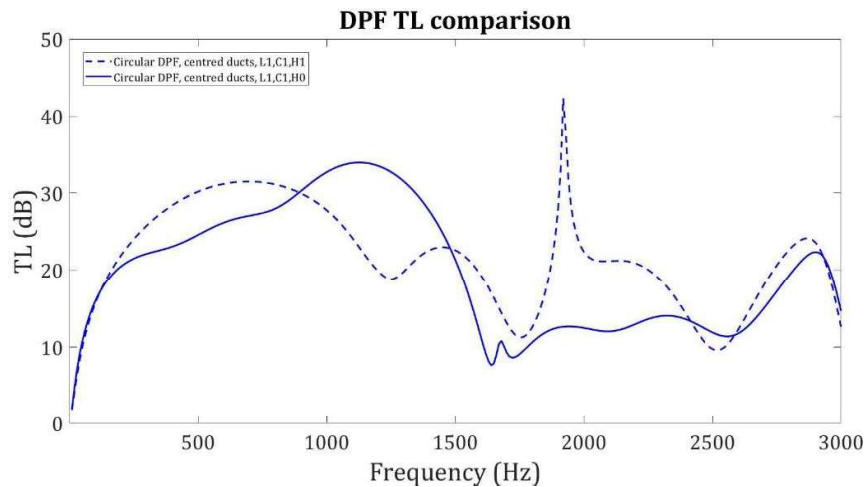


Figura 34. C7.1 Conductos circulares centrados L1, C1 con y sin hollín.

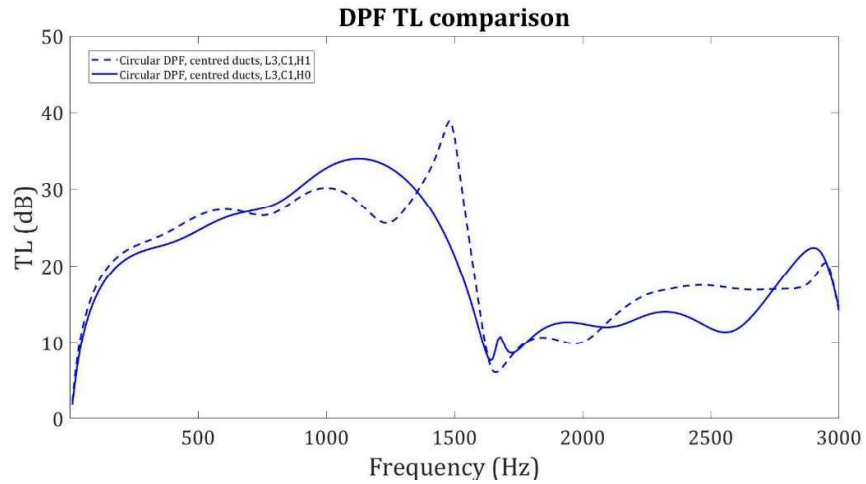


Figura 35. C7.2 Conductos circulares centrados L3, C1 con y sin hollín.

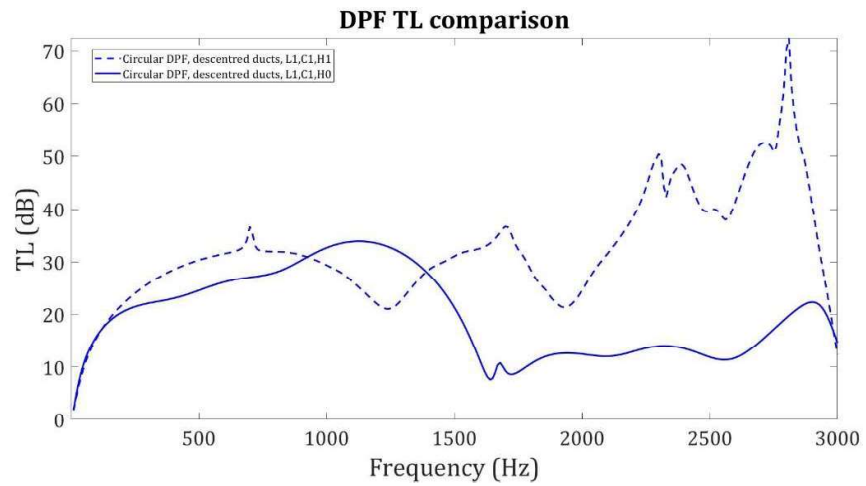


Figura 36. C7.3 Conductos circulares descentrados L1, C1 con y sin hollín.

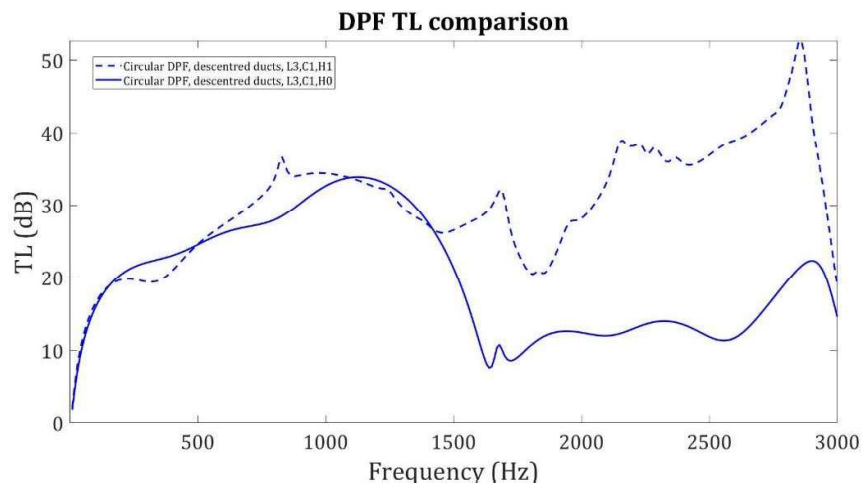


Figura 37. C7.1 Conductos circulares descentrados L3, C1 con y sin hollín.

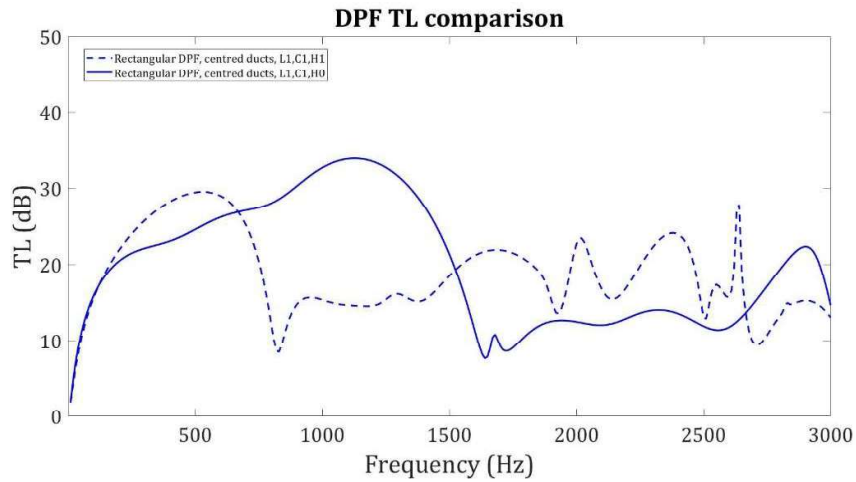


Figura 38. C8.1 Conductos rectangulares centrados L1, C1 con y sin hollín.

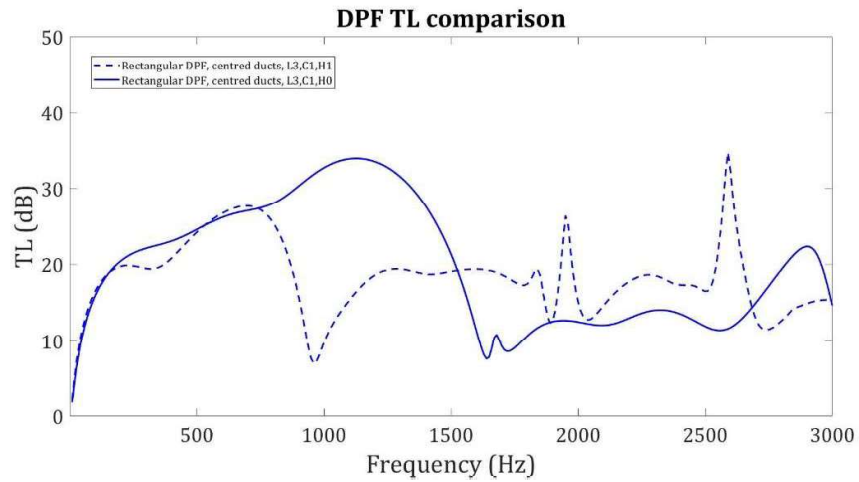


Figura 39. C8.2 Conductos rectangulares centrados L3, C1 con y sin hollín.

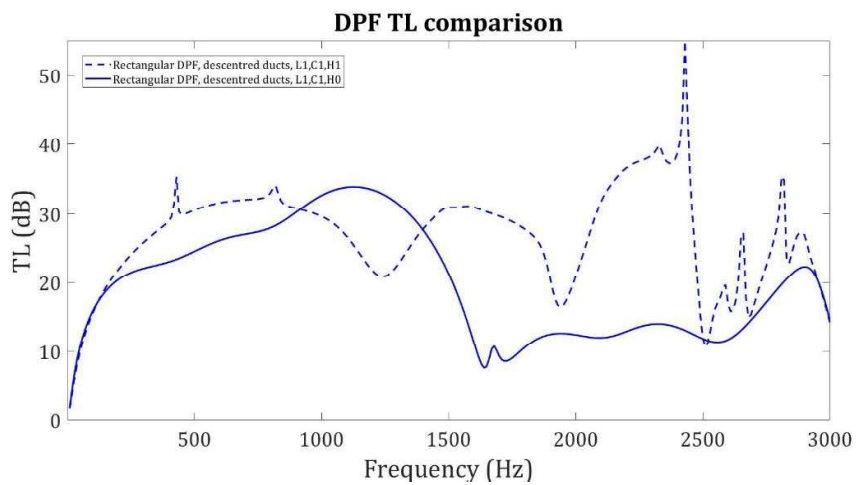


Figura 40. C8.3 Conductos rectangulares descentrados L1, C1 con y sin hollín.

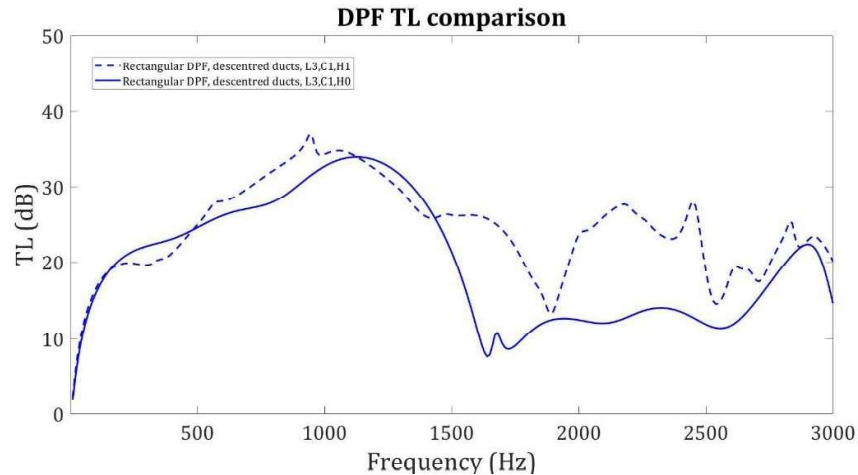


Figura 41. C8.4 Conductos rectangulares descentrados L3, C1 con y sin hollín.

Cogiendo de referencia la Figura 36 y 37, en la parte de frecuencias bajas, se aprecia que la influencia del hollín no es notoria. Una de los aspectos que podrían explicar este fenómeno sería que a bajas frecuencias el hollín es capaz de taponar inamoviblemente la sección de paso por el filtro, generando una diferencia de potencias acústicas grande y por tanto un TL mayor. Sin embargo, a altas frecuencias, el hollín puede llegar a ser desplazado de manera más notable y por tanto permitiendo el paso de los gases con una menor obstrucción y por tanto un menor coeficiente de transmisión (TL).

6.1.2. Variabilidad del TL en función del offset en las salidas del DPF

En este caso, por mostrar la influencia de este parámetro dentro del proyecto, se ha decidido realizar las comparaciones entre los resultados comparando cada una de las dos secciones por separado. Además de esto, se ha llevado a cabo un cálculo de ellas para cada una de las longitudes del monolito L_m manteniendo constante las configuraciones de contracción y expansión del sistema. En cuanto al tema del hollín, se han llevado considerando el DPF con presencia del mismo. De esta manera, se tienen 3 casos para cada una de las secciones:

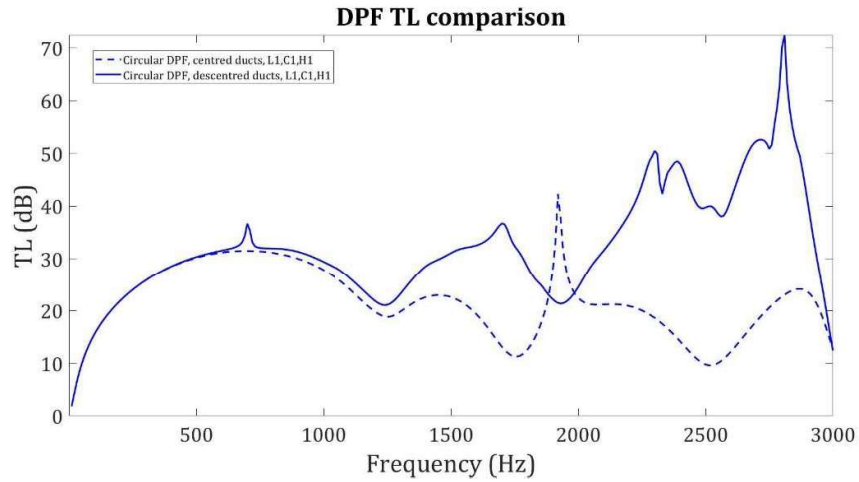


Figura 42. C5.1 Conductos circulares L1, C1, H1.

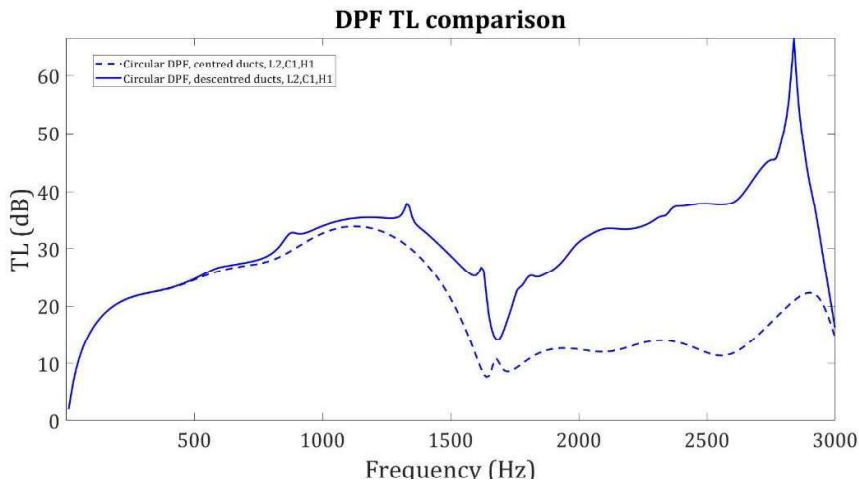


Figura 43. C5.2 Conductos circulares L2, C1, H1.

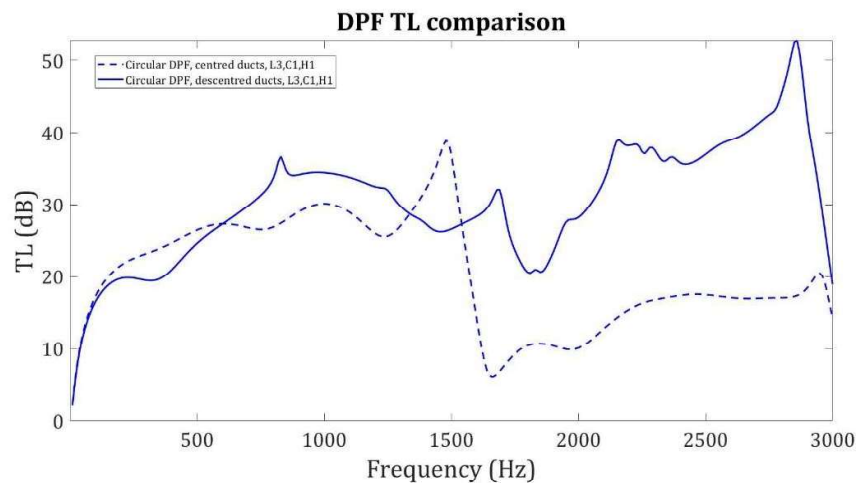


Figura 44. C5.3 Conductos circulares L3, C1, H1.

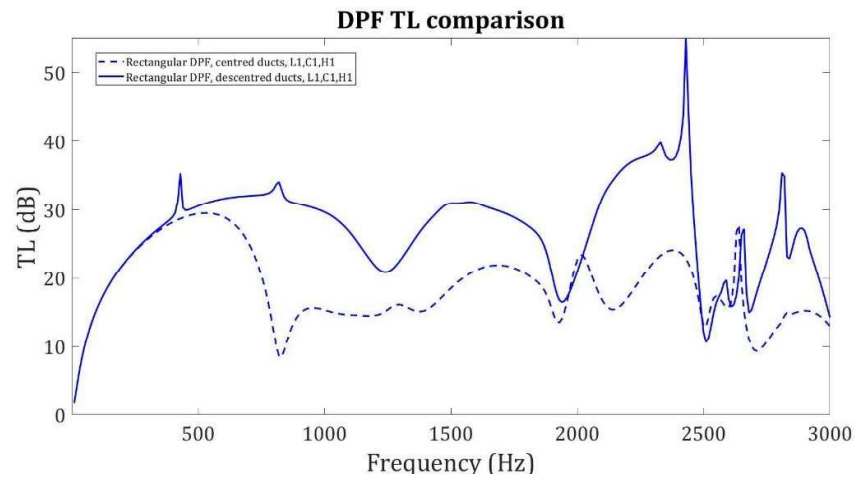


Figura 45. C6.1 Conductos rectangulares L1, C1, H1.

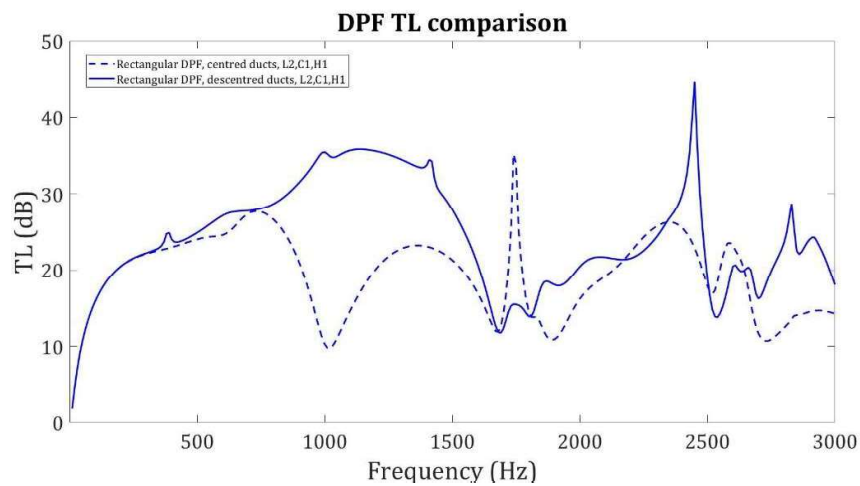


Figura 46. C6.2 Conductos rectangulares L2, C1, H1.

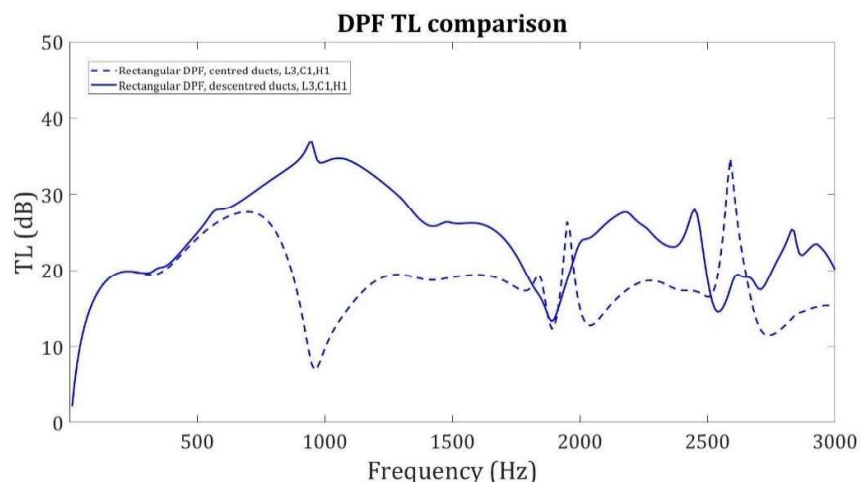


Figura 47. C6.3 Conductos rectangulares L3, C1, H1.

En este caso, se aprecia una clara predisposición a que el sistema con conductos descentrados, obtiene un mayor TL. Esto ocurre tanto en sección circular como

rectangular. La explicación acústica de este fenómeno es debido a lo comentado anteriormente en este documento acerca de la línea nodal de los modos de orden superior. Esto implica que, al colocar este conducto sobre dicha línea, la presión acústica en este punto es nula, por tanto, el coeficiente de transmisión se eleva. Esto confirma lo la hipótesis planteada al principio del proyecto sobre la distancia de desfase para dichos conductos.

6.1.3. Variabilidad del TL en función de la longitud del monolito del DPF

Para caracterizar la sensibilidad de este aspecto, se procede a estudiar para cada una de las secciones (circular y rectangular). A su vez se agrupan los casos donde los conductos de entrada y salida se encuentran alineados y los que no. Para afinar en el análisis, se ejecutan todos para ambas configuraciones de los tramos de expansión-contracción.

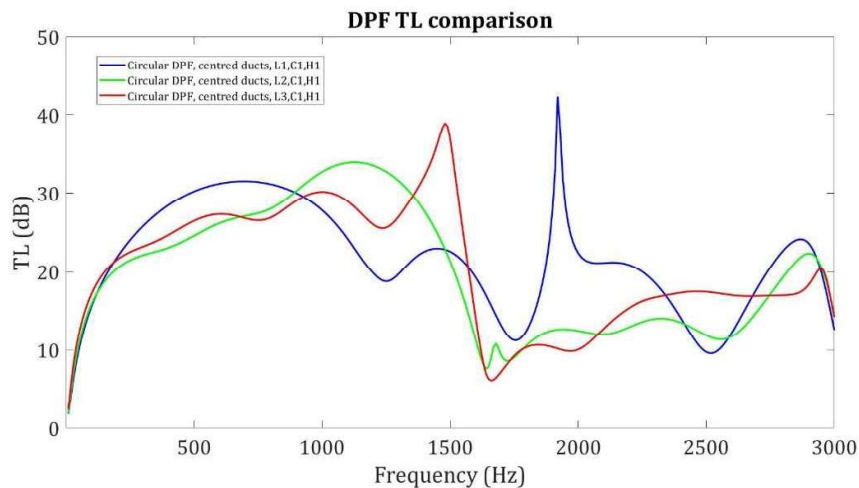


Figura 48. C9.1 Conductos circulares centrados C1.

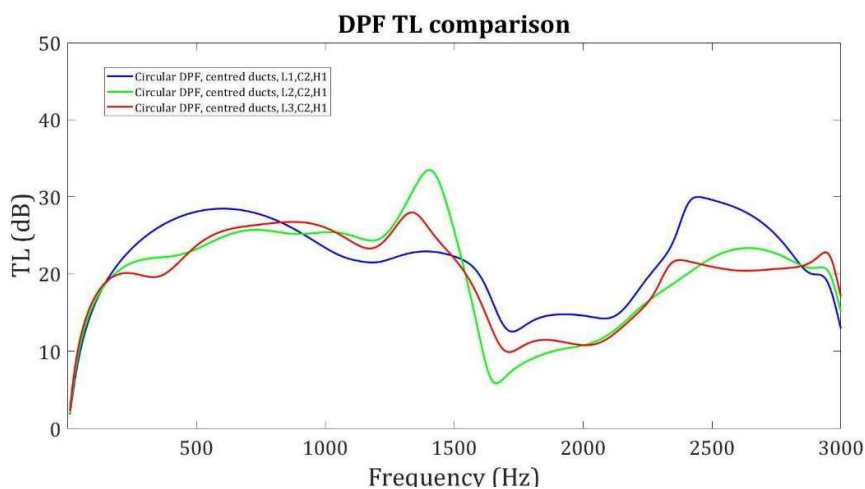


Figura 49. C9.2 Conductos circulares centrados C2.

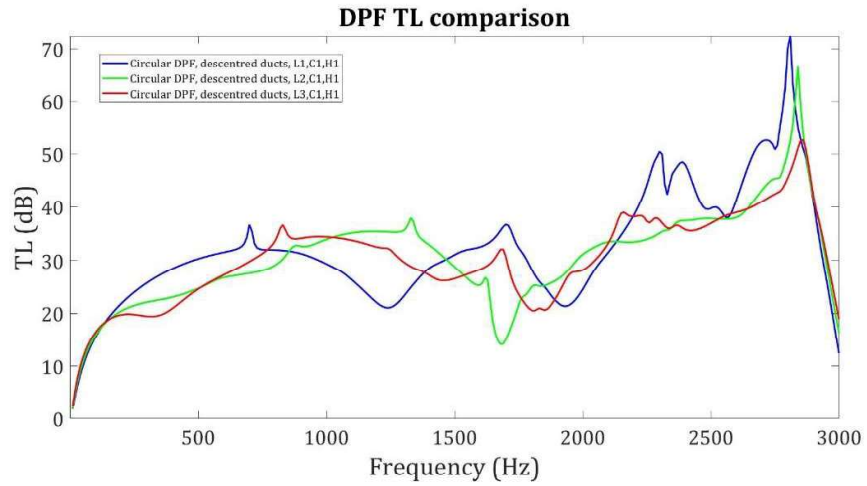


Figura 50. C9.3 Conductos circulares descentrados C1.

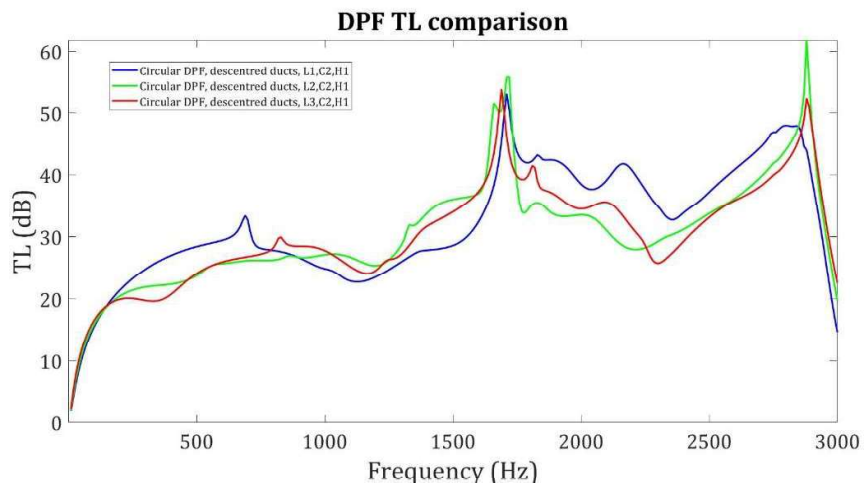


Figura 51. C9.4 Conductos circulares descentrados C2.

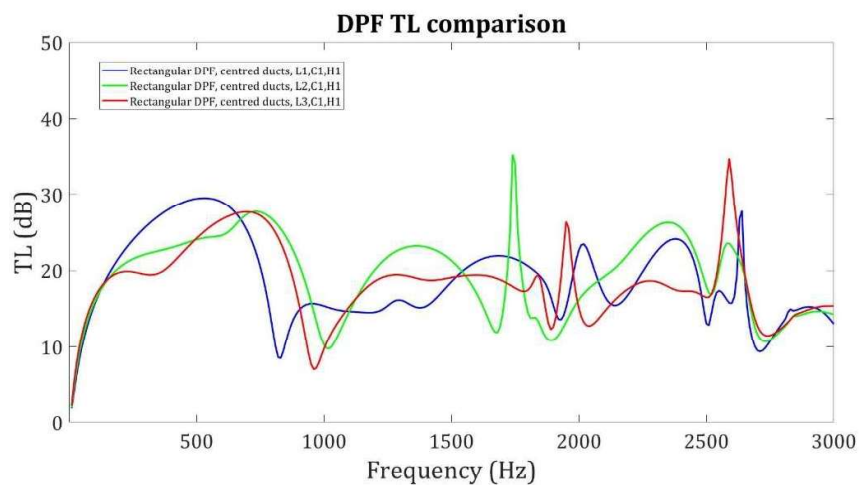


Figura 52. C10.1 Conductos rectangulares centrados C1.

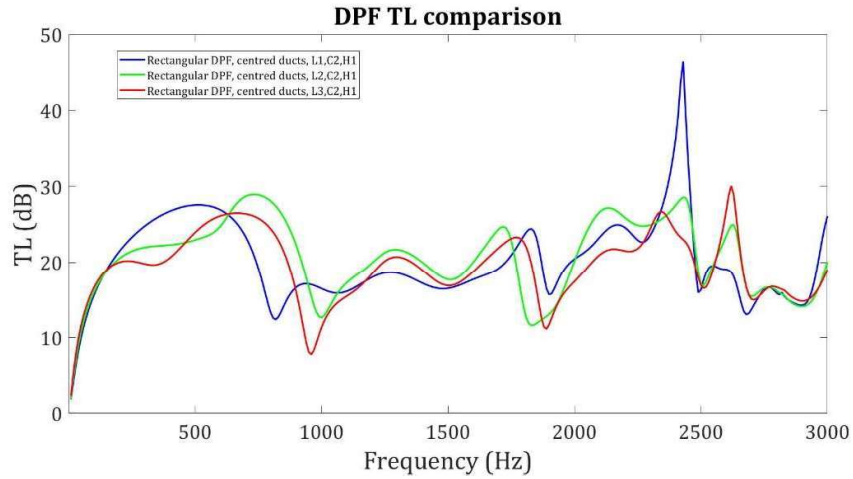


Figura 53. C10.2 Conductos rectangulares centrados C2.

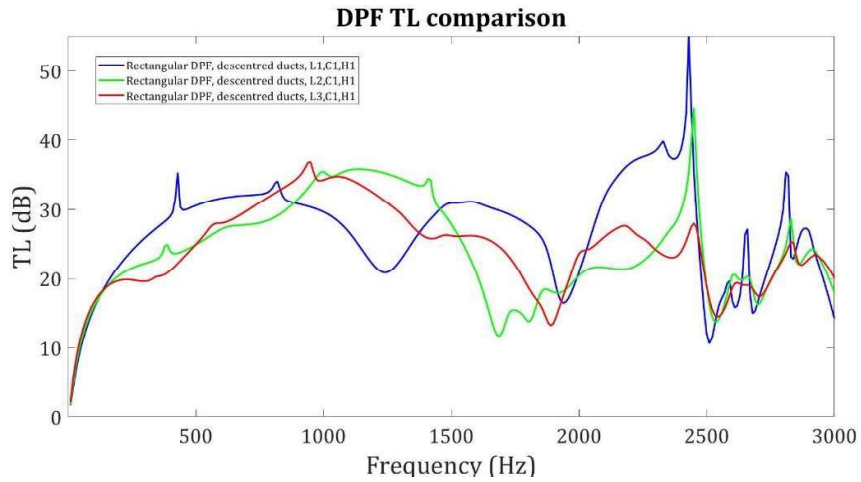


Figura 54. C10.3 Conductos rectangulares descenterados C1.

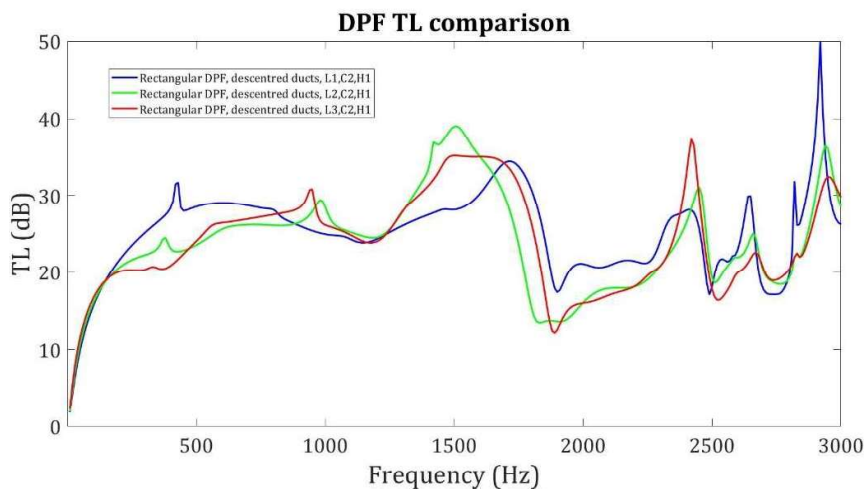


Figura 55. C10.4 Conductos rectangulares descenterados C2.

Si se centra la atención en las primeras cuatro figuras, se aprecia que, en el caso de la sección circular, tanto con conductos centrados como descenterados, bastante

variabilidad de los datos. Sin embargo, se aprecia una diferencia notable entre frecuencias bajas y altas. Ésta es que, en frecuencias bajas, cuanto menor es la longitud del monolito, menor es el TL obtenido. Sin embargo, conforme aumenta la frecuencia, ese efecto se invierte. Esto implica que conforme aumenta la frecuencia acústica, interesa reducir la longitud del monolito. Esto puede ser explicado basándonos en que produciría una pérdida de potencia mayor entre cada una de las secciones debido a una frecuencia mayor en la sección inicial.

Por otro lado, en el caso de la sección rectangular, no es tan sencillo encontrar una tendencia ya que las tres componentes de cada figura se encuentran bastante agrupadas dentro de un mismo intervalo. De esta manera, llevaría a contemplar que, en estas secciones, la longitud mayor o menor del monolito no afecta en la atenuación acústica del sistema.

6.1.4. Variabilidad del TL en función de la geometría de la sección del DPF

Con la intención de arrojar una mayor información a través de las siguientes gráficas, se ha llevado a cabo la representación de cuatro curvas representativas de conductos centrados, dos para sección circular y dos para sección rectangular. Dentro de esas dos para cada uno, se han representado longitudes extremas del monolito siendo estas 0,05 (línea discontinua) y 0,15 metros (línea continua).

En primer lugar, se hace una comparativa con la configuración C1 en las secciones de expansión-contracción como se ve a continuación:

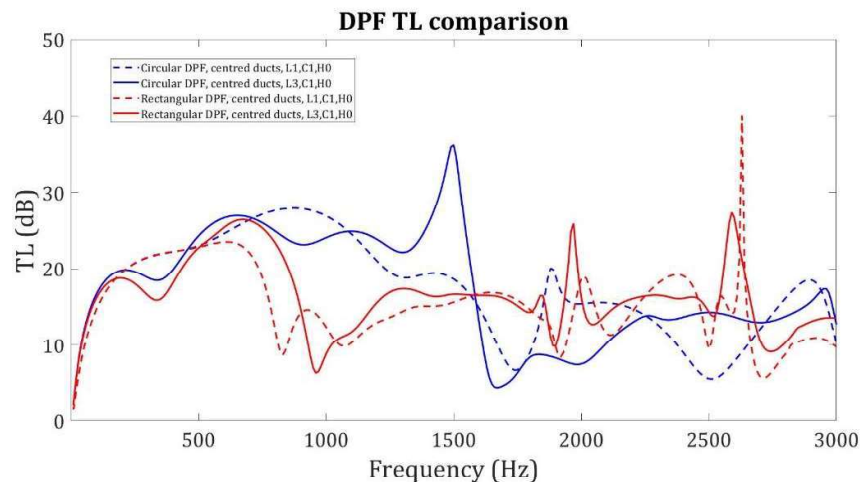


Figura 56. C1.1 Conductos centrados con C1 y L1-L3 sin hollín.

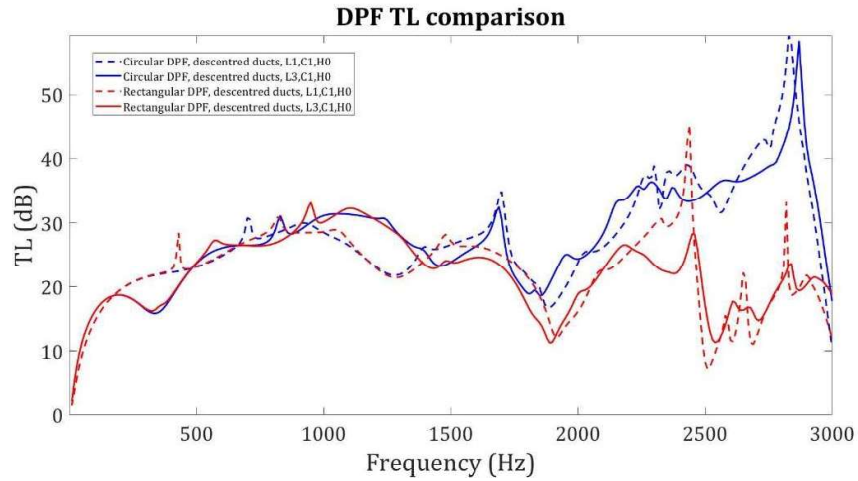


Figura 57. C2.1 Conductos descentrados con C1 y L1-L3 sin hollín.

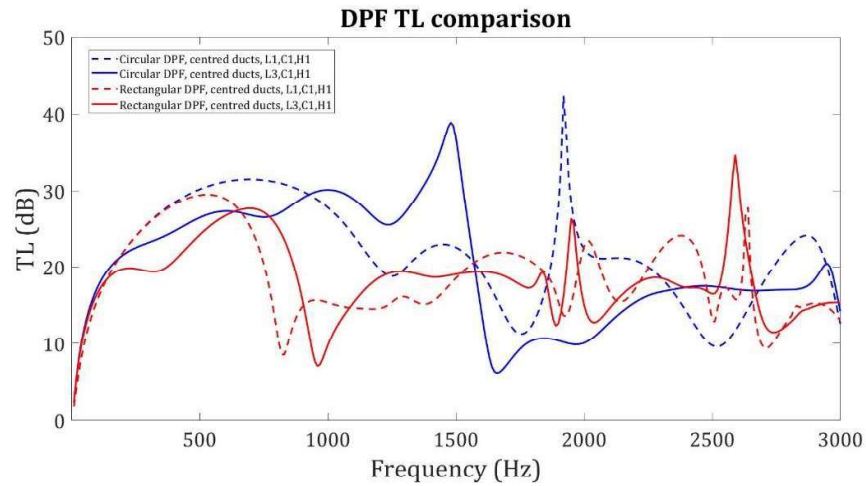


Figura 58. C3.1 Conductos centrados con C1 y L1-L3 con hollín.

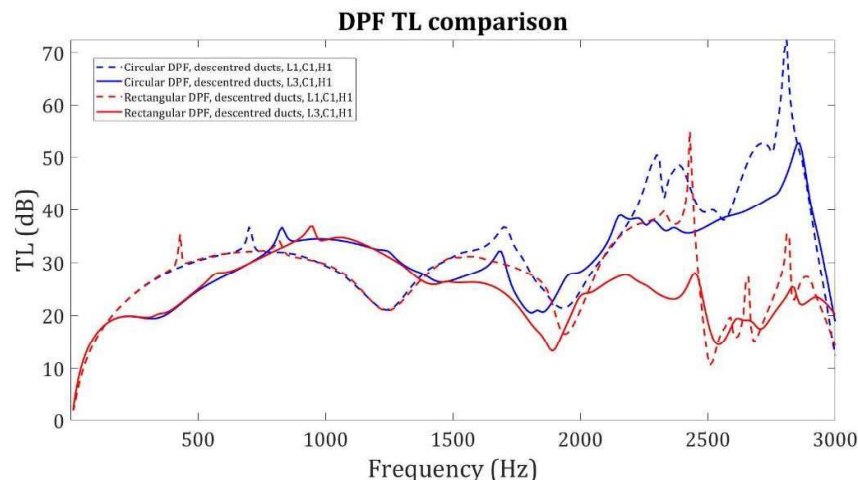


Figura 59. C4.1 Conductos descentrados con C1 y L1-L3 con hollín.

A la vista de las figuras anteriores, se puede observar que tanto en los casos sin presencia de hollín (Figuras 56 y 57) como en los casos con presencia de hollín (Figuras 58 y 59),

ambas geometrías comienzan con tramos muy parejos hasta frecuencias en torno a 1000 Hz. A partir de ahí en el caso de los conductos centrados, se produce un incremento de la geometría circular ente 1000-1500 Hz pero a partir de ahí cae en picado hasta igualarse, incluso quedándose levemente por debajo de la sección cuadrada.

En el caso de los conductos descentrados, esa igualdad se mantiene hasta frecuencias medias de en torno a 1500 Hz para que, a partir de ahí, en altas frecuencias el TL se la sección circular se ve incrementado respecto a la rectangular para ambas longitudes del monolito.

De esta manera se podría reseñar que realmente las secciones no son determinantes a la hora de tener un TL mayor o menor. Esta diferencia solamente sería apreciable a altas frecuencias (>1500 Hz) en el caso en el que las secciones de entrada y salida al DPF se encuentren descentradas.

A continuación, lo que se ha hecho ha sido limitar el estudio a ambas geometrías fijando una longitud y una configuración C2, restringiendo variables. De esta manera se busca sacar nuevas conclusiones sobre el uso de una u otra geometría.

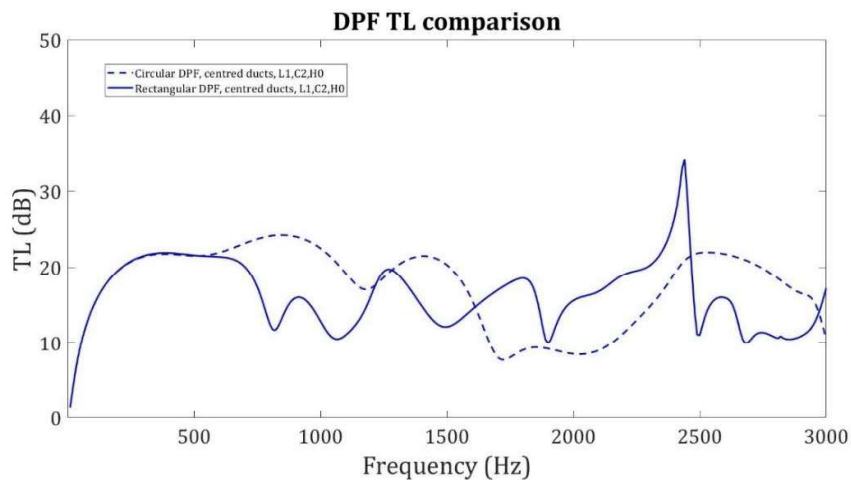


Figura 60. C1.2 Conductos centrados con C2, L1 y sin hollín.

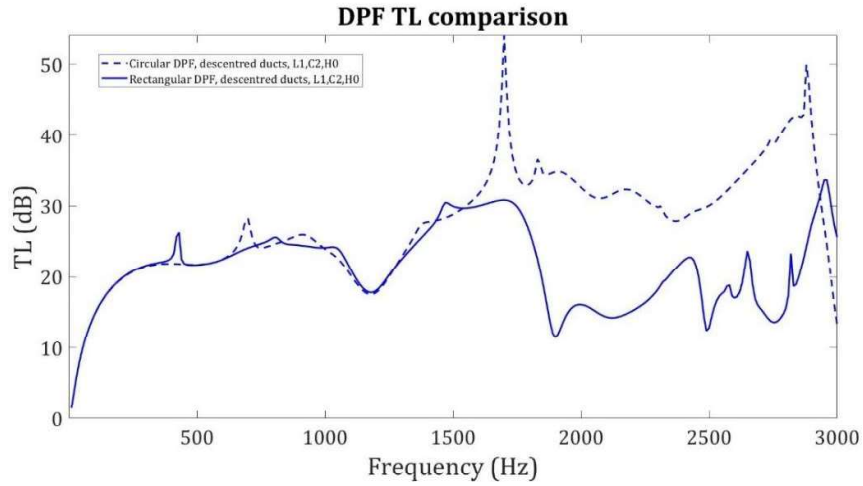


Figura 61. C2.2 Conductos descentrados con C2, L1 y sin hollín.

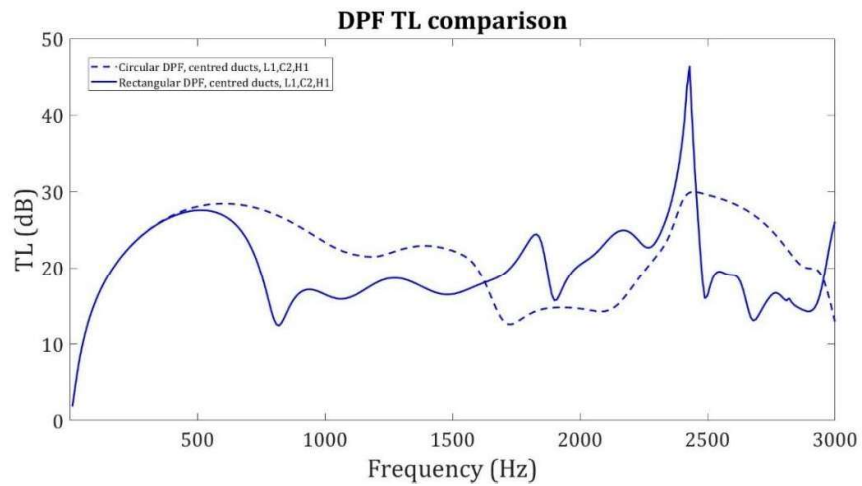


Figura 62. C3.2 Conductos centrados con C2, L1 y con hollín.

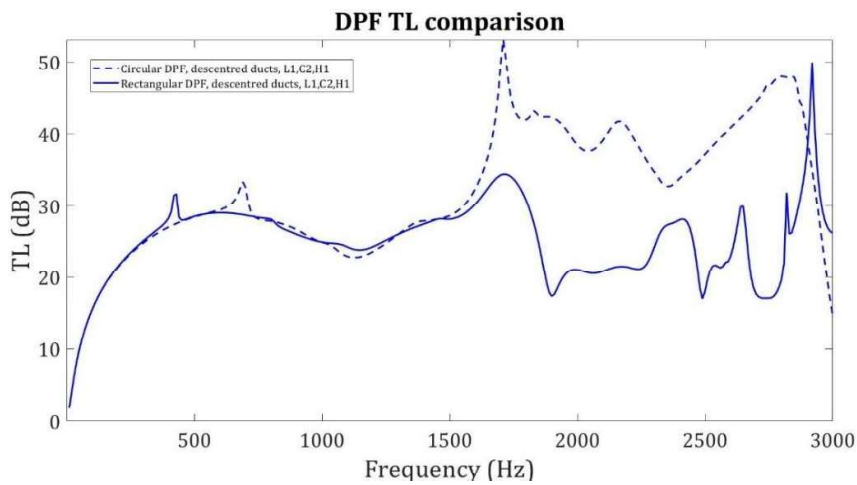


Figura 63. C4.2 Conductos descentrados con C2, L1 y con hollín.

A la vista de las cuatro gráficas anteriores, se ve claramente que tanto en presencia o no de hollín en el caso de conductos descentrados (Figura 61 y 63), la geometría circular,

es capaz de proporcionar valores de TL mayores a frecuencias altas. Sin embargo, cuando esos conductos están alineados, la diferencia no es significativa.

3.1.9. *Tiempo computacional de la técnica de ajuste modal*

Cierto es, que una de las premisas que persigue este proyecto, es la de reducir el coste computacional del cálculo acústico de este tipo de elementos y por tanto el tiempo de simulación de los mismos.

Es por esto que se han recogido todos los tiempos empleados para calcular los valores TL representados en las gráficas de las Figuras 25, 26, 27, 28 pudiendo analizar así el orden de magnitud de su duración.

Nuevamente, es necesario puntualizar que todos los tiempos mostrados a continuación han sido obtenidos bajo las mismas condiciones computacionales y ejecutadas sobre el mismo equipo. Si no hubiera sido así, no tendría sentido comparar valores temporales de cálculo.

A continuación, se muestran los tiempos utilizados para lo comentado:

	Nombre ensayo	Tiempo Computacional [s]
MALLA 1	TL1_Malla1	276,2222
	TL2_Malla1	380,2218
	TL3_Malla1	164,9595
	TL4_Malla1	171,9720
	TL5_Malla1	388,8934
	TL6_Malla1	380,9558
	TL7_Malla1	162,7310
	TL8_Malla1	162,4717
	TL9_Malla1	166,8539
	TL10_Malla1	169,3408
	TL11_Malla1	165,3207
	TL12_Malla1	164,6557
MALLA 2	TL13_Malla2	1125,2
	TL14_Malla2	1143,9
	TL15_Malla2	498,3420
	TL16_Malla2	448,3563
	TL17_Malla2	1118,6
	TL18_Malla2	870,8110
	TL19_Malla2	497,4228
	TL20_Malla2	500,1614
	TL21_Malla2	513,7365
	TL22_Malla2	492,8577
	TL23_Malla2	548,9079
	TL24_Malla2	542,6158

Tabla 16. Tiempos computacionales de todos los ensayos ejecutados (I).

	Nombre ensayo	Tiempo Computacional [s]
MALLA 3	TL25_Malla3	69,5373
	TL26_Malla3	68,9728
	TL27_Malla3	88,9592
	TL28_Malla3	88,4735
	TL29_Malla3	75,7916
	TL30_Malla3	69,6069
	TL31_Malla3	89,6557
	TL32_Malla3	89,0437
	TL33_Malla3	71,3983
	TL34_Malla3	68,6141
	TL35_Malla3	91,4734
	TL36_Malla3	90,7817
MALLA 4	TL37_Malla4	383,6906
	TL38_Malla4	376,2311
	TL39_Malla4	515,9184
	TL40_Malla4	887,4291
	TL41_Malla4	388,7168
	TL42_Malla4	384,6093
	TL43_Malla4	462,2968
	TL44_Malla4	372,0489
	TL45_Malla4	496,0792
	TL46_Malla4	469,7875
	TL47_Malla4	369,5126
	TL48_Malla4	371,9737

Tabla 17. Tiempos computacionales de todos los ensayos ejecutados (II).

A la vista de las Tablas 16 y 17 anteriores, se puede ver que por ejemplo en el caso de la Malla 3, el cálculo del TL acústico, se consigue en poco más de 1 minuto. En el caso más desfavorable, y salvando los datos extremos, el cálculo de las secciones más asimétricas como son la Malla 2 y 4 por tener los conductos descentrados, el tiempo de cálculo es en torno a 10 minutos. Esto confirma que realmente este método de caracterización acústica por ajuste modal, arroja simuladas soluciones en un tiempo de cálculo muy reducido. Además, esto implica un uso mucho más reducido que en el caso de los Elementos Finitos.

6.2. ESTUDIO Y ANÁLISIS DE LA OPTIMIZACIÓN DESARROLLADA.

Como se ha visto a lo largo de los epígrafes 5.6 y 5.7, las funciones de optimización implantadas tanto por los algoritmos basados en gradientes como los genéticos arrojan la misma solución. En ambos casos, el "Transmission Loss" ha sido la función objetivo de dicha optimización como se clarifica en el punto 5.5 de la presente memoria. Sin embargo, de dichas optimizaciones ya se ha comprobado que los resultados obtenidos como tal entre unos y otros no arrojan ninguna información adicional al respecto de este estudio.

No obstante, dado que se pretende confirmar la técnica de ajuste modal desarrollada como válida y efectiva a la hora de caracterizar acústicamente este tipo de problemas, se ha graficado el valor medio del TL obtenido con los valores de las variables obtenidas a través de la optimización respecto al valor de la propia función de optimización.

A continuación, se muestran recortes de los propios ensayos de Matlab para el cálculo del TL óptimo a partir de los valores obtenidos por los algoritmos de optimización siendo "A" el mean(TL) o valor medio del TL y "compTime" el tiempo computacional empleado:

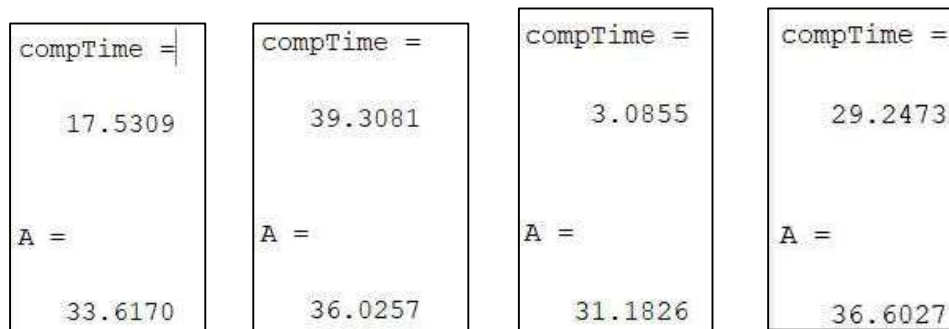


Figura 64. Tiempo computacional y valor medio de TL según valores optimizados con hollín.

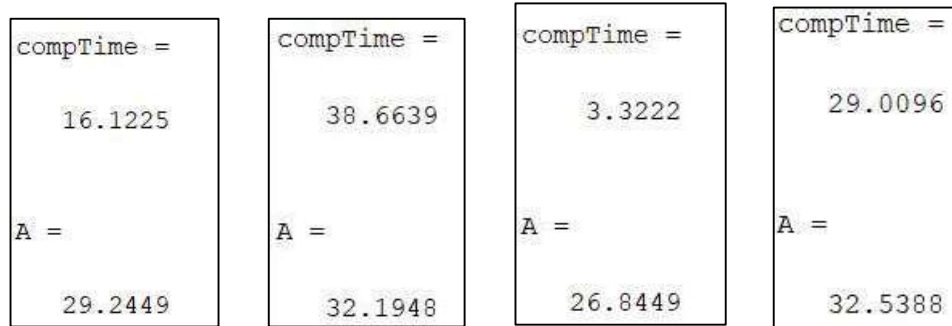


Figura 65. Tiempo computacional y valor medio de TL según valores optimizados sin hollín.

Si expresado esto, se vuelve a mostrar el resultado TL optimizado ($|fval|$) obtenido con los algoritmos de optimización de las Tablas 11 y 12 anteriores:

	¿Hollín?	La [m]	Lm [m]	Lc [m]	TL ($ fval $) [dB]
Malla 1	SÍ	0,0964	0,1006	0,0982	33,6170
Malla 2	SÍ	0,0842	0,1057	0,0838	36,0257
Malla 3	SÍ	0,1473	0,0819	0,0500	31,1826
Malla 4	SÍ	0,0777	0,1066	0,0834	36,6027

Tabla 18. Resultados optimización con hollín.

	¿Hollín?	La [m]	Lm [m]	Lc [m]	TL ($ fval $) [dB]
Malla 1	NO	0,0972	0,1411	0,0978	29,2449
Malla 2	NO	0,0837	0,1500	0,0813	32,1948
Malla 3	NO	0,1500	0,0993	0,0500	26,8449
Malla 4	NO	0,0806	0,1500	0,0830	32,5388

Tabla 19. Resultados de la optimización sin hollín.

Como se puede apreciar, los valores obtenidos en ambas situaciones “ $fval$ ” y “ A ” son idénticos, representando estos el TL obtenido por dos procedimientos diferentes. Esto demuestra que realmente la técnica de ajuste modal es capaz de caracterizar acústicamente a la perfección un elemento de este tipo con un tiempo y coste computacional mucho menor que los métodos utilizados hasta ahora como elementos finitos.

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES

En este Trabajo Fin de Máster se ha desarrollado e implementado una metodología precisa y de bajo coste computacional para la optimización acústica de filtros de partículas diésel (DPF). Esto ha permitido obtener la máxima atenuación sonora en los rangos de frecuencia de interés fijados previamente. Para ello, se ha abordado el problema mediante dos etapas globales:

1. Cálculo de las propiedades acústicas modales (frecuencias naturales y modos de presión) de las secciones transversales de los conductos implicados y obtención de la solución global de la ecuación de ondas dentro del dispositivo mediante la técnica de ajuste modal.
2. Aplicación de técnicas de optimización basadas en algoritmos genéticos y en gradiente para mejorar las prestaciones de atenuación sonora.

La integración de las técnicas descritas anteriormente ha dado como resultado final la consecución de los objetivos buscados. Una vez validadas las herramientas desarrolladas mediante comparación con el software comercial Ansys, se ha llevado a cabo un estudio detallado para la obtención de los parámetros óptimos de diseño desde un punto de vista acústico (longitudes de conductos, localización de conductos de entrada y salida, tipo de DPF, presencia de hollín, etc.) en función del intervalo de frecuencias de interés.

Los estudios se han basado en cuatro geometrías de referencia, cuya sección transversal ha sido representada por las correspondientes mallas de elementos finitos en 2D. En todos los casos se han utilizado elementos con interpolación cuadrática (fundamentalmente cuadriláteros de 8 nodos y en menor medida triángulos de 6). Los conductos de entrada y salida han sido en todos los casos circulares, mientras que para la cámara central se ha tenido en cuenta lo siguiente: (1) sección circular de radio R; (2) sección rectangular con esquinas en chaflán, en cuyo caso ha tenido el área equivalente a un círculo de radio R para facilitar la comparación de resultados. Las mallas han correspondido a:

1. Sección circular con conductos centrados.
2. Sección circular con conducto de salida descentrado. La distancia de descentrado del conducto de salida ($\text{offset} = 0.08 \text{ m}$ desde el centro) se ha calculado para que dicho conducto esté ubicado sobre la línea nodal (presión nula) del primer modo radial de orden superior. Esto ha permitido mejorar el TL respecto al caso concéntrico al haber ubicado el conducto de salida en una zona de baja presión acústica.
3. Sección rectangular con esquinas en chaflán y conductos centrados.
4. Sección rectangular con esquinas en chaflán y conducto de salida descentrado. De nuevo, la distancia de descentrado del conducto de salida ($\text{offset} = 0.0913 \text{ m}$) ha sido calculada para que dicho conducto se localice sobre la línea nodal (presión nula) del segundo modo de orden superior (por los mismos motivos comentados en 2).

Entre los criterios de selección de las cuatro geometrías se ha dado importancia a que todas tengan la misma sección transversal total, con vistas a facilitar la comparación de resultados. Por este motivo, a muy baja frecuencia los TL's han tendido a ser similares, surgiendo diferencias a medida que ha aumentado la frecuencia y se ha iniciado la propagación de modos de orden superior.

Al inicio de este Trabajo Fin de Máster, ya se remarcaba que la principal finalidad de todo el esfuerzo llevado a cabo durante el tiempo de estudio, es diseñar y validar el desarrollo de una técnica novedosa y precisa para caracterizar en términos acústicos el funcionamiento de los filtros de partículas diésel (DPF).

Para conseguir sacar conclusiones al respecto, se ha empleado uno de los ordenadores del Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales de la Universitat Politècnica de València [DIMM]. Esto ha servido para mantener siempre las capacidades computacionales iguales a lo largo de todos los ensayos y que al analizar los resultados, no influyera la mayor o menor potencia computacional en función de si se ejecuta en un equipo u otro.

En la línea de todo lo desarrollado, se puede concluir que la técnica de ajuste modal es verdaderamente efectiva, precisa y rápida a la hora de ejecutar y obtener resultados de ámbito acústico para geometrías relativamente complicadas. La mayor prueba de esto, se comprueba con la validación del sistema comparado con la geometría en elementos finitos como se aprecia en el epígrafe 4.6. En él se ha podido comprobar que realmente la desviación y el error relativo de los resultados obtenidos a través de la técnica de ajuste modal son despreciables si se comparan con una técnica ya bastante utilizada y validada como elementos finitos en el programa ANSYS. (Juárez Enríquez, 2020)

Teniendo valores máximos de 1,08% de error relativo, se clarifica que la técnica de ajuste modal arroja resultados al 98,92% de precisión respecto un modelo 3D simulado con elementos finitos.

Continuando con esta comparativa, es evidente que el tiempo computacional y los recursos computacionales necesarios para el desarrollo de cada simulación en ANSYS son mucho más elevados que con la técnica de ajuste modal en MATLAB. Esta última puede llegar a requerir en torno a 800 segundos en el cálculo acústico del sistema completo, mientras que con ANSYS y utilizando una malla fina, pueden llegar a ser necesarias varias horas.

De esta manera esto validaría el modelo estudiado. Sin embargo, a través del estudio llevado a cabo por medio de la optimización del TL dentro del rango más desfavorable de cada sistema, se han obtenido resultados aún más concluyentes. Esto quedaría recogido en el epígrafe 6.2 donde se simula el TL con las longitudes resultantes de la optimización, tanto a través del algoritmo genético como del basado en gradientes (por arrojar el mismo valor). Teniendo esto, al calcular el valor medio del TL con la técnica de ajuste modal en dichos rangos desfavorables: 1050-1250 Hz para la Malla 1, 2, 4 y entre 770-870 Hz para la Malla 3, se aprecia claramente que el valor obtenido es exactamente el mismo que el valor de la función de optimización utilizada, donde no interviene la técnica de ajuste modal.

Una conclusión que deriva también del análisis de las geometrías utilizadas, es en cuanto a cuál es la mejor configuración geométrica de las componentes del conjunto del DPF. Esto puede ser apreciado en el apartado 6.4 de la presente memoria.

En cuanto a las configuraciones de expansión-contracción del sistema, realmente no varían en gran manera el resultado de atenuación acústica. Sin embargo, con la presencia o no de hollín sí que se puede obtener alguna diferencia variando el rango de frecuencias ya que como se ha

visto, cuando existe hollín en el monolito a partir de frecuencias medias se produce una mejora del TL. El motivo fundamental está asociado al hecho de que la onda debe atravesar necesariamente la pared porosa del monolito, disipándose energía sonora en forma de calor. A mayor cantidad de hollín, menor permeabilidad, lo cual acentúa los fenómenos de disipación viscotérmica a través de las paredes del filtro, aumentando por tanto el valor del TL. Como aspecto negativo, esto debe ser controlado mediante la correspondiente regeneración del filtro (eliminación de hollín) puesto que niveles excesivos de hollín implican mayores pérdidas de carga, reducción de las prestaciones del motor y eventualmente problemas mecánicos en el vehículo. Es por ello que este factor no es variable en diseño para mejorar la atenuación acústica de los DPF. (Juárez Enríquez, 2020)

Por otro lado, la sección utilizada y la disposición de los conductos de entrada y salida, sí que es variable en la fase de diseño obteniendo mejores resultados en funcionamiento. En cuanto a esto, se ha observado una mejora del TL cuando tenemos secciones circulares frente a las rectangulares. También es apreciable, cuando los conductos de entrada y salida del DPF se encuentran descentrados entre sí situando uno de ellos sobre la línea nodal de los modos de orden superior. Esta mejora es por tanto producida porque sobre dicha línea, la presión acústica es nula reduciendo así el coeficiente de transmisión. Adicionalmente, la utilización de sección circular retarda la propagación de modos de orden superior, evitando parcialmente el colapso típico del TL a alta frecuencia. Dicho colapso se adelanta a frecuencias menores con secciones rectangulares, debido a que la longitud transversal es considerable en una de las dos dimensiones.

La última conclusión rigurosa del presente estudio, va ligada a los algoritmos de optimización. Como se ha visto anteriormente, los algoritmos de optimización basados en gradiente no siempre obtienen el máximo absoluto de una función, sino que se pueden estancar en un punto local relativo. Sin embargo, los algoritmos genéticos de forma más habitual, llegan a la solución óptima si son guiados adecuadamente. El problema de estos últimos son los recursos computacionales que necesitan y por tanto el tiempo computacional se incrementa en exceso en ensayos sencillos.

Es por esto que en casos de simulaciones que no son excesivamente complejas como estas, se ha comprobado que realmente tanto el algoritmo genético como el que se basa en el cálculo de gradientes funciona de manera correcta arrojando el mismo valor final.

CAPÍTULO 8: DESARROLLOS FUTUROS

Los filtros de partículas diésel como los estudiados en el presente TFM, son un elemento relativamente joven en el tiempo ya que hasta hace relativamente poco (dos décadas aproximadamente), su utilización en automóviles era marginal. Es por esto que realmente hay mucho por investigar al respecto.

Para la modelización acústica del DPF, la información disponible en la bibliografía es relativamente limitada, puesto que su implantación comenzó hace unas décadas, por lo que será una de las líneas de investigación del departamento en los próximos años. Además de la utilización en motores diésel, se está convirtiendo en práctica común recurrir a filtros en motores de encendido provocado, lo cual abre un nuevo campo de investigación.

Entre los posibles aspectos a abordar en el futuro, cabe indicar también que las simulaciones llevadas a cabo en el presente TFM se han hecho a baja temperatura (lo que se conoce como hipótesis de flujo frío). Uno de los motivos fundamentales está asociado a la facilidad de validación en laboratorio trabajando con estas condiciones. El siguiente paso podría estar relacionado con el efecto de la temperatura en el comportamiento acústico del DPF, así como la inclusión de flujo medio en el modelo con el objetivo de representar los gases de escape del motor.

Otra posibilidad sería llevar a cabo la modelización acústica integral del sistema de escape completo, incluyendo catalizador, trampas de partículas y silenciadores en una disposición en serie, tal y como se ensamblan comercialmente. De esta manera, los resultados serían representativos a nivel global. También cabría la posibilidad de ampliar el abanico de programas de optimización a utilizar para dar mayor validez a los resultados obtenidos. Así, las simulaciones de Matlab podrían complementarse con otras provenientes del programa modeFRONTIER, que ya ha sido utilizado con éxito por el grupo investigador en el que se enmarca este TFM.

CAPÍTULO 9: BIBLIOGRAFÍA

- Allam, S., & Åbom, M. (2005). Acoustic modelling and testing of diesel particulate filters. *Journal of Sound and Vibration*, 288(1–2), 255–273. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2005.01.004>
- Allam, S., & Åbom, M. (2006). Sound propagation in an array of narrow porous channels with application to diesel particulate filters. *Journal of Sound and Vibration*, 291(3–5), 882–901. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2005.07.022>
- Busque el mínimo de función multivariable no lineal restringida - MATLAB fmincon - MathWorks España.* (n.d.). Retrieved June 25, 2020, from <https://es.mathworks.com/help/optim/ug/fmincon.html>
- Denia, F. D. (2018). *Trabajo Original de Investigación para la Cátedra de la Universitat Politècnica de València* (p. 84).
- Denia, F. D., Antebas, A. G., Kirby, R., & Fuenmayor, F. J. (2009). Multidimensional acoustic modelling of catalytic converters. *16th International Congress on Sound and Vibration 2009, ICSV 2009, 1*(July), 487–494.
- Denia, F. D., Martínez-Casas, J., Baeza, L., & Fuenmayor, F. J. (2012). Acoustic modelling of exhaust devices with nonconforming finite element meshes and transfer matrices. *Applied Acoustics*, 73(8), 713–722. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2012.02.003>
- Denia, F. D., Martínez-Casas, J., Carballeira, J., Nadal, E., & Fuenmayor, F. J. (2018). Computational performance of analytical methods for the acoustic modelling of automotive exhaust devices incorporating monoliths. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 330, 995–1006. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2017.03.010>
- Esparcia García, L. (2014). *Optimización Forma Basado En Algoritmos De Tipo Gradiente Y Un Código Mef De Mallados Cartesianos*.
- Find minimum of function using genetic algorithm - MATLAB ga - MathWorks España.* (n.d.). Retrieved June 26, 2020, from <https://es.mathworks.com/help/gads/ga.html>
- Juárez Enríquez, P. Á. (2020). *Diseño de una metodología para la modelización acústica 3D mediante elementos finitos de dispositivos con monolito en sistemas de escape de vehículos. Aplicación a filtros de partículas diésel*. Universitat Politècnica de València.
- Paredes, B. (2016). *Optimización en ingeniería*. ESS Blog. <https://www.esss.co/es/blog/optimizacion-en-ingenieria/>
- Sánchez-Orgaz, E. M., Denia, F. D., Martínez-Casas, J., & Baeza, L. (2017). Efficient approaches for the acoustic modelling of automotive exhaust devices. Application to configurations incorporating granular materials and monoliths. *24th International Congress on Sound and Vibration, ICSV 2017*, 1–8.
- Sánchez Orgaz, E. M. (2011). *EVALUACIÓN DE ESTRATEGIAS DE PARAMETRIZACIÓN GEOMÉTRICA Y DE LA MEDIDA DE CONTROL DE LA VELOCIDAD DE CONVERGENCIA EN METODOLOGÍAS DE OPTIMIZACIÓN DE FORMA BASADAS EN ALGORITMOS EVOLUTIVOS*. 133.
- Valencia, U. P. de. (2019). *Retribuciones Profesorado Universitario*. http://www.upv.es/entidades/SRH/menu_urlv.html?/entidades/SRH/retribuciones/U0807596.pdf



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

PRESUPUESTO

ÍNDICE DEL PRESUPUESTO

1- Presupuesto	79
1.1. Partida 0: Equipos necesarios.....	79
1.2. Partida 1: Acciones previas.....	79
1.3. Partida 2: Antecedentes e información.....	80
1.4. Partida 3: Desarrollo del tfm en cuestión.....	80
1.5. Partida 4: Correcciones con el tutor y modificaciones del documento	80
2- Desglose del presupuesto	80
2.1. UO 01.1: Concepción del proyecto.....	80
2.2. UO 02.1: Búsqueda de información, lectura de artículos, documentos sobre el tema a desarrollar	81
2.3. UO 02.2: Redacción de la información teórica de los DPF y caracterización acústica	81
2.4. UO 03.1: Realización de simulaciones en ANSYS y Matlab	82
2.5. UO 03.2: Elaboración y desarrollo de las conclusiones obtenidas.....	83
2.6. UO 04.1: Revisiones y modificaciones del documento final	83
2.7. Costes materiales	83
2.8.1 Ordenador portátil MSI GL65con Windows Home 10	83
2.8.2 Conjunto de mesa de escritorio, silla y flexo.	84
2.8.3 Papelería auxiliar.....	84
2.8.4 Internet.....	84
2.8.5 Electricidad	84
3- Resumen del presupuesto	85

1- PRESUPUESTO

Como todos los proyectos desarrollados independientemente de la índole a la que responda, se le atribuye unos costes. Estos costes son recogidos en un presupuesto global del proyecto. Como es sabido, en este caso, se trata de un proyecto donde únicamente se han utilizado recursos electrónicos y auxiliares ya que no lleva asociado ninguna parte experimental donde se haya tenido que proceder a la compra de materiales o al uso de herramientas.

Es por esto, como analogía con otros ámbitos laborales, se va a dividir el presente presupuesto en Capítulos y a su vez en Unidades de obra. Este coste es totalmente orientativo, debido a que no se puede contabilizar con los medios de los que se disponen cosas como el consumo eléctrico de los equipos utilizados, ya que por ejemplo un ordenador puede pasar de consumir 15 W en modo ahorro hasta los 150 W en modo turbo. En cuanto a los costes atribuidos a elementos domésticos necesarios, se asigna un valor de su vida útil como se verá más adelante.

Todas estas tareas van a ser desarrolladas por el autor de este proyecto, siendo Ingeniero Industrial. Es por esto que las horas empleadas por el mismo para el desarrollo del mismo van a ser cotizadas según un valor medio recogido en los diferentes convenios donde representan el puesto de Ingeniero. Este valor se media en torno a los 24.000 €/año para un Ingeniero junior.

Para establecer el precio horario del mismo, se va a considerar una jornada laboral completa de 8h, ya que se entiende que hay dedicación plena al proyecto. Así mismo, un año está formado por 52 semanas, en las cuales la jornada laboral forma 40h/semanales. Esto hace un total de 2080 h. Sacando el coste horario de este supuesto, se tiene:

$$\frac{24.000 \text{ €}}{2080 \text{ h}} = 11,54 \frac{\text{€}}{\text{hora laboral}}$$

1.1. PARTIDA 0: EQUIPOS NECESARIOS

Aquí quedan recogidos los equipos electrónicos, equipos auxiliares y suministros utilizados para el desarrollo del TFM:

1. Ordenador portátil MSI GL65 con Windows Home 10
2. Ratón Eastern Times Tech
3. Electricidad
4. Conjunto de mesa de escritorio, silla y flexo.
5. Papelería auxiliar

1.2. PARTIDA 1: ACCIONES PREVIAS

En este capítulo se van a incluir las tareas pertinentes en el comienzo de un Proyecto Final de Máster como son:

- UO 01.1: Búsqueda de un tema interesante para llevarlo a cabo de forma motivada.
- UO 01.2: Búsqueda de un tutor de TFM y burocracia asociada.

1.3. PARTIDA 2: ANTECEDENTES E INFORMACIÓN

Formando parte de este capítulo encontraríamos:

- UO 02.1: Búsqueda de información y lectura de artículos, documentos sobre el tema a desarrollar.
- UO 02.2: Redacción de la información teórica de los DPF y caracterización acústica.

1.4. PARTIDA 3: DESARROLLO DEL TFM EN CUESTIÓN

Incluyendo los aspectos más importantes como son:

- UO 03.1: Realización de simulaciones en ANSYS y Matlab.
- UO 03.2: Elaboración y desarrollo de las conclusiones obtenidas.

1.5. PARTIDA 4: CORRECCIONES CON EL TUTOR Y MODIFICACIONES DEL DOCUMENTO

Incluyendo los aspectos más importantes como son:

- UO 04.1: Correcciones con el tutor y modificaciones del documento.

2- DESGLOSE DEL PRESUESTO

2.1. UO 01.1: CONCEPCIÓN DEL PROYECTO.

Id.	Descripción	Ud.	Medición	Coste unitario	Coste Total
01.1.1	Desarrollo de las diferentes partes del proyecto a partir de una idea	h	15	11,54 €	173,10 €
01.1.2	Conversaciones con diversos organismos	h	4	32,24 €	128,96 €
01.1.3	Decisión final basada en pros y contras por el autor	h	3	11,54 €	34,62 €
COSTE UO 01.1					336,68 €

Tabla presupuestaria 1. UO 01.1 Concepción del proyecto.

2.2. UO 02.1: BÚSQUDA DE INFORMACIÓN, LECTURA DE ARTÍCULOS, DOCUMENTOS SOBRE EL TEMA A DESARROLLAR

Id.	Descripción	Ud.	Medición	Coste unitario	Coste Total
02.1.1	Lectura de los distintos artículos por parte del autor	h	60	11,54 €	692,40 €
02.1.2	Lectura de documentos relacionados con la línea de investigación planteada	h	20	11,54 €	230,80 €
02.1.3	Lectura de libros relacionados con la temática	h	10	11,54 €	115,40 €
COSTE UO 02.1					1038,60 €

Tabla presupuestaria 2. UO 02.1. Búsqueda de información y lectura de artículos, documentos sobre el tema a desarrollar.

2.3. UO 02.2: REDACCIÓN DE LA INFORMACIÓN TEÓRICA DE LOS DPF Y CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA

Id.	Descripción	Ud.	Medición	Coste unitario	Coste Total
02.2.1	Redacción y formato de los diferentes epígrafes de los presentes documentos en WORD	h	60	11,54 €	692,40 €
02.2.2	Elaboración de tablas y gráficas en EXCEL	h	6	11,54 €	69,24 €
02.2.3	Referenciado bibliográfico con Mendeley	h	1	11,54 €	11,54 €
COSTE UO 02.2					773,18 €

Tabla presupuestaria 3. UO 02.2. Redacción de la información teórica de los DPF y caracterización acústica.

En este caso, las licencias de los programas Word y Excel pertenecientes a la licencia de Office365 no tiene coste alguno debido a que se trata de la licencia de estudiante de la Universitat Politècnica de València y por tanto es gratuita. En cuanto a la licencia de Mendeley, se trata de un programa abierto, añadiendo también coste cero.

2.4. UO 03.1: REALIZACIÓN DE SIMULACIONES EN ANSYS Y MATLAB

Id.	Descripción	Ud.	Medición	Coste unitario	Coste Total
03.1.1	Simulación de las mallas de ANSYS	h	30	11,54 €	346,20 €
03.1.2	Realización de diseños en SolidWorks	h	2	0 €	0 €
03.1.3	Simulación de los TL para las 48 mallas con MATLAB y el programa de ajuste modal	h	15	11,54 €	173,10 €
03.1.4	Representación gráfica de las comparaciones C_{ij} en MATLAB	h	8	11,54 €	92,32 €
03.1.5	Optimización de las mallas en cuestión con el algoritmo "fmincon" de MATLAB	h	8	11,54 €	92,32 €
03.1.6	Optimización de las mallas en cuestión con el algoritmo "ga" de MATLAB	h	32	11,54 €	369,28 €
03.1.7	Cálculo con MATLAB del TL medio en el rango de estudio de cada malla	h	2	11,54 €	23,08 €
03.1.8	Licencia ANSYS	h	30	14,42 €	432,60 €
03.1.9	Licencia MATLAB	h	65	0,39 €	25,35 €
COSTE UO 03.1					1554,25 €

Tabla presupuestaria 4. UO 03.1. Realización de simulaciones en ANSYS y MATLAB.

En cuanto al precio horario de las licencias, ha sido tomado como un valor aproximado del coste horario del programa teniendo en cuenta que la licencia de ANSYS tiene un coste en torno a 30.000 €/año según la configuración y que la de MATLAB tiene un coste de 800 €/año. Suponiendo que solo se utiliza en horario laboral, se tendrían de uso 2080 horas disponibles como se ha visto anteriormente. De esta manera, el coste horario es de:

$$30.000 \frac{\text{€}}{\text{año ANSYS}} \cdot \frac{1 \text{ año}}{2080 \text{ horas laborales}} = 14,42 \frac{\text{€}}{\text{hora laboral ANSYS}}$$

$$800 \frac{\text{€}}{\text{año ANSYS}} \cdot \frac{1 \text{ año}}{2080 \text{ horas laborales}} = 0,39 \frac{\text{€}}{\text{hora laboral ANSYS}}$$

Por otro lado, el coste de SolidWorks se contemplará dentro de los gastos indirectos e imprevistos del proyecto.

2.5. UO 03.2: ELABORACIÓN Y DESARROLLO DE LAS CONCLUSIONES OBTENIDAS

Id.	Descripción	Ud.	Medición	Coste unitario	Coste Total
03.2.1	Conclusiones de los resultados obtenidos sobre la técnica de ajuste modal en general y su validación en ANSYS	h	12	11,54 €	138,48 €
03.2.2	Conclusiones sobre los tiempos computacionales	h	3	11,54 €	34,62 €
03.2.3	Conclusiones sobre las comparativas de los TL según la influencia de las variables geométricas	h	12	11,54 €	138,48 €
03.2.4	Conclusiones sobre la optimización y el TL medio de ajuste modal	h	6	11,54 €	69,24 €
03.2.5	Ajuste y nombrado de las tablas y gráficas	h	1	11,54 €	11,54 €
COSTE UO 03.2					392,36 €

Tabla presupuestaria 5. UO 03.2. Elaboración y desarrollo de las conclusiones obtenidas.

2.6. UO 04.1: REVISIONES Y MODIFICACIONES DEL DOCUMENTO FINAL

Id.	Descripción	Ud.	Medición	Coste unitario	Coste Total
04.1.1	Reuniones autor-jefe comentando errores de formato y/o contenido	h	4	32,24 €	128,96 €
04.1.2	Modificación por parte del autor de las partes afectadas	h	15	11,54 €	173,10 €
04.1.3	Ajuste final de formato y generación de PDF	h	0,25	11,54 €	2,89 €
COSTE UO 04.1					304,95 €

Tabla presupuestaria 6. UO 04.1. Revisiones y modificaciones del documento final.

2.7. COSTES MATERIALES

Puesto que los materiales y equipos utilizados no han sido comprados exclusivamente para el presente proyecto, ya tenían una parte de amortización y deterioro no calculado. Es por esto que se va a estimar los costes de amortización de los mismos en función de su coste y de su vida útil.

2.8.1 Ordenador portátil MSI GL65 con Windows Home 10

Siendo este el ordenador utilizado por el autor, con un coste de 1.789 €. Estimando que la vida útil de un ordenador de estas características, actualmente se encuentra en 7 años. Estaríamos hablando de 14.560 horas laborales a lo largo de su vida útil. Si reducimos esas horas en un 15% debido a las fases de la vida del mismo donde las exigencias por parte de programas son elevadas, se tendrían 12.376 h. Por tanto, el coste horario que computa por este ordenador es de:

$$\frac{1.789 \text{ €}}{12.376 \text{ h}} = 0,15 \frac{\text{€}}{\text{hora laboral}}$$

Dado que se tiene una utilización plena del ordenador en este proyecto, las horas totales utilizadas suman un total de 329. Si mayoramos un 30% debido a que se tratan de horas de alto rendimiento del equipo, suman 428 horas laborales. Por esto mismo, el coste en cuanto al ordenador utilizado es de:

$$428 \text{ horas} \cdot 0,15 \frac{\text{€}}{\text{hora laboral}} = 64,20 \text{ €}$$

2.8.2 Conjunto de mesa de escritorio, silla y flexo.

La filosofía que se llevará a cabo para contemplar estos costes es análoga a lo llevado a cabo del ordenador portátil.

En este caso, el coste de todos los elementos es de:

- » Mesa de escritorio: 400 €
- » Silla de escritorio: 300€
- » Flexo: 90€

Esto hace un total de 790 €. Bajo el supuesto comentado de que se contemplarán los costes ligados a horas laborales y teniendo en cuenta que este tipo de elementos tiene una vida útil de al menos 12 años. Todo suma un total de 24960 horas. Por tanto:

$$\frac{790 \text{ €}}{24.960 \text{ horas laborales}} = 0,032 \frac{\text{€}}{\text{hora laboral}}$$

Contabilizando las 329 horas laborales contempladas en este proyecto, arroja un coste de 10,53 €.

2.8.3 Papelería auxiliar

Dentro de este apartado, se presupuestan los gastos en folios, impresiones, rotuladores, bolígrafos...

Al igual que en otros pequeños gastos, se contempla 1% de los costes del proyecto.

2.8.4 Internet

Contando que el tiempo de consumo aproximado de internet durante este proyecto ha sido de un mes, se contempla el coste de una mensualidad contratada, siendo esta de 31,99 €.

2.8.5 Electricidad

Al ser una variable muy difícil de medir a niveles tan bajos de uso, se estimará un 1% del coste del proyecto.

3- RESUMEN DEL PRESUPUESTO

Desglosado todo esto, se procede a resumir los costes del presente proyecto:

UO	DESCRIPCIÓN	COSTE	
01.1	Concepción del proyecto	336,68 €	
02.1	Búsqueda de información y lectura de artículos, documentos sobre el tema a desarrollar	1.038,60 €	
02.2	Redacción de la información teórica de los DPF y caracterización acústica	773,18 €	
03.1	Realización de simulaciones en ANSYS y Matlab	1.554,25 €	
03.2	Elaboración y desarrollo de las conclusiones obtenidas	392,36 €	
03.3	Revisiones y modificaciones del documento final	304,95 €	
COSTE TOTAL DE LAS UO			4.400,02 €
	Papelería	1%	44,00 €
	Internet	31,99 €	31,99 €
	Electricidad	1%	44,00 €
	Ordenador portátil MSI GL65 con Windows Home 10	64,20 €	64,20 €
	Conjunto de mesa de escritorio, silla y flexo	10,53 €	10,53 €
COSTES MATERIALES			194,72 €
PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL			4.594,74 €
	Gastos generales	13 %	597,32 €
	Beneficio industrial	6 %	275,68 €
PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA			5.467,74 €
	IVA	21 %	1.148,22 €
PRESUPUESTO TOTAL DEL PROYECTO			6.615,96 €

Tabla presupuestaria 7. Resumen de costes del Proyecto Final de Máster.

De esta manera, tal y como se desglosa en la tabla anterior, el presupuesto del proyecto asciende a **SEIS MIL SEISCIENTOS QUINCE EUROS CON NOVENTA Y SEIS CÉNTIMOS**.



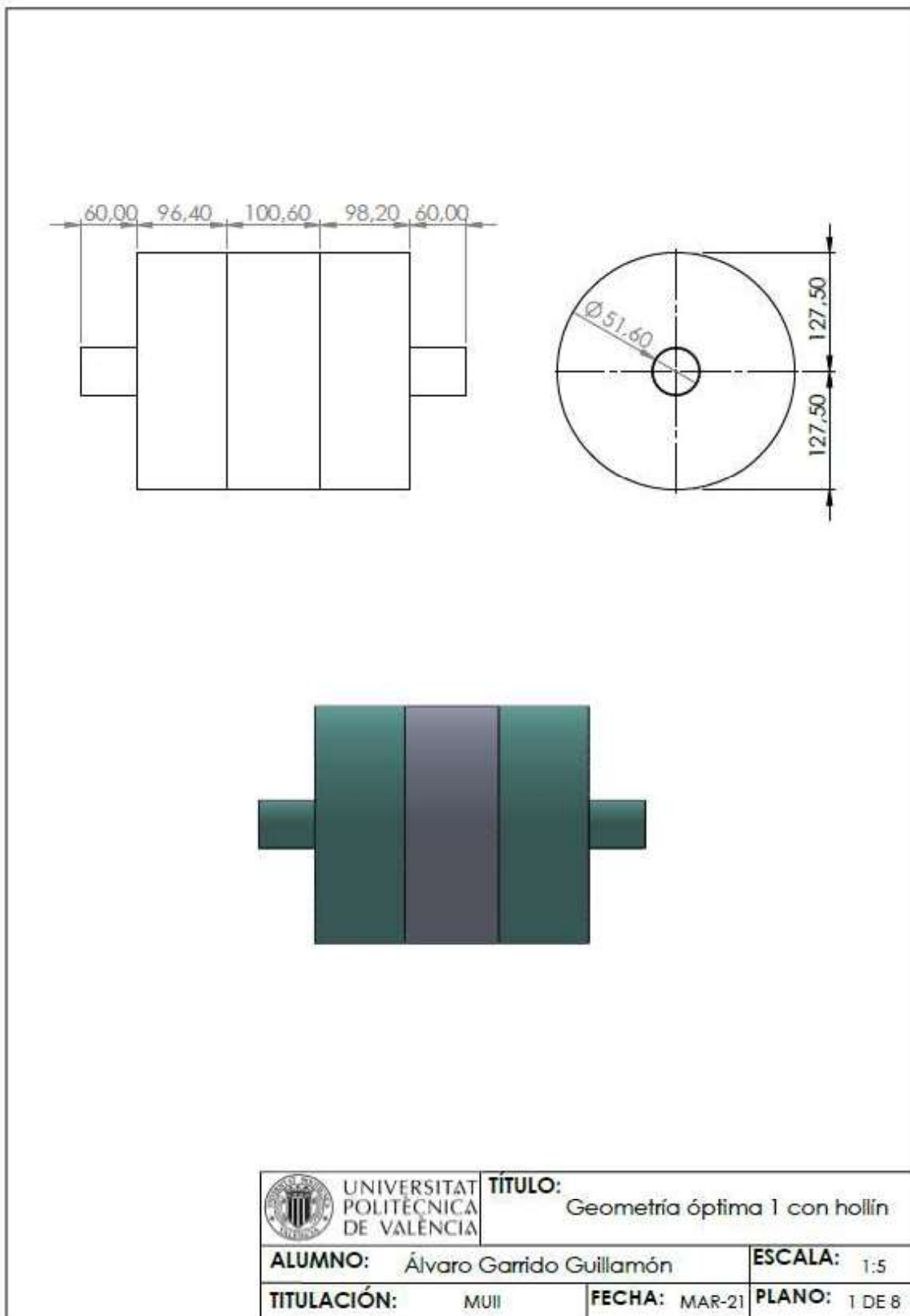
UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

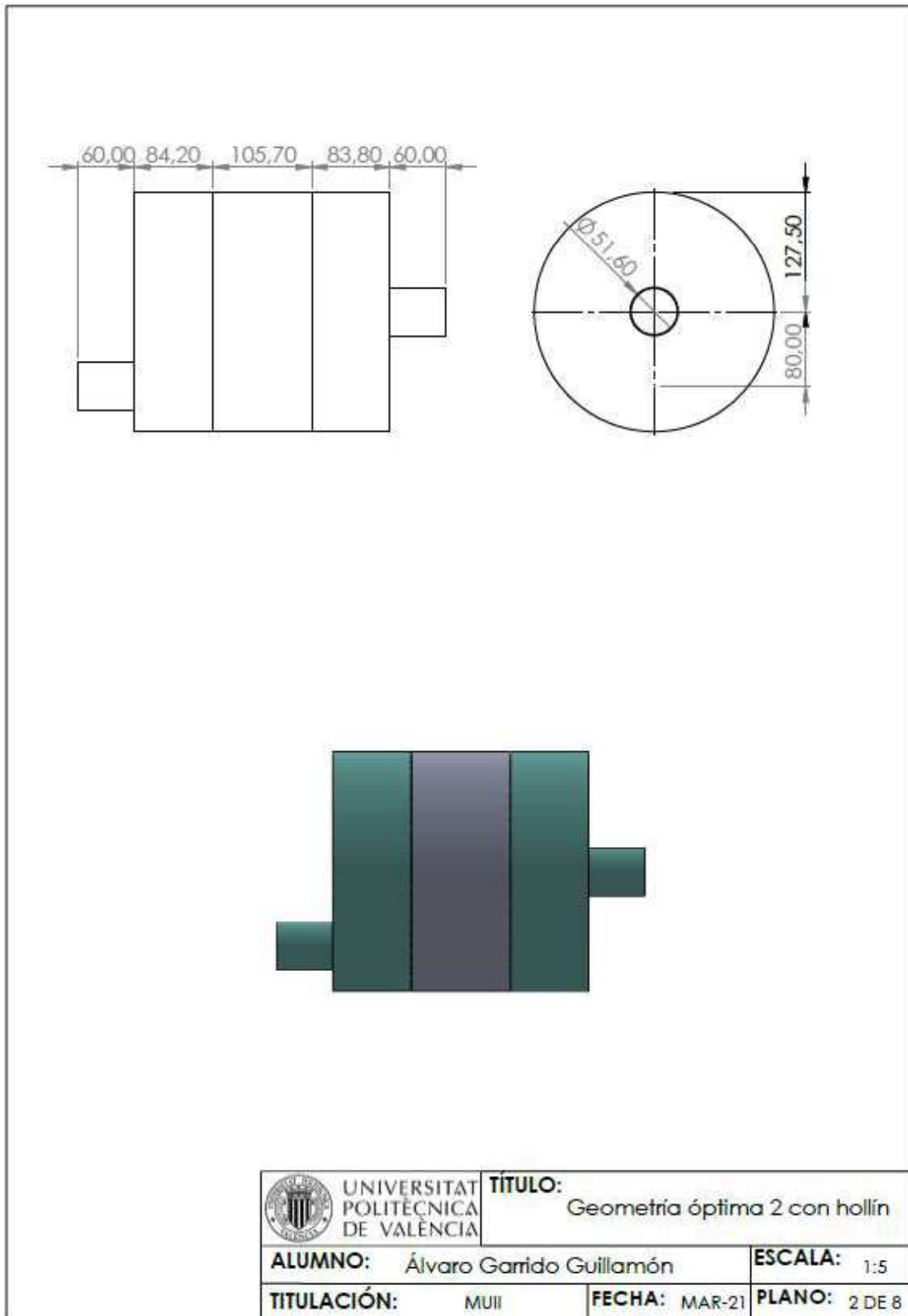


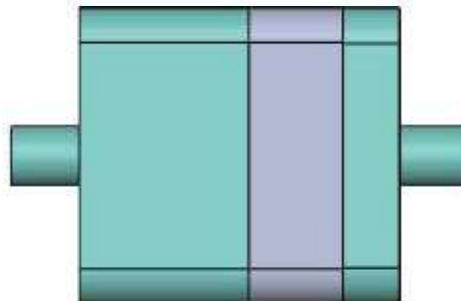
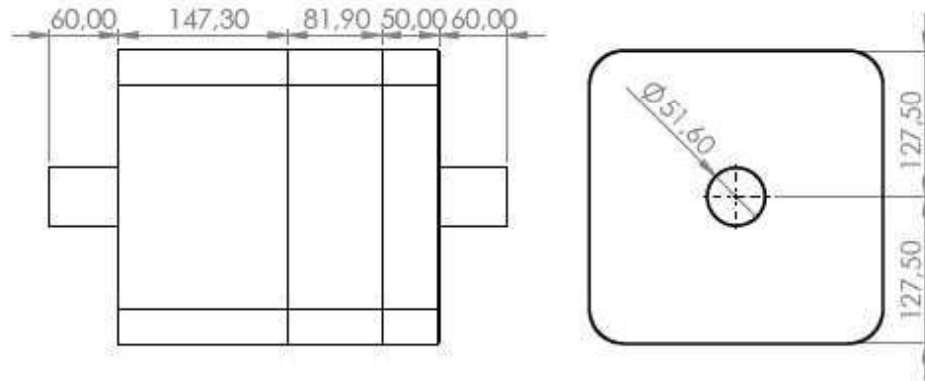
ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA


PLANOS

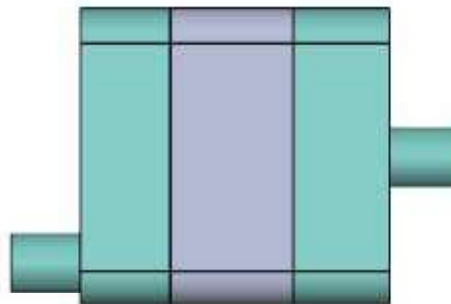
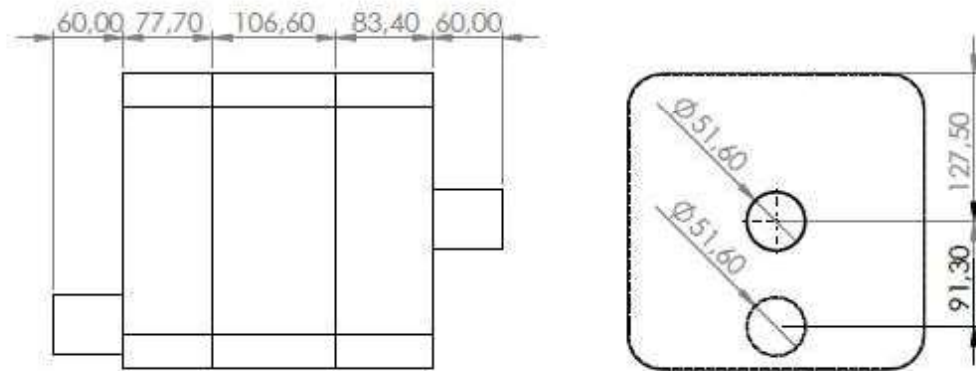
1- GEOMETRÍAS ÓPTIMAS







 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA	TÍTULO: Geometría óptima 3 con hollín	
	ALUMNO: Álvaro Garrido Guillamón	ESCALA: 1:5
	TITULACIÓN: MU11	FECHA: MAR-21 PLANO: 3 DE 8



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

TÍTULO:
Geometría óptima 4 con hollín

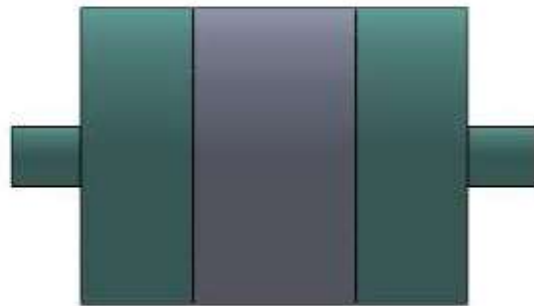
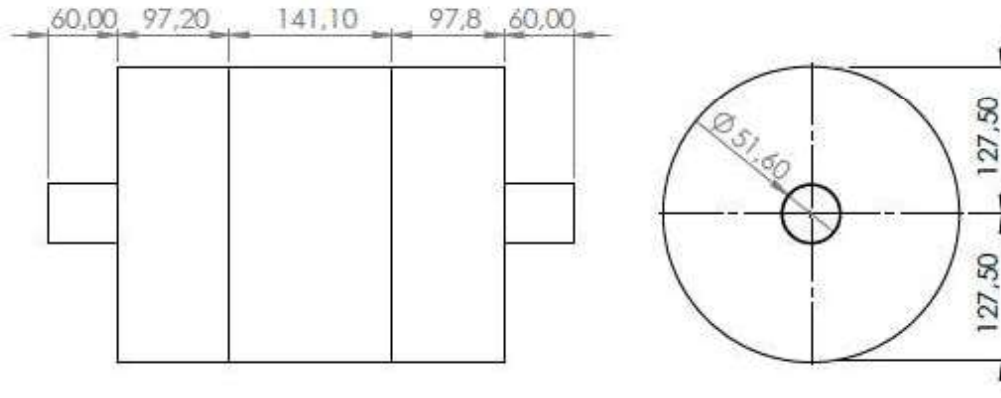
ALUMNO: Álvaro Garrido Guillamón


ESCALA: 1:5

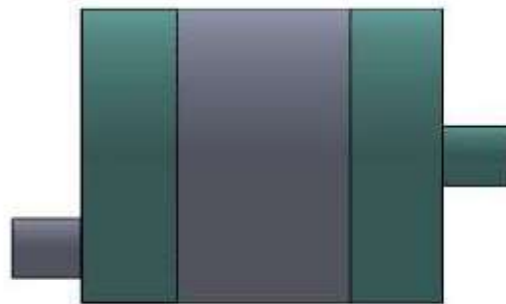
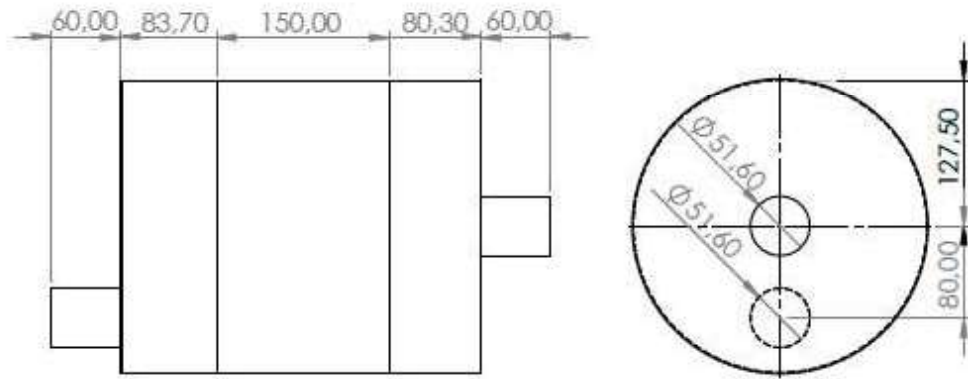
TITULACIÓN: MUII


FECHA: MAR-21

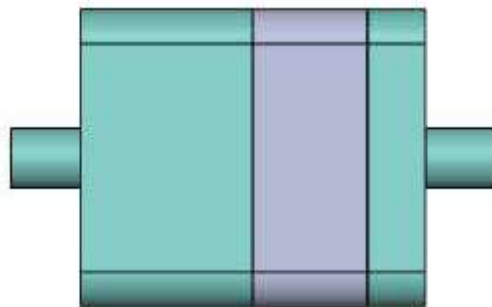
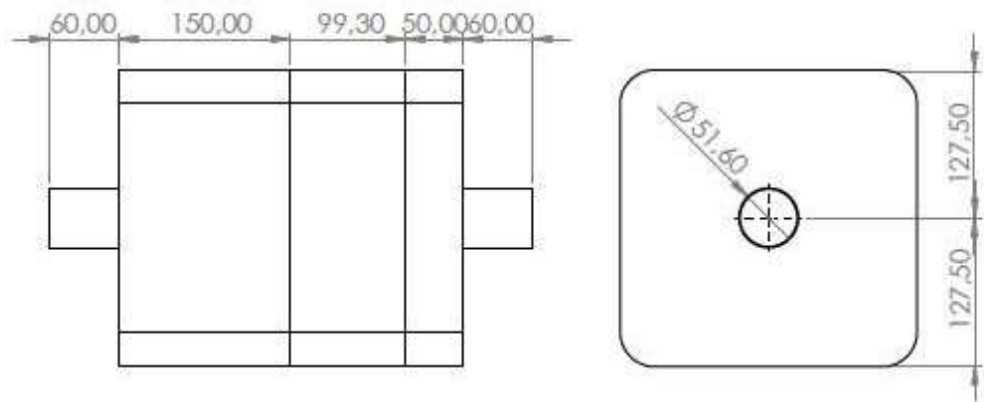
PLANO: 4 DE 8




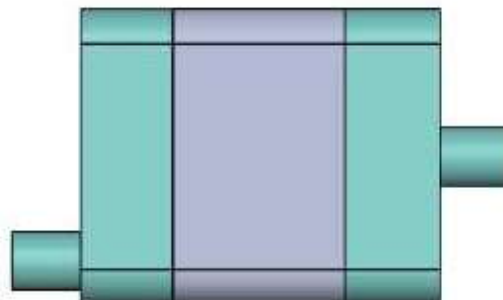
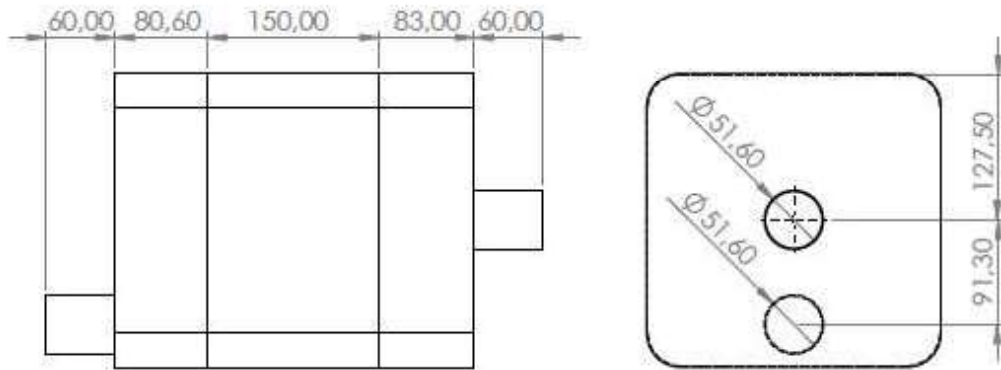
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA	TÍTULO: Geometría óptima 1 sin hollín	
	ALUMNO: Álvaro Garrido Guillamón	ESCALA: 1:5
TITULACIÓN: MUII	FECHA: MAR-21	PLANO: 5 DE 8



	UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA	TÍTULO: Geometría óptima 2 sin hollín
	ALUMNO: Álvaro Garrido Guillamón	ESCALA: 1:5
TITULACIÓN: MUII	FECHA: MAR-21	PLANO: 6 DE 8



 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA	TÍTULO: Geometría óptima 3 sin hollín
ALUMNO: Álvaro Garrido Guillamón	ESCALA: 1:5
TITULACIÓN: MUII	FECHA: MAR-21 PLANO: 7 DE 8



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

TÍTULO: Geometría óptima 4 sin hollín

ALUMNO: Álvaro Garrido Guillamón

ESCALA: 1:5

TITULACIÓN: MU11

FECHA: MAR-21

PLANO: 8 DE 8



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

ANEXOS

ÍNDICE ANEXOS

1- Códigos programas matlab	102
1.1. Ajuste modal.....	102
1.2. Ajuste modal + optimización	105
1.2.1 Optimización basada en gradiente ("fmincon")	105
1.2.2 Optimización basada en algoritmos genéticos ("ga").....	105

1- CÓDIGOS PROGRAMAS MATLAB

1.1. AJUSTE MODAL.

```
% Ajuste modal con monolito DPF (modelo 3D/1D).
% Técnica de ajuste modal híbrida analítica-numérica.
% =====

% Barrido en frecuencia
% =====

caire=c0ini;
rhoaire=rho0ini;

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

for nf=1:NB

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

    % ---- Caracterización del monolito. Allam y Abom (Kirchhoff)

    % Modelo de Kirchhoff (ver artículo JSV 2006 de Sabry Allam y Mats Abom)
    s=dh/2*sqrt(rho0ini*w/mu); % Número de onda de cortadura. El valor dh/2 no está
    claro pero da bien.
    psi=sqrt(prandtl);

    Fs=2/(s*sqrt(-li))*besselj(1,s*sqrt(-li))/besselj(0,s*sqrt(-li));
    FPs=2/(psi*s*sqrt(-li))*besselj(1,psi*s*sqrt(-li))/besselj(0,psi*s*sqrt(-li));

    c0=c0ini*sqrt(1-Fs)/sqrt(1+(gamma-1)*FPs); % Velocidad en los capilares
    rho0=rho0ini/(1-Fs); % Densidad en los capilares

    B=c0*rho0/(dh*Rw);

    k0=w/c0;
    k0prima=k0;
    Z0=rho0*c0;

    K1=k0;
    K2=-K1;
    K3=k0*sqrt(1-8i*B/k0);
    K4=-K3;
    e1prima=e1*dh^2/(Z0*k0prima/K1); % Igual a e1prima=e1*dh^2/Z0
    e2prima=e2*dh^2/(Z0*k0prima/K2); % Igual a e2prima=-e2*dh^2/Z0. Cambio de signo de
    velocidad, onda regresiva
    e3prima=e3*dh^2/(Z0*k0prima/K3); % Atención a la definición de impedancia Z para los
    modos atenuados 3 y 4
    e4prima=e4*dh^2/(Z0*k0prima/K4); % Atención a la definición de impedancia Z para los
    modos atenuados 3 y 4
    H0=[e1 e2 e3 e4;e1prima e2prima e3prima e4prima]; % Matriz H0 de ecuación 20
    HL=[e1*exp(-li*K1*x(2)) e2*exp(-li*K2*x(2)) e3*exp(-li*K3*x(2)) e4*exp(-
    li*K4*x(2));e1prima*exp(-li*K1*x(2)) e2prima*exp(-li*K2*x(2)) e3prima*exp(-li*K3*x(2))
    e4prima*exp(-li*K4*x(2))]; % Matriz HL de ecuación 20
    S=H0*inv(HL); % Matriz S
    T=[S(1,2)-S(4,2)*S(1,1)/S(4,1) S(1,4)-S(4,4)*S(1,1)/S(4,1);S(3,2)-
    S(4,2)*S(3,1)/S(4,1) S(3,4)-S(4,4)*S(3,1)/S(4,1)]; % Matriz T para presión y flujo
    volumétrico. Ecuación 21.
    TII=[T(1,1) T(1,2)/N;N*T(2,1) T(2,2)]; % Matriz T para presión y flujo volumétrico
    con todos los canales abiertos de un lado. Ecuación 22.

    TI_plug=[1 r_IN+li*rho0ini*w*1X/(N*dh^2);0 1]; % Conservación de energía
    TIII_plug=[1 r_OUT+li*rho0ini*w*1X/(N*dh^2);0 1]; % Conservación de momento
    T_v_f_IN=[1 0;0 1/Am]; % Cambio velocidad/flujo volumétrico
    T_v_f_OUT=[1 0;0 Am]; % Cambio velocidad/flujo volumétrico
    TDPF=T_v_f_IN*TI_plug*TII*TIII*TIII_plug*T_v_f_OUT; % Matrices
    T_v_f_IN*TI(plug)*TII*TIII(plug)*T_v_f_OUT

    % Conductos de entrada, salida y contiguos a DPF
```

```

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

T11=TDPF(1,1);
T12=TDPF(1,2);
T21=TDPF(2,1);
T22=TDPF(2,2);

% Números de onda axiales en conductos y cámaras

for i=1:Modos
    if kaire^2 >= D1E(i)
        kz1E(i)=(kaire^2-D1E(i))^0.5;
    end
    if kaire^2 < D1E(i)
        kz1E(i)=- (kaire^2-D1E(i))^0.5;
    end
    if kaire^2 >= D23E(i)
        kz23E(i)=(kaire^2-D23E(i))^0.5;
    end
    if kaire^2 < D23E(i)
        kz23E(i)=- (kaire^2-D23E(i))^0.5;
    end
    if kaire^2 >= D1S(i)
        kz1S(i)=(kaire^2-D1S(i))^0.5;
    end
    if kaire^2 < D1S(i)
        kz1S(i)=- (kaire^2-D1S(i))^0.5;
    end
    if kaire^2 >= D23S(i)
        kz23S(i)=(kaire^2-D23S(i))^0.5;
    end
    if kaire^2 < D23S(i)
        kz23S(i)=- (kaire^2-D23S(i))^0.5;
    end
end

% Ensamblado de las ecuaciones y resolución del sistema final de
% ecuaciones de ajuste modal (código analítico artículo JCAM adaptado)
% =====

Matriz=zeros(4*Nmod+Nmoda+Nmode,4*Nmod+Nmoda+Nmode); % Matriz de coeficientes
Vector=zeros(4*Nmod+Nmoda+Nmode,1); % Vector de términos independientes

% Presión. Sección de entrada. Onda plana incidente
Vector(1,1)=-V1E(:,1)'*mat_M1E*V1E(:,1); % De la condición de presión. Lado
derecho de la ecuación (ver artículo JCAM).
% Presión en cambio de sección A/B
for ic=1:Nmoda % Bucle de ajuste modal
    % Presión en la expansión. Modos de conducto de entrada.
    % Ortogonalidad. No hay bucle de modos en la superposición
    Matriz(ic,ic)=V1E(:,ic)'*mat_M1E*V1E(:,ic); % Regresivos. Lado izquierdo de
la ecuación (ver artículo JCAM).

    % Presión en la expansión. Modos de cámara de entrada.
    for in=1:Nmod % Bucle de modos de la superposición
        Matriz(ic,in+Nmoda)=-V23E_r(:,in)'*mat_M1E*V1E(:,ic); % Progresivos.
Pasados del lado derecho al izquierdo de la ecuación (ver artículo JCAM).
        Matriz(ic,in+Nmod+Nmoda)=-V23E_r(:,in)'*mat_M1E*V1E(:,ic); % Regresivos.
Pasados del lado derecho al izquierdo de la ecuación (ver artículo JCAM).
    end
end

% Velocidad. Sección de entrada. Onda plana incidente
for ic=1:Nmod % Bucle de ajuste modal
    Vector(ic+Nmoda,1)=-kz1E(1)*V1E(:,1)'*mat_M1E*V23E_r(:,ic); % Lado derecho de
la ecuación (ver artículo JCAM)
end
% Velocidad en cambio de sección A/B
for ic=1:Nmod % Bucle de ajuste modal
    % Velocidad en la expansión. Modos de conducto de entrada.
    for in=1:Nmoda % Bucle de modos de la superposición
        kz1E_i=kz1E(in);
        Matriz(ic+Nmoda,in)=-kz1E_i*V1E(:,in)'*mat_M1E*V23E_r(:,ic); %
Regresivos. Lado izquierdo de la ecuación (ver artículo JCAM).
    end
end

```

```

% Velocidad en la expansión. Modos de cámara de entrada.
% Ortogonalidad. No hay bucle de modos en la superposición
kz23E_i=kz23E(ic);
Matriz(ic+Nmoda,ic+Nmoda)=-kz23E_i*V23E(:,ic)'*mat_M23E*V23E(:,ic); %
Progresivos. Lado izquierdo de la ecuación (ver artículo JCAM).
Matriz(ic+Nmoda,ic+Nmod+Nmoda)=+kz23E_i*V23E(:,ic)'*mat_M23E*V23E(:,ic); %
Regresivos. Lado izquierdo de la ecuación (ver artículo JCAM).
end

% =====
% Acoplamiento de presión y velocidad a ambos lados del monolito
% =====
% Monolito
for ic=1:Nmod % Ortogonalidad. No hay bucle de modos en la superposición
kz23E_i=kz23E(ic);
kz23S_i=kz23S(ic); % Se mantienen las secciones. kz23E = kz23S.
% ===== Acoplamiento con T11, T12, T21 y T22
% Presión
Matriz(ic+Nmod+Nmoda,ic+Nmoda)=+exp(-j*kz23E_i*x(1)); % Progresivos, lado
izquierdo de la ecuación (ver artículo JCAM), aguas arriba.
Matriz(ic+Nmod+Nmoda,ic+Nmod+Nmoda)=+exp(j*kz23E_i*x(1)); % Regresivos,
lado izquierdo de la ecuación (ver artículo JCAM), aguas arriba.
Matriz(ic+Nmod+Nmoda,ic+2*Nmod+Nmoda)=-T11-T12*kz23S_i/(rhoaire*w); %
Progresivos, lado izquierdo de la ecuación (ver artículo JCAM), aguas abajo.
Matriz(ic+Nmod+Nmoda,ic+3*Nmod+Nmoda)=-T11+T12*kz23S_i/(rhoaire*w); %
Regresivos, lado izquierdo de la ecuación (ver artículo JCAM), aguas abajo.

% Velocidad
Matriz(ic+2*Nmod+Nmoda,ic+Nmoda)=+kz23E_i/(rhoaire*w)*exp(-
j*kz23E_i*x(1)); % Progresivos, ídem.
Matriz(ic+2*Nmod+Nmoda,ic+Nmod+Nmoda)=-
kz23E_i/(rhoaire*w)*exp(j*kz23E_i*x(1)); % Regresivos, ídem.
Matriz(ic+2*Nmod+Nmoda,ic+2*Nmod+Nmoda)=-T21-T22*kz23S_i/(rhoaire*w); %
Progresivos, ídem.
Matriz(ic+2*Nmod+Nmoda,ic+3*Nmod+Nmoda)=-T21+T22*kz23S_i/(rhoaire*w); %
Regresivos, ídem.
% ===== Fin de acoplamiento con T11, T12, T21 y T22
end

% Presión en cambio de sección D/E
for ic=1:Nmode % Bucle de ajuste modal
% Presión en la contracción. Modos de conducto de salida E.
% Ortogonalidad. No hay bucle de modos en la superposición
Matriz(ic+3*Nmod+Nmoda,ic+4*Nmod+Nmoda)=V1S(:,ic)'*mat_M1S*V1S(:,ic); %
Progresivos. Lado derecho de la ecuación (ver artículo JCAM).

% Presión en la contracción. Modos de cámara de salida D.
for in=1:Nmod % Bucle de modos de la superposición
kz23S_i=kz23S(in);
Matriz(ic+3*Nmod+Nmoda,in+2*Nmod+Nmoda)=-
V23S_r(:,in)'*mat_M1S*V1S(:,ic)*exp(-j*kz23S_i*x(3)); % Progresivos. Lado derecho de la
ecuación (ver artículo JCAM).
Matriz(ic+3*Nmod+Nmoda,in+3*Nmod+Nmoda)=-
V23S_r(:,in)'*mat_M1S*V1S(:,ic)*exp(j*kz23S_i*x(3)); % Regresivos. Lado derecho de la
ecuación (ver artículo JCAM).
end
end

% Velocidad en cambio de sección D/E
for ic=1:Nmod % Bucle de ajuste modal
% Velocidad en la contracción. Modos de conducto de salida E.
for in=1:Nmode % Bucle de modos de la superposición
kz1S_i=kz1S(in);

Matriz(ic+Nmode+3*Nmod+Nmoda,in+4*Nmod+Nmoda)=kz1S_i*V1S(:,in)'*mat_M1S*V23S_r(:,ic); %
Progresivos. Lado derecho de la ecuación (ver artículo JCAM).
end
% Velocidad en la contracción. Modos de cámara de salida D.
% Ortogonalidad. No hay bucle de modos en la superposición
kz23S_i=kz23S(ic);
Matriz(ic+Nmode+3*Nmod+Nmoda,ic+2*Nmod+Nmoda)=-
kz23S_i*V23S(:,ic)'*mat_M23S*V23S(:,ic)*exp(-j*kz23S_i*x(3)); % Progresivos. Lado
derecho de la ecuación (ver artículo JCAM).

Matriz(ic+Nmode+3*Nmod+Nmoda,ic+3*Nmod+Nmoda)=+kz23S_i*V23S(:,ic)'*mat_M23S*V23S(:,ic)*e
xp(j*kz23S_i*x(3)); % Regresivos. Lado derecho de la ecuación (ver artículo JCAM).

```

```

end

Sol=Matriz\Vector;

TL(nf,1)=10*log10((Sent*abs(1*V1E(1,1))^2)/(Ssal*abs(Sol(4*Nmod+Nmoda+1)*V1S(1,1))^2));
% Tiene en cuenta áreas distintas, así como posibles normalizaciones modales diferentes
de 1

end % Fin del barrido en frecuencia

```

1.2. AJUSTE MODAL + OPTIMIZACIÓN.

1.2.1 Optimización basada en gradiente (“fmincon”)

```

clear all
clf

tic

% Lectura de datos, mallados, cálculo de problema de autovalores
% =====

previo_ajuste_modal          % Llamada a programa previo al cálculo armónico (lazo
de frecuencias)

% Optimización
% =====
% Variables de optimización:
% x(1) longitud de cámara de entrada Lb
% x(2) longitud de monolito DPF Lc
% x(3) longitud de cámara de salida Ld

options = optimoptions(@fmincon,'Display','iter','Algorithm','interior-point');

[x,fval] = fmincon(@objetivo,[0.1 0.1 0.1],[],[],[],[],...
[0.05 0.05 0.05],[0.15 0.15 0.15],[],options)

toc

```

1.2.2 Optimización basada en algoritmos genéticos (“ga”)

```

clear all
clf

tic

% Lectura de datos, mallados, cálculo de problema de autovalores
% =====

previo_ajuste_modal          % Llamada a programa previo al cálculo armónico (lazo de
frecuencias)

% Optimización
% =====
% Variables de optimización:
% x(1) longitud de cámara de entrada Lb
% x(2) longitud de monolito DPF Lc
% x(3) longitud de cámara de salida Ld

options = optimoptions('ga','ConstraintTolerance',1e-6,'Display',...
'iter','FunctionTolerance',1e-6,...
'PlotFcn', @gaplotbestf);

[x,fval] = ga(@objetivo,3,[],[],[],[],[0.05 0.05 0.05],[0.15 0.15 0.15],...
[ ],options)

toc

```