



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



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

TRABAJO FIN DE MÁSTER

SIMULACIÓN DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN UN TRANSDUCTOR ELECTRODINÁMICO DE BAJA FRECUENCIA

MÁSTER UNIVERSITARIO en

SIMULACIÓN NUMÉRICA EN CIENCIA E INGENIERÍA

con COMSOL MULTIPHYSICS

Autor: P. Adrián Roig Ortiz

Tutor: Joel Hernández Wong

Cotutor: Rafael Serra Giménez

JUNIO de 2021



Contenido

| | |
|---|----|
| 1. Descripción General | 3 |
| 2. Fundamento Teórico | 3 |
| El altavoz electrodinámico, funcionamiento | 3 |
| Problemas del altavoz frente a la temperatura | 5 |
| Mecanismos de transferencia de calor en el altavoz | 7 |
| 3. Geometría | 8 |
| 4. Materiales | 8 |
| 5. Ecuaciones, Interfaces Físicas y Condiciones de Contorno | 9 |
| Magnetic Fields (<i>mf</i>) | 9 |
| Solid Mechanics (<i>solid</i>) | 10 |
| Laminar Flow (<i>spf</i>) | 11 |
| Heat Transfer in Solids and Fluids (<i>ht</i>) | 11 |
| Surface-to-Surface Radiation (<i>rad</i>) | 12 |
| Acoplamientos multi físicos | 12 |
| 6. Malla móvil | 13 |
| 7. Estudios y Resolvedores | 14 |
| 8. Resultados Obtenidos (I) | 15 |
| 9. Medidas experimentales | 16 |
| 10. Problema simplificado | 17 |
| 11. Resultados Obtenidos (II) | 18 |
| 12. Conclusiones | 21 |
| 13. Referencias | 22 |
| 14. Anexo | 23 |

1. Descripción General

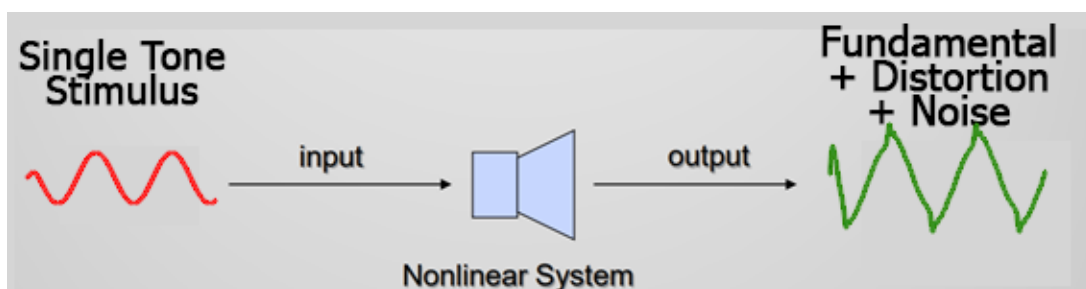
Uno de los parámetros técnicos más importante de un altavoz es la potencia eléctrica admisible. Esta viene determinada por varios factores, entre ellos la temperatura alcanzada en la bobina. Tradicionalmente se ha estudiado el flujo de calor en transductores electroacústicos analizando su circuito eléctrico equivalente [2][7]. Estas aproximaciones, únicamente describen el comportamiento del altavoz en baja señal y no contemplan el comportamiento no lineal con señales de mayor amplitud, que se asemejarían más a una aplicación real. Por otro lado, no contemplan la convección forzada del aire, un mecanismo de refrigeración muy efectivo si la velocidad de la bobina y diafragma son elevadas.

Los trabajos más recientes, realizados en el sector sobre transferencia de calor en transductores electroacústicos, que introducen métodos numéricos de simulación modelan mediante aproximaciones el comportamiento del aire y no se introducen las ecuaciones de mecánica de fluidos en la simulación. En este proyecto se plantea un procedimiento multifísico para la evaluación de la transferencia de calor en las diferentes partes de un altavoz electrodinámico de baja frecuencia, contrastándolo con experimentos de laboratorio.

2. Fundamento Teórico

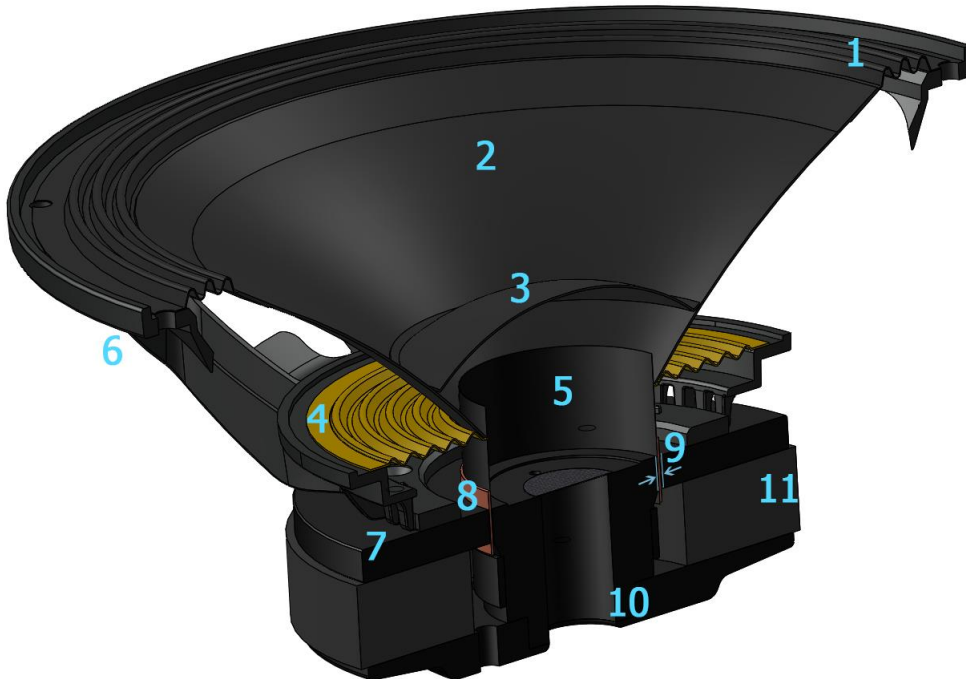
El altavoz electrodinámico, funcionamiento

El altavoz electrodinámico es un dispositivo capaz de transformar una señal eléctrica en una señal acústica a través del proceso de transducción electromecánico-acústica. El objetivo de los altavoces es producir ondas sonoras de la manera más fiel posible con respecto a la señal de entrada a reproducir. Estas ondas serán captadas por nuestros oídos e interpretadas por nuestro cerebro.



Fue en 1925 cuando dos investigadores de Western Electric, Chester W. Rice y Edward W. Kellogg, patentaron el modelo de altavoz de bobina móvil. La mayoría de los altavoces actuales siguen el mismo fundamento teórico desde entonces y es en el que se centra esta memoria.

A continuación, se muestra una sección transversal de un altavoz de bobina móvil típico y sus partes.



Img. 1 Sección del altavoz de cono

| | | |
|--------------------------|----------------------------------|-------------------------|
| 1. Suspensión (Surround) | 5. Soporte del bobinado (former) | 8. Bobina |
| 2. Membrana | 6. Carcasa o chasis | 9. Entrehierro |
| 3. Tapita tapa polvo | 7. Anilla de campo (Top Plate) | 10. T-Joke o Back plate |
| 4. Centrador (Spider) | | 11. Imán |

Al aplicarle una señal de corriente alterna a la bobina se genera un campo magnético que interactúa con el campo del imán permanente, haciendo mover la bobina y vibrar la membrana. Estas vibraciones mueven el aire circundante generando variaciones de presión, es decir, ondas sonoras.

En el mercado se cuenta con diferentes tipos de transductores de bobina móvil según su aplicación. Por ejemplo, altavoces de conos y diámetros de bobina grandes para reproducir las bajas frecuencias (subgraves), o transductores de radiación indirecta con bobinas y membranas pequeñas para reproducir las altas frecuencias (motores de compresión).

Problemas del altavoz frente a la temperatura

El efecto Joule es el fenómeno por el cual un conductor eléctrico que conduce corriente genera calor. Esto es debido a las colisiones de los electrones contra los átomos del conductor. Es decir, parte de la energía cinética de esos electrones se convierte en calor. Los transductores electrodinámicos son muy poco eficientes en la conversión de energía eléctrica en energía acústica (aproximadamente un 5%), por lo que la mayoría de la potencia entregada al altavoz será disipada en forma de calor por la bobina.

Por otro lado, las corrientes inducidas en materiales eléctricamente conductores colindantes con la bobina (por ej. el hierro) serán las fuentes de calor secundarias. Estas corrientes inducidas son conocidas como *eddy currents* o corrientes de Foucault. Un campo magnético variable creará un movimiento de electrones en el material conductor que, al generarse corrientes inducidas, aumentarán la temperatura en su superficie.

Algunos de los materiales que componen el altavoz pueden manejar temperaturas muy altas ($T > 250^\circ$), pero todos tienen un límite en el que se ven afectadas negativamente las prestaciones acústicas (distorsión, compresión en potencia) o incluso el fallo sin retorno (pérdida de continuidad eléctrica en la bobina). Por lo que el calor es uno de los factores limitantes en el diseño de un transductor electroacústico de bobina móvil.

El manejo de potencia eléctrica del altavoz es un parámetro técnico importante. Aunque este depende de la naturaleza del estímulo aplicado (tono senoidal puro, ruido aleatorio o ruido rosa, música, ondas cuadradas...), el manejo de potencia viene determinado por:

1. Aumento de temperatura en la bobina y el límite térmico de sus materiales (adhesivos y recubrimientos).
2. Distorsión armónica aceptable.
3. No linealidades del altavoz (condicionan en el desplazamiento de la bobina)
4. Daños mecánicos causados por estrés mecánico.

La limitación más crítica del altavoz en su manejo de potencia es la **degradación de los materiales de la bobina**, pudiendo quedar carbonizados y causar un cortocircuito o rotura del hilo del bobinado. Este devanado es la principal fuente de calor en el sistema.

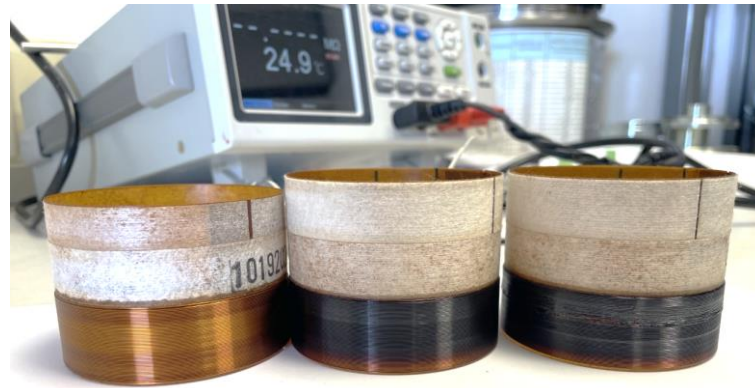
Es importante destacar que la resistencia eléctrica del altavoz (R_e) varía en función de la temperatura [5].

$$R_e(T) = R_a(1 + \alpha\Delta T) \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde R_a es la resistencia eléctrica a temperatura ambiente y α es el coeficiente de temperatura dependiente del material. El aumento de la temperatura provocará una disminución de la conductividad del material conductor disminuyendo así la eficiencia del altavoz. En el modelo hemos ajustado la conductividad eléctrica del material (σ) mediante la ecuación empírica

$$\sigma = \frac{1}{\rho_0[1 + \alpha(T - T_0)]} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde T es la temperatura, T_0 la temperatura referencia de 20°C y ρ_0 la densidad del conductor.



Img. 2 De izquierda a derecha: Bobinado nuevo, bobinado tras test de potencia (con barnices deteriorados pero funcional), bobinado sin continuidad tras test de potencia fallido

Debido al uso continuado del altavoz, el valor de R_e aumenta drásticamente tras un corto intervalo de tiempo, lo que conlleva una disminución de la eficiencia del altavoz, reduciéndose el nivel de presión sonora para una misma señal. Este fenómeno se conoce como **compresión en potencia (PC)**. Donde $R_e(T_v)$ es el valor de la resistencia eléctrica respecto de la temperatura de la bobina y T_a es la temperatura ambiente.

$$PC = 20 \log \left(\frac{R_e(T_v = T_a)}{R_e(T_v)} \right) \quad \text{Ecuación 3}$$

Otro punto importante es el límite térmico de los imanes ya que, tras alcanzar un temperatura máxima, llamada temperatura de Curie, pierden sus propiedades ferromagnéticas.

Existen mecanismos para mejorar la refrigeración en el bobinado, como por ejemplo las tecnologías Helicex® y Maltcross® introducidas por Acústica Beyma [8]. Mediante un circuito de convección forzada en el interior del altavoz de baja frecuencia, se logra reducir la temperatura de trabajo de la bobina, reduciendo así la compresión en potencia y permitiendo manejos de potencia más altos. Esto ofrece la posibilidad de utilizar bobinas de menor diámetro y por lo tanto estructuras de motor magnético más pequeñas, más ligeras y de menor coste.



Img. 3 Altavoz con tecnología Maltcross®, Acústica Beyma [8]

Mecanismos de transferencia de calor en el altavoz

Las maneras en las que el calor se transfiere en un altavoz son:

Conducción. Es el mecanismo de transferencia de calor en forma de movimiento cinético de las moléculas dentro de un material. El flujo de calor es descrito por la ley de conducción de calor de Fourier

$$Q = -kA\nabla T$$

Ecuación 4

Donde k es la conductividad térmica del material en $W/(m\cdot K)$, A es el área transversal. El último término es el gradiente de la temperatura.

Convección Natural. La convección es el proceso de transferencia debido al movimiento de un fluido. En la convección natural, este movimiento se debe a fuerzas de empuje surgidas por variaciones en la densidad del fluido. Un modelo de transferencia de calor (H) por convección es el llamado Ley de enfriamiento de Newton, en la que h es el coeficiente de convección en W/m^2K , A es el área que entrega calor a una temperatura T_A al fluido adyacente, que se encuentra a una temperatura T .

$$H = hA(T_A - T)$$

Ecuación 5

Hay que señalar que para la convección natural pura no debe haber movimiento del fluido por otras razones. Este no es el caso del altavoz, dado que su membrana está en constante movimiento, creando flujos de aire.

Convección Forzada. La convección forzada es el proceso de transferencia debido al movimiento del fluido por una fuerza externa. Este es el caso del altavoz de baja frecuencia.

Si la velocidad del fluido es alta se creará un flujo turbulento. En estos casos, el mezclado de fluido caliente y frío es más eficiente, incrementándose la transferencia de calor.

Radiación. Surge en la superficie de un material a una temperatura dada por la emisión de radiación electromagnética, producida por los cambios en las configuraciones de los átomos o moléculas del cuerpo. La transferencia de energía por radiación es más efectiva en el vacío, por lo que la velocidad, intensidad y dirección de su flujo de energía se ven influidos por el medio en el que se propagan. La potencia de radiación H es descrita por la ley de Stefan-Boltzmann.

$$H = \varepsilon\sigma AT^4$$

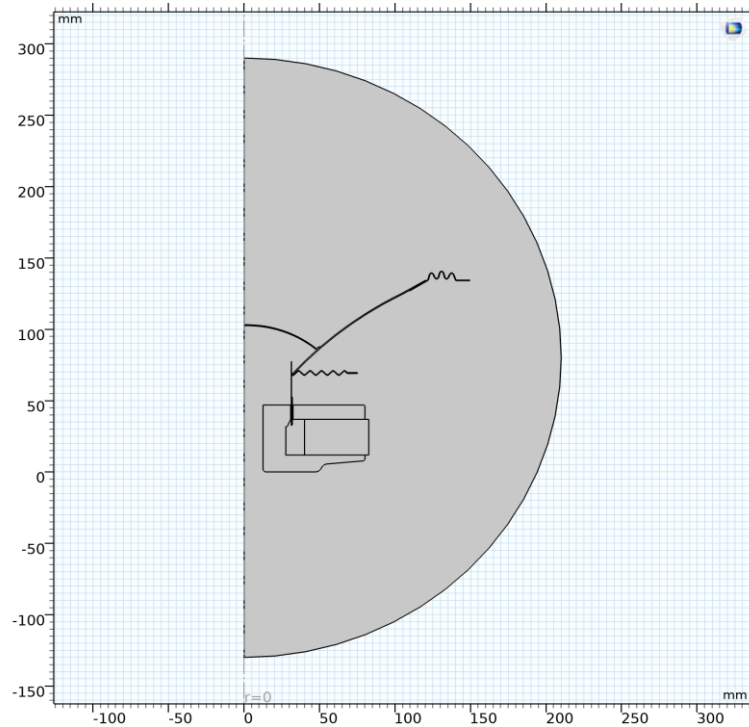
Ecuación 6

Donde $\sigma=5.67\cdot 10^8 W/(m^2K^4)$ es la constante de Stephan-Boltzmann, ε es la emisividad, una proporción de radiación térmica, sus valores varían en el rango $0 < \varepsilon < 1$, A es el área del cuerpo radiante y T es la temperatura de la superficie.

En los siguientes apartados se va a comentar el pre-procesado seguido para la simulación del problema con COMSOL multiphysics.

3. Geometría

Para este trabajo se ha escogido la modelización de un prototipo real de un altavoz de cono de 12 pulgadas. Aprovechando la simetría de revolución que posee, se va a utilizar un componente 2D Axi-simétrico con un archivo *.dxf* importado. Se modelan mediante primitivas de Comsol diferentes superficies auxiliares, como el círculo de aire en el que está inmerso el altavoz.



Img. 4 Geometría del modelo

4. Materiales

Para facilitar futuros trabajos, se ha creado una librería específica de materiales, recopilando y completando algunos de la librería de Comsol junto con otros obtenidos de trabajos previos y bibliografía. Todos ellos poseen las propiedades necesarias que requerirá el problema multifísico.

- ▲ loudspeaker driver materials
 - LS - Copper
 - LS - Soft Iron (With Losses+Thermal)
 - LS - N50M (Sintered NdFeB)
 - BMHFa-32/27 H (Y35 Magnet)
 - LS - Glass Fiber
 - LS - Phenolic Cloth
 - LS - Paper Cone (Composite)

Img. 5 Librería de materiales personalizada para el modelo

5. Ecuaciones, Interfaces Físicas y Condiciones de Contorno

Como se ha descrito en el funcionamiento del altavoz, diferentes fenómenos físicos rigen este problema. Partiendo de los fenómenos electromagnéticos del imán y la bobina, la vibración y desplazamiento de la membrana estudiando mediante mecánica del sólido o el movimiento del fluido colindante al altavoz. Todos ellos tendrán influencia en la transferencia de calor en las partes solidas del motor magnético y en el aire.

- ▲ Component 1 (*comp1*) {*comp1*}
- ▶ Definitions
- ▶ Geometry 1 (*geom1*)
- ▶ Materials
- ▶ Magnetic Fields (*mf*) {*mf*}
- ▶ Solid Mechanics (*solid*) {*solid*}
- ▶ Heat Transfer in Solids and Fluids (*ht*) {*ht*}
- ▶ Surface-to-Surface Radiation (*rad*) {*rad*}
- ▶ Laminar Flow (*spf*) {*spf*}
- ▶ Multiphysics

Img. 6 Nodos (físicas) que componen el modelo

Magnetic Fields (*mf*)

Las ecuaciones de Maxwell describen por completo los fenómenos electromagnéticos.

$$\begin{aligned}\nabla \times H &= J \\ B &= \nabla \times A \\ J &= \sigma E + \sigma v \times B + J_e \\ E &= -\frac{\partial A}{\partial t}\end{aligned}\tag{Ecuación 7}$$

Donde B es la densidad de flujo magnético, H la intensidad de campo magnético, E es la intensidad de campo eléctrico, A es la superficie, J la densidad de corriente y J_e una densidad de corriente generada externamente. Estas ecuaciones van a ser aplicadas para resolver la parte principal del altavoz electrodinámico: el motor magnético.

Se utilizarán los nodos *Ampere's Law* para modelar el aire, el hierro y el imán permanente, mediante la correcta configuración de sus relaciones constitutivas. El nodo *Coil* de Comsol nos permitirá implementar fácilmente el bobinado multivuelta del altavoz, introduciendo la descripción del hilo además de la excitación aplicada en la bobina.

$$J_e = \frac{NI_{coil}}{A}\tag{Ecuación 8}$$

Donde I_{coil} es la intensidad externa aplicada a la bobina, N el número de vueltas y A es el área de sección transversal.

La excitación elegida para crear el movimiento armónico de la membrana será un tono puro de 30Hz y amplitud V_0 . Se multiplica esta excitación por una función rampa ($rm1$) que provocará, durante el primer periodo, una transición más suave en el voltaje desde 0 a $V(t)$. Esto mejorará las condiciones iniciales.

$$V_{coil} = V_0 \sin(2\pi f_0 t) \cdot rm1(t) \quad \text{Ecuación 9}$$

Se ha modificado la conductividad del material de la bobina acorde a Ecuación 2 dentro del nodo *Coil*.

Solid Mechanics (*solid*)

Para resolver el desplazamiento y deformación de la membrana, sistema de suspensiones y bobinado utilizaremos el módulo de mecánica del sólido. Estos movimientos son descritos por la ecuación de balance de fuerzas

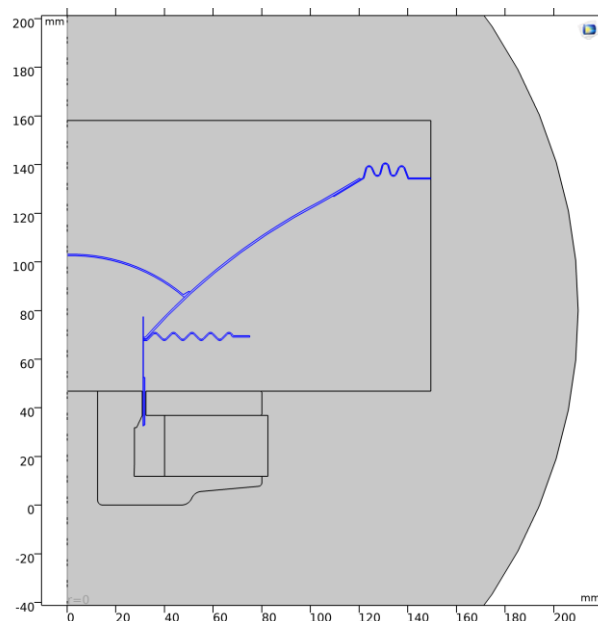
$$\rho \frac{\partial^2 u_{solid}}{\partial t^2} = \nabla \cdot \mathbf{S} + \mathbf{F}_v \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde \mathbf{u} es el vector desplazamiento, \mathbf{S} el tensor de esfuerzos, ρ es la densidad del material y \mathbf{F}_v es la fuerza por unidad de volumen que actúa sobre el cuerpo.

Las partes fijadas (pegadas) al chasis del altavoz vamos a delimitarlas con desplazamiento nulo

$$u_{solid} = 0 \quad \text{Ecuación 11}$$

Los materiales que se han utilizado siguen el modelo elástico lineal y son isotrópicos. No se ha incluido *damping* (pérdidas) ya que estamos excitando frecuencias bajas que proporcionarán un movimiento pistónico.



Img. 7 Dominios estructurales

Laminar Flow (*spf*)

Tomando como longitud característica el agujero central del *back plate* del altavoz, el número de Reynolds indica que tendremos un flujo turbulento solo si la velocidad del fluido es superior a 3 m/s. Al no disponer de datos sobre el flujo que va a crear el movimiento de la membrana, y al ser tan dependiente del estímulo aplicado al altavoz, vamos a suponer un flujo laminar, para un fluido débilmente compresible, alrededor del altavoz. Se resolverá el campo de velocidades \mathbf{u} y el de presiones p con las ecuaciones de continuidad y momento.

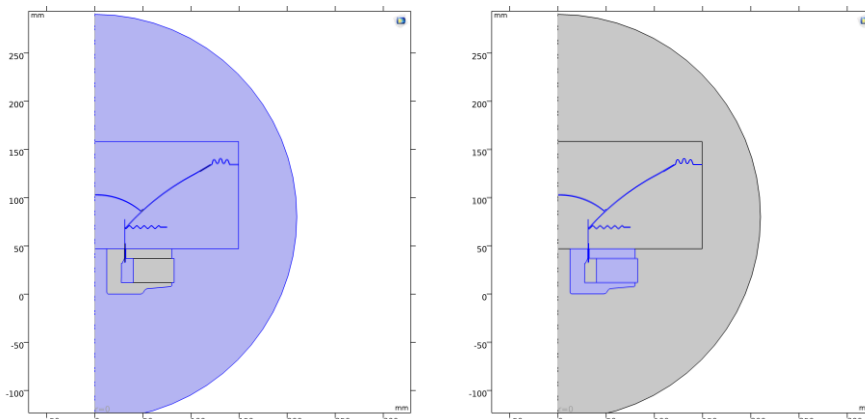
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}_{fluid}) = 0 \quad \text{Ecuación 12}$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}_{fluid}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u}_{fluid} \cdot \nabla) \mathbf{u}_{fluid} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \mathbf{K}] + \mathbf{F} \quad \text{Ecuación 13}$$

Unas correctas condiciones iniciales son necesarias para que el problema converja. En este caso, le daremos un punto de presión mediante el nodo *Pressure Point Constraint* con $p_0 = 0$.

Heat Transfer in Solids and Fluids (*ht*)

La transferencia de calor se resuelve en los dominios sólidos del altavoz y en los dominios de aire alrededor de este. Se aplicará transferencia de calor por conducción y convección en fluido, y transferencia de calor por conducción en los dominios sólidos.



Img. 8 Izquierda dominios del fluido, derecha dominios sólidos

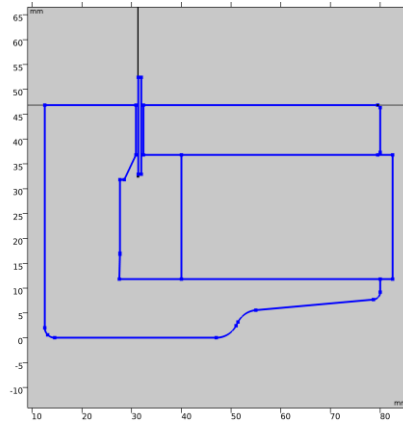
Para la resolución del campo de temperaturas T utilizaremos la ecuación de conservación de energía.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q \quad \text{Ecuación 14}$$

De izquierda a derecha tenemos el término evolutivo del campo de temperaturas, el término convectivo y el término conductivo (Ecuación 4) igualado al término fuente.

Surface-to-Surface Radiation (*rad*)

La radiación térmica se ha considerado en todos los contornos entre sólido y el fluido. Los coeficientes de emisividad han sido obtenidos de literatura y comprobados durante el experimento de laboratorio. La ecuación utilizada es ley de Stefan-Boltzmann (Ecuación 6)



Img. 9 Contornos de Surface-to-Surface Radiation

Acoplamiento multi físicos

Electromagnetic Heating (*emh*): Este acoplamiento representa las pérdidas electromagnéticas, Q_e , como una fuente de calor en la parte de transferencia de calor del modelo, incluyéndolo en la Ecuación 14.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_e \quad \text{Ecuación 15}$$

Será la fuente de calor en nuestro modelo, principalmente en la bobina y el hierro del motor magnético del altavoz.

Lorentz Coupling (*ltzc*): Es un acoplamiento bidireccional entre la interfaz de campos magnéticos y la de mecánica del sólido. Este transfiere la Fuerza de Lorentz del motor magnético del altavoz a los dominios estructurales.

$$F = J \times B \quad \text{Ecuación 16}$$

Además, transfiere las corrientes eléctricas inducidas por el movimiento de la bobina afectando a la interfaz de electromagnetismo.

$$E = v \times B \quad \text{Ecuación 17}$$

Fluid-Structure Interaction (*fsi*): Este nodo provee el acoplamiento entre un dominio de fluido y un material sólido. En este caso hemos creado un acoplamiento unidireccional para que la membrana interactúe con el fluido y el fluido no afecte al movimiento de la membrana.

Velocity transmission to fluid

Nonisothermal Flow (*nif*): Este acoplamiento resuelve la conservación de energía, masa y momento en fluidos y medios porosos y la conservación de energía en sólidos. Define el campo de velocidades en la transferencia de calor por convección, mecanismo muy importante para este modelo de altavoz. En la interfaz de fluidos, establece la temperatura que afectará a la densidad del fluido si procede.

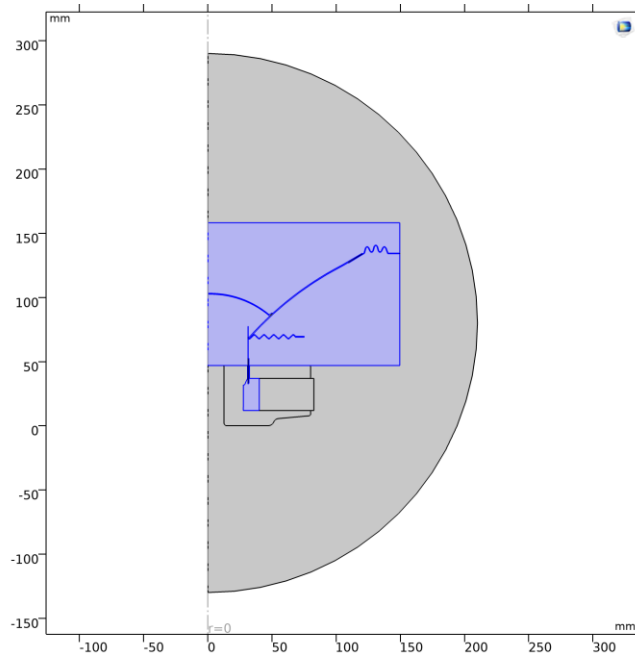
Heat Transfer with Surface-to-Surface Radiation(*htrad*): Añade la transferencia de calor por radiación en contornos. Se añade el siguiente término fuente a la ecuación del calor.

$$q = \varepsilon(G - e_b(T)) \quad \text{Ecuación 18}$$

6. Malla móvil

Los dominios estructurales (*solid*) se van a mover y a deformar debido al movimiento de la bobina por el acoplamiento multifísico *Lorenz Force*. Añadimos una malla móvil (*Moving Mesh*) para tener en cuenta estas deformaciones del sistema durante el estudio transitorio.

Se acotan los dominios cercanos a la membrana para hacer más ligero el cálculo.

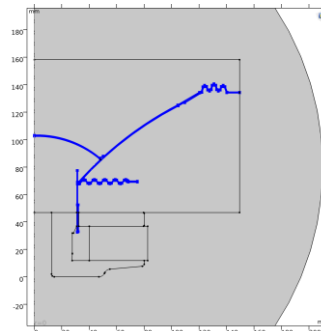


Img. 10 Dominios con malla deformable

Los contornos estructurales dominarán el desplazamiento prescrito de la malla

Prescribed mesh displacement:

| | | | |
|------|-------------|---|---|
| dx | u_{solid} | R | m |
| | w_{solid} | Z | |



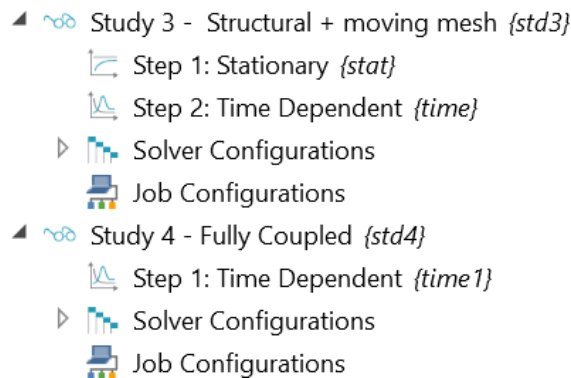
Img. 11 Contornos de Prescribed mesh displacement

7. Estudios y Resolvedores

El término de potencia que se da en las hojas técnicas de los altavoces, como la del apartado [Anexo](#), viene dado por una prueba de 2 horas de duración. Por lo que se ha intentado resolver un estudio temporal para ver la evolución de la temperatura en las partes del altavoz.

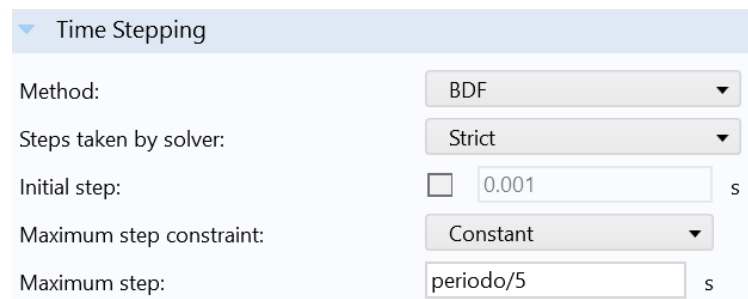
Se ha dividido en 2 estudios, el primero resuelve el movimiento, creado por el *Lorentz Coupling* y también resuelve la malla móvil con el remallado activado. Se calcula un primer paso estacionario para establecer las condiciones iniciales del campo magnético del altavoz.

El segundo estudio, acopla el resto de las interfaces físicas utilizando los datos del estudio previo.



Img. 12 Estudios realizados en el modelo multi físico acoplado

El *solver* temporal propuesto por Comsol utiliza el método *BDF*. Hemos acotado los pasos para que consiga recoger los datos del movimiento pistónico del altavoz.

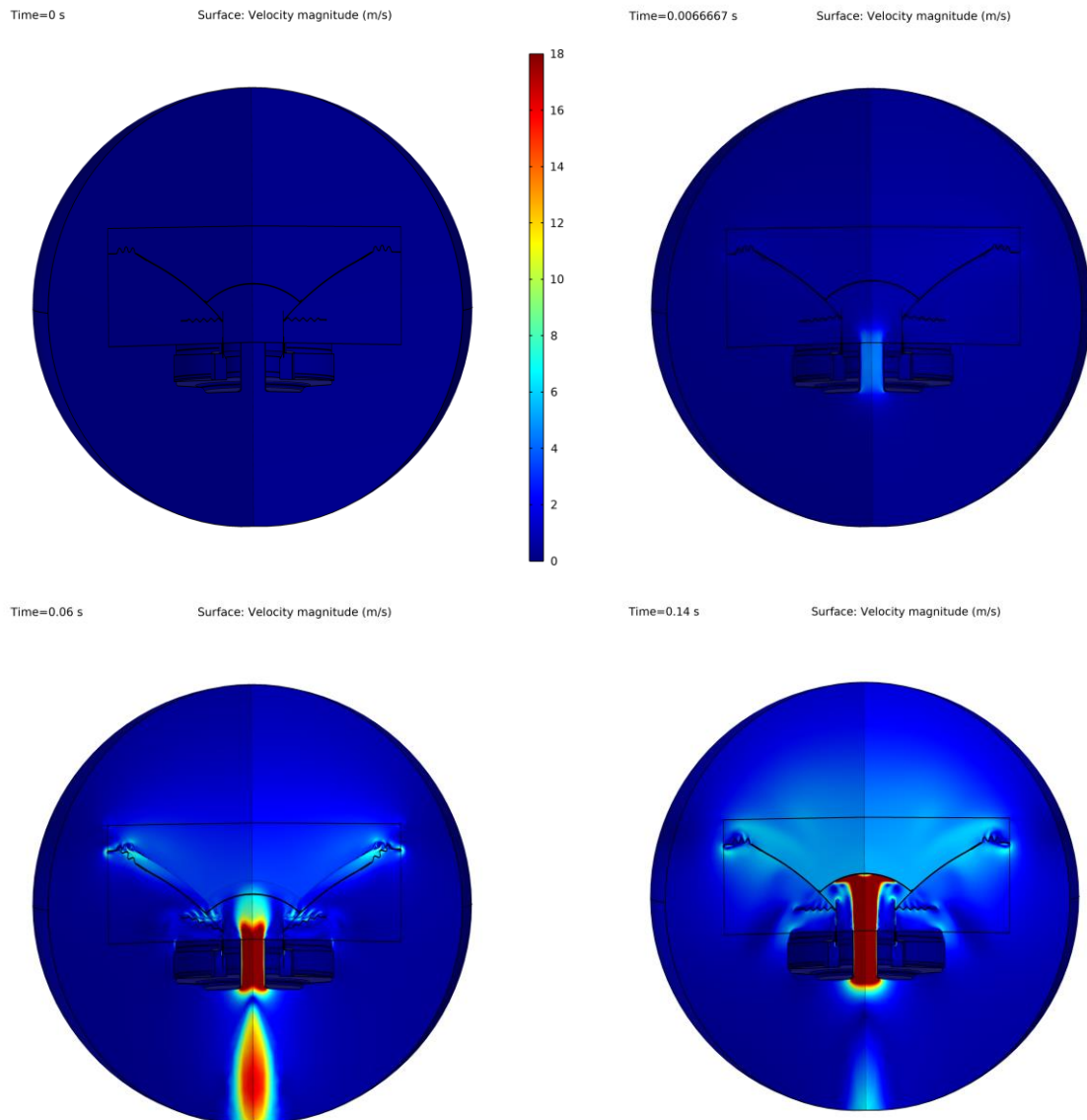


Img. 13 Time-Dependent Solver, Time Stepping

Dado el altísimo coste computacional solo se ha podido resolver unos pocos periodos de la señal senoidal aplicada, equivalente a una simulación de 0.16 s en un tiempo de cálculo superior a 8 horas. La máquina en la que se ha resuelto consta de un procesador *Inter Core i7-10700 @ 2.9GHz* y *64Gb* de memoria RAM.

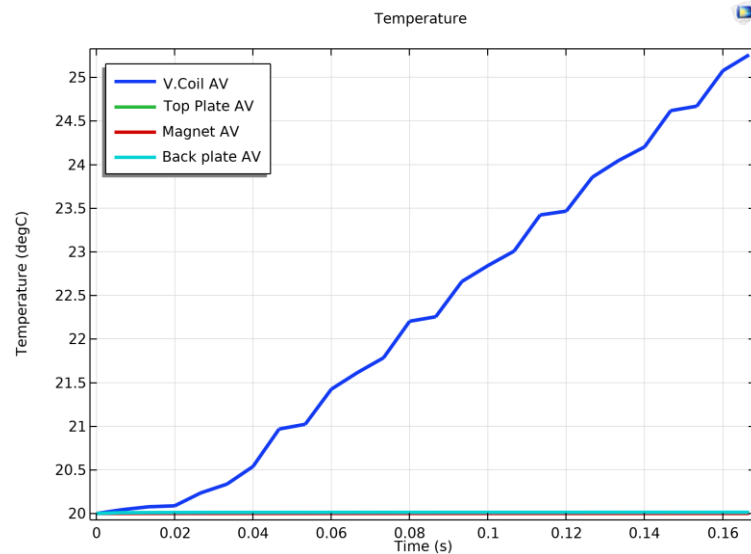
8. Resultados Obtenidos (I)

Además de poder extraer datos sobre el comportamiento magnético y estructural del transductor, el objetivo principal era modelizar la transferencia de calor en el altavoz incluyendo la convección forzada.



Img. 14 Velocidad del fluido para diferentes instantes de tiempo

Lamentablemente, para el corto tiempo de 0.16s no ha podido surgir ningún calentamiento importante, por efecto Joule en la bobina, ni en el hierro por inducción magnética.



Img. 15 Temperatura en la bobina, Top plate, Imán y Back plate

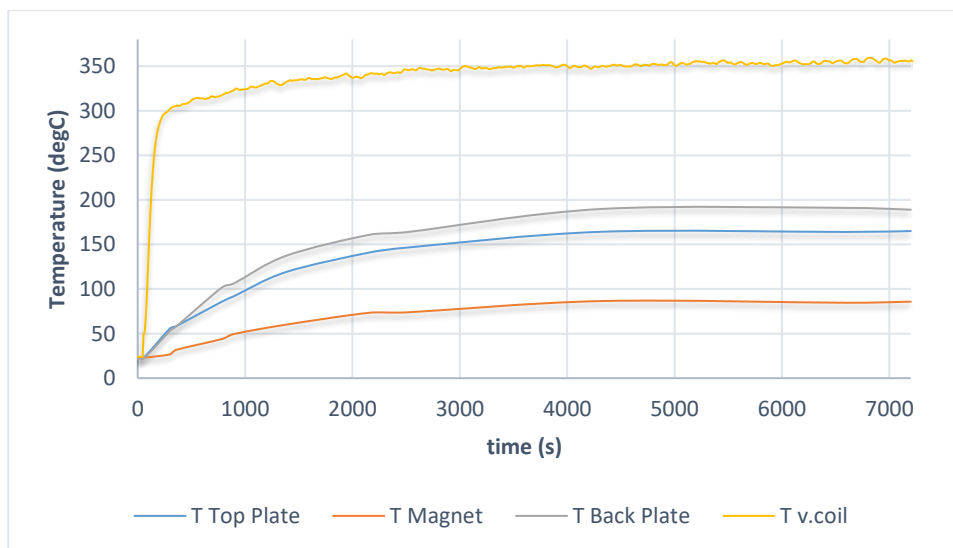
Se decide realizar un problema simplificado, usando el campo de velocidades del fluido calculado en esta primera parte.

9. Medidas experimentales

Se realiza la medición de un prototipo real y tomando valores de la temperatura en la bobina, el hierro y el imán del altavoz. Se utiliza el analizador *Klippel DA2* con el módulo *PWT*, que nos permite generar la señal de excitación, monitorear la evolución de tensión, corriente, resistencia eléctrica e incremento de temperatura en la bobina.

Test 1: Se utiliza un tono puro de 30Hz a diferentes voltajes durante 4 horas, dejando enfriar el bobinado durante 3 horas antes de cada incremento de voltaje.

Test 2: Test de potencia convencional con ruido rosa filtrado de 60-600Hz con 60Vrms (120Vpeak). Duración de 2 horas.

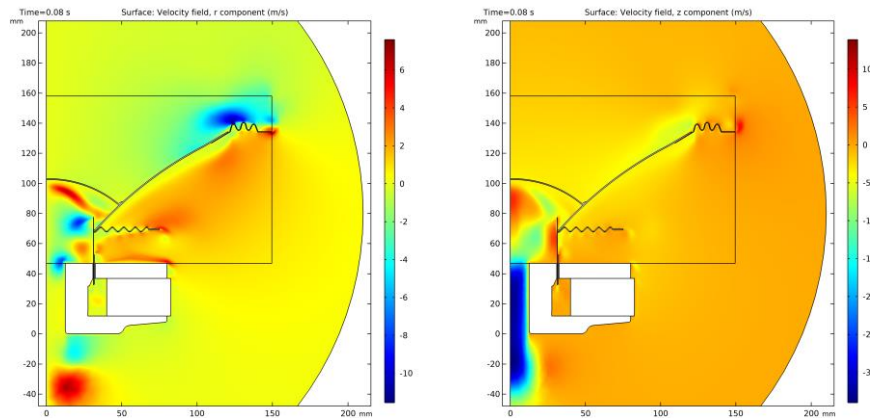


Img. 16 Resultados medidos para Test 2

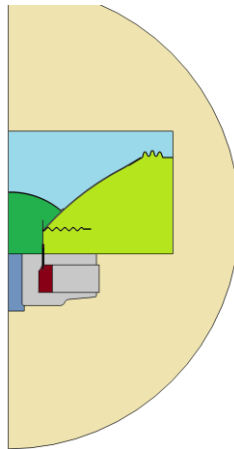
10. Problema simplificado

Se utiliza ahora una señal en DC, sin movimiento, por lo que podemos prescindir de la interfaz de mecánica del sólido, flujo laminar, y los acoplamientos correspondientes. Se va a utilizar el calentamiento electromagnético y a resolver la ecuación de calor.

Para ajustar la convección forzada, acorde al comportamiento visto en el primer modelo, dividimos el fluido en diferentes secciones en las que aplicaremos diferentes valores del vector de velocidades.



Img. 17 Campo de velocidad del fluido, componente r y z



Img. 18 Nuevos dominios fluido con diferentes valores de campo de velocidades

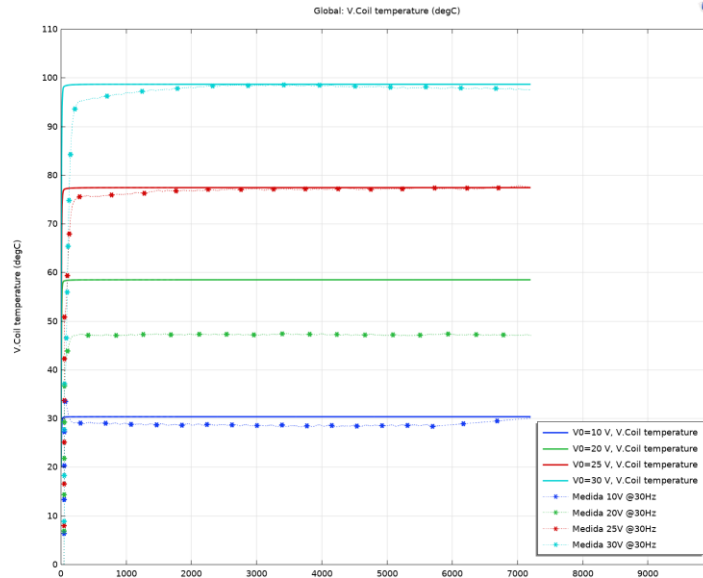
Con esta simplificación, al ser en DC no existen corrientes inducidas en el hierro, por lo que no habrá efecto Joule y no podemos analizar esta importante fuente de calor. Se decide realizar un estudio de inducción magnética con un *step Frequency-Transient* para diferentes frecuencias.

- ▶ Study 1 - Magnetic Study (i=1A) {std1}
- ▲ Study 2 - DC Time Dependant (no CFD) {std2}
 - Parametric Sweep {param}
 - Step 1: Stationary {stat}
 - Step 2: Time Dependent {time}
- ▲ Magnetic Induction Study {std2}
 - Parametric Sweep {param}
 - Step 1: Stationary {stat}
 - Step 2: Frequency-Transient {ftrans}

Img. 19 Estudios utilizados para el problema simplificado 1 (DC) y 2 (Inducción)

11. Resultados Obtenidos (II)

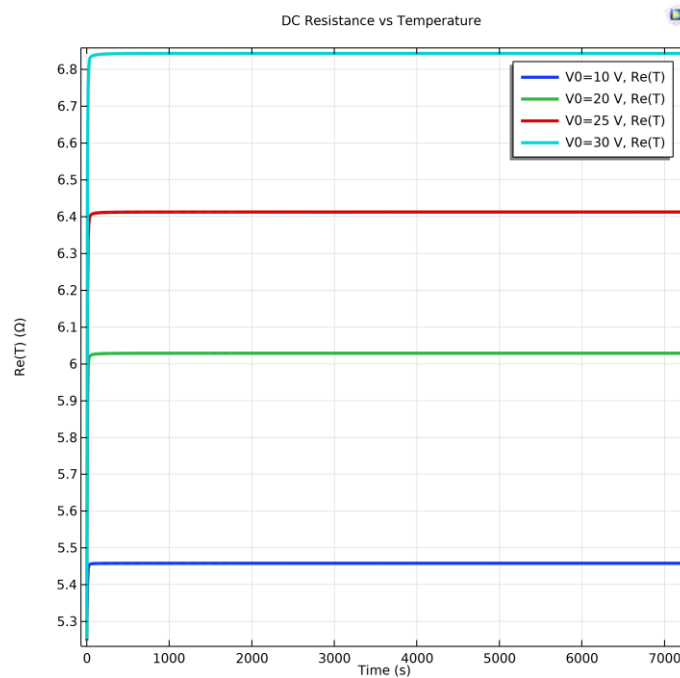
Para el caso del problema el DC obtenemos una buena correlación en el incremento de la temperatura en la bobina para diferentes voltajes.



Img. 20 Temperatura en la bobina para diferentes voltajes. Línea continua simulación, discontinua medidas experimentales

La correlación hubiera sido mejor si hubiéramos ajustado la velocidad del fluido acorde para cada voltaje ($\uparrow\uparrow$ voltaje = $\uparrow\uparrow$ mayor desplazamiento = $\uparrow\uparrow$ velocidad del fluido) y además haberla hecho variar con el tiempo.

Podemos ver como aumenta el valor de la resistencia eléctrica con la temperatura



Img. 21 Evolución de la resistencia eléctrica con la temperatura acorde a Ecuación 1

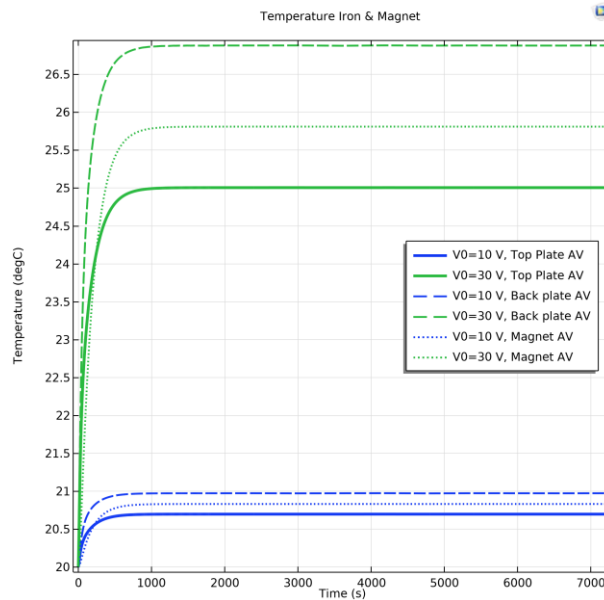
Con el uso de valores derivados se calculan diferentes parámetros del altavoz y se comprueba que corresponden a los valores del prototipo real del [Anexo](#).

| Force Factor (N/A) | DC Resistance (Ω) | Efficiency (%) | Sensitivity (dB) |
|--------------------|----------------------------|----------------|------------------|
| 18.156 | 5.2476 | 3.0397 | 97.028 |

Potencia disipada, potencia aplicada y pérdidas por compresión en potencia (dB)

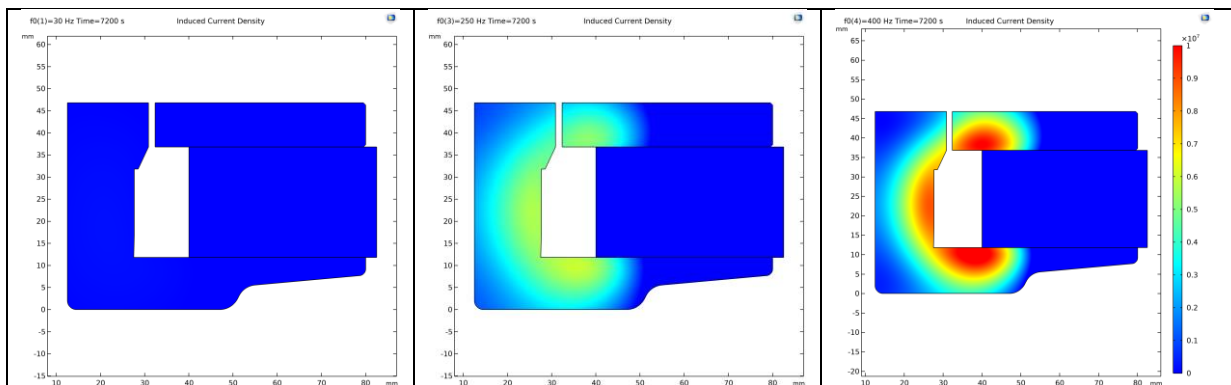
| V0 (V) | t (s) | Power Heating V.Coil (W) | Nominal Electric input Power (W) | Power Compression Losses |
|--------|--------|--------------------------|----------------------------------|--------------------------|
| 10.000 | 7200.0 | 17.772 | 18.322 | -0.34142 |
| 20.000 | 7200.0 | 64.363 | 66.353 | -1.2047 |
| 25.000 | 7200.0 | 94.551 | 97.475 | -1.7405 |
| 30.000 | 7200.0 | 127.58 | 131.53 | -2.3051 |

Como era de esperar, al no haber inducción no se generan *Eddy currents*. Esto causa que el incremento de temperatura en el hierro sea pequeño, muy lejos de una aplicación real.



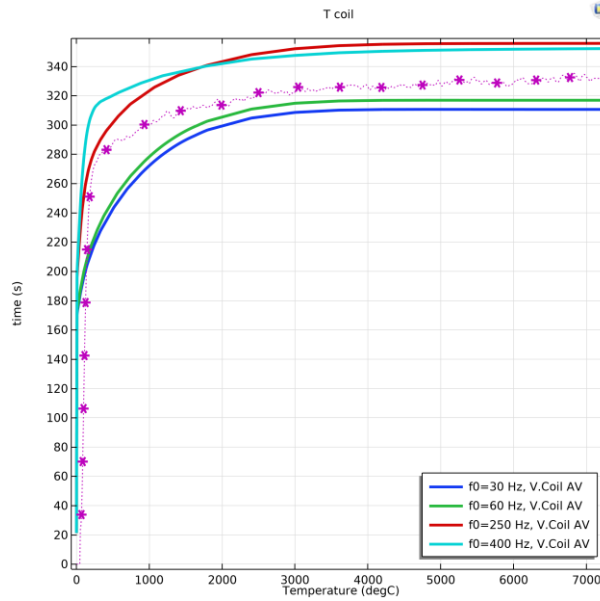
Img. 22 Incremento de temperatura en piezas de hierro e imán para el estudio en DC

Para el segundo estudio, con el paso *frequency-transient* surgirán los efectos de corrientes inducidas en el hierro dependiendo de la frecuencia.

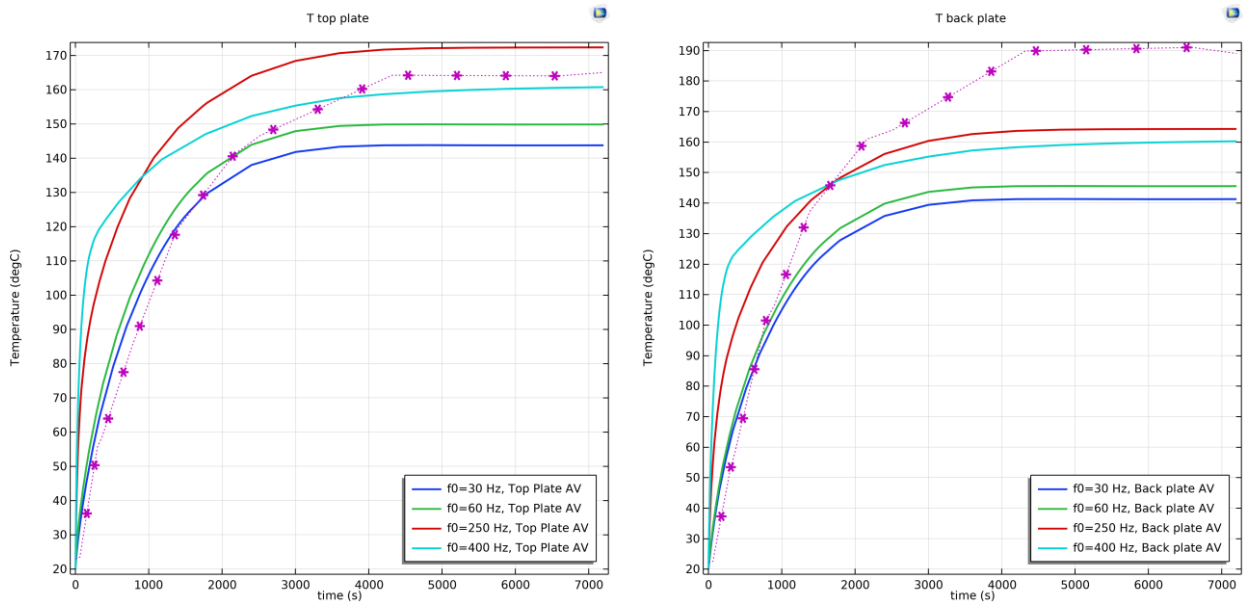


Img. 23 Densidad de corriente inducida para diferentes frecuencias

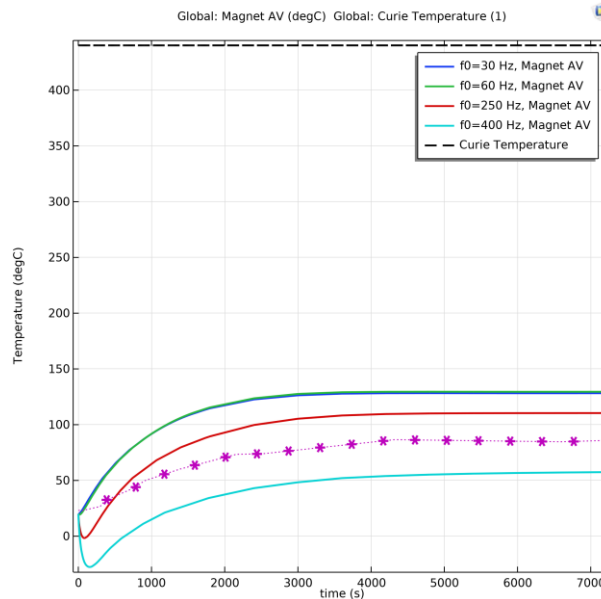
Podemos ver una tendencia en la evolución de la temperatura a diferentes frecuencias respecto a la medida real del test 2 con ruido rosa.



Img. 24 Incremento de temperatura en la bobina para el modelo de inducción



Img. 25 Incremento de temperatura en las piezas polares para el modelo de inducción



Img. 26 Incremento de temperatura en el imán y límite (Temperatura de Curie) para le modelo de inducción

12. Conclusiones

Se ha conseguido modelar el problema multifísico, totalmente acoplado, de los fenómenos más relevantes que intervienen en la transferencia calor en transductores electrodinámicos de baja frecuencia. Desafortunadamente, el coste computacional para resolver un experimento que nos aporte conclusiones es muy alto.

El modelo completo puede considerarse como un punto de partida para el estudio de otro tipo de transductores como los de de alta frecuencia, donde los desplazamientos son muy pequeños y podríamos averiguar si la convección forzada tiene o no una labor importante o mejorar los mecanismos de extracción de calor más efectivos.

Las aproximaciones que se han realizado analizando los primeros instantes del campo de velocidades del fluido ocasionado por el movimiento del cono del altavoz, han dado buenos resultados, pero para futuros trabajos se recomendaría utilizar condiciones de contorno de flujo de calor convectivo, siempre que se conozca el coeficiente de transferencia de calor o pueda ajustarse mediante medidas experimentales.

Se ha demostrado que la fuente principal de calor en el altavoz es la bobina, y que las corrientes inducidas son una fuente de calor importante a considerar. Además, se ha comprobado el importante papel que juega la convección forzada como mecanismos de refrigeración en este tipo de transductores.

Una vez se tengan calibrados los coeficientes de convección y gracias al potencial del software *Comsol Multiphysics*, mediante el *Application Builder*, podría desarrollarse una aplicación para mejorar el flujo de trabajo en el análisis de este tipo de problemas.

Las herramientas de simulación son indispensables en el campo de la ingeniería y la investigación, pudiendo incluso utilizarse para validar experimentos de laboratorio, además de evidentemente reducir los tiempos de desarrollo de un producto y el ahorro de prototipos físicos.



13. Referencias

- [1] *"Loudspeaker Driver – Transient Analysis"*, COMSOL
- [2] *"Heat Dissipation and Power Compression in Loudspeakers"*, Douglas J. Button, JAES 1992.
- [3] *"The Application of FEM to the analysis of Loudspeaker Motor Thermal behavior"*, M.Dood, 122th AES Convention, 2002.
- [4] *"The development of a Forward Radiating Compression Driver by the Application of Acoustic, Magnetic and Thermal Finite Element Methods"*. M. Dood, 115th AES Convention, 2003.
- [5] *"Nonlinear Modeling of the Heat Transfer in Loudspeakers"*, W. Klippel.
- [6] *"FEM Thermal model of a compression driver: comparison with experimental results"*, M. Baratelli, G. Spatafora, E.Capucci and R. Toppi. 144th AES Convention, 2018.
- [7] *"Heat Transfer Mechanisms in Loudspeakers; Analysis, Measurement, and Design"*. Clifford A. Herricksen, 1986.
- [8] <https://www.beyma.com/en/technologies/>
- [9] *"LSI Reference"*, Klippel R&D System.
- [10] *"PWT Reference"*, Klippel R&D System.

Contacto autor: adrian@beyma.com

14. Anexo

Hoja Técnica del transductor de baja frecuencia utilizado en los experimentos y la simulación:

Sample I-299

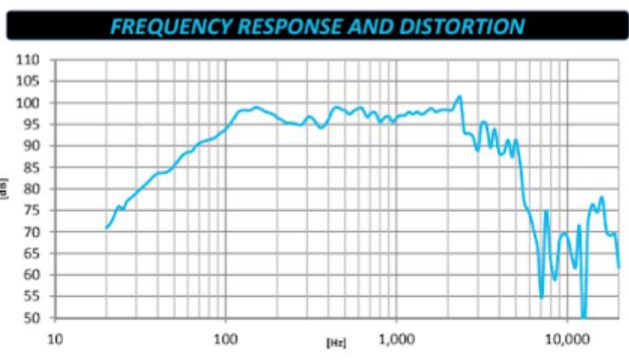
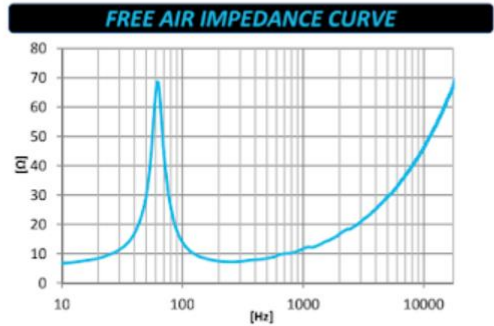
Sample Data Sheet
12" Transducer 8Ω

PROFESSIONAL LOUSPEAKERS
www.beyma.com

| TECHNICAL SPECIFICATIONS | | |
|-----------------------------|----------------------|--------------------------|
| Nominal diameter | 300 mm | 12 in |
| Rated impedance | 8 Ω | |
| Minimum impedance | 7.2 Ω | |
| Power capacity ¹ | 500 W _{AES} | |
| Program power ² | 1000 W | |
| Sensitivity | 97 dB | 1W @ 1m @ Z _n |
| Frequency range | 65 - 5.000 Hz | |
| Voice coil diameter | 63.5 mm | 2.5 in |
| Air gap height | 9.5 mm | |
| Voice coil length | 19.5 mm | |
| Bl factor | 18.0 N/A | |
| Moving mass | 0.059 kg | |
| Winding material | Copper | |
| Spider material | Polycotton | |
| Magnet material | Ferrite | |
| Cone material | Paper | |
| Frame material | Die cast aluminum | |

| THIELE-SMALL PARAMETERS ³ | |
|--|----------------------|
| Resonant frequency, f_s | 64 Hz |
| D.C. Voice coil resistance, R_e | 5.3 Ω |
| Mechanical Quality Factor, Q_{ms} | 5.9 |
| Electrical Quality Factor, Q_{es} | 0.47 |
| Total Quality Factor, Q_{ts} | 0.43 |
| Equivalent Air Volume to Cms, V_{as} | 40.3 l |
| Mechanical Compliance, C_{ms} | 94 μm/N |
| Mechanical Resistance, R_{ms} | 4.5 kg/s |
| Efficiency, η_0 | 3.0 % |
| Effective Surface Area, S_D | 0.055 m ² |
| Maximum Displacement, X_{max} ⁴ | 7.7 mm |
| Voice Coil Inductance, L_e | 1.0 mH |

| MOUNTING INFORMATION | | |
|------------------------|--------|---------|
| Overall diameter | 312 mm | 12.3 in |
| Bolt circle diameter | 295 mm | 11.6 in |
| Baffle cutout diameter | 278 mm | 10.9 in |
| Depth | 140 mm | 5.5 in |
| Net weight | 6.5 kg | 14.3 lb |



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

Notes:
 This datasheet is done with the measurements of a laboratory prototype. Small differences may appear once the driver is transferred to the production line and manufactured in big quantities. Please refer to the serial datasheet for the definitive information of the average production.
¹ Power capacity (AES2-1984 (2003)) has been estimated in this particular case for the present sample.
² Program power is defined as power capacity +3dB.
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 Xmax is calculated as $(Lvc - Hag)/2 + (Hag/3.5)$, where Lvc is the voice coil length and Hag is the air gap height.