

## Trabajo Fin de Máster

Análisis acústico en conductos y accesorios

Acoustic analysis in ducts and accessories

Autor

**Ángel García Betés**

Director

**Javier Ballester Castañer**

Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza

Agosto de 2016





## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D. Ángel García Betés, con nº de DNI 72994516Z en aplicación de lo dispuesto en el art. 14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de Máster,

*Análisis acústico en conductos y accesorios*

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 29 de Agosto del 2016

Fdo: Ángel García

## RESUMEN

### **Análisis acústico en conductos y accesorios**

El siguiente Trabajo Fin de Máster plantea como principal objetivo el desarrollo y aplicación de procedimientos de simulación de acústica en conductos y accesorios de instalaciones de fluidos. Como resultado del trabajo se elaborará un código que, además del método de cálculo, incorpore las interfaces necesarias para la entrada y salida de datos.

Durante el trabajo se deben definir claramente las ecuaciones que deben aplicarse así como el método de resolución numérica. Se desarrollará un método basado en matrices de transferencia acústica, que permita simular una cierta instalación como combinación de los distintos elementos que la componen. Con este fin, se generarán submodelos para un conjunto de elementos básicos (conducto recto, cambios de sección, resonadores, etc.) adecuados para generar la matriz de transferencia correspondiente a partir de sus parámetros geométricos y de las características del flujo (propiedades del fluido, caudal circulante, etc.).

La metodología aplicada se ayuda principalmente del uso de MATLAB, herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio. Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos y la creación de interfaces de usuario (GUI).

El trabajo consta de una memoria, en la que se presenta la temática del proyecto, y de varios anexos, donde se exponen partes complementarias de la labor realizada.

El trabajo se encuentra estructurado en las siguientes partes:

- Introducción y presentación del objeto de estudio
- Teoría de la onda acústica y búsqueda de programas comerciales.
- Explicación del método numérico y de los datos de entrada necesarios para definir el problema en cada caso.
- Elaboración del programa de cálculo
- Aplicación a un conjunto de casos y elaboración del informe final del trabajo.



## Contenido

1.	INTRODUCCIÓN .....	9
1.1.	Objeto y alcance del proyecto .....	9
1.2.	Motivación .....	9
1.3.	Conocimientos de aplicación .....	10
1.4.	Necesidad.....	10
2.	LA ONDA ACÚSTICA .....	11
2.1.	Historia.....	11
2.2.	Ecuación de onda unidimensional .....	11
2.3.	Potencia acústica .....	13
2.4.	Programas de cálculo comerciales.....	14
3.	PÉRDIDA DE TRANSMISIÓN ACÚSTICA .....	16
3.1.	El método.....	16
3.2.	Limitaciones del método .....	16
3.3.	Matrices de transferencia.....	18
3.4.	Ecuación de pérdida de transmisión acústica .....	19
4.	CONDUCTOS Y ACCESORIOS.....	20
4.1.	Conducto recto .....	20
4.2.	Resonador de Helmholtz .....	21
4.3.	Resonadores extendidos.....	23
4.4.	Cambios de sección.....	26
5.	VERIFICACIÓN DEL MÉTODO .....	29
5.1.	Caso 1 – Cámara de expansión simple.....	29
5.2.	Caso 2 – Cámara de expansión + Resonador .....	30
5.3.	Caso 3 – Cámara de expansión + 2 Resonadores .....	31
5.4.	Caso 4 – 2 Cámaras de expansión + 2 Resonadores .....	32
5.5.	Conclusiones de la verificación .....	32
6.	INTERFAZ GRÁFICA .....	33
6.1.	Distribución de elementos en la interfaz.....	33
6.2.	Identificación de los elementos en la interfaz.....	35
6.3.	Pseudocódigo.....	38



7.	CASO PRÁCTICO .....	39
7.1.	Cámara de expansión.....	41
7.2.	Cámara de expansión con resonador extendido .....	42
7.3.	Cámara de expansión con 2 resonadores extendidos.....	43
7.4.	Cámara de expansión con 2 resonadores invertidos.....	44
7.5.	Resultados.....	45
8.	CONCLUSIONES.....	47
8.1.	Conclusiones del Proyecto .....	47
8.2.	Aporte del Proyecto al autor .....	47
8.3.	Futuras líneas de investigación.....	48
9.	BIBLIOGRAFÍA .....	49
	ANEXO I. ANÁLISIS DE SOFTWARES COMERCIALES .....	50
1.	SIDLAB .....	51
2.	WAVE.....	54
3.	k-Wave .....	55
4.	I-Simpa.....	56
5.	Actran .....	57
6.	COMSOL .....	58
	ANEXO II. RUTINAS Y CÓDIGO EN MATLAB .....	59
	ANEXO III. TABLAS DE RESULTADOS .....	73
1.	Cámara de expansión .....	74
2.	Cámara de expansión con resonador extendido .....	75
3.	Cámara de expansión con 2 resonadores extendidos .....	76
3.	Cámara de expansión con 2 resonadores invertidos.....	77

## Lista de Figuras

Figura 1. Representación de la presión acústica y el desplazamiento de las partículas para una onda plana sinusoidal .....	11
Figura 2. Escala de niveles sonoros en dB [3].....	14
Figura 3. Representación de los elementos en un sistema de conductos .....	18
Figura 4. Conductos circulares y cuadrados de paredes rígidas .....	20
Figura 5. Resonador de Helmholtz esquematizado [4] .....	21
Figura 6. Pérdida de transmisión en resonador de Helmholtz.....	23
Figura 8. Cambios de sección (a. contracción; b. expansión).....	26
Figura 9. Pérdida de transmisión en una expansión brusca desde diámetro 4 cm a 8 cm, para aire en reposo.....	28
Figura 10. Modelo de referencia para el caso 1 .....	29
Figura 11. Resultados obtenidos para el caso 1 .....	29
Figura 12. Modelo de referencia para el caso 2 .....	30
Figura 13. Resultados obtenidos para el caso 2 .....	30
Figura 14. Modelo de referencia para el caso 3 .....	31
Figura 15. Resultados obtenidos para el caso 3 .....	31
Figura 16. Modelo de referencia para el caso 4 .....	32
Figura 17. Resultados obtenidos para el caso 4 .....	32
Figura 19. Layout de la interfaz acústica en GUIDE.....	34
Figura 20. Diferentes bloques de la interfaz acústica diseñada .....	35
Figura 21. Silenciador a la salida de un motor [8] .....	39
Figura 22. Introducción de las características del aire en la interfaz .....	40
Figura 23. Esquema de la configuración 1.....	41
Figura 24. Definición de la configuración 1 mediante la interfaz de entrada de datos .....	41
Figura 26. Introducción de la configuración 2 en la interfaz.....	42
Figura 28. Introducción de la configuración 3 en la interfaz.....	43
Figura 29. Esquema configuración 4 .....	44
Figura 30. Introducción de la configuración 4 en la interfaz.....	44
Figura 31. Pérdidas de transmisión acústica para las configuraciones 1, 2, 3 y 4.....	45
Figura 32. Entorno de modelado en la interfaz de SIDLAB .....	53
Figura 33. Entorno de cálculo de pérdida de transmisión acústica en la interfaz de SIDLAB ..	53
Figura 34. Modelado y resultados en WAVE .....	54
Figura 35. Resultados en k-Wave .....	55
Figura 36. Resultados de nivel sonoro para una sala de eventos .....	56
Figura 37. Resultados en Actran.....	57
Figura 38. Diseño de silenciadores en COMSOL.....	58



## Lista de Tablas

Tabla 1. Dimensiones límites de una sección rectangular .....	17
Tabla 2. Dimensiones límites de una sección circular .....	18
Tabla 3. Tabla de constantes para resonadores extendidos .....	25
Tabla 4. Valores de pérdida de transmisión en dB para la cámara de expansión .....	74
Tabla 5. Valores de pérdida de transmisión en dB para la cámara de expansión con resonador extendido.....	75
Tabla 6. Valores de pérdida de transmisión en dB para la cámara de expansión con 2 resonadores extendidos .....	76
Tabla 7. Valores de pérdida de transmisión en dB para la cámara de expansión con 2 resonadores invertidos.....	77



## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Objeto y alcance del proyecto

En el presente trabajo se lleva a cabo el desarrollo y aplicación de procedimientos de simulación acústica en conductos y accesorios en instalaciones de fluidos. En concreto, se centra en la pérdida de transmisión acústica que se produce cuando el sonido se propaga a través de sistemas de conductos.

En primer lugar, se realiza una búsqueda y análisis de programas comerciales para conocer el enfoque y capacidades usuales, que servirá como referencia para definir el alcance del trabajo. Así también se puede valorar la conveniencia de utilizar códigos existentes o incluso de comprar alguna licencia.

Seguidamente, se definen las ecuaciones y el método en el que se apoya este estudio. Se detallan las matrices de transferencia para cada uno de los diferentes elementos de una instalación de fluidos. También se explica el método mediante el que estas matrices se combinan para poder obtener resultados de pérdidas de transmisión acústica para un rango determinado de frecuencias.

Por otro lado, se definen los parámetros de entrada necesarios para definir cada elemento y la configuración de la instalación, que deberán poder ser ajustables por el usuario.

Una vez que se tiene lo anterior, se explica en qué consiste el software que se ha elaborado y como interactúa éste con el usuario. Para explicar cómo funciona el programa internamente se hace uso de un pseudocódigo sencillo en el que se ven las distintas fases del proceso de cálculo.

Finalmente, se procede a modelar una serie de casos prácticos donde se aprecia la posible utilidad del programa. En estos casos se llevan a cabo, análisis de resonadores, optimizaciones de silenciadores, etc.

### 1.2. Motivación

Este Trabajo Fin de Máster surge a raíz de mi incorporación al grupo de investigación en el que me encuentro actualmente. El tema de acústica en conductos es una línea en la que se está trabajando en el LIFTEC y con este proyecto se espera aportar una nueva herramienta de cálculo que ayude a seguir avanzando. Además, este trabajo me permite ampliar mis conocimientos, tanto en una nueva disciplina como es la acústica como por el hecho de enfrentarme al desarrollo completo de un método de cálculo, desde la concepción inicial y el diseño del algoritmo de cálculo hasta la elaboración final y validación del código.



### 1.3. Conocimientos de aplicación

En el presente proyecto se aplican los conocimientos adquiridos en las diferentes asignaturas superadas a lo largo del Grado y del Máster de Ingeniería Mecánica. A continuación se seleccionan aquellas que tienen mayor repercusión sobre el presente proyecto:

**Mecánica de Fluidos y Termodinámica:** engloba todos los conocimientos sobre propiedades de los fluidos; presión, temperatura, caudal, velocidad, flujo másico, etc.

**Instalaciones de fluidos:** proporciona los conocimientos acerca de lo que son las instalaciones de fluidos y sistemas de conductos.

**Matemáticas:** proporciona los conocimientos necesarios para analizar y resolver las ecuaciones diferenciales de la acústica.

**Informática:** proporciona las bases para poder entender y utilizar un lenguaje de programación propio como el de Matlab, operaciones con arrays multidimensionales, generación de algoritmos y creación de interfaces.

### 1.4. Necesidad

Dentro del ámbito de la ingeniería se pueden definir muchos casos que impliquen una circulación de fluidos a través de conductos, claros ejemplos pueden encontrarse en sistemas de escape, redes de tuberías, sistemas HVAC (Heat / Ventilating / Air Conditioning) e incluso turbinas de gas. Se sabe que algunos de estos sistemas son propensos a generar inestabilidades aero y termoacústicas que pueden provocar un ruido excesivo o no deseado. Por eso es importante tener a nuestro alcance herramientas que puedan predecir el comportamiento acústico en conductos y accesorios de instalaciones de fluidos.

## 2. LA ONDA ACÚSTICA

### 2.1. Historia

La acústica es la ciencia que estudia el sonido, incluyendo su generación, transmisión y efectos. Al principio, la especulación de que el sonido era un fenómeno de onda nació de las observaciones de las ondas en el agua, la posibilidad de que el sonido se comportase de una forma análoga ya se contemplaba en la Antigua Grecia.

Esta analogía del sonido con las ondas del agua se fue viendo fortalecida por diferentes razones. Primero se supo que el sonido viajaba a una velocidad finita y que podía doblar las esquinas, lo que sugería un fenómeno de difracción, fenómeno que también ocurre en el agua. Además, se llevó a cabo un experimento con el tictac de un reloj despresurizado en el que se observó que el sonido necesitaba de aire para poder existir.

A lo largo de la historia han sido numerosos los científicos que han estudiado y aportado conocimiento sobre la acústica, empezando por algunos como Aristóteles, pasando por Isaac Newton, y llegando hasta Euler, Lagrange y d'Alembert, quienes desarrollaron las bases matemáticas de la ecuación de onda y propagación del sonido [1].

### 2.2. Ecuación de onda unidimensional

En el caso ideal de un conducto de pared rígida con una sección transversal suficientemente pequeña (comparada con la longitud) en el que hay un fluido ideal, las ondas acústicas de pequeña amplitud viajan como ondas planas, es decir, pueden estar representadas por la ecuación de onda unidimensional.

Las dos variables de estado que caracterizan las ondas acústicas son la presión,  $p$ , y la velocidad de partícula,  $u$ . En un punto dado del medio fluido,  $p$  es la perturbación acústica sobre la presión ambiente  $p_0$  y  $u$  es la velocidad de la oscilación de las partículas.

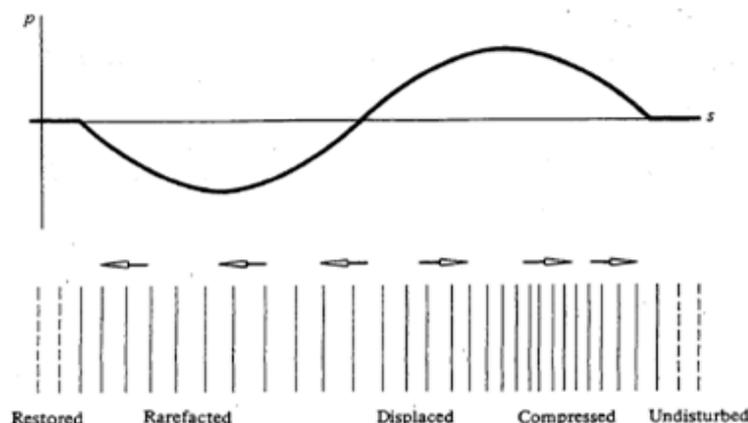


Figura 1. Representación de la presión acústica y el desplazamiento de las partículas para una onda plana sinusoidal



La perturbación de la presión acústica  $p$  y la velocidad de partícula  $u$  son la misma para todos los puntos de una misma sección. Dicho de otra forma, el frente de onda, definido como la superficie formada por los puntos en los que  $p$  y  $u$  tienen la misma amplitud y fase, es un plano normal a la dirección de propagación de la onda, que en el caso de un conducto es el eje longitudinal.

Las ecuaciones básicas linealizadas para este caso son:

- *Ecuación de continuidad*

$$\rho_0 \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (2.1)$$

- *Ecuación de cantidad de movimiento*

$$\rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (2.2)$$

- *Velocidad del sonido para gas ideal*

$$\frac{\partial p}{\partial \rho} = \frac{\gamma(p_0 + p)}{\rho_0 + \rho} \approx \frac{\gamma p_0}{\rho_0} = a_0^2 \quad (2.3)$$

Donde  $z$  es la coordenada longitudinal

$\rho$  es la variación de densidad del medio respecto a la densidad promedio  $\rho_0$

$p$  es la variación de la presión respecto a la presión promedio  $p_0$

$\gamma$  es el coeficiente de dilatación adiabática del fluido

$p_0$  y  $\rho_0$  son la presión ambiente y densidad del medio

Se supone que  $p/p_0 \ll 1$  y  $\rho/\rho_0 \ll 1$

$a_0$  es la velocidad del sonido en el medio

$$a_0 = \sqrt{\frac{\gamma R(T + 273.15)}{M}} \quad (2.4)$$

Donde  $T$  es la temperatura introducida en °C

$\gamma = 1,4$  para el aire

$R = 8,314 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$

$M = 0,029 \text{ kg/mol}$  para el aire

Cabe destacar que la velocidad del sonido en el aire (admitiendo la aproximación de la ecuación 2.4) depende únicamente de la temperatura puesto que el resto de variables son constantes, cuanto más alta es la temperatura más alta es la velocidad de propagación de las ondas acústica.



A partir de las ecuaciones 2.1, 2.2 y 2.3 anteriormente descritas se puede llegar a obtener la ecuación general de onda para una propagación unidimensional.

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - a_0^2 \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = 0 \quad (2.5)$$

Existe solución para esta ecuación en derivadas parciales y se puede representar de diferentes formas. La solución general para la presión acústica en función del tiempo y de la distancia,  $p(t, z)$ , contiene un término que representa a la onda que viaja hacia adelante (en sentido  $z$  positivo),  $f$ , y otro término que representa a la onda reflejada que viaja en dirección opuesta,  $g$ . [2]

$$p(t, z) = f(z - a_0 t) + g(z + a_0 t) \quad (2.6)$$

### 2.3. Potencia acústica

El flujo de energía por unidad de superficie es denominado intensidad acústica  $I$  y es igual al promedio del producto de  $p$  y la componente normal a la superficie de  $u$ .

$$I = \overline{p(t)u(t)} \quad (2.7)$$

La potencia acústica total que atraviesa una superficie,  $W$ , se puede obtener integrando la intensidad acústica sobre toda la superficie.

$$W = \oint I dS \quad (2.8)$$

El nivel de potencia acústica,  $L_W$ , es el parámetro que mide la forma en que es percibida la potencia acústica, es decir, el 'volumen' de sonido.

Las personas no perciben de forma lineal el cambio (aumento/disminución) de la potencia conforme se acercan/alejan de la fuente. La percepción de la potencia es una sensación que es proporcional al logaritmo de esa potencia. Esta relación logarítmica es el nivel de potencia acústica:

$$L_W = 10 \log \frac{W_1}{W_0} \quad (2.9)$$

Donde  $W_1$  es la potencia a estudiar, y  $W_0$  es la potencia umbral de audición, que expresada en unidades del SI, equivale a  $10^{-12}$  vatios y se toma como referencia fija. La unidad para medir este sonido sería el belio (B) pero como es una unidad muy grande, se utiliza normalmente su submúltiplo, el decibelio (dB).

En la Figura 2 se muestra una imagen con valores característicos de niveles de potencia acústica.

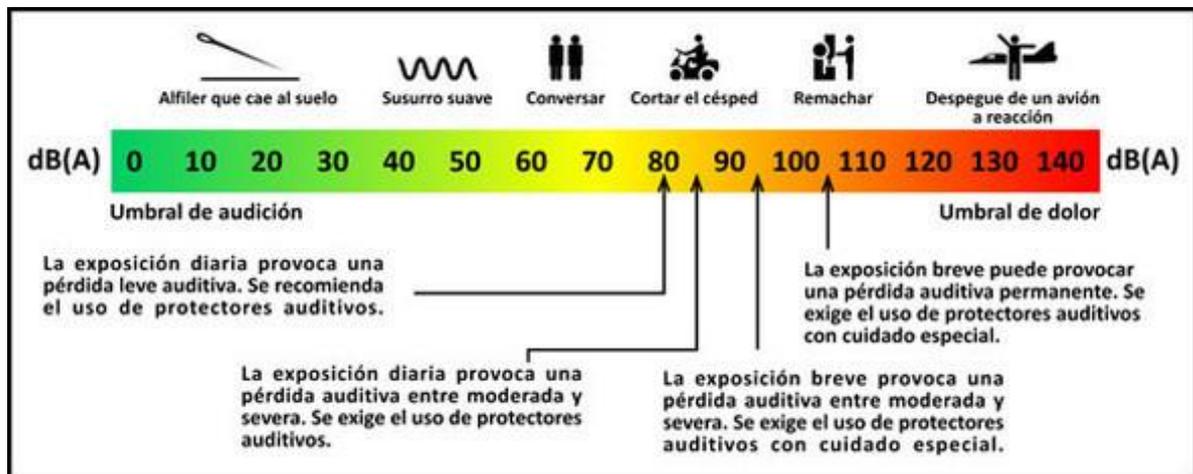


Figura 2. Escala de niveles sonoros en dB [3]

Este trabajo se va a centrar, sobre todo, en la reducción de esta potencia acústica generada por cualquier fuente mediante sistemas de conductos. Para ello se pueden usar resonadores, cámaras de expansión, tubos perforados, filtros disipativos y otros tipos de elementos que serán explicados más adelante.

Salvando alguna diferencia, lo que se busca conseguir al instalar este tipo de elementos en una instalación es dirigir las ondas sonoras para que choquen en las paredes, se reflejen y actúen de manera destructiva sobre ellas mismas.

## 2.4. Programas de cálculo comerciales

El sonido tiene un comportamiento muy complejo que depende de muchas variables y que impide obtener soluciones analíticas exactas para problemas de la vida real. Los programas que modelan el sonido se ayudan de aproximaciones y simplificaciones que se pueden hacer bajo ciertas condiciones para, al final, poder llegar a soluciones no muy lejanas de los resultados que se obtendrían experimentalmente.

En el mercado hay una infinidad de softwares que abordan este tema, cada uno con sus propios métodos para simular la acústica en conductos. Estos pueden ir desde los más simples, que se apoyan en leyes de la acústica unidimensional, hasta los más complejos válidos para configuraciones 3D y que tienen en cuenta efectos acústicos debidos a la turbulencia, pérdidas de carga, variaciones de temperatura, etc. En el **anexo I** se adjunta un estudio más amplio de estos programas acústicos y las principales características de cada uno.



Como es bien sabido, estos softwares suelen tener un coste. Es difícil encontrar un programa con buenas capacidades que sea gratuito. Los precios de las licencias oscilan entre los 300€ para los software más sencillos y los miles de euros para los más avanzados.

No siempre hace falta utilizar un programa o método que sea muy potente, de hecho, para según qué casos estos métodos implican una gran cantidad de tiempo de cálculo numérico, algo no deseado. Por otro lado, los programas que se apoyan en métodos más sencillos tienen un coste computacional mucho más bajo. Esto no necesariamente implica poca fiabilidad de los resultados. En concreto, la aproximación 1D simplifica enormemente los cálculos, y es perfectamente aceptable en ciertas condiciones. Cuando la longitud de onda es mucho mayor que la dimensión transversal del conducto (lo que suele imponer un límite en frecuencia de hasta algunos kHz) los métodos 1D son los más utilizados y proporcionan resultados fiables.



## 3. PÉRDIDA DE TRANSMISIÓN ACÚSTICA

### 3.1. El método

Una vez que se asume que la propagación de la onda es plana y unidimensional a través de los diferentes elementos de una instalación, se puede definir paso a paso una estrategia a seguir para resolver el problema acústico. En este caso, cada uno de los elementos de una red acústica estará modelado por una matriz de transferencia. Estos elementos o submodelos acústicos se podrían representar como cajas negras en las que no es necesario saber lo que pasa dentro, simplemente se toma cada submodelo como un sistema de dos puertos, una entrada y una salida. Es decir, conociendo los datos de entrada en el primer puerto, la matriz de transferencia permite calcular las variables en la salida (segundo puerto). Si esto se aplica sucesivamente, elemento tras elemento, al final se llega a obtener el comportamiento acústico global de todo el sistema y la pérdida de transmisión producida que se busca.

Dentro de la idea tan general que implica el método anteriormente expuesto se encuentran muchas variantes, cada una con sus pequeñas diferencias respecto a las demás. Hay métodos que hacen un uso ligeramente diferente de las variables de estado presión y velocidad, mientras que otros tratan de forma sutilmente diferente a un mismo tipo de elemento en una instalación; por ejemplo, es el caso de la diferencia entre los métodos que tienen siempre en cuenta un cambio de sección en el conducto y los que no lo tienen en cuenta si éste es relativamente pequeño.

Este trabajo se va a centrar en el método que explica M.L. Munjal en su libro *Acoustics of ducts and mufflers* [2], referencia obligada en este campo, y más concretamente en el primer abordaje que hace al problema en los primeros compases del libro.

### 3.2. Limitaciones del método

Para que una onda se propague de forma plana sin que ocurran otros modos de propagación basta básicamente con que la longitud de onda sea mayor que las dimensiones de la sección conducto, dicho de otra forma, para un conducto con una determinada sección habrá un rango de frecuencias bajas que presenten una propagación de onda prácticamente unidimensional. Si las frecuencias se salen de este rango, la aproximación de la teoría 1D que utiliza este método ya no será válida.

Las frecuencias que se consideran aceptables para un **conducto rectangular** son:

$$f < \frac{a_0}{2h} (1 - M^2)^{1/2} \quad (3.1)$$



Donde  $h$  es la dimensión más grande de la sección del conducto y  $M$  es el número de Mach, el ratio entre la velocidad media del fluido en movimiento y la velocidad del sonido  $a_0$  en ese medio.

La limitación anterior también se puede representar en función de la longitud de onda  $\lambda$ .

$$\lambda > \frac{2h}{(1 - M^2)^{1/2}} \quad (3.2)$$

En el caso de ser un medio en reposo ( $M = 0$ ), la longitud de onda tendrá que ser como mínimo dos veces la dimensión más grande del conducto rectangular.

En la Tabla 1. se muestran las frecuencias (Hz) máximas para las que el método de las matrices de transferencia es válido en conductos rectangulares en función del lado mayor de la sección del conducto y la temperatura del aire, siendo  $M = 0$ .

Temp °C	Lado de mayor longitud (m)									
	0.025	0.05	0.075	0.1	0.125	0.15	0.175	0.2	0.225	0.25
0	6622	3311	2207	1656	1324	1104	946	828	736	662
150	8242	4121	2747	2061	1648	1374	1177	1030	916	824
300	9593	4796	3198	2398	1919	1599	1370	1199	1066	959
450	10775	5387	3592	2694	2155	1796	1539	1347	1197	1077
600	11840	5920	3947	2960	2368	1973	1691	1480	1316	1184

Tabla 1. Dimensiones límites de una sección rectangular

Las frecuencias que se consideran aceptables para un **conducto circular** son:

$$f < \frac{1.84a_0}{\pi D} (1 - M^2)^{1/2} \quad (3.3)$$

Donde  $D$  es el diámetro del conducto y  $M$  es el número de Mach, el ratio entre la velocidad media del fluido en movimiento y la velocidad del sonido  $a_0$  en ese medio.

La limitación anterior también se puede representar en función de la longitud de onda  $\lambda$ .

$$\lambda > \frac{\pi D}{1.84(1 - M^2)^{1/2}} \quad (3.4)$$

De forma análoga a lo que ocurre en un conducto rectangular, en el caso de ser un medio en reposo ( $M = 0$ ), la longitud de onda tendrá que ser como mínimo 1.7 veces el diámetro del conducto circular.

En la Tabla 2. se muestran las frecuencias (Hz) máximas para las que el método de las matrices de transferencia es válido en conductos circulares en función del diámetro de la sección del conducto y la temperatura del aire, siendo  $M = 0$ .

Temp °C	Diámetro (m)									
	0.025	0.05	0.075	0.1	0.125	0.15	0.175	0.2	0.225	0.25
0	7757	3879	2586	1939	1551	1293	1108	970	862	776
150	9655	4827	3218	2414	1931	1609	1379	1207	1073	965
300	11237	5618	3746	2809	2247	1873	1605	1405	1249	1124
450	12622	6311	4207	3155	2524	2104	1803	1578	1402	1262
600	13869	6934	4623	3467	2774	2311	1981	1734	1541	1387

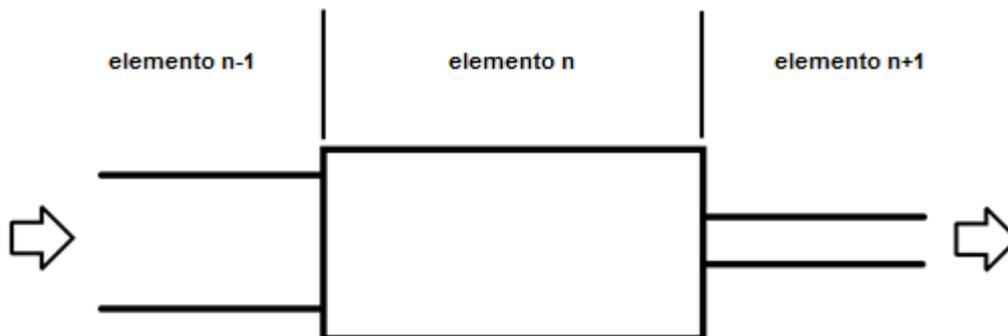
**Tabla 2. Dimensiones límites de una sección circular**

Hay que destacar que en ningún caso el número de Mach puede ser superior a 0.2 para que la aproximación que se utiliza siga siendo válida. Esto se debe a que para valores mayores de 0.2 Mach los efectos de compresibilidad en el aire empiezan a ser más significativos y no se pueden despreciar.

Con estas dos tablas anteriormente expuestas queda patente que este método se podría aplicar incluso en conductos con secciones relativamente grandes, llegando por ejemplo a 25 cm de diámetro para frecuencias por debajo de los 800 Hz. De la misma forma, también se comprueba que sería válido para frecuencias bastante más altas si las dimensiones de los conductos fuesen bastante reducidas.

### 3.3. Matrices de transferencia

Cualquier elemento puede estar representado por una matriz de transferencia si se asegura que la onda que se propaga en su interior es plana. Esta matriz relaciona las variables de estado a la entrada y a la salida del elemento:



**Figura 3. Representación de los elementos en un sistema de conductos**

$$\begin{bmatrix} p_{n-1} \\ v_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Matriz de transferencia} \\ 2 \times 2 \text{ del elemento } n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_n \\ v_n \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$\begin{bmatrix} p_{n-1} \\ v_{n-1} \end{bmatrix}$  es el vector de estado a la entrada del elemento  $n$ , cuyas dos componentes son la presión y la velocidad (como se ha apuntado, estas variables se refieren siempre a la fluctuación respecto al valor medio respectivo). A su vez, éste es también el vector de estado a la salida del elemento  $n - 1$ .

$\begin{bmatrix} p_n \\ v_n \end{bmatrix}$  es el vector de estado a la salida del elemento  $n$ . A su vez, éste es también el vector de estado a la entrada del elemento  $n + 1$ .

Las matrices de transferencia acústica para cada tipo de elemento han quedado definidas en los numerosos estudios que se han ido realizando, sobre todo, en los últimos 30 años. Esencialmente, se obtienen imponiendo condiciones de contorno a las soluciones de la ecuación de onda.

### 3.4. Ecuación de pérdida de transmisión acústica

La pérdida de transmisión acústica es la diferencia entre el nivel de potencia acústica a la entrada y el de la salida del sistema de conductos.

$$TL = L_{W_1} - L_{W_n} \quad (3.6)$$

Cada sistema de conductos se puede dividir en  $n$  elementos, cada uno representado por una matriz. El elemento  $1$  es el más cercano a la fuente de sonido y el elemento  $n$  el más alejado. Las matrices de transferencia se combinan para obtener la matriz de transferencia global del sistema con el fin de predecir el rendimiento acústico correspondiente para el conjunto (ecuación 3.7).

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ v_0 \end{bmatrix} = [T_1] \cdots [T_n] \begin{bmatrix} p_n \\ v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_n \\ v_n \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Una vez que los elementos del sistema de conductos están bien definidos se calcula la pérdida de transmisión acústica en decibelios a partir de la matriz de transferencia global (ecuación 3.8).

$$TL = 20 \log \left[ \frac{Y_n}{Y_1 + Y_n} \left| T_{11} + \frac{T_{12}}{Y_n} + T_{21} Y_1 + \frac{Y_1}{Y_n} T_{22} \right| \right] \quad (3.8)$$

Donde  $Y_1$  e  $Y_n$  son las impedancias características del primer y último elemento que se explican en el siguiente apartado (ecuación 4.3)

## 4. CONDUCTOS Y ACCESORIOS

### 4.1. Conducto recto

Los conductos rectos son los elementos principales en un sistema de conductos, por lo que su matriz de transferencia va a ser la primera en ser explicada. Cabe destacar que esta matriz de transferencia sirve tanto para conductos circulares como rectangulares, ya que el parámetro característico va a ser la superficie de la sección y no la forma de esta. Además, también podría ser aplicable a conductos curvos cuyos codos no fuesen muy pronunciados.

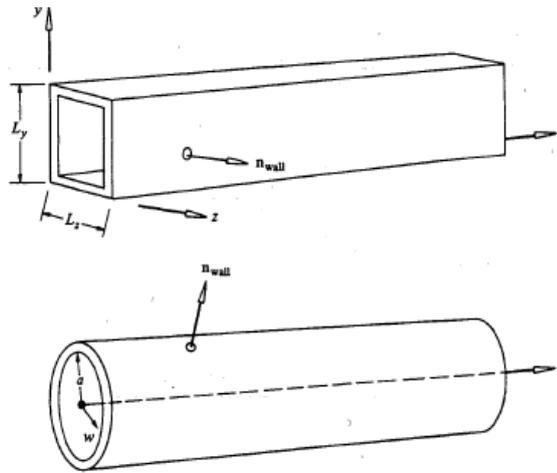


Figura 4. Conductos circulares y cuadrados de paredes rígidas

Para un conducto de longitud  $l$  y sección  $S$  sin cambios de sección, la matriz de transferencia acústica tiene la siguiente forma:

$$T_{\text{conducto}} = e^{-jMk_{c0}l} \begin{bmatrix} \cos k_{c0}l & jY \sin k_{c0}l \\ (j/Y) \sin k_{c0}l & \cos k_{c0}l \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Donde  $k_{c0}$  es el número de onda convectivo que depende de la frecuencia,  $f$ , de la velocidad del sonido en ese medio,  $a_0$ , y del número de Mach del fluido en ese conducto,  $M$ . El número de onda convectivo no es más que el número de onda simple,  $k_0$ , ligeramente modificado debido a la presencia de un fluido movimiento dentro del conducto.

$$k_{c0} = \frac{k_0}{1 - M^2} = \frac{2\pi f / a_0}{1 - M^2} \quad (4.2)$$

La impedancia característica  $Y$  se define como la relación entre la presión acústica que lleva asociada una onda y la velocidad másica acústica que lleva asociada esa onda. Se puede demostrar que esta impedancia característica depende de la velocidad del sonido en ese medio,  $a_0$ , y de la sección del conducto,  $S$ , según la ecuación 4.3.

$$Y = \frac{a_0}{S} \quad (4.3)$$

El término exponencial en base  $e$  y exponente imaginario que multiplica a la matriz de transferencia (ecuación 4.1) está asociado al movimiento del fluido dentro del conducto. Si el medio estuviese en reposo ( $M = 0$ ), este término desaparecería y el número de onda convectivo pasaría a ser el número de onda simple. Al final, lo que quedaría sería una matriz de transferencia simplificada para el caso de un conducto con fluido en reposo.

$$T_{\text{conducto } (M=0)} = \begin{bmatrix} \cos k_0 l & jY \sin k_0 l \\ (j/Y) \sin k_0 l & \cos k_0 l \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Se puede comprobar que la matriz de transferencia se convierte en la matriz identidad cuando la longitud del conducto tiende a 0 o a un múltiplo de la longitud de onda, algo totalmente lógico, ya que el vector de estado tendrá que ser el mismo a la entrada y a la salida del conducto.

En vista a lo anteriormente expuesto, para dejar definido un elemento tipo conducto, los parámetros que necesariamente se tendrán que conocer serán:

- $S$ : Sección del conducto
- $l$ : Longitud del conducto
- $a_0$ : Velocidad del sonido en el medio
- $M$ : Número de Mach en el conducto
- $f$ : Frecuencia de la onda acústica

## 4.2. Resonador de Helmholtz

El absorbente Helmholtz o resonador de Helmholtz es un tipo de absorbente acústico creado artificialmente para eliminar (absorber) un estrecho margen de frecuencias.

Los resonadores de Helmholtz se basan en el artefacto acústico conocido como cavidad de Helmholtz; consisten en una cavidad con un orificio en el extremo de un cuello (como una botella) en cuyo interior el aire se comporta como una masa resonante.

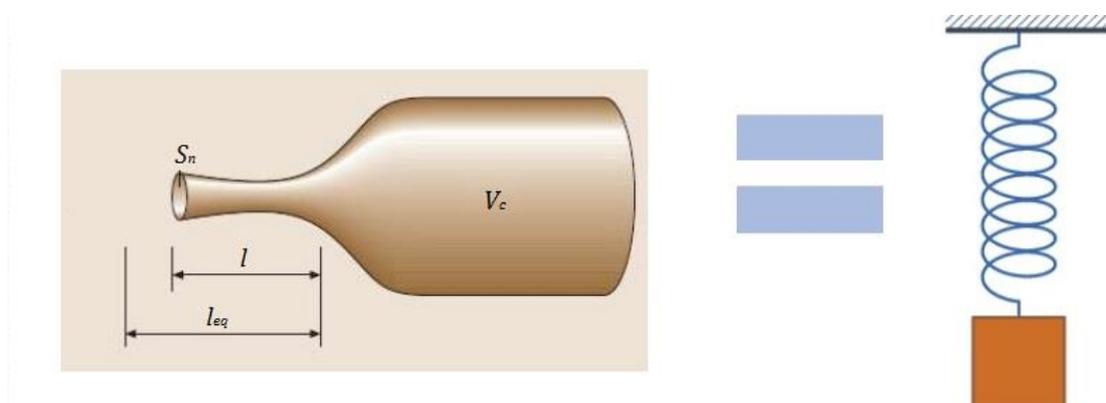


Figura 5. Resonador de Helmholtz esquematizado [4]



Un ejemplo de funcionamiento del resonador de Helmholtz es el sonido que produce una botella cuando se sopla en su borde. El sonido introducido (soplido) contiene un amplio margen de frecuencias, pero la botella produce resonancia a una cierta frecuencia, menor (más grave) cuanto más vacía se encuentre (pues el volumen en su interior es mayor).

Estos resonadores se pueden acoplar transversalmente en cualquier punto del sistema de conductos dependiendo de la respuesta que queramos obtener.

Para un resonador de Helmholtz la matriz de transferencia tiene la siguiente forma:

$$T_{\text{resonador de Helmholtz}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1/Z_r & 1 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Donde  $Z_r$  es la impedancia asociada al resonador de Helmholtz:

$$Z_r = j \left( 2\pi f \frac{l_{eq}}{S_n} - \frac{a_0^2}{2\pi f V_c} \right) + \frac{(2\pi f)^2}{\pi a_0} \quad (4.6)$$

$V_c$  es el volumen de la cámara de resonancia.

$S_n$  es la sección del cuello del resonador.

$l_{eq}$  es la longitud equivalente del cuello del resonador y viene dada por la siguiente expresión:

$$l_{eq} = \text{longitud del cuello} + \text{espesor de pared} + 1.7 * \text{radio del cuello} \quad (4.7)$$

Un resonador de Helmholtz reduce la potencia acústica de la onda sonora cuando ésta tiene una frecuencia cercana a la de resonancia del resonador, pero no tiene casi efecto sobre el resto de frecuencias.

Imponiendo que la parte imaginaria de la impedancia  $Z_r$  sea nula se obtiene la frecuencia de resonancia (es decir, en torno a la cual se produce la absorción de potencia sonora):

$$f = \frac{a_0}{2\pi} \sqrt{\frac{S_n}{l_{eq} V_c}} \quad (4.8)$$

Como ejemplo, si se usa un resonador que tenga  $4 \text{ cm}^2$  de sección de cuello,  $1 \text{ cm}$  de longitud de cuello equivalente y un volumen de  $1 \text{ litro}$ , se deduce mediante la fórmula 4.8 que el pico de la resonancia estará en torno a  $340 \text{ Hz}$ .

En la Figura 6 Se muestra la pérdida de transmisión acústica para el resonador propuesto en el ejemplo anterior. Los cálculos se realizan según la ecuación 3.8 para un rango de frecuencias de  $0$  a  $1000 \text{ Hz}$ . La matriz de transferencia usada es la que se muestra en la ecuación 4.5.

Se puede observar que el pico de absorción sonora está en torno a 340 Hz, tal y como se ha predicho con la ecuación 4.8.

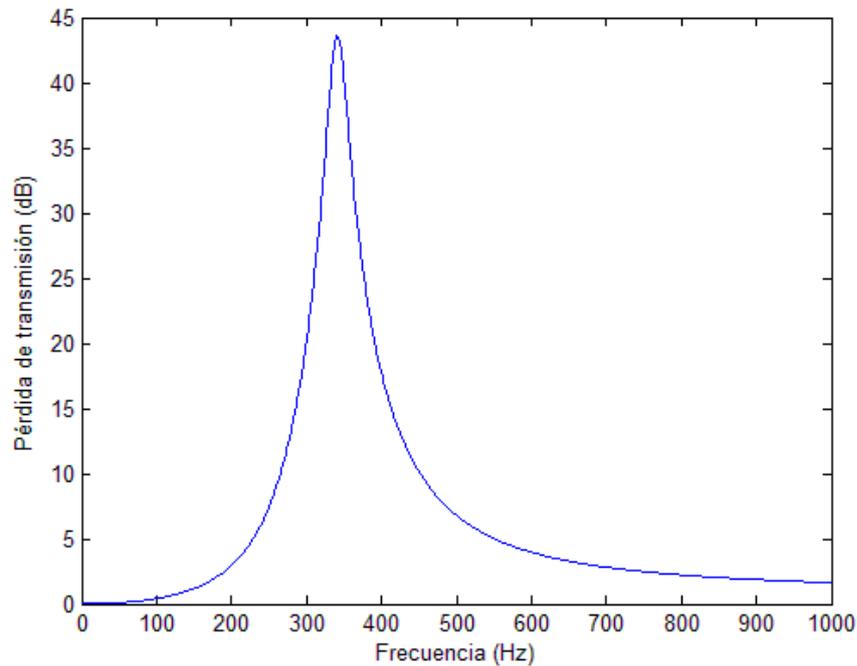


Figura 6. Pérdida de transmisión en resonador de Helmholtz

Así pues, para dejar definido un elemento tipo resonador de Helmholtz, los parámetros que se tendrán que conocer serán:

- $l_{eq}$ : Longitud equivalente del cuello
- $V_c$ : Volumen de la cámara
- $S_n$ : Sección del cuello
- $a_0$ : Velocidad del sonido en el medio
- $f$ : Frecuencia de la onda acústica

### 4.3. Resonadores extendidos

Un simple tubo cerrado montado a un lado de un conducto es un silenciador muy eficaz cuando la longitud del tubo es un múltiplo impar de un cuarto de una longitud de onda. Sin embargo, tiene muy poco efecto a otras frecuencias.

Estos picos de pérdida de transmisión generados por el resonador pueden ser predichos en las frecuencias:

$$f_{res} = (2n + 1)a/4L \quad (4.9)$$

Donde  $a$  es la velocidad del sonido en el medio

$n$  es un número entero

$L$  es la longitud del resonador

Este efecto de resonador extendido se puede lograr si un tubo se proyecta en otro tubo más ancho, como se muestra en la Figura 7. Esta configuración presenta la ventaja de ser un sistema más compacto. Los diferentes tipos de resonadores extendidos son:

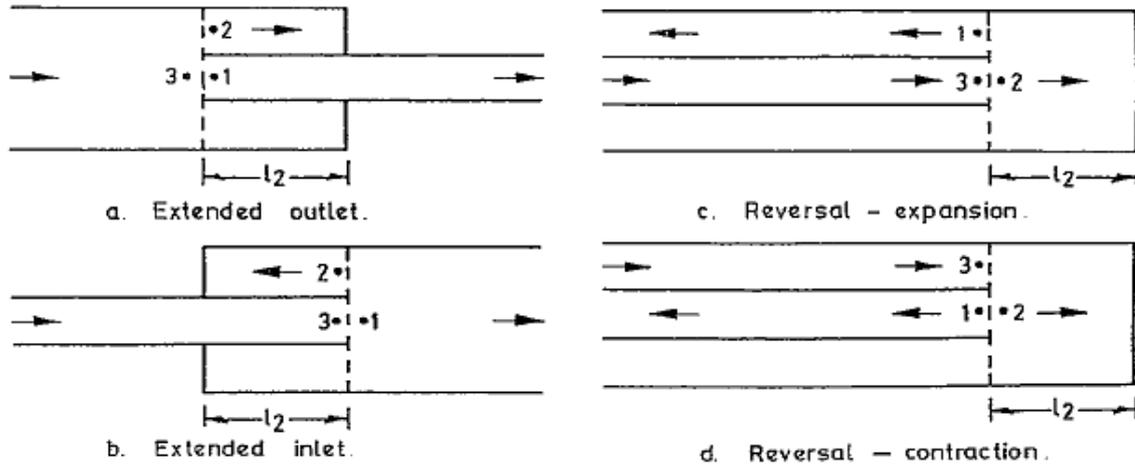


Figura 7. Tipos de resonadores extendidos (a. Resonador extendido de salida; b. Resonador extendido de entrada; c. Resonador invertido de expansión; d. Resonador extendido de contracción) [2]

Para un cambio de sección con un resonador extendido la matriz de transferencia tiene la siguiente forma:

$$T_{\text{cambio de seccion}} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

$$A_{11} = 1 - \frac{KM_1^2}{1 - M_1^2} \quad (4.11)$$

$$A_{12} = \frac{KM_1Y_1}{1 - M_1^2} \quad (4.12)$$

$$A_{22} = \frac{-\frac{S_3KM_1Y_1}{1 - M_1^2} - C_1S_1 \left(1 - \frac{(\gamma - 1)M_1^4}{1 - M_1^2}\right) + \frac{C_2S_2Z_2(\gamma - 1)KM_1^3}{(1 - M_1^2)Y_1}}{C_2S_2Z_2 + S_3M_3Y_3} \quad (4.13)$$

$$A_{22} = \frac{-\frac{S_3KM_1Y_1}{1 - M_1^2} - C_1S_1M_1Y_1 \left(1 - \frac{(\gamma - 1)M_1^2}{1 - M_1^2}\right) + C_2S_2Z_2 \left(1 - \frac{(\gamma - 1)M_1^2}{1 - M_1^2}\right)}{C_2S_2Z_2 + S_3M_3Y_3} \quad (4.14)$$

$S_1$ ,  $S_2$  y  $S_3$  son las secciones de salida, del propio resonador, y de entrada respectivamente.

$Y_1$ ,  $Y_2$  e  $Y_3$  son las impedancias características para las secciones de salida, del propio resonador, y de entrada respectivamente.

$$Y_n = \frac{a_0}{S_n} \quad (4.15)$$

$M_1$  y  $M_3$  son los números de Mach para las secciones de salida y de entrada respectivamente.

$Z_2$  es la impedancia que lleva asociada el resonador extendido:

$$Z_2 = -jY_2 \cot k_0 l_2 \quad (4.16)$$

$$k_0 = 2\pi f/a_0 \quad (4.17)$$

Las constantes  $K$ ,  $C_1$  y  $C_2$  dependen de la configuración del resonador extendido tal y como se muestra en la tabla.

Elemento	K	C1	C2
Resonador de salida extendida	$[1 - (S_1/S_2)]/2$	-1	-1
Resonador de entrada extendida	$[(S_1/S_2) - 1]^2$	-1	1
Resonador invertido de expansión	$(S_1/S_2)^2$	1	-1
Resonador invertido de contracción	0.5	1	-1

**Tabla 3. Tabla de constantes para resonadores extendidos**

Por motivos de coste computacional y simplificación, los términos que presentan algún  $M^2$  se pueden despreciar puesto que se eleva al cuadrado un número que en principio va a ser muy bajo.

Así pues, la nueva matriz de transferencia para resonadores extendidos quedaría bastante más simplificada.

$$T_{\text{resonador extendido}} = \begin{bmatrix} 1 & KM_1 Y_1 \\ \frac{C_2 S_2}{C_2 S_2 Z_2 + S_3 M_3 Y_3} & \frac{C_2 S_2 Z_2 - M_1 Y_1 (C_1 S_1 + K S_3)}{C_2 S_2 Z_2 + S_3 M_3 Y_3} \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Si se impone que el caudal circulante a través del resonador se nulo ( $M_1 = M_3 = 0$ ) se puede comprobar que la matriz de transferencia resultante es la matriz simplificada para resonadores extendidos con medio en reposo.

$$T_{\text{resonador extendido}(M_1=M_3=0)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{j}{Y_2 \cot k_0 l_2} & 1 \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

Los parámetros que se deberán conocer para dejar definido un elemento tipo resonador extendido serán:

- $K$ : Constante que depende del tipo de resonador
- $C_1$ : Constante que depende del tipo de resonador
- $C_2$ : Constante que depende del tipo de resonador
- $l_2$ : Longitud del resonador
- $M_1$ : Número de Mach en el conducto posterior al resonador
- $M_3$ : Número de Mach en el conducto anterior al resonador
- $S_1$ : Sección del conducto posterior al resonador
- $S_2$ : Sección del conducto resonador
- $S_3$ : Sección del conducto anterior al resonador
- $a_0$ : Velocidad del sonido en el medio
- $f$ : Frecuencia de la onda acústica

#### 4.4. Cambios de sección

Los cambios de sección están presentes en la gran mayoría de sistemas de conductos. Determinar la matriz de transferencia para estos elementos puede llegar a ser más difícil de lo que a priori parece, de hecho, hay alguna discrepancia en cuanto a cómo resolver este tema.

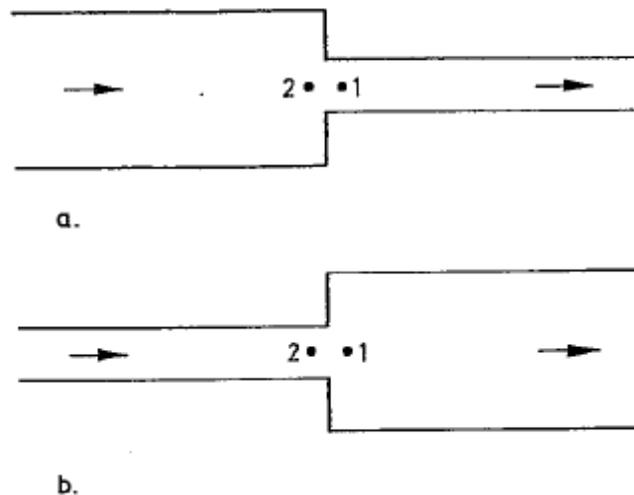


Figura 8. Cambios de sección (a. contracción; b. expansión)

La primera opción (la propuesta por Munjal) es usar la matriz de resonadores extendidos y hacer que la longitud del resonador tienda a 0, lo que hace que  $Z_2$  tienda a infinito. Resolviendo unos límites se obtiene:

$$T_{\text{cambio de sección}} = \begin{bmatrix} 1 & KM_1 Y_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.20)$$



Donde  $K$  es una constante cuyo valor depende de si es contracción o expansión,  $M_1$  es el número de Mach en el conducto posterior al cambio de sección, e  $Y_1$  la impedancia característica del conducto posterior al cambio de sección.

Si se analizan los términos de la matriz de transferencia se observa que no dependen de la frecuencia, solo dependen de las condiciones que existan en el conducto posterior al cambio de sección y de si se produce una expansión o una contracción.

Otra opción es usar la matriz de transferencia para cambios de sección de Lung y Doige [5].

$$T_{\text{cambio de sección}} = \begin{bmatrix} 1 & j2\pi fL \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

Donde  $L$  es el factor corrector de Karal [6].

$$L = \frac{8}{3\pi^2 r_0} (1 - \alpha) \quad (4.22)$$

$$\alpha = \frac{\text{radio del conducto menor, } r_0}{\text{radio del conducto mayor}} \quad (4.23)$$

En la Figura 9 se muestra la pérdida de transmisión acústica para un cambio de sección según las matrices que propone Munjal (ecuación 4.20) y Lung&Doige (ecuación 4.21).

En concreto, este cambio de sección es una expansión brusca de un conducto de diámetro 4cm a un conducto de diámetro 8 cm. Ambos métodos muestran resultados muy similares, en torno a 4.5 dB de pérdida de transmisión, por lo que se podría afirmar que sería casi indistinto usar uno u otro. Para todos cálculos posteriores a este apartado se va a utilizar la matriz de transferencia que propone Munjal (ecuación 4.20).

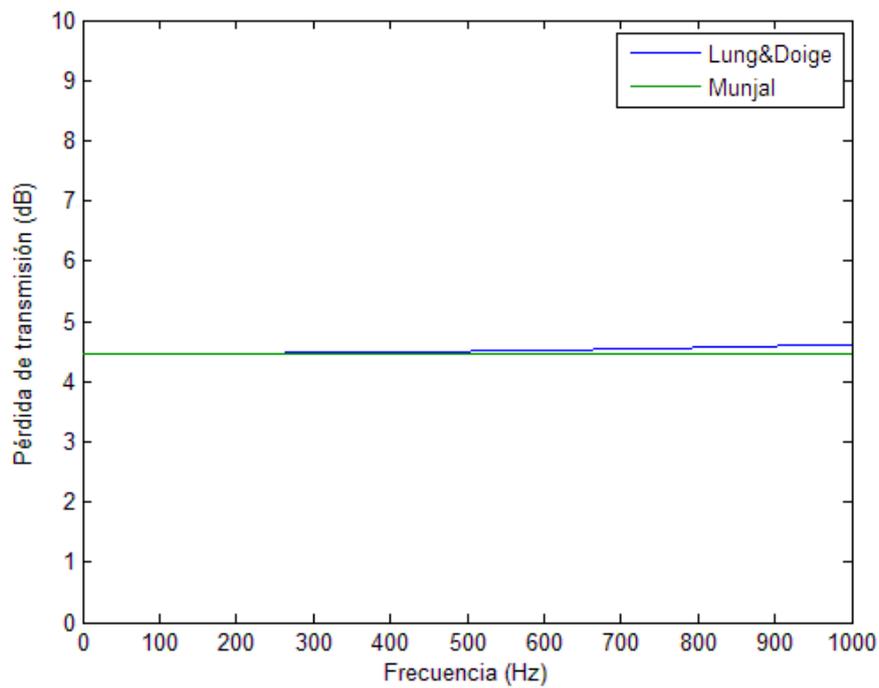


Figura 9. Pérdida de transmisión en una expansión brusca desde diámetro 4 cm a 8 cm, para aire en reposo.

Los parámetros necesarios para dejar definido un elemento tipo cambio de sección serán:

- $K$ : Constante que depende de si es expansión o contracción
- $M_1$ : Número de Mach en el conducto posterior al cambio de sección
- $S_1$ : Sección del conducto posterior al cambio de sección
- $a_0$ : Velocidad del sonido en el medio

## 5. VERIFICACIÓN DEL MÉTODO

Para comprobar que el método de cálculo funciona correctamente se analizan varios casos en los que se combinan diferentes elementos dando lugar a sistemas de conductos. Los resultados se comparan con los obtenidos por otros estudios que se consideran fiables. Además, algunos resultados también están comparados con ensayos experimentales, por lo que se puede ver el rango de fiabilidad y exactitud del método para las diferentes frecuencias.

### 5.1. Caso 1 – Cámara de expansión simple

En este caso se analiza una cámara de expansión simple de 42 cm de longitud con diámetros de 12 cm (cámara) y 6 cm (entrada\salida).

En la Figura 10 se muestran los resultados del artículo de N.Y. Gerges y R. Jordan sobre acústica en conductos [7]. En línea discontinua se muestra la simulación y en línea continua los resultados experimentales.

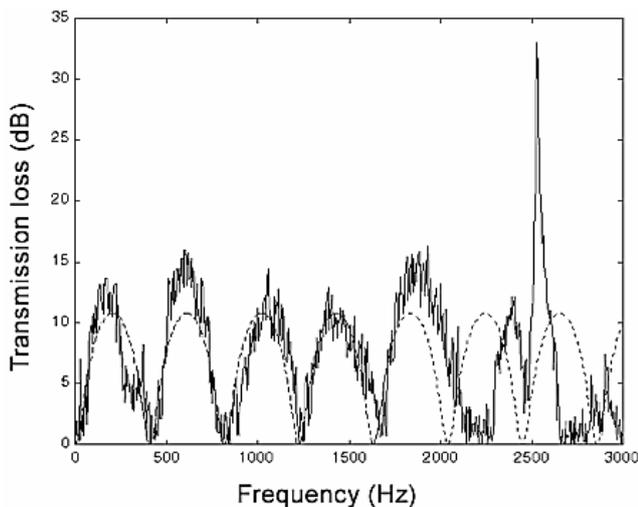


Figura 10. Modelo de referencia para el caso 1

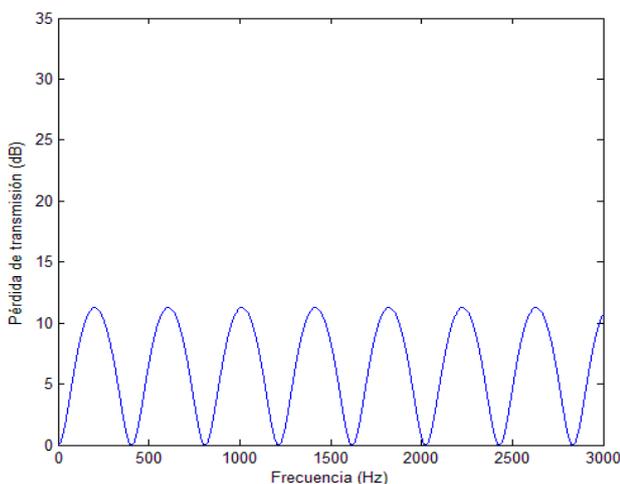


Figura 11. Resultados obtenidos para el caso 1

La máxima y mínima pérdida de transmisión para este caso están localizadas en las frecuencias  $f_{max}$  y  $f_{min}$  respectivamente, que pueden ser predichas como:

$$f_{max} = (2n + 1)a/4L \quad (5.1)$$

$$f_{min} = 2na/4L \quad (5.2)$$

Donde  $a$  es la velocidad del sonido en el medio;  $n$  es un número entero; y  $L$  es la longitud de la cámara de expansión.

Se pueden observar los típicos picos de pérdidas de transmisión que se producen en las cámaras de expansión.

Además, al comparar la simulación con los resultados experimentales se aprecia que los resultados computacionales dejan de ser fiables a partir de los 2000 Hz tal y como se ha explicado en el apartado 3.2.

Los resultados con el modelo propio (Figura 11) son prácticamente idénticos a los del modelo de referencia (Figura 10).

## 5.2. Caso 2 – Cámara de expansión + Resonador

En este caso se analiza una cámara de expansión de 42 cm de longitud con un resonador extendido de salida de 20.7 cm. Los diámetros son de 12 cm para la cámara y 6 cm para la entrada, salida y resonador.

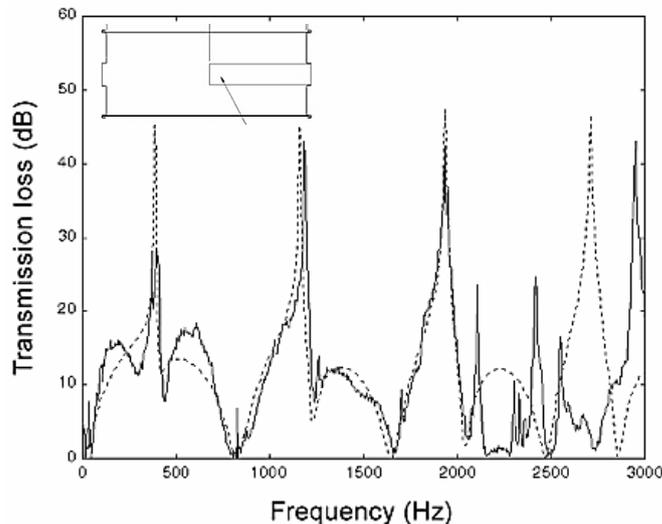


Figura 12. Modelo de referencia para el caso 2

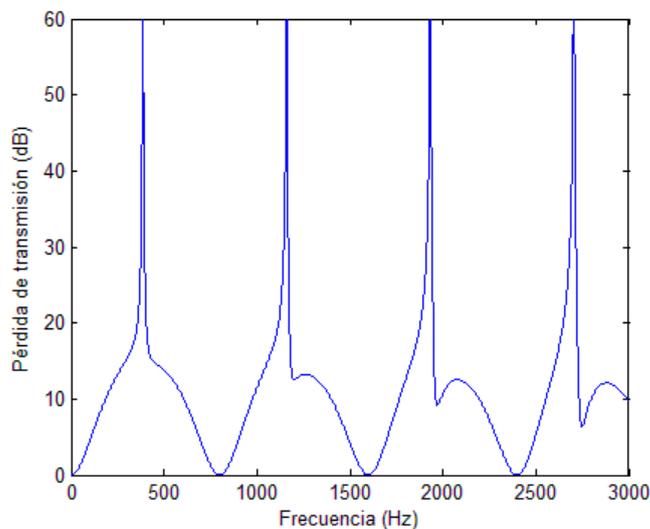


Figura 13. Resultados obtenidos para el caso 2

En la Figura 12 se muestran los resultados del artículo de N.Y. Gerges y R. Jordan sobre acústica en conductos [7].

En línea discontinua se muestra la simulación y en línea continua los resultados experimentales.

Se pueden observar los picos de pérdidas de transmisión provocados por el resonador extendido (picos altos). Estas frecuencias resonantes se predicen según la ecuación 4.9 (400Hz, 1200 Hz,...).

También se observan los picos provocados por la cámara de expansión (picos suavizados). Al comparar la simulación con los resultados experimentales se vuelve a apreciar que los resultados computacionales dejan de ser fiables a partir de los 2000 Hz aproximadamente.

El modelo creado (Figura 13) se asemeja bien al modelo de referencia (Figura 12).

### 5.3. Caso 3 – Cámara de expansión + 2 Resonadores

En este caso se analiza una cámara de expansión con resonadores extendidos a la entrada y a la salida de la misma. La cámara de expansión tiene una longitud total de 60 cm y los resonadores tienen una longitud aproximada de 30 cm (entrada) y 15 cm (salida). El ratio de expansión entre cámara y resonadores es de 4:1.

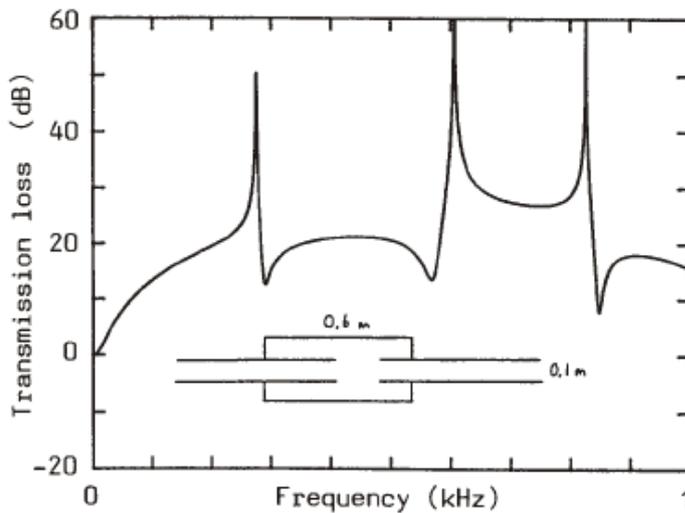


Figura 14. Modelo de referencia para el caso 3

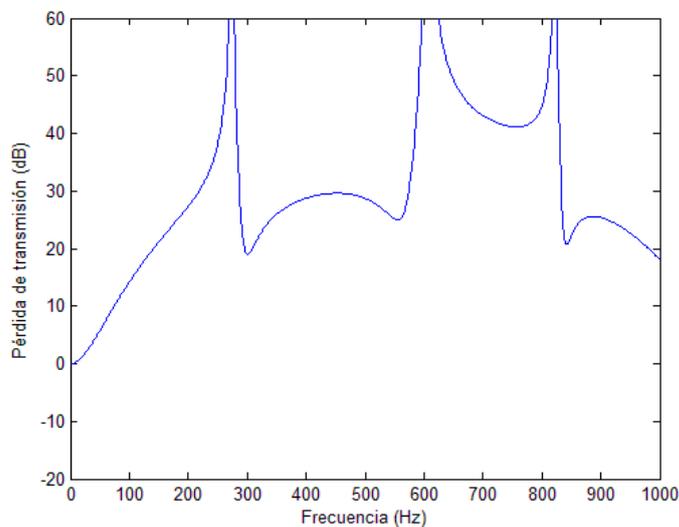


Figura 15. Resultados obtenidos para el caso 3

En la Figura 14 se muestran los resultados obtenidos en el análisis de Finn Jacobsen [8].

Se pueden observar los picos provocados por el resonador de entrada ( $\approx 290\text{Hz}$ ,  $\approx 820\text{Hz}$ ) y el resonador de salida ( $\approx 600\text{Hz}$ ). Nótese que el resonador largo (entrada) presenta un primer modo de resonancia de frecuencia baja (grave) y un segundo modo de resonancia de frecuencia más alta. El resonador corto sólo presenta un modo de resonancia dentro de las frecuencias que se representan.

El modelo programado para este caso (Figura 15) se asemeja bastante bien al modelo de referencia (Figura 14).

## 5.4. Caso 4 – 2 Cámaras de expansión + 2 Resonadores

En este caso se analiza una doble cámara de expansión con dos resonadores extendidos de igual longitud situados a la salida de la primera cámara y a la entrada de la segunda. Las cámaras de expansión tienen una longitud de 60 cm y los resonadores tienen una longitud aproximada de 30 cm. El ratio de expansión entre cámara y resonadores es de 4:1.

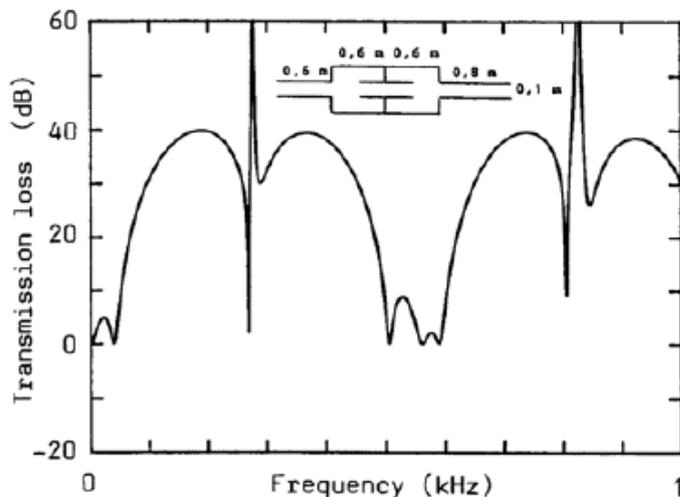


Figura 16. Modelo de referencia para el caso 4

En la Figura 16 se muestran los resultados obtenidos en el análisis de Finn Jacobsen [8]

Se pueden observar los picos provocados por los resonadores ( $\approx 290\text{Hz}$ ,  $820\text{Hz}$ ). Los picos de pérdidas acústicas correspondientes a cada resonador están superpuestos por ser los resonadores de la misma longitud.

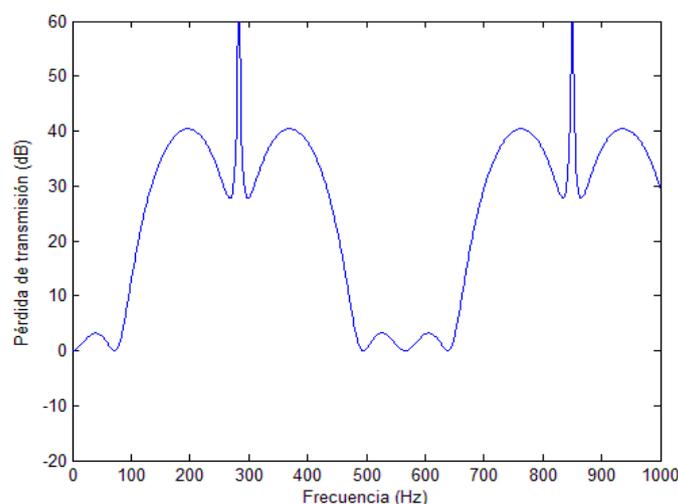


Figura 17. Resultados obtenidos para el caso 4

El modelo diseñado (Figura 17) se asemeja bastante bien al modelo de referencia (Figura 16).

## 5.5. Conclusiones de la verificación

Se observa que los resultados que se obtienen con el método programado coinciden con gran exactitud con los estudios que se han tomado de referencia. Las pequeñas diferencias que existen se deben a que no se dispone de todos los parámetros de los modelos de referencia y se han introducido algunas dimensiones de forma aproximada.

## 6. INTERFAZ GRÁFICA

### 6.1. Distribución de elementos en la interfaz

A partir de las bases que se han descrito anteriormente se ha creado una interfaz gráfica de usuario en el entorno de programación de interfaces de Matlab (GUIDE).

Esta interfaz ha de tener todo lo necesario para poder introducir los diferentes parámetros de nuestro sistema de conductos.

También tiene que mostrar una gráfica en la que se muestre la pérdida de transmisión acústica en función de la frecuencia.

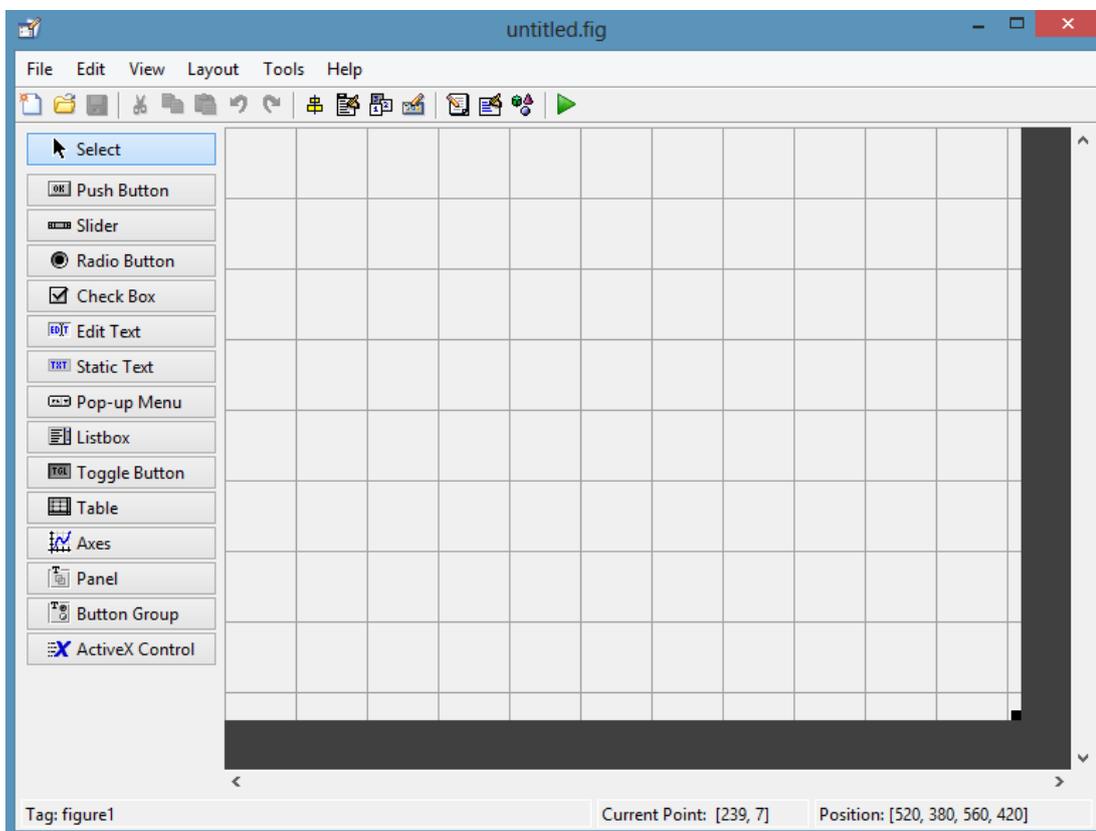
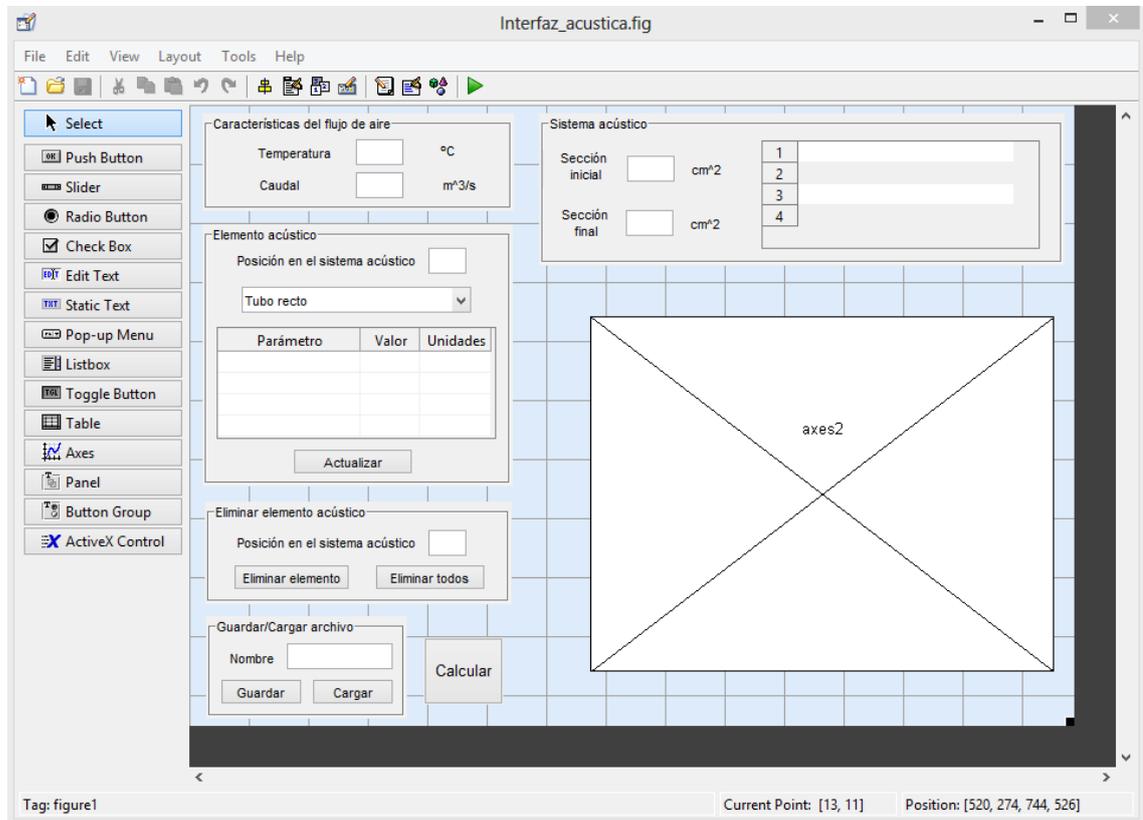


Figura 18. Entorno de programación de interfaces GUIDE de Matlab

Añadiendo diferentes componentes como pueden ser “pushbuttons”, tablas, celdas de texto, gráficas, etc. se llega a conseguir el layout que se muestra a continuación.

Se ha elegido distribuir los elementos de la interfaz así para conseguir manejar el programa de una manera bastante intuitiva y cómoda.



**Figura 19. Layout de la interfaz acústica en GUIDE**

## 6.2. Identificación de los elementos en la interfaz

En la Figura 20 se explican los diferentes bloques y elementos que hay presentes en la interfaz acústica.

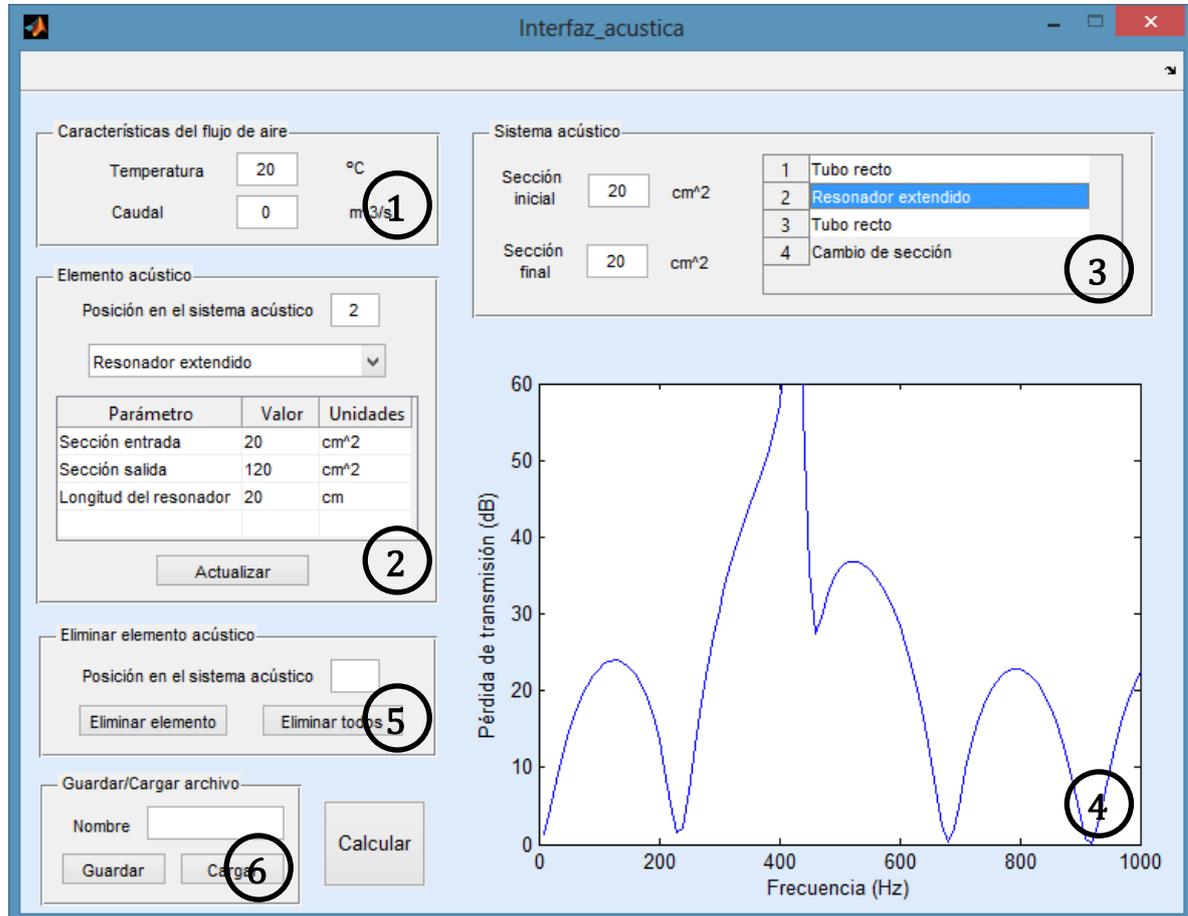


Figura 20. Diferentes bloques de la interfaz acústica diseñada

### 1. Características del flujo de aire

El primer bloque de la interfaz hace referencia a las características del flujo de aire. Se tiene que introducir la temperatura en °C y el caudal en m<sup>3</sup>/s.

Según la temperatura que se introduzca el programa calcula internamente la velocidad del sonido en el aire según la ecuación 2.4.

El programa también usa el caudal introducido para calcular los números de Mach correspondientes en las diferentes secciones del sistema de conductos. Para ello simplemente se divide el caudal entre la sección y la velocidad del sonido calculada anteriormente.

$$Mach = \frac{Caudal}{Sección \cdot a_0} \quad (6.1)$$



## **2. Elemento acústico**

El segundo bloque de la interfaz sirve tanto para crear como para modificar los elementos acústicos individualmente. Tendremos que seleccionar la posición en la que está el elemento (1, 2, 3, etc.) y el tipo de elemento que es (Resonador, Cambio de sección, etc.).

En lugar de introducir un elemento predefinido, también existe la opción de introducir una matriz de transferencia arbitraria, esta matriz puede estar expresada en función de la frecuencia sonora en Hz (f).

Una vez seleccionado un tipo de elemento hay que definir sus parámetros (Longitud, Sección, etc.) y pulsar “Actualizar” para que pase a formar parte del sistema acústico.

## **3. Sistema acústico**

En este bloque se definen las secciones de entrada y salida del sistema de conductos en  $\text{cm}^2$  y también se muestran todos los elementos que se han ido creando.

Si se quieren consultar los parámetros de algún elemento se pincha sobre él y en el bloque “Elemento acústico” aparecen sus características; también se pueden modificar los parámetros que sean necesarios y volver a pulsar “Actualizar” para que pase a formar parte del sistema.

## **4. Pérdida de transmisión**

En esta gráfica se muestra la pérdida de transmisión acústica en dB en función de la frecuencia sonora en Hz. Si se quieren ver los resultados cuando se modifica el sistema acústico hay que pulsar “Calcular”.

Se ha elegido un rango de 0 a 60 dB porque una reducción sonora de 60 dB supone un valor muy elevado y es un rango más que suficiente. Según la Figura 2, bajar 60 dB supone, por ejemplo, reducir el sonido de un cortacésped al sonido equivalente de un susurro.

Aunque el método de las matrices de transferencia acústicas sea válido para frecuencias mayores de 1000 Hz si las secciones de los conductos son reducidas (Tabla 1, Tabla 2), el rango de frecuencias elegido va de 0 a 1000 Hz por ser más que suficiente para la mayoría de los casos que se estudian en este campo.

## **5. Eliminar elemento acústico**

Este bloque sirve simplemente para eliminar elementos que se hayan creado, se pueden eliminar individualmente o todos a la vez, depende de si se quiere modificar ligeramente el sistema sustituyendo algún componente o rehacer el sistema por completo.



## **6. Guardar/Cargar archivo**

Aquí se puede guardar o cargar cualquier sistema que se haya creado. El nombre no podrá contener espacios, ej. "Cámara\_de\_expansión".

El programa guardará las variables más relevantes para que se puedan cargar en cualquier sesión posterior. El directorio donde se crea el archivo es el mismo en el que se encuentra el código de la interfaz y la extensión de éste será ".mat", extensión propia de Matlab.

### 6.3. Pseudocódigo

A partir de los datos especificados a través de la interfaz, se crean las matrices de transferencia para cada elemento y se almacenan en diferentes arrays.

Cuando se pulsa el botón “Calcular” el código ejecuta un algoritmo que se puede asemejar al pseudocódigo que se expone a continuación. El código completo se adjunta en el **anexo II**.

**n**: número de orden del elemento del sistema acústico

**f**: Frecuencia en Hz

**M**: Array que contiene las matrices de transferencia acústica para todas las frecuencias de todos los elemento del sistema.

**MG**: Matriz de transferencia global de todo el sistema de conductos.

**PT**: Vector donde se almacenan las pérdidas de transmisión acústica para todas frecuencias.

#### ALGORITMO CALCULAR

**FOR** **f = 0 : 1000** {Bucle desde 0 Hz hasta 1000 Hz}

**MG** =  $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$  {Inicializa la matriz de transferencia global a una matriz identidad}

**FOR** **n = 1 : número de elementos** {Bucle desde el elemento 1 hasta el último elemento para ir multiplicando sucesivamente todas matrices hasta conseguir la matriz global de transferencia para esa frecuencia}

**MG** = **MG** · **M(n,f)**

**END**

**PT(f)** = **función(MG)** {La pérdida de transmisión para una frecuencia es función de la matriz de transferencia global}

**END**

**PLOT** **PT** {Grafica la pérdida de transmisión frente a la frecuencia}

## 7. CASO PRÁCTICO

Para poner en práctica todo lo anteriormente expuesto, tanto los métodos de cálculo como el uso de la interfaz, se va a llevar a cabo una pequeña demostración en la que se va a optimizar el diseño de un silenciador de geometría simple a la salida de un motor de combustión para conseguir una pérdida de transmisión acústica aceptable.

Este elemento tiene el objetivo de amortiguar el ruido que se produciría si la onda mecánica generada cuando se abre la válvula de escape llegase directamente al exterior.

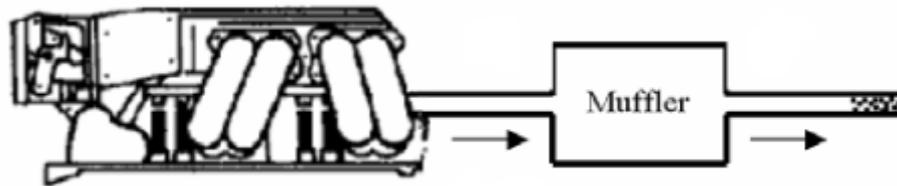


Figura 21. Silenciador a la salida de un motor [8]

Hay infinidad de diseños de silenciadores con mejor o peor eficiencia acústica, pero todos sin excepción, lo que buscan es convertir el flujo pulsante de los gases de escape a un flujo continuo y silencioso. Para ello se utiliza la cualidad de las ondas de reflejarse e interferirse.

El silenciador es una cámara cerrada, con una entrada por donde se introducen los gases del motor y una salida al resto del tubo de escape. Si las dimensiones del silenciador se calculan bien, teniendo en cuenta la velocidad de propagación de las ondas en ese medio, se puede lograr que las ondas reflejadas interactúen con las de entrada interfiriéndolas de modo destructivo, con la consiguiente disminución de la amplitud.

Hay diferentes modos de favorecer el objetivo, como por ejemplo, llenar de perforaciones los tubos interiores para convertir un frente de onda en múltiples ondas (una por cada agujero), que al moverse y reflejarse dentro de la cámara producen un intenso patrón de interferencia. También se llena el espacio interior del silenciador con un material fibroso que absorbe y atenúa las ondas sonoras.

Aunque en los silenciadores reales se utilicen estas geometrías y configuraciones más complejas, en los diseños que se van a proponer solo se van a utilizar los elementos estudiados anteriormente.

En este caso se va a suponer que se tiene un motor alternativo de combustión que genera un sonido caracterizado por un cierto espectro de frecuencias y se quiere atenuar este ruido por medio de un silenciador. Los gases, con propiedades similares a las del aire, llegan al silenciador con una temperatura de unos 300°C y el caudal de gases de escape se supone en torno a 50 litros por segundo ( $0.05 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Se asume que las frecuencias donde el

nivel sonoro es mayor son frecuencias por debajo de 1000 Hz, donde el método de las matrices de transferencia acústica funciona aceptablemente.

Características del flujo de aire		
Temperatura	300	°C
Caudal	0.05	m <sup>3</sup> /s

Figura 22. Introducción de las características del aire en la interfaz

Para dar con una buena solución que consiga atenuar el sonido del motor se van a llevar a cabo modificaciones sobre una cámara de expansión inicial añadiéndole resonadores de diferentes longitudes para ver qué configuración proporciona una mayor atenuación del ruido en las frecuencias de interés.

La cámara de expansión tiene unas dimensiones que se consideran estándar para este tipo de silenciadores. Las longitudes de los resonadores se calculan para que generen pérdidas de transmisión en frecuencias donde la cámara de expansión no sea capaz de conseguirlos. Esta longitud se dimensiona ayudándose de las ecuaciones 4.9 5.1 y 5.2.

Los diseños que se van a comparar van a ser los siguientes:

1. Cámara de expansión
2. Cámara de expansión con resonador extendido en la entrada
3. Cámara de expansión con resonadores extendidos en entrada y salida
4. Cámara de expansión con resonadores invertidos en entrada y salida

Para crear los elementos del resonador utilizaremos tubos de sección circular de aproximadamente 5 cm de diámetro para los conductos pequeños y de 12.5 cm de diámetro para el conducto correspondiente a la cámara de expansión. Para simplificar la presentación de datos, se van a redondear las secciones de los tubos a 20 cm<sup>2</sup> y 120 cm<sup>2</sup> (notar que el dato relevante para estos cálculos es la sección, no el diámetro)

También habrá que comprobar que para este tamaño de conductos es aplicable la teoría de propagación unidimensional de la onda acústica, al menos hasta frecuencias de 1000 Hz.

Usando la ecuación 2.4 obtenemos una velocidad del sonido en el aire es de 479.6 m/s a 300°C. Y usando la Tabla 2 se obtiene que, para nuestro conducto más grande de 12.5 cm de diámetro, el método es válido hasta frecuencias de 2247 Hz.

A continuación se van a definir las 4 configuraciones y al final se analizarán y compararán los resultados obtenidos para las distintas geometrías.

## 7.1. Cámara de expansión

Una simple cámara de expansión en la que haya un aumento de sección a la entrada y una posterior contracción a la salida ya puede atenuar bastante ruido.

Nuestra cámara de expansión tiene la geometría que se muestra a continuación, con  $120 \text{ cm}^2$  de área en su sección central, y  $20 \text{ cm}^2$  en entradas y salidas.

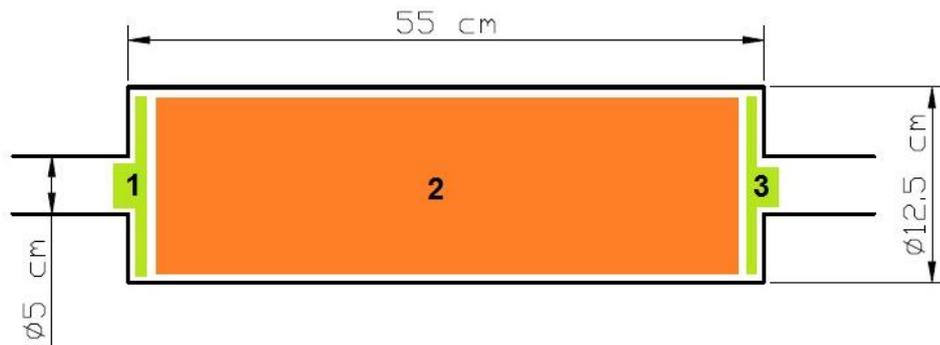


Figura 23. Esquema de la configuración 1

Los elementos que presenta una cámara de expansión son:

1. Cambio de sección a la entrada de  $20 \text{ cm}^2$  a  $120 \text{ cm}^2$
2. Tubo recto de  $120 \text{ cm}^2$
3. Cambio de sección a la salida de  $120 \text{ cm}^2$  a  $20 \text{ cm}^2$

Sistema acústico	
Sección inicial	<input type="text" value="20"/> $\text{cm}^2$
Sección final	<input type="text" value="20"/> $\text{cm}^2$
1	Cambio de sección
2	Tubo recto
3	Cambio de sección

Figura 24. Definición de la configuración 1 mediante la interfaz de entrada de datos

## 7.2. Cámara de expansión con resonador extendido

De las ecuaciones 4.9, 5.1 y 5.2 se deduce que añadiendo un simple resonador extendido con la mitad de la longitud de la cámara de expansión conseguimos obtener mejores resultados, obteniendo picos de pérdida de transmisión donde antes era mínima.

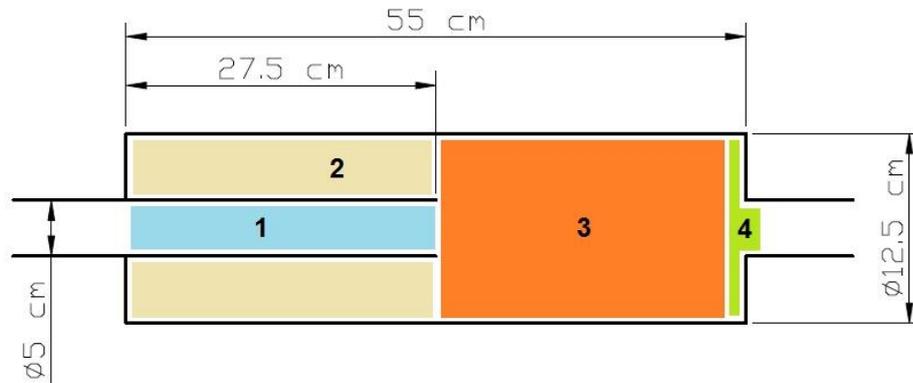


Figura 25. Esquema configuración 2

Los elementos que presenta esta configuración son:

1. Tubo recto de 20 cm<sup>2</sup>
2. Resonador extendido de entrada
3. Tubo recto de 120 cm<sup>2</sup>
4. Cambio de sección a la salida de 120 cm<sup>2</sup> a 20 cm<sup>2</sup>

Sistema acústico			
Sección inicial	<input type="text" value="20"/>	cm <sup>2</sup>	1 Tubo recto
Sección final	<input type="text" value="20"/>	cm <sup>2</sup>	2 Resonador extendido
			3 Tubo recto
			4 Cambio de sección

Figura 26. Introducción de la configuración 2 en la interfaz

### 7.3. Cámara de expansión con 2 resonadores extendidos

Si añadimos un resonador en la salida con una longitud igual a la mitad del instalado en la entrada de la cámara se obtendrá un pico de pérdida de transmisión en frecuencias en las que seguía siendo muy baja.

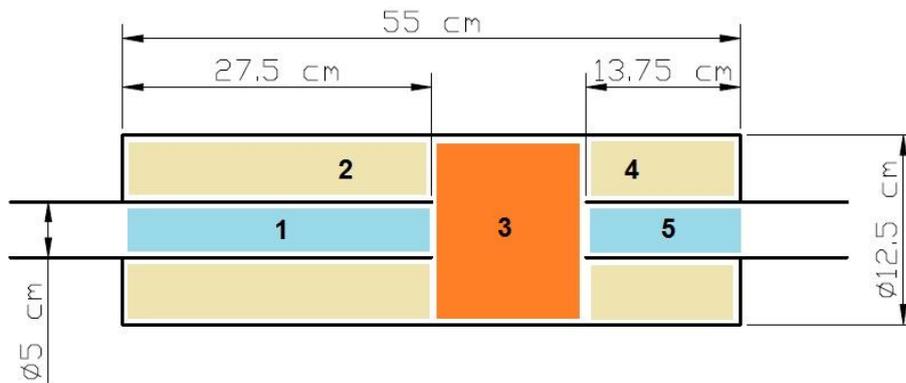


Figura 27. Esquema configuración 3

Los elementos que presenta esta configuración son:

1. Tubo recto de 20 cm<sup>2</sup>
2. Resonador extendido de entrada
3. Tubo recto de 120 cm<sup>2</sup>
4. Resonador extendido de salida
5. Tubo recto de 20 cm<sup>2</sup>

Sistema acústico		
Sección inicial	<input type="text" value="20"/>	cm <sup>2</sup>
Sección final	<input type="text" value="20"/>	cm <sup>2</sup>
1	Tubo recto	
2	Resonador extendido	
3	Tubo recto	
4	Resonador extendido	
5	Tubo recto	

Figura 28. Introducción de la configuración 3 en la interfaz

## 7.4. Cámara de expansión con 2 resonadores invertidos

Si en vez de usar resonadores extendidos se usan resonadores invertidos hacemos que las ondas sonoras tengan que recorrer mayor camino hasta la salida e interfieran más entre sí. Por consiguiente, la pérdida de transmisión acústica también aumentará en cierta medida.

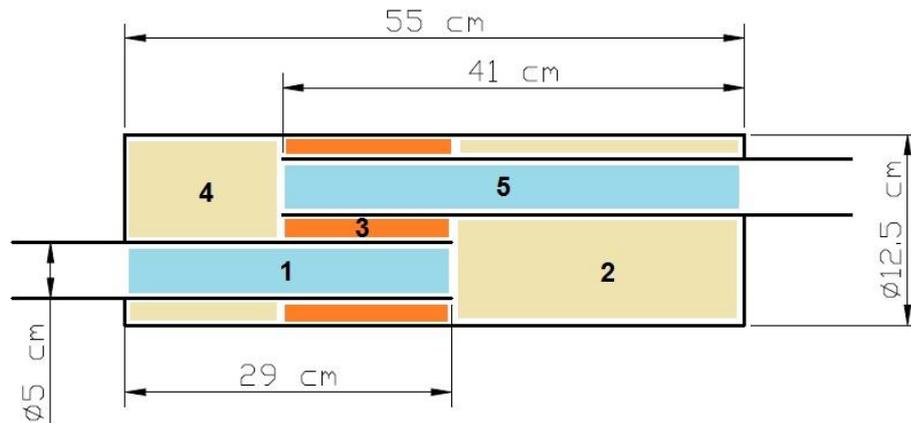


Figura 29. Esquema configuración 4

Los elementos que presenta esta configuración son:

1. Tubo recto de  $20 \text{ cm}^2$
2. Resonador invertido de expansión
3. Tubo recto de  $80 \text{ cm}^2$
4. Resonador invertido de contracción
5. Tubo recto de  $20 \text{ cm}^2$

Sistema acústico		
Sección inicial	<input type="text" value="20"/>	$\text{cm}^2$
Sección final	<input type="text" value="20"/>	$\text{cm}^2$
1	Tubo recto	
2	Resonador invertido	
3	Tubo recto	
4	Resonador invertido	
5	Tubo recto	

Figura 30. Introducción de la configuración 4 en la interfaz

## 7.5. Resultados

Es difícil definir un criterio para saber qué curva de pérdida de transmisión puede ser más favorable. De todas formas, si se quiere actuar sobre un rango de frecuencias muy concreto la mejor curva será la que más pérdida de transmisión presente en torno a esas frecuencias.

Tal y como se ha comentado antes, las frecuencias de interés para estos casos están en el rango de 0-1000 Hz. Así pues, para valorar la eficiencia de los silenciadores de una forma cuantitativa se calcula la media de las pérdidas de transmisión obtenidas para cada diseño.

En la Figura 31 se exponen las curvas de pérdida de transmisión acústica calculadas para las distintas configuraciones explicadas. En el **anexo III** se adjuntan las tablas con todos los valores numéricos de las gráficas

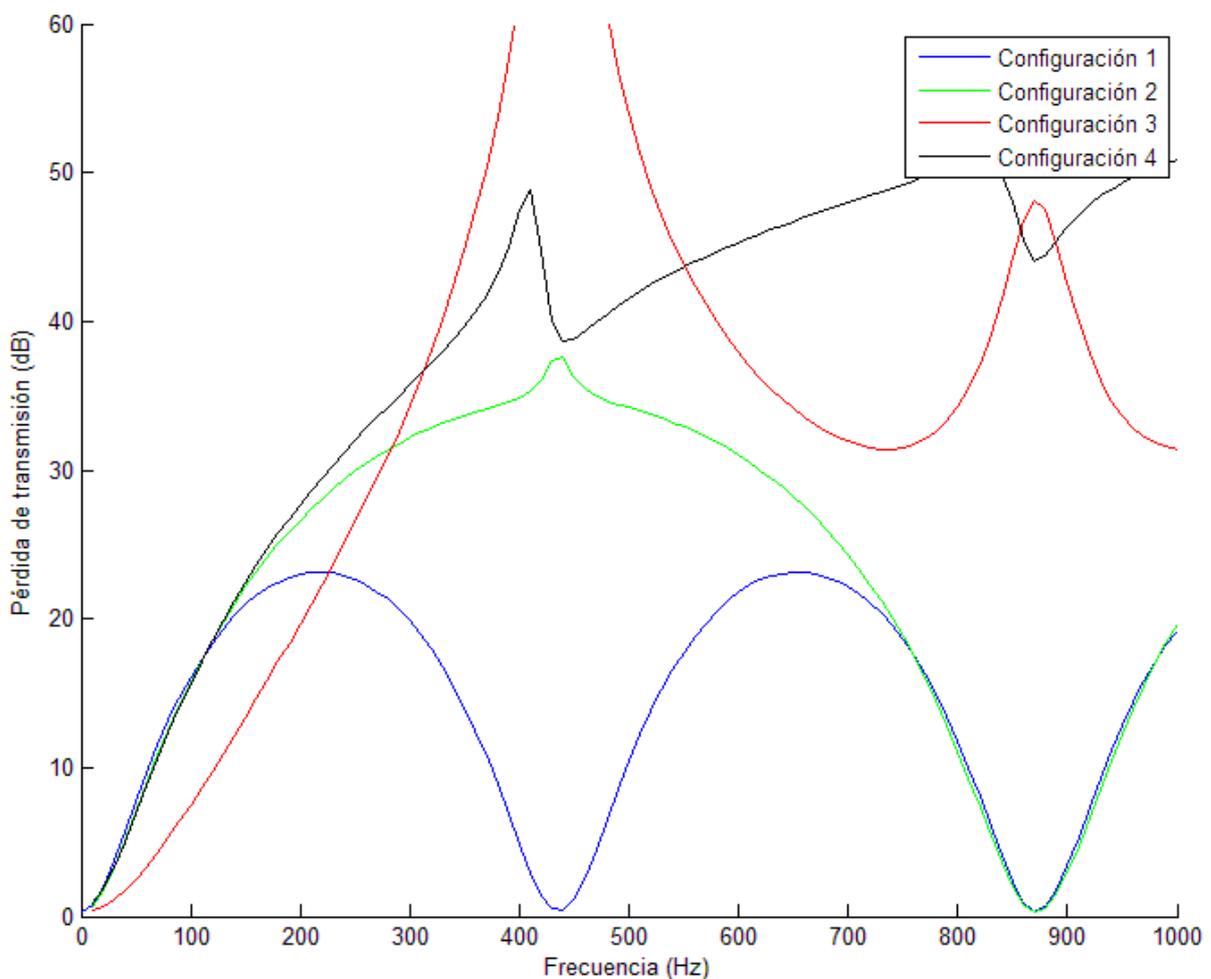


Figura 31. Pérdidas de transmisión acústica para las configuraciones 1, 2, 3 y 4



- Con la cámara de expansión simple (Configuración 1) se consiguen máximos para las frecuencias 220 Hz y 650 Hz; y valores nulos para 0 Hz, 430 Hz y 870 Hz.

$$\overline{\text{Pérdida de Transmisión}} = 14.2 \text{ dB} \quad (7.3)$$

- Con un resonador extendido (Configuración 2) se obtiene un máximo para la frecuencia de 430 Hz; y valores nulos para las frecuencias 0 Hz y 870 Hz.

$$\overline{\text{Pérdida de Transmisión}} = 22.2 \text{ dB} \quad (7.4)$$

- Con dos resonadores extendidos (Configuración 3) se obtienen máximos relativos para las frecuencias 440 Hz y 870 Hz.

$$\overline{\text{Pérdida de Transmisión}} = 34.4 \text{ dB} \quad (7.5)$$

- Con dos resonadores invertidos (Configuración 4) se obtienen máximos relativos para las frecuencias 410 Hz y 820 Hz.

$$\overline{\text{Pérdida de Transmisión}} = 37.8 \text{ dB} \quad (7.6)$$

Se puede observar que el añadir resonadores a una cámara de expansión es bastante beneficioso. Si se calcula bien la longitud del resonador ayudándose de las ecuaciones 4.9, 5.1 y 5.2 se pueden conseguir altas pérdidas para frecuencias en las que la cámara de expansión no conseguía un buen rendimiento.

La cámara de expansión consigue generar los picos de 220Hz y 650Hz; el resonador largo genera el pico de los 430 Hz; y el resonador corto genera el pico de los 870 Hz. Además, se puede ver que al hacer que los resonadores sean invertidos se consigue cubrir un rango mayor de frecuencias de una forma más uniforme, dando lugar a una pérdida de transmisión media más alta.

## 8. CONCLUSIONES

### 8.1. Conclusiones del Proyecto

A la hora de llevar a cabo el proyecto se han consultado múltiples fuentes de información referentes al modelado del sonido en conductos, en artículos de investigación, en libros específicos de acústica y en apuntes de asignaturas.

Con arreglo a las pautas encontradas en estos textos se han establecido las bases del método usado para la simulación acústica. Posteriormente, se ha verificado que el método planteado es correcto comparándolo con resultados de fuentes externas.

Como aportación, se ha diseñado una interfaz gráfica de usuario para poder introducir todos datos de un modelo acústico de forma más rápida y cómoda.

Son varias las ventajas que supone el uso de esta herramienta frente a una programación individual del algoritmo para cada caso a estudiar:

- Se reduce el tiempo necesario para introducir el modelo de conductos.
- Se pueden hacer diferentes modificaciones sobre el sistema creado de forma sencilla.
- No es necesario conocer todas las rutinas y algoritmos que engloba el proceso de cálculo, aunque sí que es recomendable tener unos mínimos conocimientos de acústica en conductos.
- Se pueden guardar y cargar diferentes casos para poder compararlos rápidamente.

Para finalizar, se ha justificado el diseño de un silenciador en base a las respuestas acústicas que se han obtenido mediante la interfaz. Los resultados muestran que si se calculan bien las dimensiones de la cámara de expansión y los resonadores se pueden conseguir grandes pérdidas de transmisión en un amplio rango de frecuencias.

### 8.2. Aporte del Proyecto al autor

La realización del Trabajo Fin de Máster ha sido un reto a la vez que una grata experiencia de aprendizaje. He aprendido a integrar las diferentes competencias adquiridas a lo largo de todo mi paso por la Universidad de Zaragoza en un único trabajo.

Han sido numerosos los imprevistos que han surgido a lo largo de la realización del proyecto, los cuales suelen ocasionar rehacer el trabajo de varios días o darle vueltas a un mismo problema durante un largo periodo hasta poder dar con la solución. Estos imprevistos se debían normalmente a problemas con la programación de código, el no estar familiarizado con códigos informáticos ha sido la mayor dificultad a la que me he enfrentado.



Tanto el aprendizaje, como la documentación y realización del proyecto se ha llevado de una forma continua, para la cual ha sido necesaria una gran organización y gestión del proyecto a nivel general.

En resumen, la realización del presente proyecto me ha aportado una base de conocimientos globales referentes a la acústica, campo que desconocía en gran medida. Además me ha permitido desarrollar competencias transversales como puede ser el manejo de Matlab.

### **8.3. Futuras líneas de investigación**

A continuación se presentan posibles temas relacionados con el objeto del presente proyecto, sobre los cuales se ha realizado una labor de investigación y análisis, y podrían aportar mejoras significativas en cuanto al funcionamiento y capacidades del programa.

- El código de la interfaz gráfica no es muy robusto, genera algún error si no se sabe lo que se está haciendo, se podría intentar mejorar este aspecto y crear algún tipo de advertencia cuando se produzca un error.
- De momento sólo se pueden hacer cálculos en aire, se podría estudiar la viabilidad y utilidad de incorporar nuevos fluidos.
- Incorporación a la interfaz de una ventana con diagramas de bloques que representen el sistema de conductos, algo más intuitivo que las tablas que hay ahora.
- Estudio e incorporación a la interfaz de elementos acústicos más complejos y avanzados como pueden ser tubos perforados o con material absorbente.

Finalmente se podría estudiar la viabilidad del proyecto como herramienta docente, ya que muchos de los análisis y cálculos realizados podrían estudiarse en un hipotético tema de acústica, como parte de la formación de Grado o Máster en Ingeniería.



## 9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] **Allan D. Pierce**, Acoustics: an Introduction to Its Physical Principles and Applications (1989)
- [2] **M.L. Munjal**, Acoustics of Ducts and Mufflers: With application to exhaust and ventilation system design (1987)
- [3] <https://es.wikipedia.org/wiki/Decibelio>
- [4] <http://es.slideshare.net/JMCGTAN/resonadores-de-helmholtz>
- [5] **T.Y. Lung and A.G.Doige**, A time-averaging transient testing method for acoustic properties of piping systems and mufflers with flow, 867-876, (1983)
- [6] **F.C Karal**, The analogous impedance for discontinuities and constrictions of circular cross section, 327-334 (1953)
- [7] **S. N.Y. Gerges; R. Jordan; F. A. Thiemell; J. L. Bento Coelho; J. P. Arenas**, Muffler modeling by transfer matrix method and experimental verification, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering (2005)
- [8] **Finn Jacobsen**, Propagation of sound waves in ducts, 33 (2011)
- [9] **N.K. Vijayasree; M.L. Munjal** On an Integrated Transfer Matrix method for multiply connected mufflers, Journal of Sound and Vibration (2011)



## **ANEXO I. ANÁLISIS DE SOFTWARES COMERCIALES**



## 1. SIDLAB

Este software modela la generación y propagación del sonido de baja frecuencia en los sistemas de conductos complejos. El rango de frecuencia se limita a la región de onda plana en los tubos conectados. Se basa en la teoría acústica lineal y todos los elementos, por ejemplo, un silenciador complejo, se reducen a dos puertos, mientras que las terminaciones y las fuentes se representan como un puerto. Están disponibles un gran número de elementos estándar que representan conductos comunes y diferentes elementos de tuberías como silenciadores. Todos los modelos de los elementos estándar se validan y se basan en las mejores y más recientes publicaciones e investigaciones. Los usuarios tienen la posibilidad de añadir sus propios elementos como elementos definidos por el usuario.

### **SIDLAB calcula:**

- Pérdida de transmisión y pérdida de inserción en dB
- Resonancias del sistema.
- Los elementos de las matrices de transferencia cada elemento y para el sistema completo.
- Presión acústica y fase en cada nodo de la red.
- Intercambio potencia de sonido en cada nodo.
- Presión acústica fuera del sistema para una posición de receptor predefinida.
- Matriz de transferencia entre cualquier par de nodos en el sistema.

### **Capacidades de SIDLAB**

- Trabaja con diferentes sistemas de unidades para definir las dimensiones de la red: m, mm y pulgadas.
- Guarda diferentes versiones de un diseño en el mismo proyecto.
- El medio fluido puede ser un gas perfecto o un líquido. Disponible biblioteca editable de líquidos comunes.
- Diferentes formas de manipular los resultados y exportarlos a diferentes formatos.
- SIDLAB Acoustics cálculos especiales
- Optimización del rendimiento del sistema para un rango de frecuencias utilizando cualquier número de variables. Posibilidad de incluir la caída de presión permisible como una restricción.
- Análisis paramétrico variando el valor de este parámetro dentro de un rango específico. Los resultados se muestran para todos los valores del parámetro de forma simultánea.



### Elementos estándar de dos puertos

- Tubería circular (puede ser rellena con material poroso)
- Conducto (sección transversal rectangular)
- Difusor, circular y rectangular
- Resonador de cuarto de onda (puede ser llenado con material poroso)
- Resonador de Helmholtz
- Catalizador
- Filtro de Partículas Diesel
- Forrado de conductos (con material poroso)
- Expansión y contracción súbita del Área
- Cámara de expansión
- Orificio
- Elemento de parámetros agrupados
- Unión en ángulo, circular y rectangular
- Tapas de entrada y de salida
- Matriz de transferencia definida por el usuario en función de la frecuencia

### Elementos estándar de un puerto

- Final abierto.
- Impedancia constante.
- Final sin reflexión.
- Impedancia del motor de combustión.
- Impedancia definida por el usuario en función de la frecuencia.

### Fuentes estándar

- Fuente de presión constante.
- Motor de combustión.
- Fuente de presión definida por el usuario en función de la frecuencia.

### Elementos estándar multi-puerto

- Elemento perforado de cuatro puertos.
- Elemento perforado de seis puertos.
- Elemento perforado de ocho puertos.

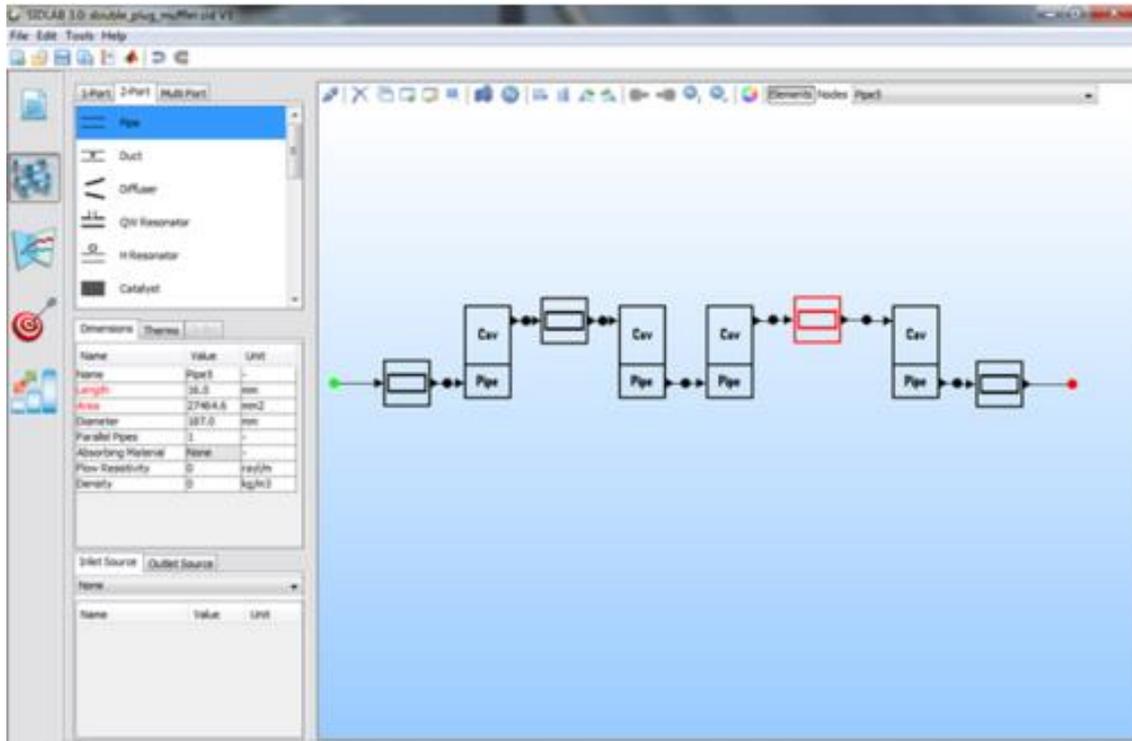


Figura 32. Entorno de modelado en la interfaz de SIDLAB

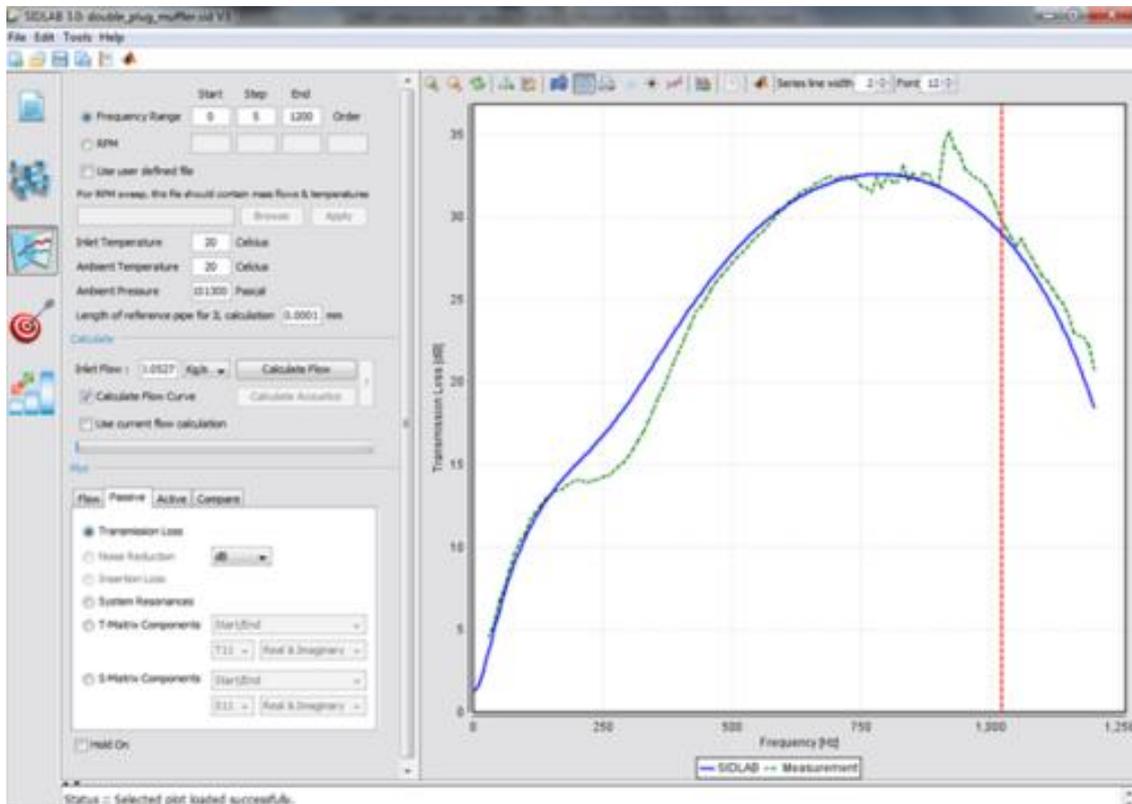


Figura 33. Entorno de cálculo de pérdida de transmisión acústica en la interfaz de SIDLAB



## 2. WAVE

WAVE es un software enfocado hacia la predicción acústica del ruido de admisión y escape. Permite desarrollar un sistema de escape más rentable o la creación de un sonido de escape a medida.

WAVE puede simular ensayos de sonido con y sin flujo de paso por el sistema, permite determinar la ubicación de admisión, escape, resonancias y, lo más importante, la predicción simultánea tanto el rendimiento del motor y el nivel de presión sonora.

Este software apenas trabaja con acústica unidimensional, está optimizado para simulaciones 3D, y por lo tanto, también tiene un sencillo entorno de modelado de sólidos y mallado.

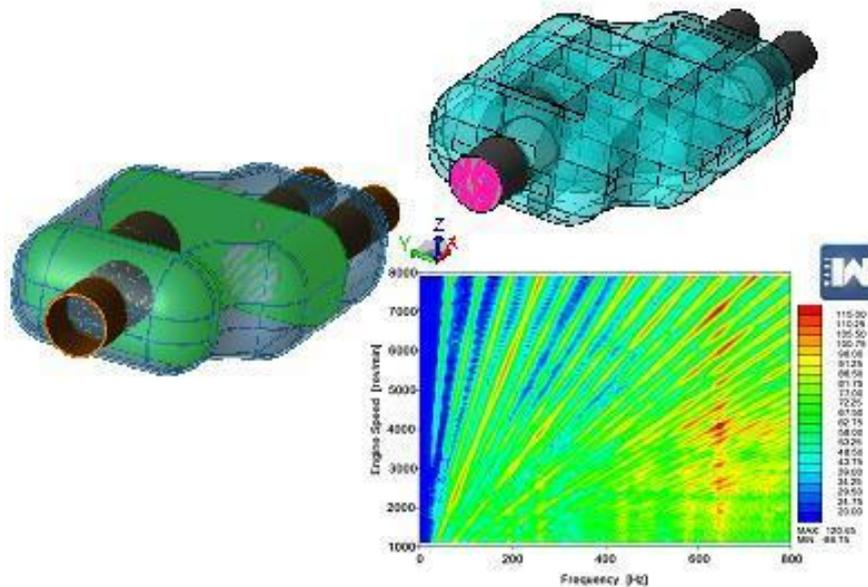


Figura 34. Modelado y resultados en WAVE

# k-Wave

## 3. k-Wave

k-Wave es un software de código libre que trabaja conjuntamente con MATLAB y C ++. Está desarrollado por Bradley Treeby y Ben Cox (University College London) y Jiri Jaros (Universidad Tecnológica de Brno). El software está diseñado para simulaciones acústicas en el dominio del tiempo y de ultrasonidos en medios complejos y realistas. Las funciones de simulación se basan en el método pseudospectral y son a la vez rápidas y fáciles de usar. Esta herramienta incluye:

- Modelado de la propagación de ondas acústicas en el dominio de tiempo que tiene en cuenta la no linealidad, las heterogeneidades acústicas, y la absorción de potencia acústica (1D, 2D y 3D ).
- Posibilidad de modelar fuentes de presión y velocidad, incluyendo fuentes fotoacústicas y transductores de ultrasonidos, tanto de diagnóstico como terapéuticos.
- Posibilidad de especificar arbitrariamente las superficies de detección, con opciones de registrar la presión acústica, velocidad de las partículas, y la intensidad acústica.
- Una versión optimizada C ++ del código que maximiza el rendimiento computacional para grandes simulaciones.
- Generación de imágenes fotoacústicas a partir de los datos grabados en los análisis 1D, 2D y 3D.
- Parámetros de entrada opcionales para ajustar la visualización y el rendimiento, incluyendo opciones para generar películas y ejecutar las simulaciones en una unidad de procesamiento de gráficos (GPU)
- Un extenso manual de usuario y muchos ejemplos en tutoriales que muestran las capacidades de k-Wave.

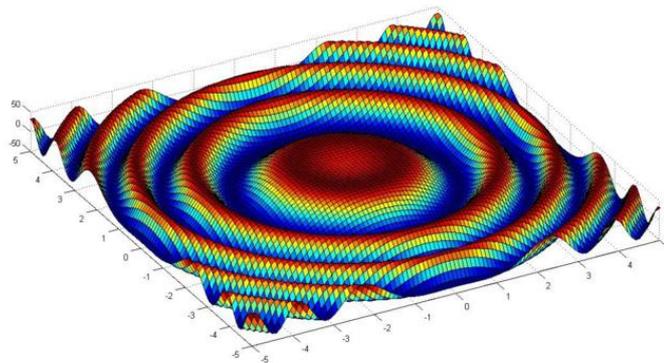


Figura 35. Resultados en k-Wave



#### 4. I-Simpa

I-Simpa es un software de licencia libre desarrollado para modelar la propagación del sonido en dominios geométricos complejos. Aunque I-Simpa está adaptado para los modelos energéticos se puede extender a enfoques ondulatorios.

I-Simpa no es un software de cálculo, es un pre y post-procesador para códigos acústicos. Los códigos numéricos deben añadirse con el fin de obtener un sistema completamente funcional. En la actualidad, I-Simpa se entrega con dos códigos (TCR basado en la teoría clásica de la reverberación y SPPS basada en el enfoque de las partículas de rastreo).

Aplicaciones clásicas son la acústica en recintos cerrados y construcciones, el ruido ambiental y el ruido industrial, pero se puede extender fácilmente a otras aplicaciones relacionadas con la propagación del sonido en entornos 3D (interior de vehículos, sonidos en cavidades...)

I-Simpa se ha desarrollado inicialmente como una herramienta de investigación, pero también puede ser una herramienta muy eficiente para un uso profesional o comercial, así como para la educación.

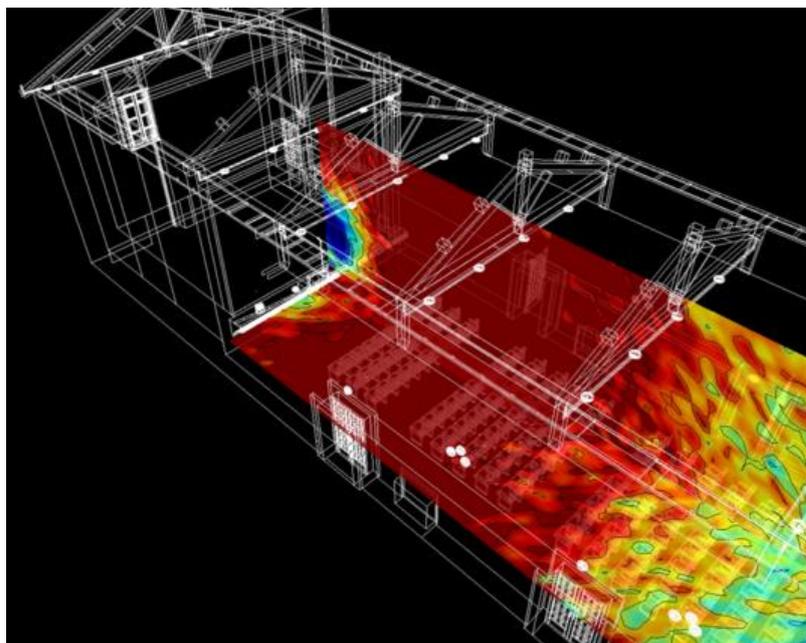


Figura 36. Resultados de nivel sonoro para una sala de eventos



## 5. Actran

Actran se apoya en la teoría de los elementos finitos para modelar sistemas acústicos 3D. Es fácil de acoplar con los códigos de análisis de elementos finitos estructurales, ayudando a resolver la interacción acoplada entre las estructuras y fluidos.

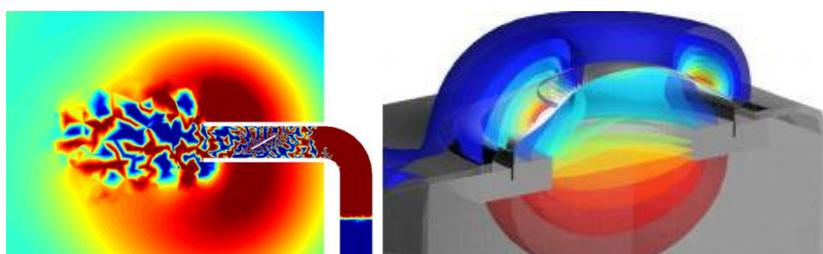
Actran se utiliza para diferentes tipos de modelado acústico:

- Acústica estándar y convectiva.
- Análisis acústico interior y exterior de vehículos.
- Transmisión acústica a través de paredes flexibles.
- Predicción de absorción acústica por un medio poroso.
- Análisis 2D, de revolución y 3D.
- Mecanismos de disipación, pérdidas visco-térmicas y absorción acústica.
- Propagación acústica y radiación en flujos de fluidos.
- Heterogeneidades tales como flujos complejos y los gradientes de temperatura
- Análisis armónico básico
- Fuentes de ondas planas, esféricas, cilíndricas.
- Método de Galerkin discontinuo
- CFD combinado con radiación acústica

Usos industriales

- Aeroespacial: Transmisión del sonido a través del fuselaje, forros del motor, aislamiento de la cabina, entrada y salida de los silenciadores, ruido generado en las aspas de helicópteros, sónares.
- Automoción: Diseño de unidades de potencia, ruido del viento, componentes de motores, compresores, colectores de admisión, filtros del aire, altavoces, silenciadores, ruido de los neumáticos, conductos de distribución de alta presión.
- Bienes de consumo: teléfonos, manos libres, auriculares, altavoces, audífonos, instrumentos musicales, lavadoras, refrigeradores, aspiradoras.
- Electrónica: Móviles, cámaras, ventiladores de proyectores LCD.
- Maquinaria: Turbomaquinaria, HVAC, cortadoras de césped y máquinas agrícolas, sistemas de escape.

Figura 37. Resultados en Actran





## 6. COMSOL

El módulo acústico de COMSOL presenta unas interfaces de usuario sencillas que proporcionan herramientas para el modelado de la propagación de ondas de presión acústica en el aire, el agua y otros líquidos. Las herramientas de modelado permiten la simulación precisa de altavoces y micrófonos en diferentes dispositivos. También se pueden modelar vibraciones y ondas elásticas en sólidos, materiales piezoeléctricos y estructuras poroelásticas.

Permite crear simulaciones realistas en 1D, 2D, simetría axial 2D o 3D.

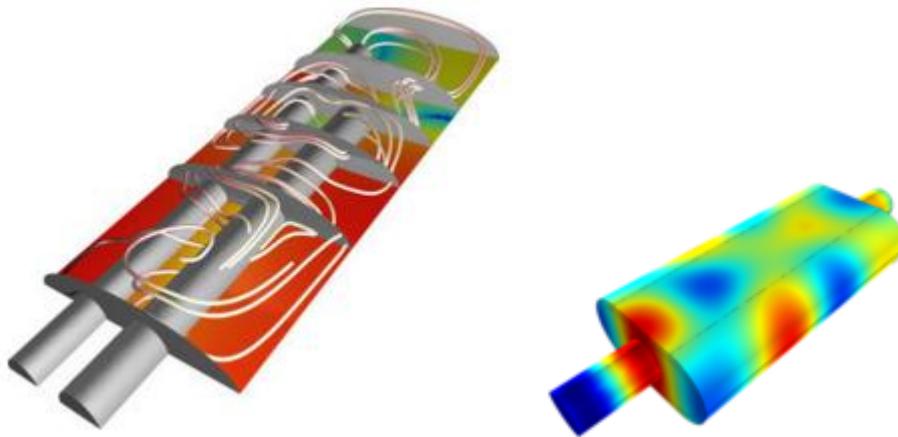


Figura 38. Diseño de silenciadores en COMSOL



## **ANEXO II. RUTINAS Y CÓDIGO EN MATLAB**



A continuación se muestra el código y las rutinas de cálculo que se ha programado para la interfaz gráfica de usuario en Matlab.

```
% INTERFAZ ACUSTICA MATLAB

% Las primeras lineas son codigo interno del programa que se autogenera al
% crear la interfaz grafica en el entorno de programacion GUIDE.
% NO SE DEBE TOCAR PARA QUE TODO SIGA FUNCIONANDO

function varargout = Interfaz_acustica(varargin)
% INTERFAZ_ACUSTICA MATLAB code for Interfaz_acustica.fig
%   INTERFAZ_ACUSTICA, by itself, creates a new INTERFAZ_ACUSTICA or
%   raises the existing
%   singleton*.
%
%   H = INTERFAZ_ACUSTICA returns the handle to a new INTERFAZ_ACUSTICA
%   or the handle to
%   the existing singleton*.
%
%   INTERFAZ_ACUSTICA('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls
%   the local
%   function named CALLBACK in INTERFAZ_ACUSTICA.M with the given input
%   arguments.
%
%   INTERFAZ_ACUSTICA('Property','Value',...) creates a new
%   INTERFAZ_ACUSTICA or raises the
%   existing singleton*. Starting from the left, property value pairs
%   are
%   applied to the GUI before Interfaz_acustica_OpeningFcn gets called.
%   An
%   unrecognized property name or invalid value makes property
%   application
%   stop. All inputs are passed to Interfaz_acustica_OpeningFcn via
%   varargin.
%
%   *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
%   instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help Interfaz_acustica

% Last Modified by GUIDE v2.5 27-Feb-2016 14:47:42

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
    'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
    'gui_OpeningFcn', @Interfaz_acustica_OpeningFcn, ...
    'gui_OutputFcn',  @Interfaz_acustica_OutputFcn, ...
    'gui_LayoutFcn',  [] , ...
    'gui_Callback',   []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
```





```
% Utiliza bastantes variables globales, entre ellas parámetros que coge de
% los textos editables de la interfaz: caudal, temperatura y secciones
% iniciales y final del sistema de conductos.
% La velocidad del sonido en el aire es calculada a partir de la
% temperatura introducida y las impedancias Y0 Yn son calculadas a partir
% de la velocidad del sonido y de las secciones.
% Una vez que se tienen estos parametros fijados se procede a ejecutar el
% algoritmo que calcula la perdida de transmision acustica.
% Un bucle que recorre las frecuencias desde 0 Hz hasta 1000 Hz
% en saltos de 10 Hz y va guardando en un vector los valores de la perdida
% de transmision
% La perdida de transmision para cada frecuencia se calcula a partir de los
% elementos de la matriz de transferencia global para el sistema.
% La matriz de transferencia global se calcula mediante otro bucle que va
% multiplicando sucesivamente las matrices de transferencia de cada
% elemento hasta llegar al ultimo.
% Finalmente se dibujan los valores de la perdida de transmision en la
% grafica
```

```
% --- Executes on button press in pushbutton1.
```

```
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
% hObject handle to pushbutton1 (see GCBO)
```

```
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
```

```
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
```

```
global caudal T f TL Temperatura seccion_inicial seccion_final;
```

```
Temperatura=str2double(get(handles.edit1, 'String'));
```

```
a=331*((Temperatura+273)/273)^(1/2);
```

```
caudal=str2double(get(handles.edit2, 'String'));
```

```
seccion_inicial=str2double(get(handles.edit8, 'String'))/10000;
```

```
Y0=a/seccion_inicial;
```

```
seccion_final=str2double(get(handles.edit9, 'String'))/10000;
```

```
Yn=a/seccion_final;
```

```
for n=1:101;
```

```
    f=10*(n-1);
```

```
    TM=eval(T(:, :, 1));
```

```
    for m=2:size(T, 3);
```

```
        TM=TM*eval(T(:, :, m));
```

```
    end
```

```
TL(n)=20*log((Yn/Y0)^(1/2)*abs(TM(1,1)+TM(1,2)/Yn+TM(2,1)*Y0+(Y0/Yn)*TM(2,2)))/2;
```

```
end
```

```
Frecuencia=0:10:1000;
```

```
plot(Frecuencia, TL)
```

```
axis([0 1000 0 60])
```

```
xlabel({'Frecuencia (Hz)'})
```

```
ylabel({'Pérdida de transmisión (dB)'})
```

```
% Esta parte del codigo se ejecuta cuando seleccionamos una de las
% diferentes opciones del menu de elementos acusticos.
% Dependiendo del que seleccionemos se muestra en la tabla de parametros
% del elemento unos campos u otros.
```

```
% --- Executes on selection change in popupmenu1.
```

```
function popupmenu1_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
% hObject handle to popupmenu1 (see GCBO)
```

```
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
```

```
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
```





```
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
global T f Sistema caudal a Parametros_sistema;
n=str2double(get(handles.edit3, 'String'));
if ~isnan(n)
    seleccion=get(handles.popupmenu1, 'Value');
    switch seleccion;
        case 1; %Tubo recto
            clearvars f caudal a;
            syms f;
            syms caudal;
            syms a;
            Parametros_sistema(:, :, n)=get(handles.uitable5, 'data');
            l=str2double(Parametros_sistema(1,2,n))/100;
            seccion=str2double(Parametros_sistema(2,2,n))/10000;
            Y=a/seccion;
            M=caudal/(seccion*a);
            k=2*pi*f/(a*(1-M^2));
            T(:, :, n)=exp(-
1j*M*k*l)*[cos(k*l), 1j*Y*sin(k*l); 1j/Y*sin(k*l), cos(k*l)];
            Sistema(n) = {'Tubo recto'};
            set(handles.uitable3, 'data', Sistema);
        case 2; %Cambio de sección
            clearvars f caudal a;
            syms f;
            syms caudal;
            syms a;
            Parametros_sistema(:, :, n)=get(handles.uitable5, 'data');
            if
str2double(Parametros_sistema(1,2,n))<str2double(Parametros_sistema(2,2,n))
                S3=str2double(Parametros_sistema(1,2,n))/10000;
                S1=str2double(Parametros_sistema(2,2,n))/10000;
                K=((S1/S3)-1)^2;
            else
                S1=str2double(Parametros_sistema(1,2,n))/10000;
                S3=str2double(Parametros_sistema(2,2,n))/10000;
                K=(1-S1/S3)/2;
            end
            Y1=a/S1;
            M1=caudal/(S1*a);
            T(:, :, n)=eval([1, K*M1*Y1; 0, 1]);
            Sistema(n) = {'Cambio de sección'};
            set(handles.uitable3, 'data', Sistema);
        case 3; %Resonador de Helmholtz
            clearvars f caudal a;
            syms f;
            syms caudal;
            syms a;
            Parametros_sistema(:, :, n)=get(handles.uitable5, 'data');
            l=str2double(Parametros_sistema(1,2,n))/100;
            S=str2double(Parametros_sistema(2,2,n))/10000;
            V=str2double(Parametros_sistema(3,2,n))/1000000;
            leq=l+0.001+1.7*(S/pi)^(1/2);
            Z=1j*(2*pi*f*leq/S-a^2/(2*pi*f*V))+(2*pi*f)^2/(pi*a);
            T(:, :, n)=[1, 0; 1/Z, 1];
            Sistema(n) = {'Resonador de Helmholtz'};
            set(handles.uitable3, 'data', Sistema);
        case 4; %Resonador extendido
```



```
clearvars f caudal a;
syms f;
syms caudal;
syms a;
Parametros_sistema(:, :, n)=get(handles.uitable5, 'data');
if
str2double(Parametros_sistema(1,2,n))<str2double(Parametros_sistema(2,2,n))
    S3=str2double(Parametros_sistema(1,2,n))/10000;
    S1=str2double(Parametros_sistema(2,2,n))/10000;
    S2=S1-S3;
    C1=-1;
    C2=1;
    K=((S1/S3)-1)^2;
else
    S1=str2double(Parametros_sistema(1,2,n))/10000;
    S3=str2double(Parametros_sistema(2,2,n))/10000;
    S2=S3-S1;
    C1=-1;
    C2=-1;
    K=(1-S1/S3)/2;
end
Y1=a/S1;
Y2=a/S2;
Y3=a/S3;
M1=caudal/(S1*a);
M3=caudal/(S3*a);
k=2*pi*f/a;
l=str2double(Parametros_sistema(3,2,n))/100;
Z2=-lj*Y2*cot(k*l);
T(:, :, n)=eval([1, K*M1*Y1; C2*S2/(C2*S2*Z2+S3*M3*Y3), (C2*S2*Z2-
M1*Y1*(C1*S1+K*S3))/(C2*S2*Z2+S3*M3*Y3)]);
Sistema(n) = {'Resonador extendido'};
set(handles.uitable3, 'data', Sistema');
case 5; %Resonador invertido
clearvars f caudal a;
syms f;
syms caudal;
syms a;
Parametros_sistema(:, :, n)=get(handles.uitable5, 'data');
if
str2double(Parametros_sistema(1,2,n))<str2double(Parametros_sistema(2,2,n))
    S3=str2double(Parametros_sistema(1,2,n))/10000;
    S1=str2double(Parametros_sistema(2,2,n))/10000;
    S2=S1+S3;
    C1=1;
    C2=-1;
    K=(S1/S3)^2;
else
    S1=str2double(Parametros_sistema(1,2,n))/10000;
    S3=str2double(Parametros_sistema(2,2,n))/10000;
    S2=S3+S1;
    C1=1;
    C2=-1;
    K=0.5;
end
Y1=a/S1;
Y2=a/S2;
Y3=a/S3;
M1=caudal/(S1*a);
M3=caudal/(S3*a);
```





```
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit2 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit2 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton3.
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton3 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% --- Executes when entered data in editable cell(s) in uitable3.
function uitable3_CellEditCallback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to uitable3 (see GCBO)
% eventdata structure with the following fields (see UITABLE)
% Indices: row and column indices of the cell(s) edited
% PreviousData: previous data for the cell(s) edited
% EditData: string(s) entered by the user
% NewData: EditData or its converted form set on the Data property. Empty
if Data was not changed
% Error: error string when failed to convert EditData to appropriate
value for Data
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% --- Executes when selected cell(s) is changed in uitable4.
function uitable4_CellSelectionCallback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to uitable4 (see GCBO)
% eventdata structure with the following fields (see UITABLE)
% Indices: row and column indices of the cell(s) currently selected
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

function edit3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit3 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit3 as text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit3 as a
double
```



```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes when entered data in editable cell(s) in uitable5.
function uitable5_CellEditCallback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to uitable5 (see GCBO)
% eventdata  structure with the following fields (see UITABLE)
%   Indices: row and column indices of the cell(s) edited
%   PreviousData: previous data for the cell(s) edited
%   EditData: string(s) entered by the user
%   NewData: EditData or its converted form set on the Data property. Empty
if Data was not changed
%   Error: error string when failed to convert EditData to appropriate
value for Data
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% --- Executes when selected cell(s) is changed in uitable5.
function uitable5_CellSelectionCallback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to uitable5 (see GCBO)
% eventdata  structure with the following fields (see UITABLE)
%   Indices: row and column indices of the cell(s) currently selecteds
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

function edit7_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit7 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit7 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit7 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit7_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit7 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
```





```
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit9 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit9 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit9_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit9 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit10_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit10 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit10 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit10 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit10_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit10 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% Esta parte del codigo carga un archivo .mat en el que se encuentran
% diferentes tipos de variables que se han podido guardar en alguna sesion
% anterior.
% Dibuja la grafica y muestra todas las tablas.

% --- Executes on button press in pushbutton6.
function pushbutton6_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton6 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
global T Sistema Parametros_sistema caudal TL Temperatura seccion_inicial
seccion_final;
load(strcat(get(handles.edit10,'String'),'.mat'));
Frecuencia=0:10:1000;
```







## **ANEXO III. TABLAS DE RESULTADOS**

## 1. Cámara de expansión

En la Tabla 4 se muestran los resultados de pérdidas de transmisión para la cámara de expansión.

		Cámara de expansión									
Frec (Hz)		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
P.T. (dB)		0	1	2	4	6	8	10	11	13	15
Frec (Hz)		100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
P.T. (dB)		16	17	18	19	20	21	22	22	22	23
Frec (Hz)		200	210	220	230	240	250	260	270	280	290
P.T. (dB)		23	23	23	23	23	23	22	22	21	21
Frec (Hz)		300	310	320	330	340	350	360	370	380	390
P.T. (dB)		20	19	18	17	16	14	13	11	9	7
Frec (Hz)		400	410	420	430	440	450	460	470	480	490
P.T. (dB)		5	3	1	0	0	1	3	5	7	9
Frec (Hz)		500	510	520	530	540	550	560	570	580	590
P.T. (dB)		10	12	14	15	17	18	19	20	21	21
Frec (Hz)		600	610	620	630	640	650	660	670	680	690
P.T. (dB)		22	22	23	23	23	23	23	23	23	23
Frec (Hz)		700	710	720	730	740	750	760	770	780	790
P.T. (dB)		22	22	21	20	20	19	18	16	15	13
Frec (Hz)		800	810	820	830	840	850	860	870	880	890
P.T. (dB)		12	10	8	6	4	2	1	0	1	2
Frec (Hz)		900	910	920	930	940	950	960	970	980	990
P.T. (dB)		3	5	7	9	11	13	14	16	17	18

Tabla 4. Valores de pérdida de transmisión en dB para la cámara de expansión



## 2. Cámara de expansión con resonador extendido

En la Tabla 5 se muestran los resultados de pérdidas de transmisión para la cámara de expansión con resonador extendido.

Cámara de expansión con resonador extendido										
Frec (Hz)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
P.T. (dB)	0	1	2	3	5	7	9	11	13	14
Frec (Hz)	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
P.T. (dB)	16	17	19	20	21	22	23	24	25	26
Frec (Hz)	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290
P.T. (dB)	27	27	28	29	29	30	30	31	31	32
Frec (Hz)	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390
P.T. (dB)	32	33	33	33	33	34	34	34	34	35
Frec (Hz)	400	410	420	430	440	450	460	470	480	490
P.T. (dB)	35	35	36	37	38	36	35	35	35	34
Frec (Hz)	500	510	520	530	540	550	560	570	580	590
P.T. (dB)	34	34	34	33	33	33	33	32	32	31
Frec (Hz)	600	610	620	630	640	650	660	670	680	690
P.T. (dB)	31	31	30	29	29	28	28	27	26	25
Frec (Hz)	700	710	720	730	740	750	760	770	780	790
P.T. (dB)	24	23	22	21	20	19	17	16	14	13
Frec (Hz)	800	810	820	830	840	850	860	870	880	890
P.T. (dB)	11	9	7	5	4	2	1	0	1	1
Frec (Hz)	900	910	920	930	940	950	960	970	980	990
P.T. (dB)	3	5	7	9	10	12	14	15	17	18

Tabla 5. Valores de pérdida de transmisión en dB para la cámara de expansión con resonador extendido

### 3. Cámara de expansión con 2 resonadores extendidos

En la Tabla 6 se muestran los resultados de pérdidas de transmisión para la cámara de expansión con 2 resonadores extendidos.

Cámara de expansión con 2 resonadores extendidos										
Frec (Hz)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
P.T. (dB)	0	0	1	1	2	2	3	4	5	6
Frec (Hz)	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
P.T. (dB)	7	9	10	11	12	13	15	16	17	18
Frec (Hz)	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290
P.T. (dB)	20	21	22	24	25	26	28	29	31	33
Frec (Hz)	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390
P.T. (dB)	34	36	38	40	42	45	47	50	54	58
Frec (Hz)	400	410	420	430	440	450	460	470	480	490
P.T. (dB)	62	68	74	81	82	76	70	65	60	57
Frec (Hz)	500	510	520	530	540	550	560	570	580	590
P.T. (dB)	54	51	49	47	45	44	42	41	40	39
Frec (Hz)	600	610	620	630	640	650	660	670	680	690
P.T. (dB)	38	37	36	35	35	34	34	33	33	32
Frec (Hz)	700	710	720	730	740	750	760	770	780	790
P.T. (dB)	32	32	31	31	31	31	32	32	33	33
Frec (Hz)	800	810	820	830	840	850	860	870	880	890
P.T. (dB)	34	35	37	39	42	44	47	48	47	45
Frec (Hz)	900	910	920	930	940	950	960	970	980	990
P.T. (dB)	43	40	38	36	35	34	33	32	32	32

Tabla 6. Valores de pérdida de transmisión en dB para la cámara de expansión con 2 resonadores extendidos

### 3. Cámara de expansión con 2 resonadores invertidos

En la Tabla 6 se muestran los resultados de pérdidas de transmisión para la cámara de expansión con 2 resonadores invertidos.

Cámara de expansión con 2 resonadores invertidos										
Frec (Hz)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
P.T. (dB)	0	1	2	3	5	7	9	11	12	14
Frec (Hz)	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
P.T. (dB)	16	17	19	20	21	22	24	25	26	27
Frec (Hz)	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290
P.T. (dB)	28	29	29	30	31	32	33	34	34	35
Frec (Hz)	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390
P.T. (dB)	36	36	37	38	39	40	41	42	43	45
Frec (Hz)	400	410	420	430	440	450	460	470	480	490
P.T. (dB)	47	49	45	40	39	39	39	40	40	41
Frec (Hz)	500	510	520	530	540	550	560	570	580	590
P.T. (dB)	42	42	42	43	43	44	44	44	45	45
Frec (Hz)	600	610	620	630	640	650	660	670	680	690
P.T. (dB)	45	46	46	46	46	47	47	47	47	48
Frec (Hz)	700	710	720	730	740	750	760	770	780	790
P.T. (dB)	48	48	48	49	49	49	49	50	50	50
Frec (Hz)	800	810	820	830	840	850	860	870	880	890
P.T. (dB)	50	51	51	51	50	48	46	44	44	45
Frec (Hz)	900	910	920	930	940	950	960	970	980	990
P.T. (dB)	46	47	48	48	49	49	50	50	50	51

Tabla 7. Valores de pérdida de transmisión en dB para la cámara de expansión con 2 resonadores invertidos