



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Politécnica Superior de Gandia

Simulación completa de un transductor a través de una
App diseñada en COMSOL Multiphysics

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Acústica

AUTOR/A: Simón Domínguez, Carlos

Tutor/a: Ramos Peinado, Germán

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCOLA POLITÈCNICA SUPERIOR DE GANDIA

Master en Ingeniería Acústica



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCOLA POLITÈCNICA
SUPERIOR DE GANDIA

“Simulación completa de un transductor a través de una App diseñada en COMSOL Multiphysics”

TRABAJO FINAL DE MASTER

Autor/a:
Simon Dominguez, Carlos

Tutor/a:
Ramos Peinado, Germán

GANDIA, 2023

Resumen:

En el presente proyecto se plantea la implementación de una aplicación de ordenador que permitirá al usuario realizar una simulación completa de un altavoz electrodinámico, estudiando así su respuesta en frecuencia, su directividad y su comportamiento en pequeña y gran señal.

Dicha simulación será llevada a cabo mediante un proceso multifísico, haciendo uso del método de elementos finitos (FEM) empleando el software COMSOL Multiphysics. Para ello se recurrirá a las interfaces físicas de acústica, mecánica de sólidos y electromagnetismo.

Gracias a la funcionalidad Application Builder de COMSOL, se podrá generar una aplicación ejecutable en cualquier sistema operativo sin necesidad de tener dicho software instalado. Además, permitirá al usuario final obtener resultados fidedignos sin la necesidad de tener que configurar o entrar en contacto con las físicas utilizadas durante la simulación, proporcionando así un entorno más amigable.

Los resultados obtenidos serán verificados gracias a la comparación de medidas experimentales del mismo transductor bajo estudio.

Resum:

En el present projecte es planteja l'implementació d'una aplicació d'ordinador que permetrà a l'usuari realitzar una simulació completa d'un altaveu electrodinàmic, estudiant així la seua resposta en freqüència, la seua directivitat i el seu comportament en xicoteta i gran senyal.

Aquesta simulació serà duta a terme mitjançant un procés multifísic, fent ús del mètode d'elements finits (FEM) emprant el programa COMSOL Multiphysics. Per a això es recorrerà a les interfícies físiques d'acústica, mecànica de sòlids i electromagnetisme.

Gràcies a la funcionalitat Application Builder de COMSOL, es podrà generar una aplicació executable en qualsevol sistema operatiu sense necessitat de tindre aquest programa instal·lat. A més, permetrà a l'usuari final obtenir resultats fidedignes sense la necessitat d'haver de configurar o entrar en contacte amb les físiques utilitzades durant la simulació, proporcionant així un entorn més amigable.

Els resultats obtinguts seran verificats gràcies a la comparació de mesures experimentals del mateix transductor sota estudi.

Abstract:

The following project presents the development of a simulation APP which will perform a complete simulation of an electrodynamic loudspeaker. Therefore, a study about its frequency response, directivity and its small and big signal behavior will be done.

All the simulations will be performed using the Finite Element Method (FEM) through the COMSOL Multiphysics software. The Acoustical, Structural Mechanics and Electromagnetics COMSOL interfaces will be used.

Thanks to COMSOL's Application Builder, a stand-alone APP can be compiled. It will allow the end user to obtain reliable results without having to configure the physics interfaces used during the simulation, providing a user-friendly environment.

The obtained results will be verified thanks to the comparison of experimental measurements of the same transducer under study.

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a mi tutor Germán Ramos Peinado por acompañarme todos estos años, desde la primera vez que contacté con él para hacer mi TFG hasta el día de hoy donde me encuentro finalizando mi TFM. Durante todo este periodo de tiempo siempre he tenido su apoyo, ayuda y paciencia. He aprendido mucho de él y sin duda ha influido en que mi pasión por el audio y el sonido haya ido aumentando durante estos años.

Quiero agradecer también a todos los profesores del Master de ingeniería acústica de Gandía, así como a mis compañeros de curso, con los cuales he compartido momentos muy bonitos haciendo de este master una experiencia muy especial.

Agradecer al departamento de I+D de Acústica Beyma por permitirme volver a colaborar con ellos en un proyecto muy ilusionante para mí, espero que les sea de ayuda, gracias Jorge, Rafa y Diego.

Por último, me gustaría hacer una mención especial para Adrián Roig, también del departamento de I+D de Beyma, el cual ha sido prácticamente cotutor de este trabajo. Gracias por haberme apoyado tanto durante este proyecto, ha sido un placer trabajar a tu lado una vez más. Gracias por la paciencia y por las horas dedicadas, por todo lo que me has enseñado desde el primer día de mis prácticas en Beyma hace ya unos años, si este trabajo ha llegado a buen puerto, tú tienes mucha culpa de ello. De Adrián no me llevo solo conocimientos si no también una gran amistad, gracias.

Índice

Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Motivación	1
1.2 Precedentes.....	1
Capítulo 2. Objetivos	7
Capítulo 3. Método de Elementos Finitos (<i>FEM</i>)	8
3.1 Introducción al <i>FEM</i>	8
3.2 Bases y funcionamiento del <i>FEM</i>	8
Capítulo 4. <i>Software</i> empleado	12
4.1 COMSOL <i>Multiphysics</i>	12
4.2 <i>App Builder</i>	14
Capítulo 5. Marco Teórico	16
5.1 El altavoz electrodinámico	16
5.2 Interfaces físicas y condiciones de contorno.....	18
5.3 <i>Blocked Impedance</i> :	23
5.4 Ajuste de propiedades mecánicas de los materiales:.....	25
Capítulo 6. Implementación y desarrollo	26
6.1 Implementación del modelo en COMSOL, Pre-Procesado:.....	26
6.1.1 <i>Complete Mode</i>	27
6.1.2 <i>Blocked Impedance</i>	42
6.2 Implementación de la App:	44
6.3 Resultados, Post-procesado:.....	44
6.3.1 Resultados <i>Electro Magnetic Study (DC)</i> :	44
6.3.2 Resultados <i>Blocked Impedance Study (AC)</i> :	46
6.3.3 Resultados <i>Eigenfrequencies Study</i> :	46
6.3.4 Resultados <i>Complete Study</i> :	49
6.3.5 Comparación <i>Complete Mode VS Blocked Impedance Mode</i> :	57
6.3.6 Comparación Simulación VS Medidas experimentales:	58
6.4 Estudio no lineal:.....	60
Capítulo 7. Trabajos futuros y mejoras	64
Capítulo 8. Conclusión.....	65
Capítulo 9. Bibliografía.....	66
Anexos.....	68

Capítulo 1. Introducción

Las aplicaciones son herramientas que rodean a los ingenieros en su día a día para facilitar su labor a la hora de resolver problemas y retos que se les van planteando en su trabajo. Muchas empresas de diversos sectores enfocan sus proyectos fundamentándolos en *softwares* de simulación, los cuales les permiten tener una primera aproximación muy realista de los resultados que van a obtener.

Dentro de un campo complejo, como es el de la electro-acústica, no se está exento de utilizar este tipo *softwares*, es más, en caso de requerir resultados de alta fidelidad se tendrá que hacer uso de algoritmos complejos, donde entren en juego diferentes puntos de vista físicos y que estos se complementen correctamente entre sí. Es aquí donde encontramos COMSOL *Multiphysics* [1] como un entorno eficiente y fiable en el que trabajar.

El presente trabajo se centrará en el desarrollo de una aplicación que permita simular el comportamiento en régimen lineal de un altavoz electrodinámico de radiación directa, haciendo hincapié en todos aquellos parámetros y aspectos que describen su funcionamiento y sean útiles para su posterior diseño. Esta aplicación será implementada haciendo uso del método de elementos finitos (*FEM*) [14], siendo aplicado gracias al *software* de simulación citado en el párrafo anterior.

1.1 Motivación

Dado que en mi trabajo final de grado realicé un proyecto, el cual, se formuló por inquietudes e iniciativas propias, he decidido probar un enfoque diferente para este TFM. Ya que mi siguiente paso es el de iniciarme en el mundo laboral, decidí que me gustaría dotar el estudio con un enfoque más profesional, por lo que contacté con ingenieros del sector de la electro-acústica.

Fue así como me puse en contacto con Acústica Beyma S.L. [9] donde yo había realizado mis prácticas en empresa anteriormente. Mi principal motivación era la de realizar un proyecto, el cual, una empresa importante dentro del sector fuese a darle uso en el día a día.

De este modo decidimos realizar una colaboración de mutuo acuerdo entre ambas partes, en la que yo ganaría tanto conocimientos, como la experiencia de realizar un trabajo para el sector profesional. Por la otra parte, ellos ganarían una herramienta útil para poder emplear en su rutina de trabajo.

1.2 Precedentes

Los *Softwares* de simulación, o modelado matemático, basan su funcionamiento en conseguir modelar un fenómeno real, descrito por ecuaciones matemáticas que describen fenómenos físicos. Este tipo de *software* es capaz de simular cualquier fenómeno que pueda reducirse a datos matemáticos, como podrían ser: condiciones climáticas, circuitos electrónicos, reacciones químicas, mecánica de fluidos, deformaciones estructurales, y un largo etcétera.

En muchos casos la simulación puede ser compleja, esto es debido a que las influencias que afectan a los fenómenos naturales son elevadas. Lo más óptimo por tanto será determinar los factores con mayor determinación en el objetivo de la simulación.

En el caso de un altavoz electro-dinámico los factores más influyentes serán las físicas electro-magnética, mecánica y acústica. También influyen otros factores importantes, por ejemplo, la transferencia del calor, pero como se ha comentado, nos centraremos en solo estas tres, con las que se obtendrán resultados validos de una forma eficiente.

Existen diversos *softwares* dedicados a realizar simulaciones óptimas de altavoces electrodinámicos. A continuación, se describen algunos ejemplos:

FEMM

FEMM (*Finite Element Method Magnetics*) [2], es un conjunto de programas que son empleados para resolver problemas electromagnéticos de baja frecuencia en dos dimensiones, tanto dominios planos como con geometría axisimétrica.

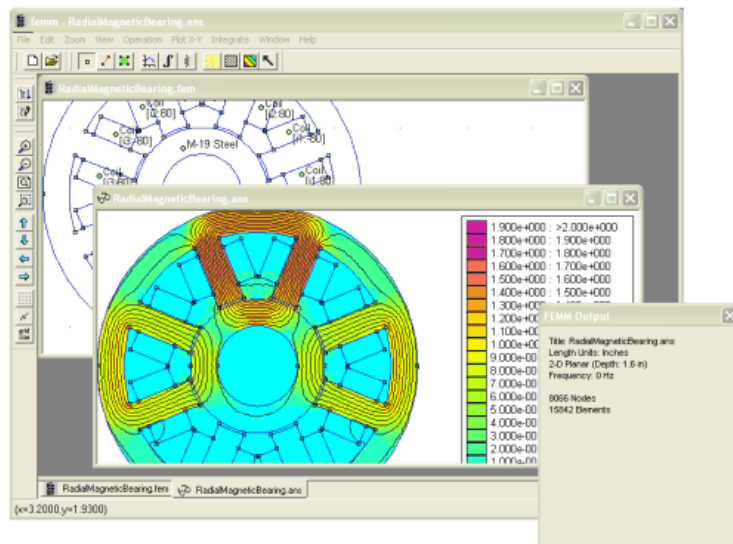


Figura 1 Interfaz FEMM [2]

Este *software* aborda problemas magnetostáticos lineales y no lineales, problemas armónicos magnéticos de tiempo lineales y no lineales, y problemas de flujo de calor en estado estacionario. Por lo tanto, nos permitirá obtener una gran información del conjunto magnético del altavoz, así como el comportamiento calorífico de este.

A continuación, se muestran algunos resultados de una simulación de la parte magnética de un *Woofers*:

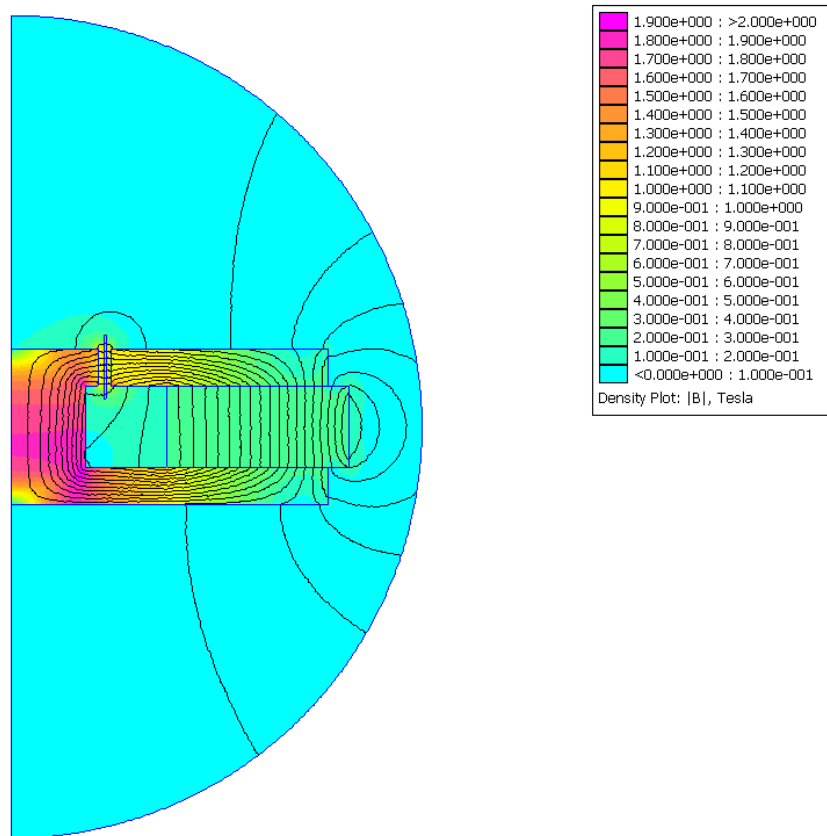


Figura 2 Resultado 1 software FEMM [2]

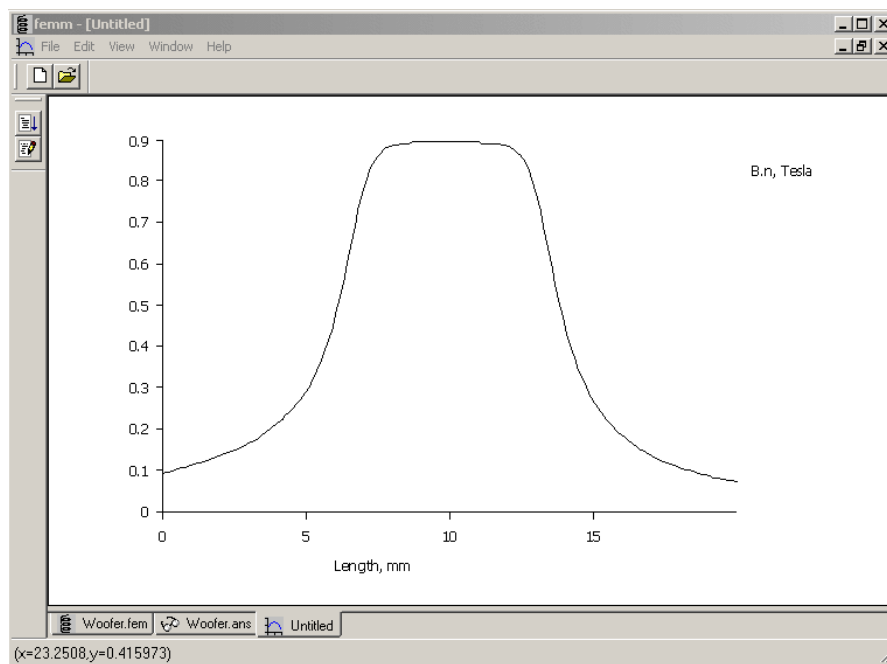


Figura 3 Resultado 2 Software FEMM [2]

FEMM es un software de uso gratuito.

PafLS

PafLS [3] es la herramienta de análisis de altavoces de la compañía PACSYS, la cual cuenta con un catálogo de *softwares* de simulación. Hace uso del método de elementos finitos (*FEM*) y provee un amplio abanico de soluciones, así como gráficos interactivos para el post-procesado.

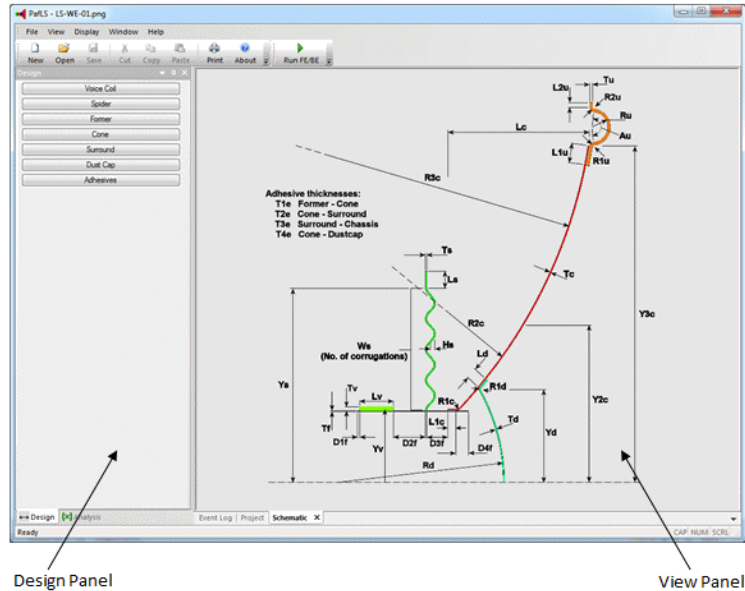


Figura 4 Interfaz PafLS [3]

Permite diseños genéricos de plantillas de altavoces axisimétricas para realizar análisis vibroacústicos. Es apto para simular desplazamientos en la suspensión y *spider* y también posee plantillas de guías de onda axisimétricas, tanto para perfiles estriados, exponenciales y cónicos. Los diversos componentes del altavoz electrodinámico y su funcionamiento serán expuestos en el capítulo 5 del presente trabajo.

Ejemplo de algunos resultados obtenidos con PafLS:

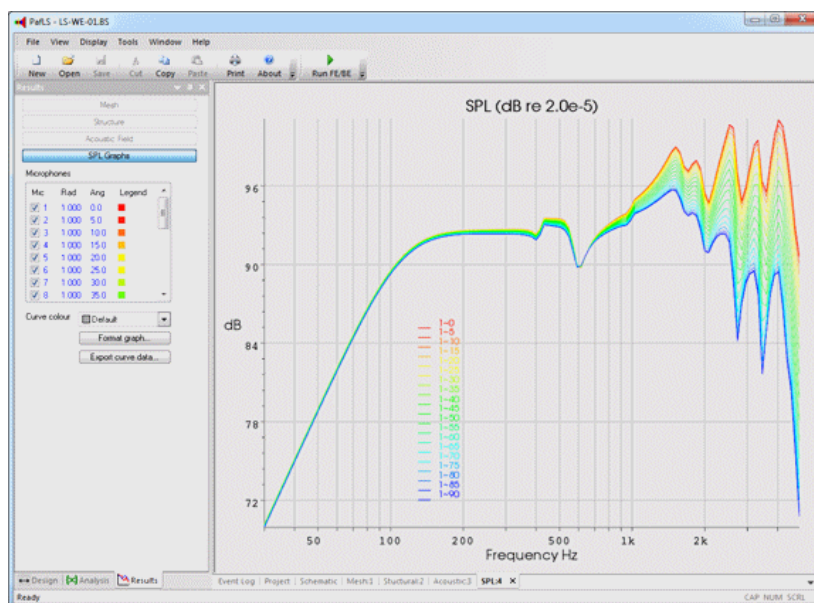


Figura 5 Resultado 1 Software PafLS [3] de respuesta en frecuencia

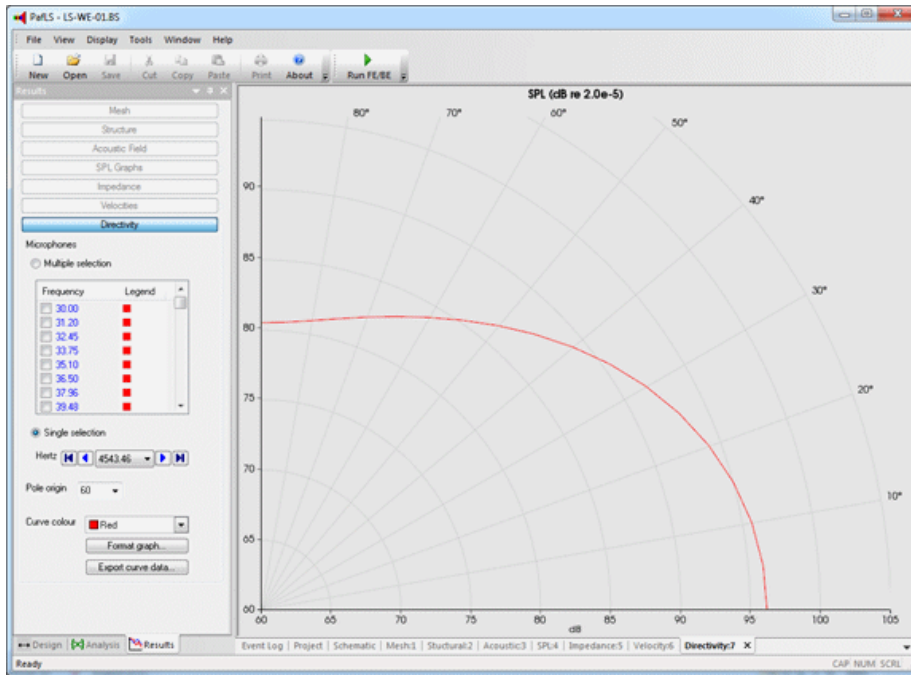


Figura 6 Resultado 2 Software PafLS [3] de directividad

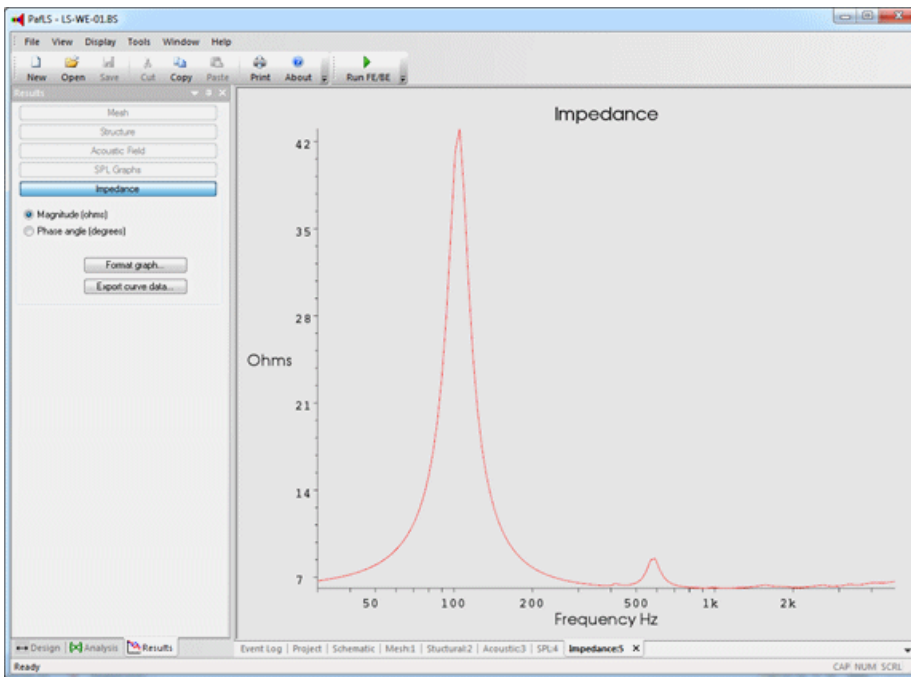


Figura 7 Resultado 3 Software PafLS [3] de impedancia eléctrica

PafLS es un software de pago.

FINECone

FINECone [4] es un *software* de simulación de la empresa danesa LOUDSOFT. Este nos permite, al importar una geometría y unos determinados parámetros de entrada, realizar una simulación acústica. Su método de cálculo es bastante rápido, pero no está preparado para realizar simulaciones magnéticas. Se trata de un software de pago.

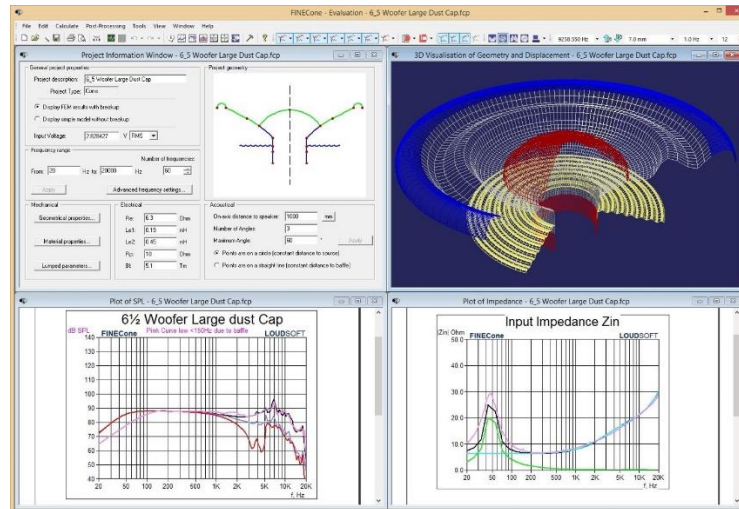


Figura 8 Interfaz FINECone [4]

FINECone nos permite ver también el desplazamiento de la membrana del altavoz por frecuencias, desde un punto de vista 2D axisimétrico.

Algunos ejemplos de simulación:

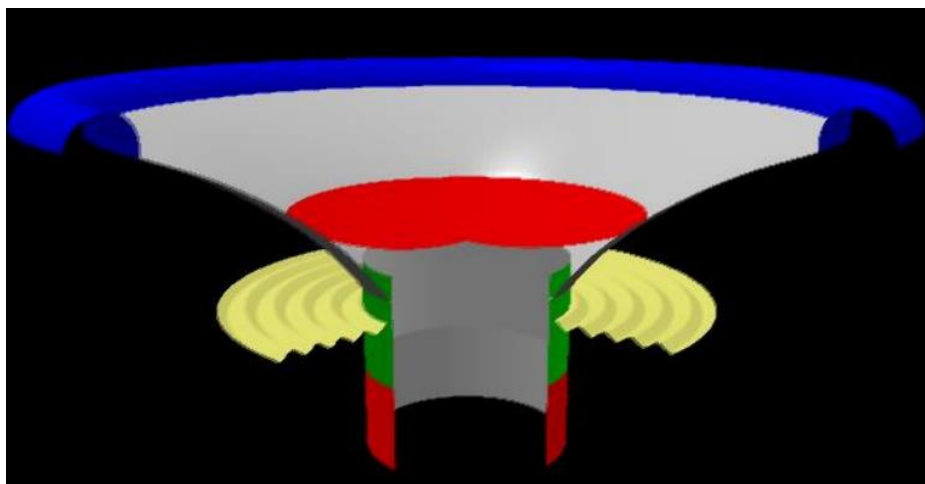


Figura 9 Resultado 1 Software FINECone [4] análisis estructural

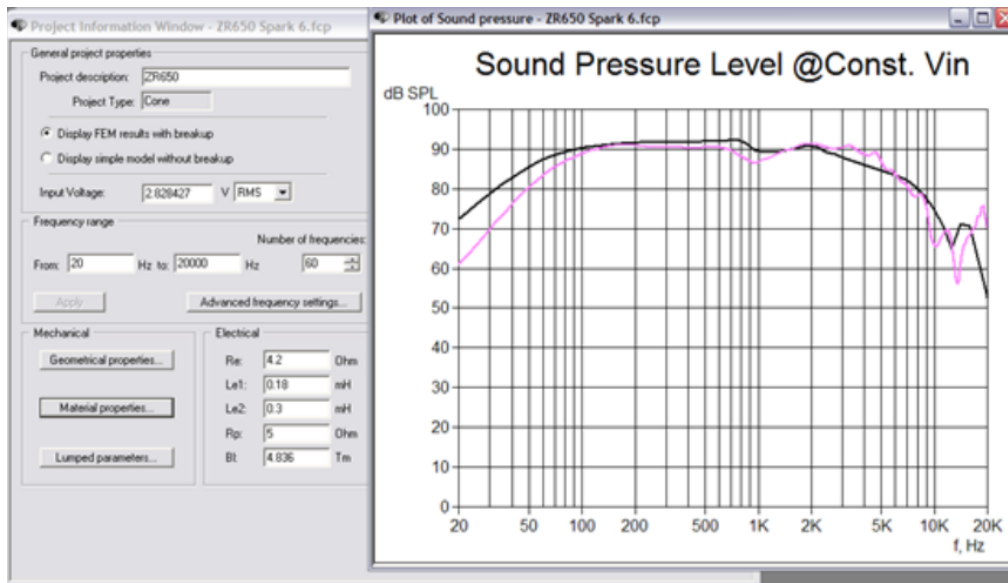


Figura 10 Resultado 2 Software FINECone [4] de respuesta en frecuencia

Capítulo 2. Objetivos

Como se ha explicado con anterioridad, el principal objetivo del proyecto consiste en programar una aplicación para ordenador con la que se pueda simular un altavoz electrodinámico de radiación directa y comportamiento en régimen lineal.

Esta App será implementada haciendo uso del programa de simulación COMSOL *Multiphysics*. Gracias a su funcionalidad *Application Builder*, podremos diseñarla acorde a las necesidades del ingeniero electro-acústico y compilarla para obtener un ejecutable, el cual, pueda ser empleado en cualquier sistema operativo.

Dicha aplicación nos permitirá realizar estudios electro-magnéticos, estructurales y acústicos del altavoz que se quiera simular, con tan solo elegir la geometría de este, y una serie de parámetros conocidos previamente por el propio usuario final. De este modo, presentamos un entorno amigable en el que poder trabajar y diseñar altavoces, comparando diversas geometrías y materiales, sin la necesidad de tener que configurar todas las físicas que emplea COMSOL, ni el acople entre estas, ya que es un conocimiento que el usuario final no tiene porque tener.

Así pues, se podrá obtener una gran variedad de resultados, fieles al comportamiento real del modelo, tales como: Respuesta en frecuencia, impedancia eléctrica, directividad, gráficas polares, modos estructurales, parámetros TS y más.

La aplicación constará de dos modos de funcionamiento, entre los cual el usuario deberá de elegir antes de empezar la simulación: modo completo y modo *Blocked Impedance* [10][11]. En el modo completo se hará uso de las tres físicas, electro-magnética, estructural y acústica, mientras que en el modo *Blocked Impedance*, se prescindirá de la física magnética, sustituyéndola por una serie de parámetros de entrada, consiguiendo así una simulación más eficiente y con resultados idénticos.

Al igual que el resto de *softwares* que se han mencionado anteriormente, COMSOL utiliza el método de elementos finitos (*FEM*), el cual será desarrollado en el siguiente capítulo.

Capítulo 3. Método de Elementos Finitos (*FEM*)

Antes de continuar con el desarrollo de nuestra aplicación, es importante entender en que consiste el método de computación de elementos finitos.

3.1 Introducción al *FEM*

El *Finite Element Method* es un método numérico el cual permite aproximar de forma iterativa soluciones de ecuaciones diferenciales parciales. Para la mayoría de geometrías y problemas, estas ecuaciones no pueden ser resueltas con métodos analíticos. El método de aproximación que se emplea es el de la discretización, aplicándolo en modelos de ecuaciones numéricas.

Está pensado para ser empleado en ordenadores, gracias a su gran capacidad de cálculo, ya que permite resolver ecuaciones diferenciales asociadas a problemas físicos o de ingeniería. Normalmente se utiliza para diseñar o mejorar productos y aplicaciones industriales, así como para simular sistemas físicos y biológicos de gran complejidad.

El requisito básico para poder emplear el *FEM* es que las ecuaciones constitutivas y las ecuaciones de evolución temporal sean conocidas de antemano, es por esto que ha crecido enormemente la variedad de problemas que pueden ser resueltos gracias a este método.

3.2 Bases y funcionamiento del *FEM*

Como se ha comentado, el *FEM* te da la posibilidad de conseguir una solución numérica aproximada sobre una estructura, cuerpo o dominio sobre el cual están definidas las ecuaciones diferenciales que caracterizan el comportamiento físico del problema. Para poder obtener estos resultados, se divide este medio continuo en un elevado número de sub-dominios, llamados elementos finitos, es así como se produce la discretización. En cada uno de estos sub-dominios encontramos una serie de puntos representativos, los cuales son denominados nodos.

Estos nodos, pueden ser adyacentes si se encuentran dentro del mismo elemento finito. Un nodo que se encuentra en la frontera del sub-dominio puede permanecer a varios elementos finitos. Todo el conjunto de nodos, teniendo en cuenta sus relaciones de adyacencia se hace llamar malla.

En la figura 11 se puede apreciar un ejemplo sencillo de un mallado unidimensional:

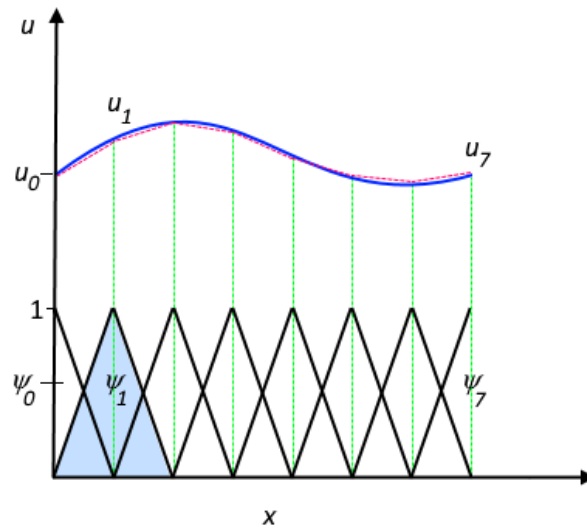


Figura 11 Ejemplo mallado unidimensional. Función real (azul), función aproximada (rojo), Mallado y nodos (negro). [14]

Uno de los beneficios de emplear el método de elementos finitos es que ofrece una gran libertad a la hora de seleccionar la discretización, como podemos apreciar en la figura 12, en zonas donde sea necesaria una mayor resolución se puede modificar la frecuencia o número de nodos:

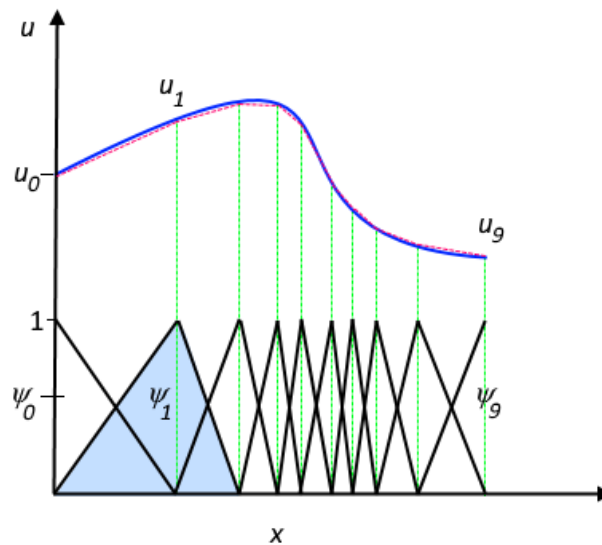


Figura 12 Ejemplo mallado unidimensional con libertad de mallado. Función real (azul), función aproximada (rojo), Mallado y nodos (negro). [14]

Esto es debido a la propiedad del método de la convergencia, si particiones de elementos finitos sucesivamente más finas son consideradas, la solución numérica calculada converge rápidamente hacia la solución exacta del sistema de ecuaciones.

A continuación, en la figura 13, podemos apreciar ejemplos de elementos finitos que compondrán los elementos de la malla, tanto para dominios en 2D, como para 3D:

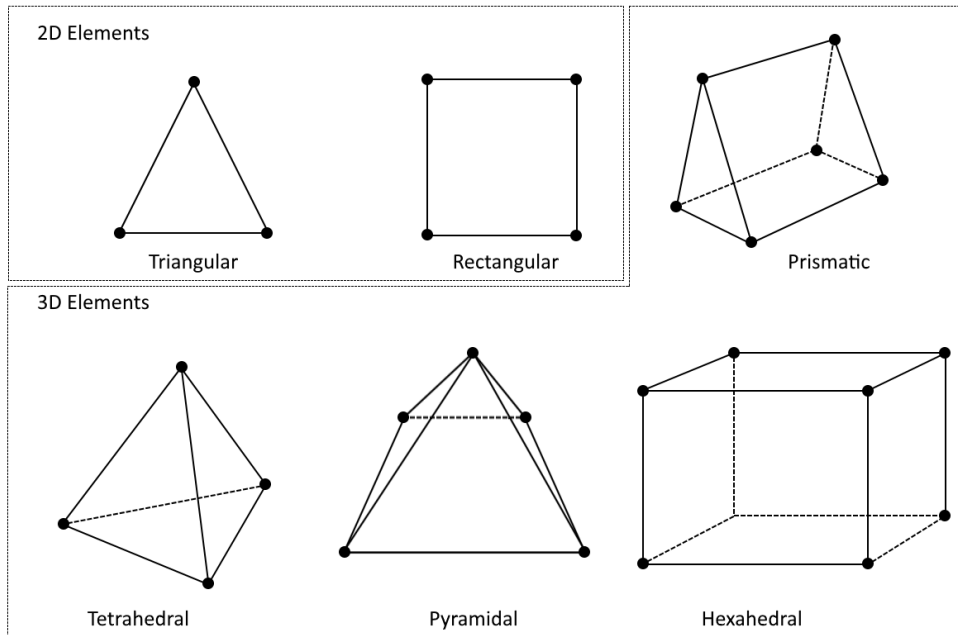


Figura 13 Ejemplo elementos de malla 1 [14]

Y en la figura 14 se pueden apreciar elementos finitos con los vértices curvos, haciendo uso de funciones de segundo grado, de este modo se puede apreciar la versatilidad del mallado, el cual puede ser configurado para que se acople mejor al dominio que se desea discretizar, convergiendo así a una mejor solución:

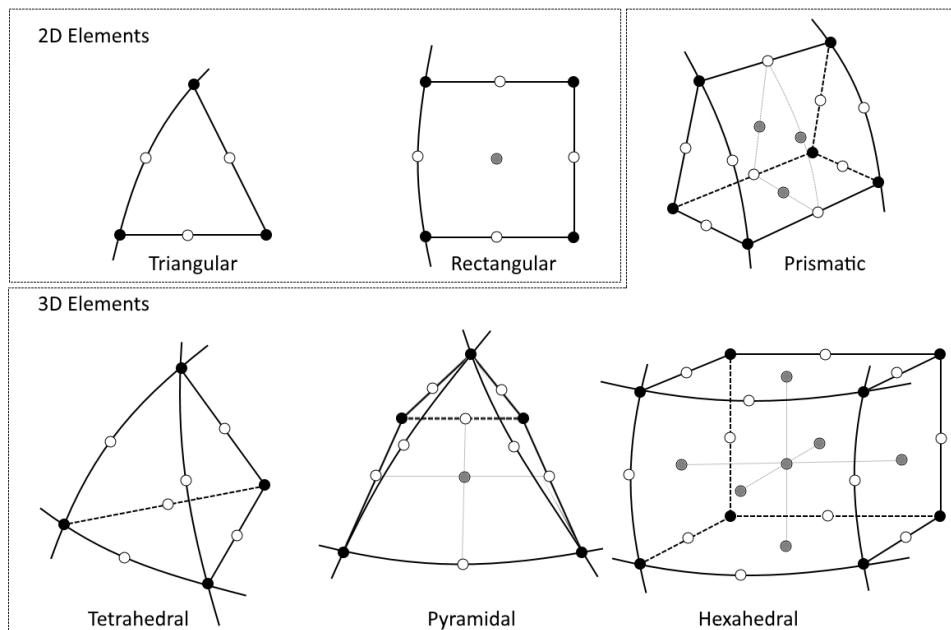


Figura 14 Ejemplo elementos de malla 2 [14]

De acuerdo con la conectividad y relaciones de adyacencia de los nodos, se relaciona el valor de un conjunto de variables e incógnitas, definidas en cada uno de éstos, y denominados grados de libertad. El conjunto de relaciones entre los valores de estas variables en los nodos, se puede aproximar como un sistema de ecuaciones lineales. El número de ecuaciones de dicho sistema será proporcional al número de nodos que exista dentro del dominio.

Típicamente los análisis que emplean el *FEM* están ideados para ser resueltos mediante el uso de un programa computacional. Recordemos que este método obtiene una solución aproximada y esta será únicamente válida en los nodos. En el resto de puntos que no son nodos se obtienen valores aproximados haciendo uso de la interpolación.

Desde el punto de vista de la programación algorítmica, el *FEM* se divide en los siguientes pasos:

- **Pre-procesado:**

En el pre-procesado se genera la malla, la cual, habitualmente, suele constar de miles de puntos. Toda la información que se almacena sobre las propiedades del material y otras características del dominio se almacenan junto a la información que describe la malla, mientras que todas las variables físicas (Fuerzas, flujos térmicos, temperaturas...) son almacenadas en los nodos. Como previamente se ha comentado, la malla es flexible y tendrá una mayor cantidad de nodos en los puntos de interés, aquellos que sean más críticos, como esquinas, entrantes o detalles complejos de la geometría. La malla es la encargada de llevar las propiedades del material que se desea simular al dominio, creando varios elementos. El tamaño de estos elementos vendrá dado según el ámbito en el que se empleen, por ejemplo, en el dominio acústico el tamaño estará limitado por la longitud de onda, mientras que en el estructural por el grosor del elemento.

- **Cálculo:**

El resultado del pre-procesado es un problema simple, es decir, no dependiente del tiempo, y genera un conjunto de N ecuaciones y N incógnitas. Este conjunto o sistema será resuelto con cualquier algoritmo que realice la resolución de sistemas de ecuaciones lineales.

En caso de querer resolver un estudio no lineal o un problema dependiente del tiempo, se hará uso del método implícito o el método explícito. En el método implícito el proceso consistirá en repetir el cálculo de una sucesión finita de sistemas de N ecuaciones y N incógnitas. Estos cálculos deberán ser resueltos uno detrás de otro, y la entrada de estos dependerá del estado anterior. Este tipo de estudios suele costar un tiempo mayor de cálculo. Mientras que con el método explícito se pueden realizar interpolaciones entre cada paso temporal, esta manera habrá un ahorro de tiempo de computación a costa de unos resultados menos fiables.

- **Post-procesado:**

En la actualidad, el *FEM* es empleado para calcular problemas de una alta complejidad, es por esto que los ficheros que se obtienen al emplear este método poseen una gran cantidad de datos e información, la cual es conveniente ordenar y procesar para poder conseguir unos resultados comprensibles. En el post-procesado los resultados obtenidos a partir de la solución del sistema son tratados, para obtener, tanto, representaciones gráficas, como otras magnitudes derivadas de las obtenidas en el propio estudio, las cuales aporten una mayor claridad o enfoque del problema.

Capítulo 4. Software empleado

El *Software* de simulación elegido para el presente proyecto es COMSOL *Multiphysics*. Este *software* hace uso del método de elementos finitos (*FEM*) expuesto en el capítulo anterior. Dicho programa ha sido elegido debido a que es una herramienta muy versátil y potente, además de que gracias a su funcionalidad *App Builder* nos permite programar aplicaciones ejecutables a nuestro gusto, pudiendo hacer uso de todas sus funcionalidades.

A continuación, se expondrá tanto el *software* COMSOL, como su funcionalidad *App Builder*:

4.1 COMSOL *Multiphysics*

COMSOL *Multiphysics* es una plataforma de simulación que proporciona la capacidad de modelar sistemas multifísicos perfectamente acoplados, así como de físicas individuales. Ingenieros y científicos emplean COMSOL para simular diseños, dispositivos y procesos en todos los campos de ingeniería, industriales e investigación científica.

El entorno de trabajo de COMSOL, donde se configuran los modelos a simular, es denominado *Model Builder*. Este incluye todos los pasos necesarios para poder desarrollar la simulación, desde la definición de geometrías, una librería de materiales, cuyas propiedades pueden ser modificadas, y las físicas que describen los fenómenos específicos bajo estudio, hasta resolvedores, post-procesado y la elaboración de resultados precisos.

A continuación, se muestra el entorno de trabajo de COMSOL:

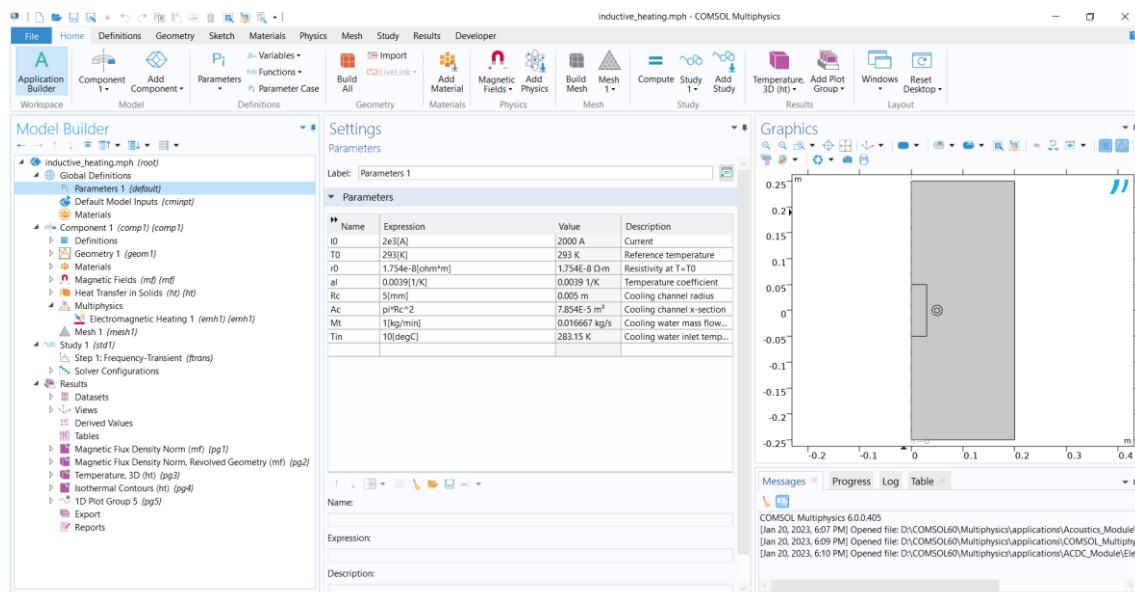


Figura 15 Interfaz COMSOL

Como se puede apreciar en la figura anterior, la interfaz cuenta con tres ventanas básicas a diferenciar: La ventana del *Model Builder*, la de Ajustes (*Settings*) y la de Graficos (*Graphics*). La ventana de *Graphics* servirá para visualizar, tanto la geometría bajo estudio, el mallado empleado y los diversos resultados obtenidos de la resolución de los estudios, preparados en el

post-procesado. Por otro lado, la ventana de *Settings*, nos muestra los ajustes específicos de cada nodo del *Model Builder*.

El *Model Builder* es donde el usuario tiene a su disposición todas las funcionalidades y herramientas para poder crear y resolver los modelos. En la siguiente imagen se pueden apreciar las diferentes partes y funcionalidades del *Model Builder*:

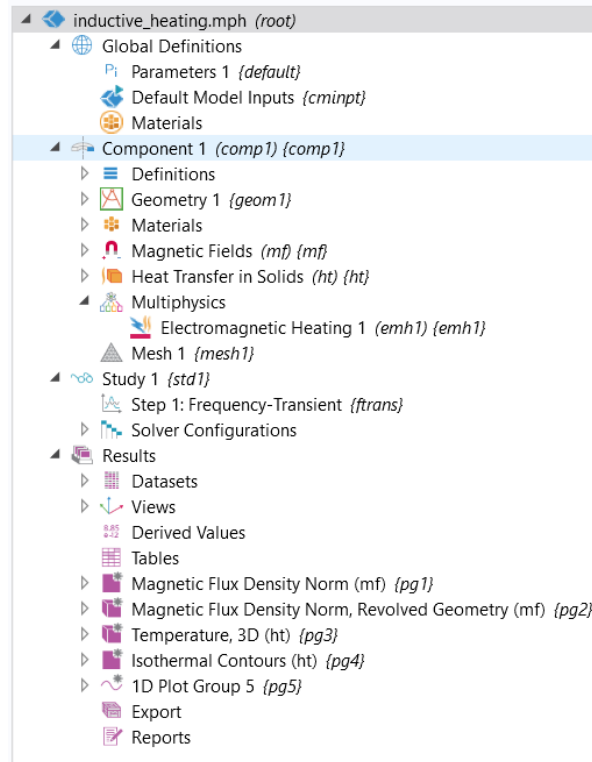


Figura 16 Ejemplo Model Builder

Este *Model Builder* pertenece al ejemplo *Inductive heating* de la librería de COMSOL, y nos servirá para poder explicar bien cada ramificación de este.

- **Global Definitions:** En este nodo se pueden añadir funcionalidades que son globales y se aplican al modelo entero. Algunos ejemplos serían parámetros globales como podrían ser la velocidad de un medio, o la longitud de una parte de la geometría.
- **Component:** El *model component* es una parte fundamental del modelo, y contiene definiciones locales dentro del propio componente. Es aquí donde se definen partes tan importantes como la geometría (la cual puede ser importada o construida), los materiales que se aplicarán a dicha geometría, las físicas, y acoples entre ellas, que se quieren aplicar en el modelo y el mallado, así como otro tipo de definiciones como funciones y más tipo de declaraciones. COMSOL nos permite tener más de un componente en cada modelo, por ejemplo, para resolver un sistema modelado tanto en 2D como en 3D, cada enfoque se podría realizar en un componente diferente.
- **Study:** El proceso para resolver un problema en COMSOL es una jerarquía en la cual se emplean unos pasos que se van ejecutando uno detrás de otro. Estos pasos (denominados *steps* en el programa) son empleados para controlar el resolvidor, la forma de las

ecuaciones y variables dependientes empleadas, que físicas interfieren en el estudio y que malla se empleará en este. Se pueden realizar tantos estudios como sea deseado.

- **Results:** En este apartado se encuentran los *datasets* obtenidos de cada estudio. Es aquí donde se realiza todo el post-procesado que nos permite visualizar los resultados de una forma ordenada y clara.

Todos estos nodos del *Model Builder* serán explicados de una forma más detallada al explicar el diseño del modelo que se ha empleado para desarrollar la aplicación.

4.2 App Builder

La funcionalidad *App Builder* provee herramientas para crear aplicaciones customizadas a partir de modelos previamente diseñados en COMSOL. Para poder realizar este proceso, el *App Builder* ofrece dos funcionalidades principales. Una de ellas nos permitirá generar la parte gráfica de nuestra aplicación, mientras que la otra nos permitirá programar funciones específicas que pueden conectar el modelo con la interfaz gráfica de la aplicación. Estas funcionalidades son conocidas como formularios y métodos respectivamente.

- **Formularios:** Como se acaba de explicar, los formularios son las herramientas que hacen posible crear la interfaz gráfica, por la cual, el usuario final navegará. Estos formularios podrán ser editados haciendo uso de gráficos, donde poder visualizar la geometría o los resultados obtenidos, inputs de variables, para poder controlar variables internas del modelo, *check boxes*, botones y campos de texto entre otras varias funcionalidades. También se podrá editar el *Ribbon*, el cual es la barra de herramientas principal de la aplicación. A continuación, se muestra una imagen para ilustrar el entorno de trabajo de los formularios:

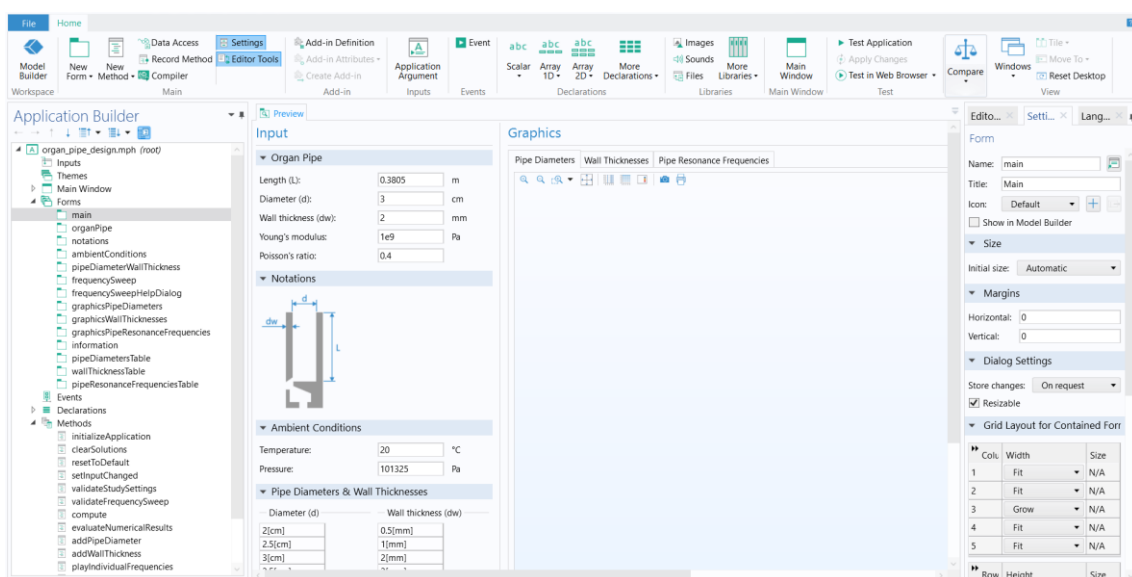


Figura 17 Ejemplo interfaz de trabajo formularios

- Métodos:** Gracias a los métodos se pueden crear funciones, diseñadas mediante código de programación, que las aplicaciones emplearán para realizar una tarea determinada. Estas funciones serán activadas una vez el usuario interactúe con algún objeto determinado que haya decidido el diseñador de la aplicación. El lenguaje de programación empleado para desarrollar el código de los métodos es Java. COMSOL ofrece una funcionalidad muy útil llamada *Record Method*, la cual nos permite volver al modelo, realizar cambios o determinadas acciones en este y grabarlo en un método en forma de código. Aquí se puede apreciar el entorno de trabajo de los métodos:

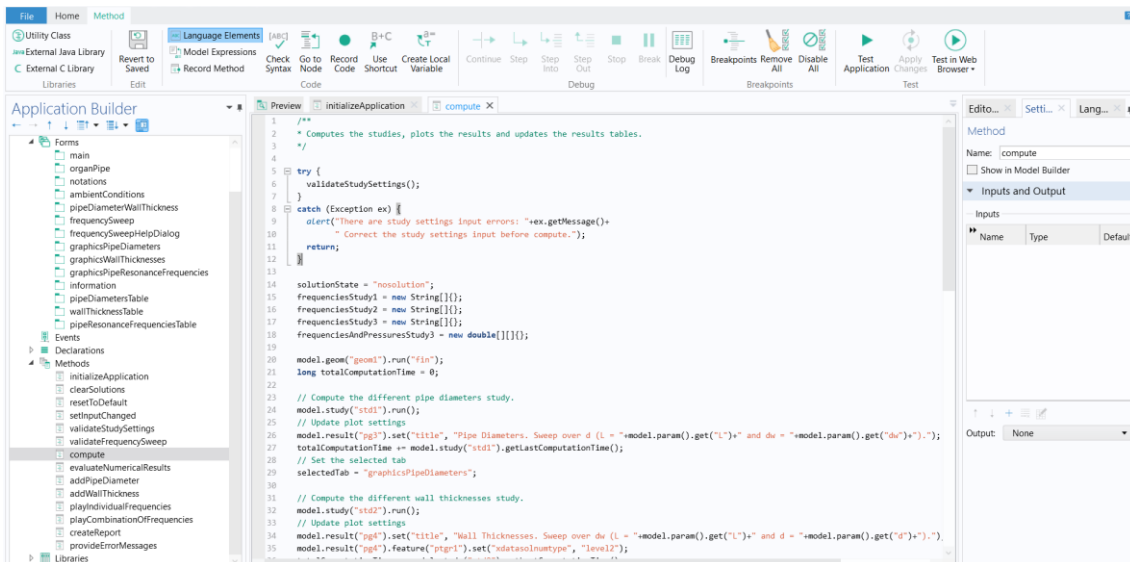


Figura 18 Ejemplo interfaz de trabajo métodos

Para poder crear el archivo ejecutable es necesaria una licencia a parte que te autorice a emplear el compilador de aplicaciones.

Capítulo 5. Marco Teórico

En el presente apartado, se procederá a explicar la teoría en la que se ha basado el desarrollo y la implementación de este trabajo. Es importante aclarar una serie de conceptos, tales como el funcionamiento y temas de interés del altavoz electrodinámico, las interfaces físicas y condiciones de contorno empleados durante el desarrollo del modelo de COMSOL y otros conceptos empleados en este, como el *Blocked Impedance*, o el ajuste de propiedades mecánicas de materiales.

5.1 El altavoz electrodinámico

El altavoz electrodinámico es un dispositivo, el cual, se encuentra compuesto por una serie de elementos mecánicos y eléctricos diseñados para realizar su función en un entorno acústico. El altavoz es un transductor electro-mecánico-acústico, esto quiere decir que es capaz de transformar una señal eléctrica en una señal acústica.

Su principio de funcionamiento consiste en, aplicar una señal de corriente alterna a la bobina, produciendo así un campo magnético. Dicho campo magnético interactúa con el campo del imán, el cual es permanente y uniforme, generándose una fuerza que desplaza la bobina (transducción electro-mecánica). La bobina se encuentra pegada a la membrana, y al moverse, hace que esta comience a vibrar. Este movimiento de la membrana desplaza las partículas del aire, generando así variaciones de presión, y, por tanto, ondas sonoras (transducción mecánico-acústica).

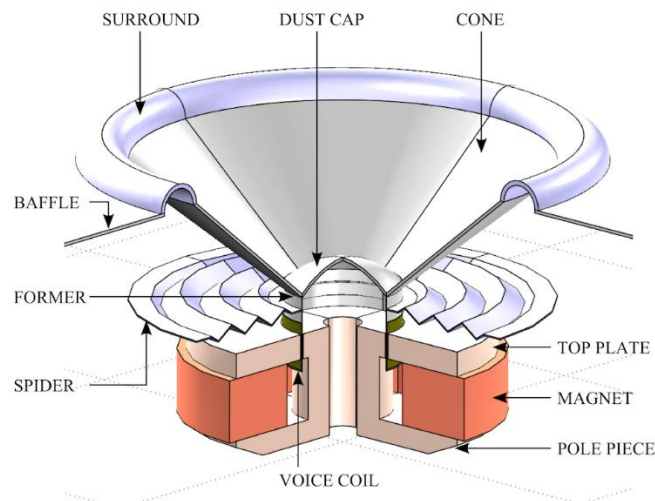


Figura 19 Partes altavoz electrodinámico [15]

Las partes de un altavoz se podrían clasificar en dos conjuntos:

- **Conjunto Móvil:**
 - **Former:** Se trata del soporte donde se enrolla la bobina, está pegado al cono y al spider, transmitiendo el movimiento de la bobina al cono.
 - **Cono:** Es el encargado de desplazar las partículas del aire, generando así los cambios de presión y provocando la radiación de ondas acústicas.
 - **Dust Cap:** Su función principal es proteger el entrehierro de la acumulación de partículas extrañas.
 - **Spider y suspensión:** Elementos flexibles que se encargan de centrar el desplazamiento del cono, tratando de que este se desplace en una única dirección axial.
 - **Bobina:** Se trata del elemento motriz del conjunto móvil. Forma parte de ambos conjuntos.
- **Conjunto Electro-magnético o motor:**
 - **Bobina:** Al circular corriente por ella se genera un campo magnético que interacciona con el del imán, provocando así una fuerza que genera el desplazamiento de esta.
 - **Imán:** Está hecho de un material conductor, normalmente ferrita o neodimio. Consta de un campo magnético permanente.
 - **Pole piece y top plate:** Se encargan de distribuir la densidad de flujo magnético proporcionado por el imán al entrehierro, para que este sea dirigido a la bobina.

Todos estos componentes se encuentran soportados en carcasa.

Como podemos apreciar la bobina se encuentra tanto en el conjunto móvil como en el conjunto del motor, esto es debido a que es una parte fundamental de la transducción electro-mecánica del altavoz.

A continuación, se describirán algunos de los resultados y parámetros más influyentes a la hora de estudiar y diseñar un transductor:

- **Respuesta en frecuencia:** Describe el comportamiento del altavoz ante una señal alterna de amplitud constante y variante en frecuencia. Este comportamiento será representado con el nivel de presión sonora (*SPL*) correspondiente a cada frecuencia. Esta medida puede ser realizada tanto en el eje del altavoz como fuera de él con una determinada angulación. Normalmente está determinada a 1 metro del altavoz aplicando 1 W de potencia eléctrica.
- **Mapa de directividad:** Nos permite apreciar en un mapa 2D de colores el nivel *SPL* normalizado para cada frecuencia en un determinado rango de cobertura fuera del eje, expresada en grados.
- **Gráficas Polares:** Aporta información sobre el patrón de directividad por frecuencia. Se suele expresar con el nivel normalizado y en un rango de 180 grados en transductores (+- 90°).
- **Impedancia eléctrica:** La impedancia eléctrica nos permite apreciar tanto el carácter resistivo como el inductivo de la bobina, viendo así el comportamiento de esta ante la señal alterna a la entrada. Esta se representa en una gráfica de ohmios frente a hercios. Gracias a esta curva podremos comprobar la frecuencia de resonancia del altavoz, ya que

coincide con el valor del pico de esta función. La parte resistiva de la bobina será el valor de esta curva en 0 Hz.

- **Densidad de flujo magnético:** Nos permite observar la distribución de la densidad flujo magnético del imán sobre el hierro, de esta forma podremos estimar si este está suficientemente saturado en la zona del entrehierro, lugar por donde se desplaza la bobina.
- **Parámetros Thiele-Small:** Los parámetros TS [8] son una serie de parámetros que sirven para caracterizar el comportamiento de un altavoz de baja frecuencia en el rango lineal de funcionamiento. Estos datos técnicos son empleados para calcular el volumen del baffle necesario donde va a ser empleado el altavoz, así como para comparar altavoces. Algunos de estos parámetros son:
 - **fs:** Frecuencia de resonancia.
 - **Re:** Resistencia eléctrica de la bobina.
 - **Le:** Inductancia de la bobina.
 - **Qms:** Factor de calidad mecánico, hace referencia a las pérdidas mecánicas.
 - **Qes:** Factor de calidad eléctrico, hace referencia a las pérdidas eléctricas.
 - **Bl:** Factor de fuerza, constante de transducción electro-mecánica.
 - **Cms:** Compliancia mecánica de la suspensión.
 - **Mms:** Masa equivalente de la suma de la masa del conjunto móvil y el aire desplazado.
 - **η:** Rendimiento del altavoz expresado en porcentaje. Relación entre potencia acústica radiada y la potencia eléctrica de entrada.
 - **Lm:** Sensibilidad del altavoz. Representación del nivel que se puede esperar para un nivel relativo de potencia de entrada, normalmente 1W a 1m.

Todos estos resultados y parámetros podrán ser obtenidos haciendo uso de la App de este proyecto.

5.2 Interfaces físicas y condiciones de contorno

A continuación, nos centraremos en explicar las interfaces físicas [16] que se han empleado en nuestro modelo de COMSOL y las ecuaciones que estas resuelven:

The Pressure Acoustics, Frequency Domain Interface

Esta interfaz está diseñada para el análisis de varios tipos de problemas de presión acústica en el dominio frecuencial, relacionados con ondas de presión en un fluido.

La ecuación que modela la transmisión de la onda en un espacio es una ecuación no homogénea de Helmholtz:

$$\nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho_c} (\nabla p - q_d) \right) - \frac{\omega^2 p}{\rho_c c_c^2} = Q_m \quad (1)$$

donde p es la presión, ρ es la densidad del medio, c es la velocidad del sonido, ω es la pulsación angular, q_d es una fuente dipolo, y Q_m una fuente monopolo. Con esta formulación se puede calcular la respuesta en frecuencia de un sistema para un número determinado de frecuencias.

En esta interfaz se ha hecho uso de varios nodos de condiciones de contorno:

- ***Sound Hard Boundary/Contorno duro de sonido (Wall/Muro):***

Esta condición de contorno se caracteriza por tener como condición que la componente normal de la aceleración sea cero:

$$-\mathbf{n} \cdot \left(-\frac{1}{\rho_0} (\nabla p - q_d) \right) = 0 \quad (2)$$

donde \mathbf{n} es la componente de dirección de la onda.

Para una fuente dipolo cero y una densidad constante de fluido, encontramos que la derivada de la componente normal de la presión es 0 en este contorno:

$$\frac{\partial p}{\partial \mathbf{n}} = 0 \quad (3)$$

- ***Exterior Field Calculation/Calculo del campo exterior:***

Esta condición de contorno permite calcular y visualizar el campo de presión fuera del dominio computacional, a cualquier distancia, incluidas la amplitud y la fase. Esta función debe de aplicarse en un límite exterior.

- ***Narrow Region Acoustics/Región estrecha acústica:***

Este nodo define un modelo de fluido termo-viscoso que introduce pérdidas en canales y conductos estrechos conectados con espacios más grandes. Si no se tuviera en cuenta este nodo podrían apreciarse ciertos resultados en el sistema simulado que no se corresponderían con el comportamiento real de este. Este tipo de nodo es una simplificación del modelo termo-viscoso acústico, y tiene un coste computacional mucho menor.

- ***Perfectly Matched Boundary/Contorno perfectamente coincidente (PMB):***

El PMB es equivalente al nodo *Perfectly matched layer* (PML), salvo que este es empleado sobre un contorno abierto sin la necesidad de definir un dominio específico en la geometría. Este aplica un escalado y amortiguamiento de la onda en el contorno seleccionado, de manera que se atenúe sin tener reflexiones que afecten al estudio del modelo.

$$\begin{aligned}
\mathbf{p}(\mathbf{r}) &= e^{-i\mathbf{k}\mathbf{r}} \\
\mathbf{r} &\rightarrow \propto (\mathbf{1} - i\boldsymbol{\beta}(\mathbf{r}))\mathbf{r} \\
\mathbf{p} &\rightarrow e^{-i\mathbf{k}\mathbf{r}} e^{-\alpha\mathbf{k}\boldsymbol{\beta}(\mathbf{r})\mathbf{r}}
\end{aligned}
\tag{4}$$

Magnetic Fields Interface

Esta interfaz es empleada para calcular campos magnéticos y distribuciones de corrientes inducidas dentro y alrededor de bobinas, conductores e imanes.

Las ecuaciones de Maxwell son las encargadas de describir el comportamiento de los fenómenos electromagnéticos:

$$\begin{aligned}
\nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J} \\
\mathbf{B} &= \nabla \times \mathbf{A} \\
\mathbf{J} &= \sigma \mathbf{E} + \sigma \mathbf{v} \times \mathbf{B} + \mathbf{J}_e
\end{aligned}
\tag{5}$$

donde H es la intensidad del campo magnético, J es la densidad de corriente, B es la densidad de flujo magnético, A es el vector de potencial magnético, E es la intensidad del campo eléctrico, v es la velocidad del conductor y J_e es una densidad de corriente generada de manera externa.

Los nodos empleados en esta interfaz han sido los siguientes:

- ***Ampère's Law:***

La ley de Ampere nos permite calcular campos magnéticos a partir de las corrientes eléctricas. Por, tanto este nodo nos permitirá modelar dominios como el aire, el hierro y el imán del altavoz mediante una correcta configuración de sus relaciones constitutivas.

- ***Coil:***

Es empleado para modelar bobinas, cables u otro tipo de conductores sujetos a una excitación, ya sea una corriente o un voltaje. El nodo permite, a partir de esta excitación, realizar una serie de cálculos con los que se obtienen parámetros como su impedancia e inductancia.

Solid Mechanics Interface

La interfaz *Solid Mechanics* resuelve ecuaciones de movimiento de un modelo constituido por un material sólido, y permite realizar cálculos para obtener resultados de desplazamiento, estrés y deformación entre otros.

La ecuación que modela esta interfaz es la de balance de fuerzas:

$$-\rho\omega^2\mathbf{u} = \nabla \cdot \mathbf{S} + \mathbf{F}_c e^{i\varphi} \tag{6}$$

Donde ρ es la densidad del material, u es el vector de desplazamiento, ω es la pulsación angular, S es el tensor de esfuerzos y F_v es la fuerza por unidad de volumen que actúa sobre el cuerpo.

En esta interfaz se han empleado los nodos:

- **Linear Elastic Material:**

Define el modelo sólido y las propiedades elásticas y lineares del material en el que se aplica, tales como tipo de material (isotrópico, orthotropico o anisotropico), la densidad y la amortiguación entre otros.

- **Fixed Constraint:**

Añade una condición que hace que la parte de la geometría seleccionada esté fija, esto quiere decir que el desplazamiento será 0 en todas las direcciones del contorno seleccionado.:

$$\mathbf{u} = \mathbf{0} \quad (7)$$

- **Body Load:**

Añade una fuerza externa, la cual es aplicada a un volumen determinado:

$$\mathbf{F}_v = \frac{\mathbf{F}_{tot}}{V} \quad (8)$$

donde \mathbf{F}_{tot} es la fuerza aplicada en las direcciones seleccionadas y V es el volumen del dominio donde esta fuerza es aplicada.

Multifísicas:

Como se ha comentado anteriormente COMSOL es un *software* de simulación multifísico, por tanto, nos permite realizar acoples y relaciones entre las diferentes interfaces físicas que empleamos. Estos acoples son realizados en el nodo *Multiphysics*.

En nuestro modelo se está simulando un altavoz electrodinámico, por tanto, se deberán de realizar los acoples de la transducción electro-mecánica y la mecánico-acústica. Para ello se ha hecho uso de los siguientes nodos:

- **Lorentz Coupling:**

Es un acople multifísico bidireccional entre las interfaces *Magnetic Fields* y *Solid mechanics*.

- **Acople Magnetic Fields – Solid Mechanics:**

Se transfiere la fuerza de Lorentz del motor magnético del altavoz a los dominios estructurales tal que:

$$\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (9)$$

- **Acople Solid Mechanics – Magnetic Fields:**

Se transfiere el campo eléctrico inducido por el movimiento de la bobina a la interfaz electromagnética:

$$\mathbf{E} = \mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (10)$$

Este acople se realiza en el domino de la bobina.

- **Acoustic-Structure Boundary:**

Es empleado para realizar el acople entre un modelo de presión acústica a cualquier componente estructural. El acoplamiento incluye la carga de fluido sobre la estructura y la aceleración estructural experimentada por el fluido, por lo tanto, es un acople bidireccional.

Matemáticamente la condición en los contornos exteriores es:

$$-\mathbf{n} \cdot \left(-\frac{1}{\rho_c} (\nabla \mathbf{p}_t - \mathbf{q}_d) \right) = -\mathbf{n} \cdot \mathbf{u}_{tt} \quad (11)$$

$$\mathbf{F}_A = \mathbf{p}_t \mathbf{n}$$

donde \mathbf{u}_{tt} es la aceleración estructural, \mathbf{n} es la componente normal a la superficie, \mathbf{p}_t es la presión acústica total y \mathbf{F}_A es la fuerza por unidad de área que experimenta la estructura.

En el interior de los contornos es:

$$-\mathbf{n} \cdot \left(-\frac{1}{\rho_c} (\nabla \mathbf{p}_t - \mathbf{q}_d) \right)_{up} = -\mathbf{n} \cdot \mathbf{u}_{tt} \quad (12)$$

$$-\mathbf{n} \cdot \left(-\frac{1}{\rho_c} (\nabla p_t - q_d) \right)_{down} = -\mathbf{n} \cdot \mathbf{u}_{tt}$$

$$\mathbf{F}_A = (p_{t,down} - p_{t,up}) \mathbf{n}$$

Los subíndices *up* y *down*, hacen referencia a los dos contornos interiores del dominio estructural.

Gracias a este nodo se podrá aplicar la transducción mecánico-acústica, generando cambios de presión y por tanto ondas acústicas gracias al movimiento de la membrana.

5.3 Blocked Impedance:

Como se ha comentado en el capítulo número dos del presente documento, la aplicación implementada en este trabajo constará de dos modos de funcionamiento, siendo uno de ellos el modo *Blocked Impedance*, en el cual se sustituye el uso de la interfaz física *Magnetic Fields* por una serie de parámetros de entrada, los cuales serán explicados a continuación.

El objetivo de esta metodología es el de sustituir la parte del motor magnético del altavoz por una fuerza equivalente.

La fuerza de Lorentz en un hilo de longitud L con una corriente I dentro de una densidad de flujo magnético B generada externamente y perpendicular viene dada por:

$$\mathbf{F} = LI \times \mathbf{B} \quad (13)$$

Este hilo, con un número N de vueltas, será la bobina del altavoz:

$$N_0 I = \int_A J_\varphi dA \quad (14)$$

donde J_φ es la densidad de corriente en la dirección azimut a través de la sección en contacto con el campo del imán en el plano rz . Por lo que la fuerza total será:

$$\mathbf{F}_e = - \int_V J_\varphi \mathbf{B}_r dV \quad (15)$$

donde \mathbf{B}_r es la componen en r de la densidad de flujo magnética del imán.

La corriente que circula a través de la bobina está relacionada con el voltaje de entrada V_0 :

$$I = (V_0 + V_{be})/Z_e \quad (16)$$

donde Z_b es la impedancia bloqueada, la cual hace referencia al valor de la impedancia eléctrica de la bobina del altavoz medida cuando los componentes móviles de este se encuentran en un estado estacionario. $-V_{be}$ es el voltaje inducido en dirección contraria debido al movimiento de la bobina dentro del campo permanente del imán, es conocido como EMF (*Electromotive Force*) y viene dado por la siguiente expresión:

$$-V_{be} = u \cdot BL \quad (17)$$

donde u es la velocidad de la bobina en movimiento y BL el factor de fuerza.

Asumiendo que $J_\phi = I \cdot N_0/A$ y que es constante en la sección de cruce de área A , si escribimos la ecuación x1 en función de la corriente obtenemos la siguiente expresión:

$$F_e = -\frac{2\pi IN_0}{A} \int r B_r dA \quad (18)$$

Y sabiendo que BL viene dado por:

$$BL = -\frac{2\pi N_0}{A} \int r B_r dA \quad (19)$$

Combinando las ecuaciones 16, 18 y 19 obtenemos que la fuerza equivalente que se debe aplicar para suplir la interfaz física *Magnetic Fields* es la siguiente:

$$F_e = \frac{BLV_0}{Z_b} - v \frac{(BL)^2}{Z_b} \quad (20)$$

Para poder aplicar esta metodología es necesario tener conocimiento de los parámetros Z_b y BL previamente, ya sea mediante medidas experimentales realizadas con anterioridad, o mediante una simulación previa de la que se puedan exportar estos valores. El hecho de poder sustituir el uso de una interfaz física por una serie de parámetros de entrada conlleva a obtener los resultados con un menor coste computacional. Durante el siguiente capítulo de este documento se hará un mayor hincapié sobre este método.

5.4 Ajuste de propiedades mecánicas de los materiales:

Un apartado delicado que puede influir en los resultados de la simulación acústica son las propiedades mecánicas de los materiales. Es importante tener los valores más próximos posibles a los reales de estas propiedades. Algunas de estas propiedades son el módulo de Young E , la frecuencia de resonancia mecánica f_0 y la densidad ρ .

Dentro de la aplicación, que se ha desarrollado en este proyecto, hay un amplio listado de materiales y componentes de los cuales se puede hacer uso para la simulación, pero algunos de ellos pueden servir como punto de partida, ya que quizá difieran con los valores reales de los materiales empleados en la realidad.

Para poder salvar estas distancias, se ha programado un apartado dentro de la App, en el cual, se puede realizar un ajuste de estas propiedades mecánicas mediante un pequeño estudio. Concretamente se podrá realizar un ajuste del módulo de Young y de la densidad, aunque para ello deberemos de conocer unos ciertos valores reales previamente, que pueden ser proporcionados por el distribuidor de estos u obtenido mediante una serie de mediciones específicas.

A continuación, se describe el desarrollo de cada uno de ellos, el cual consistirá en aplicar relaciones entre valores de propiedades simulados, y valores reales.

- **Ajuste de la densidad, ρ :**

Supongamos que al realizar la simulación apreciamos que la densidad de un determinado material no se corresponde con la esperada. En este caso deberemos de conocer la masa real del material, y sabiendo que la densidad viene dada por la fórmula:

$$\rho = m/V \quad (21)$$

Donde m es la masa y V el volumen. Podemos deducir la siguiente relación:

$$\begin{aligned} V &= m_{real}/\rho_{mod} \\ V &= m_{sim}/\rho_{sim} \end{aligned} \quad (22)$$

Igualando los volúmenes obtenemos que la nueva densidad a aplicar sobre este material deberá de ser:

$$\rho_{mod} = (m_{real} \cdot \rho_{sim})/m_{sim} \quad (23)$$

- **Ajuste del módulo de Young, E :**

Este caso en concreto se suele aplicar en la suspensión del altavoz, y es aplicable cuando conocemos la frecuencia de resonancia mecánica de la pieza.

La frecuencia de resonancia mecánica de un material viene dada por la siguiente ecuación:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (24)$$

Donde k es la rigidez y m la masa. La relación entre el módulo de Young y la rigidez viene dada por:

$$k = E \cdot \frac{A}{L} \quad (25)$$

Donde A es el área, y L la longitud del elemento. Por lo tanto, podemos deducir la siguiente relación:

$$\begin{aligned} m &= (E_{mod} \cdot A/L) / (2 \cdot \pi \cdot f_{0real})^2 \\ m &= (E_{sim} \cdot A/L) / (2 \cdot \pi \cdot f_{0sim})^2 \end{aligned} \quad (26)$$

Igualando las masas obtenemos que el nuevo módulo de Young a aplicar sobre este material deberá de ser:

$$E_{mod} = E_{sim} \cdot (f_{0real}/f_{0sim})^2 \quad (27)$$

Capítulo 6. Implementación y desarrollo

En el presente punto se procederá a exponer el desarrollo del modelo empleado para cada modo de simulación (*Completo* y *Blocked Impedance*), así como su posterior implementación en la aplicación final haciendo uso del *Application Builder* de COMSOL.

6.1 Implementación del modelo en COMSOL, Pre-Procesado:

A continuación, se procederá a explicar paso a paso cómo se ha configurado el *Model Builder* empleado como base para realizar la simulación y nuestra App, tanto del modo de simulación *Complete*, como del modo *Blocked Impedance*.

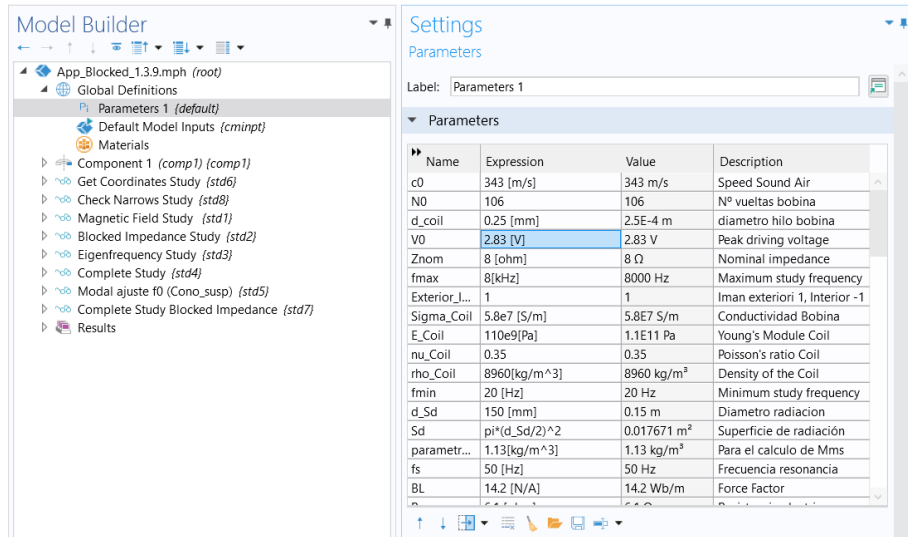
En primer lugar, la disposición dimensional que ha sido empleada ha sido la 2D–Axi-simétrica, con la cual modelaremos la geometría del altavoz con un corte transversal a esta.

Centrándonos en el *Model Builder*, expondremos la configuración específica para cada una de sus ramas expuestas en el capítulo 4 y para cada uno de los modos de simulación:

6.1.1 Complete Mode

Global Definitions:

Dentro de las definiciones Globales únicamente se ha hecho uso de la declaración de variables o parámetros con uso global, tales como la velocidad del sonido en el aire, el número de vueltas de la bobina, el voltaje de entrada, frecuencia máxima del estudio y más variables que veremos donde se les ha dado uso en diferentes ramificaciones del modelo.



Name	Expression	Value	Description
c0	343 [m/s]	343 m/s	Speed Sound Air
N0	106	106	Nº vueltas bobina
d_coil	0.25 [mm]	2.5E-4 m	diametro hilo bobina
V0	2.83 [V]	2.83 V	Peak driving voltage
Znom	8 [ohm]	8 Ω	Nominal impedance
fmax	8[kHz]	8000 Hz	Maximum study frequency
Exterior_I...	1	1	Iman exteriori 1, Interior -1
Sigma_Coil	5.8e7 [S/m]	5.8E7 S/m	Conductividad Bobina
E_Coil	110e9[Pa]	1.1E11 Pa	Young's Module Coil
nu_Coil	0.35	0.35	Poisson's ratio Coil
rho_Coil	8960[kg/m^3]	8960 kg/m³	Density of the Coil
fmin	20 [Hz]	20 Hz	Minimum study frequency
d_Sd	150 [mm]	0.15 m	Diametro radiación
Sd	pi*(d_Sd/2)^2	0.017671 m²	Superficie de radiación
parametr...	1.13[kg/m^3]	1.13 kg/m³	Para el calculo de Mms
fs	50 [Hz]	50 Hz	Frecuencia resonancia
BL	14.2 [N/A]	14.2 Wb/m	Force Factor

Figura 20 Global Definitions

Component:

Como se ha comentado con anterioridad, en la rama *component* se encuentran varias de las definiciones más importantes del modelo:

- **Geometría:**

Para cargar la geometría principal del altavoz, proveniente de un archivo externo, (normalmente un archivo CAD con extensión .dxf, aunque también es posible importar de una geometría ya realizada en un archivo de COMSOL .mph), se hace uso del nodo *Import*, el cual nos permite seleccionar la ruta del fichero y cargarlo, así como seleccionar que capas queremos importar, en caso de que este esté estructurado por capas.

Para simular el aire se ha generado media circunferencia, así como dos polígonos con los cuales se pueden delimitar donde se encontrarán los dominios *narrow regions* explicados en el marco teórico. A su vez, para evitar fallos en las simulaciones y tener una mayor versatilidad se han añadido funciones tales que permiten desplazar la geometría principal tanto en r como en z, así como generar un panel infinito para evitar el cortocircuito acústico.

Por tanto, la geometría tendría la siguiente distribución:

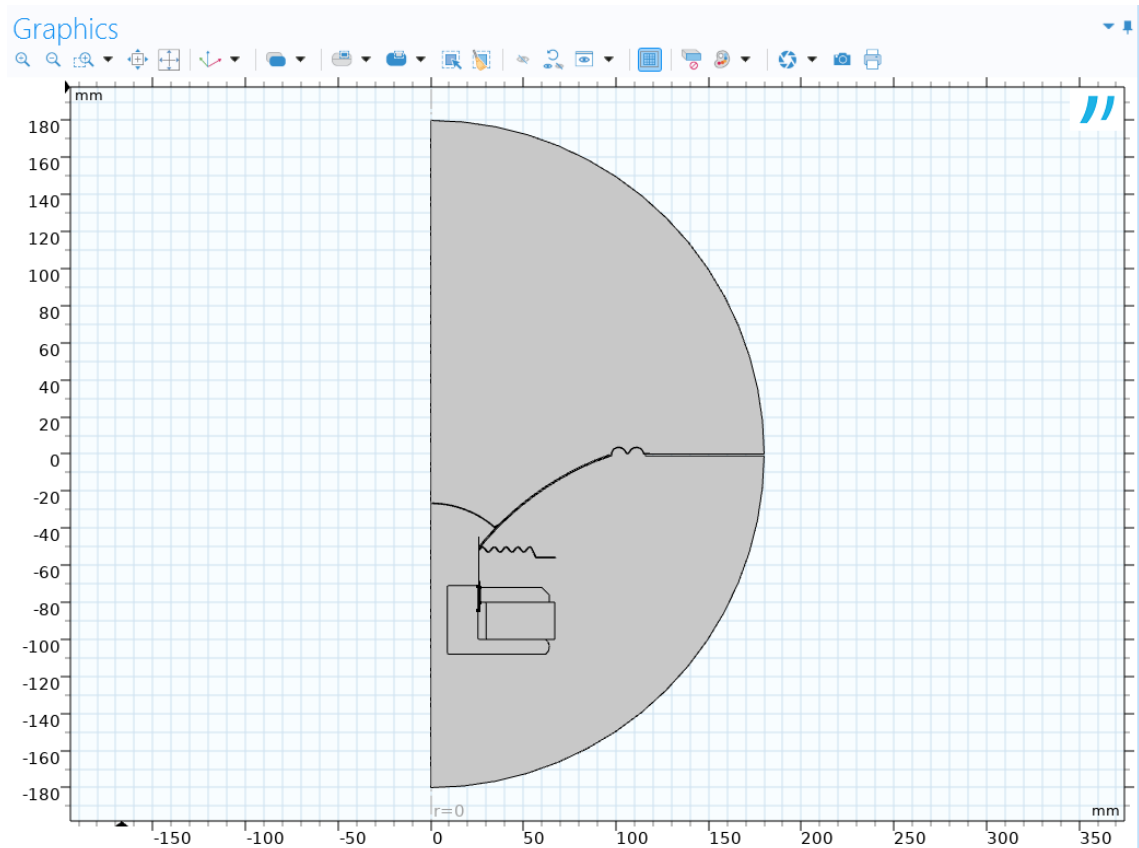


Figura 21 Geometría

- **Selecciones:**

Las selecciones nos permiten diferenciar los dominios y contornos existentes dentro de la geometría. Por tanto, es importante definirlas, tanto para poder seleccionar en que dominio aplicar las propiedades de un material, como para definir donde emplear unas condiciones de contorno o un determinado tipo de mallado. Es por esto que, se han creado selecciones tanto de los componentes de la geometría (suspensión, cono, bobina...) o agrupaciones de estos (Conjunto estructural, que será la agrupación de las anteriores), como selecciones que nos sirven para delimitar donde una determinada condición de contorno (*exterior field*, *PMB*, *narrow regions*...).

- **Materiales:**

Haciendo uso de las librerías de materiales de COMSOL, se ha importado un material de partida para cada uno de los componentes del altavoz, además de para el aire. Cada material tiene sus propiedades básicas intrínsecas. Para el medio acústico necesitamos conocer las propiedades del fluido como la densidad ρ y la velocidad del sonido c en el medio. Las que más peso tienen en nuestro estudio acústico-estructural son el módulo de Young E , la densidad ρ , el coeficiente de Poisson μ y el factor de pérdidas isotrópico η

para los dominios estructurales. Estas cuatro características se encuentran parametrizadas, con variables globales, para más adelante poder modificarlas y hacer uso de un mayor número de materiales dentro de la aplicación.

- **Interfaces Físicas:**

En el modo de simulación complete se han empleado las tres interfaces físicas explicadas anteriormente. A continuación, se comentará su configuración:

Pressure Acoustics, Frequency Domain:

Esta interfaz será aplicada en el dominio acústico, es decir el aire, la cual ha sido acotada con la selección *acoustic domain*. Se toma un valor de presión de referencia de 20uPa y $c_0 = 343$ m/s.

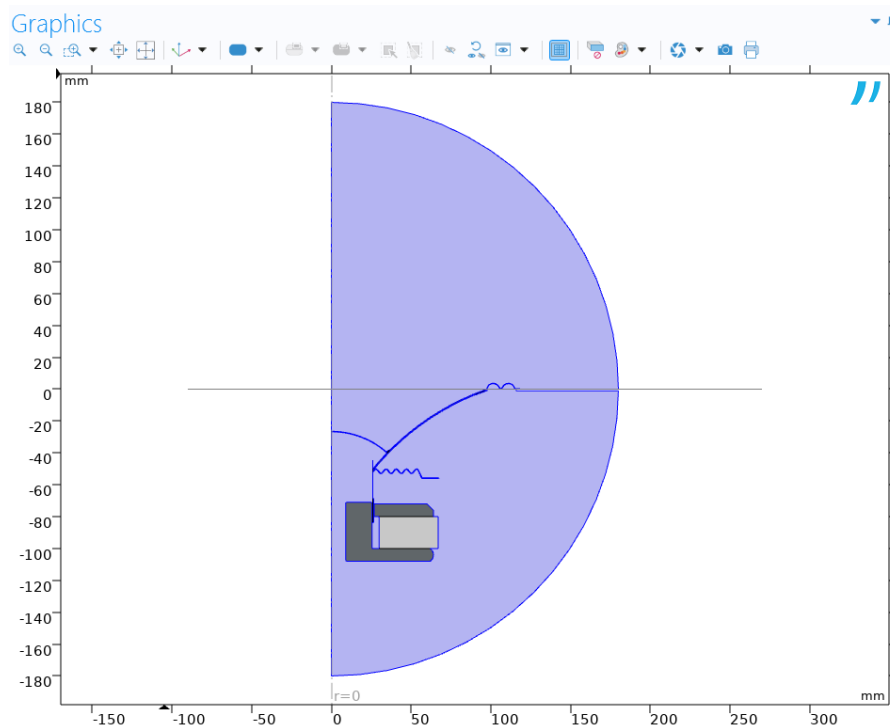


Figura 22 Dominio acústico

Se ha aplicado la condición *Sound hard Boundary* tanto en el hierro, imán y panel infinito:

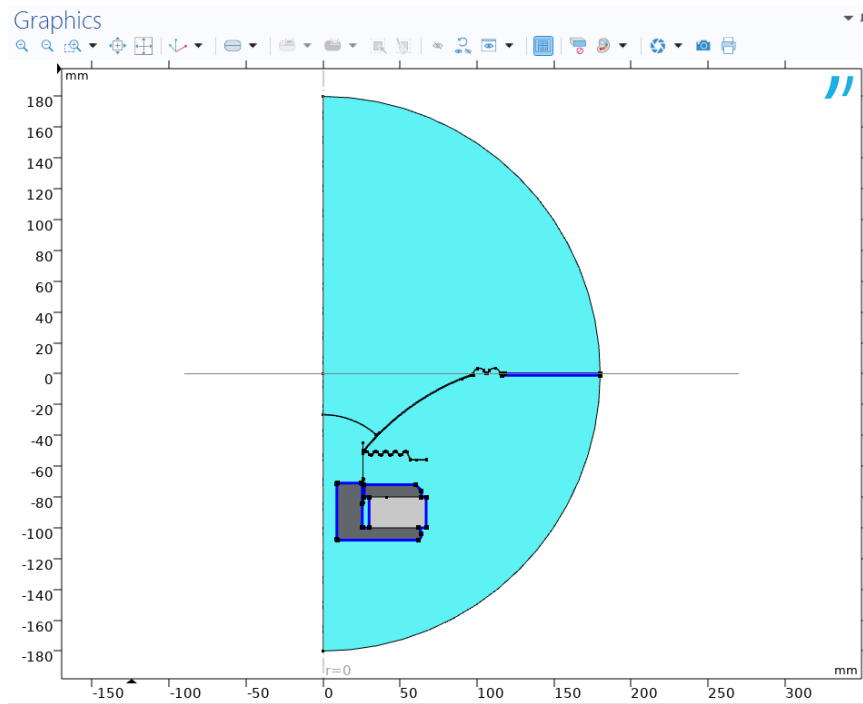


Figura 23 Sound Hard Boundary

La condición de contorno de *Exterior Field Calculation* ha sido aplicada en el borde superior de la circunferencia:

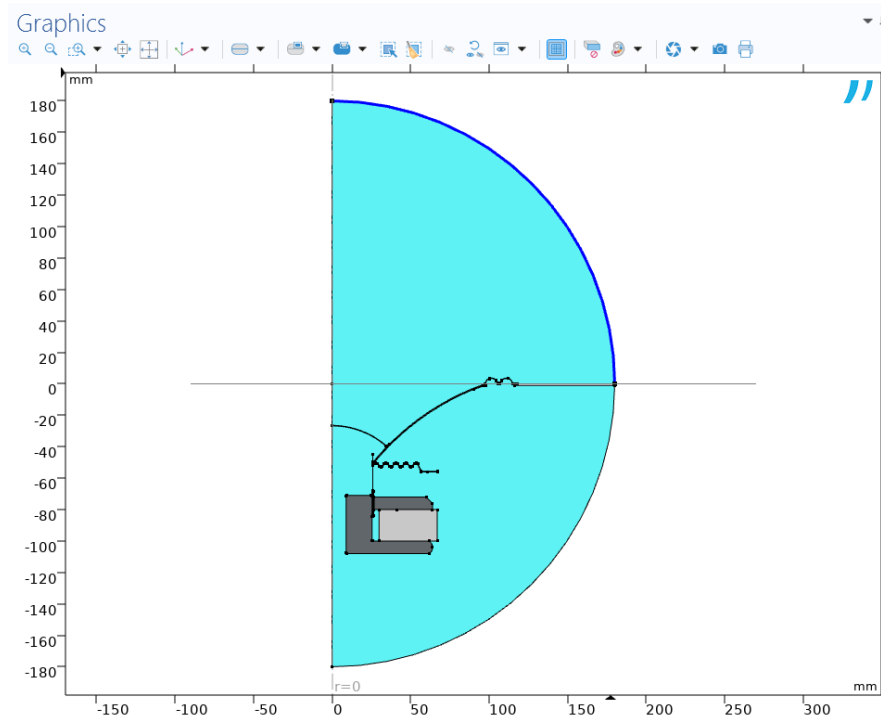


Figura 24 Exterior Field Calculation

Los *narrow regions* se han definido en las dos regiones estrechas situadas en el entrehierro a ambos lados de la bobina:

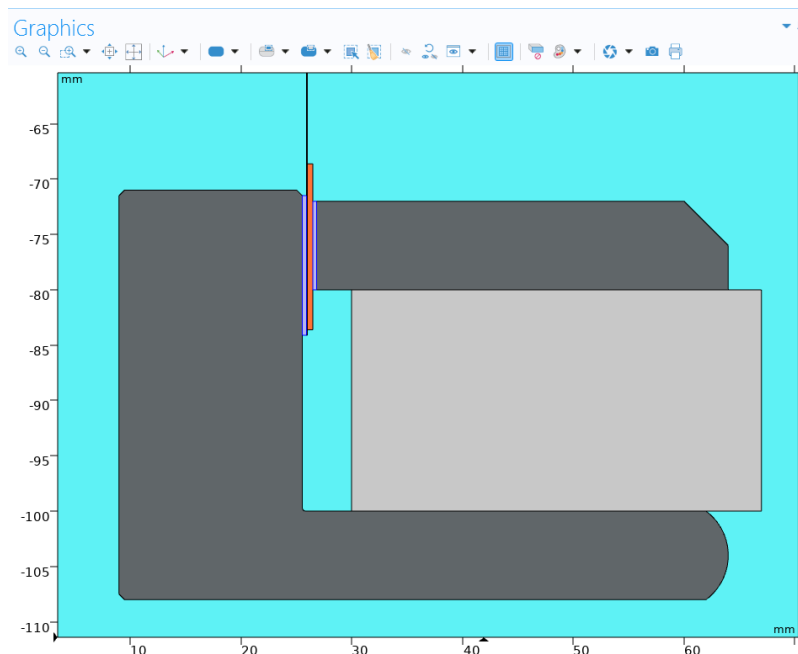


Figura 25 Narrow Regions

Por último, el PMB se ha aplicado en todo el contorno exterior de la circunferencia. Se ha hecho uso de los parámetros por defecto, ya que son los valores óptimos para estudios acústicos que proporciona el propio *software*:

PML scaling factor:	<input type="text" value="1"/>	1
PML scaling curvature parameter:	<input type="text" value="3"/>	1
Number of mesh points:	<input type="text" value="8"/>	1

Figura 26 Configuración PMB

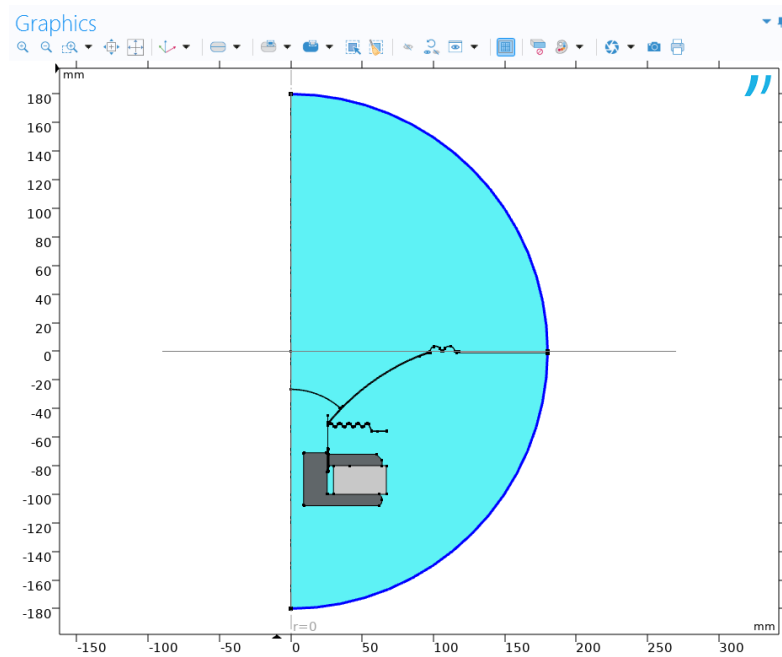


Figura 27 Contornos PMB

Solid Mechanics:

La interfaz *solid mechanics* se aplica en el conjunto móvil del altavoz delimitada por la selección *Structural Domains*:

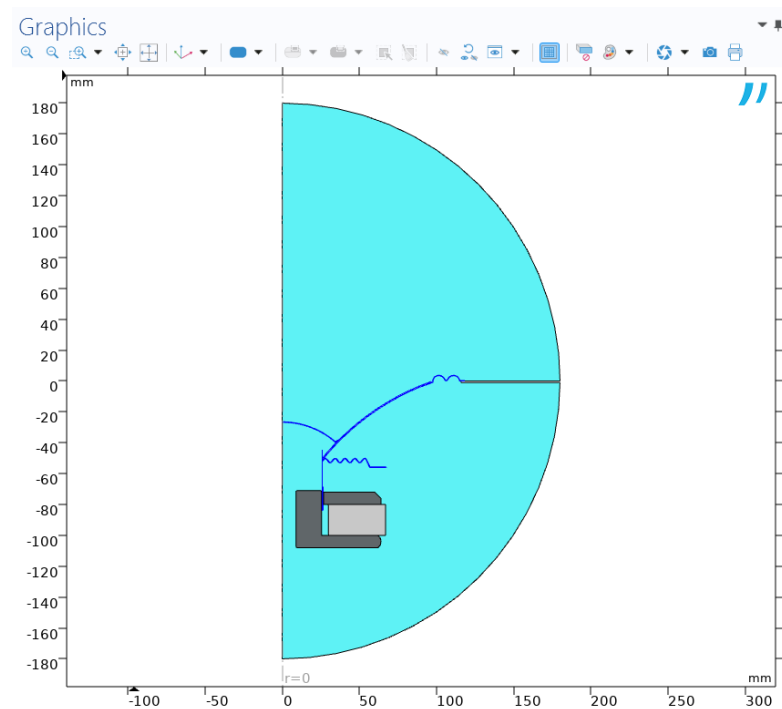


Figura 28 Structural domains

Dentro del nodo *Linear Elastic Material* se ha definido el amortiguamiento (*damping*) de los materiales, los cuales vendrán dados por un factor de pérdidas isotrópico, definido en las propiedades de cada material.

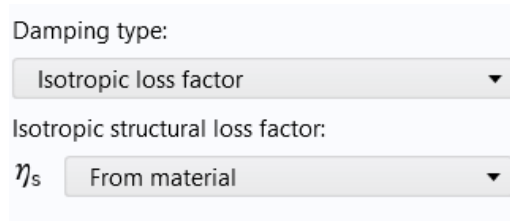


Figura 29 Damping

La última condición de contorno empleada en esta interfaz física es la de *Fixed Constraints*, la cual ha sido aplicada tanto en la suspensión como en el *spider*, en las partes que se encuentran fijas y adhesivadas a la carcasa:

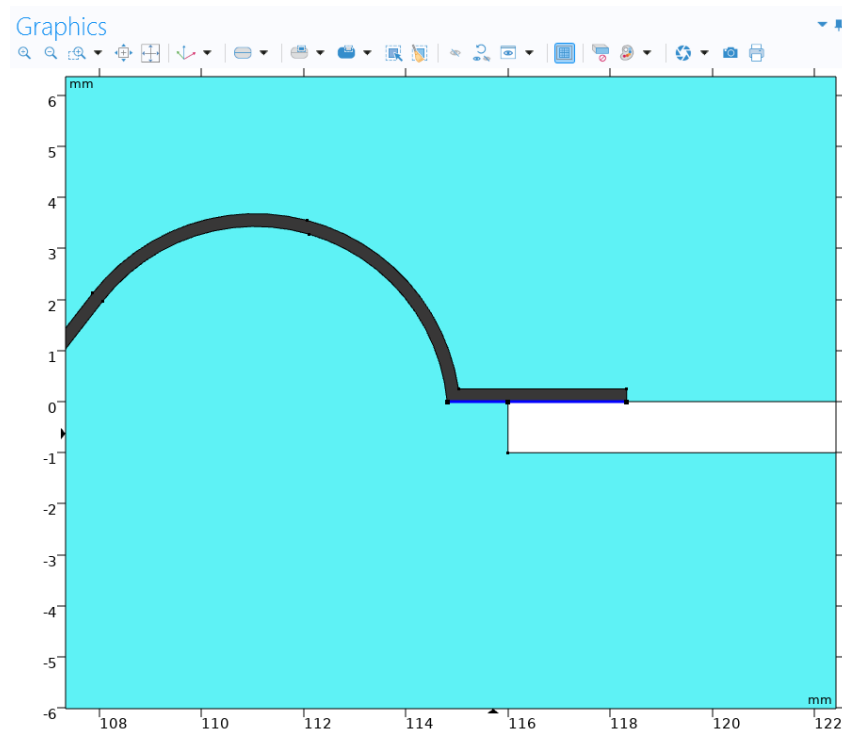


Figura 30 Fixed Constraints en suspensión

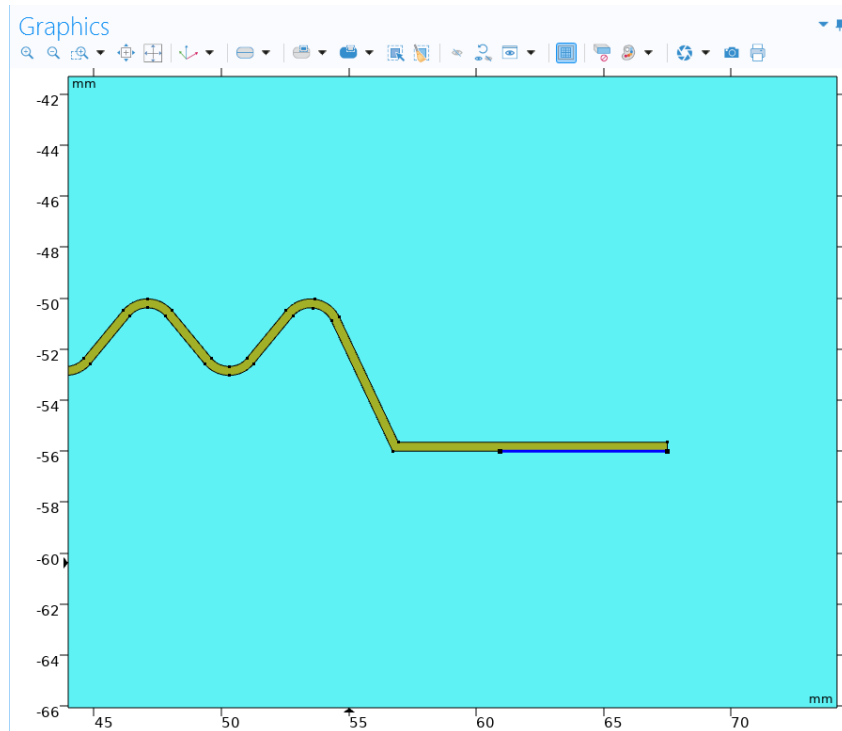


Figura 31 Fixed Constraints en Spider

Magnetic Field:

La interfaz magnética es aplicada en todos los dominios del modelo. Esto es debido a que en caso de tener un dominio en el cual no es aplicada, la onda magnética no entraría en este, debido a la condición de contorno de aislamiento magnético que esta interfaz tiene por defecto.

Para modelar los campos magnéticos bajo estudio, se ha hecho uso de tres nodos de Ampere's law, uno para el imán, otro para el hierro (*pole piece* y *top plate*) y otro para el resto del entorno (aire, anillos de demodulación...). A continuación, se muestran las relaciones constitutivas de estos:

Para el imán tenemos las siguientes relaciones constitutivas:

Magnetization model:
 Remanent flux density

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_{rec} \mathbf{H} + \mathbf{B}_r, \quad \mathbf{B}_r = \|\mathbf{B}_r\| \frac{\mathbf{e}}{\|\mathbf{e}\|}$$

Recoil permeability:
 μ_{rec} From material

Remanent flux density norm:
 $\|\mathbf{B}_r\|$ From material

Remanent flux direction:

0	r	1
0	phi	
Exterior_Interior_magnet	z	

Figura 32 Relaciones constitutivas Imán

Donde la componente z marcará la dirección de la densidad de flujo remanente magnético. El signo de esta se encuentra parametrizado por una variable global, la cual nos servirá para poder modificarlo en la aplicación, dependiendo del modelo a simular.

Para el hierro sería de la siguiente forma:

Magnetization model:
 B-H curve
 $\mathbf{B} = f(\|\mathbf{H}\|) \frac{\mathbf{H}}{\|\mathbf{H}\|}$
 Magnetic field norm:
 $\|\mathbf{H}\|$ From material
 Magnetic coenergy density:
 W'_m From material

Figura 33 Relaciones constitutivas Hierro

Mientras que para el resto del entorno sería:

Magnetization model:
 Relative permeability
 $\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}$
 Relative permeability:
 μ_r From material

Figura 34 Relaciones constitutivas

Se puede apreciar que en los tres casos se toman los datos de los materiales asignados en cada dominio.

Existe la posibilidad de activar un segundo imán, en caso de que el modelo a simular lo requiriese. En este caso se activaría un cuarto nodo con la misma configuración que la explicada anteriormente para el imán principal, salvo que sería una variable diferente la que controle la dirección del flujo remanente del imán.

Por último, se emplea el nodo *Coil* para modelar la bobina. Se ha hecho uso de dos nodos *Coil*, uno para modelar la excitación con Corriente continua:

Coil excitation:
 Current
 Coil current:
 I_{coil} 1[A] A

Figura 35 Excitación bobina DC

Y un segundo nodo para la excitación de corriente alterna:

Coil excitation:
 Voltage

Coil voltage:
 V_{coil} linper(V0) V

Figura 36 Excitación bobina AC

Se hace esta diferenciación debido a que dependiendo del estudio a realizar y los resultados que queremos obtener, se hará uso de una o de otra.

Al tratarse de una bobina multigiro, se deberá de determinar el número de vueltas, así como el tamaño del hilo y su conductividad:

Number of turns:
 N N0

Coil wire conductivity:
 σ_{coil} Sigma_Coil S/m

Coil wire cross-section area:
 User defined

a_{coil} a_coil m²

Figura 37 Configuración bobina

Multifísicas:

Como se ha comentado en el capítulo anterior, los acoples multifísicos empleados han sido:

Acoustic structure boundary, aplicada en los contornos entre los dominios estructurales y los dominios acústicos:

Acoustics:
 Pressure Acoustics, Frequency Domain (acpr) {acpr}

Structure:
 Solid Mechanics (solid) {solid}

Figura 38 Configuración acople mecánico-acústico

Y Lorentz Coupling, aplicada en la bobina:

Magnetic fields:
 Magnetic Fields (mf) {mf}

Solid mechanics:
 Solid Mechanics (solid) {solid}

Figura 39 Configuración acople electro-mecánico

- **Mallado:**

Han sido empleados dos mallados diferentes. El mallado 1, que será empleado para realizar todos los estudios principales y el cual será aplicado en todos los dominios de la geometría. Y el mallado 2, que será empleado únicamente en los dominios seleccionados para realizar el estudio estructural concreto y ajustar las propiedades de los materiales.

Mallado 1:

Para este mallado se hace una diferenciación entre el mallado estructural y el mallado acústico. En ambos casos se emplea una malla con elementos triangulares, siendo una aplicada al dominio estructural y la primera en construirse. La malla acústica es empleada en todos los dominios restantes y está limitada en su tamaño máximo por la longitud de onda de la frecuencia máxima del estudio:

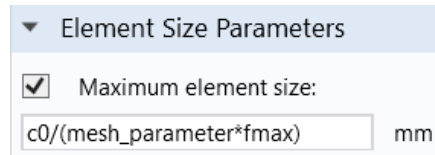


Figura 40 Configuración tamaño malla

Donde $c0$ es la velocidad del sonido en el aire, $fmax$ es la frecuencia máxima bajo estudio y $mesh_parameter$ es un parámetro el cual nos permite modificar la resolución del mallado, oscilando entre los valores 4 y 8, de esta forma podremos elegir un mallado más fino y preciso o uno más grueso y con menor coste computacional dentro de la App.

Finalmente se emplea el nodo *boundary layers* para modelar el estudio acústico en los límites del contorno de la circunferencia, nos permite resolver problemas de flujos de fluido en contornos estrechos, como es el caso del PMB, mejorando así la convergencia a la solución.

Como ejemplo de la malla resultante, para una frecuencia máxima de 8 kHz y un escalado de malla con valor 6, el resultado es el siguiente:

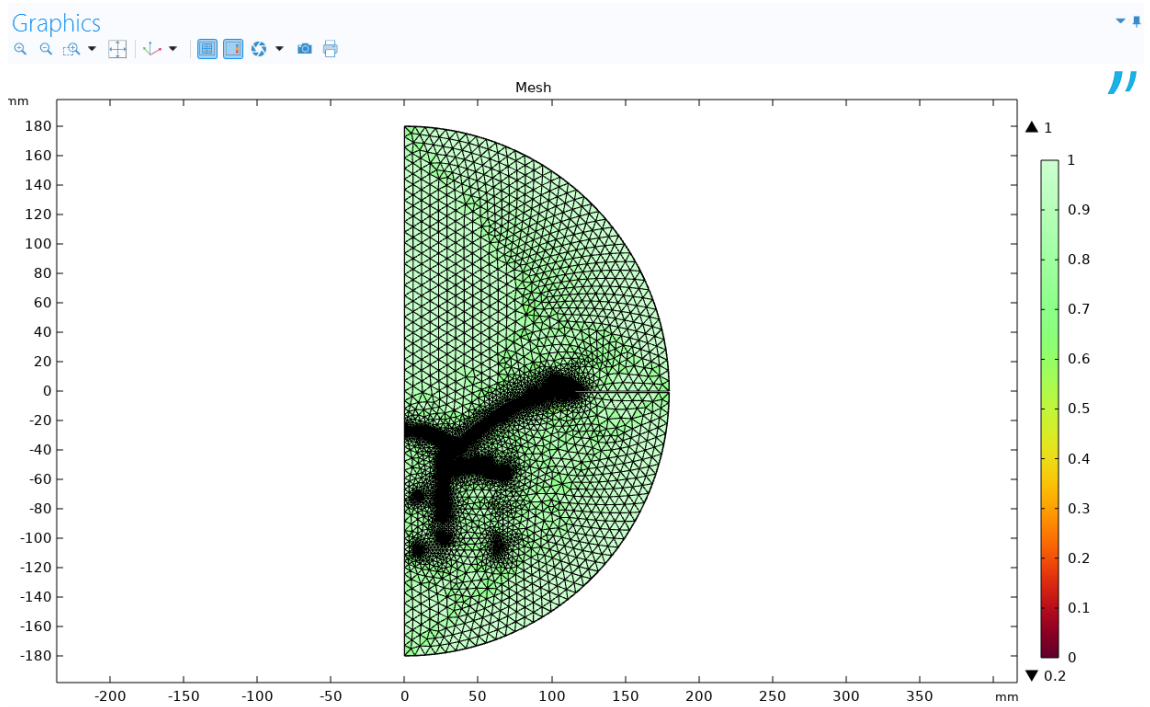


Figura 41 Malla

La escala que se muestra en la imagen evalúa la calidad del mallado entre 0 y 1. Este es un parámetro interno de COMSOL, cuanto mayor calidad mejor converge la solución.

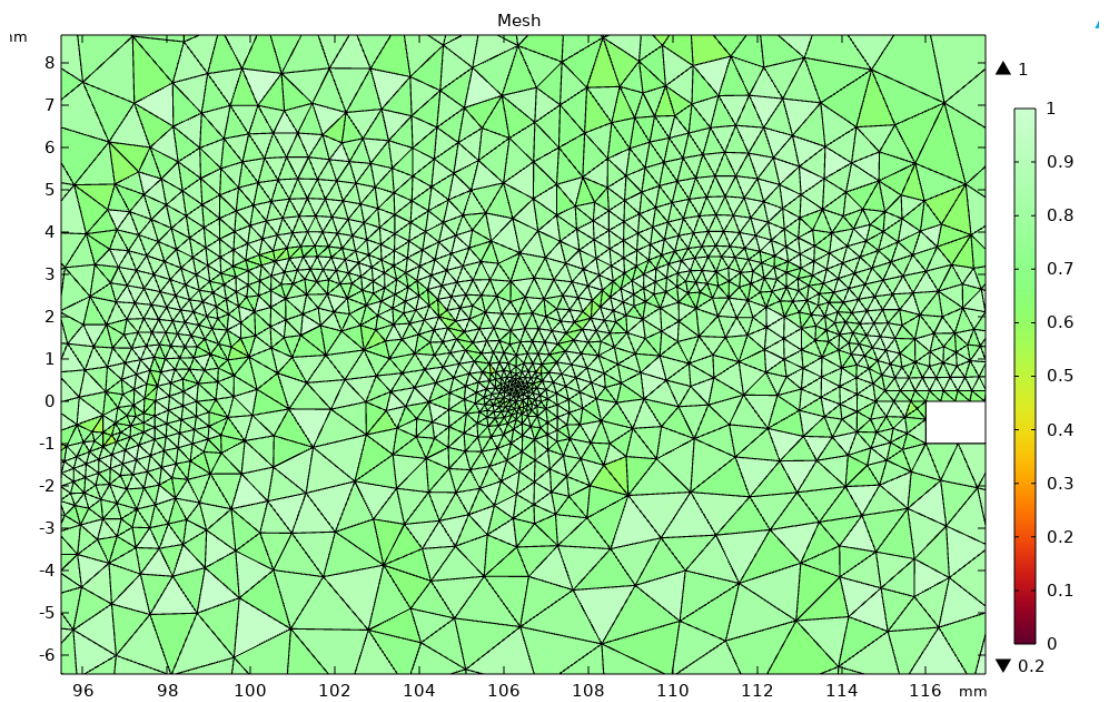


Figura 42 Zoom mallado en suspensión

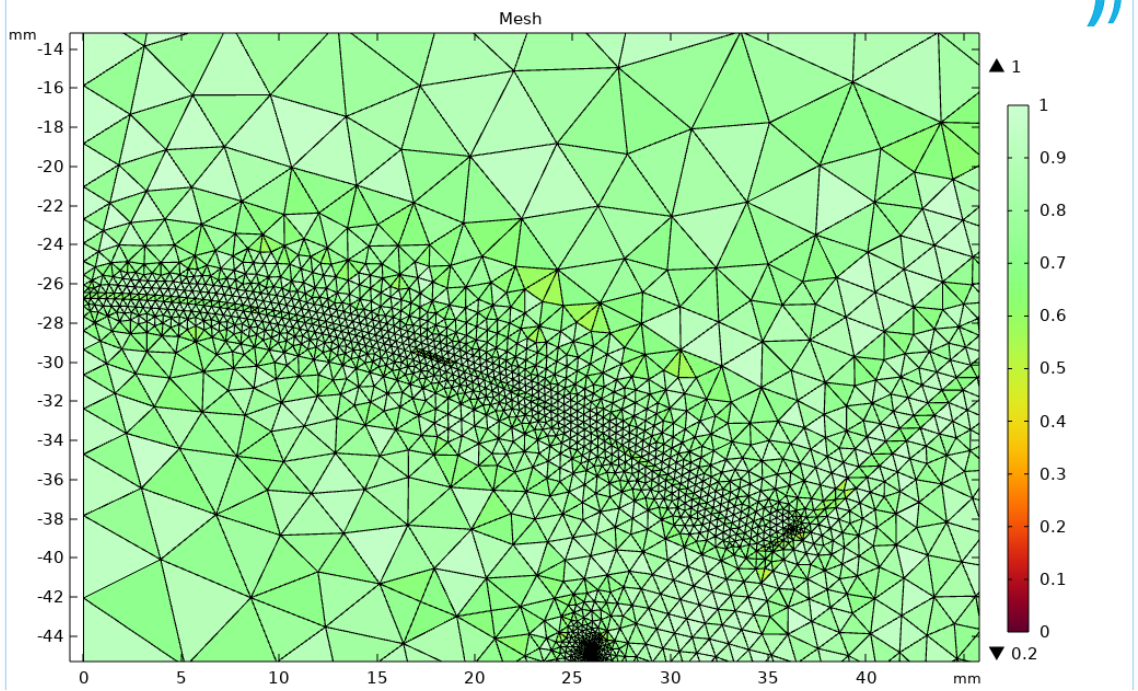


Figura 43 Zoom mallado en Dust Cap

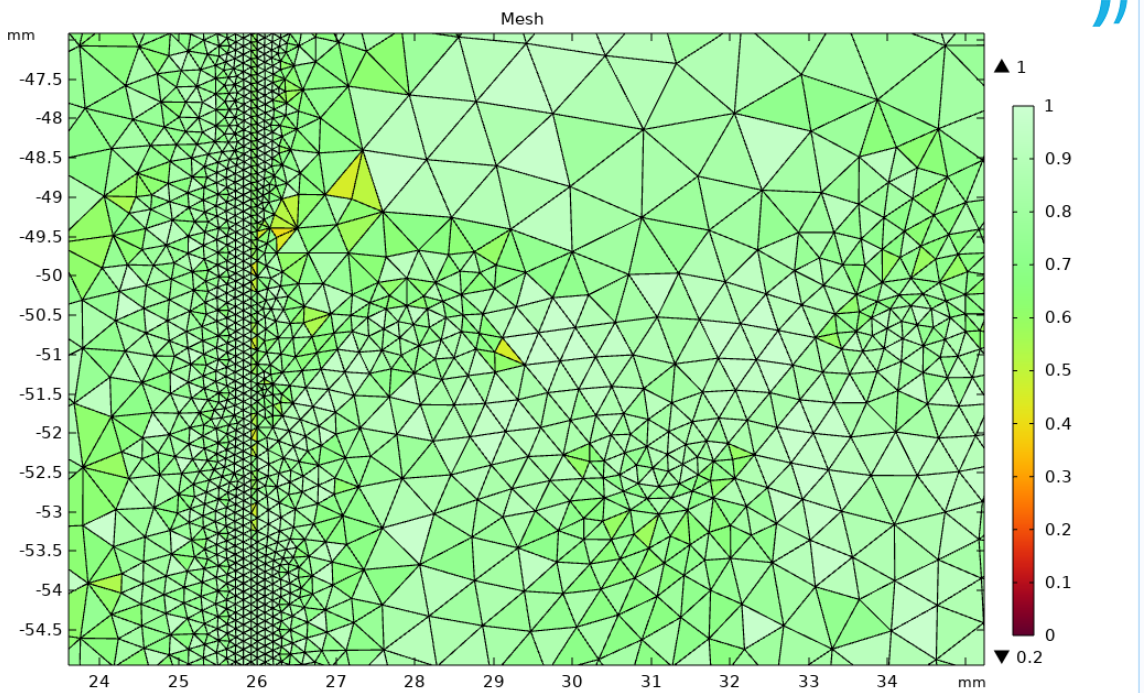


Figura 44 Zoom mallado Spider y Former

Mallado 2:

Como se ha comentado previamente, este mallado es aplicado exclusivamente a los dominios estructurales que se encuentren bajo estudio para realizar el ajuste de propiedades de los materiales. Estos han sido delimitados haciendo uso de una selección. Se ha aplicado un mallado con elementos triangulares, igual al aplicado en el mallado 1. Su tamaño máximo vendrá delimitado por el grosor del dominio donde es aplicado.

Un ejemplo de esta malla para un estudio del cono sería el siguiente:

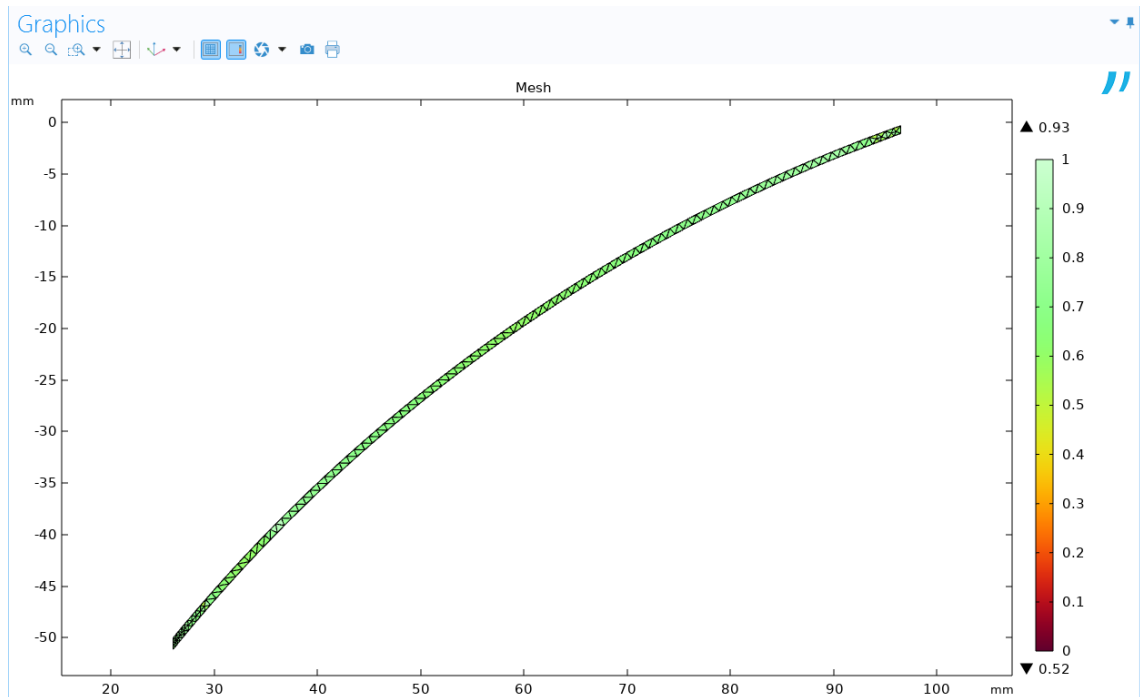


Figura 45 Mallado ajuste materiales

Estudios:

En el modo de simulación completo se hace uso de 5 estudios distintos, los cuales serán expuestos a continuación:

Magnetic Field Study DC:

Para el estudio electromagnético con corriente continua se aplica un paso estacionario, en el cual se deshabilitan las interfaces físicas acústicas y estructurales, dejando solo la interfaz *Magnetic Fields*, dentro de la cual haremos uso de la bobina excitada con una corriente continua.

Este estudio nos permitirá obtener información sobre propiedades de la bobina, del imán, la interacción entre los campos magnéticos y calcular el factor de fuerza BL.

Blocked Impedance Study AC:

En este estudio de nuevo se hace uso únicamente de la interfaz electro-magnética, pero con la diferencia de que esta vez se emplea como excitación en la bobina una señal alterna.

Se emplean dos pasos, en primer lugar, uno estacionario para poder calcular el campo magnético estático, y posteriormente aplicar los resultados como input del segundo paso, llamado *Frequency Domain Perturbation*. Ese nos permitirá realizar el estudio de la interfaz electro-magnética en función de la frecuencia, y calcular así la impedancia bloqueada.

Eigenfrequency Study:

Aplicando el paso *Eigenfrequency* únicamente en la interfaz física *solid mechanics*, se pueden calcular los modos de vibración de la estructura y a que frecuencias ocurren estos. Se pueden especificar el número de modos que se quieren encontrar.

A parte de conocer las frecuencias a las que encontramos estos modos de vibración, de este estudio podremos extraer valores sobre propiedades mecánicas de los dominios estructurales donde ha sido aplicado el estudio.

Complete Study:

Al igual que en el estudio *Blocked Impedance AC*, se hace uso de los pasos estacionario y *Frequency Domain Perturbation*. La diferencia es que esta vez se aplican las tres interfaces físicas, así como los nodos multifísicos que permite la relación entre estas.

De esta forma obtenemos un estudio frecuencial sobre el funcionamiento completo del altavoz, pudiendo realizar así el análisis acústico, magnético y estructural.

Material Study:

Este estudio resuelve exactamente lo mismo que el *Eigenfrequency Study*, salvo que aquí es el único estudio en el que aplicamos el mallado 2, por tanto, nos aportará únicamente información mecánica-estructural sobre el o los dominios que hayamos incluido en este mallado. Esto nos servirá para evaluar rápidamente el comportamiento estructural de ciertas partes frente a variaciones de las propiedades del material.

6.1.2 *Blocked Impedance*

Debido a que los dos modos de simulación están implementados en el mismo modelo, ambos tienen una configuración similar de las ramificaciones del *Model Builder*. Es por esto que, en este sub-apartado se dispondrá a exponer únicamente las características propias del modo de simulación *Blocked Impedance*.

Global Definitions:

Como se ha comentado en puntos anteriores, el modo de simulación *Blocked Impedance* hace uso de una serie de parámetros de entrada que servirán para calcular la fuerza equivalente al motor del altavoz. Por tanto, dentro de las variables globales deberá de definirse el factor de fuerza BL.

Component:

En la rama del Componente es donde más diferencias encontramos entre ambos modelos:

- **Funciones:**

Se ha hecho uso de funciones de interpolación para incorporar como valores de entrada en función de la frecuencia la impedancia bloqueada Z_b . Esta debe ser importada en dos ficheros distintos, uno para R_b (valores resistivos) y otro para L_b (valores inductivos).

También se hacen uso de variables locales dentro de la rama *Component* para poder calcular la fuerza equivalente. De esta forma es posible aplicar las formulas desarrolladas en el apartado 5.3 del presente documento.

- **Interfaces Físicas:**

En este modo de simulación no se hará uso de la interfaz física *Magnetic Fields*, en su lugar se aplicará una fuerza equivalente, la cual provocará el desplazamiento de la bobina.

Para ello se ha hecho uso del nodo *Body Load* dentro de la interfaz *Solid Mechanics*. Dicha fuerza se aplicará en el dominio de la bobina y en el sentido positivo del eje z.

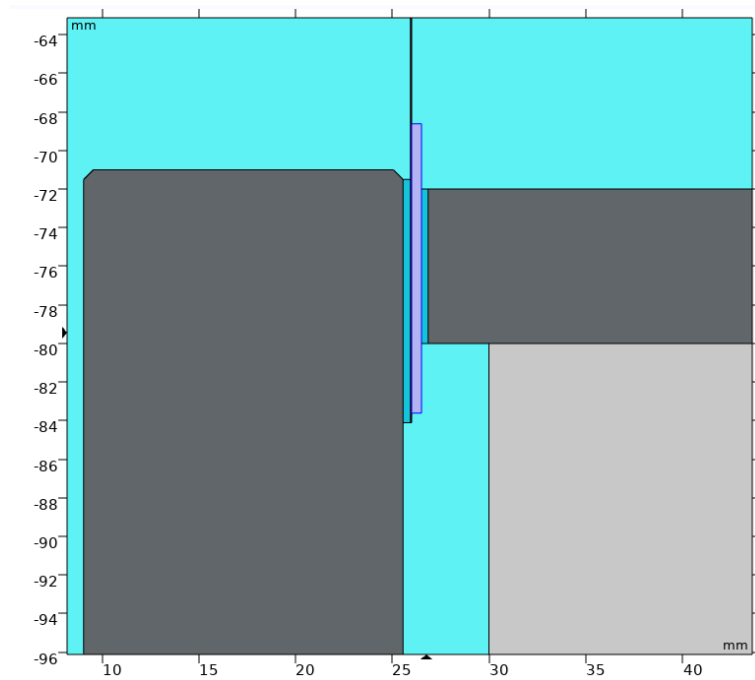


Figura 46 Dominio de la bobina donde es aplicada la fuerza

En cuanto a las multifísicas, únicamente se hará uso del nodo *Acoustic-Structure* para realizar el acople mecánico-acústico.

Estudios:

En modo de simulación *Blocked Impedance*, no se realiza ningún estudio electro-magnético. Los estudios estructurales se mantienen intactos, mientras que para realizar el estudio acústico se hace uso de un nuevo estudio.

Complete Study:

Al no hacer uso de una interfaz electro magnética no es necesario aplicar un paso estacionario previo. Por tanto, el paso empleado ha sido el *Frequency Domain*, con el que podemos realizar un estudio acústico en función de la frecuencia y con una fuerza como excitación del modelo estructural.

6.2 Implementación de la App:

Una vez el modelo se encuentra configurado correctamente, gracias a la funcionalidad *Application Builder* de COMSOL, es posible implementar una App con la cual se simplifique la interacción con este, sin necesidad de realizar una configuración previa de todas las interfaces físicas, estudios y demás preparaciones que han sido expuestas previamente. El usuario final de esta App no necesita tener un conocimiento previo de estas.

Para ver el funcionamiento y la interfaz de la aplicación, ver el Anexo 1, donde se encuentran las instrucciones para el usuario final.

6.3 Resultados, Post-procesado:

A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos simulando el altavoz 10WR300 de Beyma, haciendo uso de la aplicación desarrollada en este trabajo. Estos resultados serán comparados entre sí en los diferentes modos de simulación, y también con las medidas experimentales/ficha técnica de este modelo.

6.3.1 Resultados *Electro Magnetic Study (DC)*:

En el presente apartado se muestran los resultados obtenidos a partir de la simulación realizada con nuestra aplicación:

Parámetros:

Bmax in Coil: 1.281 T BL: 15.26 N/A Re: 6.141 Ω

Figura 47 Resultados Electro-magnéticos 1: Parámetros

Densidad de flujo magnético:

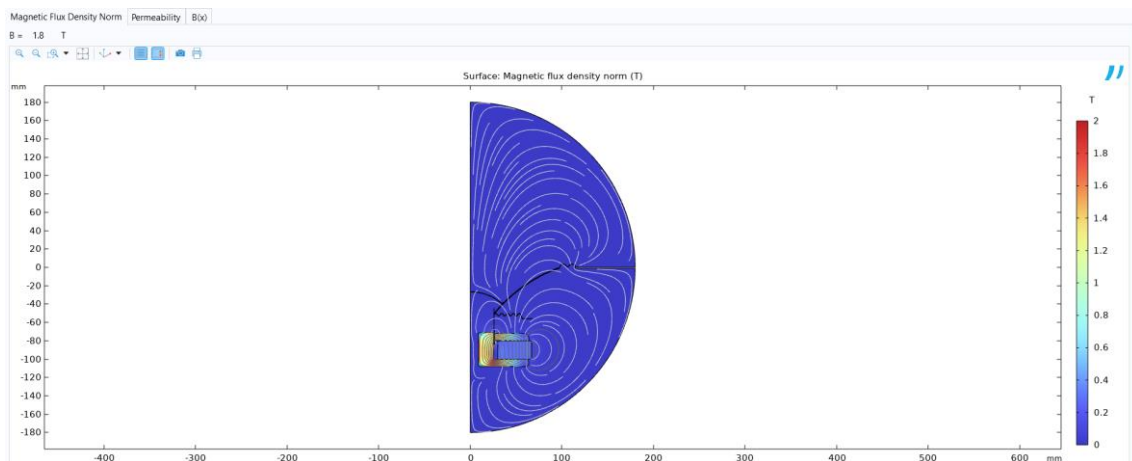


Figura 48 Resultados electro-magnéticos 2: Densidad de flujo magnético

Permeabilidad:

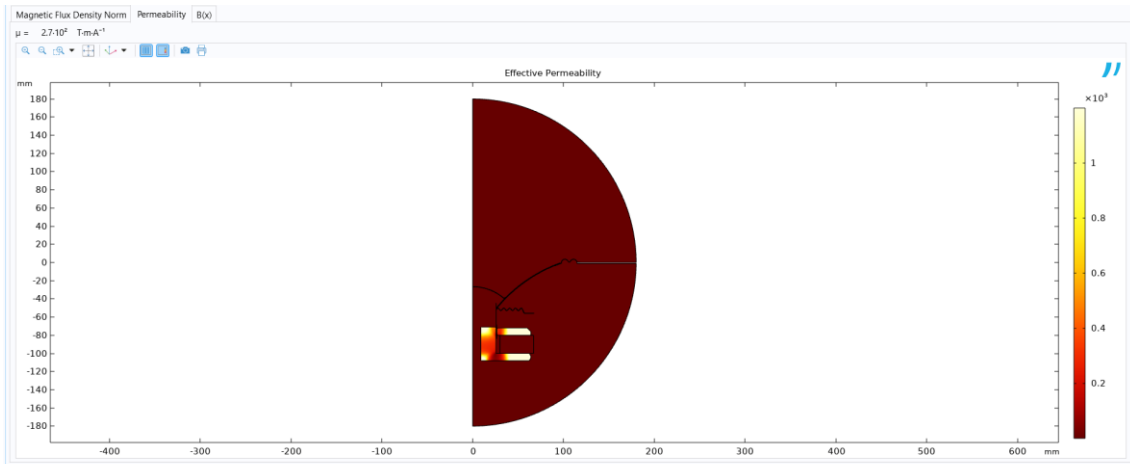


Figura 49 Resultados electro-magnéticos 3: Permeabilidad

B(x):

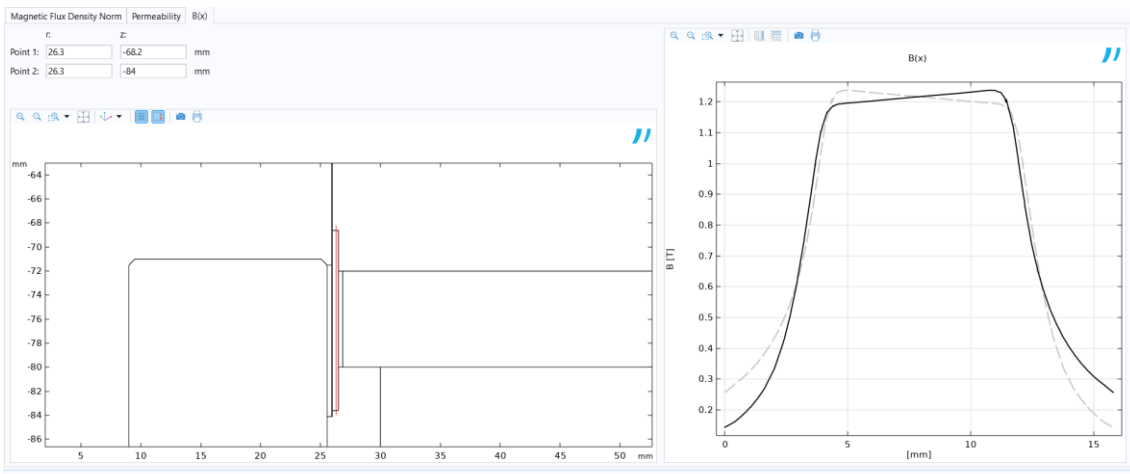


Figura 50 Resultados electro-magnéticos 4: B(x)

6.3.2 Resultados *Blocked Impedance Study (AC)*:

A continuación, se muestra la simulación de la impedancia bloqueada. Estas curvas serán las empleadas como entrada para la simulación con el modo de simulación *Blocked Impedance*.

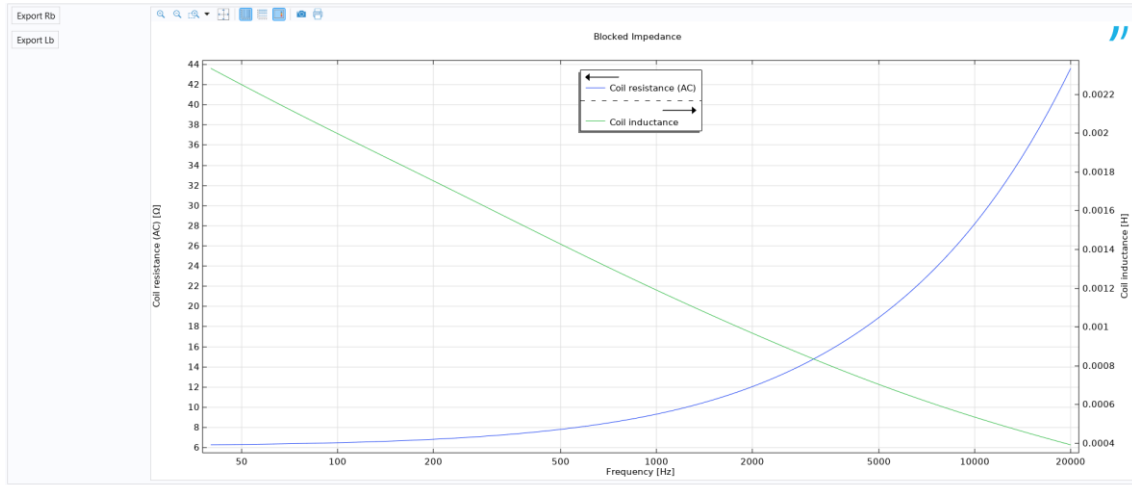


Figura 51 Resultado *Blocked Impedance Rb* y *Lb*

6.3.3 Resultados *Eigenfrequencies Study*:

Se han elegido tres modos diferentes, todos ellos representados tanto en 2D como en 3D:

Modo 1º:

2D:

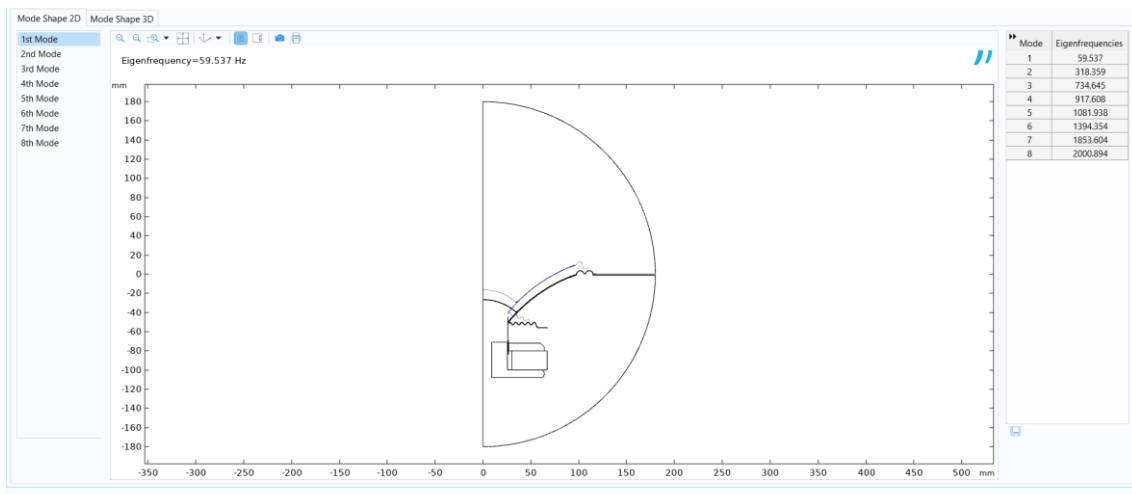


Figura 52 Modo 1 en 2D

3D:

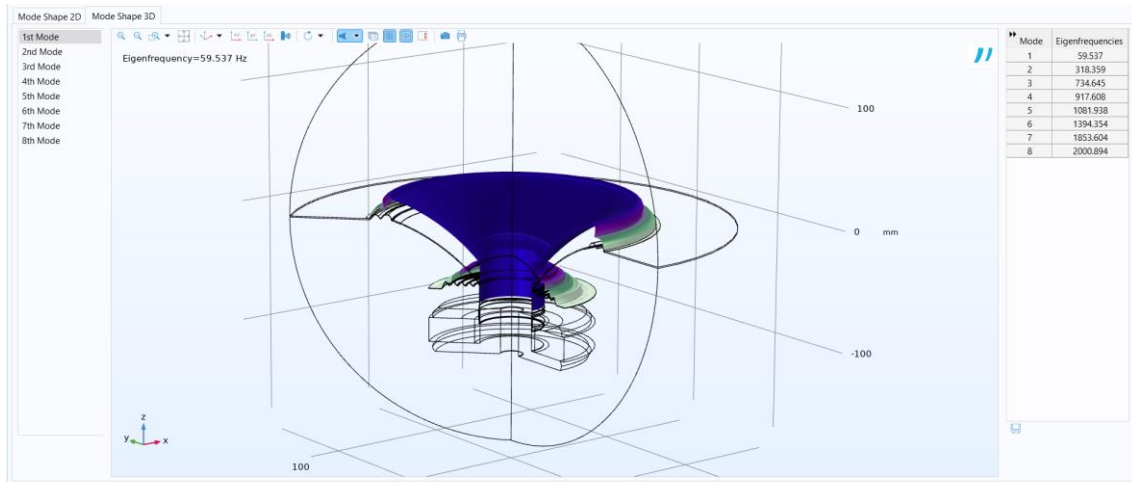


Figura 53 Modo 1 en 3D

Modo 2º:

2D:

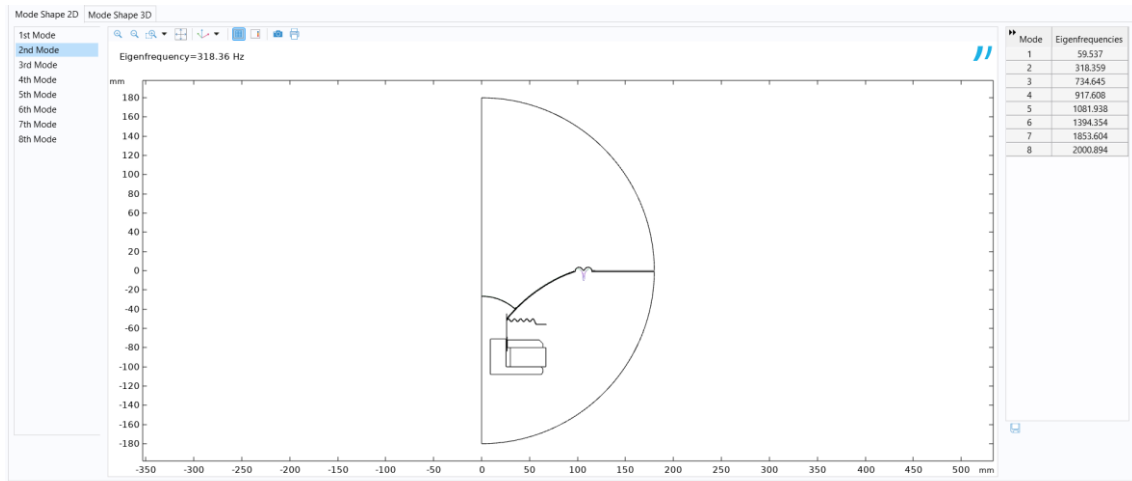


Figura 54 Modo 2 en 2D

3D:

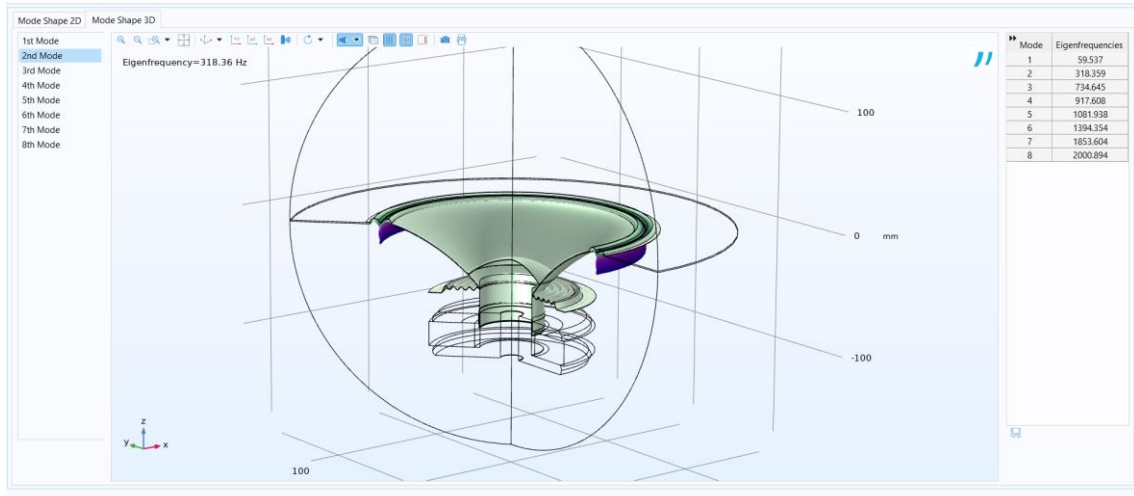


Figura 55 Modo 2 en 3D

Modo 4º:

2D:

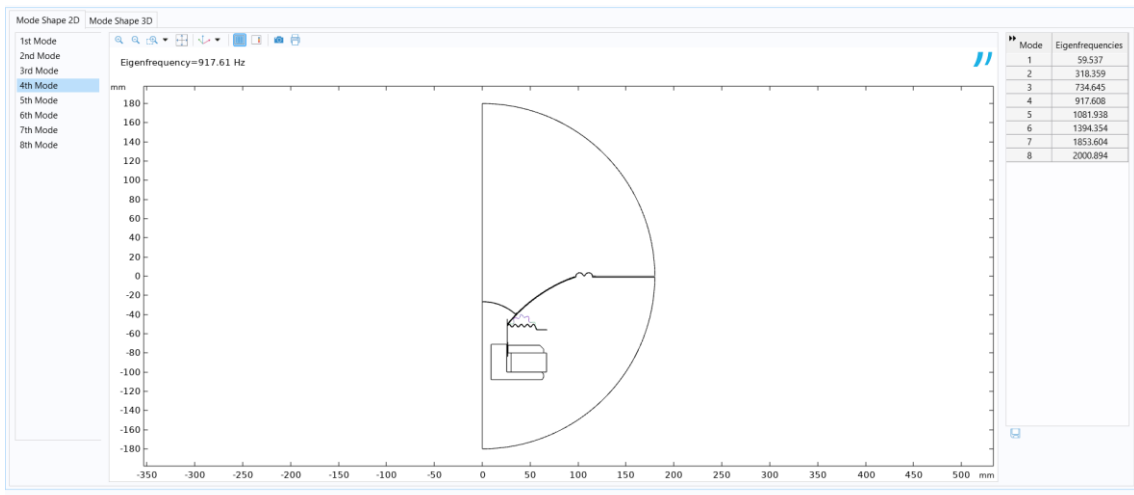


Figura 56 Modo 4 en 2D

3D:

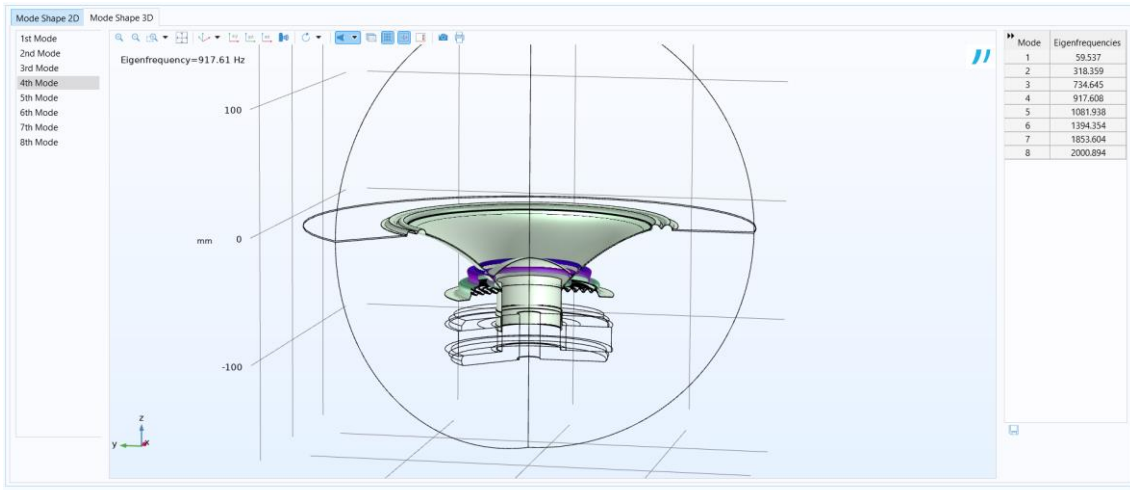


Figura 57 Modo 4 en 3D

6.3.4 Resultados Complete Study:

A continuación, se muestran los resultados obtenidos del *Complete Study*:

Respuesta en frecuencia:

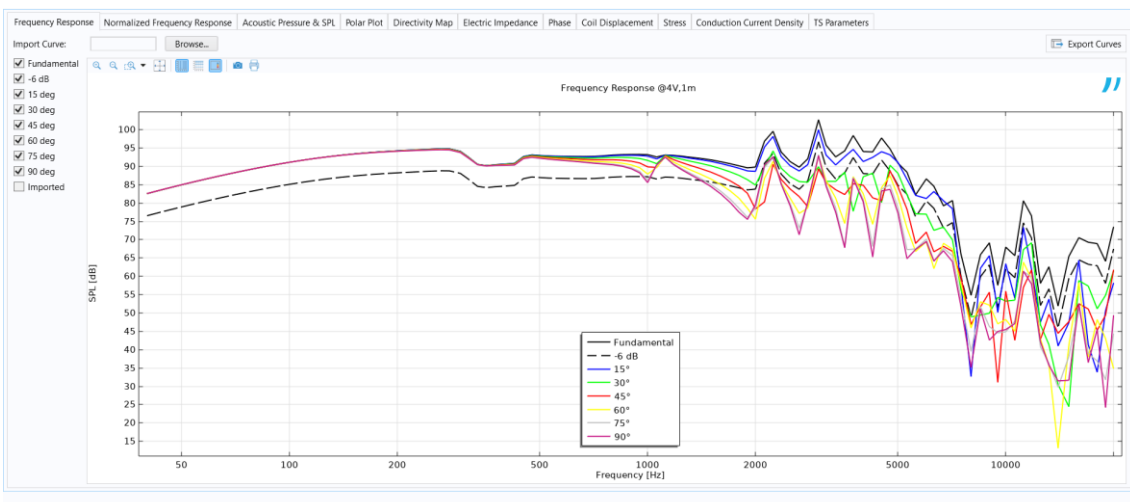


Figura 58 Respuesta en frecuencia

Respuesta en frecuencia normalizada:

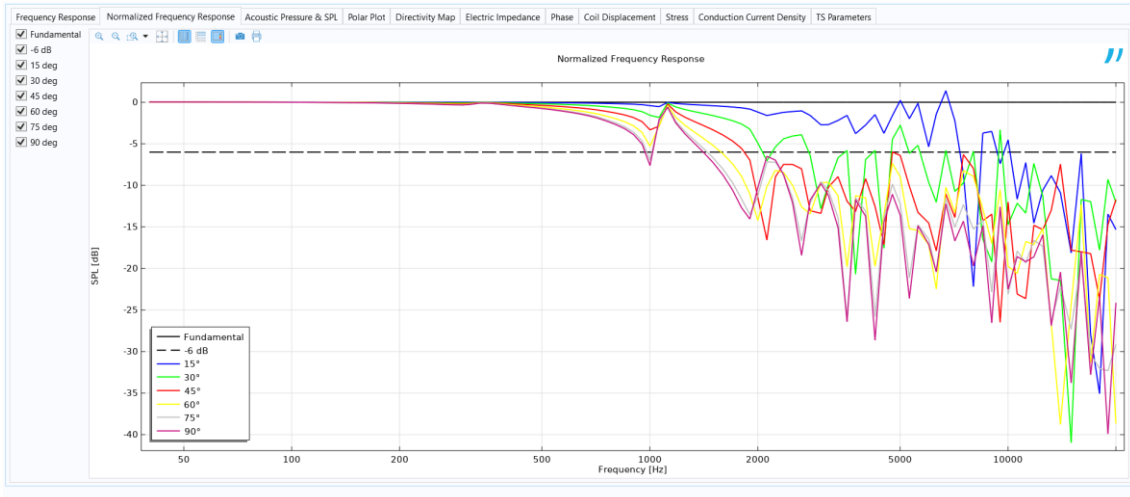


Figura 59 Respuesta en frecuencia normalizada

Presión acústica y SPL:

150 Hz:

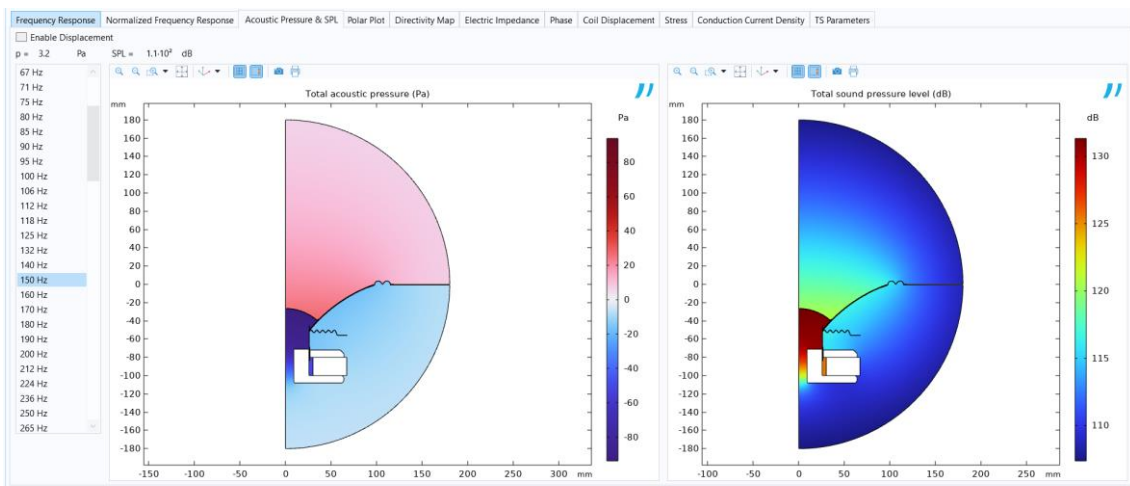


Figura 60 Presión acústica y SPL en 150 Hz

1500 Hz:

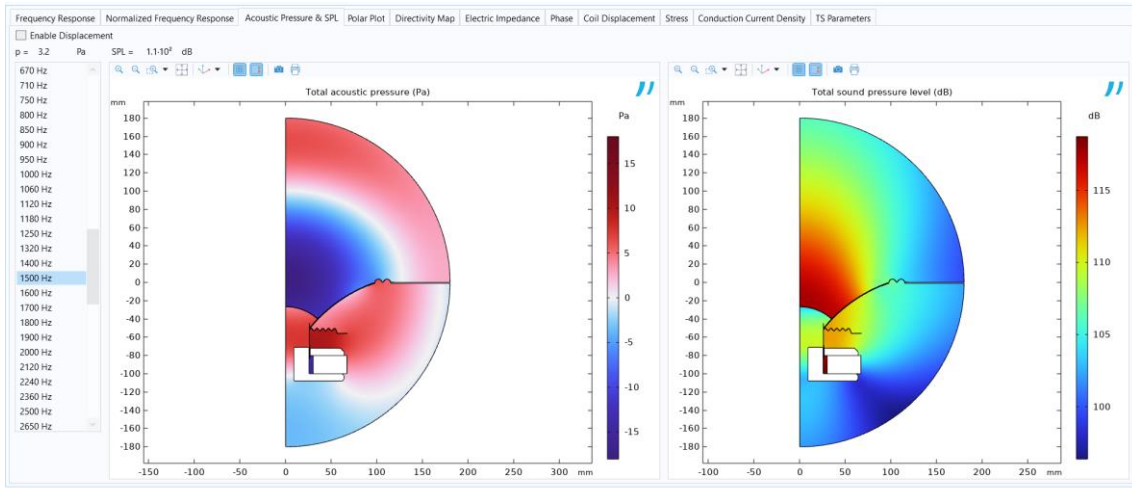


Figura 61 Presión acústica y SPL en 1500 Hz

5000 Hz:

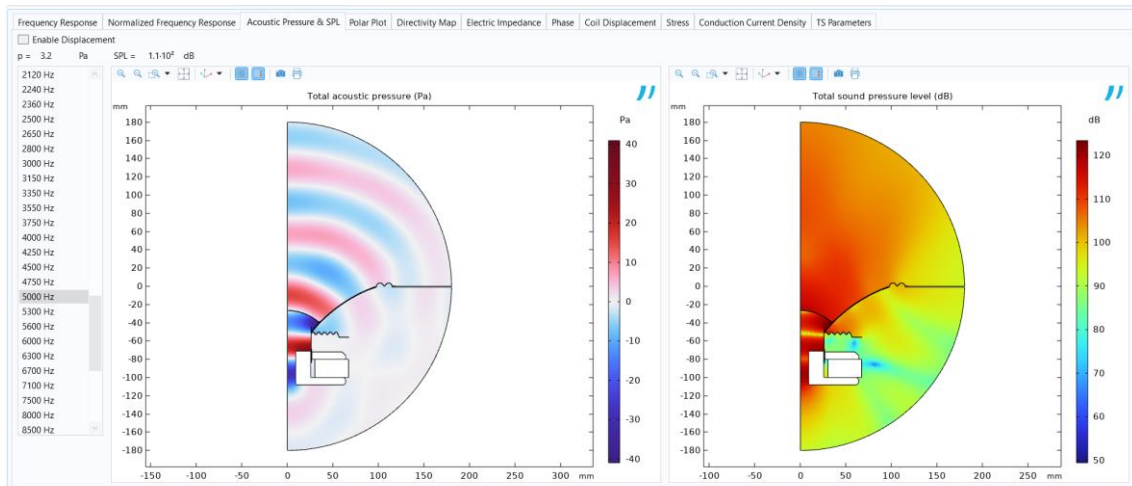


Figura 62 Presión acústica y SPL en 5000 Hz

Gráfica Polar y Beamwidth:

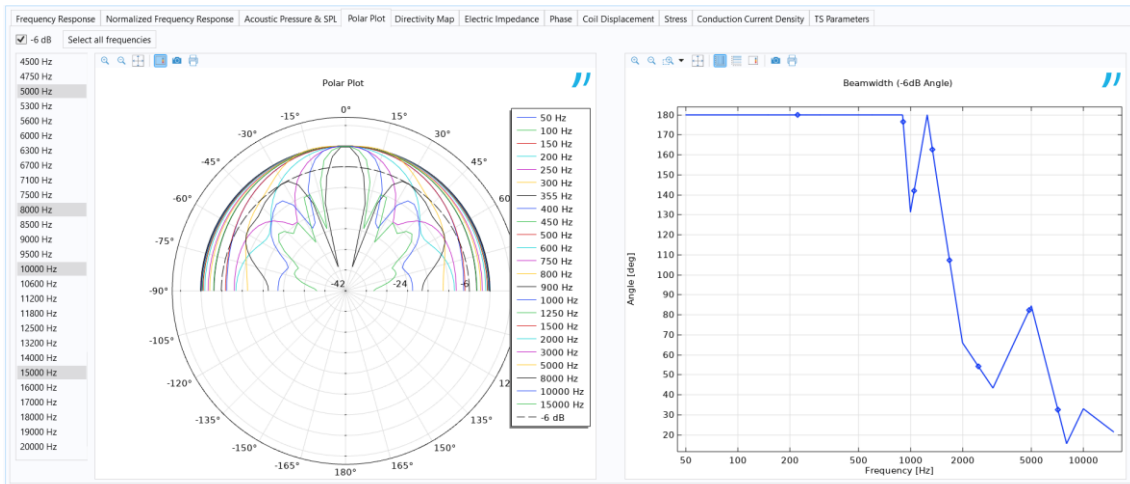


Figura 63 Gráfica polar y beamwidth

Mapa de directividad:

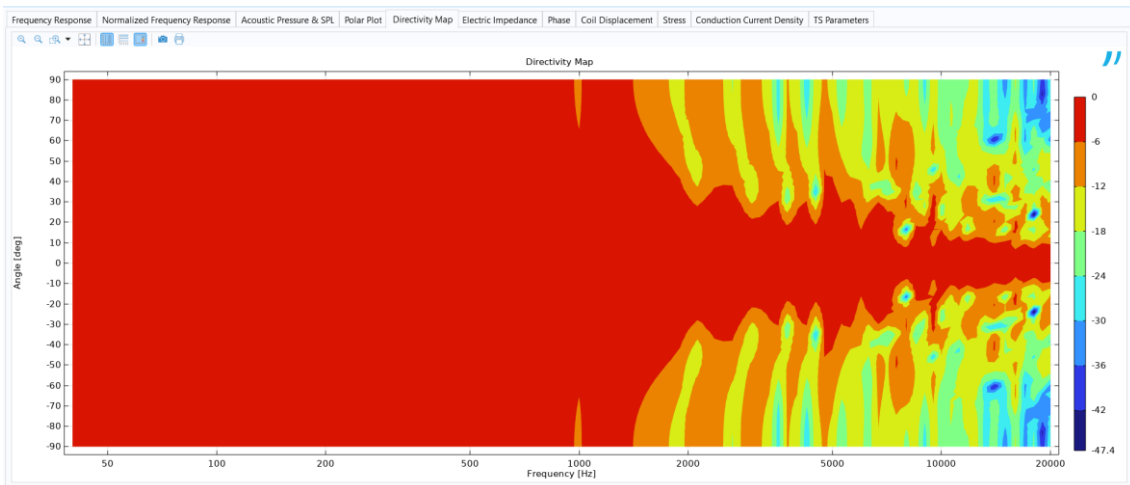


Figura 64 Mapa de directividad

Impedancia eléctrica:

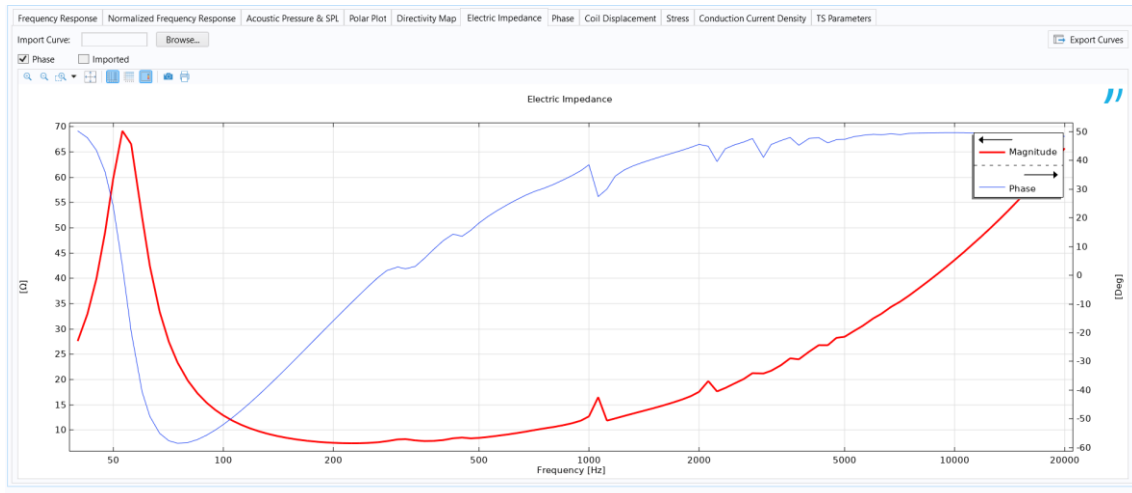


Figura 65 Impedancia eléctrica

Fase Acústica:

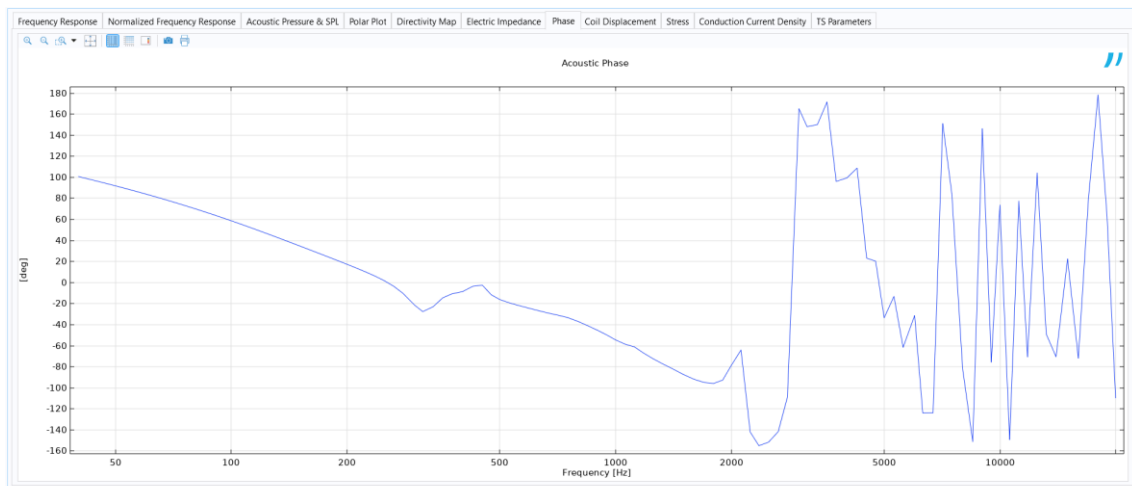


Figura 66 Fase acústica

Desplazamiento de la bobina:

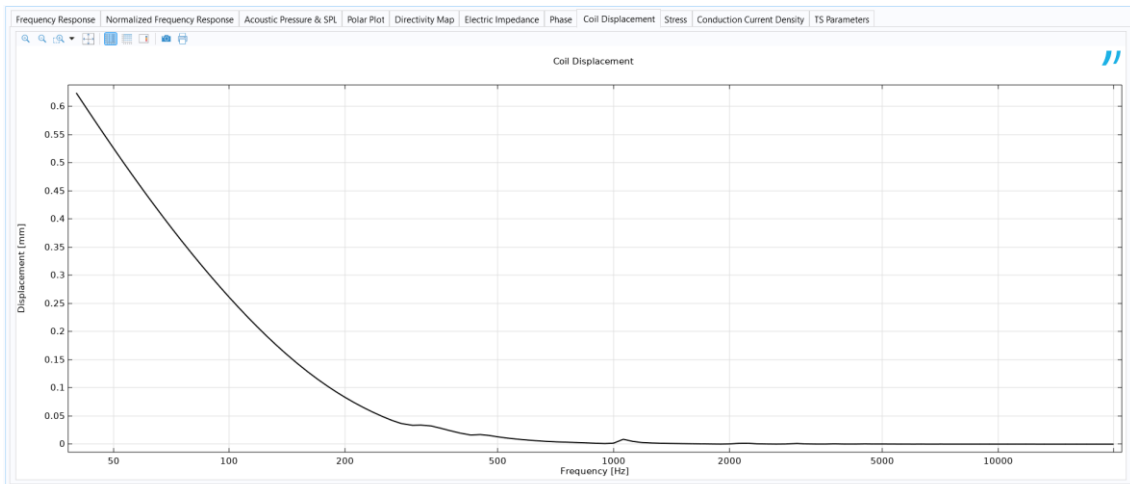


Figura 67 Desplazamiento de la bobina

Stress:

1000 Hz:

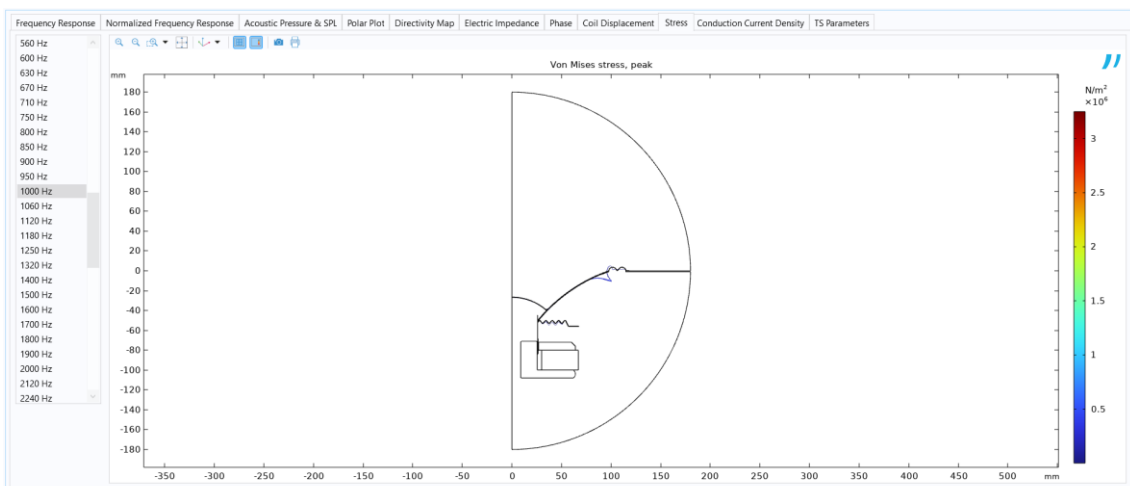


Figura 68 Stress en 1000 Hz

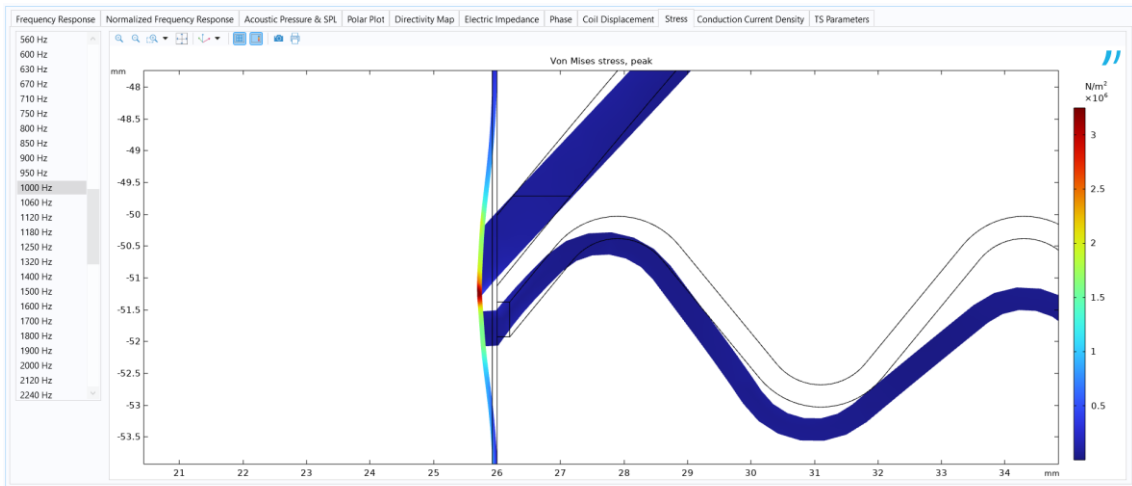


Figura 69 Stress en 1000 Hz Zoom en zona crítica

Densidad de corriente:

40 Hz

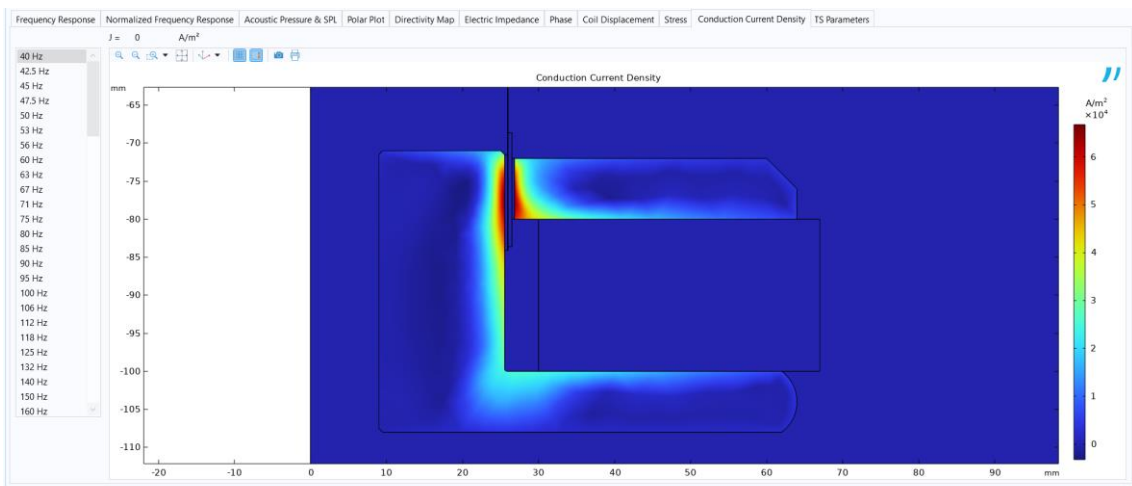


Figura 70 Densidad de corriente en 40 Hz

3000 Hz

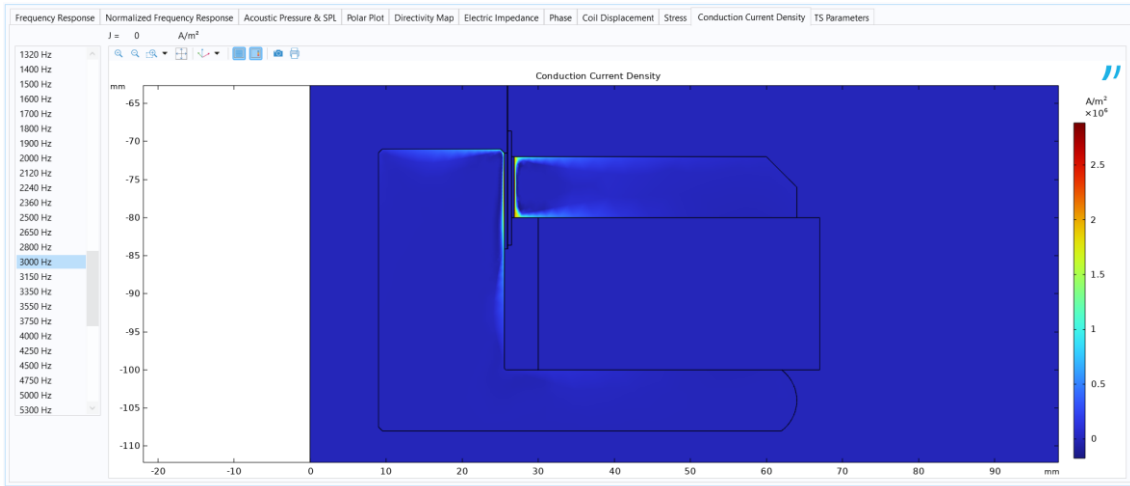


Figura 71 Densidad de corriente en 3000 Hz

Parámetros TS:

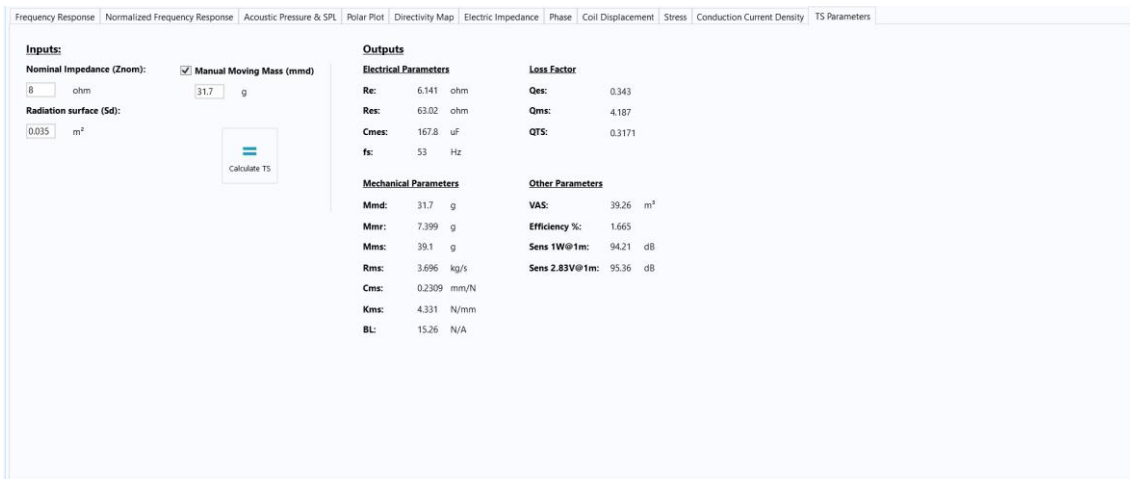


Figura 72 Parámetros TS

6.3.5 Comparación *Complete Mode* VS *Blocked Impedance Mode*:

A continuación, se muestra la comparación entre el modo de simulación *Complete Mode* y *Blocked Impedance*. La siguiente gráfica muestra la comparativa entre la respuesta en frecuencia obtenida por ambos modos de simulación. Para realizar la simulación en el modo *Blocked Impedance* se ha hecho uso de las curvas de *Rb* y *Lb* mostradas en el apartado anterior.

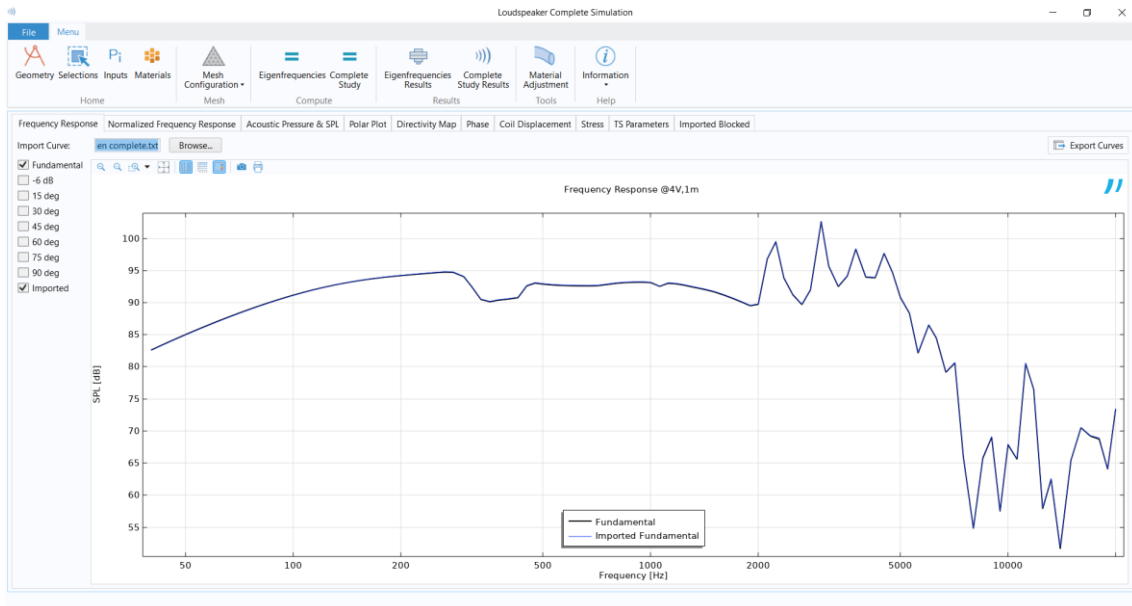


Figura 73 Comparación respuesta en frecuencia entre modos de simulación *Complete* y *Blocked Impedance*

Como se puede apreciar, el resultado es prácticamente idéntico, validando así el uso del modo *Blocked Impedance*. En la gráfica, la curva negra representa la respuesta obtenida del *Blocked Impedance Mode*, mientras que la azul representa la obtenida en el *Complete Mode*.

Comparación de tiempos de simulación:

Blocked Impedance mode:

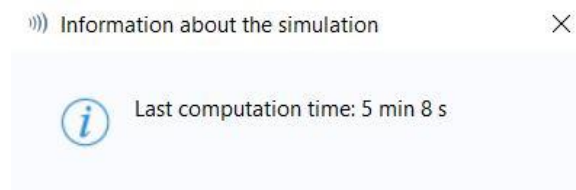


Figura 74 Tiempo de simulación *Complete Study* con *Blocked Impedance mode*

Complete mode:

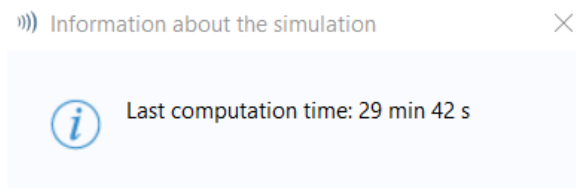


Figura 75 Tiempo de simulación *Complete Study* con *Complete mode*

Viendo los tiempos de simulación de cada modo, podemos afirmar lo que se ha comentado anteriormente en puntos anteriores del proyecto, y es que el modo *Blocked Impedance*, al estar empleando una interfaz física menos, tiene un tiempo de simulación menor.

No se muestran comparación del resto de resultados ya que estos son idénticos.

6.3.6 Comparación Simulación VS Medidas experimentales:

A continuación, se procede a realizar la comparación entre la simulación y medidas experimentales proporcionadas por el fabricante del transductor bajo estudio:

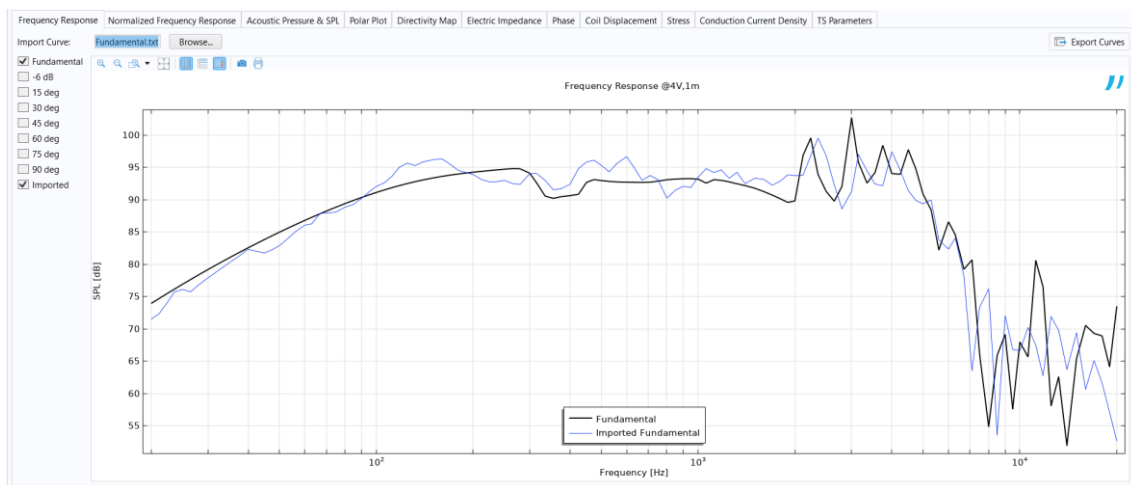


Figura 76 Respuesta en frecuencia Simulación VS Medida experimental

Podemos apreciar que la simulación hace un buen *matching* con la medida experimental. Las diferencias entre estas pueden deberse al entorno de la medida (panel no infinito), caracterización de los materiales, y posibles diferencias con la geometría real del transductor, ya que, por ejemplo, los adhesivos no han sido modelados.

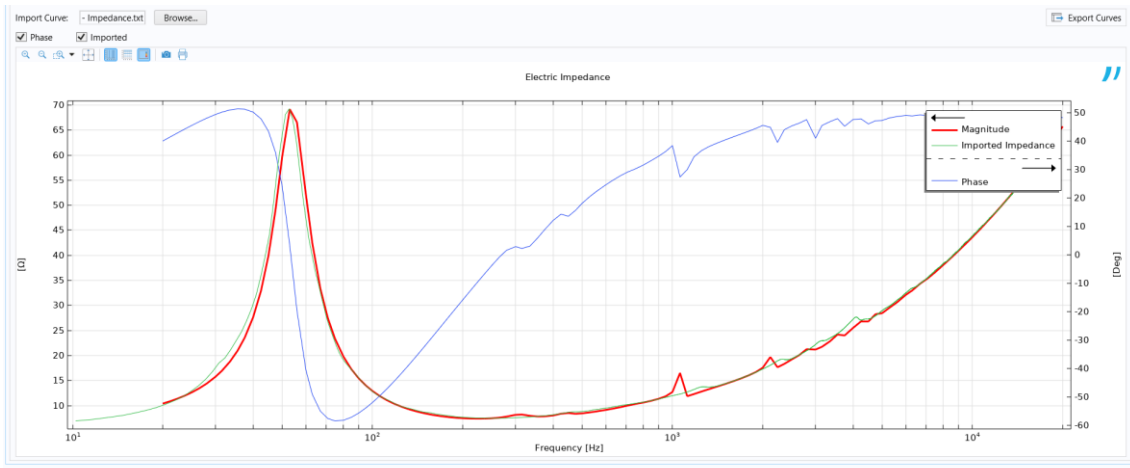


Figura 77 Impedancia eléctrica Simulación VS Medida experimental

En cuanto a la impedancia eléctrica se puede apreciar que el resultado de la simulación coincide con el de la medida experimental.

En la siguiente tabla se puede apreciar la comparación entre los parámetros TS simulados y los obtenidos mediante medidas experimentales:

Parámetro	Unidades	Medidas Exp.	Simulación	% Error
Sensibilidad 1W@1m	dB	95	94.21	0.83
BL	N/A	14.2	15.26	7.46
mms	kg	0.039	0.0391	0.26
Fs	Hz	52	53	1.92
Re	Ω	6.1	6.141	0.67
Qms	-	3.9	4.187	7.36
Qes	-	0.39	0.343	12.05
Qts	-	0.35	0.3171	9.40
Vas	l	42	39.26	6.52
Cms	µm/N	240	230.9	3.79
Rms	kg/s	3.3	3.696	12.00
η	%	1.5	1.665	11.00

Tabla 1 Comparación parámetros Simulación VS Medidas experimentales

Como podemos ver, estos son muy similares, por lo que podemos afirmar que la aplicación realiza una correcta predicción de los parámetros del transductor.

Tanto los valores de los parámetros como las curvas de respuesta en frecuencia e impedancia eléctrica, se pueden ver en la hoja técnica del altavoz 10WR300, adjuntada en el anexo 2 del presente documento.

6.4 Estudio no lineal:

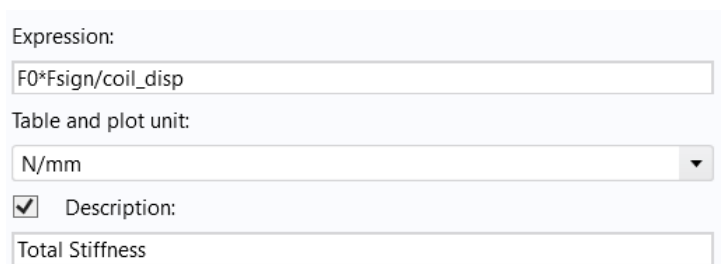
El altavoz electrodinámico es un sistema no lineal. Esto es debido a que no se comporta de la misma manera cuando trabaja con amplitudes pequeñas que cuando lo hacen con grandes amplitudes. Al trabajar con voltajes más elevados se produce un mayor desplazamiento de la bobina, provocando que la densidad de flujo magnético, con el cual interactúa esta, no sea constante y por tanto el factor de fuerza disminuye al sobresalir la bobina del entrehierro. Esto provoca también un cambio en la compliancia y por tanto en su rigidez en función de este determinado desplazamiento. Estos dos fenómenos son definidos por dos parámetros llamados factor de fuerza no lineal $BL(x)$, y rigidez no lineal $Kms(x)$.

Ambos parámetros pueden ser simulados haciendo uso del *software* COMSOL. Se valoró la opción de añadirlos dentro de la aplicación para enriquecer sus prestaciones, pero finalmente se declinó la propuesta debido a que en Beyma ya poseen una herramienta para afrontar dicho tipo de estudios. Es por esto que se adjuntan al trabajo en un fichero a parte del de la aplicación.

Para poder simular los dos parámetros dentro de un mismo *Model Builder*, se ha hecho uso de dos nodos *Component*. Únicamente se hará hincapié en las nuevas configuraciones del modelo, ya que muchas de ellas son idénticas al modelo de la aplicación. A continuación, se expondrá la configuración de cada uno de estos:

Configuración $Kms(x)$:

En primer lugar, la rigidez $Kms(x)$ se define como Fuerza/desplazamiento. Sobre la bobina aplicaremos una fuerza conocida en sentido positivo y negativo y evaluaremos la relación fuerza-desplazamiento.



Expression:
F0*Fsign/coil_disp

Table and plot unit:
N/mm

Description:
Total Stiffness

Figura 78 Configuración $kms(x)$

Donde $F0$ es la variable de la fuerza que va a ser parametrizada, $Fsign$ es el signo de esta fuerza y $coil_disp$ es la componente z de desplazamiento.

La única interfaz física que se emplea en este caso es *Solid Mechanics*, y su configuración es idéntica a la de la aplicación mostrada en el apartado 6.1.1.

Dado que va a ser un estudio paramétrico se debe de activar la siguiente opción:

Auxiliary sweep

Sweep type: All combinations

Parameter name	Parameter value list	Parameter unit
Fsign (Force sign)	-1 1	
F0 (Force parameter for the sweep)	Fmax/1000 Fmax/20 range(Fmax/10,Fmax/10,Fmax*1.15)	N

Figura 79 Configuración estudio paramétrico $kms(x)$

Finalmente, mediante el post-procesado de COMSOL, podemos representar la rigidez en función del desplazamiento de la bobina, obteniendo así la rigidez no lineal $Kms(x)$:

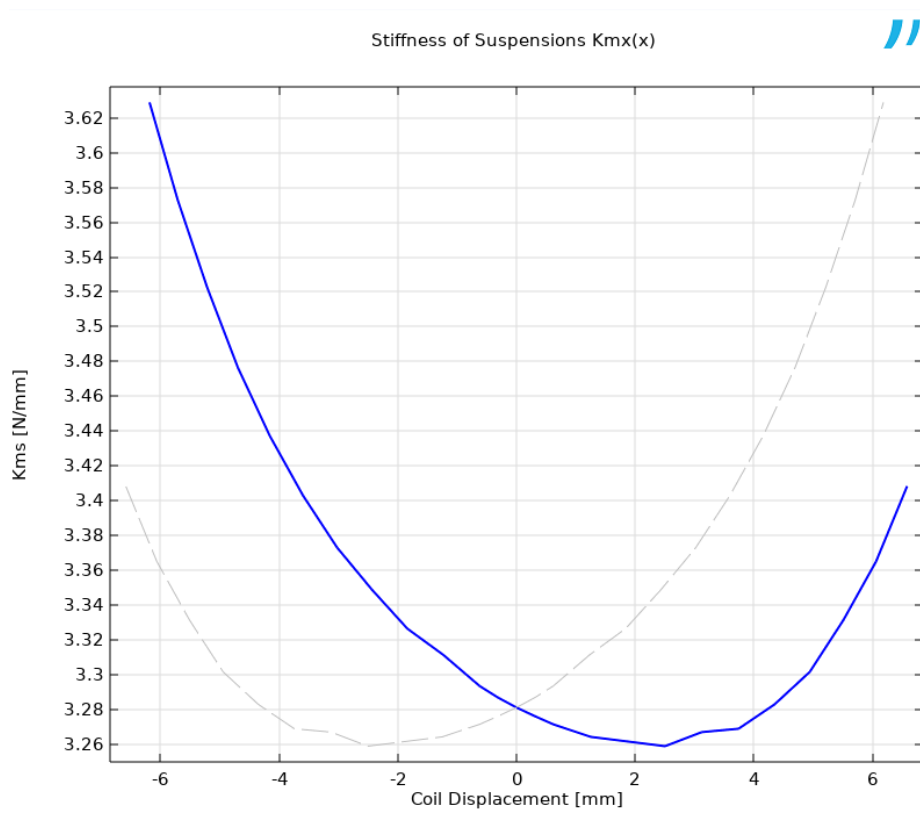


Figura 80 Resultado $kms(x)$

Configuración BL(x):

En el caso del factor de fuerza no lineal el enfoque del estudio es diferente, ya que al intervenir la interfaz física *Magnetic Fields*, al desplazar la bobina, la geometría debe de ser remallada de nuevo cada vez que se quiera realizar el estudio electro-magnético.

Respecto a la geometría, es suficiente con incluir el motor electro-magnético del altavoz y la bobina:

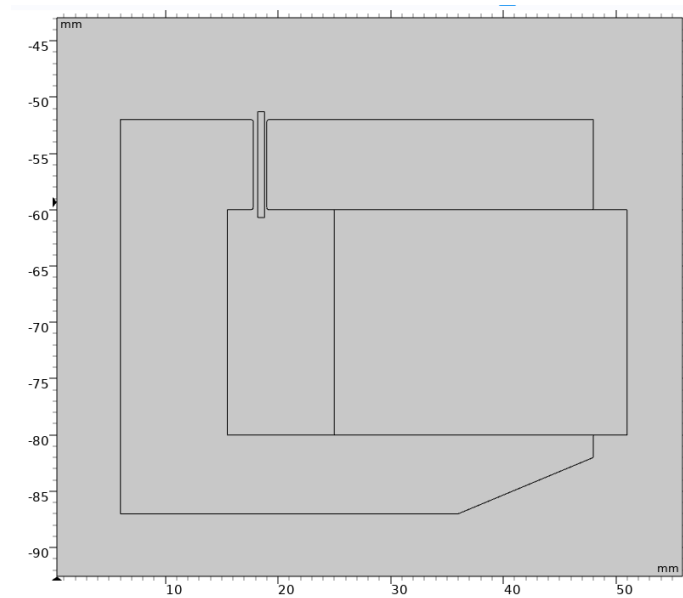


Figura 81 Geometría empleada para el estudio de BL(x)

La configuración de la interfaz física es exactamente la misma que se realiza en la aplicación para el estudio en DC.

Se define el parámetro offset para controlar el desplazamiento de la bobina respecto a su posición inicial.

En cuanto a la configuración del estudio, antes del paso estacionario se añade un barrido paramétrico, en el cual se especificarán los valores que tomará la variable offset en cada iteración:

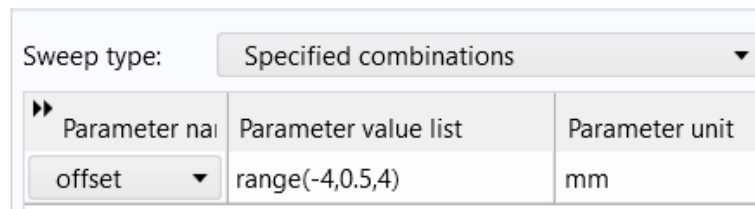


Figura 82 Configuración estudio BL(x)

Finalmente, mediante el post-procesado de COMSOL, podemos representar el factor de fuerza en función del desplazamiento de la bobina, obteniendo así el factor de fuerza no lineal BL(x):

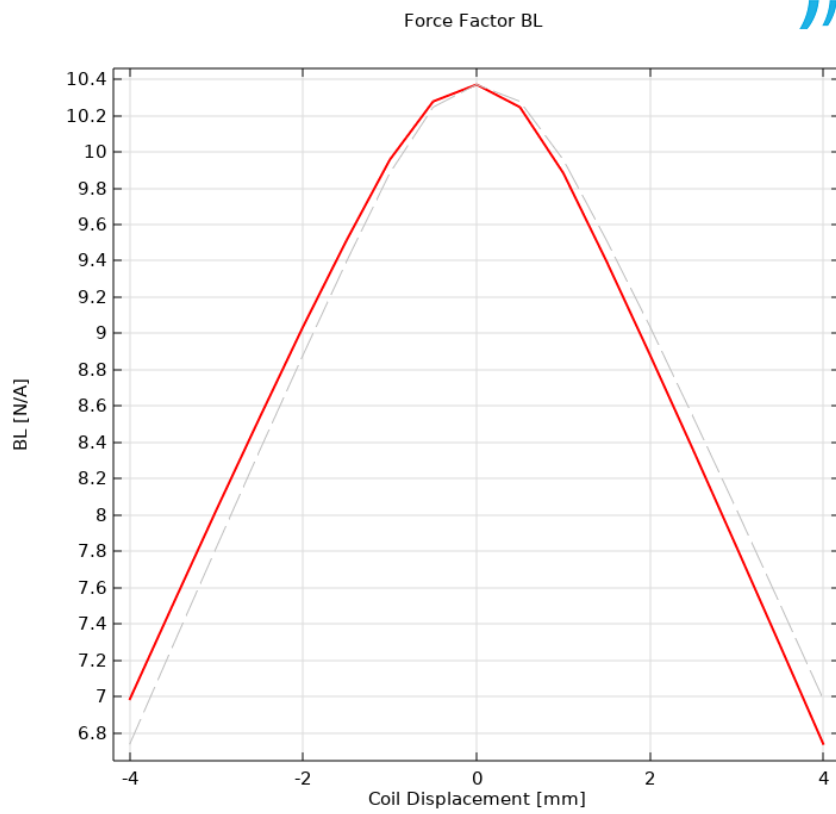


Figura 83 Resultado $BL(x)$

Capítulo 7. Trabajos futuros y mejoras

Como se ha podido comprobar, el funcionamiento de la aplicación es correcto y eficiente, proporcionando al usuario final, rápidamente, una gran variedad de resultados y permitiendo realizar el trabajo en un entorno de fácil comprensión y uso para un ingeniero del sector de la electroacústica. Pero esto no exime que pudiesen incluirse mejoras en el software desarrollado.

Una mejora sería implementar estudios de carácter temporal, ya que también pueden aportarnos información relevante acerca del comportamiento del altavoz. Este tipo de estudios podrían proporcionarnos información sobre la respuesta transitoria para cada una de las frecuencias bajo estudio. Sin embargo, tienen un alto coste computacional y son más complejos de configurar debido a la inclusión de mallas móviles, además, no estaba en los objetivos de Beyma para esta App.

Una funcionalidad que sería interesante añadir sería la de poder exportar y cargar materiales en la librería de la aplicación. Esto sería bastante útil para no tener que hacer uso de la opción *Custom* cada vez que se quiera emplear un nuevo material.

Otra posible mejora para incrementar la comodidad de la aplicación, sería encontrar una forma de que el propio software detectase, a partir de la geometría importada, que dominio corresponde a cada componente del altavoz de manera automática. Una forma de aplicar esta funcionalidad sería que el usuario tuviese el fichero DXF separado por capas, con cada componente en una capa diferente, para facilitar así la distinción dentro del software, en vez de tener que hacerlo manualmente.

Estudios sobre la distorsión del transductor, es también una información relevante del comportamiento no lineal de este. Por lo tanto, resultados sobre la distorsión armónica o de intermodulación serían funcionalidades de gran interés a añadir.

Por último, podría implementarse esta aplicación para estudios de modelos y geometrías en 3D, pero esto se descartó debido a su alto coste computacional y a la necesidad de tener una memoria RAM elevada. Este tipo de simulaciones aportarían una mayor riqueza en el estudio de los modos de vibración, por ejemplo, los *rocking mode*, así como geometrías sin simetría de revolución. Sin embargo, al tener la mayoría de altavoces una simetría de revolución, la aplicación implementada es más que válida.

Capítulo 8. Conclusión

Para concluir el presente trabajo, considero que se ha cumplido satisfactoriamente el objetivo que se propuso en un principio, ya que se ha conseguido desarrollar una aplicación mediante la cual se pueda realizar una simulación completa del comportamiento de un altavoz electrodinámico de radiación directa en régimen lineal. Esta aplicación proporciona un entorno amigable que permite una rápida configuración del estudio, así como guardar y cargar resultados para realizar comparaciones y proporciona de un vistazo los resultados más importantes sin tener que preocuparse por el post-procesado. Esta aplicación puede ser distribuida sin tener instalado COMSOL.

Considero que el resultado es una aplicación muy potente y versátil, que mejora las prestaciones de varios productos que se encuentran en el mercado actualmente, como los citados en el apartado 1.2, ya que proporciona una mayor versatilidad a la hora de trabajar y una gran variedad de resultados, proporcionando información electro-magnética, estructural y acústica del comportamiento del transductor.

Me gustaría hacer hincapié en que este proyecto ha sido muy útil a la hora de aumentar mis conocimientos acerca de *COMSOL Multiphysics*, una herramienta de gran utilidad para los sectores de la ingeniería, así como del altavoz electrodinámico, en un periodo de tiempo corto. Todo esto ha sido en parte gracias a trabajar y colaborar con una empresa influyente en el sector de la electroacústica como es Acústica Beyma.

Finalizar mi etapa en el master de ingeniería acústica realizando una aplicación, la cual, va a ser empleada diariamente en el desarrollo y estudio de altavoces en el ámbito profesional es un orgullo para mí. Espero poder seguir aprendiendo más del mundo del sonido y la acústica, ya sea tanto en futuros proyectos y colaboraciones, como en el mundo laboral.

Capítulo 9. Bibliografía

- [1] COMSOL *Multiphysics*, [En línea]. Available:
<https://www.comsol.com/>
- [2] Finite Element Method Magnetics, [En línea]. Available:
<https://www.femm.info/wiki/HomePage>
- [3] FINECone, [En línea]. Available:
<https://loudsoft.com/finecone/>
- [4] PafLS, loudspeaker analysis tool, [En línea]. Available:
<http://pafec.eu/>
- [5] Klippel, diagnostics of audio systems speaker control, [En línea]. Available:
<https://www.klippel.de/>
- [6] Peter Larsen, Experts in high quality of sound, [En línea]. Available:
<https://loudsoft.com/about-loudsoft/>
- [7] AudioXpress, advancing the evolution of audio technology, [En línea]. Available:
<https://audioxpress.com/>
- [8] Eminence, The art of science of sound, [En línea]. Available:
https://eminence.com/pages/support__understanding-loudspeaker-data
- [9] Acústica Beyma, Transducer 10WR300, [En línea]. Available:
<https://www.beyma.com/productos/c/low-mid-frequency/110WR308/altavoz-10wr300-8-oh/>
- [10] Blocked Impedance, FEMM, [En línea]. Available:
<https://www.femm.info/wiki/BlockedImpedance>
- [11] Loudspeaker Driver – Frequency-Domain Analysis, COMSOL, [En línea]. Available:
<https://www.comsol.com/model/loudspeaker-driver-8212-frequency-domain-analysis-1369>
- [12] Loudspeaker Spider Optimization, COMSOL, [En línea]. Available:
<https://www.comsol.com/model/loudspeaker-spider-optimization-93771>
- [13] Loudspeaker Driver in a Vented Enclosure, COMSOL, [En línea]. Available:
<https://www.comsol.com/model/loudspeaker-driver-in-a-vented-enclosure-2312>
- [14] The Finite Element Method (FEM), COMSOL, [En línea]. Available:
<https://www.comsol.com/multiphysics/finite-element-method>

[15] How to Perform a Nonlinear Distortion Analysis of a Loudspeaker Driver, COMSOL, [En línea]. Available:

<https://www.comsol.com/blogs/how-to-perform-a-nonlinear-distortion-analysis-of-a-loudspeaker-driver/>

[16] COMSOL Reference Manual, COMSOL, [En línea]. Available:

https://doc.comsol.com/5.5/doc/com.comsol.help.comsol/COMSOL_ReferenceManual.pdf

Anexo 1

Instrucciones de la aplicación

Instrucciones de la Aplicación

Autor: Carlos Simon Domínguez

Revisión: Adrián Roig

Febrero de 2023

Índice

1 – Introducción	3
2 - Complete Mode:	4
2.1 - Geometry:	4
2.2 - Selections:	6
2.3 - Inputs:	7
2.4 - Materials:	8
2.5 - Mesh Configuration:	10
2.6 - Compute:.....	11
2.7 - Results:.....	11
2.8 - Materials Adjustment:	20
3 - Blocked Impedance Mode:	21
3.1 - Geometry:	21
3.2 – Selections:	21
3.3 – Inputs:.....	22
3.4 - Materials:	22
3.5 – Mesh configuration:	22
3.6 - Compute:.....	23
3.7 - Results:.....	23
3.8 - Materials Adjustment:	25

1 – Introducción

En el presente documento se aporta toda la información necesaria para entender y poder hacer uso de la aplicación paso a paso.

Esta aplicación permitirá al usuario realizar una simulación completa del comportamiento lineal de un altavoz electrodinámico de radiación directa. Para ello se da la opción de elegir entre dos modos de simulación:

- **Complete Mode:** Escoger este modo en caso de querer realizar una simulación en la que se realice un estudio electro-magnético del transductor, a parte del estudio estructural y el acústico.
- **Blocked Impedance Mode:** Escoger este modo de simulación en caso de querer realizar un estudio con un menor coste computacional, tanto estructural como acústico.

Al ejecutar la aplicación encontraremos la pantalla de inicio, en la cual deberemos de elegir el modo de simulación que se desea emplear:

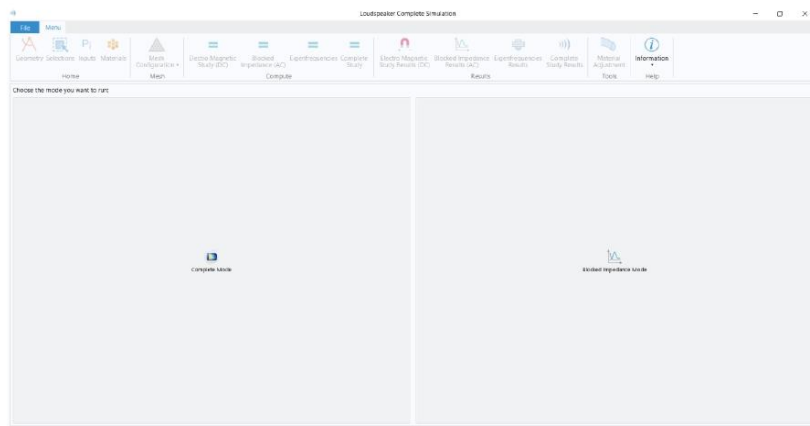


Figura 1 Pantalla de inicio

2 - Complete Mode:

A continuación, se procede a explicar el uso de la aplicación en modo “Complete Mode”:

2.1 - Geometry:

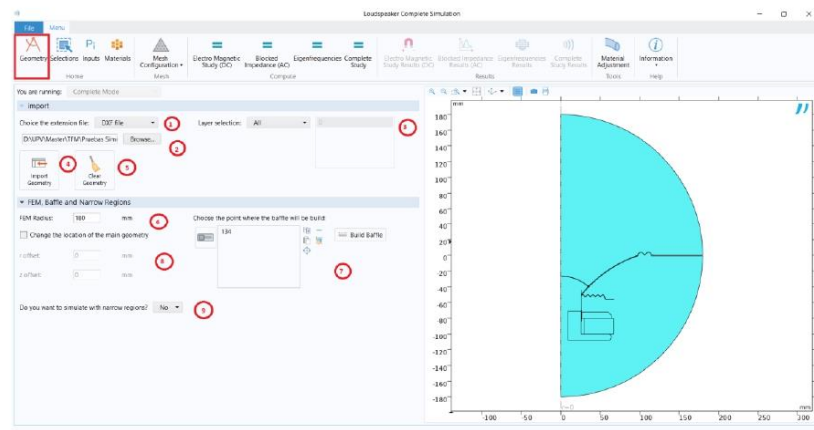


Figura 2 Geometría

- 1 – Emplea el desplegable para elegir la extensión del fichero en el que se encuentra la geometría a importar. Puede ser tanto DXF (archivo CAD) o MPH (Archivo de COMSOL).
- 2 – Selecciona la ruta donde se encuentra el fichero a importar.
- 3 – En caso de que el fichero cargado sea de extensión DXF, es posible elegir importar todas las capas o seleccionar las que se deseen.
- 4 – Pulsa el botón “Import Geometry” para importar el archivo en la App.
- 5 – Pulsa el botón “Clear Geometry” en caso de querer eliminar la geometría importada. La configuración de la pantalla Geometry volverá a su estado inicial.
- 6 – Introduce el radio en mm de la semicircunferencia que hará la función del aire.
- 7 – Al activar esta selección se podrá elegir el punto de la geometría donde se desea crear el panel infinito. Solo se debe de seleccionar un punto. Una vez seleccionado pulsar el botón “Build Baffle” para construirlo.
- 8 – Emplea este check box en caso de querer desplazar la geometría entera tanto en la dirección “r” como en “z”.
- 9 – Haz uso del siguiente desplegable para seleccionar si deseas realizar la simulación haciendo uso del nodo “narrow regions” o no.

En caso afirmativo, habrá dos opciones:

Narrow regions importadas en la geometría:

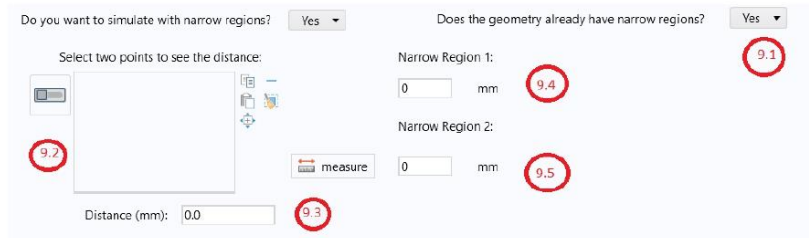


Figura 3 Narrow Regions importadas

9.1.1 – Emplea este desplegable para conmutar entre las dos opciones de narrow regions.

9.1.2 – Emplea esta selección para elegir dos puntos de la geometría y medir la anchura de los narrow regions en caso de no conocerla.

9.1.3 – Una vez pulsado el botón “measure” se mostrará la distancia entre los puntos seleccionados

9.1.4 – Introduce aquí la anchura del narrow región 1.

9.1.5 - Introduce aquí la anchura del narrow región 2.

Narrow regions no importadas en la geometría:

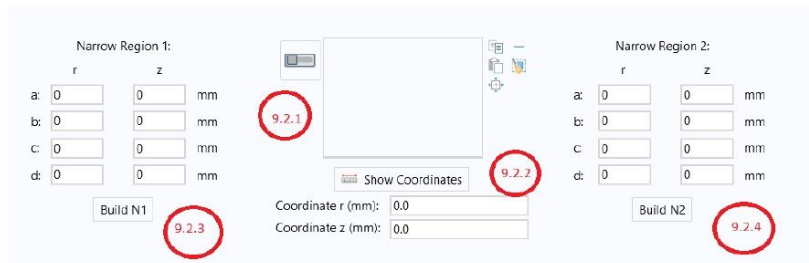


Figura 4 Narrow Regions no importadas

9.2.1 – Haz uso de esta selección para escoger un punto de la geometría y saber sus coordenadas.

9.2.2 – Pulsa el botón “Show Coordinates” para mostrar las coordenadas de este punto.

9.2.3 – Introduce las coordenadas del rectángulo que hará la función del dominio narrow región 1.

9.2.4 – Introduce las coordenadas del rectángulo que hará la función del dominio narrow región 2.

Estas coordenadas vendrán definidas por la siguiente disposición:

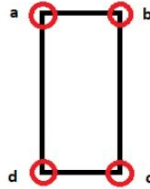


Figura 5 Disposición coordenadas Narrow Regions

2.2 - Selections:

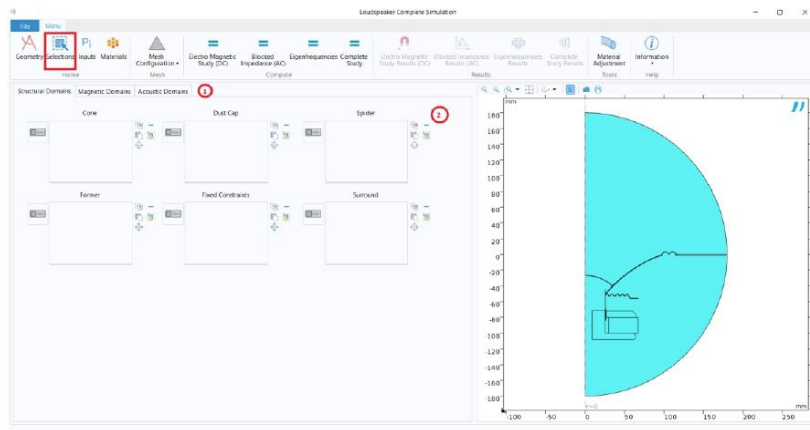


Figura 6 Selecciones

1 – Emplea el menú de pestañas para poder conmutar entre las selecciones de los tres dominios: Estructural, magnético y acústico.

2 – Haz uso de las selecciones para poder definir los dominios empleados en el modelo.

Las selecciones que tengan un check box se activarán una vez se active este, ya que son opcionales:

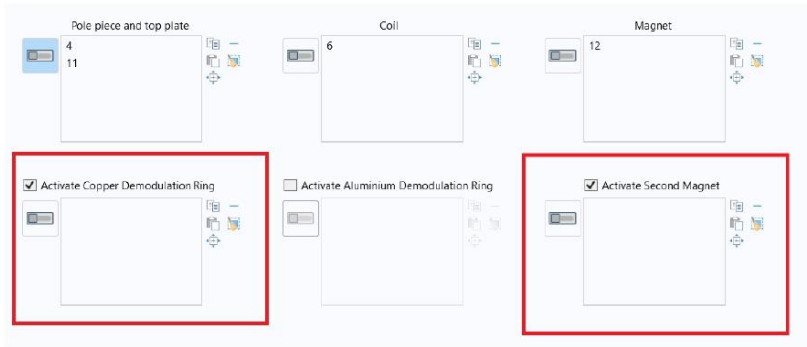


Figura 7 Checkbox Selecciones

2.3 - Inputs:

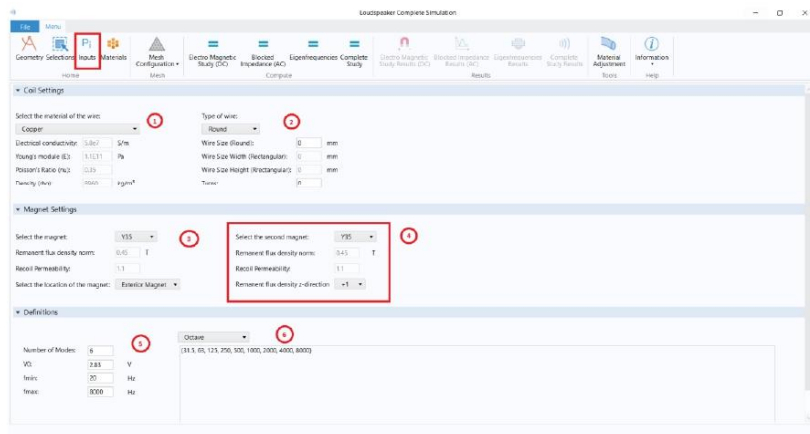


Figura 8 Inputs

1 – Emplea el desplegable para elegir el material empleado en la bobina. Los materiales a elegir son los siguientes:

	Conductividad Eléctrica (S/m)	Módulo de Young (Pa)	Coefficiente de Poisson	Densidad (kg/m ³)
Cobre	5.8e7	1.1e11	0.35	8960
CCAW	3.92e7	1.1e11	0.35	3630
Aluminio	3.77e7	7e10	0.33	2700

Tabla 1 Materiales Bobina

Existe la opción Custom, en el que el usuario tiene acceso directo a las propiedades del material.

2 – Selecciona la forma del hilo de la bobina (redondo o rectangular) e introduce sus dimensiones, en función de la forma seleccionada, así como el número de vueltas.

3 – Emplea el desplegable para elegir el material empleado en el imán principal. Los imanes a elegir son los siguientes:

	Material	Densidad de Flujo Remanente (T)	Recoil Permeability
Y30	Ferrita	0.40	1.1
Y35	Ferrita	0.45	1.1
N35	Neodimio	1.22	1.05
N38	Neodimio	1.25	1.05
N40	Neodimio	1.28	1.05
N42	Neodimio	1.32	1.05
N45	Neodimio	1.37	1.05
N48	Neodimio	1.42	1.05
N50	Neodimio	1.44	1.05
N52	Neodimio	1.47	1.05

Tabla 2 Materiales Imán

Existe la opción Custom, en el que el usuario tiene acceso directo a las propiedades del imán.

Deberá de hacerse uso del desplegable para elegir la posición del imán y así la dirección de la densidad de flujo remanente de este.

4 – En caso de haber activado en “Selections” la opción del segundo imán, se podrá configurar este de igual manera que el principal.

5 – Emplea las casillas de inputs para establecer el número de modos estructurales a calcular, el voltaje de entrada y el rango de frecuencias del estudio.

6 – Emplea el desplegable para cambiar la resolución frecuencial del estudio, siguiendo el modelo de frecuencias ISO.

2.4 - Materials:

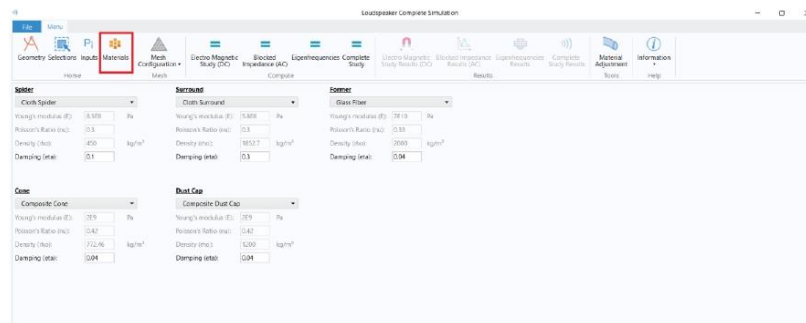


Figura 9 Materiales

En esta pantalla se deben de elegir los materiales empleados en cada uno de los componentes estructurales del altavoz a simular. El listado de materiales incluidos es el siguiente:

	Módulo de Young (Pa)	Coefficiente de Poisson	Densidad (kg/m³)	Damping
Aluminium (honeycomb)	1.5e10	0.33	550	0.02
Aluminium (sheet)	7.5e10	0.33	2700	0.01
Beryllium	2.5e11	0.33	1800	0.01
Bextrene (p.v.a Doped)	1.9e9	0.33	1300	0.09
Carbon Fiber Composite	1e10	0.33	260	0.01
Carbon Fiber TXT (“Quasi - Isotropic”)	9e10	0.31	1560	0.05
Cloth Spider	8.5e8	0.3	450	0.1
Cloth Surround	5.8e8	0.3	1852.7	0.3
Composite Cone	2e9	0.42	772.46	0.04
Composite Dust Cap	2e9	0.42	1200	0.04
Copper	1.1e11	0.35	8960	0.05
EPOXY	5e8	0.3	1.1e9	0.01
Foam	5e6	0.4	67	0.1
Glass Fiber	7e10	0.33	2000	0.04
Graphite Polymer	7e10	0.33	1800	0.1
Kapton	6.9e10	0.34	1420	0.1
Paper (Coated)	6e9	0.33	683	0.01
Paper/phenolic	1e9	0.33	350	0.06
Paper/pulp (typical)	5e8	0.33	150	0.09
Polyamide film	3e9	0.33	1400	0.02
PP copolymer	2e9	0.33	910	0.09
PP homopolymer	1.1e9	0.33	1000	0.09
Resin glass fiber (honeycomb)	1.16e11	0.33	430	0.06
Rubber	2.76e6	0.48	1124.4	0.02
Silk	6e9	0.48	1000	0.02
Spider (typical)	1e9	0.33	450	0.8
Titanium	1.16e11	0.33	4500	0.01

Tabla 3 Materiales Componentes

Existe la opción Custom, en el que el usuario tiene acceso directo a las propiedades del material empleado en cada componente del altavoz.

2.5 - Mesh Configuration:

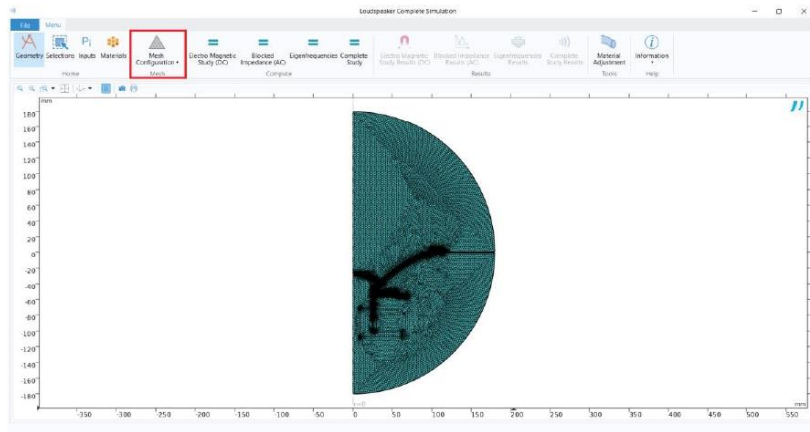


Figura 10 Malla

Haciendo uso del desplegable se puede elegir entre los 4 tamaño de malla disponibles:

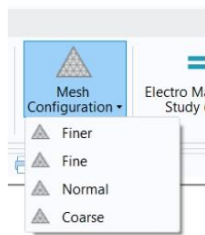


Figura 11 Configuración tamaño malla

Estos tamaños vienen dados por la siguiente expresión:

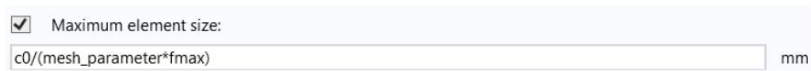


Figura 12 Expresión del tamaño máximo del elemento acústico de la malla

- Finer → mesh_parameter = 8
- Fine → mesh_parameter = 6
- Normal → mesh_parameter = 5
- Coarse → mesh_parameter = 4

2.6 - Compute:



Figura 13 Estudios

Emplea la sección Compute del menú Ribbon para ejecutar los estudios. Al ejecutar uno de ellos, este te enviará a su respectiva pantalla de resultados.

2.7 - Results:

Emplea la sección Results del menú Ribbon para desplazarte por las diferentes pantallas de resultados. Solo se podrá acceder a estos en caso de haber ejecutado los estudios.

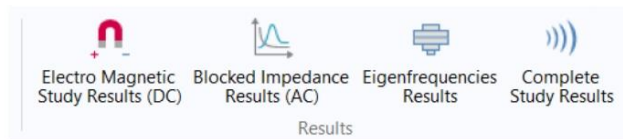


Figura 14 Resultados

Electro-Magnetic Study Results (DC):

Magnetic Flux Density Norm:

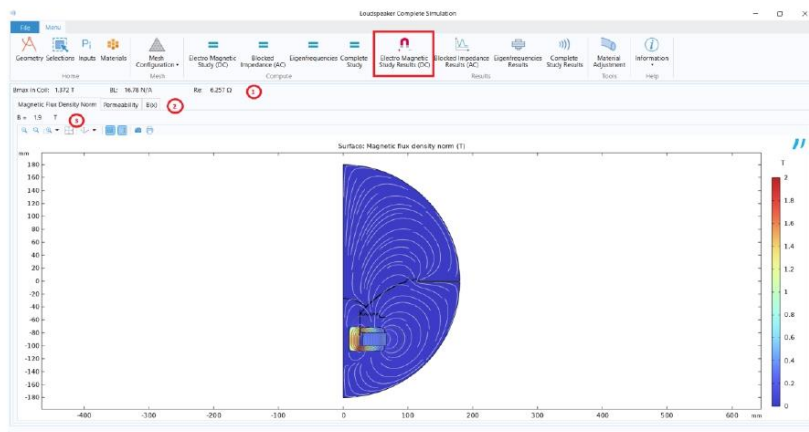


Figura 15 Densidad de flujo magnético

- 1 – Aquí se visualizan resultados globales del estudio electro magnético DC, tales como Bmax en la bobina, BL y Re.
- 2 – Emplea el menú de pestañas para poder conmutar entre los diferentes resultados obtenidos: Densidad de flujo magnético, Permeabilidad y B(x).
- 3 – Muestra el valor de la densidad de flujo magnético en el punto que hagas click dentro del gráfico.

Permeability:

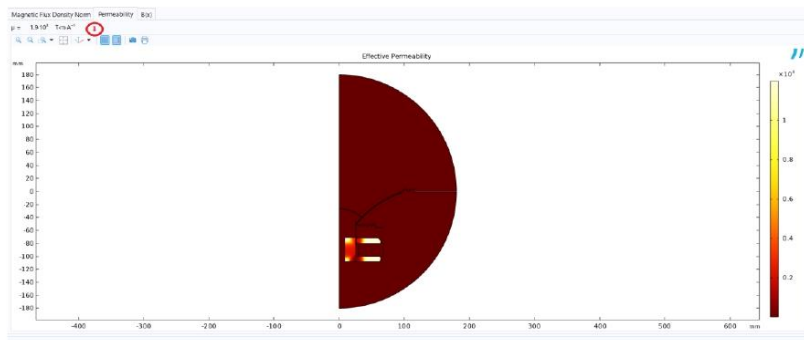


Figura 16 Permeabilidad

- 1 – Muestra el valor de la permeabilidad en el punto que hagas click dentro del gráfico.

B(x):

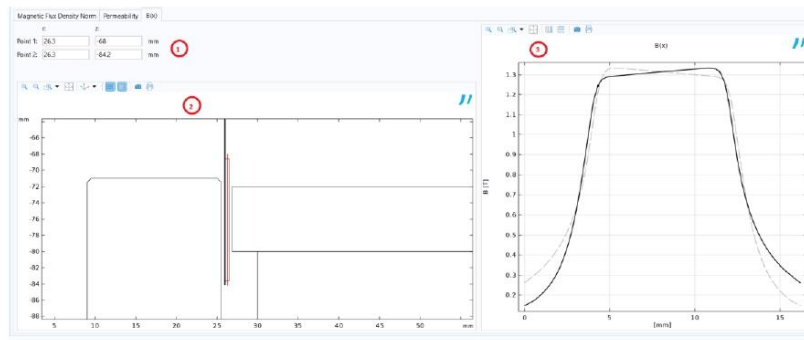


Figura 17 B(x)

- 1 – Se deben introducir las coordenadas de los dos puntos de la recta donde se evalúa el valor de la densidad de flujo remanente.
- 2 – Muestra en qué lugar de la geometría se esta evaluando.
- 3 - Muestra el valor de $B(x)$ a lo largo de la recta representada anteriormente.

Blocked Impedance Results (AC):

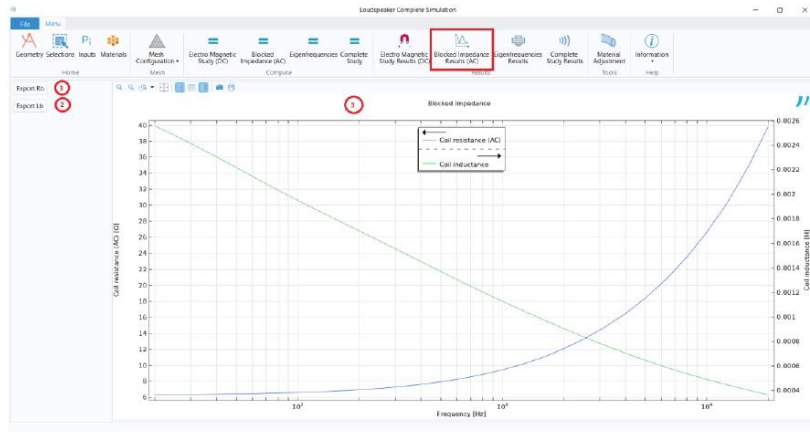


Figura 18 Blocekd Impedance

- 1 – Pulsando el botón “Export Rb” se exportará la curva Rb en un fichero TXT.
- 2 – Pulsando el botón “Export Lb” se exportará la curva Lb en un fichero TXT.
- 3 – En el gráfico se visualizan las curvas a exportar.

Eigenfrequencies Results:

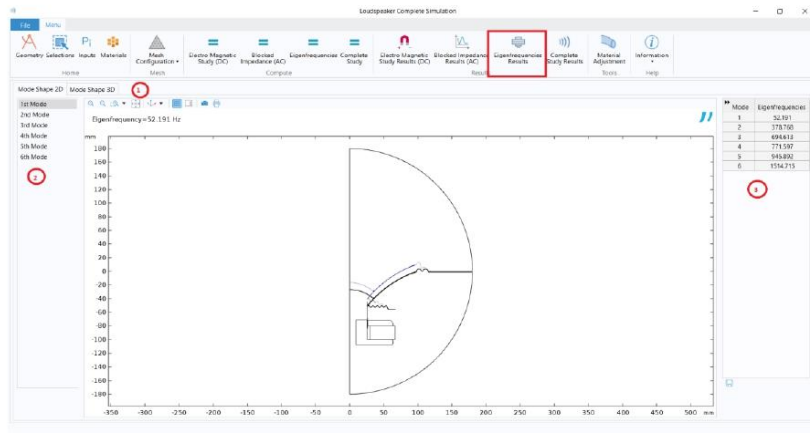


Figura 19 Eigenfrecuencias

- 1 – Conmuta entre las pestañas para visualizar los modos tanto en 2D como en 3D.
- 2 – Elige el modo que deseas visualizar en el gráfico.
- 3 – Listado de las frecuencias a la que suceden los modos, pueden ser exportadas con el botón de guardar.

Complete Study Results:

Frequency Response:

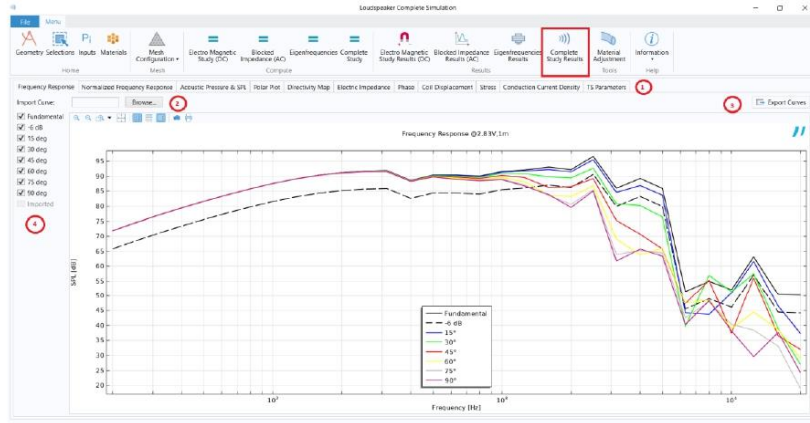


Figura 20 Respuesta en frecuencia

- 1 – Conmuta entre las pestañas para visualizar diferentes resultados del estudio.

- 2 – Importa una curva de un fichero TXT para comparar resultados.
- 3 – Exporta las curvas seleccionadas y se guardan consecutivamente en diferentes documentos TXT.
- 4 – Selecciona las curvas que deseas visualizar en el gráfico.

Normalized Frequency Response:

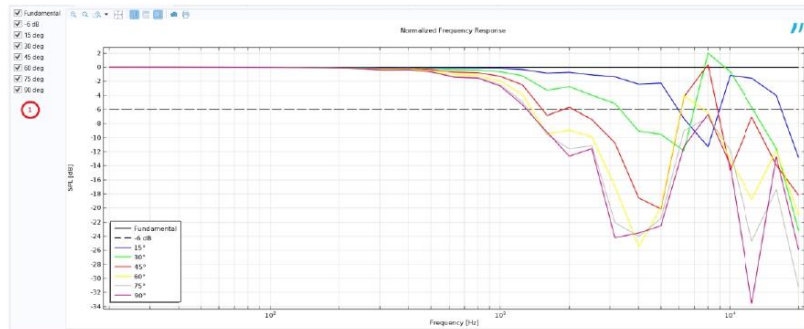


Figura 21 Respuesta en frecuencia normalizada

- 1 – Selecciona las curvas que deseas visualizar en el gráfico.

Acoustic Pressure & SPL:

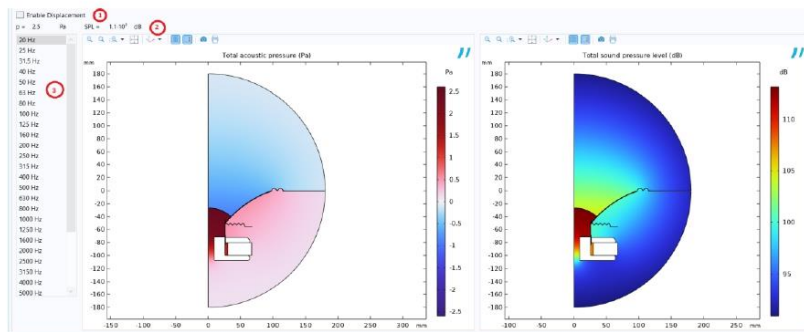


Figura 22 Presión acústica y SPL

- 1 – Habilita visualizar el desplazamiento con deformación (escalada).
- 2 – Muestra el valor de la presión acústica y SPL en el punto que hagas click dentro del gráfico.
- 3 – Selecciona la frecuencia que deseas visualizar en el gráfico.

Polar plot:

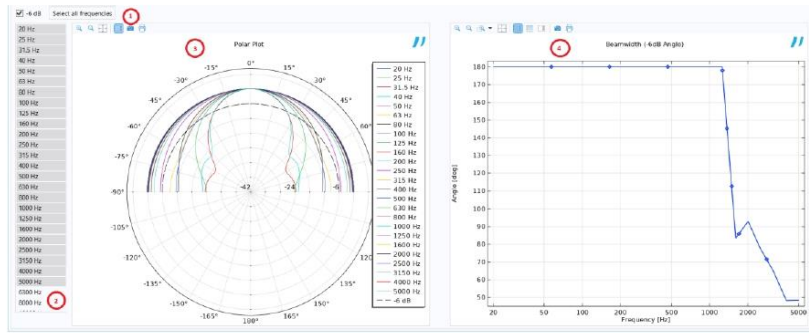


Figura 23 Polar Plot y Beamwidth

- 1 – Habilita la curva de -6 dB. Pulsa el botón “Select all frecuencias” para seleccionar todas las frecuencias al momento.
- 2 – Selecciona la o las frecuencias, haciendo uso de la tecla CTRL, que deseas visualizar en el gráfico.
- 3 – Gráfico polar.
- 4 – Gráfico Beamwidth (ángulo a -6dB).

Directivity map:

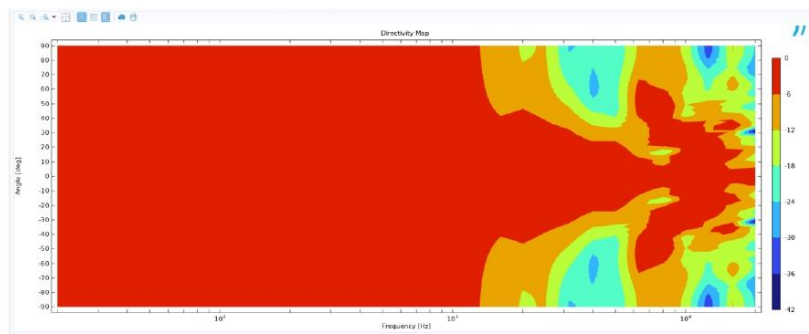


Figura 24 Mapa de directividad

Electric Impedance:

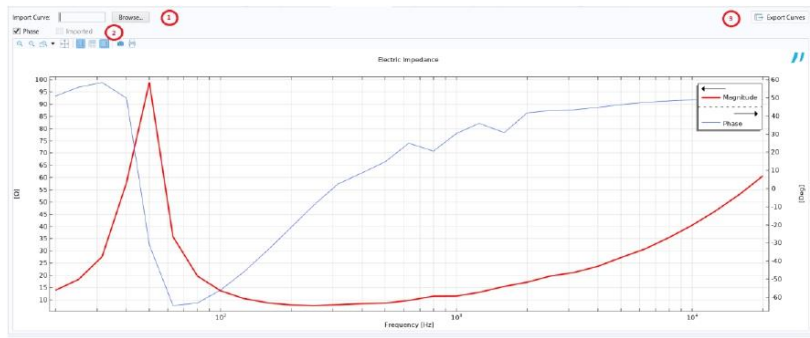


Figura 25 Impedancia eléctrica

- 1 – Importa una curva de un fichero TXT para comparar resultados.
- 2 – Habilita para ver la fase de la impedancia eléctrica y la curva importada.
- 3 – Exporta la curva en un documento TXT.

Acoustic Phase:

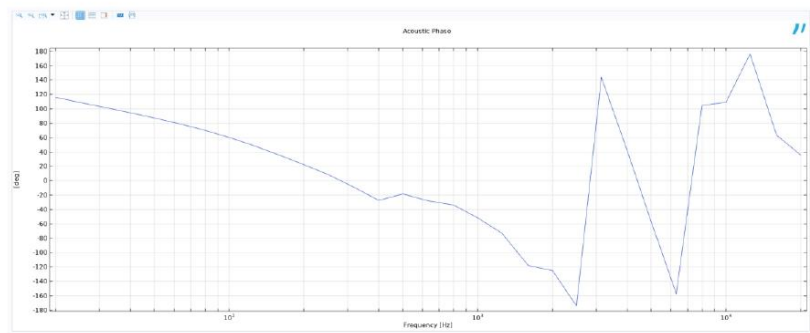


Figura 26 Fase Acústica

Coil Displacement:

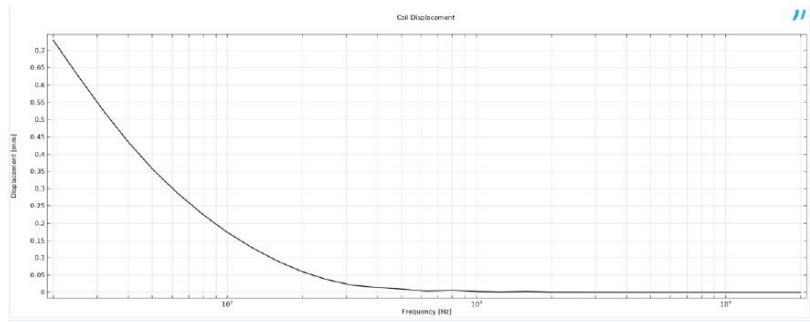


Figura 27 Desplazamiento de la bobina

Stress:

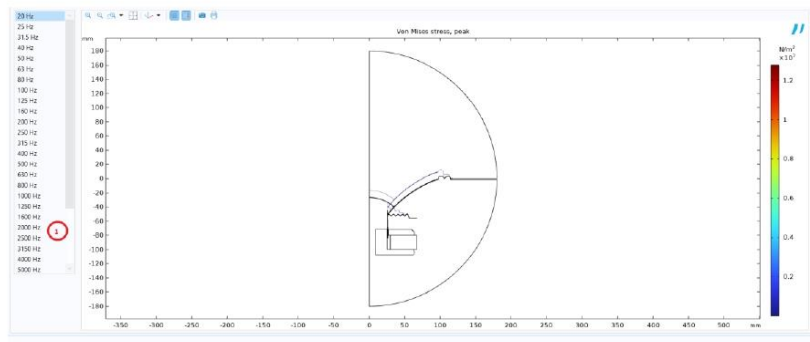


Figura 28 Stress

1 – Selecciona la frecuencia que deseas visualizar en el gráfico.

Conduction Current Density:

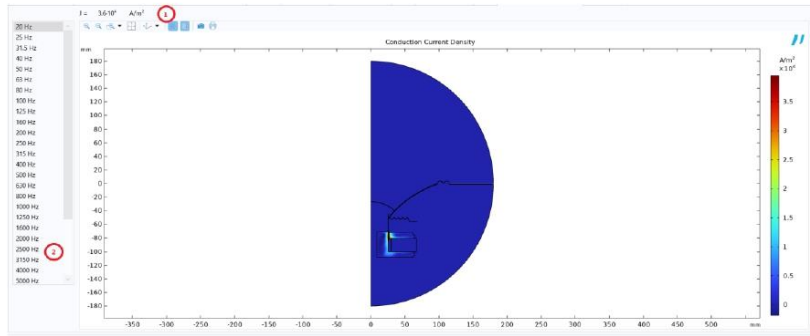


Figura 29 Densidad de corriente inducida

- 1 – Muestra el valor de la densidad de corriente en el punto que hagas click dentro del gráfico.
- 2 – Selecciona la frecuencia que deseas visualizar en el gráfico.

TS Parameters:

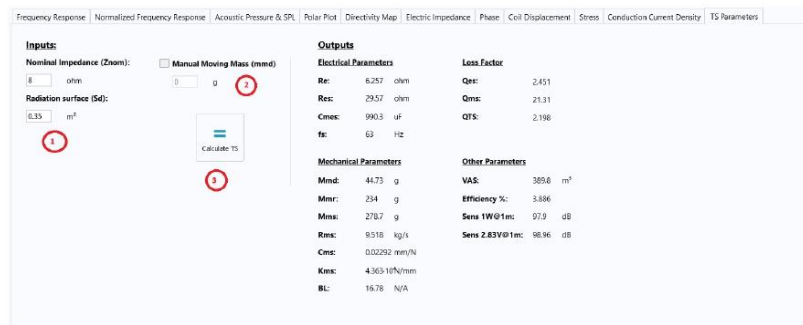


Figura 30 Parámetros TS

- 1 – Introduce los valores necesarios de Z_{nom} y S_d para calcular el resto de parámetros TS.
- 2 – Por defecto M_{md} se calcula de manera automática sumando el peso de los dominios estructurales, pero puede ser introducida de manera manual para un mejor ajuste.
- 3 – Presiona el botón “Calculate TS” para calcular el valor de los parámetros TS.

2.8 - Materials Adjustment:

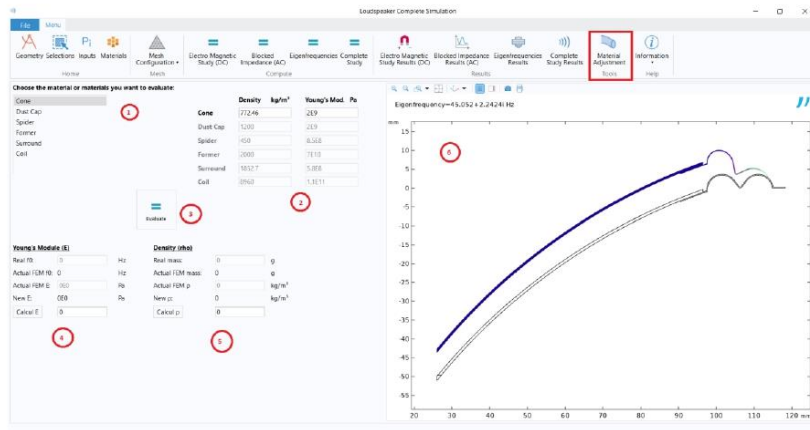


Figura 31 Ajuste de materiales

- 1 – Selecciona el o los componentes que deseas estudiar.
- 2 – Muestra la densidad y el módulo de Young del o de los materiales seleccionados.
- 3 – Pulsa el botón “Evaluate” para realizar el estudio y evaluar los valores de las propiedades de los materiales.
- 4 – Introduce los valores y calcula el nuevo módulo de Young pulsando el botón “Calcul E”.
- 5 – Introduce los valores y calcula la nueva densidad pulsando el botón “Calcul rho”.
- 6 – Visualiza el primer modo estructural del o de los componentes seleccionados.

3 - Blocked Impedance Mode:

A continuación, se procede a explicar el uso de la aplicación en modo “Blocked Impedance Mode”:

3.1 - Geometry:

Ver punto 2.1 ya que es igual que en el “Complete Mode”.

3.2 – Selections:

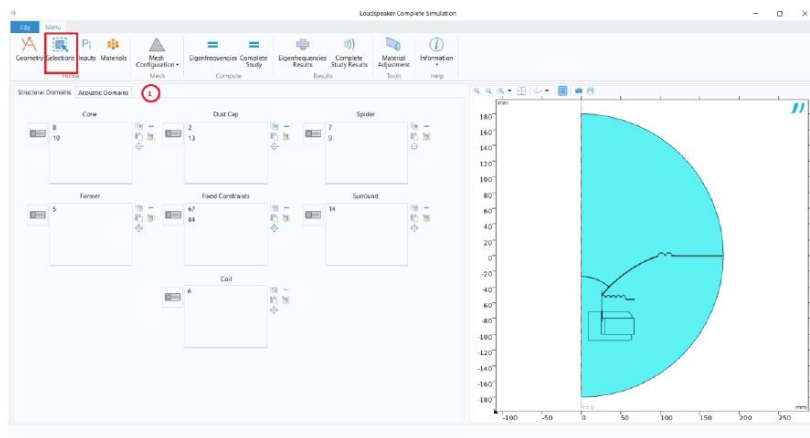


Figura 32 Selecciones Blocked Impedance Mode

1 - El funcionamiento es el mismo que en el “Complete Mode”, la diferencia es que en este modo solo se diferencian entre los dominios estructurales y acústicos.

3.3 – Inputs:

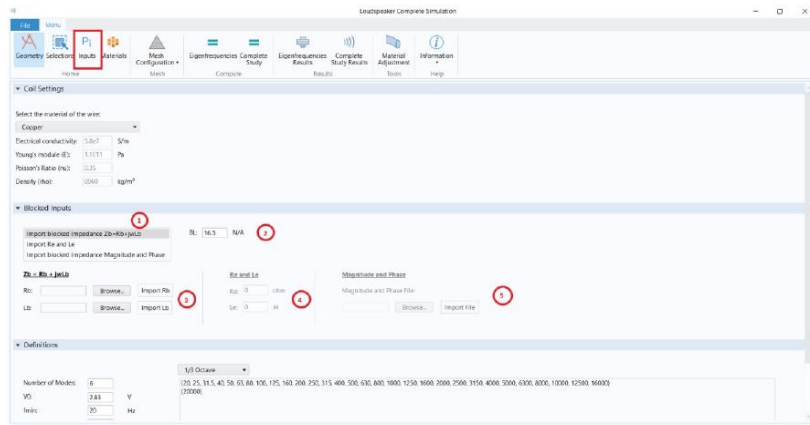


Figura 33 Inputs Blocked Impedance Mode

- 1 – Selecciona el método a emplear para importar Z_b .
- 2 – Introduce el valor BL como input.
- 3 – Importa las curvas R_b y L_b , cada una en un fichero TXT.
- 4 – Importa los valores constantes de R_e y L_e .
- 5 – Importa el fichero TXT con tres columnas: frecuencia, magnitud y fase.

3.4 - Materials:

Ver punto 2.4 ya que es igual que en el “Complete Mode”.

3.5 – Mesh configuration:

Ver punto 2.5 ya que es igual que en el “Complete Mode”.

3.6 - Compute:

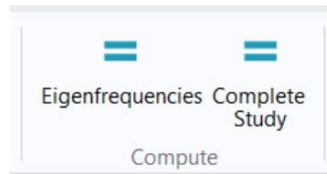


Figura 34 Estudio Blocked Impedance Mode

Emplea la sección Compute del menú Ribbon para ejecutar los estudios. Al ejecutar uno de ellos, este te enviará a su respectiva pantalla de resultados.

3.7 - Results:

Emplea la sección Results del menú Ribbon para desplazarte por las diferentes pantallas de resultados. Solo se podrá acceder a estos en caso de haber ejecutado los estudios.



Figura 35 Resultados Blocked Impedance Mode

Eigenfrequencies Results:

Ver punto 2.7 ya que es igual que en el “Complete Mode”.

Complete Study Results:

Los resultados obtenidos en este estudio son todos iguales que en el “Complete Mode” salvo dos de ellos:

TS parameters:

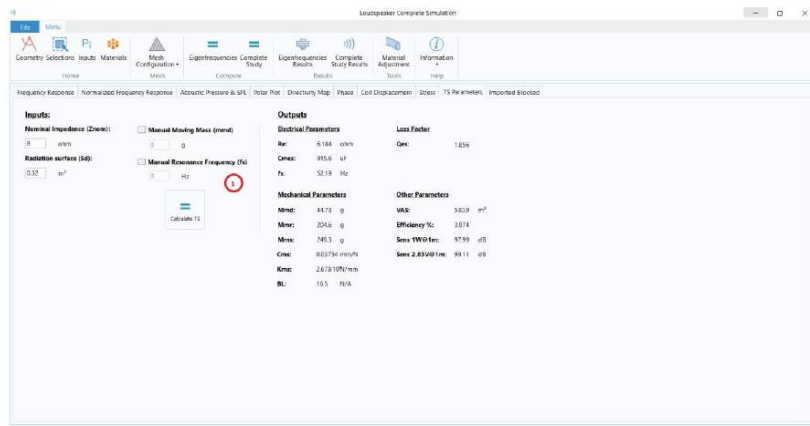


Figura 36 Parámetros TS Blocked Impedance Mode

1 – Es posible introducir la fs como parámetro de entrada. En caso de haber simulado, por defecto toma el primer valor del estudio estructural Eigenfrequency.

El resto de parámetros de entrada coinciden con los empleados en el modo de simulación “Complete Mode”.

Imported Blocked:

En esta pestaña se pueden visualizar las curvas, empleadas como input, para este modo de simulación.

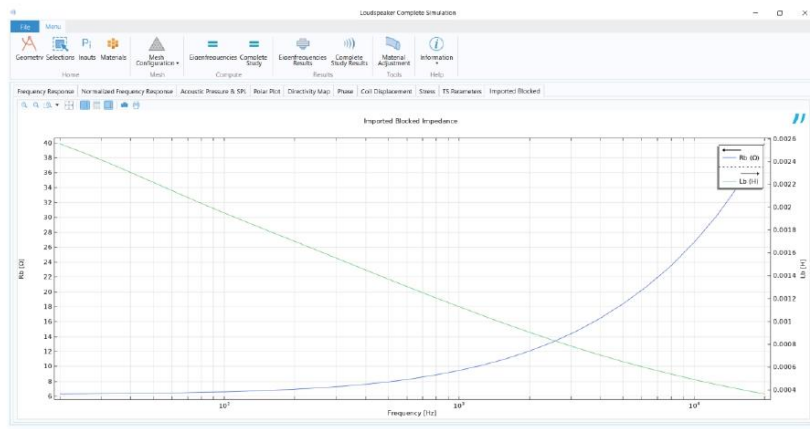


Figura 37 Curva de impedancia bloqueada empleada

Para el resto de resultados, ver punto 2.7.

3.8 - Materials Adjustment:

Ver punto 2.8 ya que es igual que en el "Complete Mode".

Anexo 2

Hoja técnica

10WR300

beyma PROFESSIONAL LOUSPEAKERS
www.beyma.com**10WR300**

LOW FREQUENCY TRANSDUCER

WR Series

KEY FEATURES

- High power handling: 600 W program power
- 2" copper wire voice coil
- High sensitivity: 95 dB (1W / 1m)
- FEA optimized ceramic magnetic circuit
- Weatherproof cone treatment for both sides of the cone
- Extended controlled displacement: $X_{\max} \pm 6$ mm
- 30 mm peak-to-peak excursion before damage
- Low harmonic distortion and linear response
- Wide range of applications of low and mid-low frequencies

**TECHNICAL SPECIFICATIONS**

Nominal diameter	250 mm	10 in
Rated impedance		8 Ω
Minimum impedance		6,5 Ω
Power capacity ¹		300 W _{AES}
Program power ²		600 W
Sensitivity	95 dB	1W / 1m @ Z _N
Frequency range		55 - 5.000 Hz
Recom. enclosure vol.	15 / 50 l	0,53 / 1,77 ft ³
Voice coil diameter	50,8 mm	2 in
Bl factor		14,2 N/A
Moving mass		0,039 kg
Voice coil length		15 mm
Air gap height		8 mm
X _{damage} (peak to peak)		30 mm

Notes:

¹ The power capacity is determined according to AES2-1984 (2003) standard.² Program power is defined as power capacity + 3 dB.³ T-S parameters are measured after an exercise period using a preconditioning power test. The measurements are carried out with a velocity-current laser transducer and will reflect the long term parameters (once the loudspeaker has been working for a short period of time).⁴ The X_{\max} is calculated as $(L_{vc} \cdot H_{ag})/2 + (H_{ag}/3,5)$, where L_{vc} is the voice coil length and H_{ag} is the air gap height.**THIELE-SMALL PARAMETERS³**

Resonant frequency, f_s	52 Hz
D.C. Voice coil resistance, R_e	6,1 Ω
Mechanical Quality Factor, Q_{ms}	3,9
Electrical Quality Factor, Q_{es}	0,39
Total Quality Factor, Q_{ts}	0,35
Equivalent Air Volume to C_{ms} , V_{as}	42 l
Mechanical Compliance, C_{ms}	240 $\mu\text{m} / \text{N}$
Mechanical Resistance, R_{ms}	3,3 kg / s
Efficiency, η_0	1,5 %
Effective Surface Area, S_d	0,035 m ²
Maximum Displacement, X_{\max} ⁴	6 mm
Displacement Volume, V_d	210 cm ³
Voice Coil Inductance, L_e	1 mH

Acústica Beyma SL - P.I. Moncada II, C/ Pont Sec, 1C - 46113 Moncada, Valencia (Spain) - Tel. +34 96 130 13 75 - beyma@beyma.com

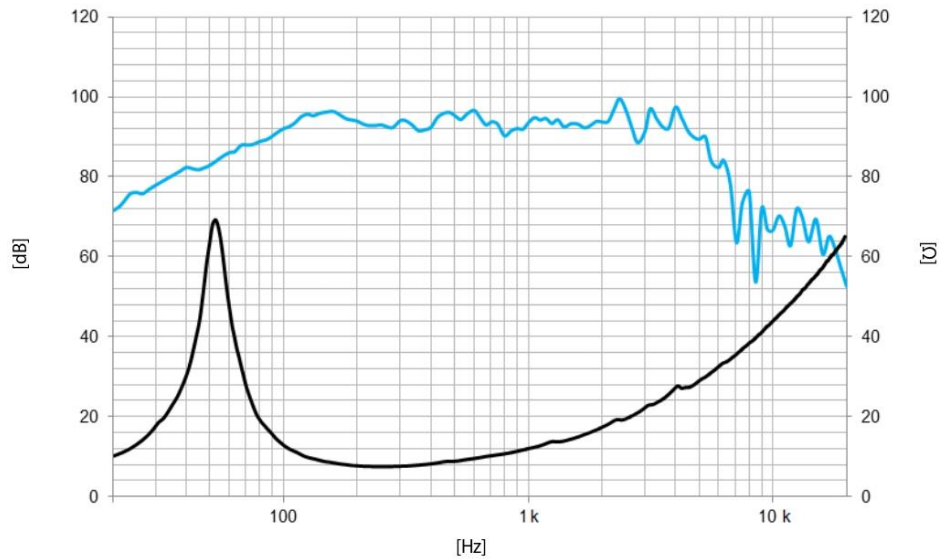
beyma 

PROFESSIONAL LOUSPEAKERS
www.beyma.com

10WR300

LOW FREQUENCY TRANSDUCER

WR Series

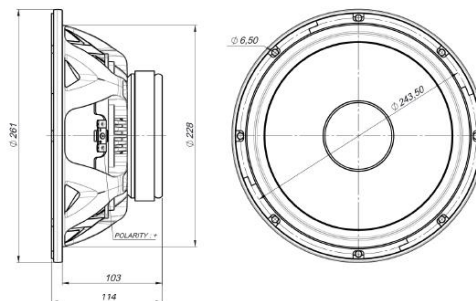


Note: On axis frequency response measured with loudspeaker standing on infinite baffle in anechoic chamber, 1W @ 1m

MOUNTING INFORMATION

Overall diameter	261 mm	10,3 in
Bolt circle diameter	243,5 mm	9,6 in
Baffle cutout diameter:		
- Front mount	228 mm	9,0 in
Depth	114 mm	4,5 in
Net weight	3,5 kg	7,7 lb
Shipping weight	3,9 kg	8,6 lb

DIMENSION DRAWING



Acústica Beyma SL - P.I. Moncada II, C/ Pont Sec, 1C - 46113 Moncada, Valencia (Spain) - Tel. +34 96 130 13 75 - beyma@beyma.com

10/20