

5. SIMULACIÓN

5.1 Introducción

El objetivo de este capítulo es comprobar el grado de eficacia del software LMS virtual.lab como herramienta para realizar cálculos acústicos.

En primer lugar se lleva a cabo la simulación de un silenciador con una estructura simple, cámara de expansión. Se simulará el modelo, se calcularán sus pérdidas de transmisión y se compararán con los valores recogidos en la tesis doctoral “*Modelado analítico-numérico y caracterización experimental de silenciadores de escape híbridos*” [6]. Este análisis, utilizando el método de la matriz de transferencia, se encuentra en la página 70 de la tesis bajo el título de “*Cámara de expansión simple*”. Una vez analizado este sistema se realizará el análisis de un silenciador con geometría más compleja, el visto en la primera de las investigaciones [8].

5.2 Cámara de expansión

5.2.1 Introducción

El silenciador con el que vamos a comprobar la fiabilidad del método es un modelo tomado de la tesis doctoral *Modelado analítico-numérico y caracterización experimental de silenciadores e escape híbridos* del departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales de la Universidad Politécnica de Valencia [6].

El modelo es el siguiente:

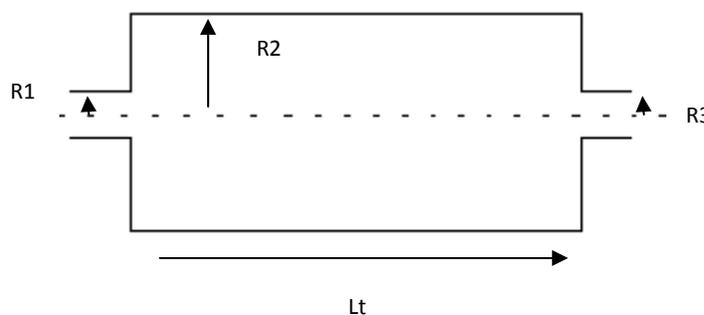


Figura 5.1. Cámara de expansión simple

Se calculan las pérdidas de transmisión para la configuración:

Geometría	R ₁ =R ₃ (m)	R ₂ (m)	Longitud L _T (m)	R ₂ /R ₁
1	0,0245	0,1	0,5	4,081

Como se ha comentado anteriormente, hay varias maneras de observar y medir el rango de amplitudes e intensidades de las señales acústicas, las más conocidas son el Índice de Pérdidas de Inserción (IL) y el Índice de pérdidas de Transmisión (TL). Esta última nos proporciona la relación entre la potencia acústica que incide en el silenciador y la potencia acústica transmitida por éste cuando se utiliza una salida anecoica, como en este caso. El índice TL es independiente de la fuente de ruido y se define como:

$$TL = 20 \log \left[\left(\frac{S_1}{S_2} \right)^{\frac{1}{2}} \left| \frac{P_1^*}{P_2^*} \right| \right] \quad [5.1]$$

El índice que se usará en el análisis será éste, TL debido a que se adapta perfectamente a este modelo y además es un índice que no depende de la interacción acústica con otros elementos de un sistema acústico, lo que permite generalizar para otros casos.

El fundamento teórico que se usa en la tesis doctoral para evaluar el Índice de Transmisión en el silenciador procede en base a la hipótesis de propagación unidimensional. Por medio del método de la Matriz de Transferencia, la matriz que relaciona las variables a la entrada y salida del silenciador, denotadas como subíndices 1 y 2, se representa mediante la expresión

$$\begin{Bmatrix} P_1 \\ U_1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_2 \\ U_2 \end{Bmatrix} \quad [5.2]$$

Descomponiendo en ondas incidentes y reflejadas y teniendo en cuenta las siguientes ecuaciones:

$$P(z) = P^+ e^{-jK_0 z} + P^- e^{jK_0 z} \quad [5.3]$$

$$[(U) 1 + e^{j(-jK_0 z)} + U^- e^{jK_0 z}] = \frac{1}{\rho_0 c_0} (P^+ e^{-jK_0 z} + P^- e^{jK_0 z}) \quad [5.4]$$

Resulta:

$$R_1 = R_1^+ + R_1^- \quad [5.5]$$

$$U_1 = \frac{1}{\rho_0 c_0} (R_1^+ + R_1^-) \quad [5.6]$$

Por lo tanto

$$R_1^+ = \frac{R_1 + \rho_0 c_0 U_1}{2} \quad [5.7]$$

Al tener salida anecoica

$$R_2 = R_2^+ = \rho_0 c_0 U_2 \quad [5.8]$$

De acuerdo con las expresiones anteriores se tiene finalmente:

$$TL = 20 \log \left[\left(\frac{S_1}{S_2} \right)^{\frac{1}{2}} \left| \frac{A + \frac{B}{\rho_0 c_0} + \rho_0 c_0 C + D}{2} \right| \right] \quad [5.9]$$

Esta sería la expresión a usar en un cálculo teórico, y con ello se obtienen los siguientes resultados, figura 5.2:

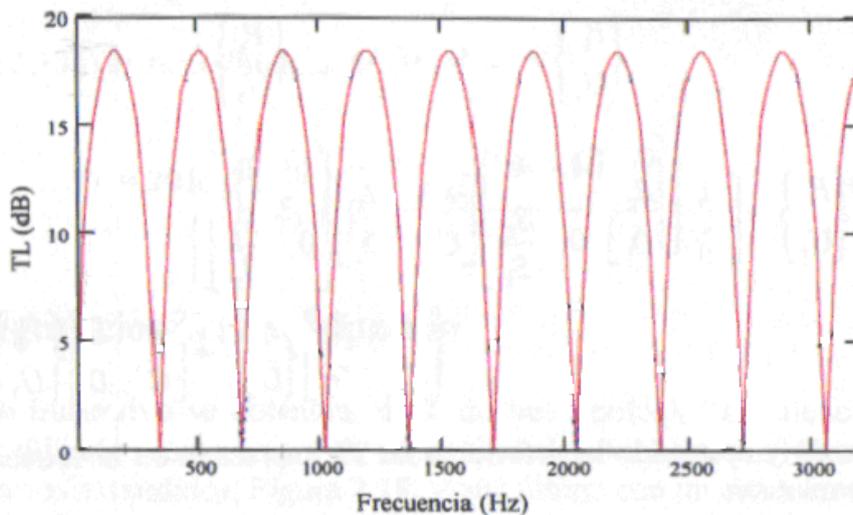


Figura 5.2. TL de Cámara de expansión simple

Para el análisis que se realizará con el software LMS virtual se utilizarán las ecuaciones 5.7 y 5.8 para calcular los valores de P_1^+ y P_2^+ , y la ecuación 5.1 para calcular los valores de TL.

El procedimiento será el siguiente:

1. Se generará la malla del silenciador mediante el software Ansys.
2. Se importará al software LMS virtual.lab.
3. Se realizará el análisis acústico, del cual obtendremos los valores de presión y velocidad P_1, U_1, U_2 .
4. Con los datos obtenidos y según las ecuaciones 5.7 y 5.8 calcularemos los valores de P_1^+, P_2^+
5. Sustituiremos esos valores en la ecuación 5.1, junto con el valor de las superficies de entrada y salida para calcular el valor del Índice de Transmisión (TL) en el silenciador, que en este caso son iguales.
6. Compararemos estos resultados con los obtenidos teóricamente en la tesis.
7. Realizaremos un análisis y obtendremos unas conclusiones.

5.2.2 Generación de la malla

Una de las ventajas del LMS virtual.lab es que se pueden importar archivos desde otros programas, con lo que se permite aprovechar lo mejor de cada uno. Se pueden importar los siguientes archivos:

Software	Tipo de archivo
Nastran	Bulk data file [*.bdf, *.dat]
Nastran	Punch file [*.pch]
Nastran	Output2 file [*.op2]
Catia V5	Geometry [*.CATPart]
Catia V5	Assembly [CATProduct]
Catia V5	Analysis[*.CATAnalysis]
SDRC IDEAS	Universal files [*.unv]
Ansys	RST files [*.rst]

En este caso se realizará la malla en el ansys. Para conseguir el archivo *.rst se deberá realizar un análisis completo, uno arbitrario, y guardar toda la información, es entonces cuando se genera este tipo de archivos.

Generación de la geometría:

Se ha llevado a cabo mediante la función

CYLIND(RAD1,RAD2,Z1,Z2,THETA1,THETA2)

donde RAD1 y RAD2 corresponden al radio interno y externo que conforman el cilindro, Z1 y Z2, a la coordenada en el eje z en la comienza y termina el cilindro, quedando definida su longitud, y THETA1 y THETA2 el ángulo de comienzo y fin de éste, en este caso como se requieren cilindros completos, toman los valores de 0° y 360° respectivamente.

El código de geometría llevado a cabo para la generación de los cilindros del primer caso es el siguiente:

```
cylind,0,0.0245,0,0.1,0,360
```

```
cylind,0,0.1,0.1,0.6,0,360
```

```
cylind,0,0.0245,0.6,0.7,0,360
```

```
vadd,all %función que unifica los tres cilindros en un único volumen, lo cual es muy
```

```
% útil a la hora de conseguir una malla continúa.
```

Definición del tipo de elemento

Dado que se va a trabajar en el módulo de Acoustic Harmonic FEM los elementos deben ser volumétricos. LMS virtual.lab requiere elementos de volumen para el trabajo con FEM mientras que si se trabaja con el módulo de BEM los elementos a utilizar deben ser superficiales.

En este caso se usará el elemento **solid187**:

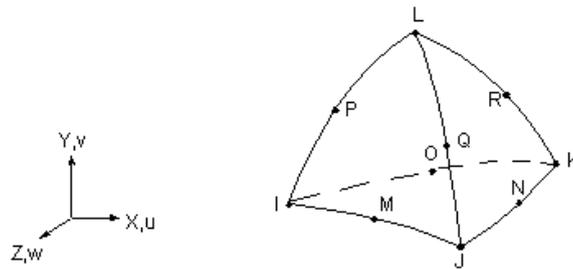


Figura 5.3. TL de Cámara de expansión simple

Es un elemento 3-D, definido por 10 nodos y con tres grados de libertad en cada uno de ellos, translación en los tres ejes. Posee capacidad plástica, hiperelástica, fluencia, rigidización por tensión y permite representar grandes desplazamientos y deformaciones.

El desplazamiento tiene comportamiento cuadrático, lo que lo hace apropiado para modelar mallas irregulares.

Propiedades del material

En este aspecto no existe requisito por parte del LMS virtual. Cuando se importa un archivo *.rst, desde Ansys, lo único que se está importando es la malla generada. El tipo de material, las condiciones de contorno o fuerzas introducidas para realizar el análisis en Ansys no se importan, por lo cual podemos introducir cualquiera que nos permita resolver un modelo.

En este caso las propiedades que se han introducido han sido las del acero:

$$\mathbf{E} = 2.1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2; \quad \nu = 0.3; \quad \rho = 7850 \text{ Kg/m}^3; \quad \alpha = 2.1 \times 10^{-5}$$

Generación de la malla

1. Para mallar el volumen lo primero que se define es el tamaño del elemento.

La asignación del tamaño del elemento se hace mediante la orden

ESIZE, SIZE, NDIV

Donde SIZE se refiere al tamaño del elemento, la longitud, y NDIV al número de divisiones a lo largo del contorno a mallar. Se introduce uno de los dos valores. En este caso se eligió el tamaño de elemento, 0.03m, con lo que se asegura que la longitud del elemento es menor que la mitad de la longitud de onda del sonido que se introduce.

Teniendo en cuenta que el fluido que va por el conducto es aire y que $\lambda = \frac{c}{f}$, la menor

longitud posible que aparecerá será la que se obtiene para la frecuencia más alta a la que se realiza el análisis, $f_{\max} = 3000\text{Hz}$, siendo $c = 340\text{m/s}$, $\lambda = 0.113\text{m}$, $\lambda/2 = 0.056$, mayor que el tamaño elegido para el elemento.

La orden introducida en Ansys es la siguiente:

```
esize,0.03
```

2. Una vez asignado el tamaño del elemento se procede al mallado mediante la orden:

VMESH, NV1, NV2, NIC

Orden para mallar volúmenes, donde NV1 es el volumen por el que se comienza a mallar y NV2 el último volumen que se quiere mallar con el paso NIC, que por defecto es 1. En este caso queremos mallar todos los volúmenes bajo la orden anteriormente dada (tamaño de elemento=0.03m), por lo que NV1= ALL, y los valores NV2 y NIC se ignoran.

La orden introducida es la siguiente:

```
vmesh,all
```

Una vez se han realizado estos pasos la malla obtenida es la siguiente, figura 5.4,

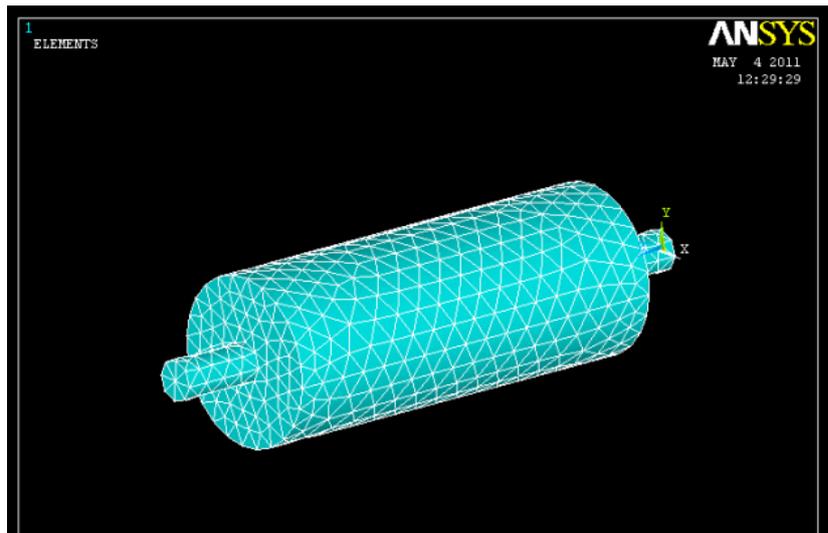


Figura 5.4. Cámara de expansión simple mallada, generada en Ansys

Condiciones de contorno y cargas

Como se ha comentado antes, es independiente el análisis que se haga siempre que se termine.

En nuestro caso se restringen los movimientos en una línea del modelo y se aplican 10 N en un nodo aleatorio.

Solución

Como se ha comentado, es imprescindible resolver el modelo para obtener el archivo *.rst, ya que éste es un archivo de resultados.

Simplemente mediante *solve*—>*current LS* se resuelve el análisis y cuando se termina se guardan los resultados.

5.2.3 Análisis en el software LMS virtual.lab

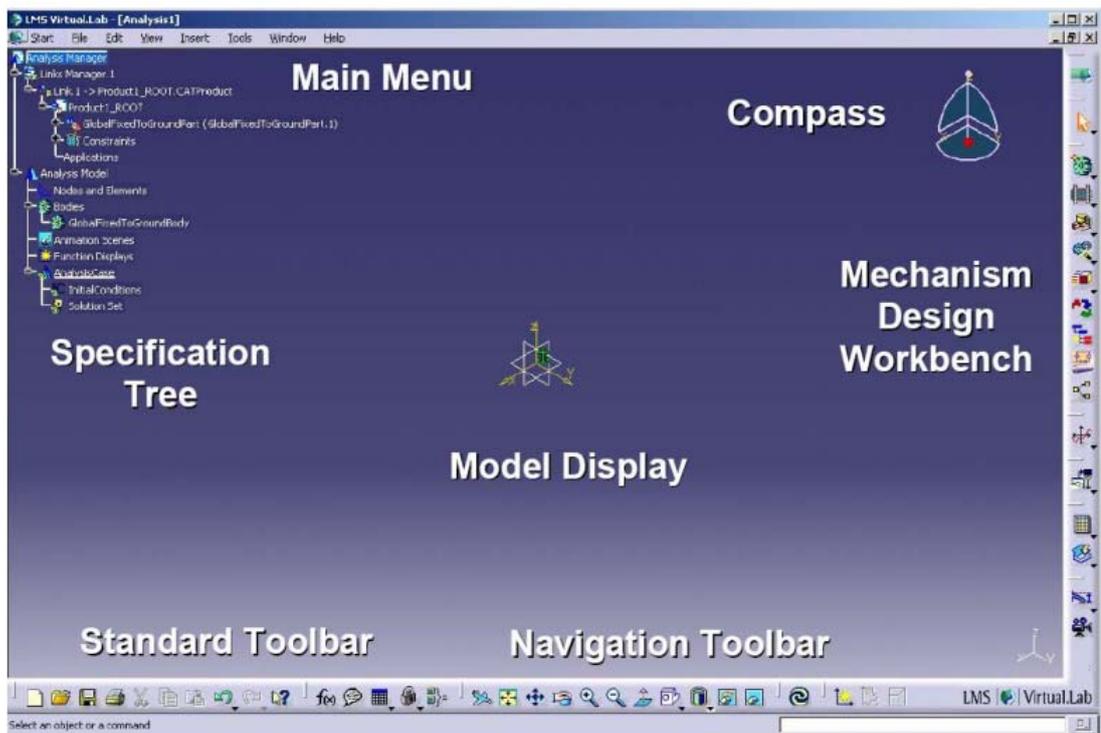
Descripción de Virtual.Lab

LMS Virtual.lab es un software de análisis que está a la cabeza en la tarea de prueba y simulación mecatrónica, la automotriz, aeroespacial y otras industrias de manufactura avanzada.

Combina software de simulación mecatrónica, sistemas de pruebas y servicios de ingeniería, tocando las ramas más recurrentes de la ingeniería, que van desde la dinámica de sistemas, la integridad estructural y calidad de sonido a la durabilidad, la seguridad y el consumo de energía.

A continuación la descripción funcional del software.

Una vez se ejecuta virtual.lab, se muestra la interfase de análisis, la cual consiste en la base del programa, para después acudir a análisis específicos del modelo establecido en la misma. Dicha interfase cuenta con siete áreas principales, las cuales son el menú principal, árbol de especificaciones, *display* del modelo, el *compass*, *barra de herramientas* característica del *banco de trabajo* en el que se está trabajando. Dicha distribución se aprecia en la siguiente figura:



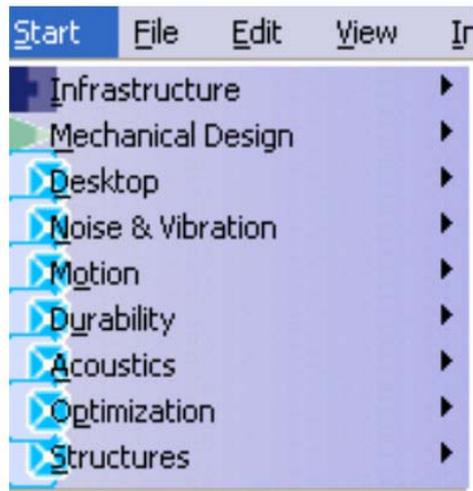
El menú principal muestra todas las barras de herramientas esenciales para la manipulación de un software, las cuales son View, Edit, Start, File, etc. Corresponde a las operaciones indispensables para la operación del software como guardar y abrir archivos, importar y exportar, modificar características y opciones de vistas, acceso al menú de ayuda, etc.

En el display aparece el modelo a simular y puede ser manipulado por medio del *compass*, tanto para ser cambiado de posición como para ser visto desde diferentes perspectivas.

La barra de herramientas estándar maneja diversas utilidades contenidas en la barra de *File* y *Edit*, las cuales forman parte del menú principal; esto con el objeto de tener una vía de acceso directo con la finalidad de hacer más práctico su manejo. Igualmente en la barra de herramientas de navegación se encuentran accesos directos a utilidades, pero en este caso son opciones de vista contenidas en el menú principal.

El árbol de especificaciones representa un historial de todas las operaciones realizadas en cada análisis, muestra el orden jerárquico de los modelos y operaciones efectuadas, así como sus dependencias. Esta herramienta es sumamente importante y útil, ya que por medio de ella se manipula el archivo en su totalidad, se realizan todas las nuevas operaciones y modificaciones, y debido a que se da la opción a tener un modelo parametrizado, hace que las correcciones futuras y modificaciones sean hechas de un forma sencilla y simplificada. Los bancos de trabajo o *Workbenches*, son barras de herramientas características de un módulo específico contenido en Virtual.Lab. Cada uno trabaja con diferentes utilidades necesarias para realizar un análisis específico. Este software cuenta con los siguientes: *Infrastructure, Mechanical design, Desktop, Noise and Vibration, Motion, Durability, Acoustics, Optimization* y *Structures*. Todos los bancos de trabajo interactúan entre sí y se permite el uso de uno a otro mediante el cambio automático entre ellos, durante el procesamiento de un mismo modelo y de esta forma se tiene un vínculo y una secuencia de operaciones en el mismo, las cuales aparecen en el árbol de la izquierda.

Se accede a cada banco mediante la barra de herramientas *Start*, contenida en el menú principal tal y como se muestra en la siguiente figura:



En los bancos de trabajo **Infraestructure** y **Mechanical design** se diseñan y generan sólido, superficies, planos y ensambles, de manera que mediante ellos se puede generar el producto con sus respectivas partes para después ser sometido a algún tipo de análisis desarrollado por Virtual. Lab y contenido en alguno de sus otros módulos.

Virtual.Lab **Desktop** proporciona un ambiente común para la implementación de una ingeniería funcional. Por medio del mismo, el usuario tiene el acceso sin restricciones y datos en códigos CAD y CAE, así como para los datos de pruebas virtuales. El Escritorio también ofrece un ambiente de visualización completo para los ensambles y las partes que lo comprenden, datos para el desempeño de una ingeniería funcional, funciones de tiempo y frecuencia, entre otros.

El módulo **Noise and Vibration** combina tecnologías ya probadas con técnicas innovadoras para crear una solución para el modelado de ruidos y vibraciones en productos, así como su refinamiento en el nivel del sistema. Con este banco de trabajo, los modelos se pueden montar rápidamente, confiablemente, y en un tiempo benéfico para el curso del proceso de desarrollo.

Mediante **Acoustics**, es posible analizar sistemas acústicamente, mediante el modelo de elementos finitos, FEM, o del método de los contornos, BEM. En el caso de este proyecto utilizaremos este banco de trabajo y lo haremos mediante el método de los elementos finitos.

Durability permite la predicción de la vida a fatiga de un producto debido al desarrollo de ciclos de operación durante el tiempo.

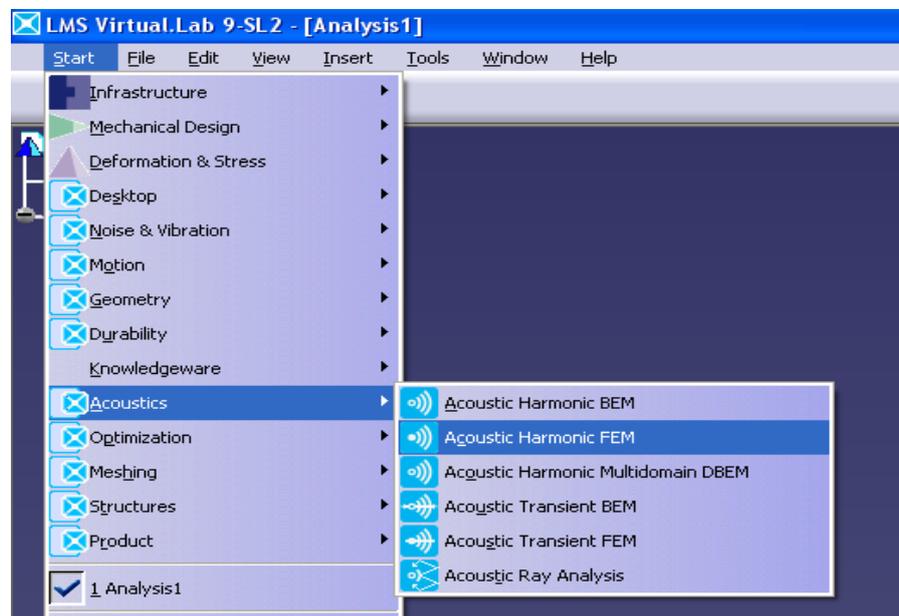
El banco de trabajo **Motion** proporciona un análisis en diseños de mecanismos, lo que se logra mediante la simulación, en tiempo y condiciones reales, del comportamiento del mecanismo diseñado. Por medio de sus herramientas es capaz de analizar y optimizar dicho comportamiento asegurando de esta forma que todos sus componentes interactúen entre sí, se mueven tal y como se había previsto; así como proporciona predicciones en la deformación de piezas y rupturas bajo cargas máximas.

Una vez descrita la interfaz del software se continúa con la simulación del atenuador. Como se ha comentado anteriormente el análisis se va a realizar en el banco de trabajo de acústica, concretamente en “Acoustic Harmonic FEM”.

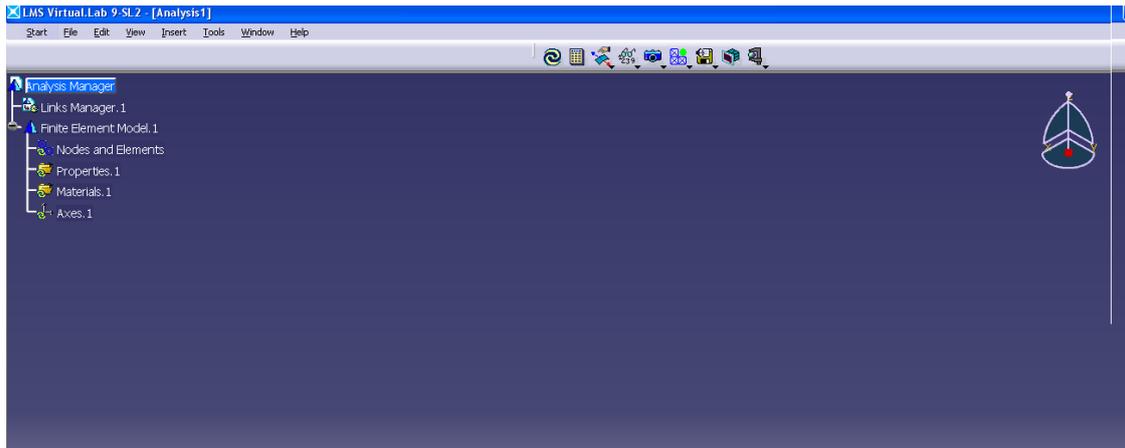
Simulación en el software

A continuación se explica paso a paso como se realiza el análisis del silenciador “cámara de expansión simple”.

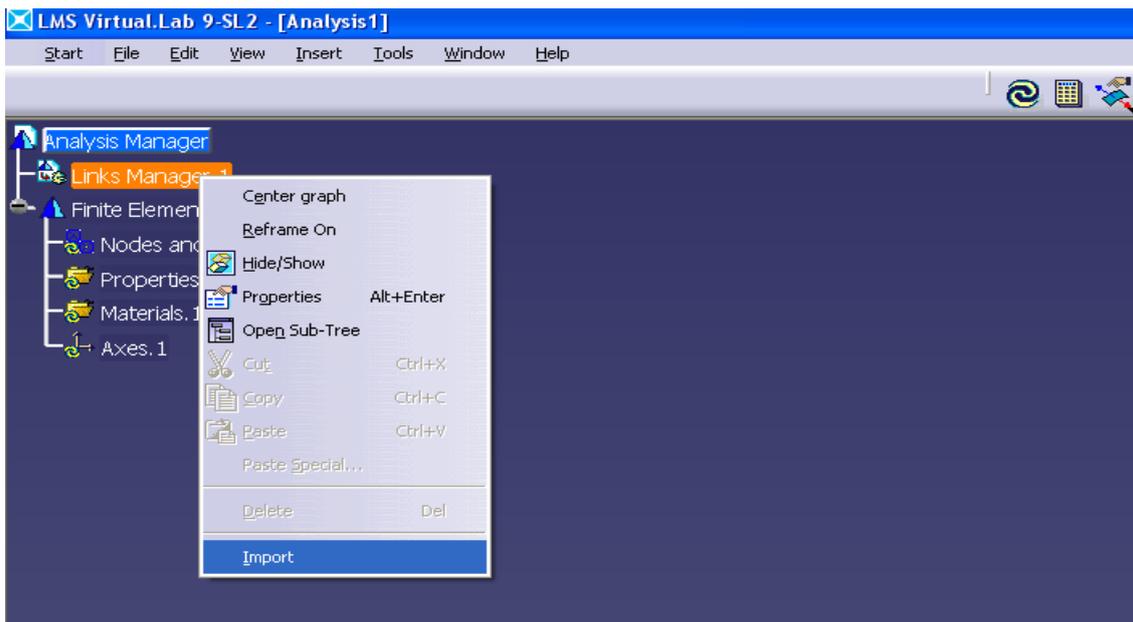
Para entrar en la barra de herramientas adecuada se debe pinchar en *start* → *acoustic* → *acoustic harmonic FEM*, como se muestra en la imagen



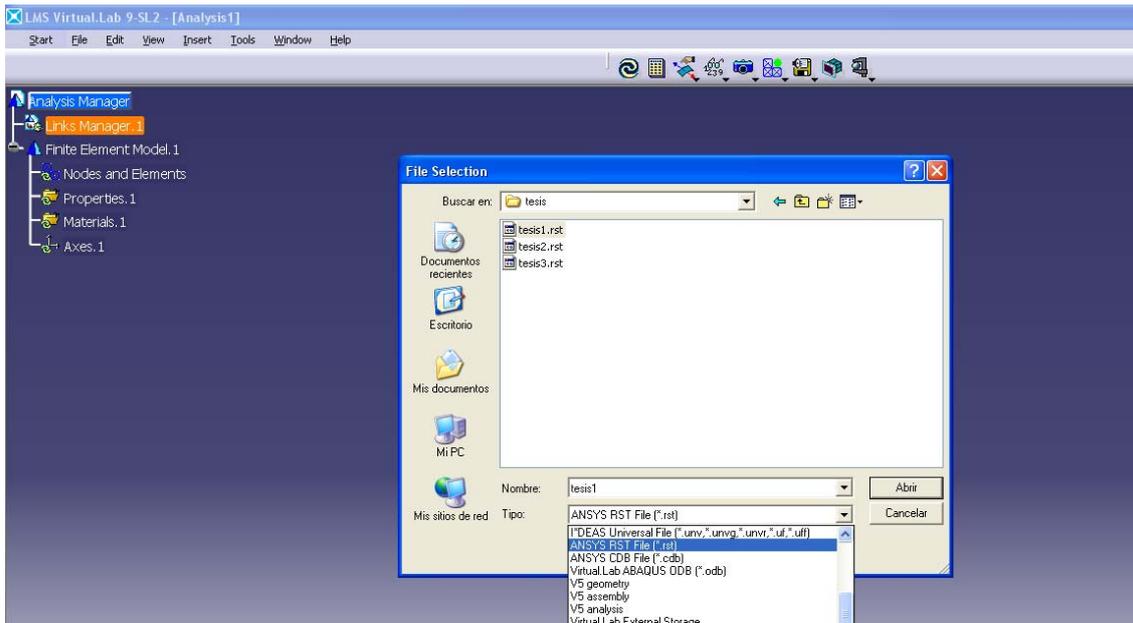
Una vez se está en ese espacio aparecerá una pantalla como la siguiente



Para importar el archivo *.rst se debe hacer click con el botón derecho sobre la opción *Links Manager.1* del árbol, el cual quedará subrayado en color naranja, se debe seleccionar la última opción que aparece, *import*, como se aprecia en la figura de abajo, y buscar el archivo en la carpeta que se tenga.



En el caso de que el archivo no aparezca se debe comprobar que en *tipo de archivo* está seleccionado *ANSYS RST File (*.rst)*, como se ve en la siguiente figura:



Una vez seleccionado, se abre el documento y aparece la siguiente pantalla:

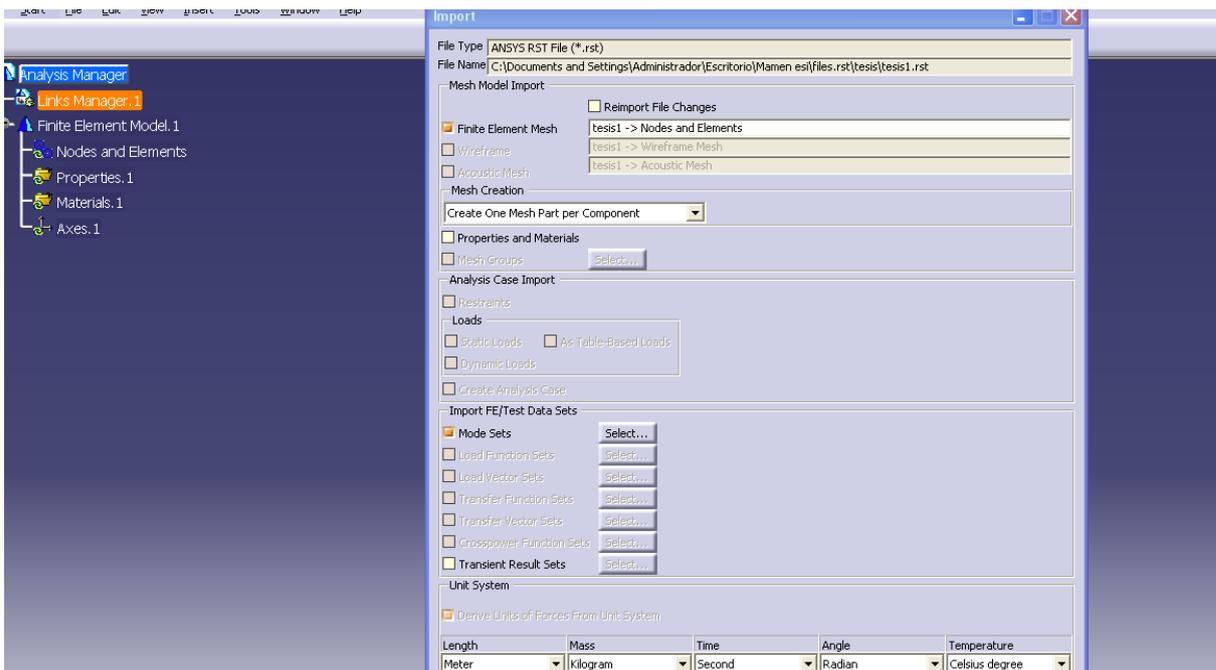
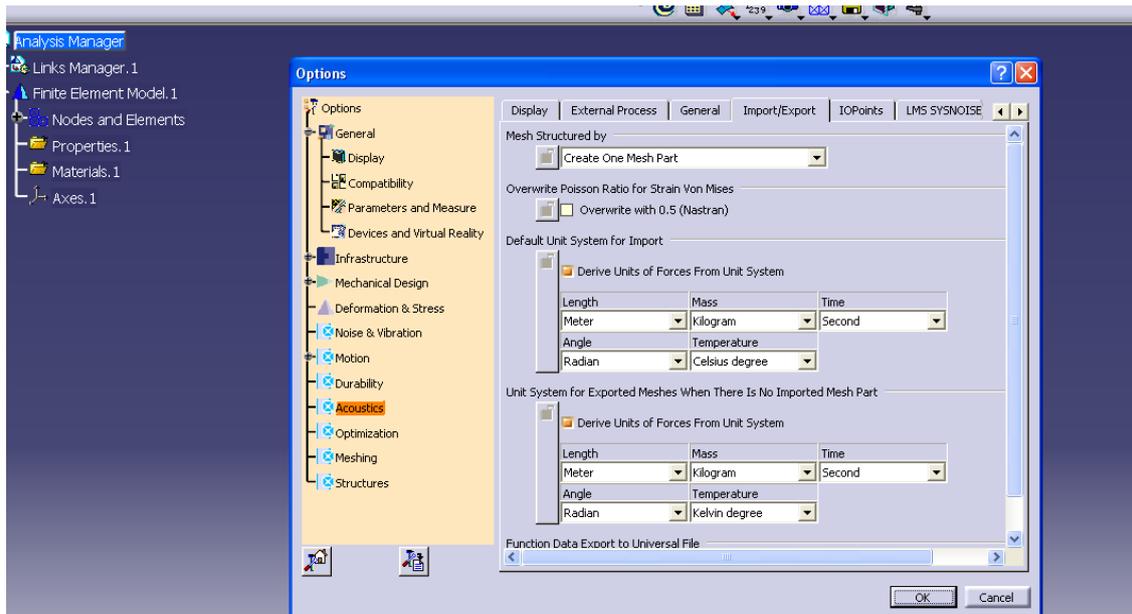


Figura 5.5.

En este caso no se va a realizar ningún análisis modal, por lo que se debe deseleccionar la opción de *Mode Sets*, al igual que se debe comprobar, al final de la ventana, que las unidades que aparecen son las que interesan, en caso contrario se seleccionaría en las pestañas las de interés.

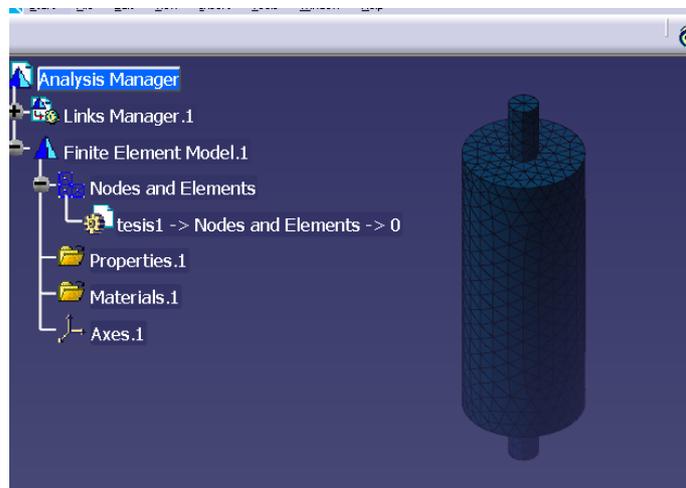
Una vez se salga de esta ventana no hay manera de volver a ella, de manera que si más adelante se quiere comprobar o cambiar las unidades en las que se está trabajando se debe hacer de la siguiente manera:

En la barra principal seleccionamos *Tools* → *Options*, y en la ventana que nos aparece elegimos en la barra de la izquierda la opción *Acoustics*, y dentro de ella, en la barra superior *Import/Export*, como vemos en la siguiente figura:

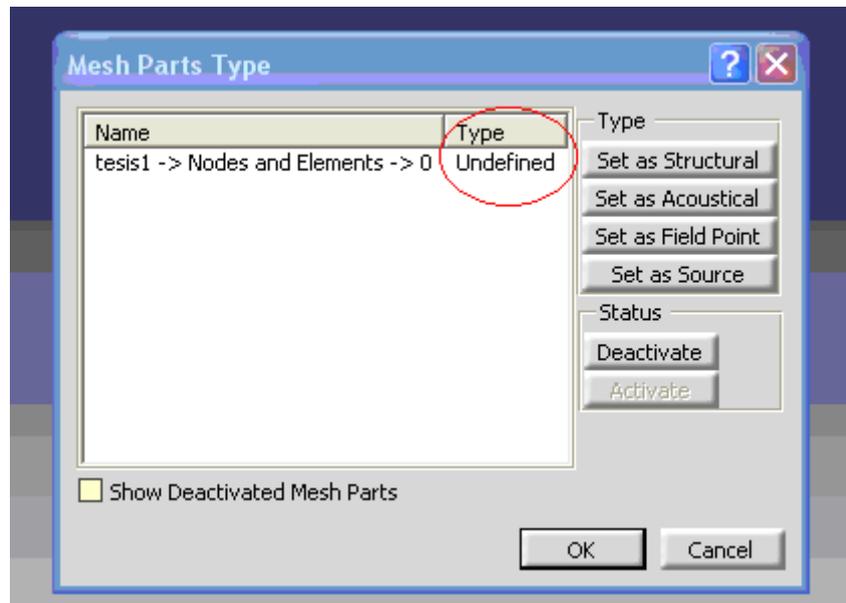


Ahí podemos modificar las unidades de los archivos que exportamos y los que importamos de manera independiente.

Volviendo al análisis, una vez se cierra la ventana que se presenta en la figura 5.5, la malla importada aparece en la pantalla de la siguiente manera:



Se observa que en el árbol ya aparece el documento importado. Lo primero que se debe hacer es darle a esta malla carácter acústico, lo que se lleva a cabo haciendo click en *Tools* → *mesh part types*. Emerge entonces un cuadro, mostrado en la siguiente figura, en el aparece a la izquierda el nombre del documento, al que se ha adjudica como *Type: undefined*.



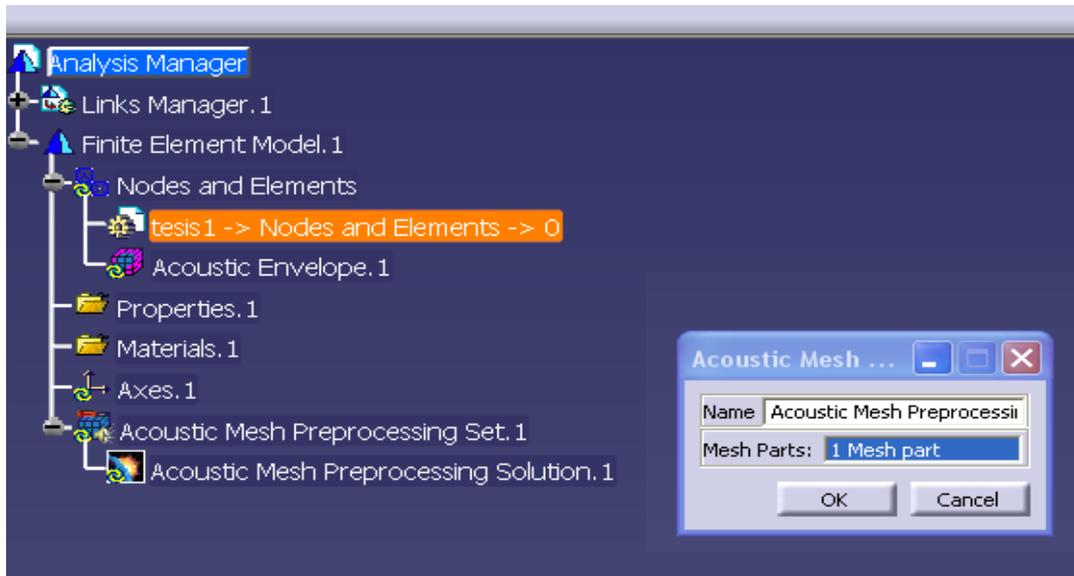
Se debe seleccionar el documento y hacer click en *set as acoustical*, entonces deberá cambiar el type de este archivo a *acoustical*.

El color de esta malla y de las demás se puede modificar si vamos a *Tools* → *options* → *acoustics* → *display*. Ahí se observa que en este caso el color dado a la malla acústica es azul.

Una vez se tiene definida la malla como acústica se puede introducir un set de preprocesado que creará un *envelop*, que será donde el software aplique condiciones y calcule resultados. Resulta ser como el envoltorio de la malla. Para añadirlo hacemos clic en *insert* → *acoustic mesh prespocesing set*. Es entonces cuando emerge la siguiente ventana



Se hace click sobre el archivo importado, en el árbol, e inmediatamente *No selection* es sustituido por *1 Mesh part*

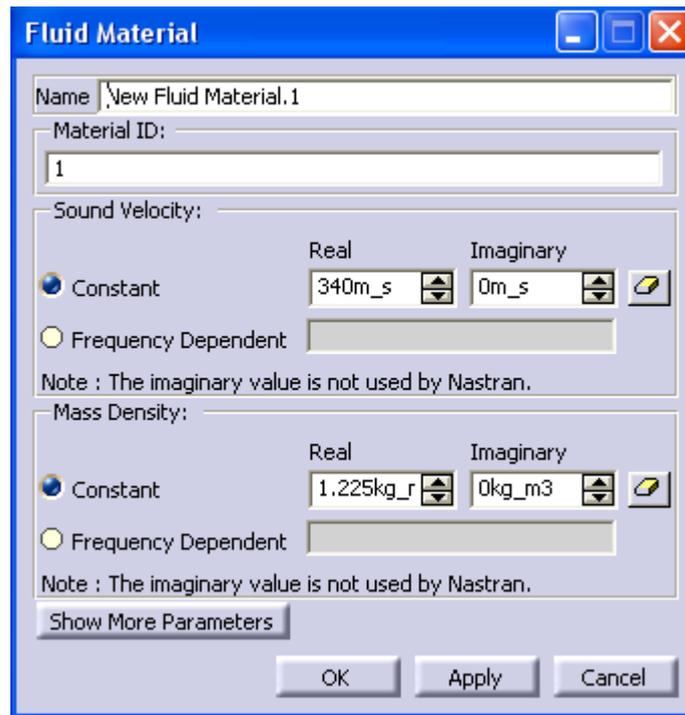


Se hace click en *ok*, y comprobamos que el árbol se ha modificado. El símbolo amarillo en forma de espiral ,  , que aparece en algunos elementos en el árbol significa que esos elementos no están actualizados. Para actualizarlos se hace click con el botón derecho sobre los que lo tienen y se pulsa *update*.

El siguiente paso es asignar a este volumen las propiedades del aire. Esto se lleva a cabo mediante dos pasos:

1. Creación del material.

Se puede hacer de dos maneras, mediante *Insert* → *Materials* → *New material* → *New fluid material* , ya que en este caso es el aire, o haciendo click con el botón derecho sobre *Material* , en el árbol, y siguiendo la misma ruta. En ambos casos emerge la siguiente pantalla donde se han introducido las propiedades del aire:



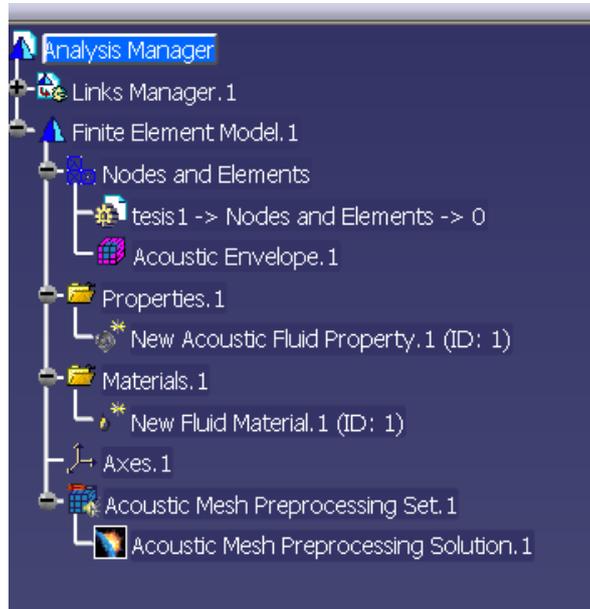
2. Asignación ese material al volumen de control:

Lo cual también se puede hacer de dos maneras, mediante *Insert* → *Properties* → *New properties* → *New acoustic fluid properties*, o haciendo click con el botón derecho sobre *Properties*, en el árbol, y siguiendo la misma ruta. En ambos casos emerge la siguiente pantalla:

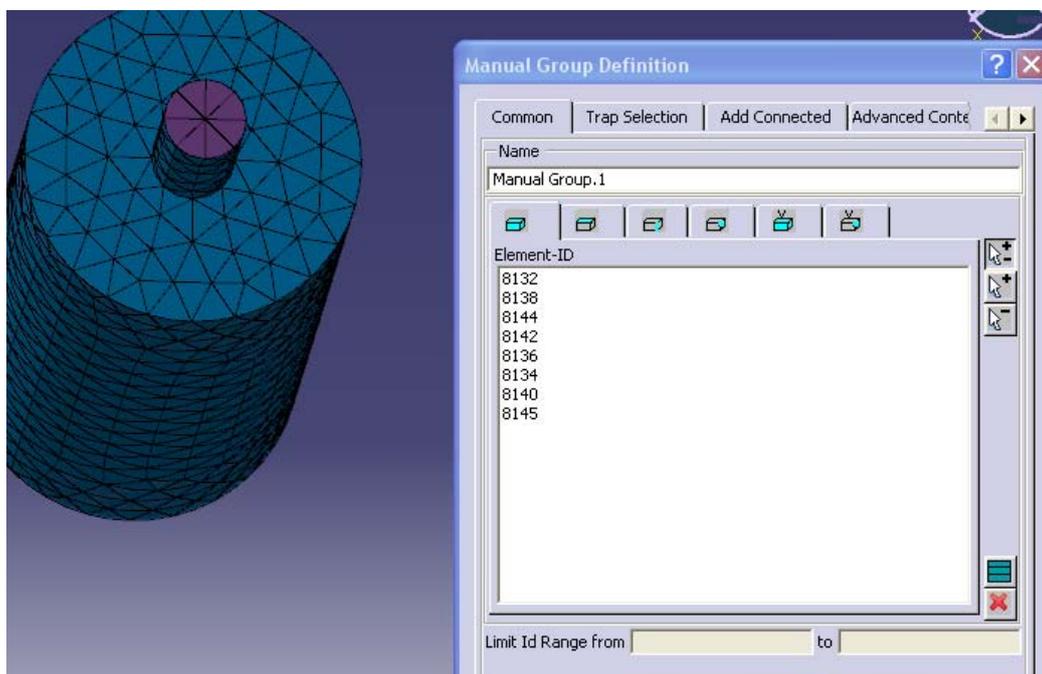


Para seleccionar la malla se hace click en *edit* y luego en el archivo *tesis1* del árbol, entonces aparecerá ese nombre en *application region*. Para añadir el material anteriormente definido en *fluid material*, se hace clic en la mano y se selecciona en único material que se tiene.

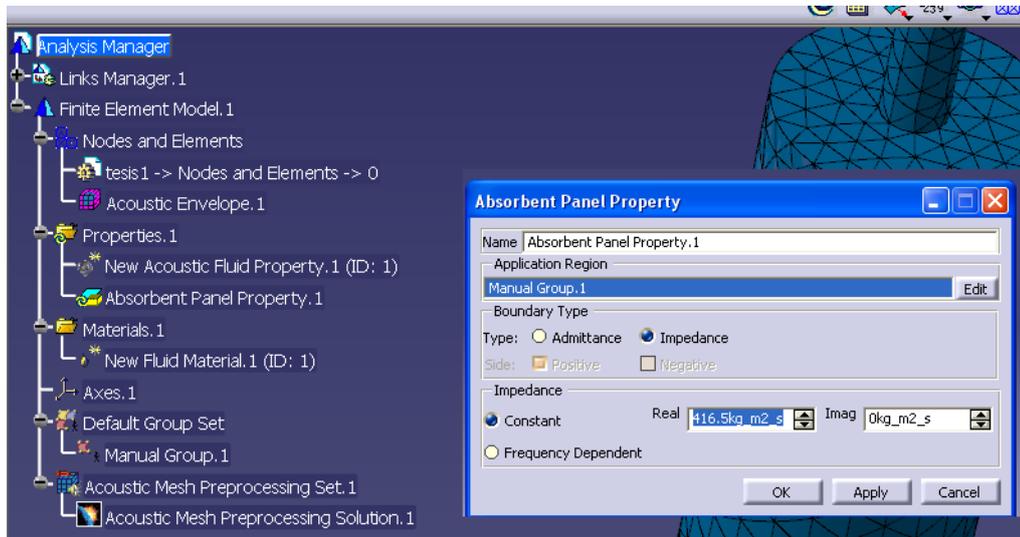
Tras realizar esto el árbol crece de la siguiente manera:



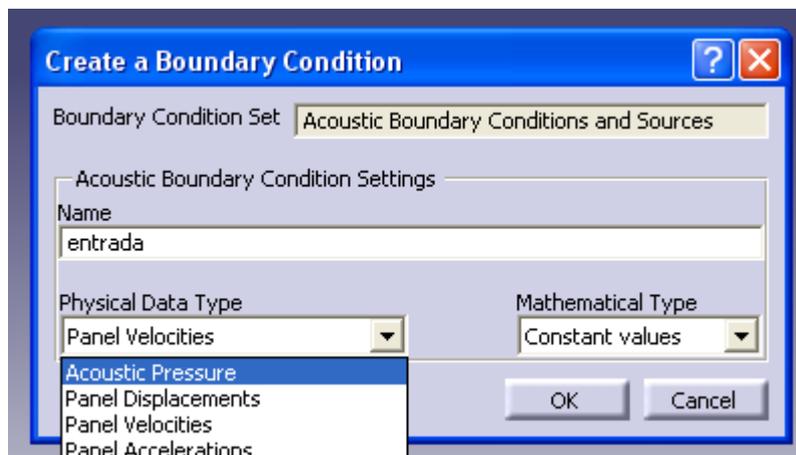
Como se ha visto en la explicación teórica del modelo y el cálculo de las pérdidas de transmisión, la salida de los silenciadores se consideran anecoica, lo que significa que en ellas la impedancia acústica es de $Z = 416.5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$. Para introducir esta propiedad primero se crea un grupo que contenga todos los elementos a los que se va a aplicar la condición. Para ello seguimos la siguiente ruta, *insert* → *mesh grouping* → *manual group*. Una vez hecho esto se selecciona uno a uno los elementos que nos interesan, irán cambiando de color y apareciendo en la ventana que emergió, como se ve en la figura:



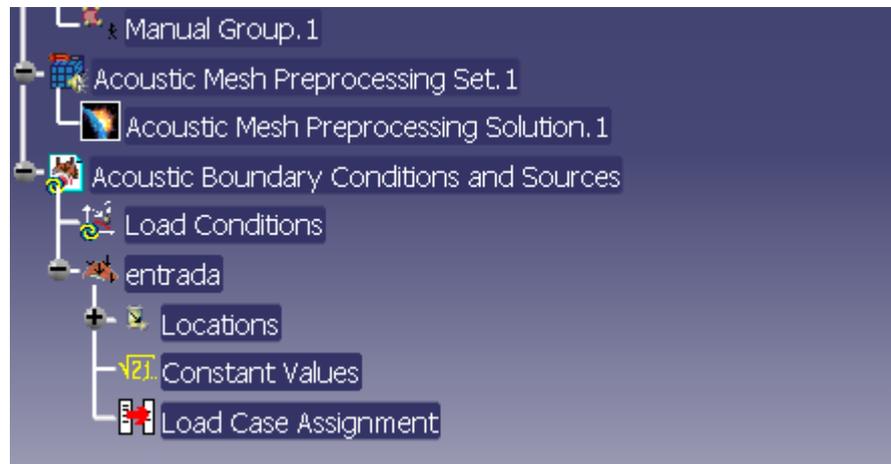
Una vez creado el grupo, para asignarle la condición anecoica se hace click en *insert* → *properties* → *new properties* → *absorbent panel properties* y en la ventana que emerge se introduce la región de aplicación, seleccionando *edit* y posteriormente haciendo click en *manual Group.1*, en el árbol, y la condición de anecoico, quedando de la siguiente manera:



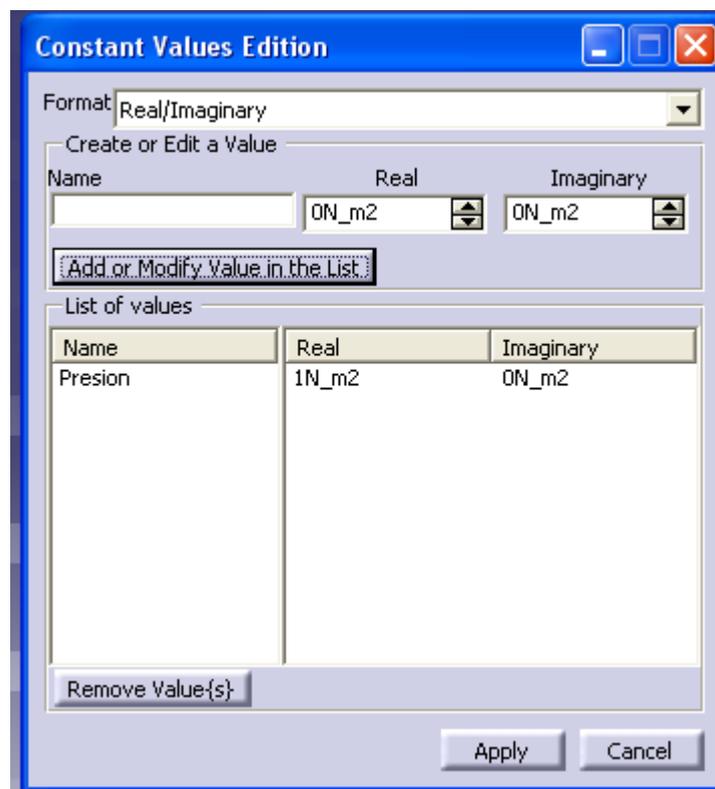
A continuación se introduce las condiciones de contorno. En este caso impondremos a la entrada una presión de 1N/m^2 . Para ello se introduce un set de condiciones de contorno, *insert* → *acoustic boundary conditions and sources* → *acoustic Boundary conditions and source set*. Una vez introducido aparece en el árbol, y haciendo click sobre él con el botón derecho se elige la opción *add an acoustic boundary condition*, entonces emerge la siguiente ventana, en la que se escribe el nombre que se quiera dar a la condición de contorno, en este caso se ha escrito *entrada* y se elige la magnitud que se quiere introducir y el valor que se le va a dar (cte, función o vector). En este caso en la presión y con un valor constante.



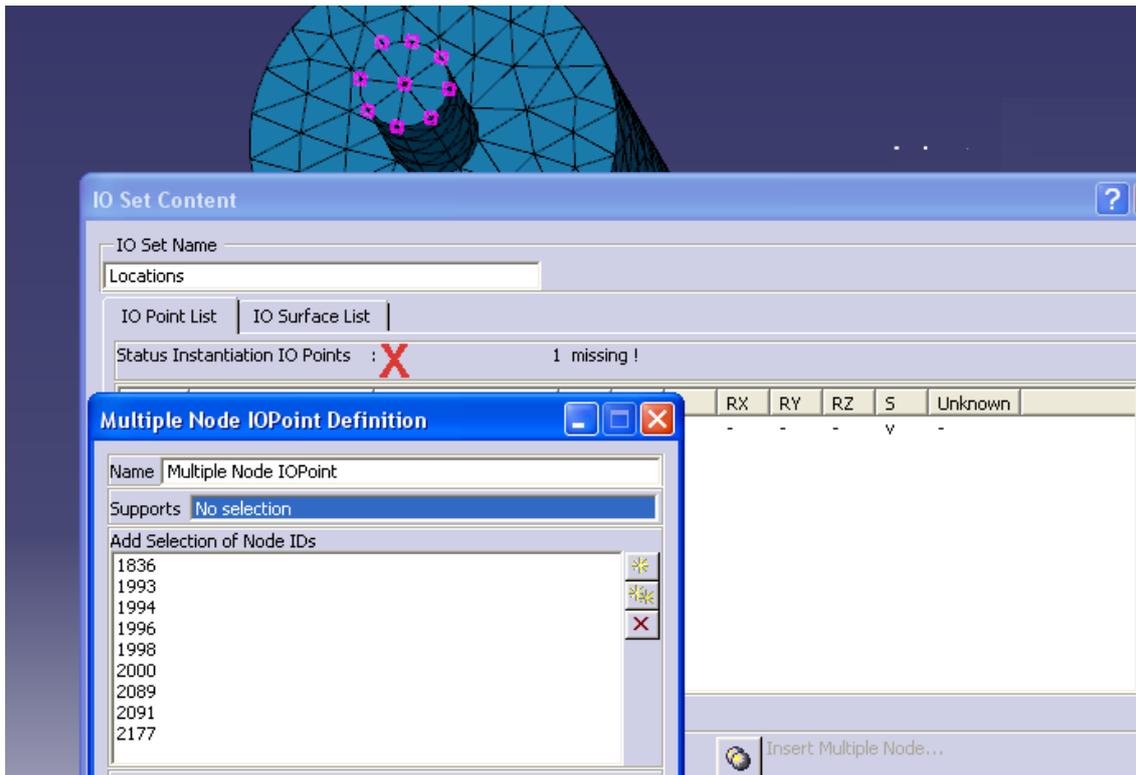
En el árbol queda añadido lo siguiente:



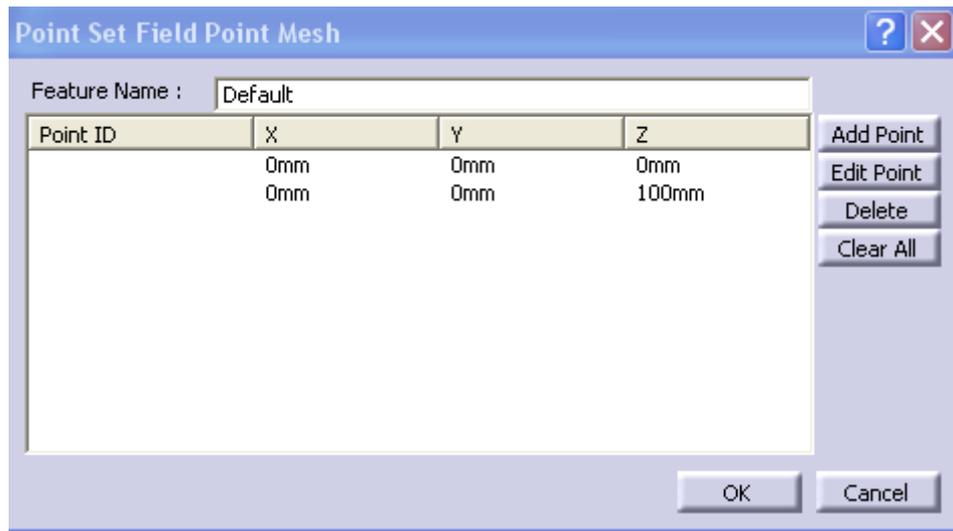
Picando con el botón derecho en *constant values* → *constant values objet* → *definition*, emerge una ventana donde damos un nombre a la condición, un valor, y la añadimos a una lista, quedando de la siguiente manera:



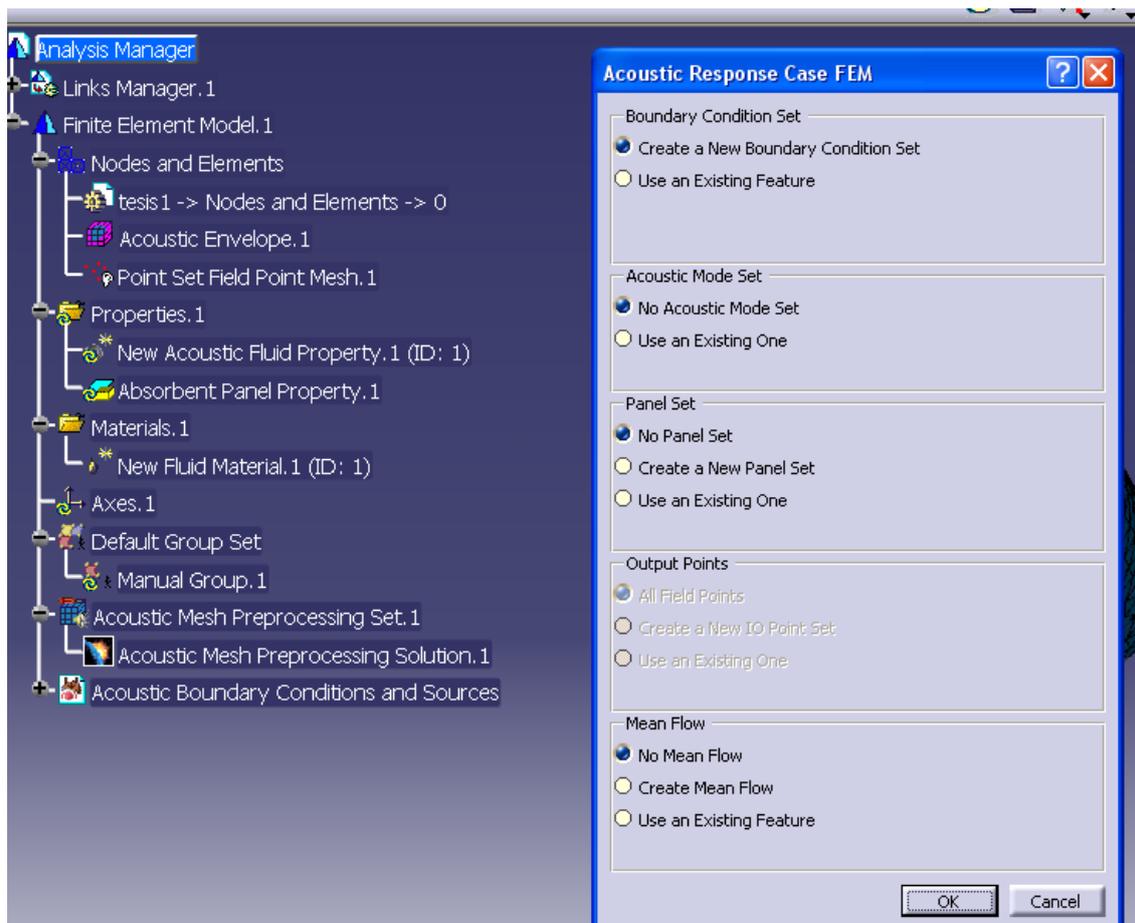
Se aplica y se procede a señalar los nodos sobre los que se va a aplicar. En el árbol, sobre *locations*, se hace click con el botón derecho y se selecciona *locations object* → *definition*. En la pantalla emergente se hace click en el botón *Insert Multiple Node*, apareciendo así otra ventana emergente en la que se irán añadiendo el localizador de los nodos que vamos señalando. Se señalan todos los nodos de la cara de entrada. Se muestra el conjunto en la siguiente figura:



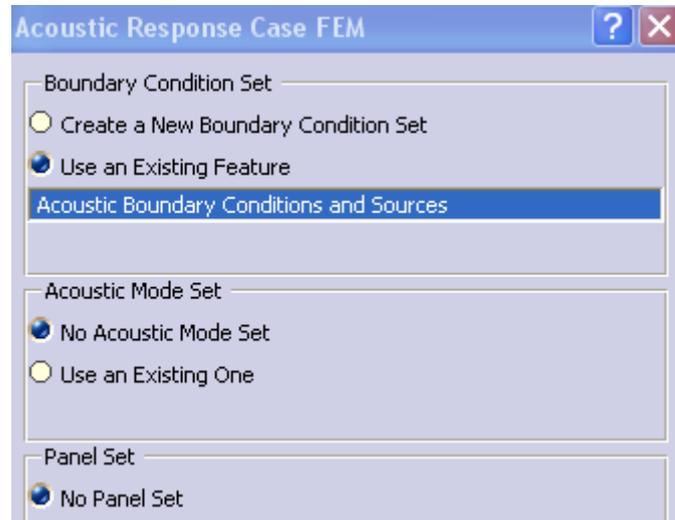
Una vez definidas las condiciones del modelo, el software requiere que se añada un set tipo *field point* si se quiere que los resultados, valores de presión y velocidad, queden almacenados y puedan ser tratados posteriormente. En este caso los valores que interesan son los de presión y velocidad del nodo central de la cara de entrada (0,0,0) y el nodo central del nodo de salida (0,0,100), por ello se creará ese set con estos dos nodos. Se procede, *insert* → *field point meshes* → *point set field point mesh*, en la ventana que emerge se hace click en *add point*, nos da la opción de introducir el identificador del nodo o las coordenadas. En este caso se introducen las coordenadas, quedando de la siguiente manera:



Una vez creado se pasa a resolver le problema, *insert* → *FEM analysis cases* → *Acoustic Response analysis case*, emergiendo la siguiente ventana:



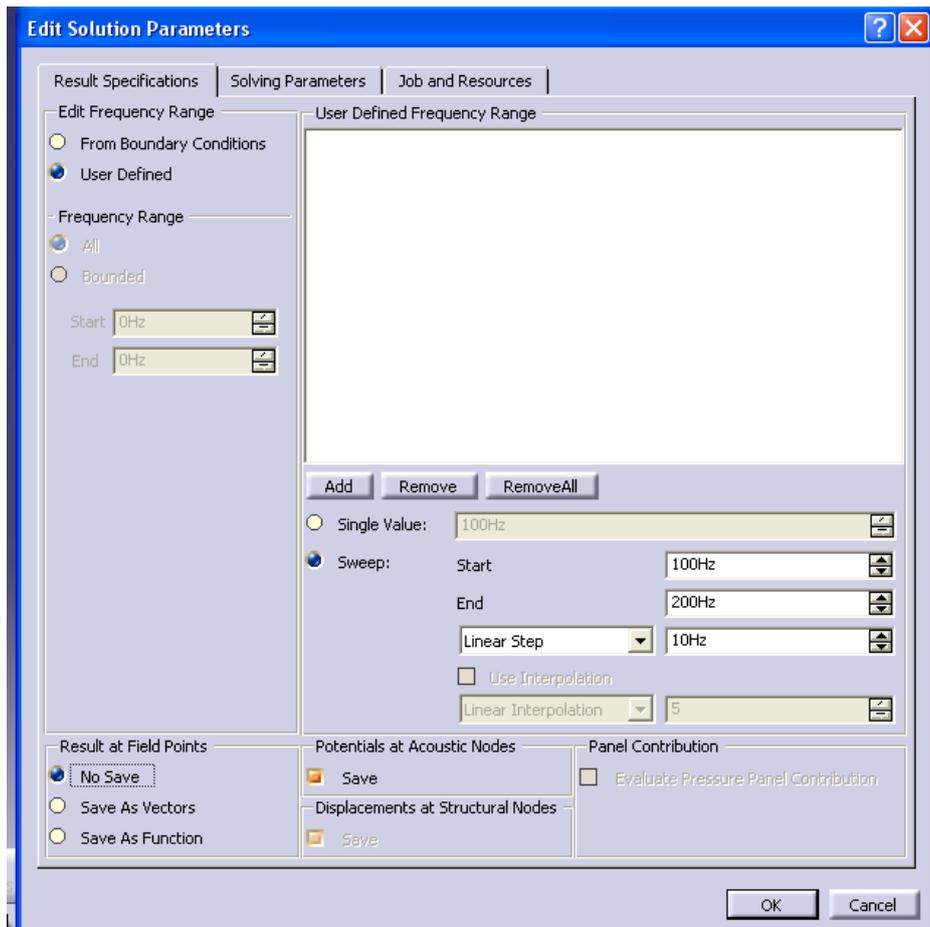
Se van a usar las condiciones de contorno que se han definido anteriormente, por lo que se selecciona en la primera opción *use an existing feature* y para incluirlas deberemos seleccionarlas del árbol principal, quedando:



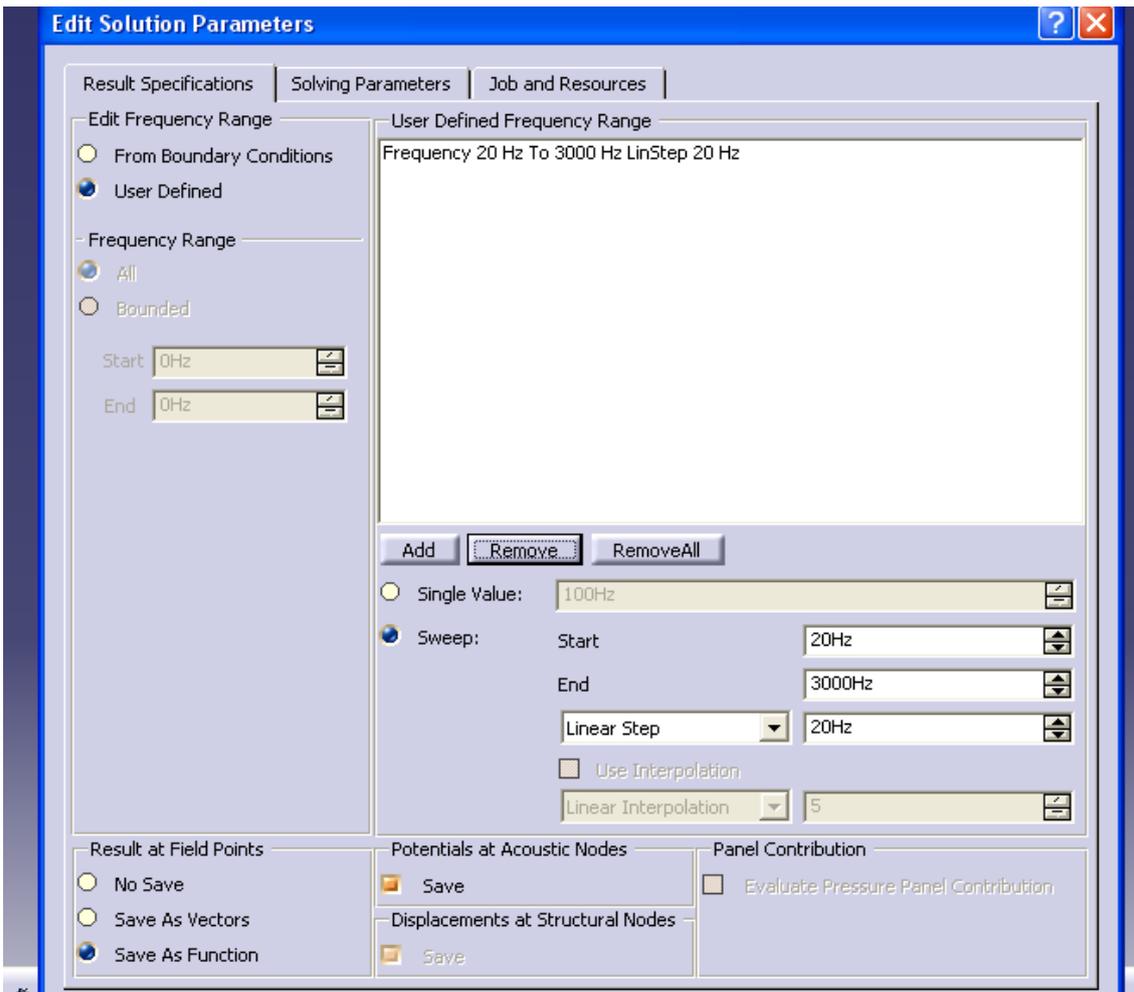
El resto de opciones se dejan tal y como están, ya que no se va a hacer un análisis modal ni se va a tener en cuenta el flujo en este análisis. El árbol principal queda ampliado con el set del análisis como se ve en la figura:



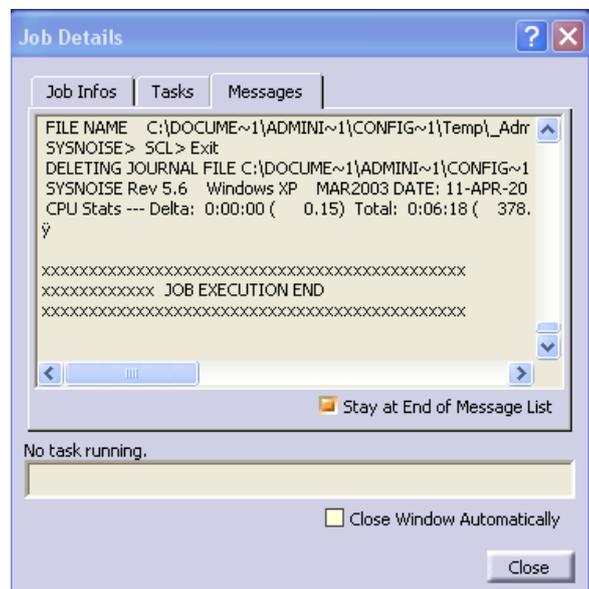
Para definir el análisis se hace click con el botón derecho sobre *acoustic response solution set.1* → *acoustic response solution set.1 object* → *definition* entonces emerge la siguiente ventana:



Aquí se añadirá el rango de frecuencia en el se quiere hacer el análisis y el paso, modificando los valores en las pestañas y luego haciendo click en el botón *add*, en este caso se hará entre 20 y 3000Hz de 20 en 20 Hz. También se indicará que guarde los resultados del campo de puntos que definimos, se hará como funciones, quedando de la siguiente manera:



Se pulsa el ok y se procede a resolver. En el árbol principal, se hace click con el botón derercho sobre *acoustic response solution set.1* → *update*. Emerge una ventana (*job detail*) en la que aparece los pasos que va realizando el software hasta resolver el análisis, en caso de que hubiera algún error aparecería ahí escrito, en caso de que todo vaya bien , una vez termine aparece lo siguiente:



5.2.4 Obtención de TL.

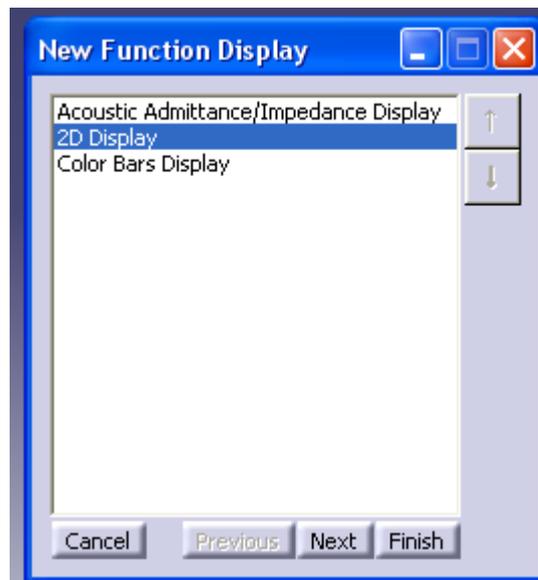
Una vez resuelto el análisis se procede al cálculo de las pérdidas de transmisión. A continuación se explica el procedimiento:

La expresión mediante la cual se hará el cálculo es la ecuación 5.1.

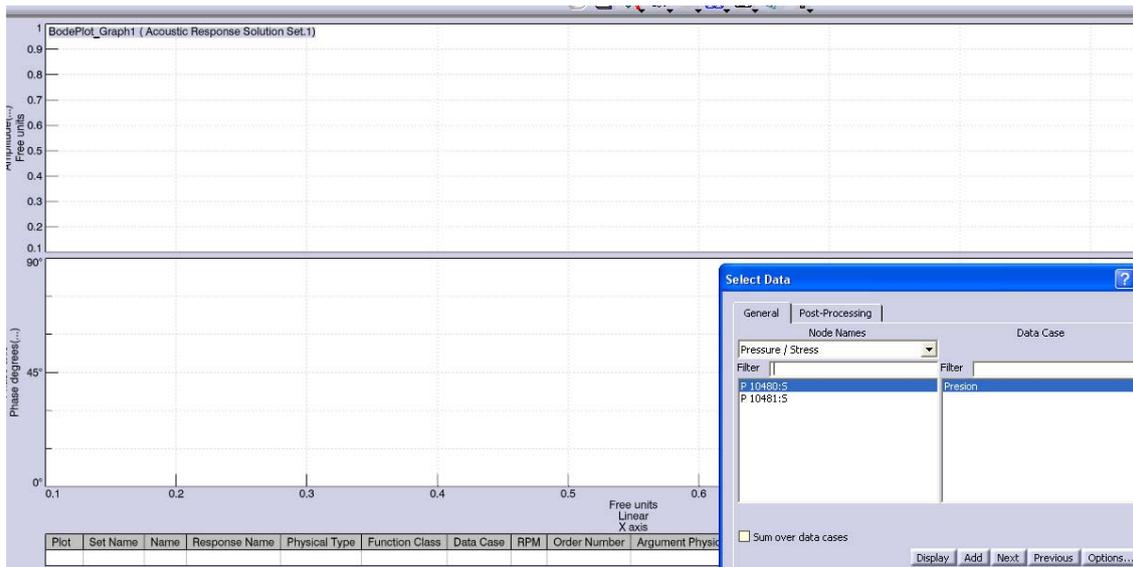
Los valores de P_1 , P_2 y U_1 se toman del análisis realizado con el LMS, una vez los tenemos, calculamos los valores de P_1^+ y P_2^+ mediante 5.7 y 5.8, y sustituimos en 5.1.

Para exportar los valores se procede de la siguiente manera:

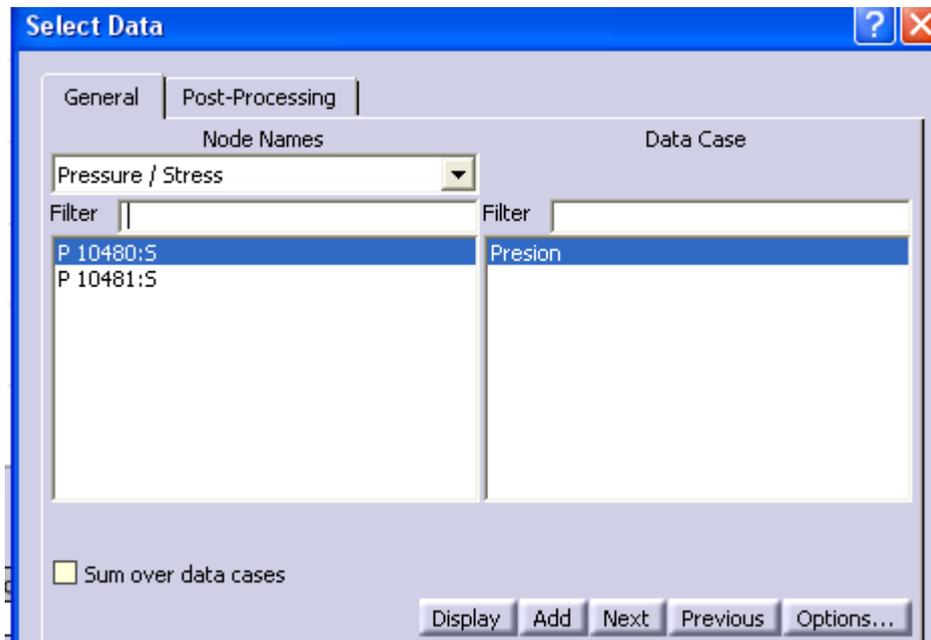
En el árbol principal se hace click con el botón derecho sobre *acoustic response solution set1* → *New function display*. En la pantalla emergente que aparece se selecciona tipo *2D display* → *next*



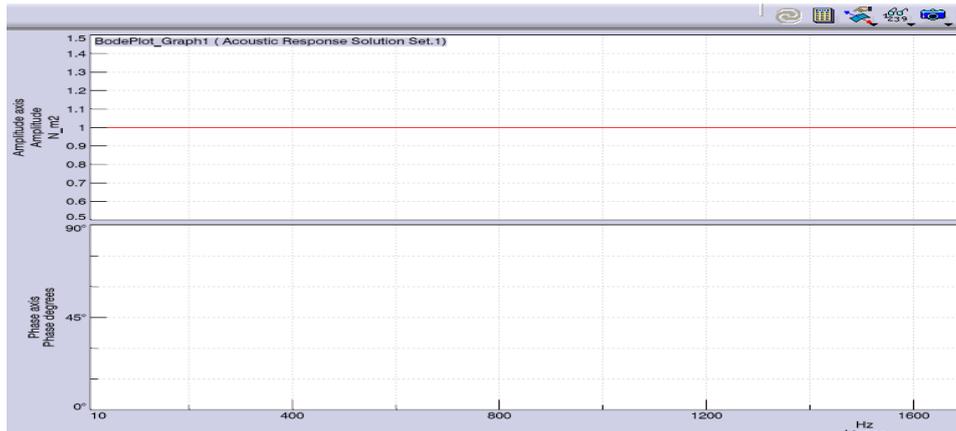
En la nueva ventana se puede elegir el modo en que representar los datos, seleccionamos *bode Plot* → *finish* y aparece la siguiente pantalla:



Los valores necesarios son P_1 , U_1 y U_2 . Se observa que aparecen únicamente dos nodos a elegir, P10480 y P10481, los nodos que se incluyeron en el *Point set field point mesh*.

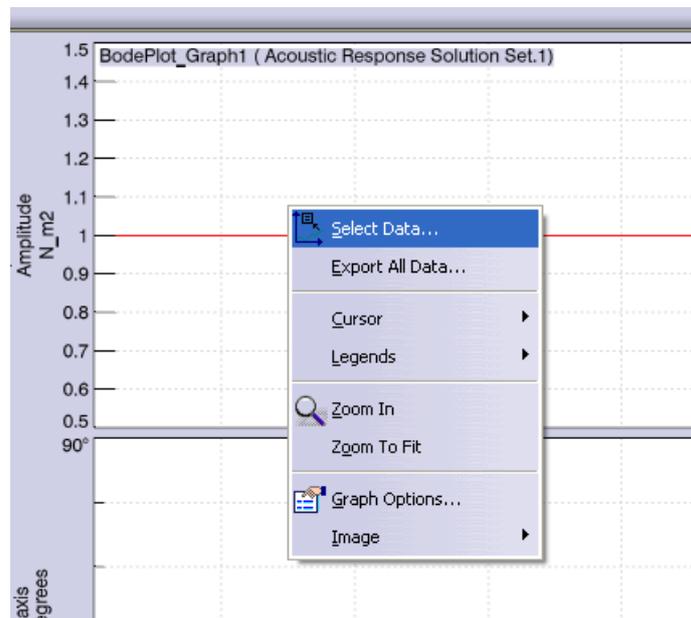


Para obtener la presión a la entrada, P_1 , se deja seleccionada *pressure/stress* y se selecciona el primer nodo, se hace click en display y aparece dibujada de la siguiente manera:

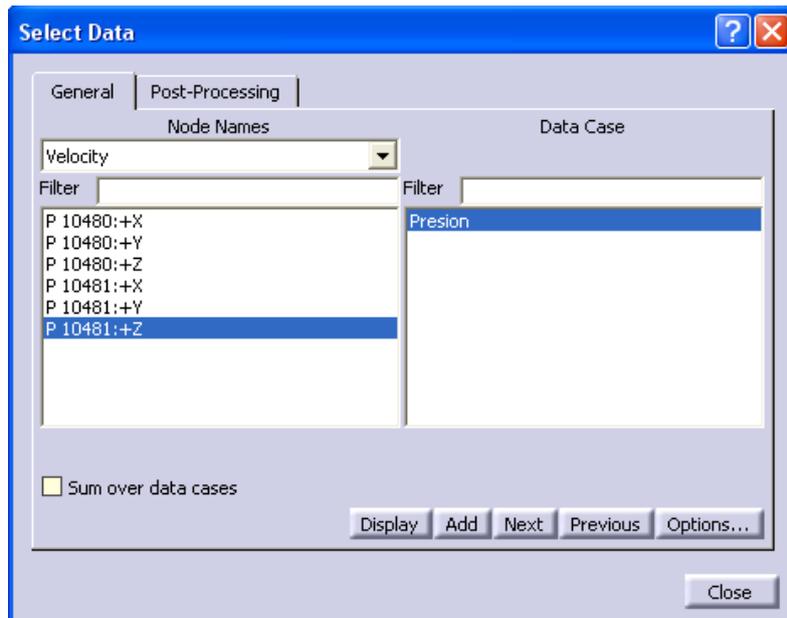


No ha sido ninguna sorpresa, se impuso que la presión en la cara de entrada fuese 1 N/m^2 . No es interesante que exportemos este dato, es un valor constante durante el análisis.

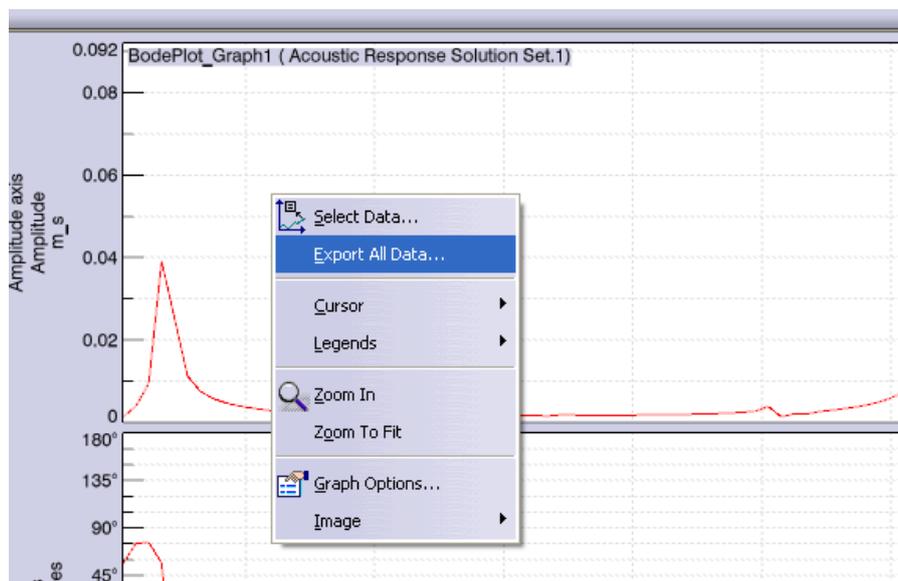
Exportamos los valores de U_2 , para ello se dibuja primero, se hace click sobre esta pantalla, la de la figura anterior, con el botón derecho y se selecciona *select data*,



Para dibujarla se procede igual que con la presión pero en este caso se selecciona velocidad y el segundo nodo. En este caso se puede representar la velocidad en cualquier eje de manera independiente, el eje de interés en este estudio es el eje z:



Se hace click en *display* y una vez tenemos la gráfica se hace click con el botón derecho sobre el dibujo y se selecciona *export all data*:



Tras esto aparecerá un cuadro que nos permitirá guardar la información en Excel en el directorio que se quiera, los resultados se presentan de la siguiente manera:

	A	B	C	D
1	X: Linear	Amplitude	Phase degrees	
2	10	0.00132	55.94996	
3	30	0.00392	75.05791	
4	50	0.00939	76.18198	
5	70	0.03912	57.01552	
6	90	0.02531	-76.55743	
7	110	0.01133	-85.54541	
8	130	0.00757	-87.5667	
9	150	0.00579	-88.35851	
10	170	0.00473	-88.73446	
11	190	0.00402	-88.91864	
12	210	0.00349	-88.98872	
13	230	0.00308	-88.96705	
14	250	0.00274	-88.83939	
15	270	0.00243	-88.53742	
16	290	0.00213	-87.84358	
17	310	0.00178	-85.88938	
18	330	0.00124	-76.12046	
19	350	0.00196	9.91563	
20	370	0.00465	-75.11919	
21	390	0.00309	-86.74914	
22	410	0.00261	-88.63525	
23	430	0.00236	-89.24743	
24	450	0.0022	-89.51398	
25	470	0.00208	-89.65002	

5.2.5 Resultados y análisis.

Pérdidas de transmisión obtenidas por el software LMS virtual.lab:

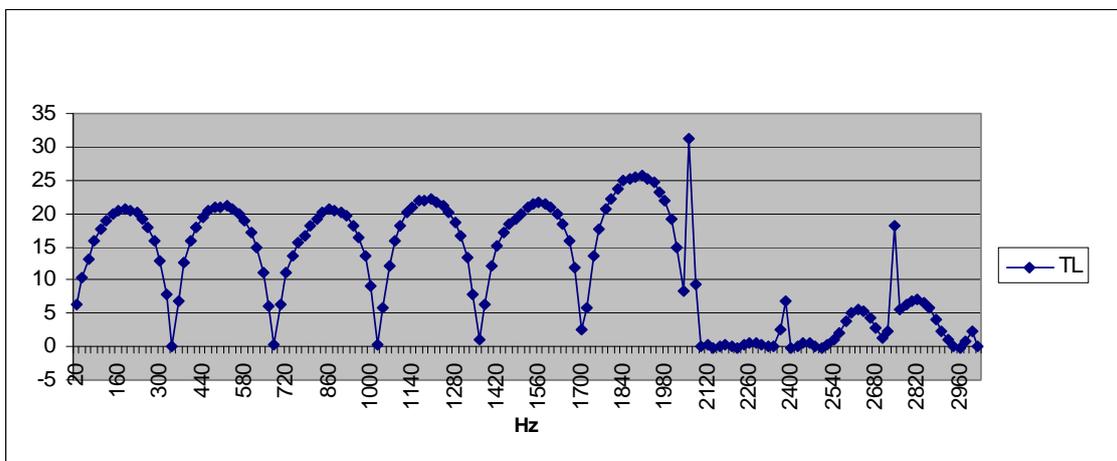


Figura 5.6. TL para cámara de expansión simples calculados mediante LMS virtual usando MEF

Comparando con la siguiente gráfica, figura 5.7, en la que se presentan los resultados obtenidos en la tesis [6] mediante el modelo de onda plana, se observa que hasta los 2000 Hz, a pesar de que los resultados experimentales son algo mayores, sobre todo a partir de la frecuencia de 1700 Hz, se ajustan bastante bien a los obtenidos en la tesis. La gran diferencia aparece a partir de los 2000 Hz, lo cual se puede explicar debido a las limitaciones del modelo de onda plana. En una discontinuidad geométrica el campo acústico es multidimensional, generándose modos de alto orden. Por tanto, ante cambios bruscos de sección la solución ofrecida por el método de onda plana es aproximada. Otra limitación se refiere a que el modelo de onda plana proporciona los mismos resultados con independencia de la geometría de la sección transversal. Por tanto los resultados expuestos en la figura 5.6, calculados mediante el método de elementos finitos son más reales que los otros.

En la tesis también se realizan cálculos mediante el método de elementos finitos, figura 5.8, los resultados mostrados en esa gráfica son de tres cámaras de expansión simple, con distintas dimensiones, ninguna de la dimensión de la que se está analizando en este caso, aunque los resultados que se obtienen son suficientes para comprobar que el comportamiento visto en la figura 5.6 es el comportamiento que deben seguir las pérdidas de transmisión.

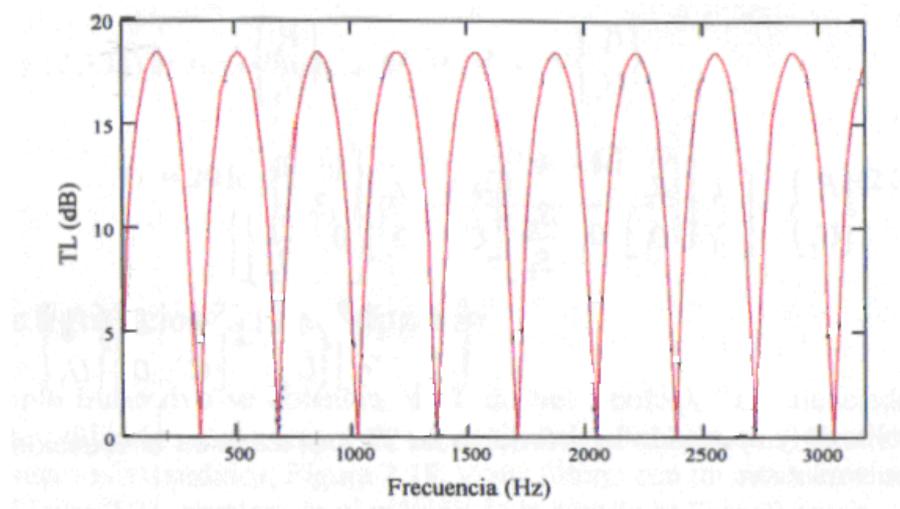


Figura 5.7. TL para cámara de expansión simple calculados mediante método de onda plana

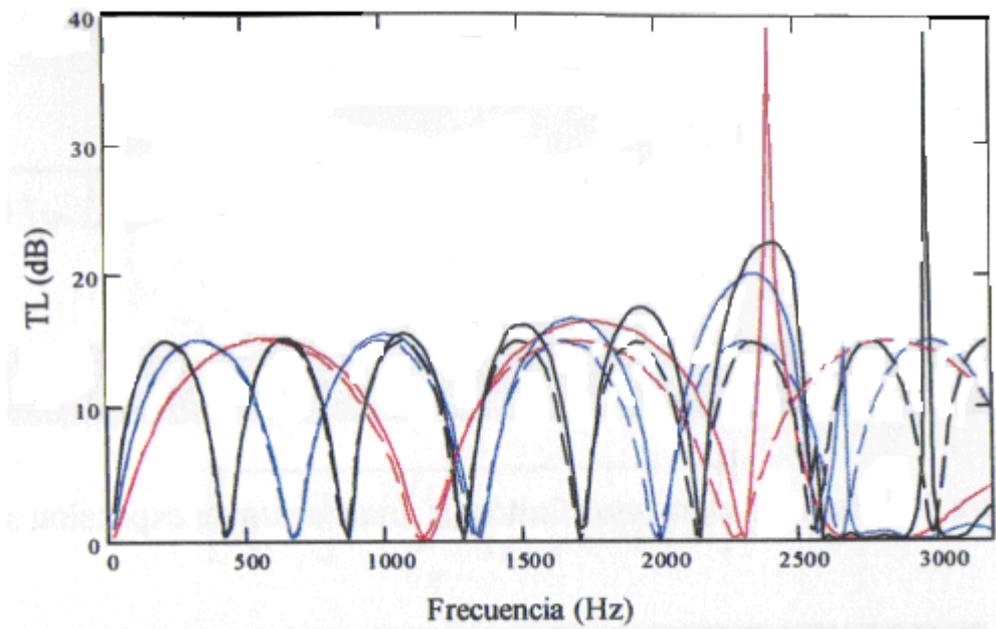


Figura 5.8. Comparación entre métodos. Tl cámara de expansión simple: geometría 1: ———, MEF; - - - - - ; onda plana; geometría 2: ———, MEF; - - - - - ; onda plana; geometría 3: ———, MEF; - - - - - , onda plana.

5.3 Simulación del silenciador con pequeñas cámaras de expansión.

5.3.1 Cálculo de las pérdidas de transmisión

El próximo silenciador a estudiar está definido en el primero de los estudios analizados. Se recordarán sus características y las condiciones bajo las que se realizará la simulación.

El silenciador que se someterá al análisis mediante el software virtual.lab tiene el siguiente aspecto:

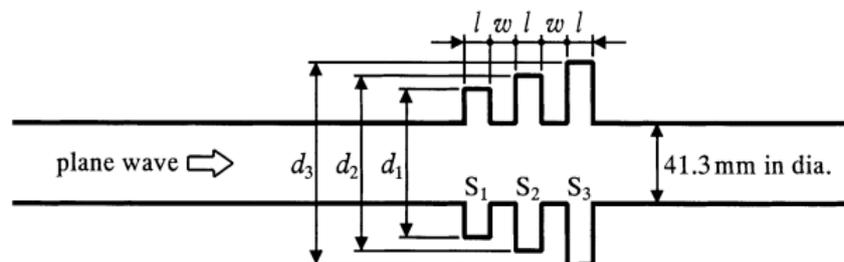


Figura 5.9. TL para tres cámaras de expansión simples dispuestas en serie

La longitud total del conducto será de 0.1m. Cada disco tendrá un espesor $l=5\text{mm}$, esta medida será constante, al igual que la separación entre ellos, $w= 1\text{mm}$. El diámetro del conducto también permanece constante y será de 41.3mm. El diámetro de los discos de expansión serán variables, se concreta más adelante.

El procedimiento que se lleva a cabo es el mismo que se hizo anteriormente con la cámara de expansión simple.

En este caso, el código introducido para generar la geometría en Ansys es el siguiente:

```
cylind,0 0.02065,0,0.0415,0,360
```

```
cylind,0,0.032,0.0415,0.0465,0,360
```

```
cylind,0,0.02065,0.0465,0.0475,0,360
```

```
cylind,0,0.036,0.0475,0.0525,0,360
```

```
cylind,0,0.02065,0.0525,0.0535,0,360
```

```
cylind,0,0.040,0.0535,0.0585,0,360
```

```
cylind,0,0.02065,0.0585,0.1,0,360
```

Con la diferencia de que en este caso el tamaño del elemento es menor,

$$\lambda = \frac{c}{f_{\max}} = \frac{340}{7000} = 0.024, \text{ el tamaño del elemento es } 0.005\text{m, por lo que cumple que es}$$

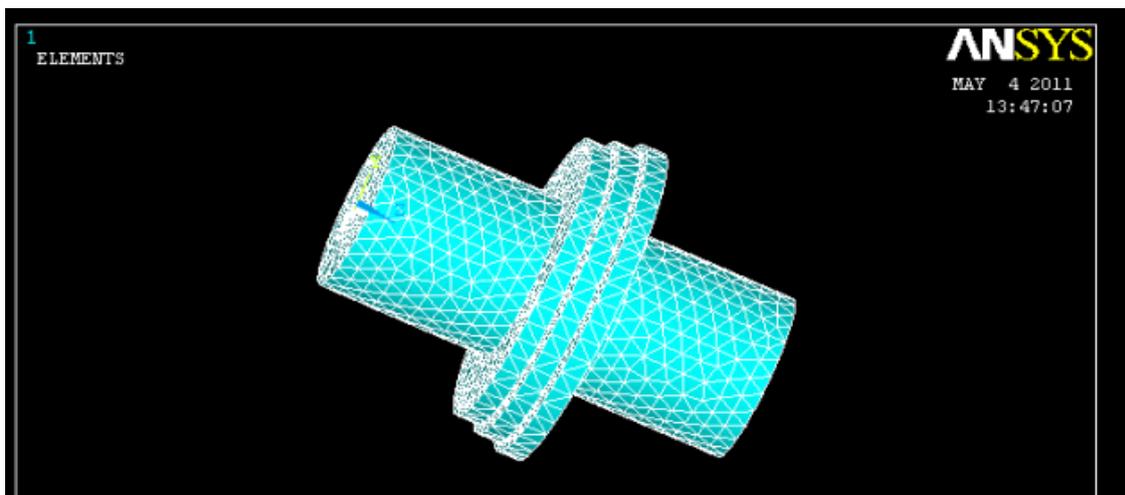
menor que $\lambda/2$.

Se trabajará bajo las mismas condiciones de contorno, presión igual a 1 N/m^2 a la entrada y salida anecoica, siendo el flujo del interior del conducto aire.

Se lleva a cabo el análisis de tres configuraciones distintas, en la que varían las dimensiones de los radios de los discos, siendo las siguientes:

Configuración	D1(mm)	D2 (mm)	D3 (mm)
A	64	72	80
B	72	76	80
C	64	68	72

La malla obtenida en Ansys para la primera de las configuraciones es la siguiente:



Los resultados obtenidos en la investigación se llevan a cabo experimentalmente y teóricamente, se presentan a continuación, en primer lugar los resultados de la investigación.

En este gráfico, figura 5.10, las medidas representadas por un punto lleno, •, corresponden al análisis cuando $l=2mm$, las representadas por el punto vacío, °, se hicieron para $l=5mm$ y la línea, _____, se corresponde con los datos teóricos obtenidos mediante el método de las diferencias finitas para este último caso. Por lo tanto los resultados obtenidos con el software LMS virtual.lab deben compararse con estos dos últimos, el punto vacío y el FDM, y son los siguientes:

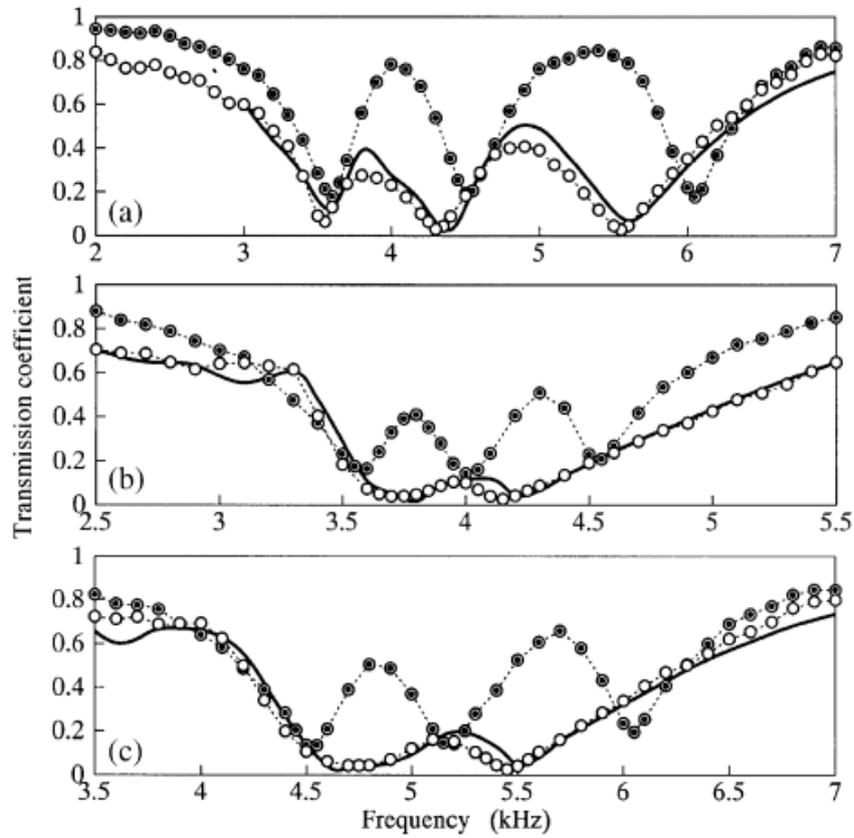


Figura 5.10. TL para tres discos de expansión dispuestos en serie

Los resultados obtenidos mediante el LMS virtual.lab son los siguientes:

Configuración (a):

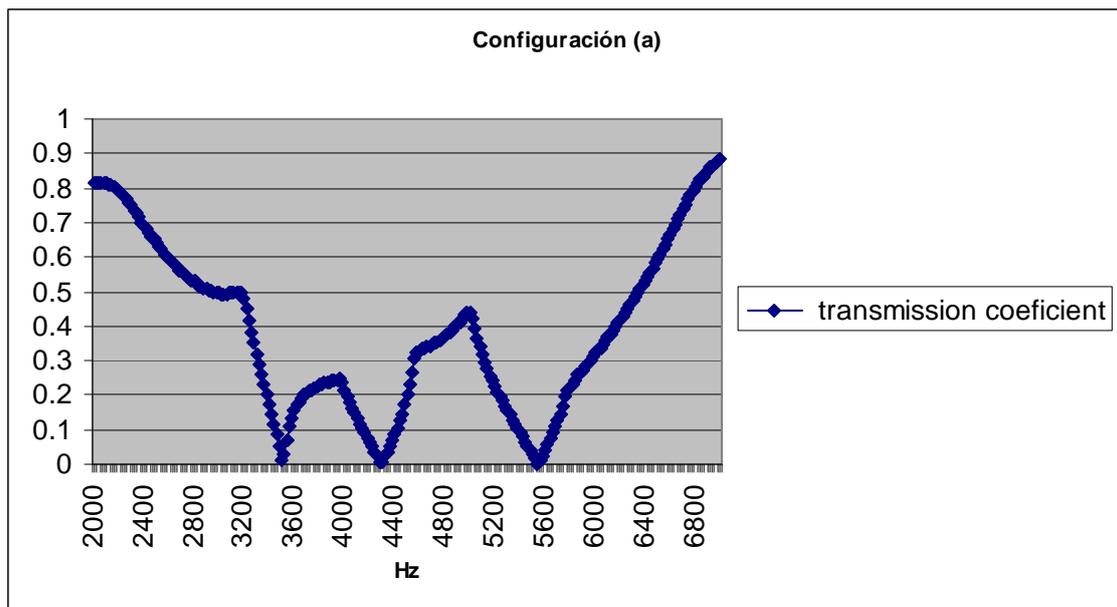


Figura 5.11 TL para tres cámaras de expansión simples calculados mediante el MEF usando LMS virtual

Configuración (b):

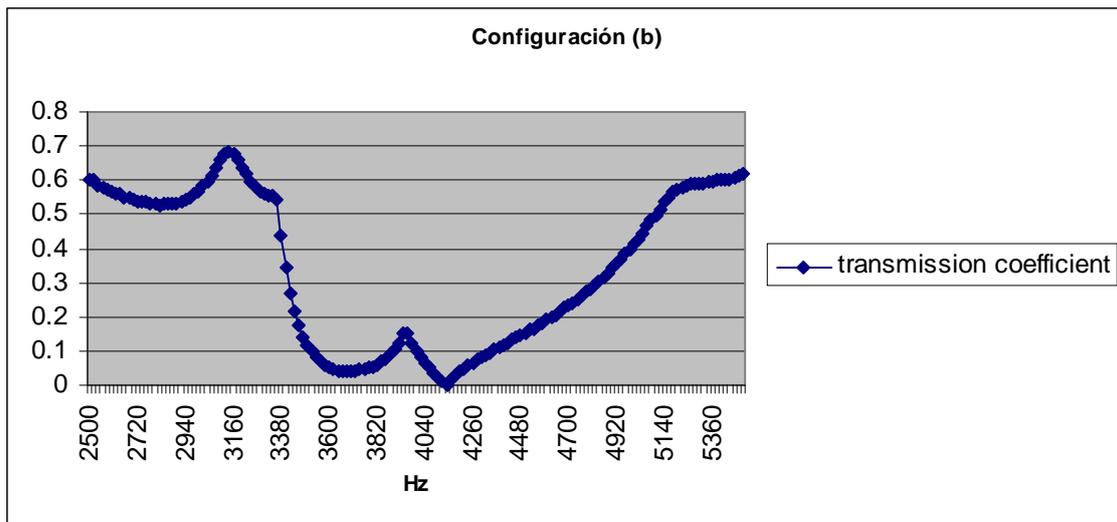


Figura 5.12. TL para tres cámaras de expansión simples calculados mediante el MEF usando LMS virtual

Configuración (c):

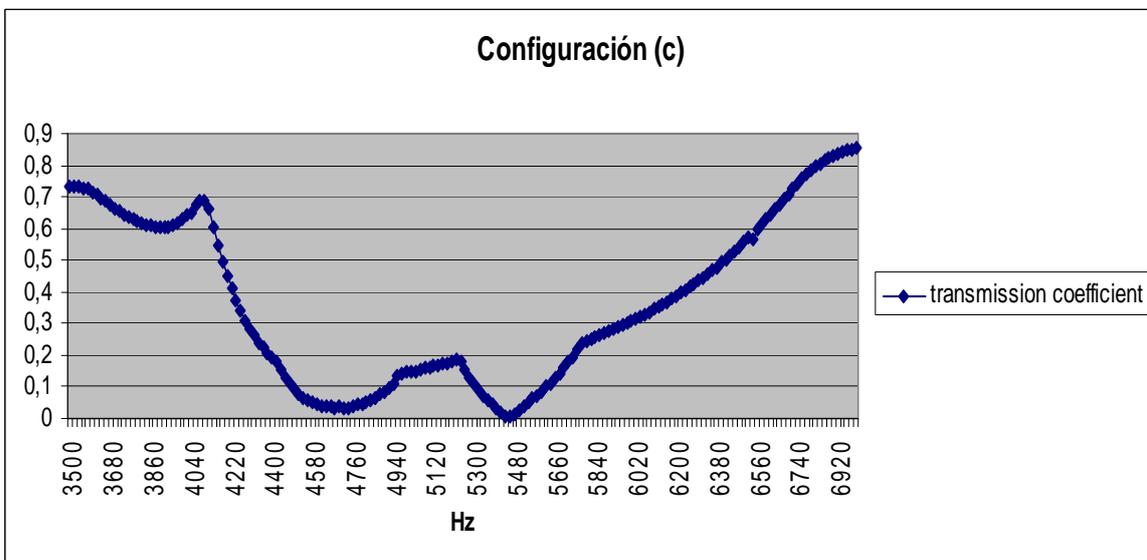


Figura 5.13. TL para tres cámaras de expansión simples calculados mediante el MEF usando el LMS virtual

5.3.2 Análisis y resultados

Como se comentó en la introducción del proyecto, existe un gran interés en este proyecto por comprobar la viabilidad del LMS virtual.lab, como herramienta para el análisis acústico, y más concretamente para el de conductos. Para examinar de mejor manera los resultados se compararán los picos del coeficiente de transmisión y las frecuencias a las que se producen obtenidos experimentalmente en la investigación con los obtenidos con el software, teniendo en cuenta la dificultad de determinar exactamente esos valores para el caso de la investigación, puesto que sólo contamos con el material anteriormente presentado.

Análisis 1

Se realiza desde la frecuencia de 2000Hz a la de 7000 Hz. La tabla comparativa es la siguiente:

	Resultados experimentales	Resultados teóricos, LMS virtual.lab
C.T₁	0.04	0.02
F₁	3550	3500
C.T₂	0.01	0.01
F₂	4300	4300
C.T₃	0.01	0.01
F₃	5600	5500

Análisis 2

Se realiza desde la frecuencia de 2500Hz a la de 5500 Hz. La tabla comparativa es la siguiente:

	Resultados experimentales	Resultados teóricos, LMS virtual.lab
C.T₁	0.04	0.05
F₁	3750	3700
C.T₂	0.01	0.01
F₂	4150	4150

Análisis 3

Se realiza desde la frecuencia de 3500Hz a la de 7000 Hz. La tabla comparativa es la siguiente:

	Resultados experimentales	Resultados teóricos, LMS virtual.lab
C.T₁	0.04	0.05
F₁	4700	4700
C.T₂	0.01	0.01
F₂	5480	5500

Se corrobora en este segundo análisis la efectividad del software a la hora de realizar análisis acústicos, en este caso, con la novedad de que los resultados con los que se compara son resultados tomados experimentalmente, en un banco de ensayos. Las pequeñas discrepancias que se pueden encontrar entre los valores, es probable que se deba a la falta de precisión al leer los datos de las gráficas mostradas, ya que su resolución no es demasiada y no se dispone de más información de la investigación.