



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Modelado numérico de la respuesta acústica de silenciadores de escape

Grado en Ingeniería Mecánica (GIM)



Alumna: Blanca Elena Pérez Cariñena

Tutora: Ana María Pedrosa Sánchez

Valencia. Septiembre de 2017

A mi madre.

Agradecimientos

Primero de todo quería agradecerle a mi tutora Ana todo su esfuerzo y la paciencia que ha tenido conmigo, se que no podría haber tenido una tutora mejor. Asimismo, agradecerle a José Antón, el alumno que está realizando el TFM y que me ha proporcionado los datos experimentales.

También quiero agradecerse a mi familia, por todo el apoyo recibido durante la carrera a pesar de la distancia. Sobre todo a mi padre, por venir hasta Valencia siempre que le he necesitado durante la carrera y darme ánimos, y a mi madre, ya que solo he seguido por ella. A mis compañeros de la carrera, sobre todo a Joan y Rubén, que me hacían compañía mientras pasaba horas encerrada en el aula haciendo el trabajo, y también Miriam, Andrea, Emilio, Iván y Chelsea. También quería agradecerse a Andrés, que fue él quien me consiguió a Ana como tutora, y pasaba a por el aula a darnos ánimos.

Y por último, pero no menos importante, quiero agradecerse a todas mis amigas de Tarragona, por estar siempre ahí apoyándome.

Índice

1. Antecedentes.....	5
2. Motivación.....	5
3. Objetivo	5
4. Justificación.....	6
4.1. Justificación Técnica	6
4.2. Justificación Académica.....	6
5. Introducción	7
5.1. Ecuación de Ondas.....	7
5.2. Energía acústica.....	9
5.3. Impedancia	10
5.4. Índice de atenuación sonora.....	10
6. Índice de Pérdidas de Transmisión, <i>TL</i> (Transmission Loss).....	10
6.1. Ecuación de Onda Plana, OP.....	10
6.2. Método de los Elementos Finitos, MEF.....	17
6.3. Comparación Onda Plana con el Método de Elementos Finitos.....	37
6.4. Datos experimentales.....	40
6.5. Comparación del Método de Elementos Finitos con el Experimental.....	41
6.6. MEF teniendo en cuenta características reales del aire.....	44
6.7. Comparación MEF, teniendo en cuenta las características reales del aire, con el Experimental.....	49
7. Conclusiones.....	53
8. Bibliografía.....	54
9. Presupuesto	55
9.1. Introducción.....	55
9.2. Estudio económico	55
9.2.1 Coste de mano de obra	55
9.2.2 Amortización del Hardware y Software.....	56
9.2.3 Gastos generales	56
9.3. Resumen del presupuesto	57

1. Antecedentes

En el Dpto. de Ingeniería Mecánica y de Materiales existe una línea de investigación dedicada al estudio de silenciadores de escape. Este departamento tiene unas instalaciones que cuentan con un banco de ensayos para el estudio del comportamiento acústico de silenciadores.

En este Trabajo de Fin de Grado (TFG) no se han realizado medidas experimentales, pero sí se han aportado datos empíricos de un Trabajo de Fin de Master (TFM), realizado por José Antón Ruiz, estudiante del Master de Industriales en la Universidad Politécnica de Valencia (UPV). Dado que, su trabajo consiste en el estudio de silenciadores de escape, con y sin flujo medio, y se han utilizado las mismas cámaras que en este, se ha podido emplear los resultados obtenidos experimentalmente, sin flujo medio, en las cámaras, y posteriormente ser comparados con los cálculos numéricos.

2. Motivación

Hoy en día, la principal fuente de contaminación acústica en las ciudades se debe a la circulación del tráfico, produciendo aproximadamente un 75 % del ruido en estas. El medio de transporte más utilizado son los coches, y el ruido producido por estos es debido, principalmente, al motor de combustión interna (MCI) y a la fricción del vehículo con el suelo y el aire. Los silenciadores de escape son utilizados para la atenuación acústica de los MCI y así disminuir, en gran escala, el nivel de ruido transmitido por los automóviles.

Existen diversas herramientas para el cálculo de silenciadores. En este TFG se pretende realizar un análisis de estos mediante un modelo analítico y un modelo numérico. Posteriormente serán comparados con los resultados experimentales.

3. Objetivo

El objetivo de este trabajo es la caracterización de los silenciadores de escape de los automóviles, para así lograr resultados que consigan reducir la potencia acústica asociada al ruido de combustión y que estos cumplan con la normativa de ruido en las ciudades.

Para lograr la atenuación acústica en los vehículos, se pueden utilizar dos tipos de silenciadores acústicos. Por un lado, están los silenciadores reactivos, que actúan por fenómenos de reflexión. Este tipo de silenciador está compuesto por cambios de sección, que logran que la energía que incide sea cancelada, o al menos atenuada, por la interferencia destructiva con las ondas reflejadas. Por otro lado, existen los silenciadores de disipación, que como bien indica el nombre, operan disipando energía acústica mediante el uso de materiales absorbentes. El caso más común en líneas de escape de automóviles es utilizar una combinación de ambos tipos de silenciadores. En este TFG se va a realizar el estudio de silenciadores reactivos, concretamente, de cámaras de expansión simple.

Para la caracterización de la respuesta acústica de los silenciadores existen herramientas matemáticas analíticas y numéricas. El modelo analítico más elemental para este caso sería el modelo de onda plana. Es válido para cierto rango de frecuencias, por lo que puede ser útil a la hora de diseñar el silenciador. El modelo numérico más utilizado es el método de elementos finitos, se trata de una herramienta de cálculo numérico de tipo general, por lo que permite realizar geometrías arbitrarias con condiciones de contorno complejas. Para realizar el modelo numérico se van a utilizar dos programas comerciales que utilizan el método de elementos finitos: Ansys y Sysnoise.

Por último, como se ha citado anteriormente, en este trabajo no se van a realizar medidas experimentales, pero se dispone de los resultados de las cámaras ensayadas que han sido llevadas a cabo para un TFM complementario a este trabajo. La comparación entre estos datos experimentales y los cálculos realizados mediante el modelo numérico permitirá la validación de los modelos empleados.

Para poder valorar el nivel de atenuación acústica, existen varios tipos de índices de atenuación. En este TFG se ha optado por utilizar el índice de Perdidas de Transmisión (*Transmission Loss, TL*). En este TFG, este índice se va a obtener tanto a partir del modelo analítico como del numérico y posteriormente serán comparados con las gráficas correspondientes en el dominio de la frecuencia. Adicionalmente se hará una comparativa con las medidas experimentales, lo que permitirá validarla previsión teórica o corregirla en caso de existir discrepancias.

4. Justificación

4.1. Justificación Técnica

El Grado de Ingeniería Mecánica no incluye la materia de acústica, por lo que este trabajo ha servido para poder sumar nuevos conocimientos.

Uno de los aspectos que estudia la acústica son los silenciadores de escape. Los silenciadores de los coches son utilizados para reducir el ruido que emite el MCI. Para poder mitigar la contaminación acústica, y así cumplir con la normativa, estos dispositivos son utilizados en el sistema de escape.

4.2. Justificación Académica

La realización del Trabajo de Fin de Grado es una condición para la obtención del título de Graduado en Ingeniería Mecánica.

5. Introducción

5.1. Ecuación de Ondas

La acústica es una rama de la física que estudia el sonido, sus causas, sus fuentes y su medio de propagación. Se considera el sonido como una vibración que se propaga generalmente por medio de un fluido. Este se debe a la perturbación de la presión en un medio elástico capaz de comprimirse, dicha perturbación se transmite a los puntos adyacentes sucesivamente.

Las ondas unidimensionales, u ondas planas, son ondas longitudinales confinadas en un conducto que tienen la característica de poseer en todos los puntos de una sección transversal el mismo estado acústico, de ahí su nombre. Estas son ondas que se propagan en una única dirección a través del espacio.

Para obtener la ecuación de onda plana, se plantean una serie de hipótesis simplificativas.

- La primera hipótesis es considerar el aire, que es el medio de propagación, como un gas perfecto, por lo que se cumple la ecuación fundamental de los gases (1).

$$p = \frac{\rho \cdot R \cdot T}{M} \quad (1)$$

Siendo:

p : Presión total

ρ : Densidad del aire

R : Constante de los gases perfectos

T : Temperatura absoluta

M : Masa molar del aire

- Se suponen variaciones, de velocidad, presión y densidad de las partículas, con un valor pequeño respecto al valor medio. De modo que pueden expresarse de la siguiente forma:

$$\vec{u}_T = \vec{u}_0 + \vec{u} \quad \text{Sin flujo medio, } \vec{u}_0 = 0 \quad (2)$$

$$p_T = p_0 + p \quad (p \ll p_0) \quad (3)$$

$$\rho_T = \rho_0 + \rho \quad (\rho \ll \rho_0) \quad (4)$$

Donde las variables con el subíndice T representan el valor total, el subíndice 0 corresponde al valor medio y aquellas sin subíndice representan la perturbación acústica.

→ El proceso de propagación se considera adiabático con una evolución reversible, ya que entre las partículas hay un intercambio de energía térmica insignificante, por lo que la entropía del fluido casi no varía. Se puede introducir la ecuación de la evolución de los gases a entropía constante (5).

$$\frac{p}{\rho^\gamma} = Cte \quad (5)$$

Siendo:

γ : Exponente adiabático

En el caso de la de los silenciadores estas hipótesis son válidas puesto que los sistemas de excitación no suelen sobrepasar los 140 dB, valor por encima del cual se pierde la linealidad entre las magnitudes físicas que intervienen en el fenómeno acústico.

La ecuación de ondas sin flujo medio es también conocida como la ecuación de *Helmholtz*. Dicha ecuación se obtiene a partir de tres ecuaciones: la ecuación de equilibrio dinámico (ecuación de Navier-Stokes (6)), la ecuación de continuidad (conservación de la masa (7)) y la ecuación de la energía (ecuación de estado (8)). Teniendo en cuenta las hipótesis anteriormente nombradas, se obtienen las tres ecuaciones como sigue

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \rho_0 \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} \quad (6)$$

$$\rho_0 \frac{\partial \vec{u}}{\partial x} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (7)$$

$$p = \frac{dp_T}{d\rho_T} \rho = c^2 \rho \quad (8)$$

Donde x es la dirección de propagación.

La combinación de las tres ecuaciones y las hipótesis simplificativas expuestas anteriormente da lugar a la ecuación de ondas:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (9)$$

La solución de la ecuación de ondas general queda:

$$p(x, t) = f(ct - x) + g(ct + x) \quad (10)$$

La solución numérica de la ecuación (10) está compuesta por dos términos que corresponden a una onda de presión progresiva ($f(ct - x)$, se propaga en la misma dirección y sentido de las partículas) y otra regresiva $g(ct + x)$ que viaja en sentido opuesto a las partículas. Si se representa con respuesta armónica y en forma

compleja, sabiendo que la frecuencia angular es $\omega = 2\pi f \text{ rad/s}$, y definiendo el número de onda como $k = \omega/c$, quedará la ecuación:

$$p(x, t) = Ae^{j(\omega t - kx + \varphi_1)} + Be^{j(\omega t + kx + \varphi_2)} \quad (11)$$

Si $\hat{A} = Ae^{j\varphi_1}$ y $\hat{B} = Be^{j\varphi_2}$, donde \hat{A} y \hat{B} son las amplitudes complejas de onda, la ecuación (11) puede reescribirse:

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

Normalmente se omite la dependencia temporal, por lo que la definición de campo acústico queda de la siguiente manera:

Presión

$$p(x) = \hat{A}e^{-jkx} + \hat{B}e^{jkx} \quad (13)$$

Velocidad

$$u(x) = \frac{1}{Z_0} (\hat{A}e^{-jkx} - \hat{B}e^{jkx}) \quad (14)$$

Donde $Z_0 = \rho_0 c$ es la impedancia característica del medio de propagación.

5.2. Energía acústica

El movimiento ondulatorio es capaz de transportar energía sin la necesidad de transportar materia. El movimiento de las partículas va asociado a la energía cinética de la onda y la compresibilidad del fluido a la energía potencial. La suma de ambas corresponde a la energía acústica.

A partir de la energía acústica se obtiene la intensidad acústica I que resulta de mayor interés. Es definida como la energía por unidad de tiempo que atraviesa en la dirección perpendicular a la de propagación por unidad de tiempo y superficie y puede calcularse como:

$$I(t) = p(t) \cdot u(t) \quad (15)$$

En el caso de ondas acústicas confinadas en un conducto, la potencia acústica W se obtiene a partir de la intensidad y la sección transversal del conducto.

$$W = \int_S I dS \quad (16)$$

Dado que es una solución armónica, bajo la hipótesis de onda plana, se puede estimar la intensidad a partir de las magnitudes acústicas en un punto. En el caso de las ondas planas progresivas quedaría la siguiente ecuación:

$$\bar{I} = \frac{|\hat{p}|^2}{2 \rho_0 c} \quad (17)$$

5.3. Impedancia

La impedancia acústica específica es la relación que hay entre la presión acústica de un medio y la velocidad de la partícula. En el caso de una onda plana progresiva, se puede definir la impedancia característica del medio de propagación como $Z_0 = \rho_0 c$, aunque únicamente cuando el fluido, por el que se propaga la onda, es aire. En el caso de una onda regresiva, esta sería igual, pero con signo contrario.

5.4. Índice de atenuación sonora

Los índices de atenuación sonora son parámetros que representan el comportamiento acústico y proporcionan una idea del nivel de atenuación acústica de los silenciadores. Estos índices suelen representarse en función de la frecuencia.

En este trabajo se va a utilizar el índice de pérdidas de transmisión (TL), que representa la relación que hay entre la potencia acústica incidente W_i y la transmitida W_t a través del silenciador en dB. Este índice es independiente de la fuente y precisa una terminación a la salida del silenciador anecoica, que impida la reflexión de las ondas a la salida (sin eco), de modo que el TL no dependerá de la terminación.

$$TL = 10 \log \left(\frac{W_i}{W_t} \right) \quad (18)$$

6. Índice de Pérdidas de Transmisión, TL (*Transmission Loss*)

6.1. Ecuación de Onda Plana, OP

En este punto se va a proceder a obtener la ecuación del índice de pérdidas de transmisión TL mediante la ecuación de Onda Plana. Para ello se deben definir primero las distintas ondas que van a aparecer en un silenciador simple de un tubo de escape. Los resultados obtenidos se procesarán con la ayuda del programa Mathcad, donde se representarán las gráficas de las cámaras utilizadas en este trabajo.

Una cámara de expansión simple consta de dos cambios de sección, como se puede observar en la Figura 1. Los cambios de sección tienen un gran impacto en la propagación sonora y por ello se utiliza en automoción.

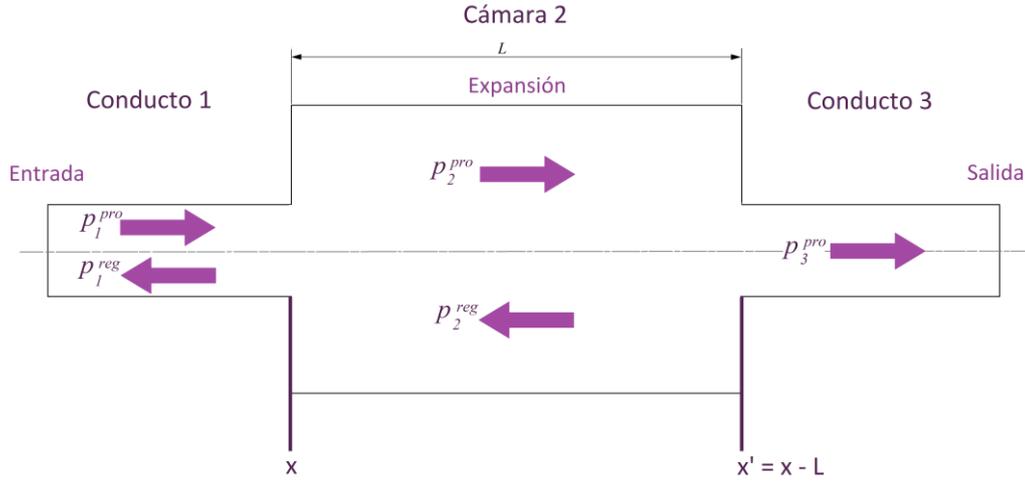


Figura 1: Esquema simplificado de un silenciador.

En la Figura 1 se pueden observar las componentes transmitida y reflejada en cada uno de los dominios generados en los cambios de sección. La impedancia Z_0 de los conductos y de la cámara es la misma ya que tienen el mismo medio de propagación. Por tanto, los campos de presión y de velocidad de los conductos son:

$$p_1 = p_1^{pro} + p_1^{reg} = \hat{P}_1^{pro} e^{j(\omega t - k_1 x)} + \hat{P}_1^{reg} e^{j(\omega t + k_1 x)} \quad \text{Presión conducto 1}$$

$$u_1 = u_1^{pro} + u_1^{reg} = \frac{1}{Z_0} (\hat{P}_1^{pro} e^{j(\omega t - k_1 x)} - \hat{P}_1^{reg} e^{j(\omega t + k_1 x)}) \quad \text{Velocidad conducto 1}$$

$$p_2 = p_2^{pro} + p_2^{reg} = \hat{P}_2^{pro} e^{j(\omega t - k_2 x)} + \hat{P}_2^{reg} e^{j(\omega t + k_2 x)} \quad \text{Presión cámara 2}$$

$$u_2 = u_2^{pro} + u_2^{reg} = \frac{1}{Z_0} (\hat{P}_2^{pro} e^{j(\omega t - k_2 x)} - \hat{P}_2^{reg} e^{j(\omega t + k_2 x)}) \quad \text{Velocidad cámara 2}$$

$$p_3 = p_3^{pro} = \hat{P}_3^{pro} e^{j(\omega t - k_3(x-L))} \quad \text{Presión conducto 3}$$

$$u_3 = u_3^{pro} = \frac{1}{Z_0} \hat{P}_3^{pro} e^{j(\omega t - k_3(x-L))} \quad \text{Velocidad conducto 3}$$

En el dominio 3, la presión y la velocidad corresponden únicamente a las de la onda progresiva como consecuencia de la imposición de salida anecoica derivada de la definición del TL .

En el plano de separación ($x = 0$ y $x = L$) se cumplen las condiciones de continuidad de presión y de flujo másico, por lo que se cumplirá que:

Conducto 1 y cámara 2 ($x = 0$):

$$p_1 = p_2 \quad \Leftrightarrow \quad \hat{P}_1^{pro} + \hat{P}_1^{reg} = \hat{P}_2^{pro} + \hat{P}_2^{reg} \quad (19)$$

$$\rho_0 u_1 S_1 = \rho_0 u_2 S_2 \quad \Leftrightarrow \quad (\hat{P}_1^{pro} - \hat{P}_1^{reg}) S_1 = (\hat{P}_2^{pro} - \hat{P}_2^{reg}) S_2 \quad (20)$$

Cámara 2 y conducto 3 ($x = L$ o $x' = 0$):

$$p_2 = p_3 \Rightarrow \hat{P}_2^{pro} e^{-jk_2L} + \hat{P}_2^{reg} e^{jk_2L} = \hat{P}_3^{pro} \quad (21)$$

$$\rho_0 u_2 S_2 = \rho_0 u_3 S_3 \Rightarrow (\hat{P}_2^{pro} e^{-jk_2L} - \hat{P}_2^{reg} e^{jk_2L}) S_2 = \hat{P}_3^{pro} S_3 \quad (22)$$

Imponiendo como condición de contorno $\hat{P}_1^{pro} = 1$, $S_1 = S_3$ y una relación de superficies $m = \frac{S_{cámara}}{S_{conducto}}$, se pueden reescribir las cuatro ecuaciones como:

$$1 + \hat{P}_1^{reg} = \hat{P}_2^{pro} + \hat{P}_2^{reg} \quad (23)$$

$$1 - \hat{P}_1^{reg} = (\hat{P}_2^{pro} - \hat{P}_2^{reg}) \cdot m \quad (24)$$

$$\hat{P}_2^{pro} e^{-jk_2L} + \hat{P}_2^{reg} e^{jk_2L} = \hat{P}_3^{pro} \quad (25)$$

$$(\hat{P}_2^{pro} e^{-jk_2L} - \hat{P}_2^{reg} e^{jk_2L}) \cdot m = \hat{P}_3^{pro} \quad (26)$$

Si se combinan las ecuaciones (23) y (24) y se restan la (25) y (26), se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$\hat{P}_2^{pro} (1 + m) + \hat{P}_2^{reg} (1 - m) = 2 \quad (27)$$

$$\hat{P}_2^{pro} e^{-jk_2L} (1 - m) + \hat{P}_2^{reg} e^{jk_2L} (1 + m) = 0 \quad (28)$$

Se multiplica la ecuación (28) por $\frac{1+m}{1-m} \cdot e^{jk_2L}$, y se resta las ecuaciones (27) y (28), se obtiene:

$$\hat{P}_2^{pro} (1 + m) + \hat{P}_2^{reg} e^{2jk_2L} \frac{(1+m)^2}{(1-m)} = 0 \quad (29)$$

De donde puede despejarse \hat{P}_2^{reg} :

$$\hat{P}_2^{reg} = \frac{2(1-m)}{((1-m)^2 - e^{2jk_2L}(1+m)^2)} \quad (30)$$

Se sustituye la ecuación (30) en la (27) para despejar \hat{P}_2^{pro} y queda la ecuación:

$$\hat{P}_2^{pro} = \frac{1+m}{(1+m)^2 - (1+m)^2 e^{-2jk_2L}} \quad (31)$$

Y por último se sustituye (30) y (31) en la ecuación (26) y se despeja \hat{P}_3^{pro} :

$$\hat{P}_3^{pro} = \frac{-4m}{(1-m)^2 e^{-jk_2L} - (1+m)^2 e^{jk_2L}} \quad (32)$$

Como ya se ha visto en la ecuación (18) el índice por pérdidas de transmisión TL está definido como:

$$TL = 10 \log \left(\frac{W_1}{W_3} \right) = 10 \log \left(\frac{\frac{|\hat{p}_1^{pro}|^2 S_1}{2Z_0}}{\frac{|\hat{p}_3^{pro}|^2 S_3}{2Z_0}} \right) \quad (33)$$

Teniendo en cuenta que se ha considerado una presión incidente de amplitud unidad y que las superficies e impedancias de los conductos 1 y 3 son iguales, la ecuación (33), teniendo en cuenta (32), queda:

$$TL = 10 \log \left(\frac{1}{|\hat{p}_3^{pro}|^2} \right) = 20 \log \left(\frac{(1-m)^2 e^{-jkL} - (1+m)^2 e^{jkL}}{4m} \right) \quad (34)$$

Para un sistema experimental, en el que no es fácil conseguir la excitación de amplitud unidad ni impedir la presencia de reflexiones en la sección de salida, puede reescribirse la ecuación (33) en función de magnitudes físicas a la entrada y a la salida. Teniendo en cuenta la misma área transversal e impedancia en los conductos de entrada y salida, se tiene:

$$TL = 10 \log \left(\frac{W_1}{W_3} \right) = 20 \log \left(\frac{|\hat{p}_1^{pro}|}{|\hat{p}_3^{pro}|} \right) \quad (35)$$

Además, en la entrada al sistema ($x = 0$) se cumple:

$$p_1 = \hat{p}_1^{pro} + \hat{p}_1^{reg} \quad (36)$$

$$u_1 = \frac{1}{Z_0} (\hat{p}_1^{pro} - \hat{p}_1^{reg}) \quad (37)$$

Y en la salida anecoica:

$$p_3 = \hat{p}_3^{pro} \quad (38)$$

Combinando las ecuaciones (36) y (37) se tiene:

$$\hat{p}_1^{pro} = \frac{p_1 + Z_0 u_1}{2} \quad (39)$$

Sustituyendo (38) y (39) en (35), se obtiene el TL en función de las magnitudes físicas reales:

$$TL = 20 \log \left(\frac{p_1 + Z_0 u_1}{2 p_3} \right) \quad (40)$$

Introduciendo la ecuación del índice de pérdidas de transmisión TL para onda plana dada por (34) en el programa Mathcad se obtienen las gráficas mostradas en las Figura 2, 3, 4, 5 y 6, que corresponden a las cámaras detalladas en la Tabla 1:

Tabla 1: Datos de las cámaras

	Radio conductos entrada-salida r_1-r_3 (m)	Radio cámara r_2 (m)	Longitud cámara L (m)	Relación de superficies m (-)
Cámara 2	0,0268	0,0532	0,2	3,941
Cámara 3	0,0268	0,0532	0,4	3,941
Cámara 4	0,0268	0,0886	0,2	10,929
Cámara 5	0,0268	0,0886	0,4	10,929

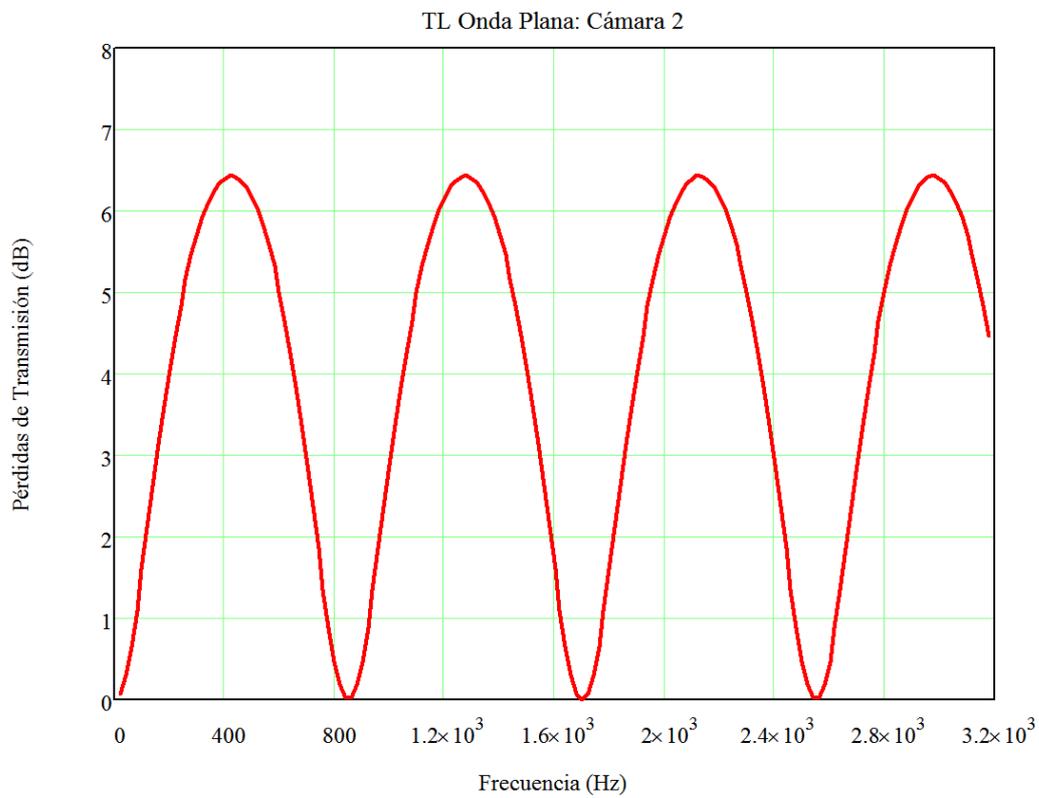


Figura 2: Gráfica de TL de la ecuación de Onda Plana de la cámara 2.

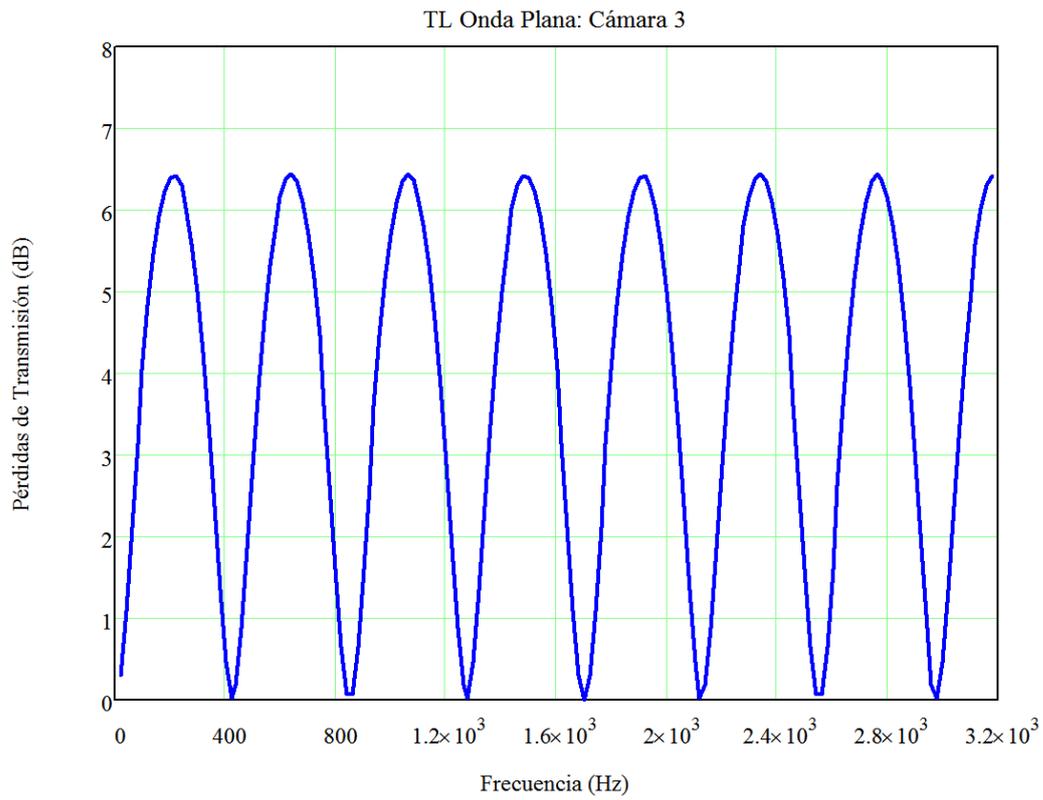


Figura 3: Gráfica de TL de la ecuación de Onda Plana de la cámara 3.

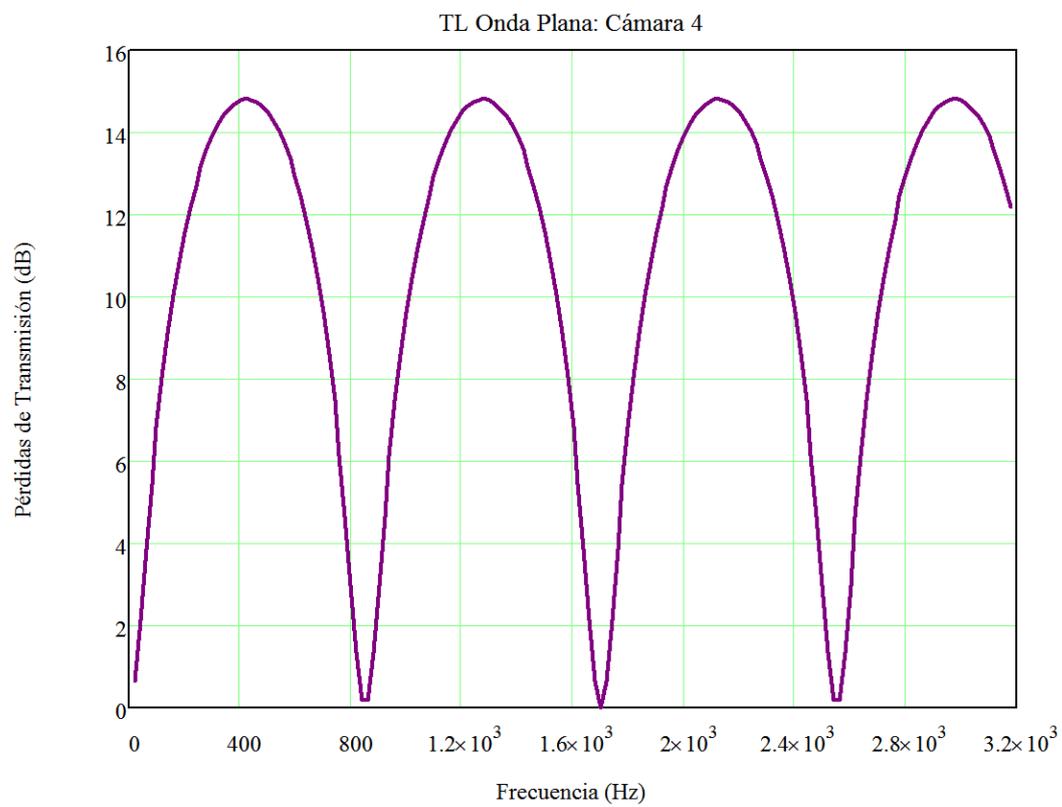


Figura 4: Gráfica de TL de la ecuación de Onda Plana de la cámara 4

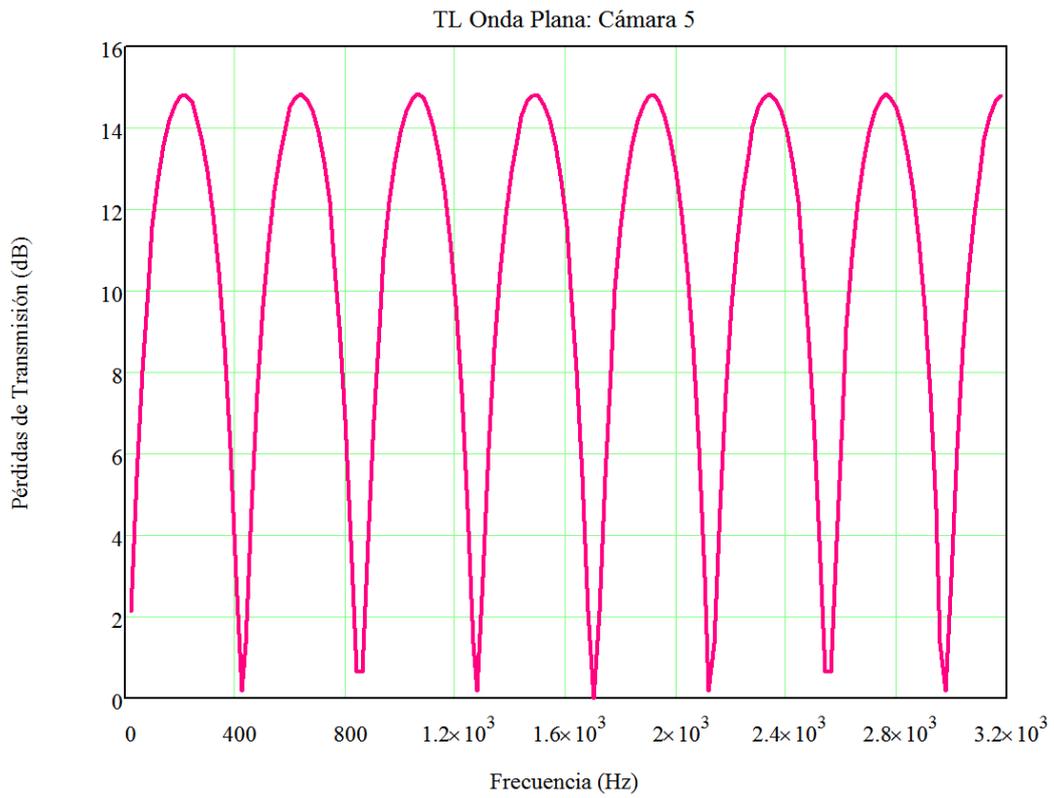


Figura 5: Gráfica de TL de la ecuación de Onda Plana de la cámara 5.

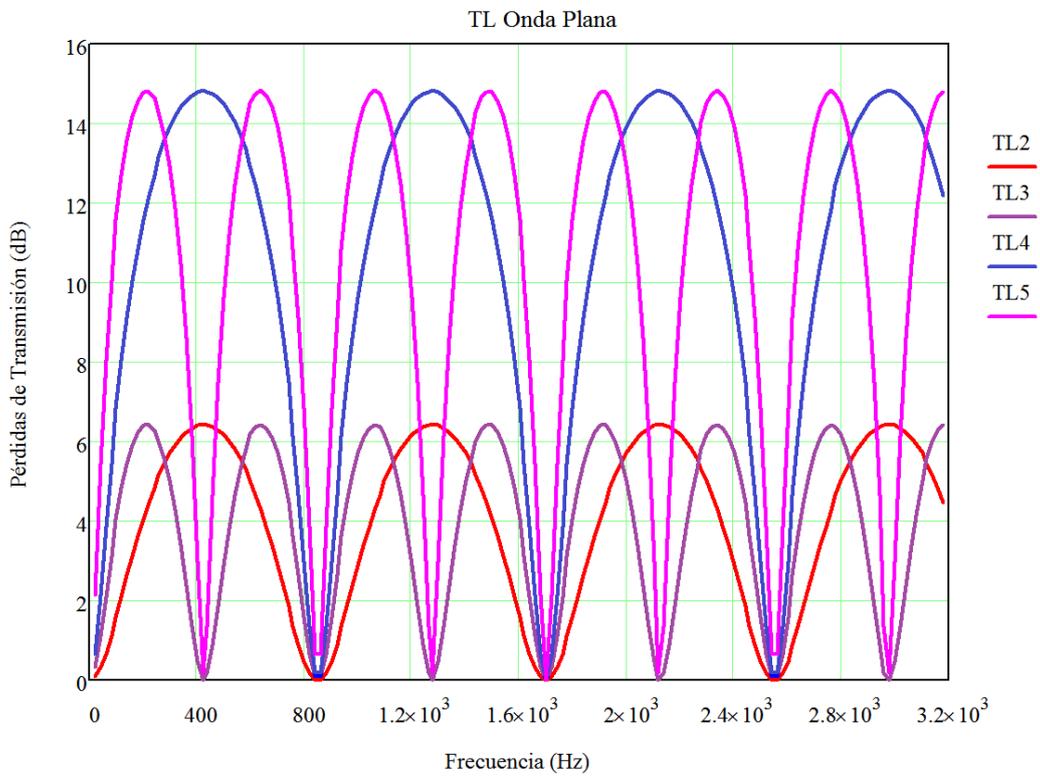


Figura 6: Gráficas de las TL de las cuatro cámaras. Onda Plana.

En las gráficas se puede observar cómo la amplitud del TL está asociada a la relación de áreas m y la distancia entre las bandas de paso depende de la longitud L de la cámara. Las cámaras 2 y 3, con una misma relación de superficies, como se puede observar en la Tabla 1, tienen una amplitud máxima cercana a 6,5 dB y las cámaras 4 y 5 una amplitud de aproximadamente 15 dB, de lo que se deduce que a mayor relación entre superficies mayor capacidad de atenuación. Las cámaras 2 y 4, de misma longitud, tienen una distancia entre las bandas de paso de unos 850 Hz, y las cámaras 3 y 5 tienen una distancia de 425 Hz, de modo que a mayor longitud menor es la distancia entre las bandas de paso.

6.2. Método de los Elementos Finitos, MEF

El MEF es una de las herramientas de cálculo genéricas más utilizadas para resolver problemas que aparecen en la ingeniería ya que permite la resolución de problemas de gran complejidad como es el caso de fenómenos con comportamiento no lineal. Esta herramienta permite analizar problemas térmicos, acústicos, dinámicos, electromagnéticos y de flujo, pero dado que es una solución aproximada, su implementación conlleva siempre error.

Este método se basa en subdividir la geometría de una pieza en partes más pequeñas llamadas “elementos”, definidos a partir de un conjunto de “nodos” y que en su conjunto forman una “malla”, las ecuaciones diferenciales pueden discretizarse para la geometría mallada y de este modo se simplifican problemas complejos. Al subdividir la geometría se está creando un conjunto de subdominios con un número limitado de elementos, de ahí viene el nombre de “elementos finitos”. La solución a la ecuación del fenómeno en estudio se aproxima localmente cada elemento mediante funciones incógnita, generalmente polinómicas, en función de un conjunto de variables discretas. El comportamiento en cada elemento se obtiene mediante la formulación de un sistema algebraico de ecuaciones.

Para realizar los cálculos se ha utilizado un programa de elementos finitos, especializado en la solución de simulación de diseños vibro-acústicos, llamado Sysnoise. Antes de realizar los cálculos en este programa se debe realizar el mallado en Ansys.

A continuación, se va a proceder a explicar el procedimiento seguido que consta de varios pasos: en el primero se obtiene la malla del dominio en Ansys, en el segundo se resuelve el problema acústico mediante el MEF con Sysnoise, en este paso se obtiene como resultado el valor de la presión y velocidad en los nodos de la malla, en el último paso se procesa en Mathcad los resultados obtenidos previamente por Sysnoise para obtener el TL buscado. Se utilizará para la explicación detallada del procedimiento la Cámara 2 (Figura 7).

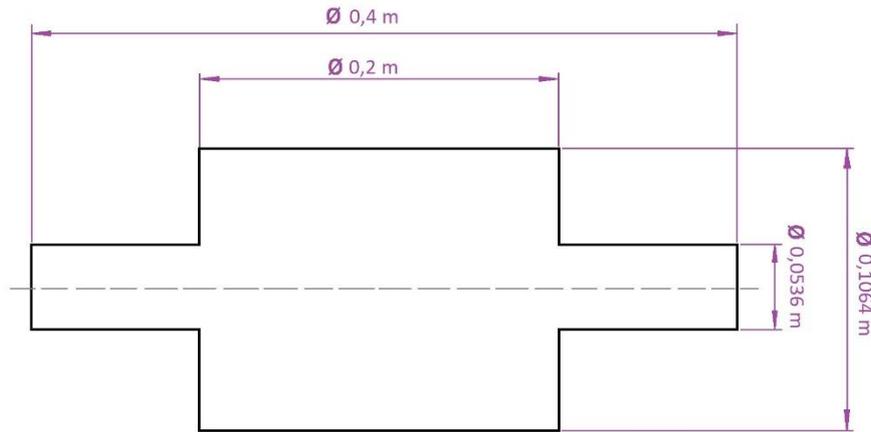


Figura 7: Dimensiones de la Cámara 2.

Ansys: obtención de la malla

Para generar la malla se debe abrir el programa Ansys¹ (Mechanical APDL Product Launcher 17.2). Se le indica el directorio donde se quiere guardar el archivo y el nombre con el que se desea guardar, y se pulsa **Run** para iniciar el programa (Figura 8).

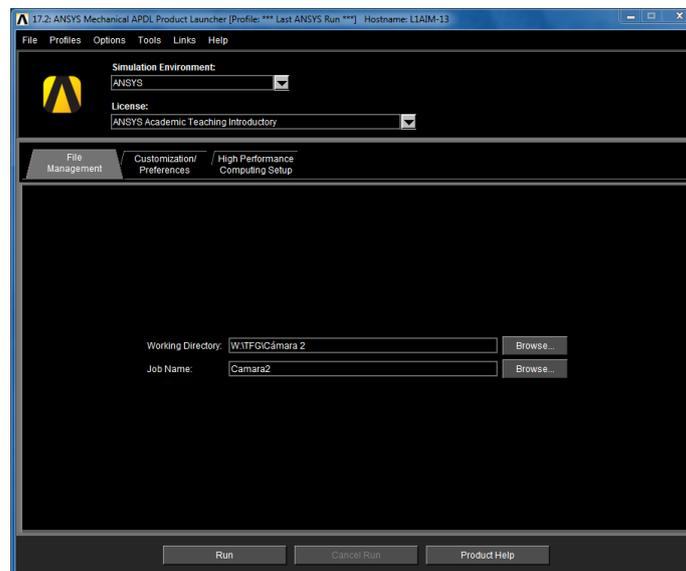


Figura 8: Iniciar programa Ansys.

Una vez abierto, en el menú principal se encuentra la opción de **Preprocessor**, comando en el cual se definirá el problema, su geometría, y la malla de elementos finitos. Primero se va a proceder a elegir el tipo de elemento a utilizar, para ello, dentro de **Preprocessor** se elige la opción **Element Type**, y dentro de esta **Add/Edit/Delete**. Una vez dentro se selecciona **Add...** Y ahí se escoge el elemento

¹ Versión estudiantil.

cuadrilátero lineal de 8 nodos, seleccionando el elemento **Structural Solid** tipo **Quad 8 node 183** (Figura 9), se pulsa **OK** y queda asignado como **Type 1**.

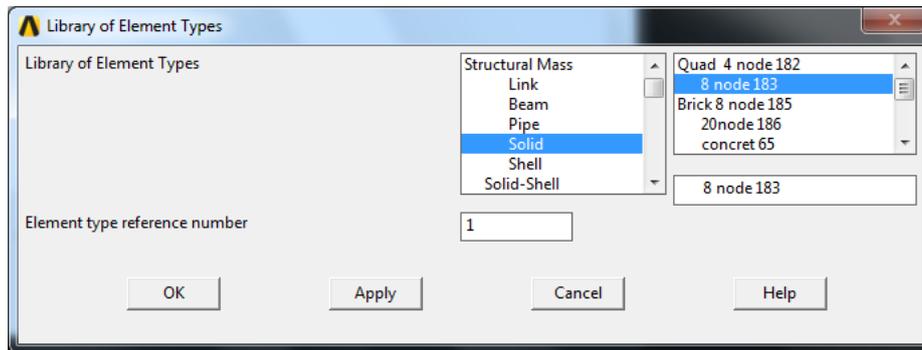


Figura 9: Selección de tipo de elemento.

Ahora se va a proceder a crear la geometría del silenciador, para ello se va a simplificar esta geometría creando un área que, revolucionada sobre su eje, origina el volumen donde se encuentra el fluido del silenciador. Para ello se debe crear los **Keypoints**, que para la Cámara 2 corresponden a los mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 2: Puntos para crear la geometría de la Cámara 2.

Keypoints	X (m)	Y (m)
1	0	0
2	0,0268	0
3	0,0268	0,1
4	0,0532	0,1
5	0,0532	0,3
6	0,0268	0,3
7	0,0268	0,4
8	0	0,4

Dentro de **Preprocessor** se selecciona la opción **Modeling > Create > Keypoints > In Active C S** y se procede a meter las coordenadas de la Tabla 2 (Figura 10). Una vez creados, se unen a través de líneas, **Create > Lines > Lines > Straight Line** (Figura 11). Para finalizar la geometría, se selecciona **Create > Areas > Arbitrary > By Lines** (Figura 12), se seleccionan todas las líneas y se hace clic en **OK**. El área queda creada como se muestra en la Figura 13.

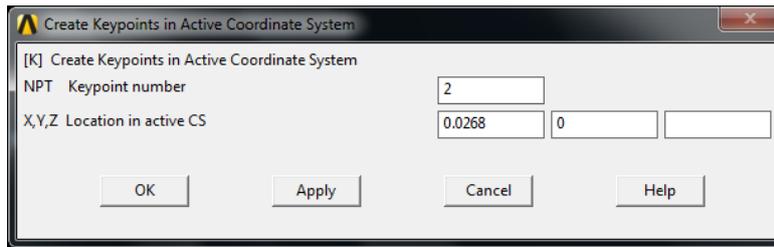


Figura 10: Creación de los puntos (Keypoints).

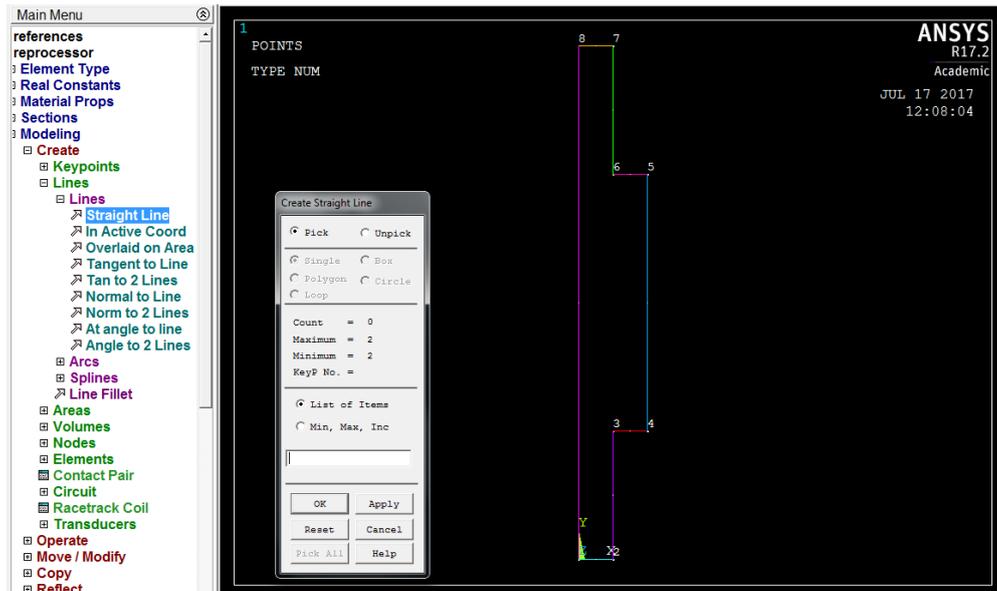


Figura 11: Unión de los puntos.

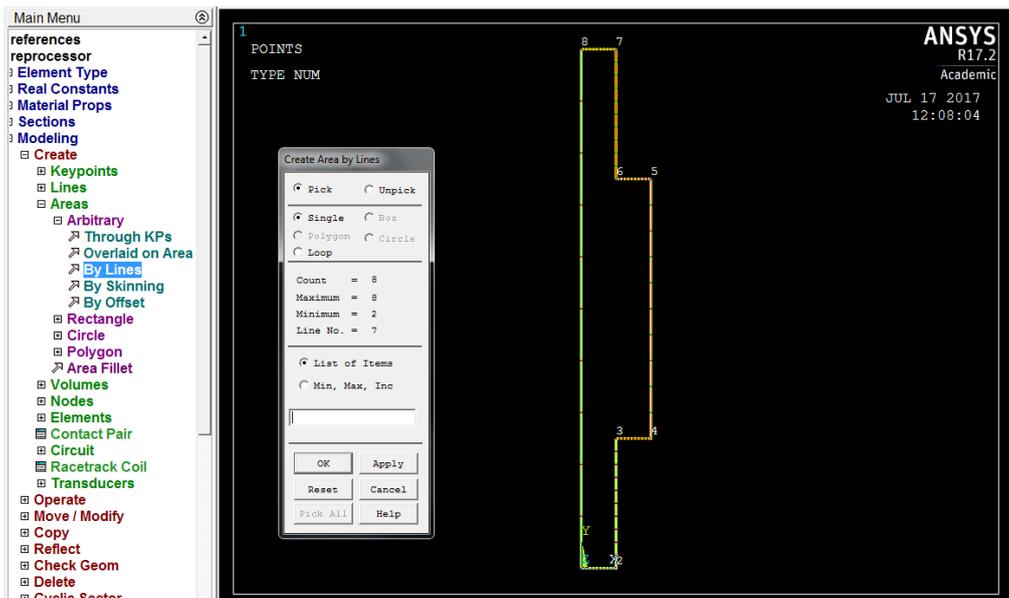


Figura 12: Selección de las líneas para crear el área.

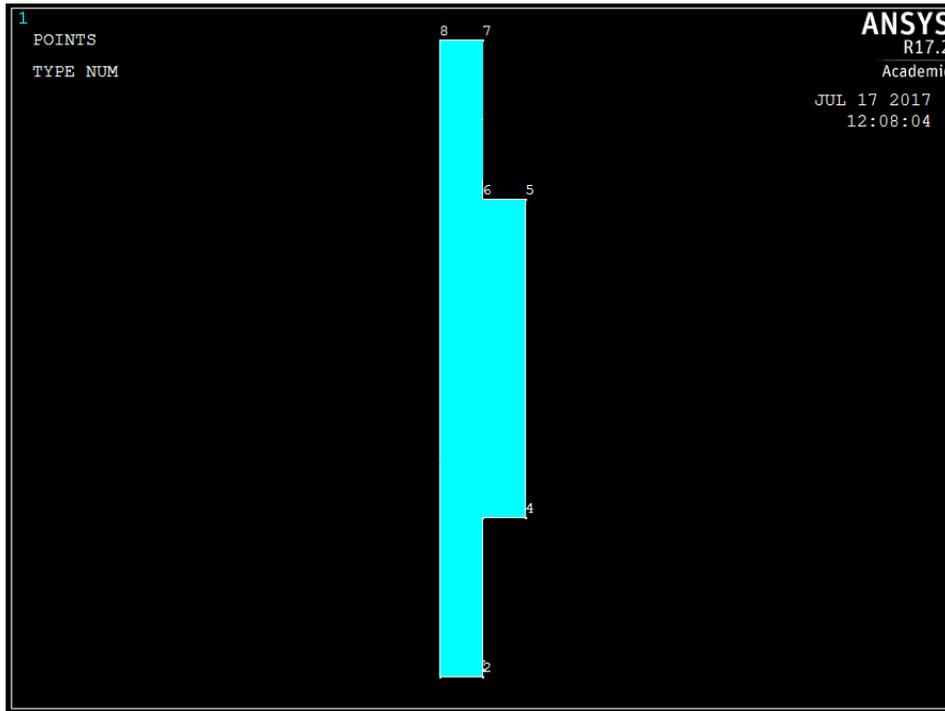


Figura 13: Área de la cámara.

Una vez creada la geometría se selecciona la opción **Meshing**, dentro de **Preprocessor**, para a continuación crear la malla. Primero vamos a definir el tamaño del elemento, en este caso se ha escogido un tamaño de 5 milímetros, suficientemente pequeño para que la solución de elementos finitos se aproxime a la exacta. Para ello se selecciona dentro de **Meshing**, **Size Cntrls > ManualSize > Global > Size** y se introducen los 5 mm en el espacio de **Element edge length** (Figura 14). Ahora, que ya está definido el tipo de elemento y su tamaño, se puede generar la malla. Se elige dentro de **Meshing**, la opción **Mesh > Areas > Free**, se selecciona el área que se desea mallar y se hace clic en **OK**. La malla ya está generada (Figura 15).

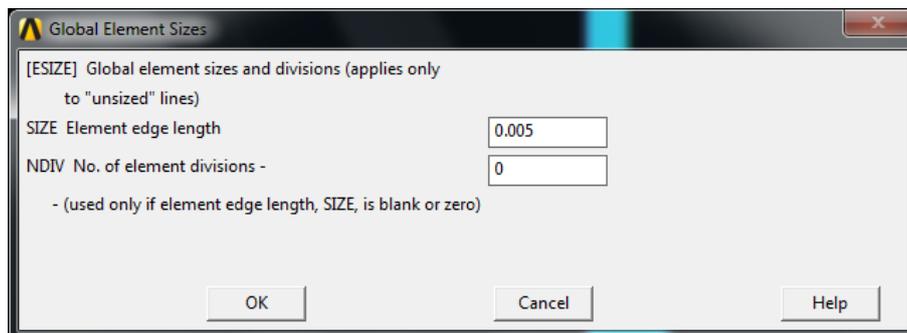


Figura 14: Tamaño del elemento.

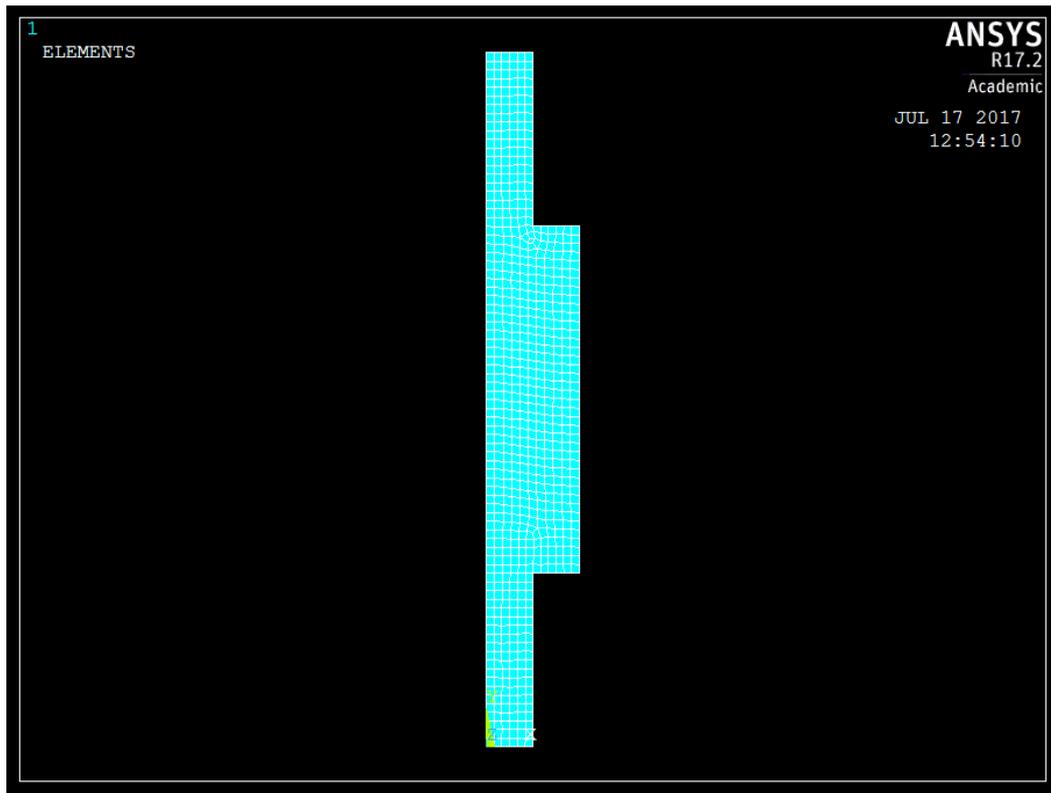


Figura 15: Malla generada.

A continuación, se guarda la malla para importarla en Sysnoise. Para que este programa pueda leer el fichero de datos, es necesario guardarla con la extensión “*.cbd”. En la barra de comandos, **Command Prompt**, se escribe la siguiente orden: “cdwrite,all,Camara2,cbd,,,,unblocked”. De esta forma quedará guardado un archivo con el nombre “Camara2.cbd” en la carpeta ya escogida al iniciar el programa. Se guarda también el archivo de Ansys, **File > Save as...** con el nombre “Camara2.db”.

Sysnoise: cálculo mediante elementos finitos

Sysnoise está instalado en una estación de trabajo del Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales (edificio 5E). Esta estación de trabajo funciona con Sistema operativo Linux, por esta razón, para intercambiar archivos con el PC, se debe emplear protocolo FTP (*File Transfer Protocol*). En este trabajo se ha empleado un programa llamado TotalCommander. Una vez abierto se abre sesión pulsando **Net > FTP Connect...** o con la abreviatura **Ctrl+F**, se da clic a **New connection...** y se inicia sesión tal y como se indica en la Figura 16.

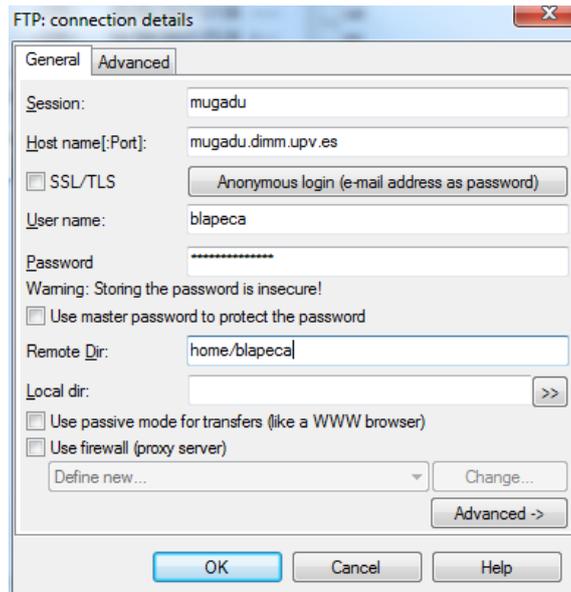


Figura 16: Iniciando conexión con la estación de trabajo.

Una vez ya conectados los archivos deben transferirse en modo texto. Se selecciona el archivo “Camara2.cbd” y se pulsa la tecla **F5** (Figura 17). De esta forma quedará ya copiado el archivo en la estación de trabajo.

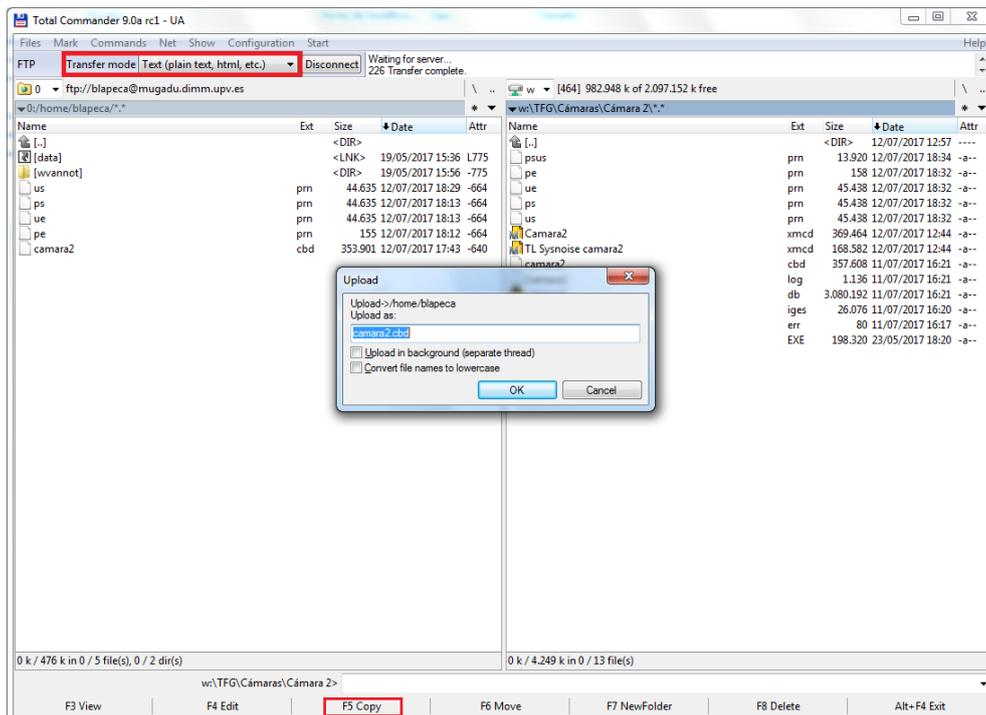


Figura 17: Transferencia, del archivo “*.cbd”, del PC a la estación de trabajo. TotalCommander.

Para conectarse en remoto desde un PC a la estación de trabajo (mugadu) se utiliza un programa llamado X-Win32. Se debe iniciar sesión en el programa haciendo clic con el botón derecho del ratón sobre la barra de título, se selecciona **Sessions** y se conecta a la sesión “mugadu” (Figura 1).

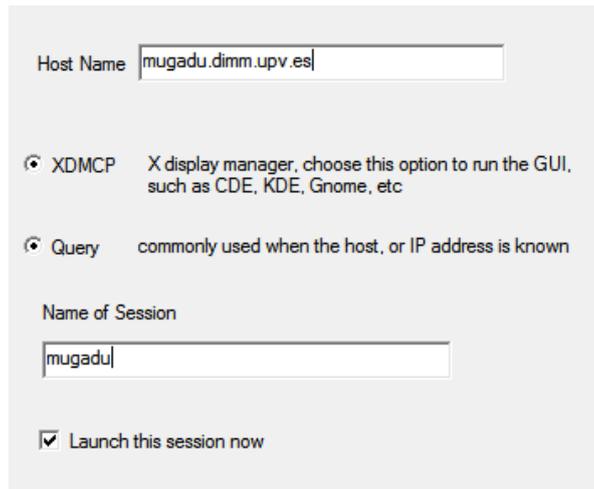


Figura 18: Inicio sesión X-Win32.

Ya iniciada la sesión, dentro de X-Win32, se abre el **Terminal**. Para ejecutar el programa, basta con escribir en la línea de comandos su nombre (**Sysnoise**) y pulsar la tecla **Intro** (Figura 19).

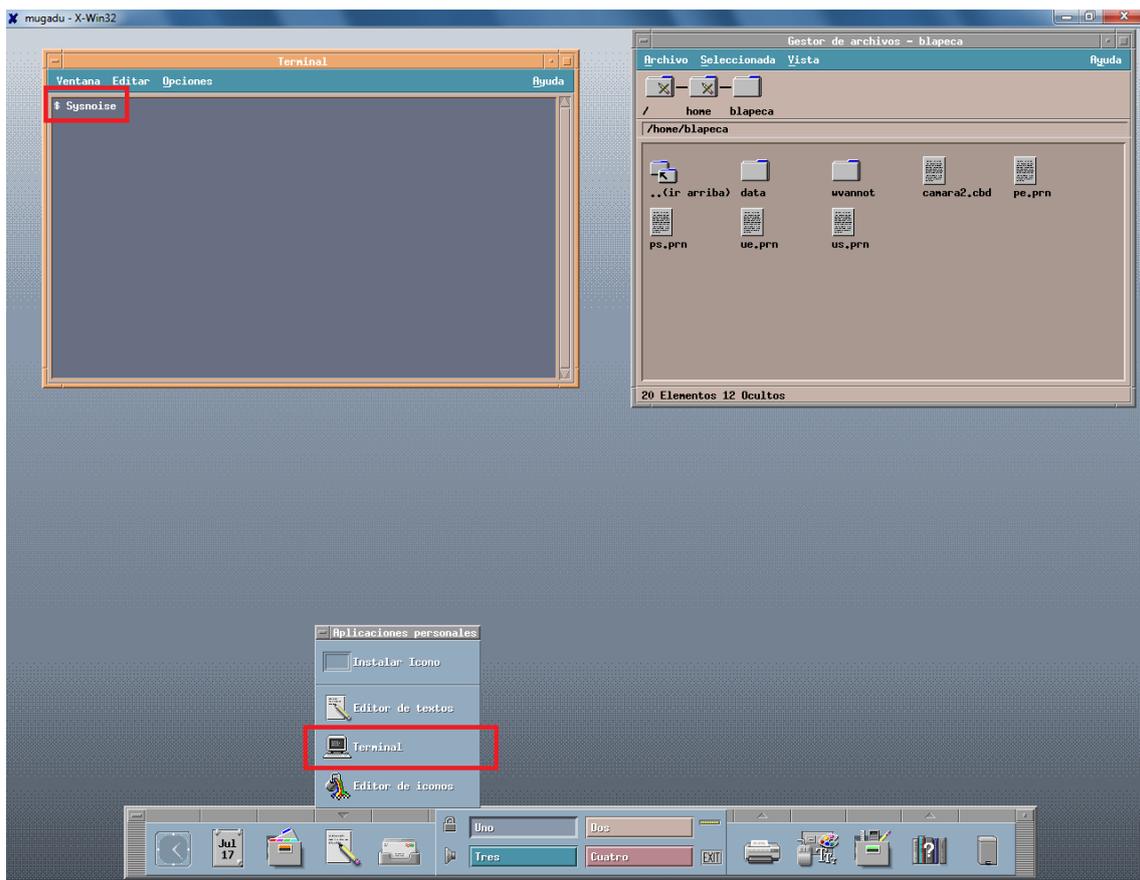


Figura 19: Programa X-Win32.

Una vez abierto Sysnoise, se importa el archivo “Camara2.cbd” en **File > Import... o Ctrl+I**, se escoge el formato **Ansys** y se selecciona el archivo, se hace clic en **OK** (Figura 20).

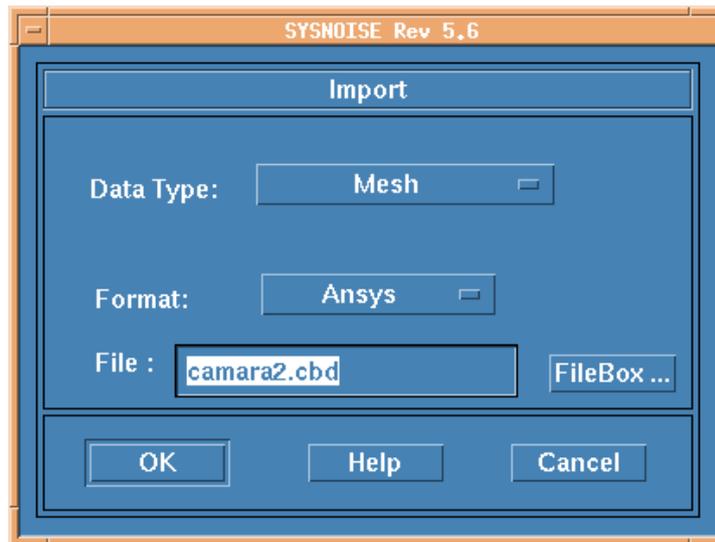


Figura 20: Importación del archivo "camara2.cbd" a Sysnoise.

A continuación, se debe seleccionar el método de cálculo, en este caso FEM (*finite elements method*). Se selecciona **Model > Option...**, y una vez dentro, se hace clic en la opción **FEM** (Figura 21).

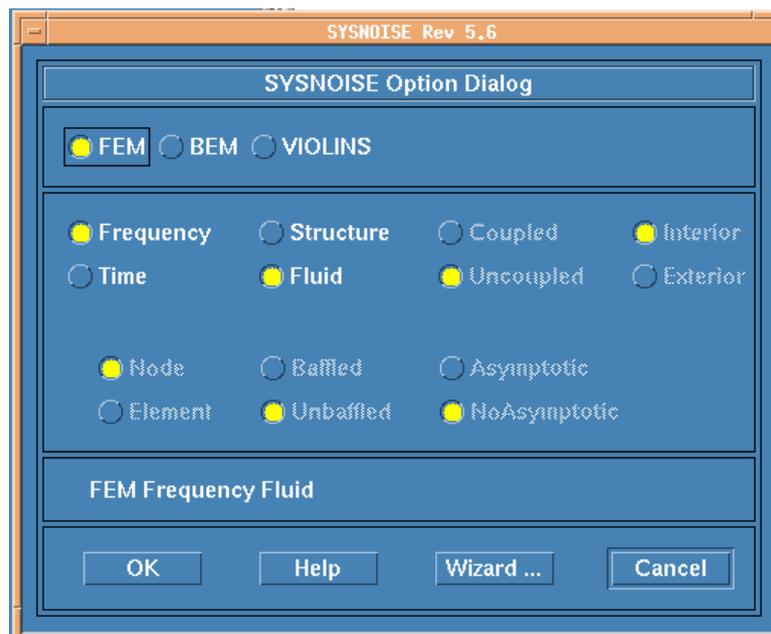


Figura 21: Cambio de condiciones a MEF.

El siguiente paso es cambiar las condiciones a una geometría de revolución. En **Geometry**, se elige la opción **AxiSymmetry**. Para ver la figura en el plano XY se abre la opción **Display > View Point > XY**, quedando como la Figura 22.

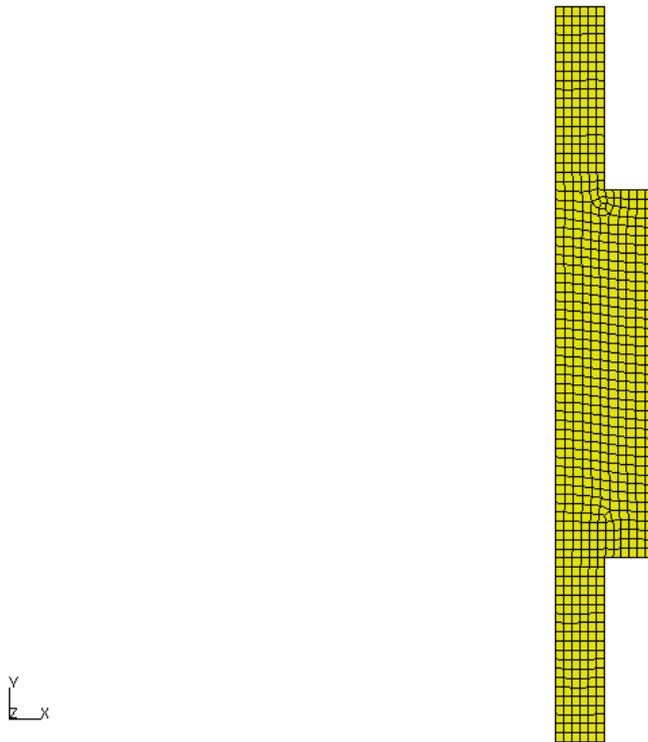


Figura 22: Figura vista desde el plano XY.

El siguiente paso es aplicar las condiciones de contorno de presión en la entrada, e impedancia en la salida del silenciador. Para ello se debe definir lo que el programa llama *Set* que es un conjunto de entidades geométricas del mismo tipo de la malla. Para ello primero se amplía la parte inferior de la figura, y con el icono **Box Select** marcado, se seleccionan solo los nodos de esta cara. Se abre una ventana, dándole el nombre de **Entrada** y dejando en **Set Type** la opción **Node** (Figura 23).

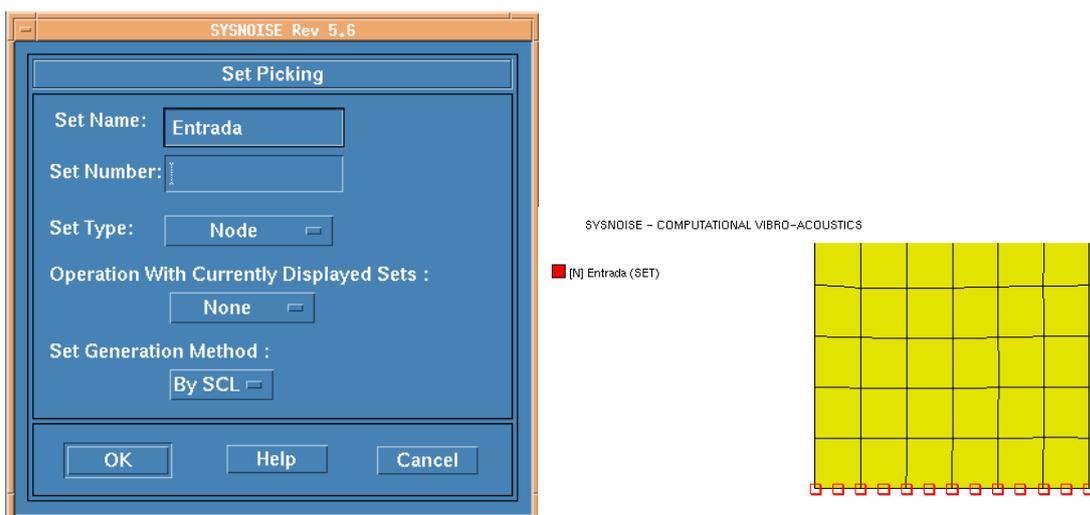


Figura 23: Selección de los nodos de entrada.

Una vez seleccionados, dentro del menú **Model**, se escoge la opción **Pressure B.C. > Manual**. Esta condición de contorno es completamente aleatoria ya que, por un lado, el índice que se va a calcular corresponde a la relación de la potencia acústica entre la entrada y la salida y por otro se trata de un problema lineal, por tanto, la solución va a ser independiente del valor de la presión impuesta en la entrada, se decide tomar valor la unidad, de modo que se introduce **1** en la parte real, como valor de presión en la entrada. Se abre la ventana de **Node Selector** y se escoge el **Set Entrada**, se hace clic en añadir (**Add**) y ya queda definido el valor de la presión en la entrada del silenciador (Figura 24).

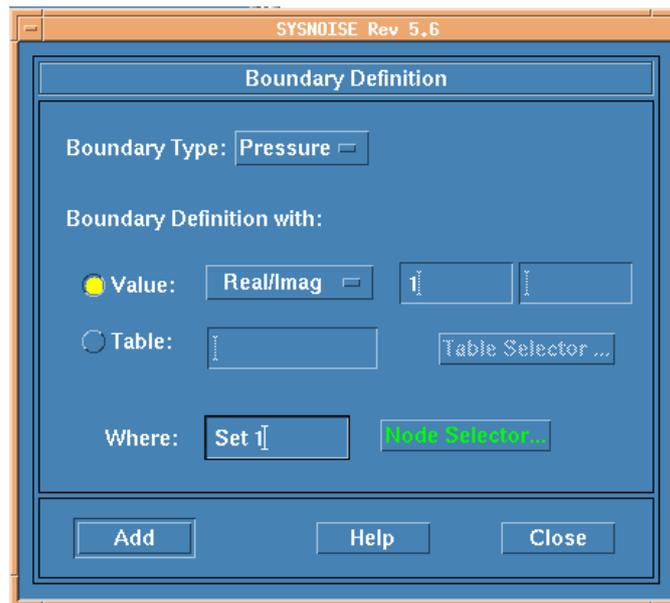


Figura 24: Condición de presión a la entrada del silenciador.

Para llevar a cabo la aplicación del método de cálculo es necesario aplicar una segunda condición de contorno. En este caso va a ser imponer salida anecoica, correspondiente a la definición completa del TL , que mide el citado balance de potencia acústica bajo este supuesto. La forma de modelizar la ausencia de reflexiones al final del dispositivo es forzar una impedancia a la salida igual a la impedancia del medio, cuyo valor estándar es $Z_0 = 416.5 \text{ rayls}$.

Para ello es necesario crear un nuevo **Set** en la sección de salida, en este caso debe ser de caras de elementos, así que se vuelve a seleccionar el icono **Box Select** una vez ampliada la imagen y se selecciona la cara superior, marcando en el **Set Type** la opción de **Faces**. Finalmente se hace clic en **OK** (Figura 25).

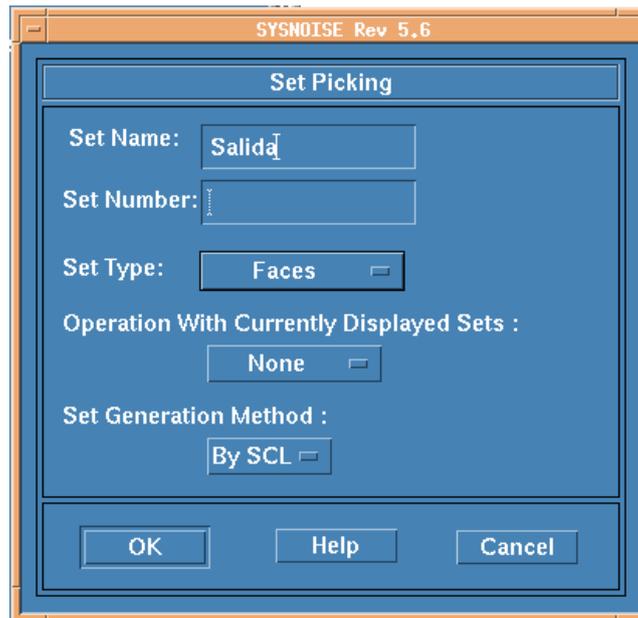


Figura 25: Selección de la cara de salida.

En el menú **Model**, esta vez se elige la opción **Absorbent Panels...**, en las opciones de **Boundary Type**, se marca **Impedance**, y se introduce el valor de **416,5** en la parte real. En **Face Selector...** se escoge el **Set Salida** y se hace clic en **Add** (Figura 26).

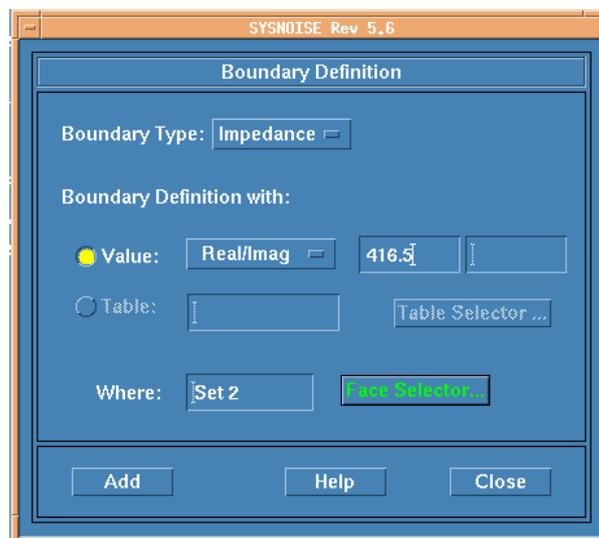


Figura 26: Condición de impedancia a la salida del silenciador.

Hasta aquí ya han quedado definidas las condiciones de contorno a la entrada y la salida, ahora ya se puede proceder a resolver el problema. En el menú **Analysis**, se hace clic en **Solve...**, en la ventana de este, se marca la opción de **Frequency**, se indica que el rango de frecuencia va de **20 Hz** a **3200 Hz**, con intervalos de **20 Hz**, se hace clic en **OK** (Figura 27) y el programa procederá a resolver el problema.

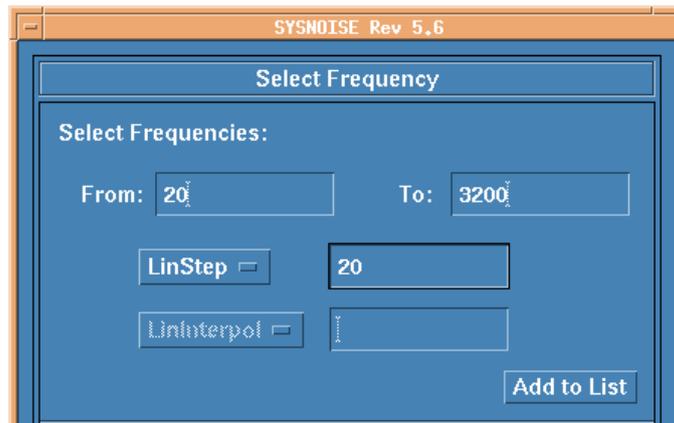


Figura 27: Rango de frecuencias para realizar los cálculos.

Una vez resueltos los cálculos se puede observar la solución de estos en el menú **Postprocess > Color Map...**, se elige la opción **Pressure** y desde el menú desplegable se puede seleccionar la frecuencia de interés. El gráfico de colores muestra en la figura el campo de presiones para las distintas frecuencias.

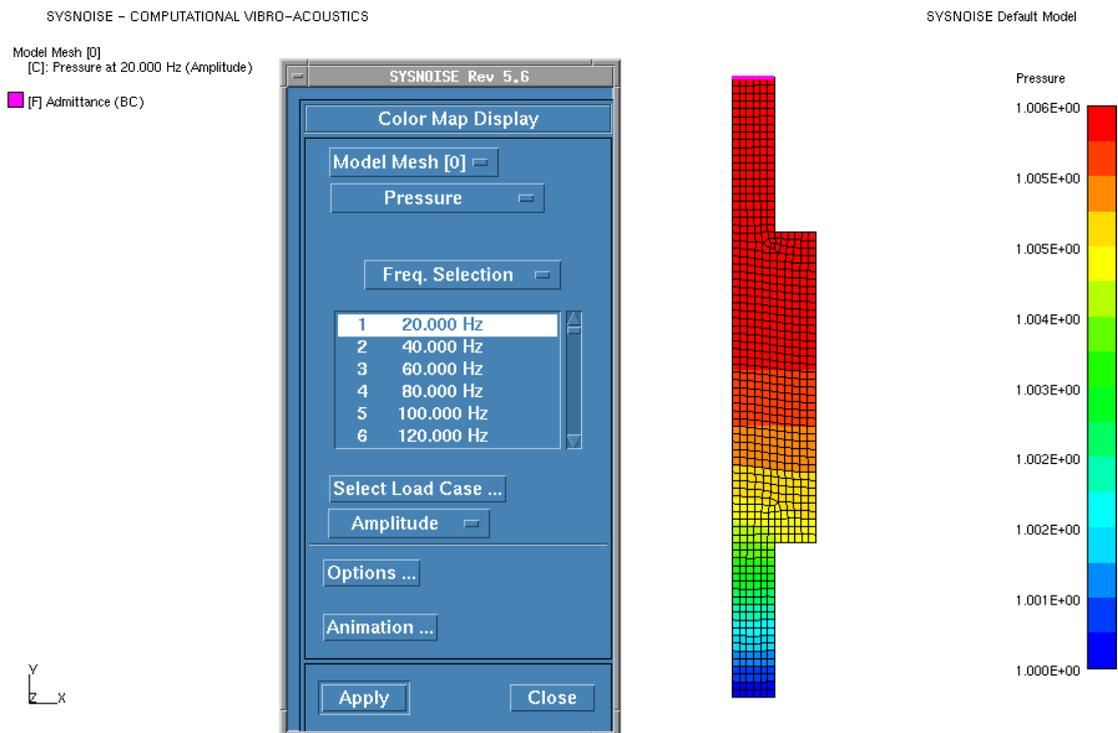


Figura 28: Campo de presiones a 20 Hz.

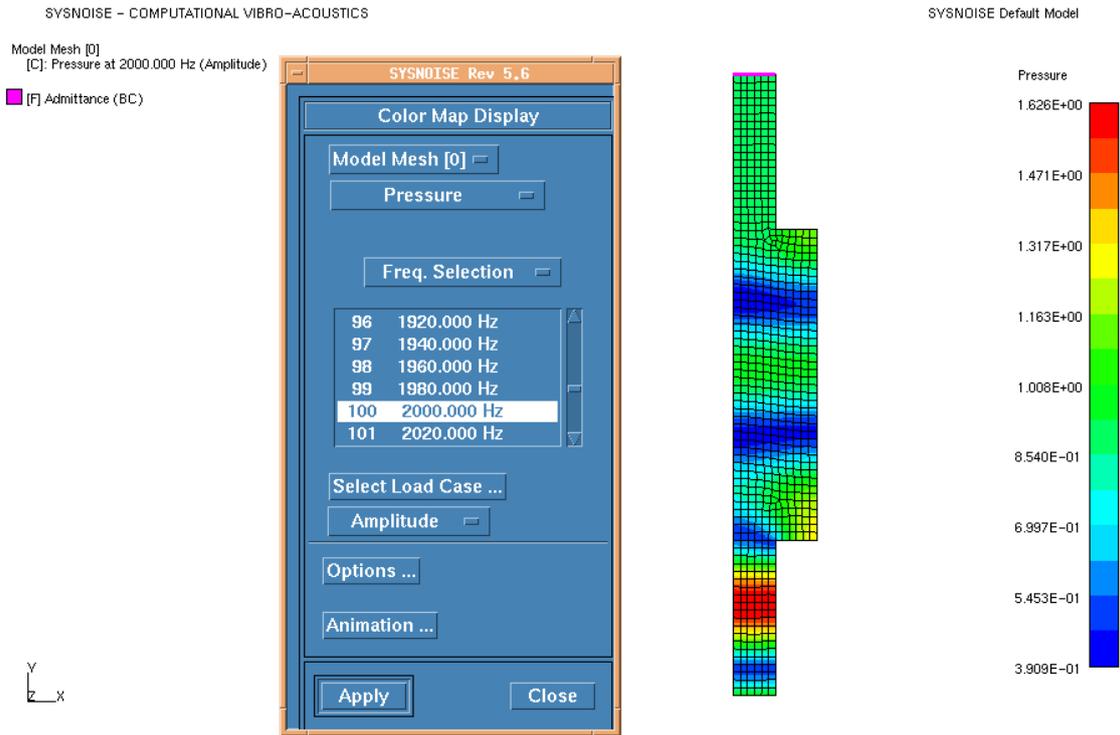


Figura 29: Campo de presiones a 2000 Hz.

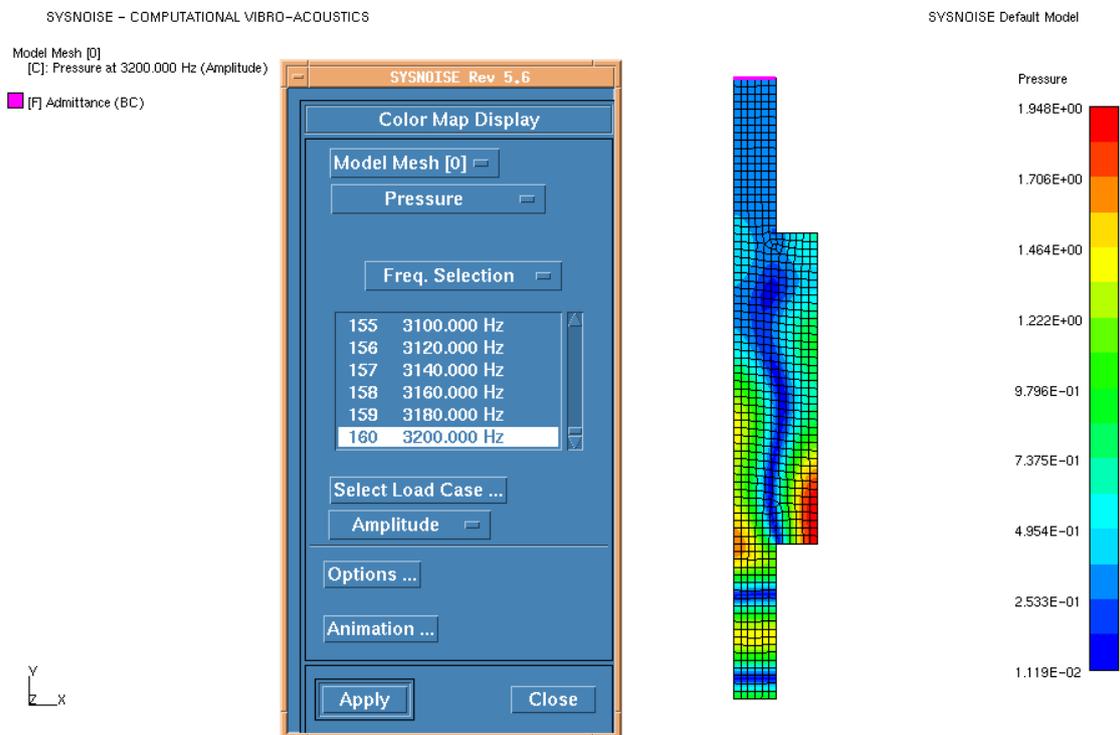


Figura 30: Campo de presiones a 3200 Hz.

El siguiente paso es procesar el resultado para obtener el índice que se está buscando, haciendo uso de la definición de TL dada por la ecuación (40)

$$TL = 20 \log \left(\frac{p_1 + Z_0 u_1}{2 p_3} \right) \quad (41)$$

Teniendo en cuenta que tanto en la entrada como en la salida se puede garantizar onda plana, la presión y la velocidad será la misma para cualquier nodo de estas secciones, se van a obtener las del nodo central.

Para crear los archivos, que posteriormente serán leídos en Mathcad, primero se debe conocer el número de nodo central en las secciones de interés, esto es entrada y salida, para ello se hace clic en el icono **Show/Hide Node Number**, y aparecerá la numeración de los nodos (Figura 31).

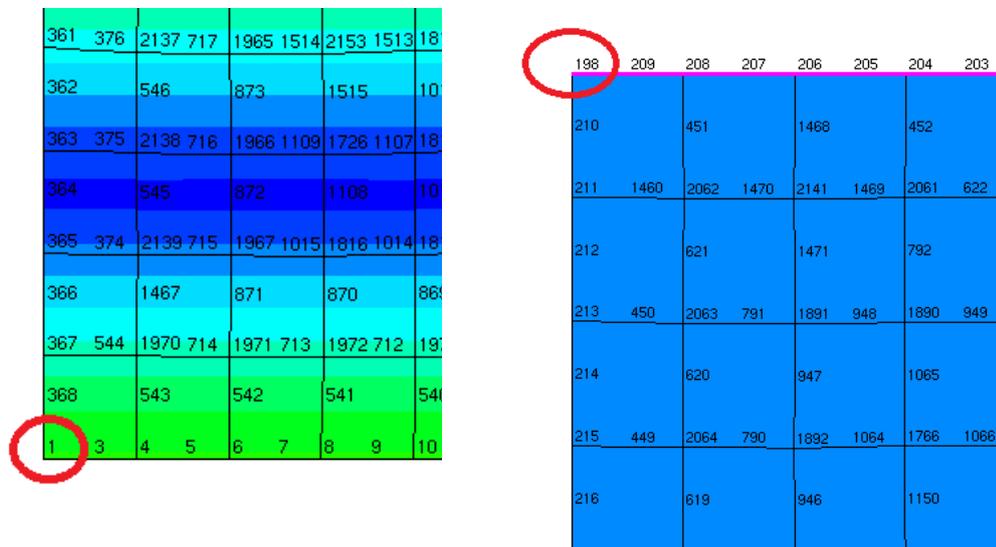


Figura 31: Nodos centrales del silenciador.

A continuación, se selecciona en el menú **Tools** la opción **Combine...**, en la ventana se hace clic en **Read**. Una vez abierta se introduce el número del nodo (1 para la sección de entrada), con la opción **Pressure** marcada, se hace clic en **OK** (Figura 32).

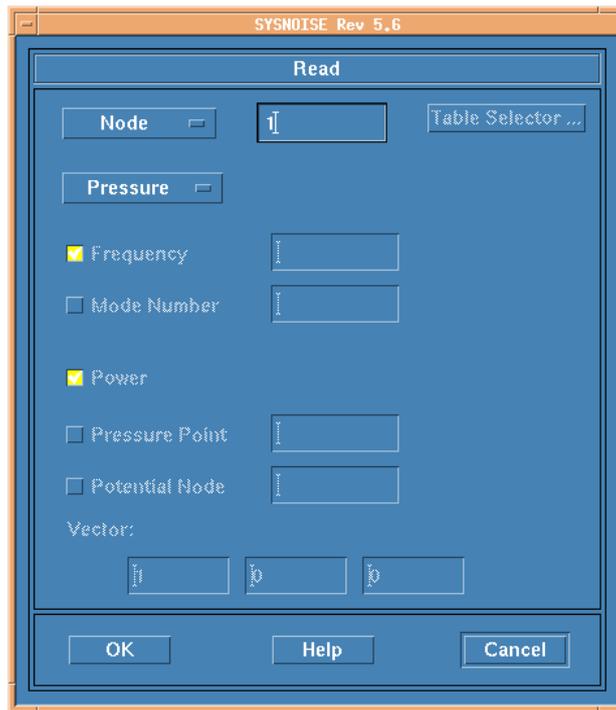


Figura 32: Lectura de los datos de la presión de entrada.

Aparecerá una tabla con los datos de presión de entrada, para guardarlos se hace clic en **Write**, y en el cuadro de **File** se escribe “pe.prn”, se debe guardar con la extensión “*.prn” para que Mathcad pueda leer el archivo (Figura 33).

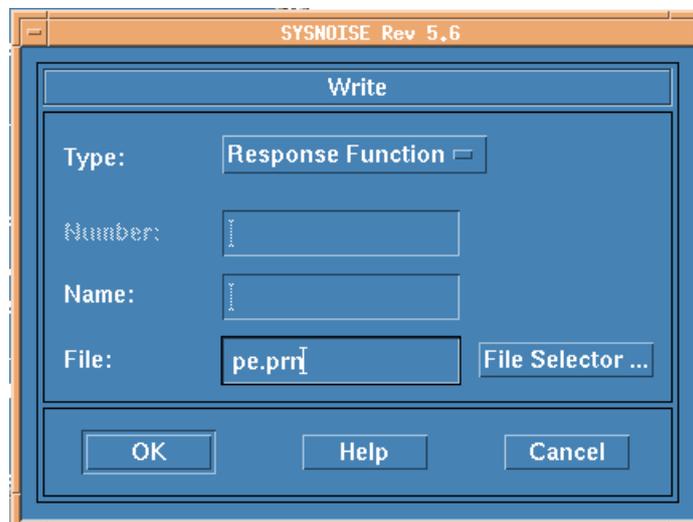


Figura 33: Exportación de los datos de la presión de salida con extensión “*.prn”

Se vuelve a hacer clic en el icono **Read**, se indica el número de nodo, y esta vez se escoge la opción **Velocity**, y en el vector se escribe (0, 1, 0), ya que, en esta sección la velocidad va en dirección del eje Y (Figura 34).

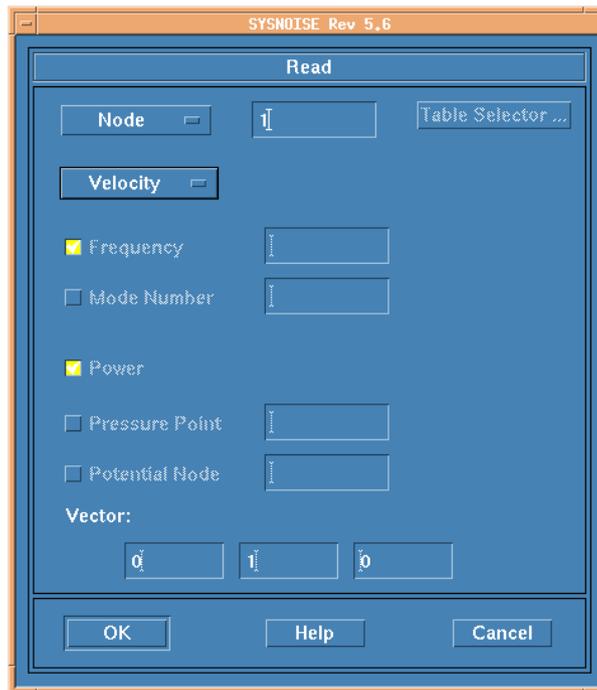


Figura 34: Lectura de los datos de velocidad de entrada en la dirección Y.

Se guarda el archivo de la velocidad de entrada con el mismo procedimiento que el anterior, con el nombre "ue.prn". Para sacar la presión y velocidad de salida se sigue el mismo proceso seleccionando en este caso el nodo de la sección de salida (198 según Figura 31) y se guarda con los nombres "ps.prn" y "us.prn" respectivamente.

Se guarda el archivo de Sysnoise con la extensión "*.sdb" en **File > Save As...**, con el nombre de "Camara2.sdb". Y con esto se da por finalizado el uso este programa.

Mathcad: obtención del TL

Ahora los archivos exportados de Sysnoise, que se encuentran en la estación de trabajo, deben copiarse al PC. Para ello volvemos a emplear el programa TotalCommander, se seleccionan los 4 archivos con la extensión "*.prn" y se pulsa **F5** (Figura 35).

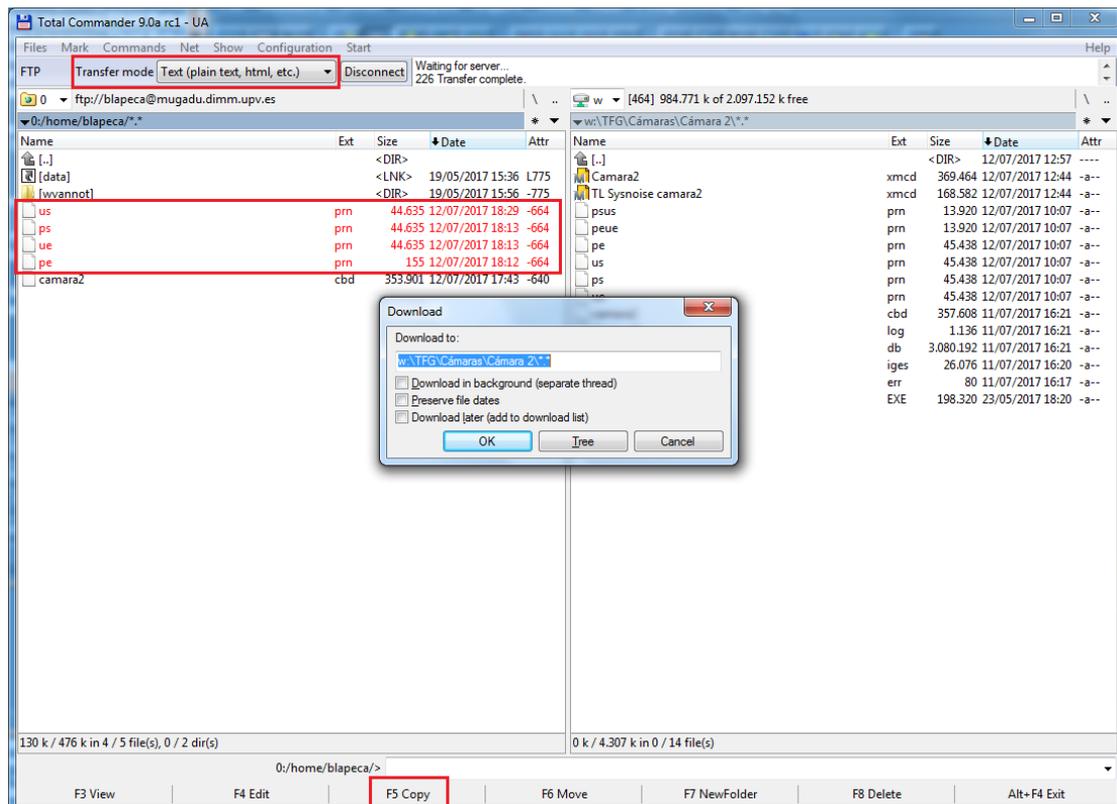


Figura 35: Copia de los cuatro archivos “*.prn” de la estación de trabajo al PC.

Una vez transferidos los archivos a la carpeta deseada, deben combinarse los ficheros para posibilitar su lectura con Mathcad, para ello se utiliza una aplicación llamada TSYSMC, en las que se combinarán los resultados de la sección de entrada por un lado y los de la sección de salida por otro, creando dos ficheros nuevos “peue.prn” y “psus.prn” (Figura 36), que ya podrán ser leídos por Mathcad. Estos ficheros deben encontrarse en la misma carpeta que el fichero de Mathcad, para poder ser leídos.

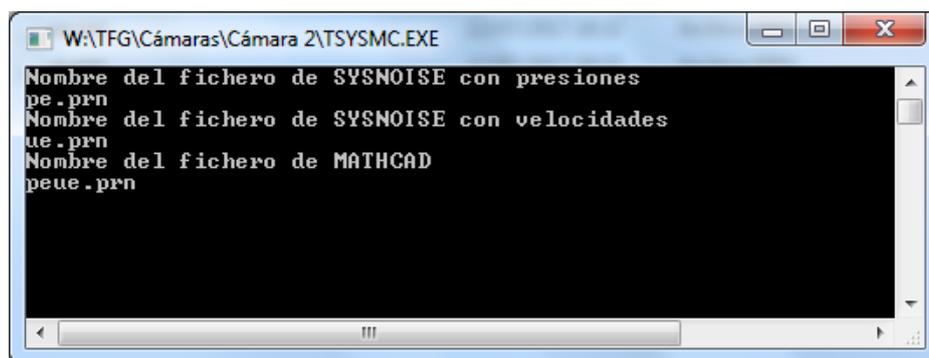


Figura 36: Combinación de archivos.

En el archivo para calcular el TL , se ha utilizado la ecuación (41). Las gráficas de pérdidas de transmisión TL con los datos obtenidos en Sysnoise se muestran a continuación.

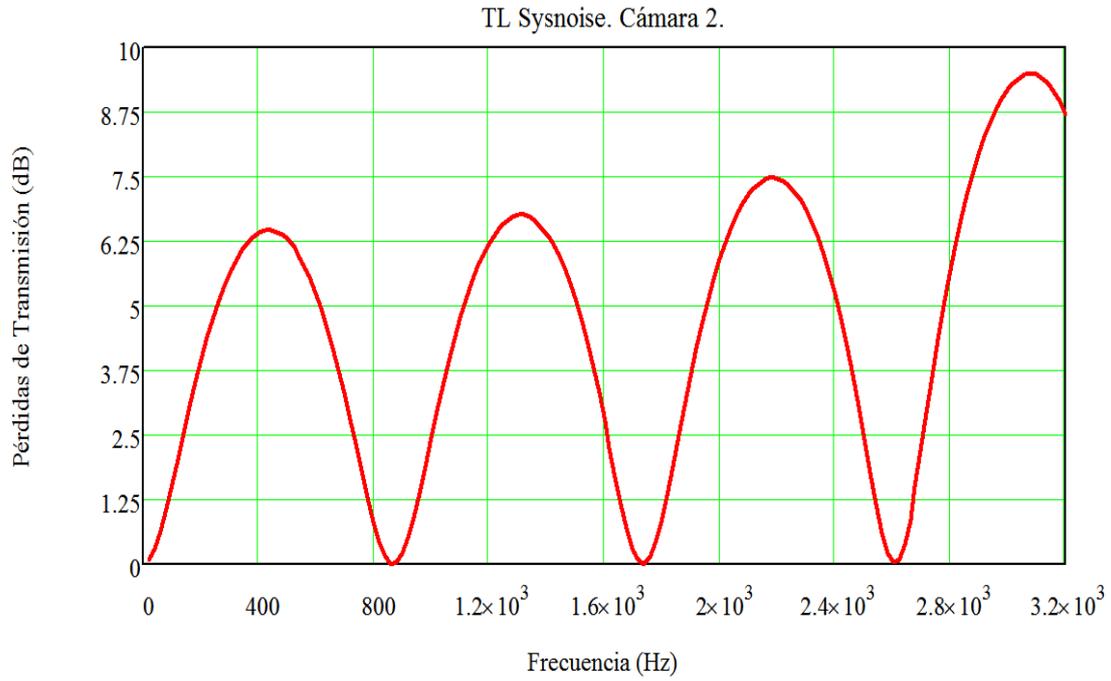


Figura 37: Gráfica del TL de la cámara 2 con los datos obtenidos en Sysnoise (MEF).

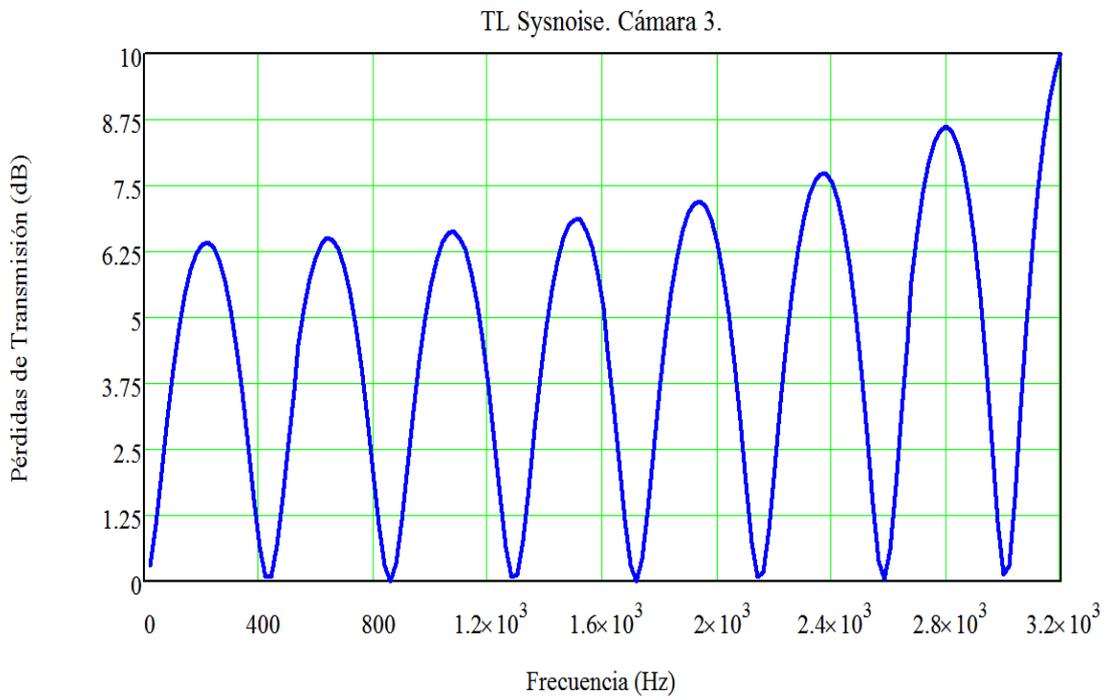


Figura 38: Gráfica del TL de la cámara 3 con los datos obtenidos en Sysnoise (MEF).

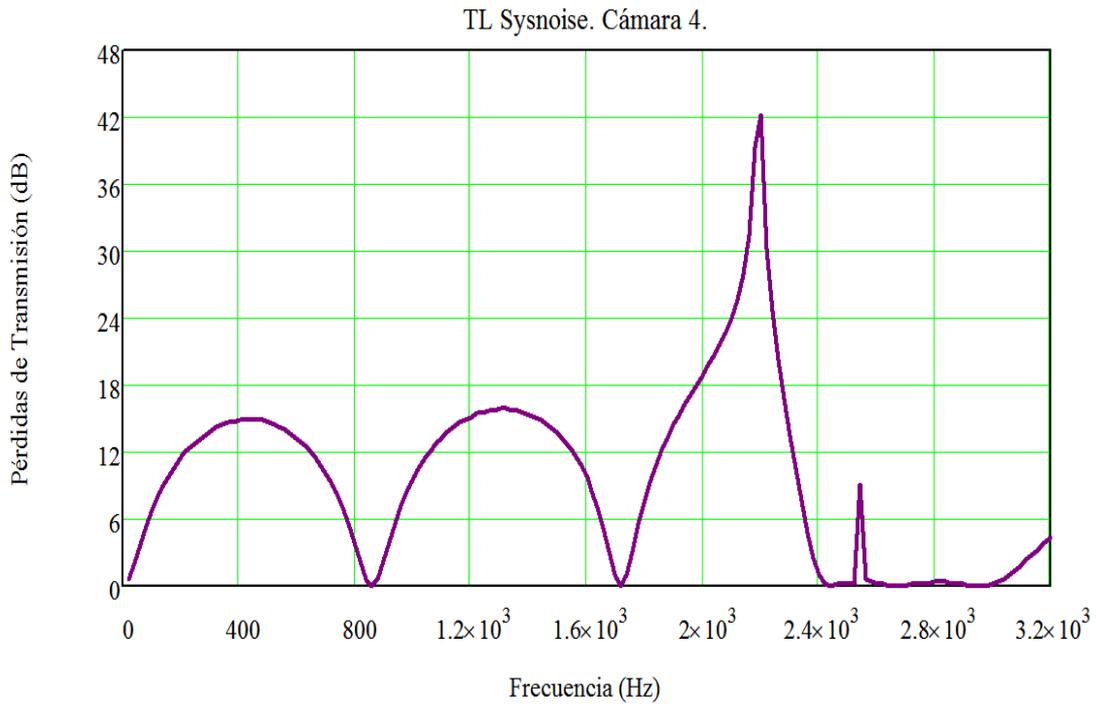


Figura 39: Gráfica del TL de la cámara 4 con los datos obtenidos en Sysnoise (MEF).

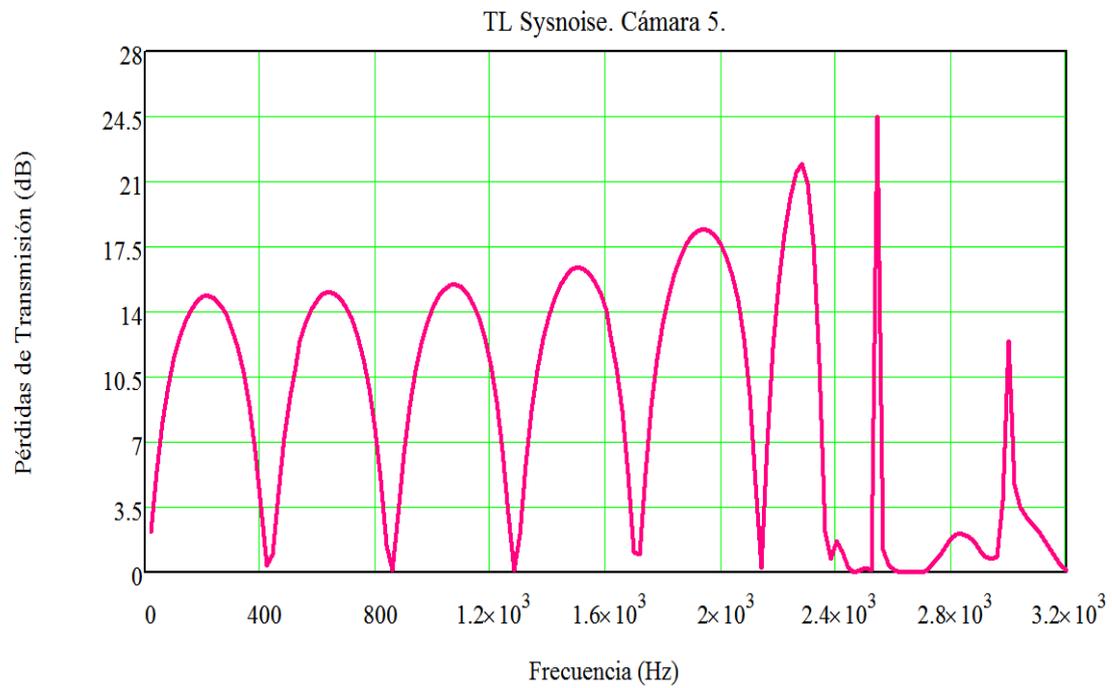


Figura 40: Gráfica del TL de la cámara 5 con los datos obtenidos en Sysnoise (MEF).

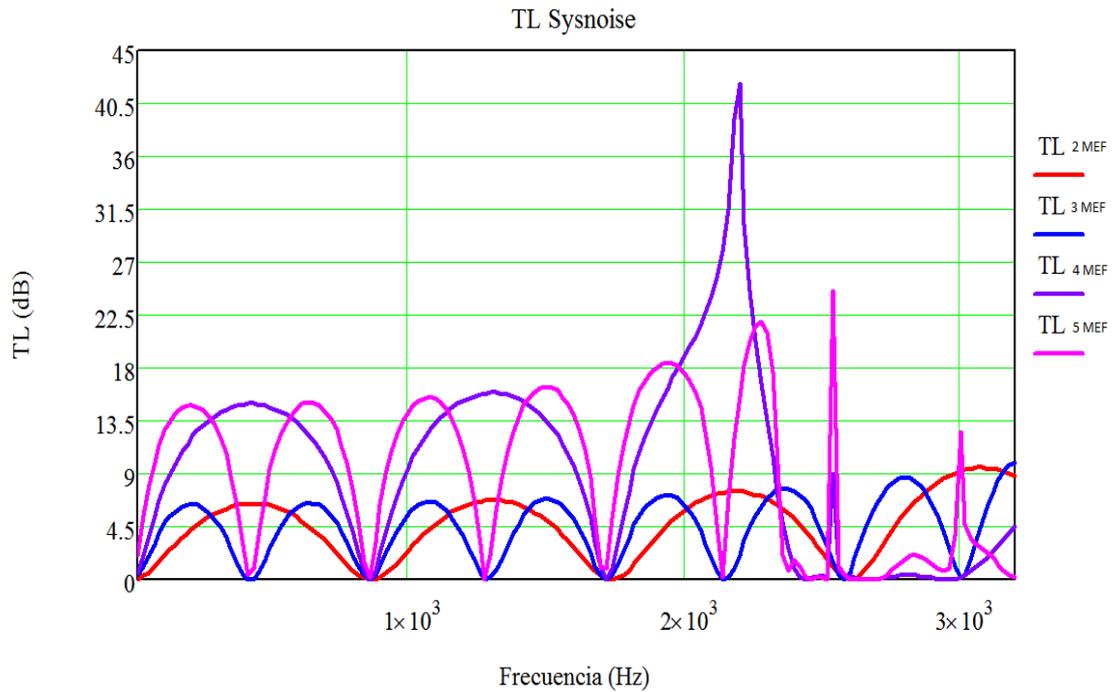


Figura 41: Gráficas del TL de las cámaras con los datos obtenidos en Sysnoise (MEF).

6.3. Comparación Onda Plana con el Método de Elementos Finitos

En este apartado se va a comparar los resultados obtenidos mediante la ecuación de Onda Plana y los obtenidos mediante Sysnoise, que utiliza el Método de Elementos Finitos.

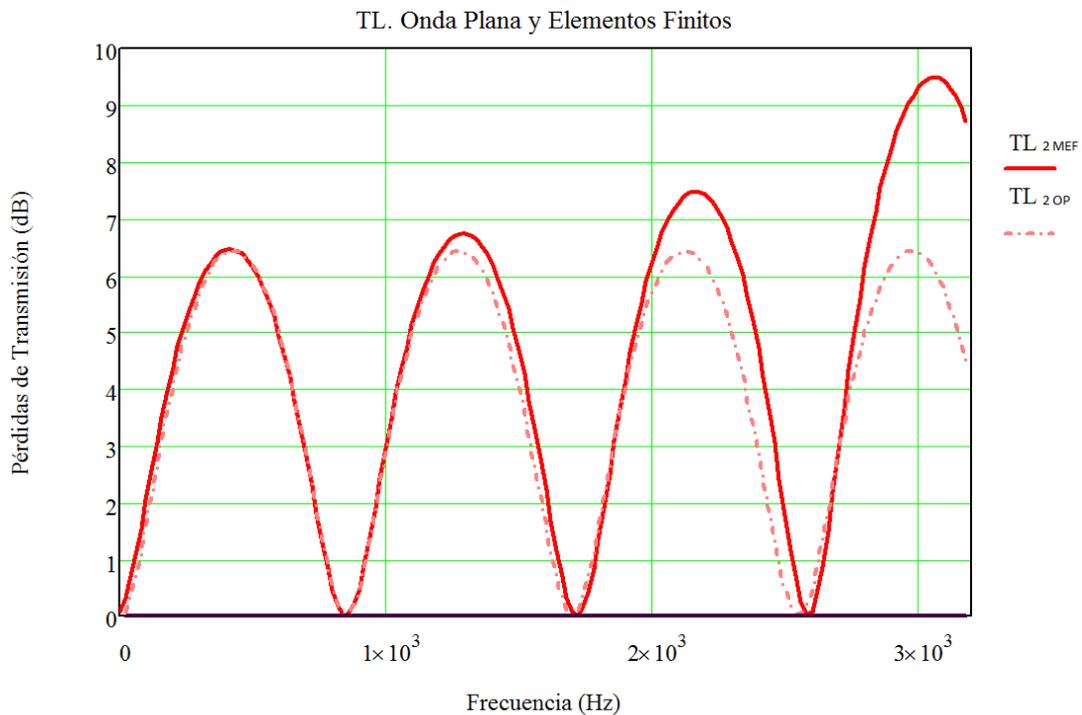


Figura 42: Cámara 2. MEF y OP.

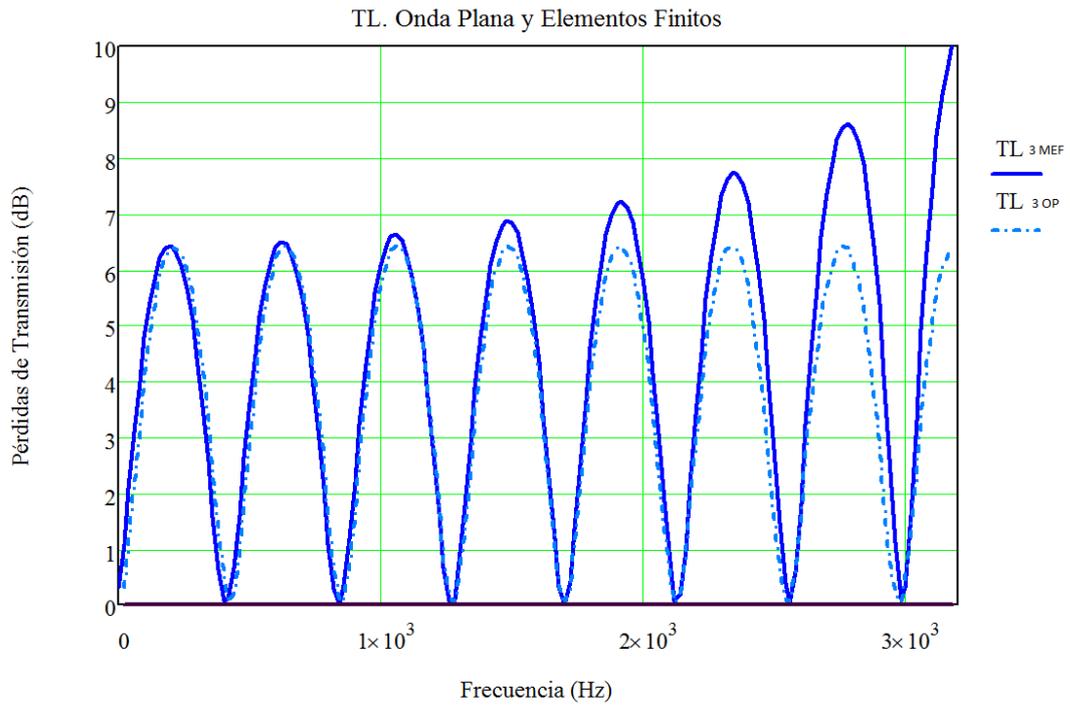


Figura 43: Cámara 3. MEF y OP.

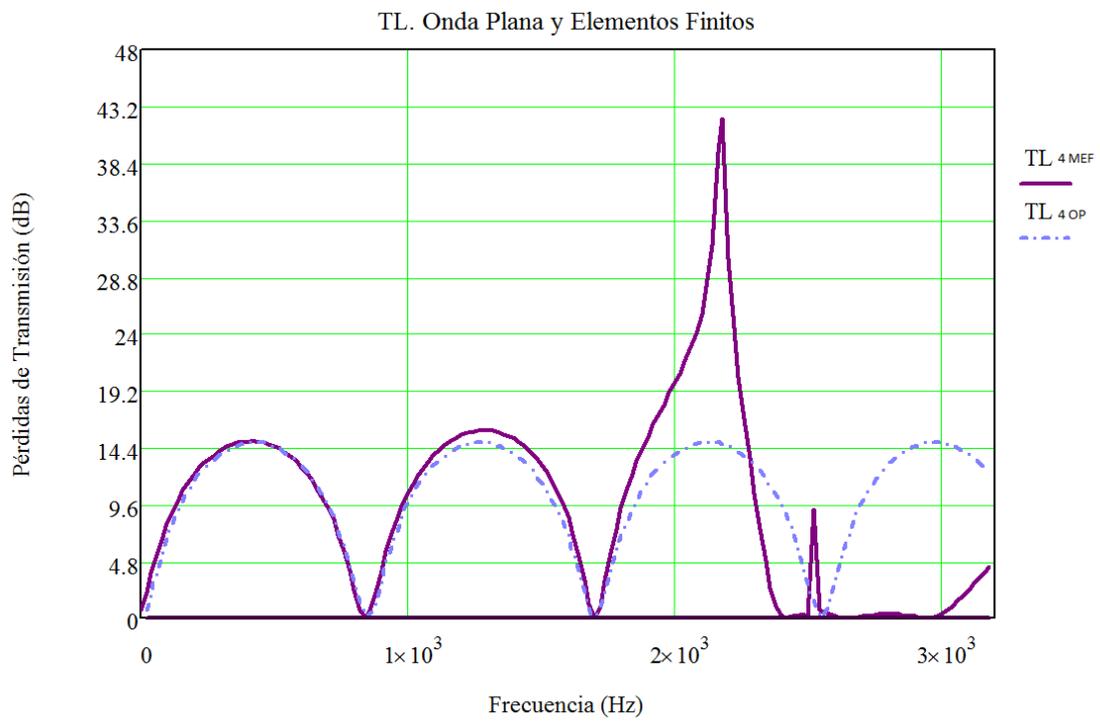


Figura 44: Cámara 4. MEF y OP.

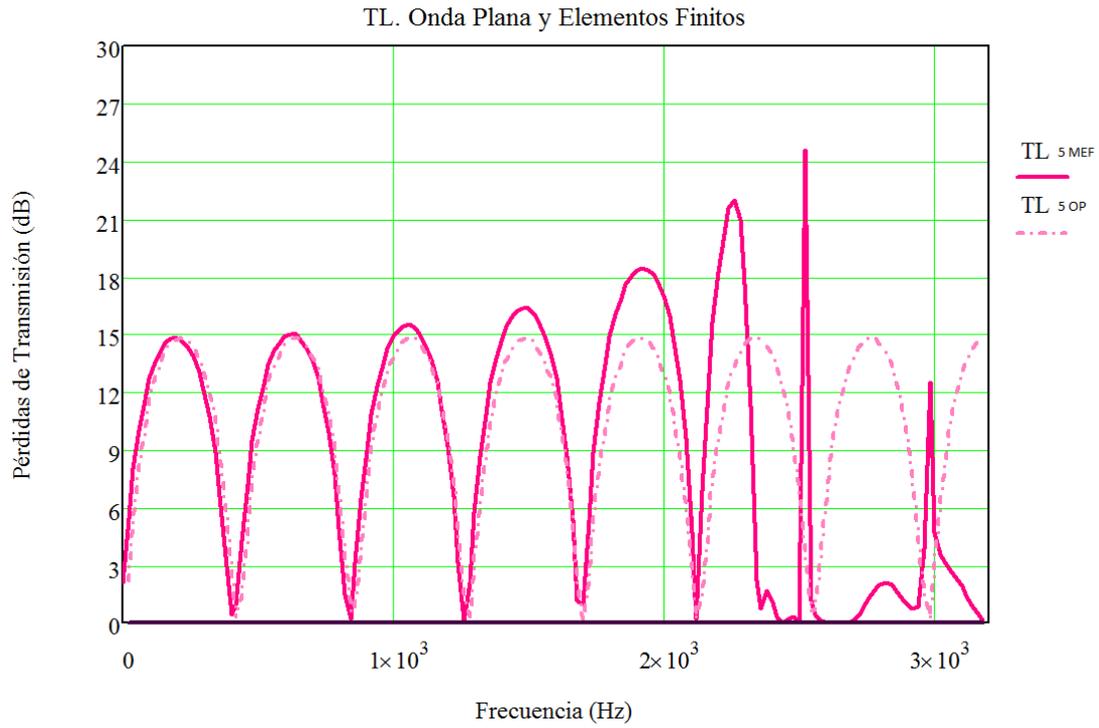


Figura 45: Cámara 5. MEF y OP.

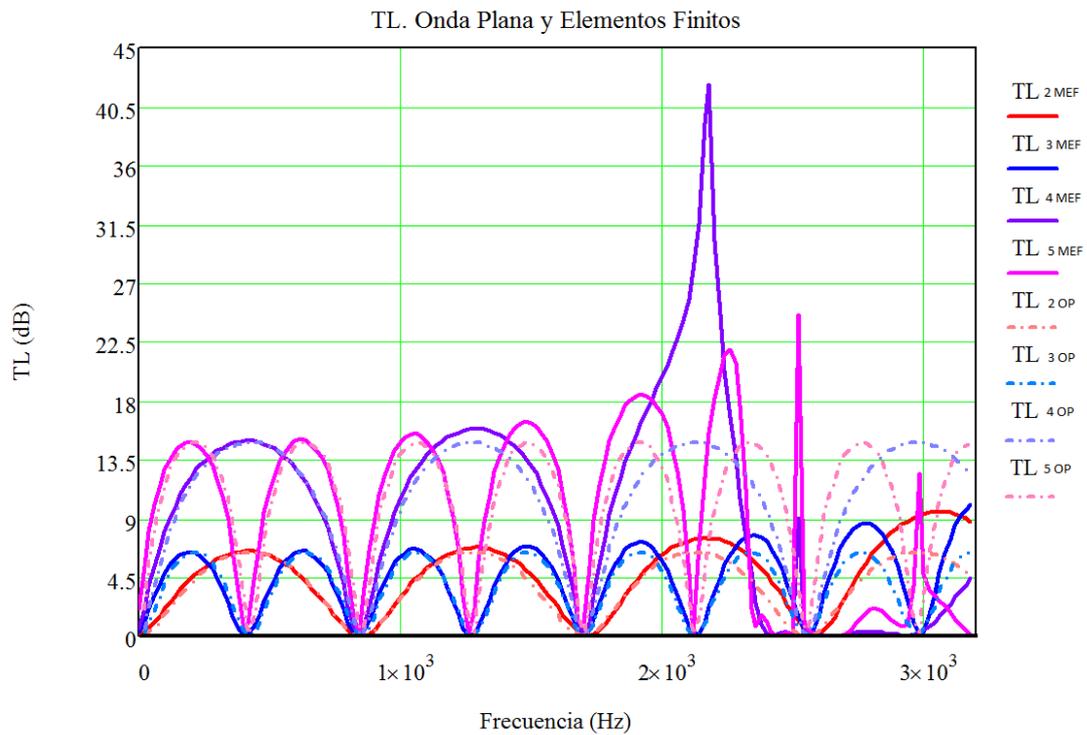


Figura 46: Cámaras. MEF y OP.

Como puede observarse en las gráficas (Figura 42, 43, 44, 45 y 46), hay un rango de frecuencias en las que ambos métodos dan prácticamente los mismos valores de

TL , pero a partir de un cierto valor de frecuencia, se observa una clara diferencia. Este valor se encuentra entre los 1200 y 1500 Hz. En la cámara 2 y 3 puede verse como las bandas de paso si coinciden para casi todas las frecuencias, pero la amplitud en cada cúpula por el MEF va aumentando, mientras que en OP se mantiene constante, teniendo amplitudes máximas diferentes. En las cámaras 4 y 5, las bandas de paso dejan de coincidir a partir de unos 2000 Hz y en esta frecuencia, la gráfica del TL , deja de tener forma de cúpula presentando una caída drástica de la atenuación.

Se puede decir que para en el rango de frecuencias “bajas” la hipótesis de Onda Plana proporciona resultados aceptables, pero a partir de un determinado valor de frecuencia este método deja de ser válido. Esto se debe a que el supuesto de Onda Plana es una hipótesis excesivamente simplificada, ya que considera que en la propagación no existen modos de orden superior. La frecuencia de corte correspondiente al primer modo de propagación no plano en un conducto de sección circular de diámetro D , es:

$$f_c = \frac{1.84 c_0}{\pi D} \quad (42)$$

Las frecuencias de corte asociadas a las cámaras estudiadas son, para las cámaras 2 y 3 $f_{c,cámara\ 2\ y\ 3} = 1870\ Hz$ y para las cámaras 4 y 5 $f_{c,cámara\ 4\ y\ 5} = 1124\ Hz$, que coincide con las frecuencias a partir de las cuales se observa un cambio de comportamiento.

Por tanto, el modelo de OP presenta como ventaja la simplicidad de su implementación, pero proporciona resultados válidos para rangos de frecuencia limitados. Como conclusión este método puede ser utilizado para realizar una estimación inicial del comportamiento acústico del silenciador, pero es necesario trabajar con modelos más sofisticados si se necesita conocer con precisión cual es la respuesta en un rango de frecuencias elevadas.

6.4. Datos experimentales

En este trabajo de fin de grado no se han realizado ensayos de las cámaras pero, como ya se ha nombrado anteriormente, un estudiante del Máster de Industriales, ha realizado un Trabajo Fin de Máster afín a este, de modo que se dispone de sus resultados experimentales que se van a emplear para ser comparados con las previsiones numéricas obtenidas en Sysnoise.

Los resultados obtenidos mediante medidas se encuentran en un archivo Excel. Para que Mathcad pueda leerlo, se ha copiado la columna de los datos TL obtenidos en un documento de texto que ha sido guardado con la extensión “*.prn” (Figura 47).

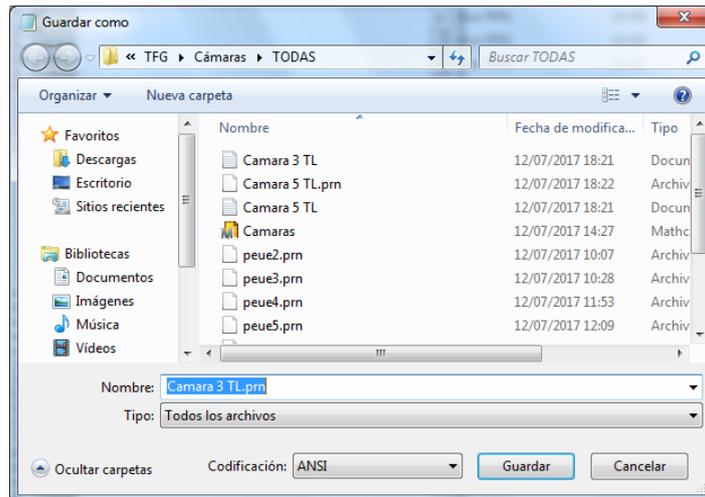


Figura 47: Documento de texto con los datos experimentales de la TL.

Dado que Mathcad reconoce como separador decimal el punto, en el texto se deben sustituir las comas “,” por puntos “.”, para ello abrimos el archivo con Notepad++. Una vez abierto se hace clic sobre el icono **Find...**, se abre una ventana y se marca la pestaña **Replace**. En esta se rellenan los campos de **Find what** y **Replace with** con una “,” y “.” respectivamente. Para finalizar se pulsa el botón **Replace All** (Figura 48).

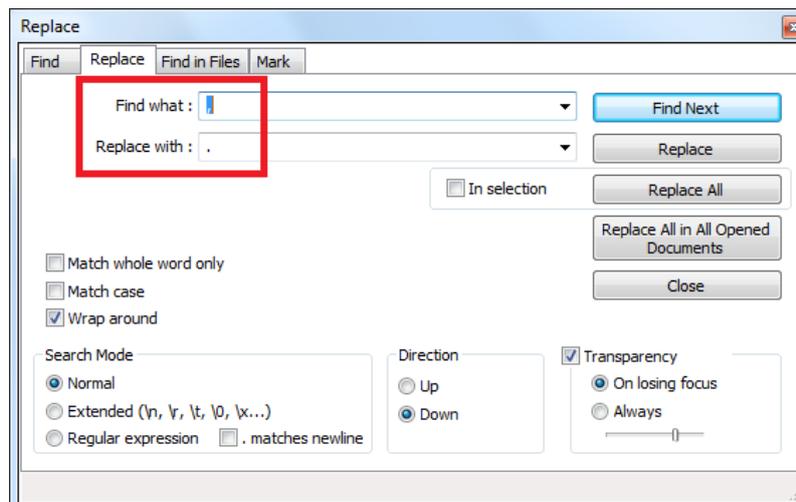


Figura 48: Reemplazar las comas por puntos en Notepad++.

Ahora el archivo de Mathcad puede leer los datos experimentales y compararlos con los obtenidos por Sysnoise.

6.5. Comparación del Método de Elementos Finitos con el Experimental

En este apartado se procede a comparar los resultados obtenidos en Sysnoise con los experimentales (Figura 49, 50, 51 y 52).

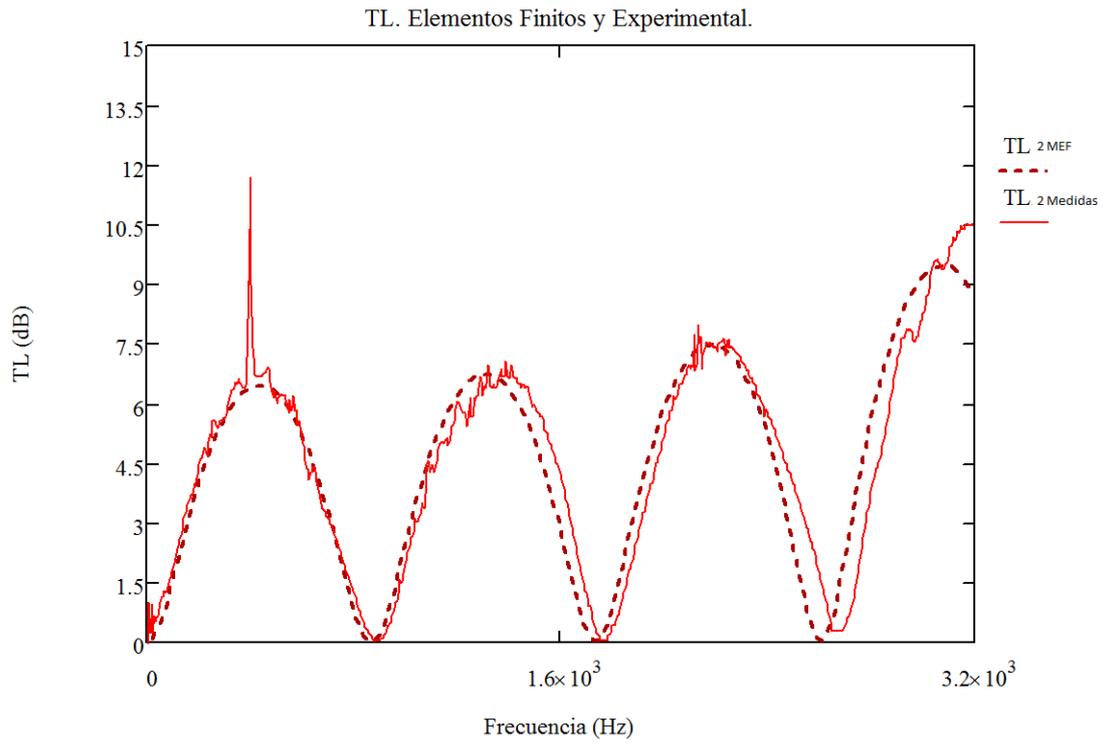


Figura 49: Cámara 2. MEF y ensayos.

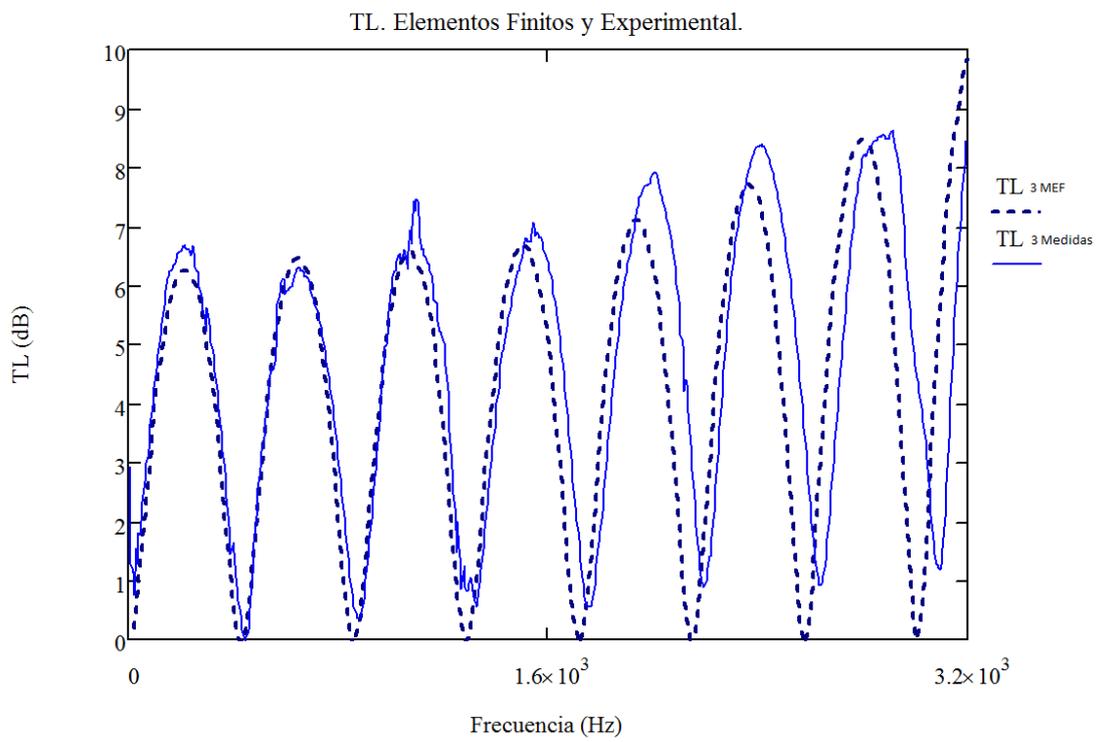


Figura 50: Cámara 3. MEF y ensayos.

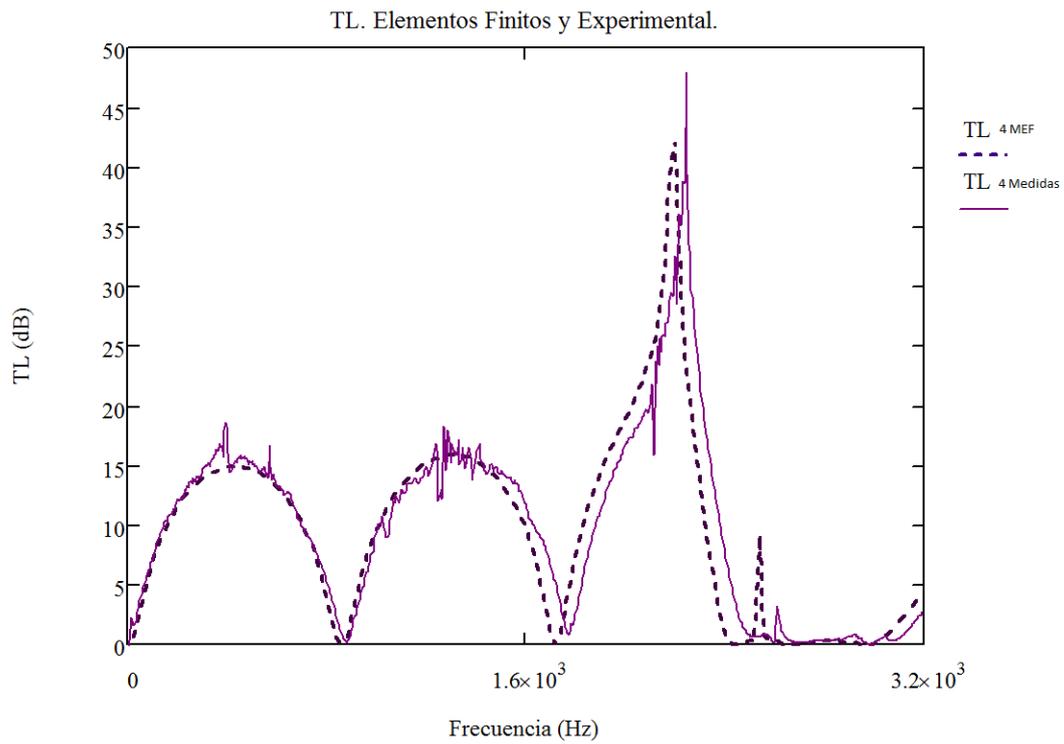


Figura 51: Cámara 4. MEF y ensayos.

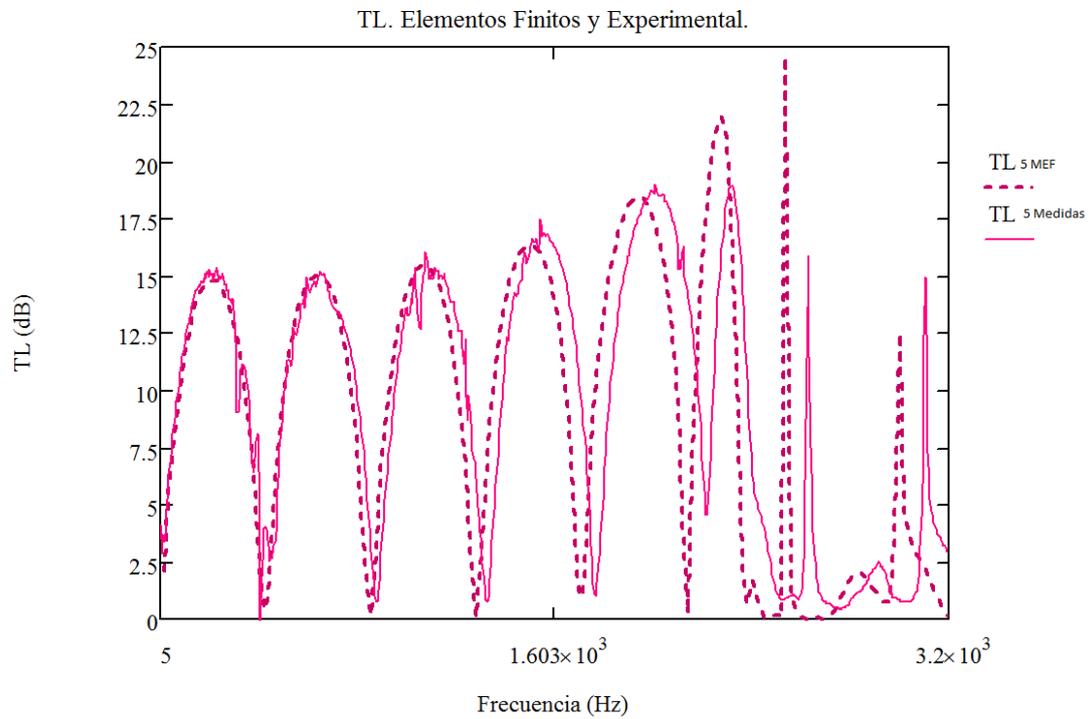


Figura 52: Cámara 5. MEF y ensayos.

Como puede observarse, el método por elementos finitos ha dado unos resultados bastante similares a los obtenidos experimentalmente. Aun así, se puede observar

un desplazamiento en frecuencias. Las bandas de paso de los datos experimentales se desplazan a frecuencias superiores a las obtenidas por el MEF, este desplazamiento es mayor a medida que aumenta la frecuencia. Esto es debido a la diferencia de temperatura entre el modelo y el sistema experimental. Los cálculos realizados en Sysnoise considera que la velocidad del fluido y la densidad del mismo tienen unos valores de $c_0 = 340 \text{ m/s}$ y $\rho_0 = 1,225 \text{ kg/m}^3$ respectivamente, estos datos serían los correspondientes a una temperatura de $T = 15 \text{ }^\circ\text{C}$. Mientras que los datos experimentales han sido adquiridos a otras temperaturas, por lo que el valor de la velocidad y densidad del fluido no coincide, y por ello el resultado de las pérdidas de transmisión dan unos valores desplazados con respecto a los calculados por Elementos Finitos.

Se observa también que en las bandas de paso el TL experimental no llega a anularse, pero sí lo hace el calculado numéricamente. La razón de esta discrepancia se encuentra en que en la simulación numérica, el fluido es considerado como gas perfecto e ideal, por tanto, sin pérdidas por fricción y con viscosidad nula ($\mu = 0$). Sin embargo, el fluido real tiene asociado un consumo de potencia acústica por pérdidas viscosas que sí es detectado por el sistema experimental dando un valor de TL no nulo en las bandas de paso.

6.6.MEF teniendo en cuenta características reales del aire.

Para poder comparar los resultados bajo las mismas condiciones ambientales, se vuelven a realizar los cálculos en Sysnoise, esta vez se cambiarán las propiedades del fluido que dependen de la temperatura. Estas son la densidad y la velocidad del aire que atraviesa el silenciador y, por tanto, la impedancia a la salida del mismo (Tabla 3).

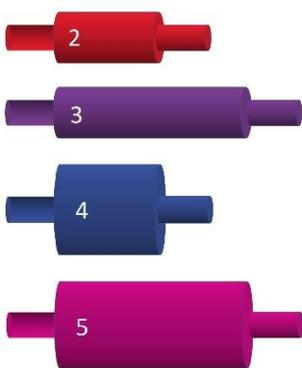


Tabla 3: Datos obtenidos con Mathcad.

Cámara	Temperatura del ensayo ($^\circ\text{C}$)	Densidad ρ_0 (Kg/m^3)	Velocidad c_0 (m/s)	Impedancia Z_0 (rayls)
2	28,6	1,1715	347,928	407,613
3	30	1,1661	348,734	406,617
4	28,7	1,1712	347,986	407,546
5	28	1,1739	347,582	408,019

Primero, se ha procedido a calcular los datos, de la densidad (43), velocidad (44), e impedancia (45), con un archivo de Mathcad.

$$\rho_0 = \frac{P_0 M}{R T} \quad (43)$$

$$c = Y \cdot \frac{\pi D^2}{4} \quad (44)$$

$$Z_0 = c \rho_0 \quad (45)$$

Siendo:

Y : Admitancia del conducto

D : Diámetro del conducto

c : Velocidad real del sonido en el aire

De este archivo se obtienen dos tablas. En las que se guardará en la primera columna las frecuencias, y en la segunda y tercera la parte real e imaginaria de la velocidad para un fichero y la parte real e imaginaria de la admitancia del medio de propagación para el segundo fichero. La admitancia es la inversa de la impedancia. Se trabaja con esta magnitud, porque el programa Sysnoise solo permite introducir condición de contorno impuesta por una impedancia (final anecoico) a través de tablas, en la opción de admitancia.

En cada cámara se obtienen tres tablas. Introduciendo la temperatura y el diámetro del tramo obtenemos dos tablas, una con la velocidad del sonido en el conducto y otra con dicha velocidad en la cámara (debido a la dependencia con el diámetro). La tercera tabla contiene la admitancia a la salida del conducto.

Una vez se graban las tablas de datos con extensión “*.tbl”, se procede a pasar los archivos a la estación de trabajo, tal y como se ha hecho en pasos explicados anteriormente en el apartado 6.2 (Figura 53).

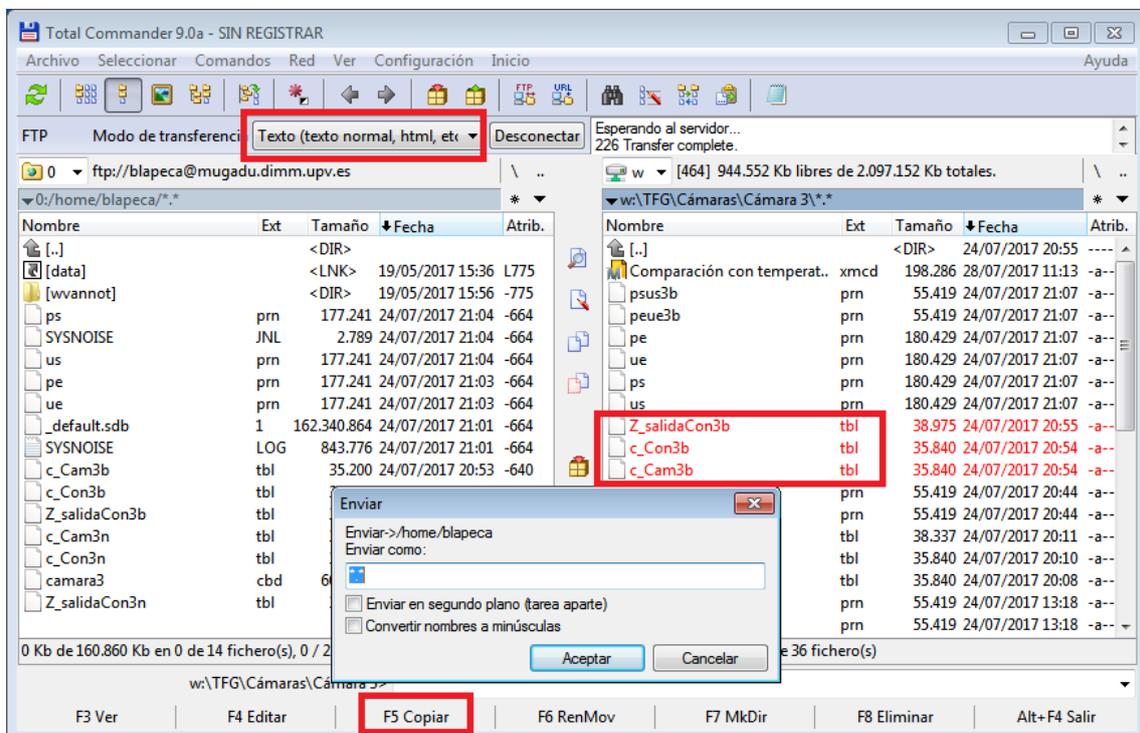


Figura 53: Importar archivos “*.tbl” a la estación de trabajo.

Al abrir el programa Sysnoise, se siguen los mismos pasos que en el párrafo 6.2 hasta antes de definir la impedancia a la salida. Para poder introducir los valores, se debe primero importar las tablas, en la opción **Model > Table > From File...** (Figura 54). Después, en **Model > Absorbent Panels...** Se marca la opción tabla y se introduce (Figura 55).

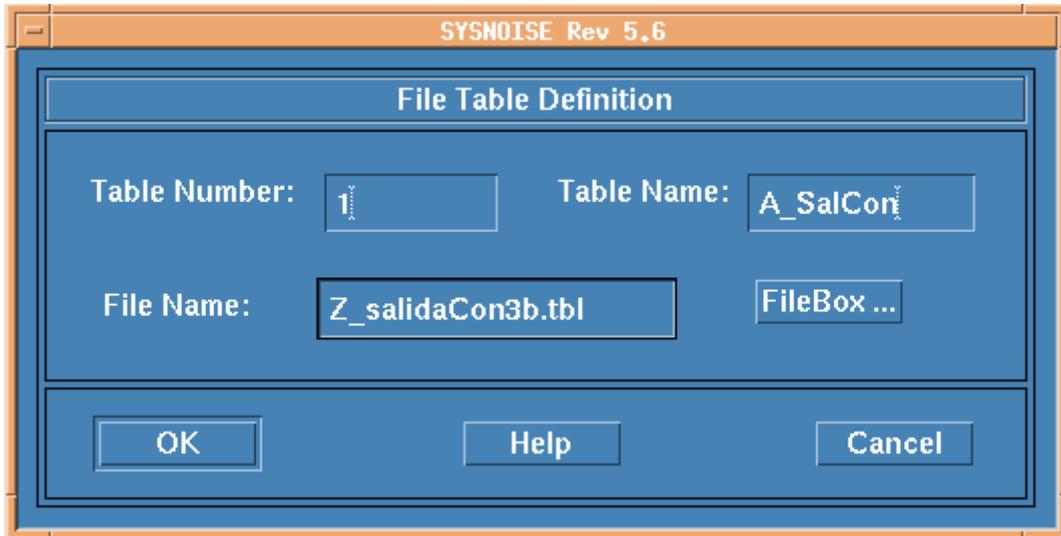


Figura 54: Importar tablas.

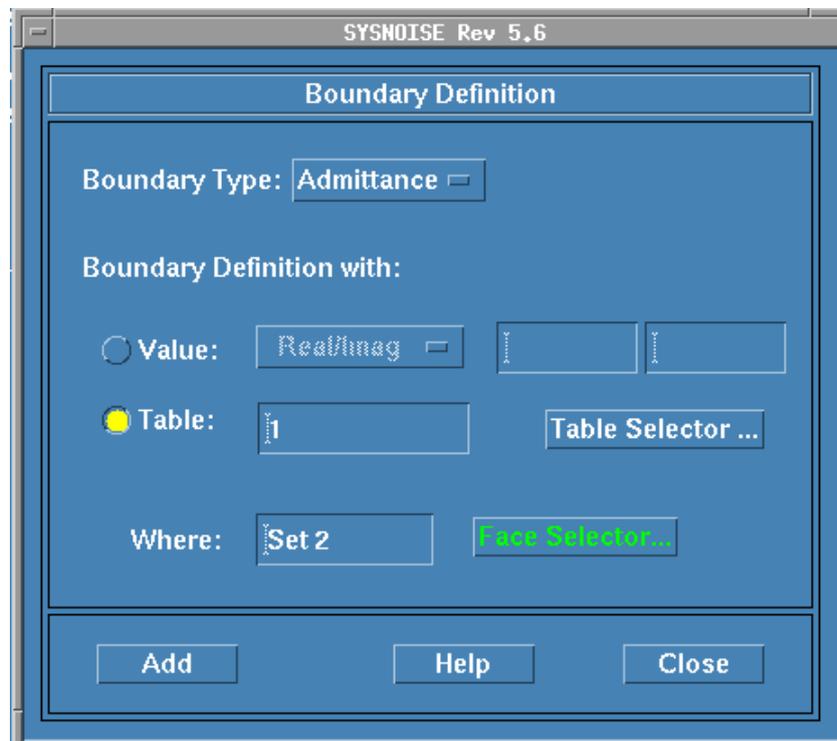


Figura 55: Definir valores de admitancia a la salida.

Ahora se van a definir las áreas del conducto de entrada y salida y la cámara, para así poder especificar los valores de la velocidad y densidad que hay en el fluido que

pasa por el silenciador. El tipo de *Set* en este caso será elemento (**Element**). Para ello se selecciona todo el tramo del conducto de entrada con el icono **Box Select**, se le da un nombre, en la opción de **Set Type**, se marca **Elements**, y clic en **OK** (Figura 56). El mismo procedimiento para el conducto de salida y la cámara. Aparecerá como en la Figura 57.

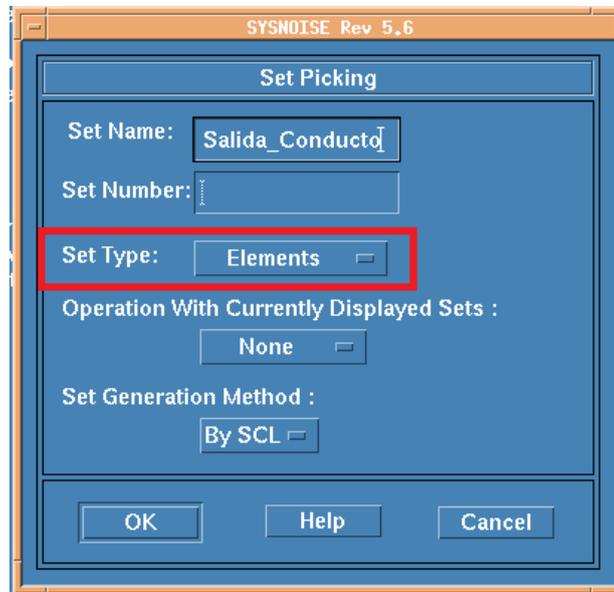


Figura 56: Definir sección de salida del conducto.

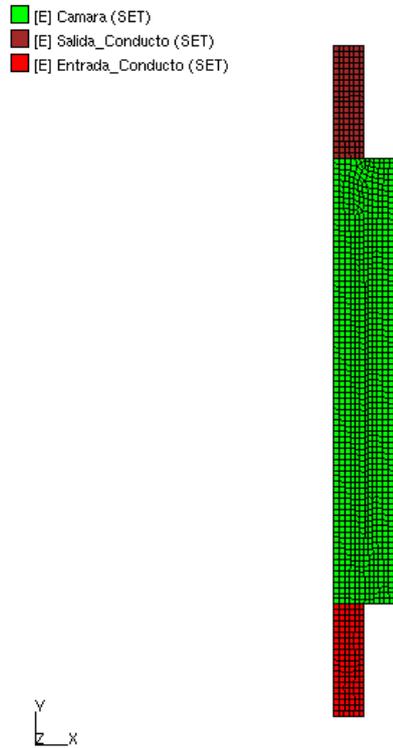


Figura 57: Secciones del silenciador.

Siguiendo el mismo procedimiento para la importación de la tabla de la impedancia, se introducen las dos tablas restantes, para así poder definir el fluido. Para ello se va a **Model > Fluid Properties > Material Definition > Fluid...** Una vez dentro en **Sound Velocity**, se marca **Table**, y se selecciona la tabla de la velocidad en la cámara. En **Mass Density** se cambia el valor, por el correspondiente a la temperatura de ensayo. Se selecciona el *Set* **Cámara** (Figura 58). y se hace clic en OK. Se repite un procedimiento análogo para los conductos de entrada y salida con la tabla de velocidades que le corresponde y los *Sets* **Entrada_conducto** y **Salida_conducto**.

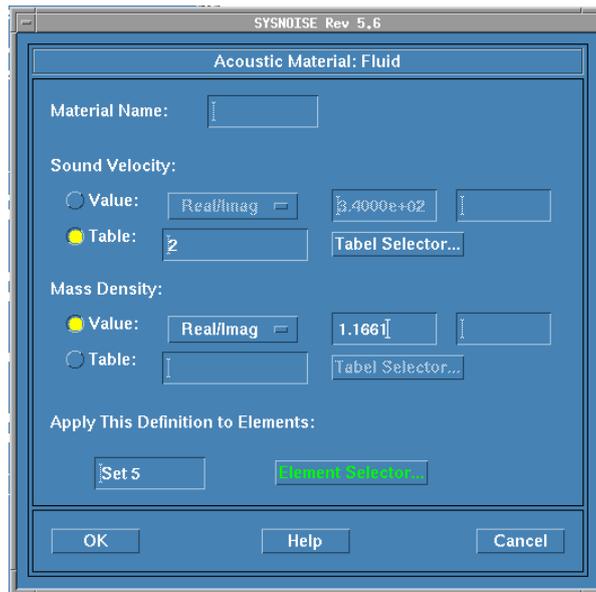


Figura 58: Definición del aire a la temperatura de 30 °C.

Esta vez, para proceder a resolver, se van a poner intervalos de 5 en la frecuencia (Figura 59). Una vez resuelto se siguen los mismos pasos que en los apartado 6.2.

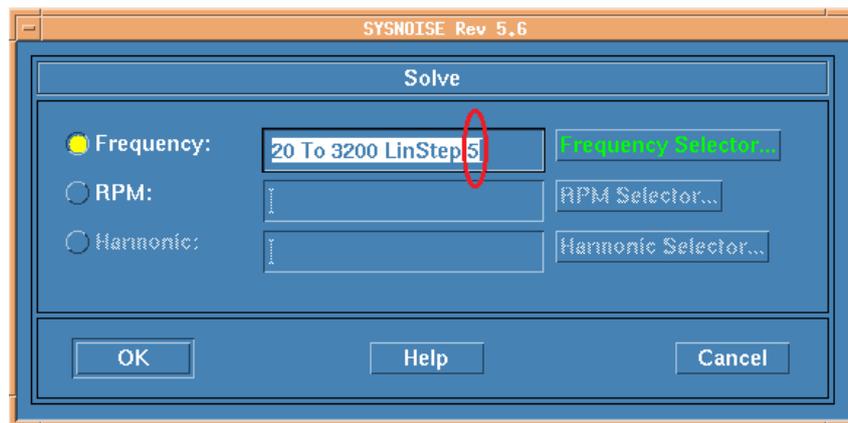


Figura 59: Resolver el problema con intervalos de frecuencia de 5 en 5.

6.7. Comparación MEF, teniendo en cuenta las características reales del aire, con el Experimental

Las nuevas gráficas obtenidas, teniendo en cuenta la temperatura con la que se tomaron los datos experimentales, son las siguientes.

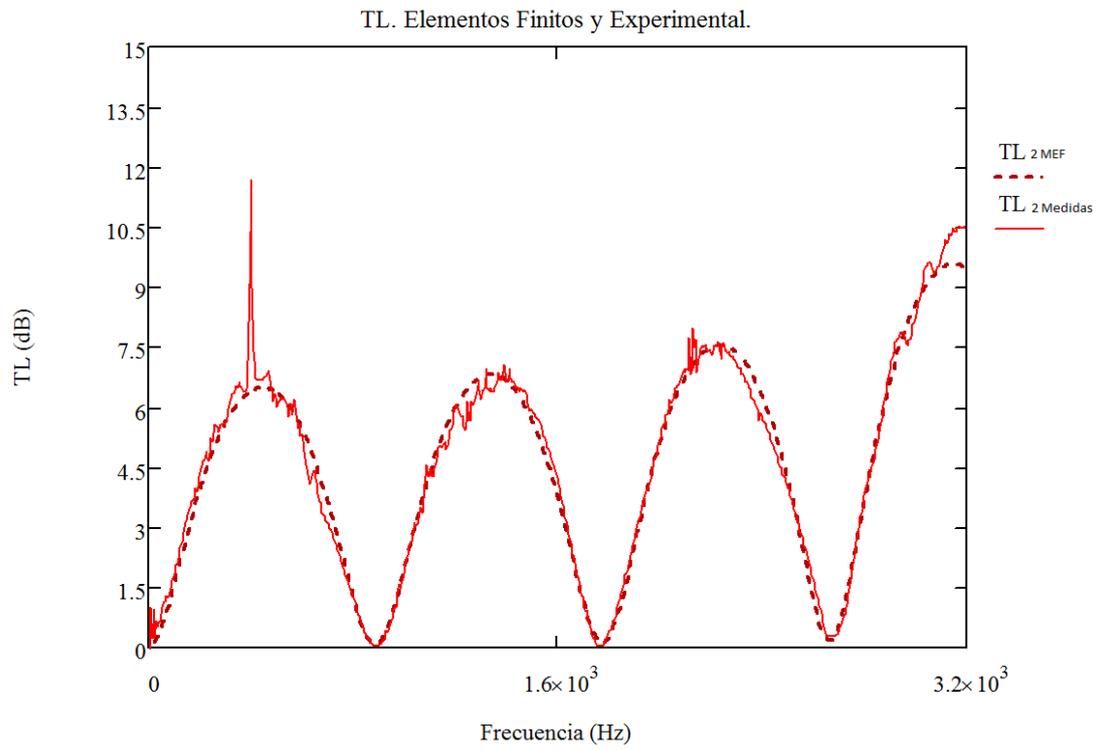


Figura 60: Cámara 2. MEF y ensayos. Teniendo en cuenta la temperatura.

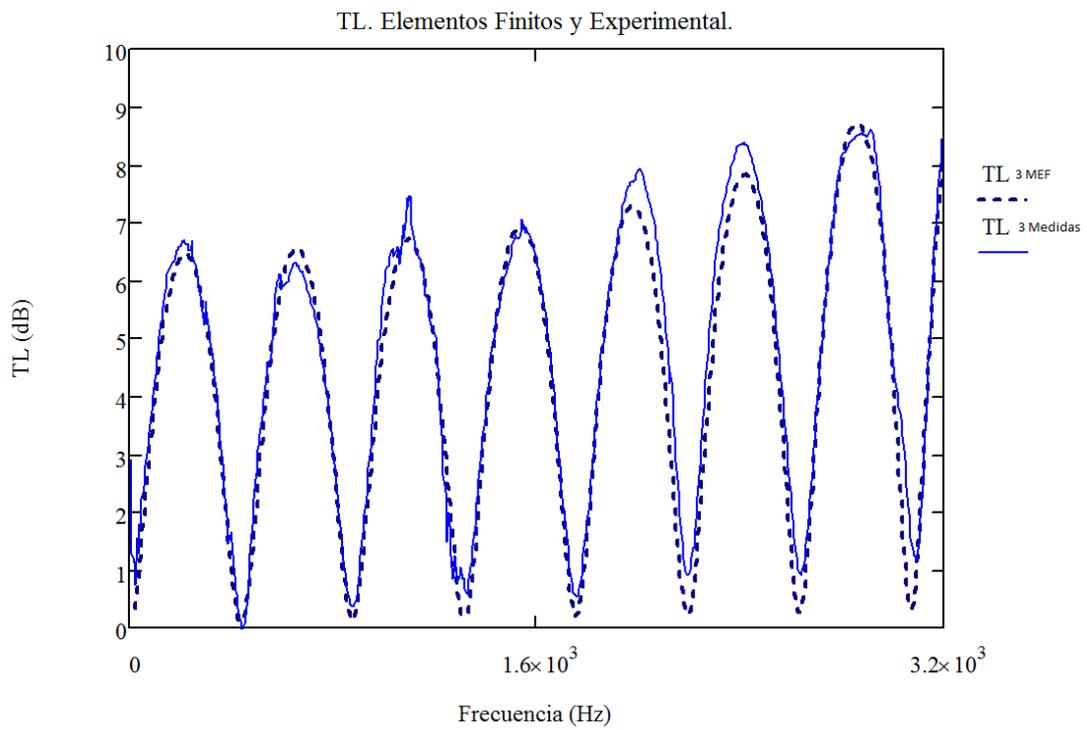


Figura 61: Cámara 3. MEF y ensayos. Teniendo en cuenta la temperatura.

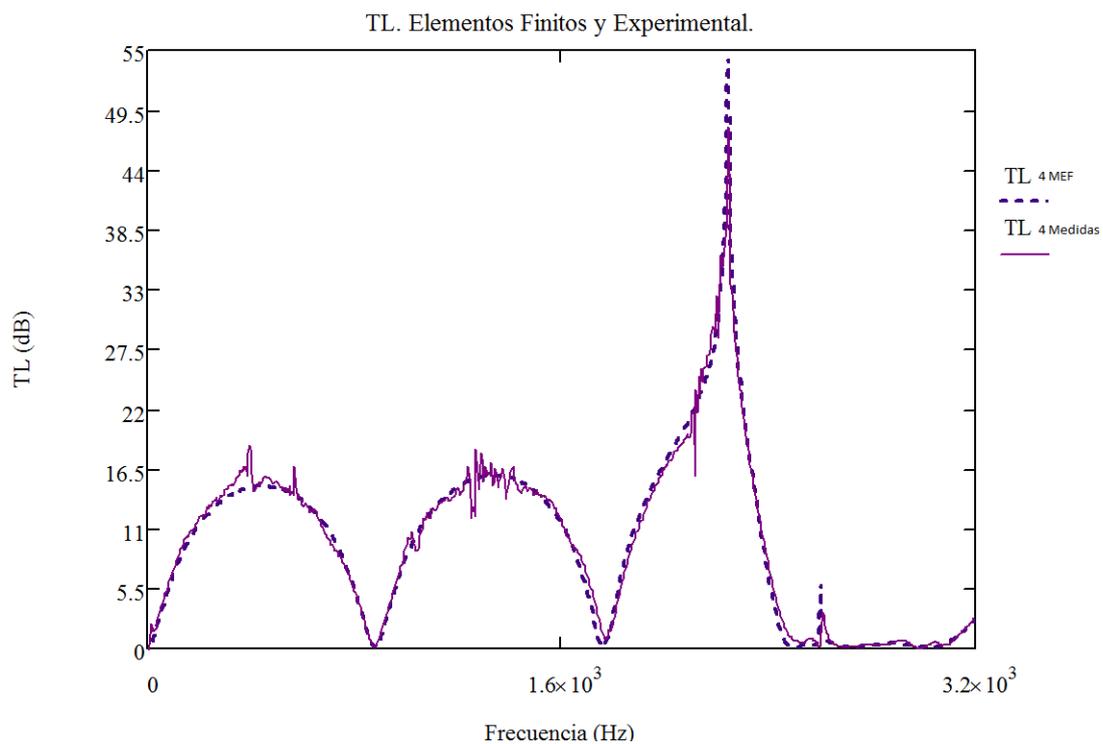


Figura 62: Cámara 4. MEF y ensayos. Teniendo en cuenta la temperatura.

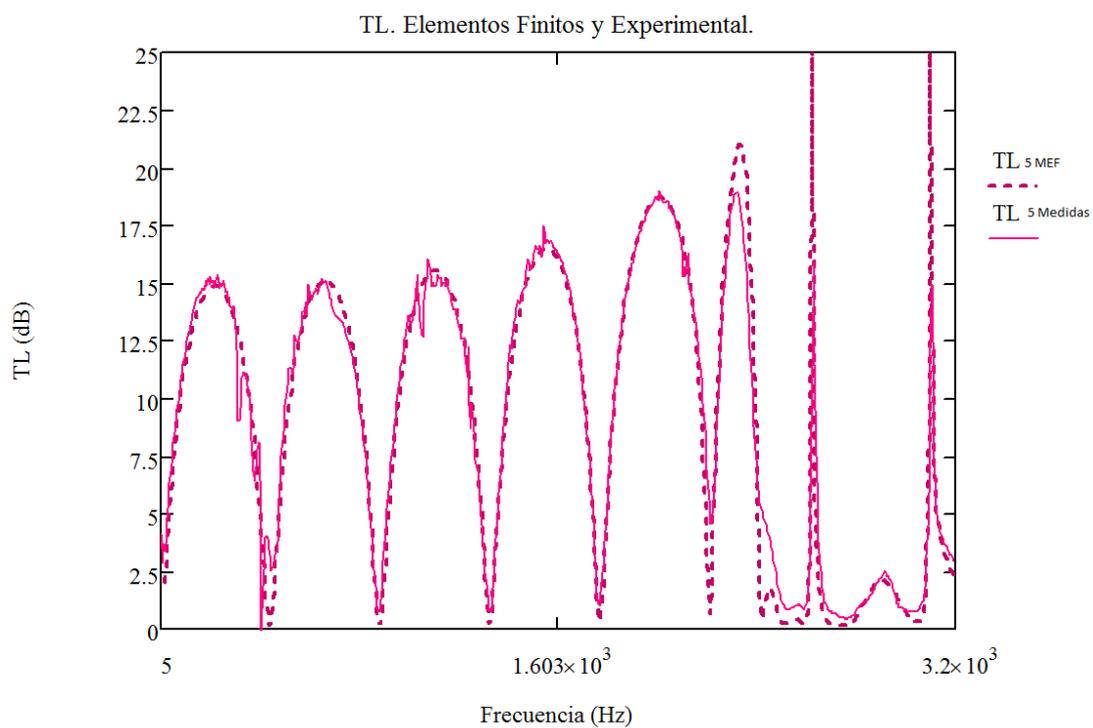


Figura 63: Cámara 5. MEF y ensayos. Teniendo en cuenta la temperatura.

Como puede observarse en las nuevas gráficas, los resultados obtenidos a través del método de elementos finitos, teniendo en cuenta las características reales del aire a la temperatura a la que se han realizado los ensayos, son mucho más afines a los obtenidos experimentalmente. Las bandas de paso se van desplazando hacia la derecha y el TL en las bandas de paso va aumentando tal y como ocurre en el experimental.

7. Conclusiones

En primer lugar, se ha obtenido el TL mediante la ecuación de Onda Plana, para posteriormente poder compararlo con el obtenido mediante el MEF (6.3). Se ha observado que la teoría de OP es válida para un rango de frecuencias hasta unos 1100 y 1800 Hz en el caso de las cámaras estudiadas, por lo que este método puede ser útil a la hora de realizar un diseño inicial, pero el método de elementos finitos da mejores resultados.

Más tarde, se ha comparado el MEF con los datos obtenidos experimentalmente (6.5). En esas gráficas se ha podido observar que, aunque las bandas de paso y las cúpulas eran muy similares, presentaban ciertas discrepancias tanto en el valor mínimo como en la localización de las bandas de paso. Se ha demostrado que eso es debido, por un lado, a que el programa por defecto realiza los cálculos para una temperatura de 15 °C y los datos experimentales se han medido con otras temperaturas, por otro lado, en la primera estimación numérica no se ha considerado pérdidas viscosas producidas por el medio, que si están presentes en un sistema real.

Para aproximar los valores estimados a los experimentales, se ha introducido en el modelo numérico las propiedades reales del aire (velocidad y densidad) correspondientes a la temperatura de los ensayos de cada una de las cámaras (6.7) con la inclusión de la viscosidad responsable de las pérdidas viscosas. Los resultados obtenidos, con esta modificación mediante el MEF, presentan gran similitud a los experimentales. Por lo tanto, con el programa de elementos finitos se alcanzan resultados válidos.

8. Bibliografía

Bo, A. (2014). Caracterización acústica de silenciadores reactivos. Cálculo numérico y validación experimental. Trabajo final de grado. Valencia.

Pedrosa Sánchez, A. M. (2015). Desarrollo de herramientas experimentales para la caracterización acústica de silenciadores en presencia de flujo medio. Tesis Doctoral. Valencia.

Pedrosa Sánchez, A. M. (2002). Planteamiento del problema acústico en conductos mediante elementos finitos. Trabajo de investigación. Valencia.

Denia Guzmán, F. D. (2015/2016). Vibraciones y acústica. Bloque de acústica. Apuntes. Valencia.

Teoría de propagación de ondas sonoras en conductos. documento: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4950/fichero/2.pdf>

López, N (2014). ¿Cómo nos afecta el ruido de los coches? Artículo: <http://www.autobild.es/practicos/sonoridad-los-coches-acaba-con-ruido-233593>

9. Presupuesto

9.1. Introducción

En este apartado se va a realizar un estudio de los costes necesarios para llevar a cabo este trabajo.

Para realizar el presupuesto no se ha considerado este trabajo como un trabajo de fin de grado, si no realizado por un ingeniero autónomo.

9.2. Estudio económico

9.2.1 Coste de mano de obra

Este trabajo puede ser realizado por un solo ingeniero, por lo que no será necesario incluir la mano de obra indirecta, solo se debe calcular el coste de mano de obra directa.

Se ha estado realizando en un periodo de 4 meses, durante 3 horas en días laborables, lo que son un total de 300 horas para llevar a cabo este trabajo.

El coste de los honorarios de un ingeniero es:

30 € por cada hora de investigación.

$$\text{Coste} = \text{Tiempo (horas)} \cdot \text{Coste Ingeniero (€/h)}$$

Tabla 1: Costes Honorarios Ingeniero

	Tiempo (h)	Coste /h	Coste Total (€)
Ingeniero	300	30	9.000

Pagos a la Seguridad Social:

Hay que tener en cuenta la cotización a la Seguridad Social, donde un Ingeniero corresponde al grupo 1 de cotización, por lo que la base mínima por hora que corresponde con este tipo de trabajo es de 1,84 €/h.

$$\begin{aligned} \text{Coste Seguridad Social} &= \text{Horas de trabajo} \cdot \text{Base de cotización (€/h)} \\ &= 300 \text{ (h)} \cdot 1,84 \text{ (h/€)} = 552 \text{ €} \end{aligned}$$

Los costes por pagos a la seguridad social son: **552 €**

El coste total de la mano de obra de este trabajo se calcula sumando el coste de los honorarios del ingeniero y el coste de la Seguridad Social.

Tabla 2: Costes totales de Mano de Obra

Honorarios de Ingeniero	9.000 €
Seguridad Social	552 €
Total	9.552 €

9.2.2 Amortización del Hardware y Software

Para los programas informáticos se considera un periodo de amortización de 5 años, mientras que los de un PC que tiene un periodo de amortización de 3 años.

$$\text{Amortización} = \text{Precio} \cdot \frac{\text{Tiempo Uso (meses)}}{12 \text{ meses/año}} \cdot \frac{1}{\text{Periodo Amortización (años)}}$$

Tabla 3: Coste de amortización del Software

Aplicación	Precio (€)	Tiempo de uso (meses)	Amortización (años)	Coste de amortización (€)
PC	800	4	3	89
Ansys	26.400	4	5	1760
Sysnoise	15.000	4	5	1000
Mathcad	450	4	5	30
Total				2.879 €

9.2.3 Gastos generales

En este apartado se contabilizan los gastos del trabajo como el mantenimiento de los equipos informáticos, el mantenimiento de los gastos de la Oficina Técnica. Estos gastos se pueden estimar en un 13 % sobre el coste total de mano de obra.

$$\text{Coste de mantenimiento} = 0,13 \cdot 9.552 = 1.241,76 \text{ €}$$

9.3. Resumen del presupuesto

A continuación, se va a calcular el presupuesto del trabajo, y se va a incluir el IVA de 21 %.

Tabla 4: Presupuesto del trabajo.

Concepto	Importe (€)
Mano de Obra	9.552
Amortización del Hardware y Software	2.879
Gastos generales	1.241,76
Subtotal	13.672,76
IVA (21 %)	2.871,27
Total	16.544,04 €

La estimación del coste del presupuesto asciende a: **16.544,04 €**