



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



Máster Universitario
en Simulación Numérica
en Ciencia e Ingeniería
con COMSOL Multiphysics

TRABAJO FIN DE MÁSTER

SIMULACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE UN ALTAVOZ ELECTRODINÁMICO DISEÑADO PARA DISPOSITIVOS INTELIGENTES

MÁSTER UNIVERSITARIO en

SIMULACIÓN NUMÉRICA EN CIENCIA E INGENIERÍA

CON COMSOL MULTIPHYSICS

Autor: Lorenzo Aschieri

Tutor: Carlos David González Gómez

30 de JULIO de 2020

1. Descripción General

Un altavoz electrodinámico es un dispositivo capaz de transformar una señal eléctrica en una señal acústica pasando por dos tipos distintos de transformaciones:

- transformación electro-mecánica a través de una bobina sumergida en un campo magnético generado por un circuito magnético estático compuesto de uno o más imanes permanentes y placas de hierros dulce (piezas polares);

- transformación mecano-acústica a través de una membrana y suspensiones

El objetivo principal de este trabajo es de simular el conjunto de las transformaciones electro-mecano-acústica de un altavoz de 2 pulgadas. Típicamente estos tipos de transductores se suelen emplear en los diferentes dispositivos inteligentes disponibles en el mercado debido a las prestaciones típicas requeridas para entornos residenciales de pequeña-mediana dimensión. El mejor compromiso entre coste y prestaciones puede asegurar el éxito de estos componentes.

Como punto de partida se considerará el análisis del altavoz empezando por la simulación del complejo magnético y optimizando la medidas geométricas de su piezas principales para llegar a una curva optima del “*factor de fuerza*” al variar del desplazamiento: $Bl(x)$. En un segundo momento se considerará el estudio de la curva de *rigidez* $kms(x)$ del componente spider al variar del desplazamiento y de la fuerza aplicada. Por último se simulará la curva de respuesta en frecuencia estimada resultante que nos proporcionará mas informaciones sobre las prestaciones que se pueden obtener usando el conjunto de todos los componentes elegidos para este modelo.

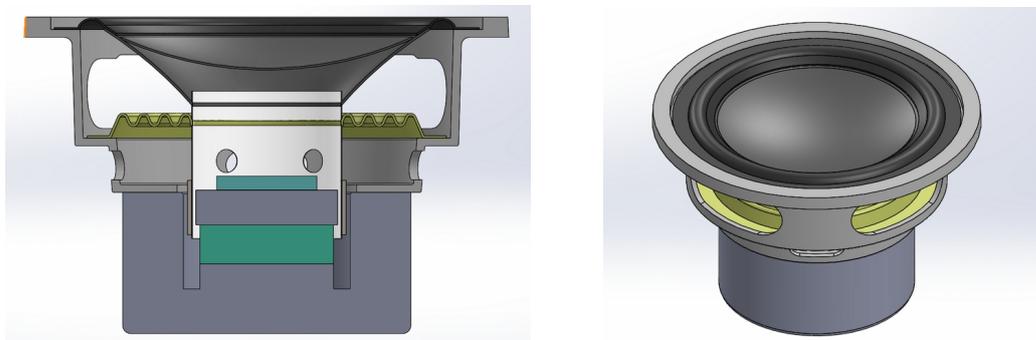


Fig1. Sección transversal y proyección isométrica del altavoz considerado

2. Fundamento Teórico

La sección transversal de un altavoz electrodinámico a bobina móvil (Fig.1) nos permite entender los principales componentes que forman parte de esta fuente de sonido. La membrana rígida (cono), generalmente hecha de papel comprimido tratado, presenta la parte externa conectada elásticamente al chasis de metal y la parte interna se une directamente con la bobina móvil así que es libre de moverse solo en la dirección axial. La corriente que atraviesa la bobina genera una fuerza magneto-motriz que interactúa con el flujo magnético presente en el entre hierro causando el movimiento de la bobina y, por consiguiente, de la membrana misma. El cono moviéndose hacia adelante y hacia atrás genera ondas de presión que producen los sonidos que escuchamos. La membrana, la bobina móvil y las suspensiones (spider y surround) forman un sistema masa-resorte amortiguado que tiene su propia frecuencia de

resonancia. Típicamente el cono de un altavoz es lo suficiente rígido para comportarse como un pistón a bajas frecuencias. Para altas frecuencias, las vibraciones del cono generan sonidos que interactúan directamente con la estructura externa que suele contener los altavoces mismos. Estas vibraciones y las resonancias del cono generan irregularidades en la respuesta en frecuencia[1]. La colocación de un altavoz en un baffle o en un recinto (cerrado o en configuración bass-reflex) permite evitar el “cortocircuito” acústico entre la parte frontal y trasera del altavoz mejorando así la respuesta en frecuencia de los graves. Un altavoz electrodinámico se puede representar por un circuito equivalente completo:

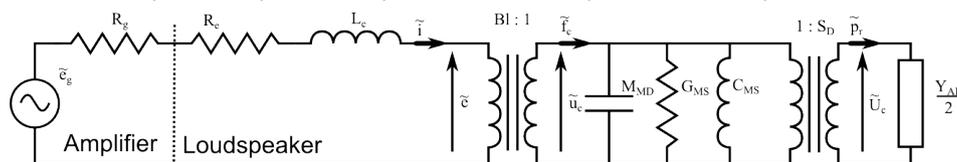


Fig2. Circuito equivalente completo altavoz electro dinámico[2] (modelo inductancia simplificado).

donde se pueden apreciar las dos transformaciones electro-mecánica y mecano-acústica. A continuación el detalle del circuito equivalente correspondiente al sistema masa- resorte amortiguado.

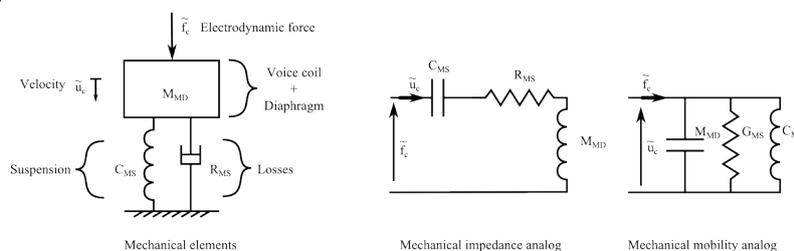


Fig3. Circuito equivalente mecánico – sistema masa resorte amortiguado[2]

Las principales no linealidades de un altavoz suelen ocurrir cuando se trabaja con señales de grande amplitud. Son causadas por el propio principio de funcionamiento del transductor y están directamente relacionadas con la geometría y las propiedades de los componentes del motor, la suspensión, la membrana y la estructura [3]. Considerando todas las no-linealidades de un altavoz, las que se investigan en este trabajo son:

- Factor de fuerza $Bl(x) \rightarrow$ La fuerza motriz $F=Bl(x)i$ causa excitación paramétrica y la fuerza contraelectromotriz causa amortiguamiento no-lineal.
- Rigidez del sistema de sujeción $kms(x) \rightarrow$ Fuerza no lineal de re-posicionamiento $F_r = kms(x)*x$

Mediante COMSOL Multiphysics se quiere simular el análisis de estas dos fuentes principales de no-linealidad $Bl(x)$ y $kms(x)$, el comportamiento en frecuencia de la impedancia de la bobina móvil (versión bloqueada y sujeta a fuerza externa), introducción de un anillo de cortocircuito para reducir las corrientes parásitas en el hierro y como se refleja este compo en la respuesta en frecuencia. Análisis sobre las otras no-linealidades están planeadas para futuros proyectos.

3. Geometría

El modelo COMSOL considerado es de tipo 2D axial-simétrico. La geometría ha sido creada previamente en Solidworks, pos-procesada en Draftsight para incluir las condiciones al contorno y reducir los detalles de la geometría e importada como archivo .mphbin.

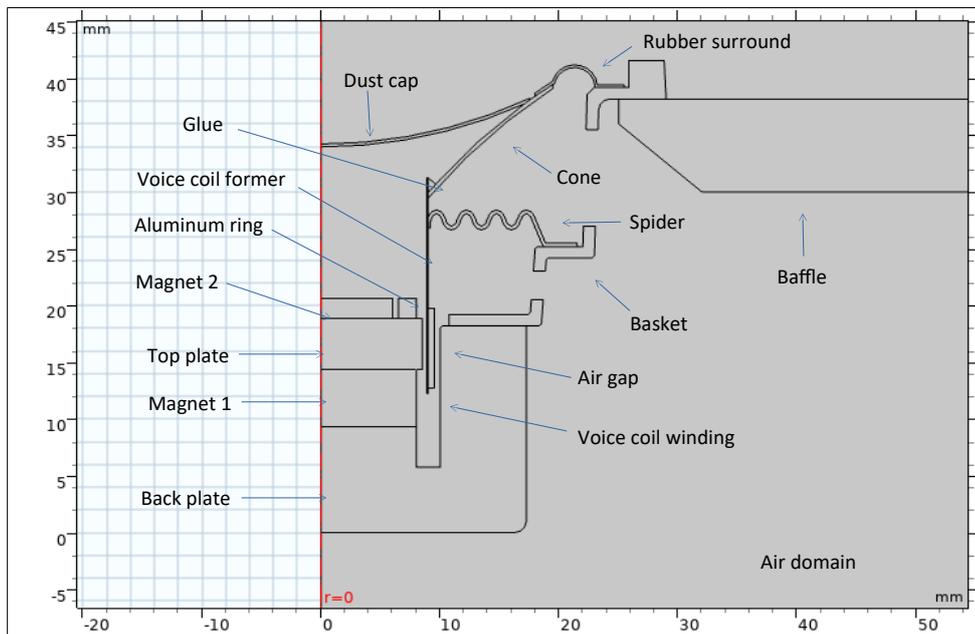


Fig 4 .Detalle geometría importado / modelo 2D axial-simétrico (medidas en mm)

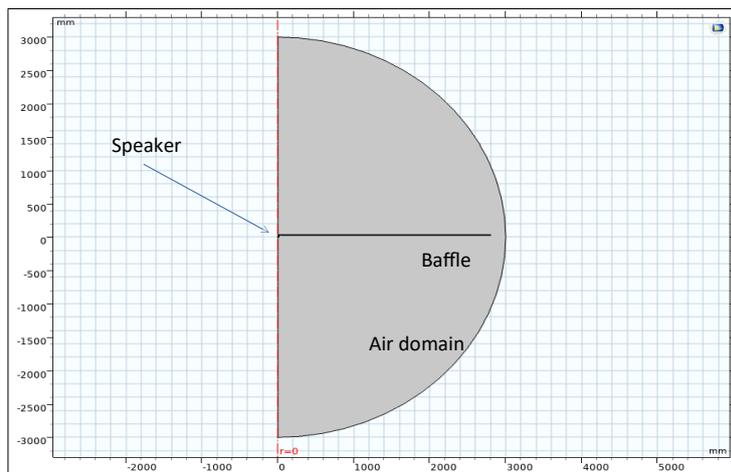


Fig5. Geometría completa / modelo 2D axial-simétrico (medidas en mm)

Hay que destacar que en el modelo no se han podido considerar los dominios PML (*Perfectly matched Layer*) de COMSOL que garantizarían un nivel de absorción ideal en los contornos externos sin la necesidad de hacer un dominio externo muy grande. Una semicircunferencia de radio de 3m de aire representa el dominio de aire necesario para evitar las primeras reflexiones acústicas en el análisis del dominio de la frecuencia.

4. Materiales

Los materiales considerados para el modelo del altavoz son los siguientes: Biblioteca de Comsol: - Air → Dominio de aire / Aluminio → Dominio Canasta y Anillo de cortocircuito / Panel → Madera (Pino) / Placas → Hierro dulce con perdidas / Imanes → NdFeB – grado N38H

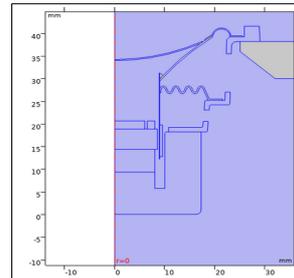
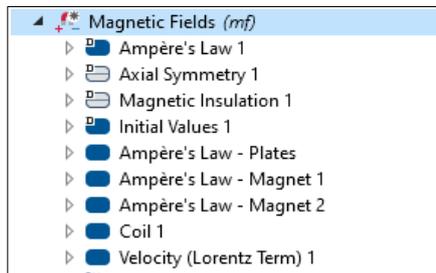
Materiales custom cuyos valores de densidad (kg/m³), Ratio de Poisson, Modulo de Young (Pa), Factor de pérdida estructural isotrópico han sido determinados mediante tablas procedentes de [5]: Suspensión externa: Natural Rubber (NR) / Araña: Polycotton / Bobina → CCAW 15% - Copper Clad Aluminum Wire / Membrana (cono) y cobre polvo → Papel comprimido tratado / Soporte bobina – Fibra de vidrio / Pegamento: Resina epoxi



5. Ecuaciones e Interfaces Físicas

El modelo incluye las siguientes interfaces físicas: Magnetic Fields, Pressure Acoustic-Frequency domain, Solid Mechanics 2, Solid mechanics – Kms spider.

Magnetic Fields:



Las ecuaciones de Maxwell representan la teoría de referencia como base para los estudios electro-magnéticos [5]:

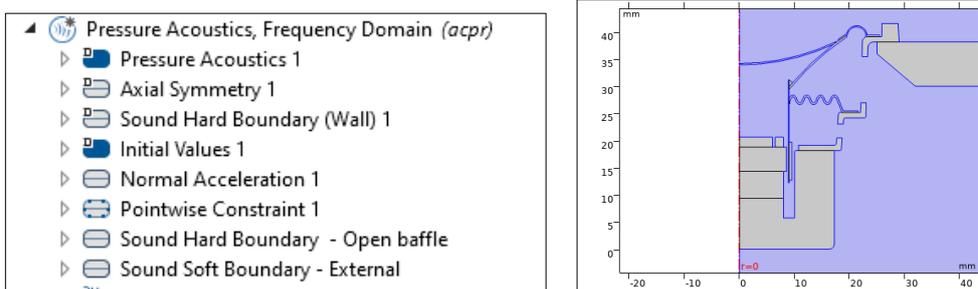
$$\begin{array}{cccc} \nabla \times H = J + \frac{\delta D}{\delta t} & \nabla \times E = -\left(\frac{\delta B}{\delta t}\right) & \nabla \cdot D = \rho & \nabla \cdot B = 0 \\ \text{Maxwell-Ampère's law} & \text{Faraday's law} & \text{Gauss's law – Electric form} & \text{Gauss's law – Magnetic form} \end{array}$$

E – intensidad del campo eléctrico / **D** – Desplazamiento eléctrico / **H** – Intensidad del campo magnético / **B** – Densidad del flujo magnético / **J** – Densidad de corriente / **ρ** – Densidad de carga eléctrica / **μ** - permeabilidad magnética / **ε** – permitividad eléctrica con las relaciones constitutivas: $B = \mu_0 \mu_r H = \mu H$; $D = \epsilon_0 \epsilon_r E = \epsilon E$

En el modelo considerado la interfaz Magnetic Field incluye cuatro diferentes condiciones de dominio de tipo *Ampere's law*: una dedicada para el dominio de aire, una para el dominio de las placas de hierro dulce (relación constitutiva usa la curva B-H del material) y las otras dos *Ampere's Law* definen los dos imanes permanente de NdFeB - grado N38H (relación constitutiva usa el valor de densidad de flujo remanente Br del material) con dirección de flujo opuesta en el eje z para aprovechar del correcto “acoplamiento” entre los dos imanes y obtener un valor de B en el entre hierro lo mas alto posible. El conjunto de estas condiciones me asegura que las ecuaciones del modulo *Magnetic Fields* se reducen a: $\nabla \times H = J$; $B = \nabla \times A$; $J = \sigma E$ en un estudio estacionario / $\nabla \times H = J$; $B = \nabla \times A$; $J = \sigma E + j\omega D$;

$E = -j\omega A$ en un estudio en frecuencia con A vector potencial magnético y σ el valor de conductividad eléctrica. La bobina se modela con una condición de dominio de tipo "Coil" multi-vuelta donde se definen el número de vueltas, la conductividad del hilo considerado, la sección transversal y el tipo de señal de excitación (voltaje). El acoplamiento con la física de "Solid Mechanics 2" se realiza a través de la condición "Velocity (Lorentz term)" [6] que añade el término de velocidad a la densidad de corriente: $J = \sigma(E + v \times B)$ (estudio estacionario); $J = \sigma(E + v \times B) + j\omega D$ (estudio en frecuencia).

- **Pressure Acoustic-Frequency domain**



Estudios de problemas de presión acústica implican resolver estudios de variaciones de presión acústica p respecto a una presión de referencia p_0 . En general, las ecuaciones que gobiernan problemas de flujo de fluidos compresibles sin pérdidas son las ecuaciones de conservación de masa (ecuación de continuidad), la ecuación de conservación del momento (ecuación de Euler) y la ecuación de energía (ecuación de entropía) [7].

$$\frac{\delta \rho}{\delta t} + \nabla(\rho u) = M \quad ; \quad \frac{\delta \rho}{\delta t} + (u \nabla) u = -\left(\frac{1}{\rho}\right) \nabla p + F \quad ; \quad \frac{\delta s}{\delta t} + \nabla(su) = 0$$

Continuity equation Euler's equation Entropy equation

p – Presión total / ρ – Densidad total / u – campo velocidad / s – entropía / M y F – fuentes

Considerando que en todos los procesos termodinámicos reversibles y adiabáticos (procesos isentropicos), la entropía es constante y no hay transferencia de calor y asumiendo que los parámetros de los materiales sean constantes se puede llegar a escribir la ecuación de ondas de presión en un medio sin pérdidas como:

$$\frac{1}{\rho c^2} \frac{\delta^2 p}{\delta t^2} + \nabla \left(-\left(\frac{1}{\rho}\right) (\nabla p - q_d) \right) = Q_m \quad \rho: \text{densidad}$$

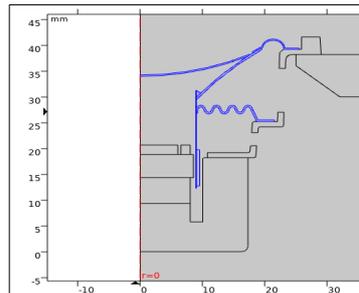
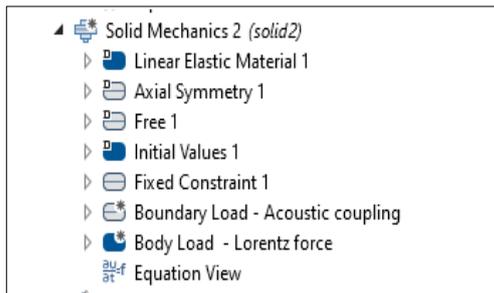
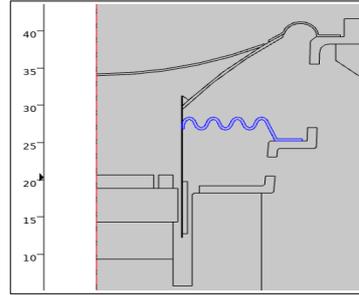
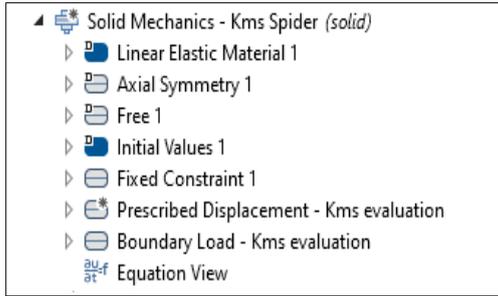
(kg/m³), c : velocidad del sonido (m/s). Cuando ambos términos fuentes q_d (fuente de masa en la ecuación de continuidad: N/m³) y Q_m (fuente de fuerza en la ecuación del momento: 1/s²) son igual a cero y la densidad es constante en el espacio obtengo la ecuación de ondas:

$$\frac{\delta^2 p}{\delta t^2} = c^2 \nabla^2 p \rightarrow \text{Dominio frecuencia: } \nabla \left(-\left(\frac{1}{\rho_c}\right) (\nabla p_t - q_d) \right) - k_{eq}^2 \frac{p_t}{\rho_c} = Q_m \quad , \text{ en el caso}$$

2D axial simétrico: $p_t = p + p_b$; $k_{eq}^2 = \left(\frac{\omega}{c_c}\right)^2 - k_m^2$. Se usa el nodo "Normal acceleration"

aplicado sobre los contornos del cono para enlazar la física de "Pressure acoustic – Frequency domain" con la de "Solid Mechanics 2".[

- Solid mechanics



En la simulación se han considerado dos interfaces distintas de Solid – Mechanics. Una dedicada para el calculo del kms estático del componente spider y la otra para la simulación del modelo completo del altavoz. Las ecuaciones de equilibrio vienen dada por la segunda ley de Newton

que se puede escribir como $\rho \frac{\delta^2 u}{\delta t^2} = \nabla_x \sigma + f_v$ donde σ es el tensor de tensiones de Cauchy,

f_v es una fuerza de cuerpo por unidad de volumen deformado y ρ es la densidad de masa. Según

la notación de COMSOL se puede escribir como: $\rho_0 \frac{\delta^2 u}{\delta t^2} = \nabla_x (FS) + F_v$ donde F es el

gradiente de deformación, S el segundo tensor de tensión Piola-Kirchooff y F_v es una fuerza corporal con componentes en la configuración actual pero dada con respecto al volumen no deformado [8]. Considerando el estado estacionario y el dominio de la frecuencia e incluyendo las no linealidades geométricas la ecuación anterior se puede reescribir como:

$$0 = \nabla_x (FS)^T + F_v; F = I + \nabla u \quad ; \quad -\rho \omega^2 u = \nabla (FS)^T + F_v e^{(j\phi)}; F = I + \nabla u, -ik_z = \lambda$$

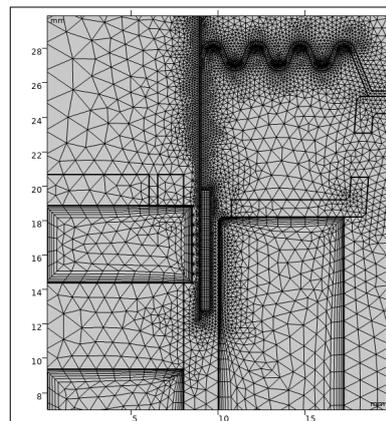
En en la física “Solid Mechanics – Kms spider” para calculo de la rigidez kms del spider se define un “Prescribed Displacement” con vinculo el eje r y con un valor del modulo de Young del material constante. Estas hipótesis se hacen solo para el calculo del kms “ideal” del componente spider debido a que en un altavoz real estas consideraciones se ven afectada por tolerancias de producción en el proceso de ensamblaje. La otra interfaz física “Solid Mechanics 2”, que se usa para modelar las dos trasformaciones electro-mecánica y mecano-acústica del altavoz incluye dos condiciones de carga: “Boundary Load” para el acoplamiento acústico con el modulo de Pressure Acoustic y una “Body Load” para el acoplamiento con la parte magnética a través de la fuerza de Lorentz.

6. Condiciones de Contorno

Una semicircunferencia de 3 metros de radio y un baffle acústico de 2 metros de radio son las principales condiciones al contorno usadas en este modelo. Los bordes del dominio de aire se han incluido tanto en la física de "Magnetic Fields" (nodo "Magnetic Insulation") y de Pressure Acoustics (nodo "Sound Soft Boundary" - en este contorno se garantiza que la presión sea = 0). El baffle acústico hecho de madera, aun que en realidad el material en este caso no es importante debido al tipo de análisis considerada, presenta los contornos definidos como "Sound Hard Boundary (Wall)" o sea como aristas perfectamente reflectantes. El spider y el surround se "fijan" a la canasta a través un nodo de "Pointwise constraints" y "Fixed constraints" para las físicas de "Pressure Acoustics – Frequency domain" y "Solid-mechanics 2" respectivamente. Por último, merece la pena recordar que el acoplamiento entre las distintas interfaces se ha hecho definiendo: un nodo "Velocity(Lorentz term)" en la física "Magnetic Fields" acoplado a la velocidad calculada en la física "Solid Mechanics 2"; un nodo "Normal Acceleration" en la física "Pressure Acoustics – Frequency domain" acoplado a la aceleración calculada en física "Solid Mechanics 2" ; un nodo Boundary Load en la física "Solid Mechanics 2" acoplado a la presión calculada en el nodo "Pressure Acoustic" y un nodo "Body Load" acoplado a la fuerza de Lorentz calculada en el nodo "Magnetic field" [6][9].

7. Malla

La malla ha sido creada usando condiciones de "Boundary Layer" en los dominios de las placas de hierro dulce para obtener una mayor resolución en el cálculo de las eddy currents. En las bobinas se ha usado un "Free Quad" con tamaño max del elemento a 0.1mm mientras que en el spider un "Free Triangular" con tamaño max del elemento igual a 0.3mm y tamaño mínimo 0.05mm. La parte restante de la malla con un "Free Triangular". El análisis estadístico sobre la calidad de la malla muestra un Average element Quality de 0.8567 (quality measure: Skewness).



8. Estudios

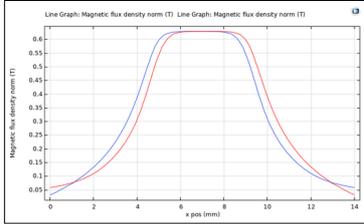
El modelo incluye 9 estudios distintos en total. Los primeros 4 son estudios preliminares de Magnetic field (Stationary) necesarios para encontrar el mejor compromiso entre las dimensiones geométricas de las piezas polares y de los imanes y el flujo B en el entre hierro.

- ▶ Study 1 - Magnetic test 1 - Discarted
- ▶ Study 2 - Magnetic test 2 - Discarted
- ▶ Study 3 - Mangetic test 3 - Discarted
- ▶ Study 4 - Magnetic test 4 - Discarted
- ▶ Study 5 - Magnetic Field Stationary - No Alu ring - Blocked_Coil
- ▶ Study 6 - Static BL - Magnetic Field - Si Alu ring - Blocked coil
- ▶ Study 7 - Static Kms - OK - External force
- ▶ Study 8 - Acoustics - No Alu ring
- ▶ Study 12 - Acoustics - Si Alu ring

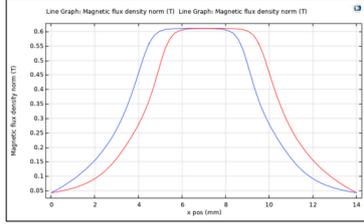
Los estudios 5 y 6 añaden estudios en frecuencia para poder simular la curva de impedancia de la bobina bloqueada en el entre hierro con y sin un anillo de cortocircuito incluido en el modelo. El estudio 7 es dedicado para el cálculo de la curva del kms del spider. Los estudio 8 y 12 son estudios completos del altavoz para comparar las variaciones en la respuesta en frecuencia cuando se usa el anillo de de-modulación.

9. Resultados Obtenidos

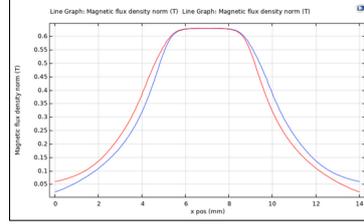
Resultados comparativos circuito magnético - curva B(x) (roja) y B(x)(azul) – Estudios 1 - 2- 3 – 4



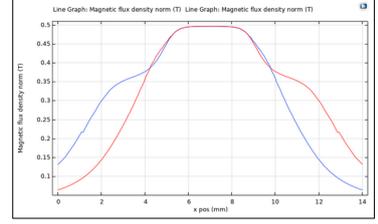
Geometría 1



Geometría 2

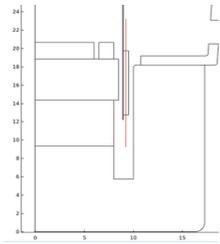


Geometría 3

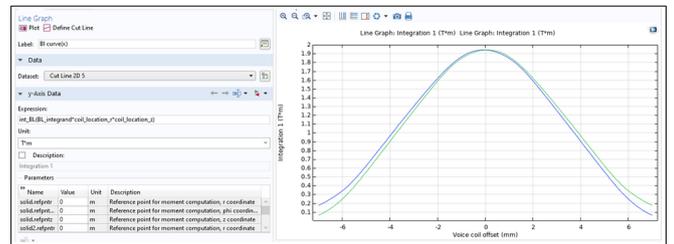
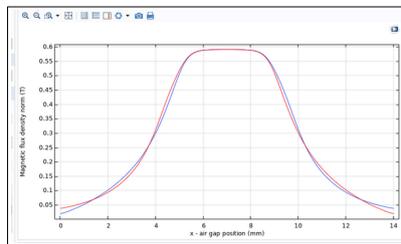


Geometría 4

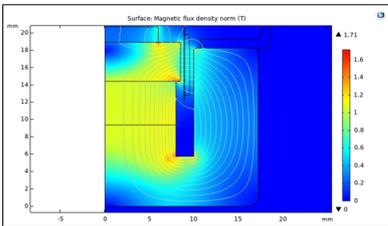
Resultados comparativos circuito magnético - con/sin anillo de cortocircuito – Estudios 5 – 6 – 12 [6][10]



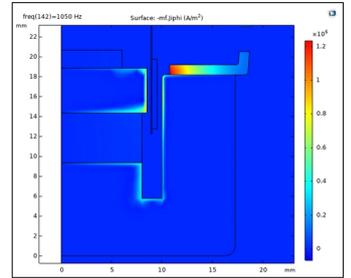
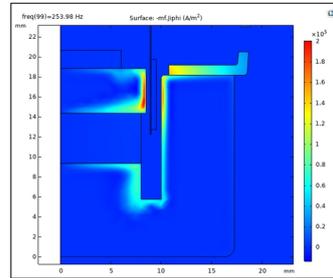
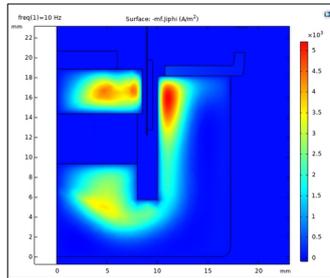
Geometría óptima



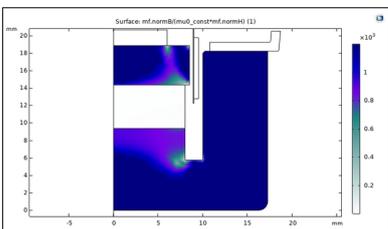
Calculo $B^*l(x)$



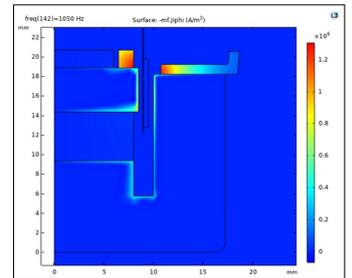
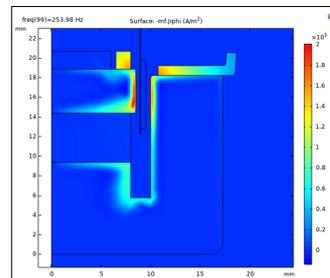
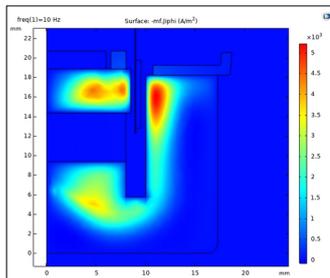
Densidad de flujo magnético B(T)



Eddy currents $f = 10\text{Hz}; 253\text{ Hz}; 1000\text{ Hz}$ (No Alu ring)

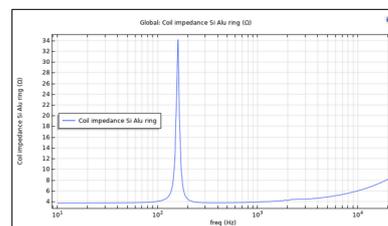
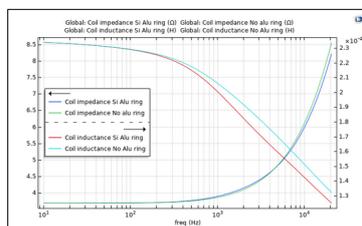


Permeabilidad magnética



Eddy currents $f = 10\text{Hz}; 253\text{ Hz}; 1000\text{ Hz}$ (Si Alu ring)

Comparación curva impedancia / inductancia con y sin anillo de cortocircuito con bobina bloqueada en el entre hierro. (modelo simplificado de la inductancia de la bobina)

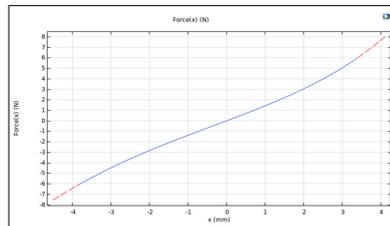


Curva de impedancia altavoz. Frecuencia de resonancia: $f = 160\text{Hz}$ – baffle

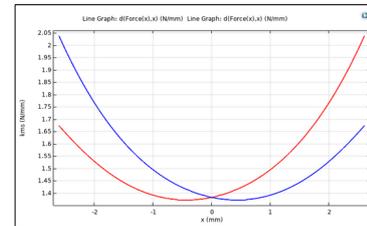
Resultado estudio 7: stiffness – kms spider



Configuración COMSOL

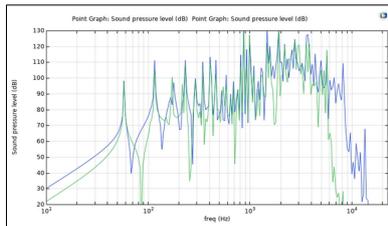


Curva Fuerza (N) vs desplaz.(mm)

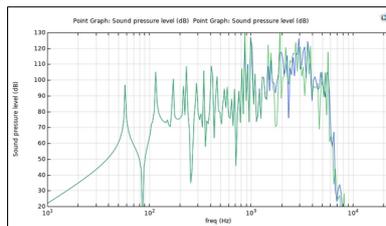


Stiffness kms (N/mm) kms(x) red; kms(-x) blue

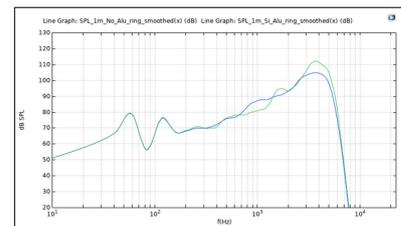
Resultado comparativo análisis en frecuencia estudio 8 -12:



SPL @50cm(blue); @1m(green) free air



SPL @1m No ring(blue); Si ring (green)



SPL @1m No ring(blue); Si ring (green) - Matlab

10. Conclusiones

El modelo de Comsol ha permitido simular las principales propiedades de un altavoz electro-dinámico. El circuito magnético ha sido caracterizado y los resultados obtenidos resultan conforme a los de un altavoz típico de 2 pulgadas (de tipo mid-bass) para aplicaciones multimedia. La introducción de un anillo de cortocircuito permite bajar los valores de inductancia y de impedancia de la bobina en la zona de las altas frecuencias y este aspecto se refleja también en las simulaciones. Importante destacar que este modelo de Comsol no tiene en cuenta el modelo completo que se suele usar para modelar la inductancia de la bobina [11] y los resultados obtenido no reflejan completamente los valores reales que se podrían obtener. Trabajos futuros se enfocarán sobre la modelización completa de la rigidez del conjunto spider-surround, en el desarrollo del estudio térmico y en el comportamiento del altavoz en un recinto cerrado/bass reflex.

11. Referencias

- [1] Leo Beranek, "Acoustics" – Electro-mechano-acoustical circuits - Chap.3 part VIII pag. 70 – Acoustical Society of America (1993)
- [2] LoudspeakerEquivalentCircuit image By CaptainKwah - Own work, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=36907747>;
- MechanicalSubsystemModelingLoudspeaker image by By CaptainKwah - Own work, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=36369414>
- [3] Wolfgang Klippel, "Loudspeaker Nonlinearities – Causes, Parameters, Symptoms", Klippel GmbH
- [4] <https://www.engineeringtoolbox.com> / <https://www.elektrisola.com/> / <https://www.engineersedge.com>
- [5] AC/DC Module User's guide COMSOL version 5.5

- [6] <https://www.comsol.com/video/modeling-loudspeakers-in-comsol-multiphysics>
- [7] Acoustic Module User's guide COMSOL version 5.5
- [8] Teoría de Mecánica Estructural - parte 2.6.1 – Apuntes del Master en COMSOL Multiphysics – MUCOM – Universidad de Malaga [2019/20]
- [9] Mecánica estructural – acoplamiento multifísico - Apuntes del Master en COMSOL Multiphysics – MUCOM – Universidad de Malaga [2019/20]
- [10] Modelo de Comsol “OW Microspeaker: Simulation and Correlation with Measurements”
- [11] J. Vanderkooy, “A Model of Loudspeaker Driver Impedance Incorporating Eddy Currents in the Pole Structure,” J. Audio Eng. Soc., Vol. 37, No. 3, pp. 119-128, March 1989.