



Análisis electroacústico y térmico de un altavoz de bobina-móvil de tipo *overhung* a través de LTspice

Nicolás F. Quinteros, Víctor M. Espinoza

RESUMEN/ ABSTRACT

En esta investigación se presenta una extensión del trabajo de altavoces en SPICE realizado por Leach, para un altavoz dinámico de bobina móvil de tipo *overhung*, en que la altura de la bobina sobresale del entrehierro magnético. A través del *software* LTspice, que simula SPICE, se desarrollaron los modelos eléctrico, mecánico y acústico equivalentes completos, a partir de las analogías electroacústicas, las cuales permitieron verificar el modelo equivalente de Leach. Adicionalmente, se desarrollaron sub-circuitos que permitieron medir directamente la velocidad y velocidad de volumen emitida por el diafragma en el circuito mecánico equivalente completo. Además, se implementaron tres modelos de inductancia eléctrica y tres modelos de impedancia acústica de radiación. Y, finalmente se implementaron el modelo lineal térmico del altavoz y el modelo de resistencia con variación de temperatura de la bobina móvil. Los resultados de los modelos mostraron consistencia en las respuestas medidas y simuladas del altavoz utilizado. Los distintos modelos de inductancia eléctrica e impedancia acústica de radiación mostraron las ventajas y desventajas de su uso e implementación. El modelo lineal térmico mostró una buena estimación de la temperatura medida en el altavoz, excepto para el enfriamiento de la bobina-móvil. Por último, los resultados de la implementación del modelo térmico en la resistencia eléctrica del altavoz mostraron el comportamiento esperado según lo que indica la literatura, i.e., al aumentar la temperatura aumenta la magnitud de la impedancia eléctrica de entrada, disminuye el desplazamiento y velocidad del diafragma y disminuye el nivel de presión sonora.

Palabras claves: Altavoces, Efecto de la Temperatura, Impedancia Eléctrica, Respuesta en Frecuencia, Modelo SPICE, Simulación SPICE.

This research presents an extension of the SPICE loudspeaker work done by Leach for an overhung-type moving-coil dynamic loudspeaker, where the height of the voice coil is greater than the magnetic gap's height. Using LTspice software, which simulates SPICE, the complete equivalent electrical, mechanical, and acoustic models from the electroacoustic analogies were developed, which allowed verifying the original equivalent model. Sub-circuits were then developed, allowing direct measurement of the velocity and volume velocity emitted by the diaphragm in the complete equivalent mechanical circuit. In addition, three models of electrical inductance and three models of radiation acoustic impedance were implemented. Furthermore, the thermal linear model of the loudspeaker and the resistance model with temperature variation of the voice coil were implemented. The results of the models showed consistency in the measured and simulated responses of the loudspeaker used. The different electrical inductance and radiation acoustic impedance models showed their use and implementation advantages and disadvantages. The thermal linear model showed a reasonable estimation of the measured temperature in the loudspeaker, except for the cooling of the voice coil. Finally, the results of the implementation of the thermal model on the electrical resistance of the loudspeaker showed the expected behavior as indicated in the literature, i.e., increasing the temperature increases the magnitude of the input electrical impedance, decreases the displacement and velocity of the diaphragm and decreases the sound pressure level.

Keywords: Loudspeakers, Temperature Effect, Electrical Impedance, Frequency-response, SPICE Model, SPICE Simulation.

Electroacoustic and thermal analysis of an overhung-type moving-coil loudspeaker using LTspice.

Recibido: 5/10/2022

Aceptado: 30/12/2022

1.- INTRODUCCIÓN

Cerca de un siglo ha pasado desde que los investigadores Rice & Kellogg [1] desarrollaron un modelo de altavoz dinámico de bobina móvil como radiador directo, el cual, salvo algunas pequeñas modificaciones, sigue siendo el más utilizado hasta la actualidad [2,3]. El funcionamiento de este tipo de altavoz se fundamenta en que, al fluir la corriente por la bobina, varía el campo magnético de esta, y al interactuar con el campo magnético estático de la estructura magnética se produce una fuerza que desplaza la bobina a lo largo del entrehierro. Puesto que la bobina está unida al diafragma genera el movimiento de este y, por consecuencia, la radiación de sonido [4,5].

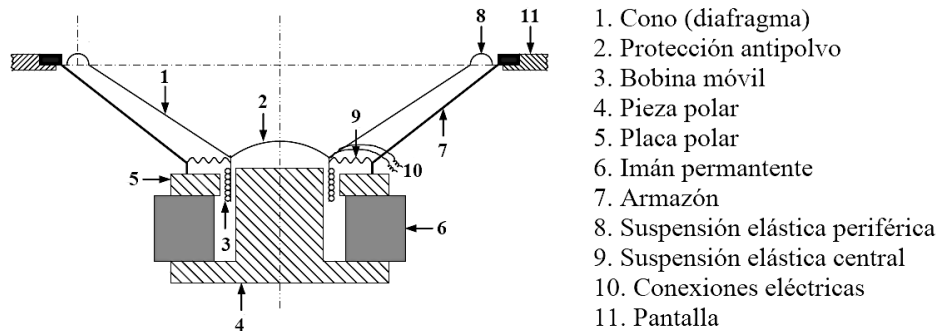


Figura 1

Corte transversal de un típico altavoz dinámico de bobina móvil [5]. Edición propia.

El presente estudio desarrolla y extiende la implementación del modelo de altavoz dinámico de bobina móvil de Leach [4,6,7] en el Programa de Simulación con énfasis en Circuitos Integrados (*Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis*, SPICE), el que permite simular circuitos electrónicos analógicos para obtener la respuesta en frecuencia de distintas magnitudes, potencias y niveles del altavoz, además del análisis transitorio que permite ver la evolución de la temperatura del altavoz en el tiempo. En la actualidad, SPICE sigue siendo una herramienta vigente y poderosa para implementar diversos tipos de modelos científicos [8–16]. Específicamente, en esta investigación, para implementar SPICE, se utilizó el *software gratis* de simulación LTspice®, el cual incluye una interfaz gráfica de captura esquemática y un visor de formas de onda, entre otras ventajas. De esta forma, se desarrolla el circuito equivalente para las características eléctrica, mecánica y acústica, lo que permite mostrar la utilidad, certezas y limitaciones de las analogías electroacústicas para fines pedagógicos en cursos afines al área. Además, se implementan distintos modelos de inductancia eléctrica de entrada. A pesar de muchas veces se utiliza el modelo de la inductancia eléctrica sin pérdida de la bobina móvil del altavoz, esta a altas frecuencias sufre pérdidas de inductancia debido a las corrientes de Foucault en la estructura magnética del altavoz [17]. Existen varios modelos prácticos que implementan estas pérdidas [7,17–19]. Sin embargo, el modelo de Vanderkooy [17], que contiene un único parámetro, falla en la predicción de muchos altavoces en altas frecuencias [18], y el modelo de Dodd et al. [19], el cual contiene tres parámetros, a menudo proporciona un peor ajuste para medir la impedancia de la bobina [19]. En adición, se implementaron distintos modelos de radiación sonora, los que permiten observar el grado de certeza según grado de complejidad del modelo [2,7,20,21]. Por otro lado, se implementó el modelo de resistencia eléctrica con variación de temperatura y el modelo de temperatura lineal [22–28], los cuales se compararon a los resultados experimentales obtenidos. Futuros estudios podrán mostrar estudios de modelos de altavoces de distintas características.

La investigación es organizada como sigue. En la Secc. 2 se presenta toda la teoría que envuelve el estudio. En la Secc. 3 se muestran los materiales y métodos utilizados en la investigación. En la Secc. 4 se presentan los resultados. Finalmente, la Secc. 5 da cuenta de la discusión y conclusiones del estudio.

Las principales contribuciones de la publicación son:

- Desarrollo detallado del circuito completo propuesto por Leach de un altavoz dinámico de bobina móvil.
- Mostrar implementación de circuitos y desarrollo de analogías electroacústicas con fines pedagógicos para estudiantes universitarios de pregrado en cursos de electroacústica

- Comparación entre mediciones reales y simuladas del altavoz.
- Estimación del comportamiento del altavoz frente a la variación de la temperatura.

2.- TEORÍA

A continuación, se presentarán los antecedentes teóricos que constituyen la base de esta investigación. Los temas a tratar serán: 2.1.- Analogías electroacústicas; 2.2.- Modelo lineal electroacústico del altavoz; 2.3.- Respuestas eléctricas, mecánicas y acústicas; 2.4.- Efecto térmico en altavoces.

2.1.- ANALOGÍAS ELECTROACÚSTICAS

Las analogías electroacústicas son la aplicación de la teoría de circuitos eléctricos a la solución de problemas mecánicos y acústicos, permitiendo visualizar, analizar y diseñar el comportamiento de un sistema más fácilmente, sin tener que considerar las ecuaciones diferenciales que gobiernan su comportamiento, como por ejemplo los fenómenos vibratorios en la mecánica clásica. Por tanto, el comportamiento de la mayoría de los transductores, entre ellos el altavoz, puede analizarse con ayuda de circuitos electro-mecano-acústicos que son análogos a los circuitos utilizados en electrónica [5]. El circuito equivalente de un sistema electroacústico, contiene elementos eléctricos conocidos tales como resistencias, bobinas, condensadores y, generadores de voltaje y corriente [2,5]. Para un circuito mecánico en analogía tipo impedancia, la tensión es reemplazada por el voltaje, y la corriente por la velocidad, y en analogía tipo admitancia, inversamente. De igual forma para un circuito acústico en analogía impedancia, la tensión es reemplazada por la presión, y la corriente por la velocidad de volumen. Cabe mencionar que conceptualmente la impedancia es la oposición al flujo de la energía, ya sea eléctrica, mecánica o acústica, y la admitancia su recíproco.

2.2.- PARÁMETROS Y MODELO LINEAL ELECTROACÚSTICO DEL ALTAVOZ REPORTADOS EN LA LITERATURA

Considerando las analogías electroacústicas, las partes y parámetros del altavoz dinámico de bobina móvil, se puede obtener el circuito equivalente de este. Los parámetros lineales son aquellos que modelan el comportamiento del altavoz en su región lineal [2]. Por un lado, los parámetros electromecánicos contemplan los elementos eléctricos y mecánicos que rigen el comportamiento del altavoz y, por otro lado, los parámetros de *Thiele-Small*, también llamados de pequeña-señal, que permiten predecir el comportamiento del altavoz, a través de la teoría de filtros, en distintos encierros acústicos. Estos parámetros, para fines de análisis y diseño, permiten describir de manera más interpretable el comportamiento del altavoz [2,5,6,7]. Con estos parámetros, Leach [4,6,7] propone un circuito equivalente electro-mecano-acústico de un altavoz dinámico de bobina móvil implementado en SPICE el cual permite simular circuitos electrónicos analógicos compuestos por elementos tales como resistencias, condensadores, bobinas, diodos, transistores, entre otros. Dentro de los análisis que permite el programa y que son de interés en la presente investigación, se encuentran el análisis AC el cual permite obtener la respuesta en frecuencia de distintas magnitudes, potencias y niveles del altavoz, y el análisis transitorio que permite ver la evolución de la temperatura del altavoz en el tiempo.

Los modelos de la impedancia de la bobina que se implementarán serán el de Wright [18] quien propone un modelo de la forma $Z = K_r \omega^{X_r} + jK_i \omega^{X_i}$, donde ω es la frecuencia angular, K_r y X_r son constantes que modelan la resistencia, y K_i y X_i son constantes que modelan la inductancia, y cuyo método para determinar sus cuatro parámetros se basa en la medición de la impedancia en dos frecuencias, y el de Leach [7] quien propone un modelo que utiliza sólo dos parámetros de la forma $Z = (j\omega)^{n_e} L_e$, donde n_e y L_e son constantes de inductancia con pérdidas. Por otro lado, cuando el altavoz vibra, las partículas de aire que están en la región más próxima del diafragma experimentan desplazamientos, forzándolo a empujar contra el aire contenido del espacio contiguo [20]. La impedancia acústica sobre la cara de un pistón montado en pantalla infinita Z_{AR} se puede calcular según [20]:

$$Z_{AR} = \frac{\rho c}{S^2} \left[1 - \frac{J_1(2ka)}{ka} + \frac{H_1(2ka)}{ka} \right] \quad (1)$$

donde ρ es la densidad del medio, c es la velocidad de propagación de la onda, S es la superficie del pistón, k es la longitud de onda, a es el radio del pistón, J_1 es la función de Bessel de primer orden del primer tipo y H_1 es la función de Struve de primer orden. Puesto que implementar estas funciones es tedioso, la implementación de aproximaciones en baja y alta frecuencia resulta más sencillo [2]. Leach propone su propia aproximación de la impedancia acústica de radiación [4].

2.3.- RESPUESTAS ELÉCTRICAS, MECÁNICAS Y ACÚSTICAS

La impedancia eléctrica de entrada del altavoz Z_E , se define como la oposición al flujo de la energía eléctrica vista por el generador cuando ambos son conectados, y se expresa como la razón del voltaje complejo v medido en los terminales del altavoz a la corriente compleja i que resulta de este voltaje aplicado [20]:

$$Z_E = \frac{v}{i} \quad (2)$$

De las analogías electro-mecano-acústicas, la impedancia mecánica del diafragma del altavoz Z_M se define como la razón entre la fuerza generada f_D y la velocidad del diafragma u_D , se calcula según [20]:

$$Z_M = \frac{f_D}{u_D} \quad (3)$$

Cabe mencionar que, de igual forma, la impedancia acústica Z_A se define como la razón entre la presión en el diafragma p_D y la velocidad de volumen emitida por el diafragma U_D . Esta última se obtiene según $U_D = u_D \cdot S_D$, donde S_D es el área efectiva del diafragma, y el desplazamiento del diafragma x_D se obtiene según $x_D = u_D/s$, donde s es la frecuencia compleja. Además, el nivel de presión sonora (NPS), que es la respuesta en frecuencia en el eje a la distancia de un metro, puede ser calculado desde U_D , según la expresión [2,20]:

$$NPS = 20 \log \left(\frac{\rho_0 \omega U_D}{2\pi p_0} \right) \quad (4)$$

donde p_0 es la presión de referencia ($2 \cdot 10^{-5}$ Pa), la cual representa el umbral auditivo humano. Finalmente, la eficiencia η se define como la razón de la potencia acústica radiada P_{AR} a la potencia eléctrica de entrada P_E del altavoz, según [20]:

$$\eta = \frac{P_{AR}}{P_E} = \frac{P_{AR}}{P_1 + P_2 + P_{AR}} = \frac{U_D^2 R_{AR}}{i^2 R_E + u_D^2 R_{MS} + U_D^2 R_{AR}} \quad (5)$$

donde P_1 y P_2 son las potencias disipadas en las resistencias eléctrica de la bobina R_E y mecánica de la suspensión del diafragma R_{MS} , respectivamente. Por otro lado, la potencia P_{AR} se disipa en la resistencia acústica de radiación R_{AR} .

2.4.- EFECTO TÉRMICO EN ALTAVOCES

Un altavoz funcionando tenderá a calentar su bobina, siendo importante estudiar la capacidad que tiene ésta para disipar el calor. Dicha capacidad, dependerá de distintos factores, siendo lo más importantes el diseño del entrehierro, el diseño de la bobina y de la habilidad de la estructura magnética del altavoz para disipar calor a los alrededores o ambiente [29]. En general, tanto los altavoces que reproducen baja frecuencia como los de alta potencia, tienen bobinas más grandes, lo que permite una mayor capacidad de disipar el calor. Sin embargo, en altavoces diseñados para reproducir sonidos de alta frecuencia, en los que se necesita que tanto la bobina como el diafragma sean bastante pequeños para reducir la masa en movimiento, la bobina tiene poca capacidad de disipar el calor, pudiendo dañarse fácilmente [21]. Este comportamiento está asociado a la potencia máxima de entrada limitada térmicamente, es decir, cuánto calor puede disipar la bobina antes de dañarse.

El funcionamiento continuo de un altavoz producirá una temperatura elevada en la bobina de este, a través del efecto de calentamiento de las corrientes involucradas. Esto, a su vez, conduce a una resistencia de la bobina ligeramente más alta, que permanece relativamente estable mientras persista el funcionamiento con señales pequeñas [20]. Producto del funcionamiento del altavoz, al aumentar la temperatura en 1°C la resistencia eléctrica aumenta en un 0,4%, por lo tanto, si la bobina del altavoz alcanza una temperatura de 100°C sobre la temperatura ambiente causará que la resistencia eléctrica incremente en un 40% su valor a temperatura ambiente [29]. Existen distintos modelos térmicos lineales de altavoces propuestos en la literatura [22,23,26,27], sin embargo el modelo implementado es el propuesto por Zuccatti [23] (ver más adelante en la Figura 7). Este modelo considera dos caminos del flujo de calor. Por un camino, la mayor parte del calor pasa a través de la bobina móvil, las piezas polares, el imán y el marco al medio ambiente. Por el otro, está el enfriamiento por convección en el que se transfiere el calor de la bobina móvil directamente al aire en movimiento [30]. Cuando se aplica un estímulo de potencia constante al altavoz, el sistema térmico alcanza el equilibrio térmico [28]. La constante de tiempo térmica τ representa el intervalo de tiempo durante el cual la temperatura alcanza un 63% de su valor máximo [31]. Al estar en funcionamiento el altavoz aumenta la temperatura de la bobina móvil, al mismo tiempo que incrementa su resistencia eléctrica, generando una reducción de la eficiencia de referencia η_0 . Por tanto, el aumento de la bobina móvil genera una reducción de la salida del

altavoz, cuyos valores típicos van de 3 a 6 dB. El modelo que describe el aumento de la resistencia eléctrica producto del aumento de la temperatura, es de vasto conocimiento y utilización, el cual se define según [22–24,26–28]:

$$R_E(T) = R_E(T_a)(1 + \alpha(T - T_a)) \quad (6)$$

donde T_a es la temperatura ambiente y $\alpha = 3.93 \cdot 10^{-3}$ es el coeficiente de temperatura del cobre. Button [26] y Klippel [28], también definen la reducción de la eficiencia de referencia y nivel de presión sonora del altavoz con el aumento de la temperatura.

3.- MATERIALES Y MÉTODOS

En esta sección se describe la implementación de distintos modelos de altavoz dinámico de bobina-móvil en el software LTspice, basado en el desarrollo de Leach en SPICE [4,6,7]. Estas implementaciones permitieron obtener la impedancia eléctrica, comportamiento del diafragma, respuesta en frecuencia, eficiencia del altavoz, y comportamiento térmico, también obtenidas en mediciones y simulaciones a través de la teoría clásica de altavoces.

Por otro lado, los parámetros de *Thiele-Small* y electromecánicos utilizados en la implementación del modelo del altavoz corresponden a los obtenidos a través de la medición de la impedancia eléctrica de entrada del altavoz (ver Tablas 1 y 2, respectivamente), para una temperatura ambiente de 19°C, a través del método de la masa añadida [32]. Por otro lado, los parámetros térmicos del modelo lineal se obtuvieron a partir del calentamiento y enfriamiento del altavoz (ver Tabla 3). El altavoz estudiado es de tipo dinámico de bobina-móvil, diseñado para reproducir baja-frecuencia, de diámetro nominal 8" e impedancia nominal 8 Ω.

Tabla 1
Parámetros de *Thiele-Small* medidos del altavoz *Peerless SLS-P830667* de 8".

f_s	Q_{ES}	Q_{MS}	Q_{TS}	V_{AS}
54.4 Hz	0.994	4.53	0.815	16.2 L

Tabla 2
Parámetros electromecánicos medidos del altavoz *Peerless SLS-P830667* de 8".

R_E	L_E	Bl	M_{MS}	C_{MS}	R_{MS}	SPL	η_0
5.43 Ω	1.27 mH (1kHz)	7.96 Tm	33.9 g	0.252 mm/N	2.56 Ns/m	86.1 dB	0.251 %

Tabla 3
Parámetros térmicos medidos del altavoz *Peerless SLS-P830667* de 8".

R_{tv}	C_{tv}	R_{tm}	C_{tm}
4.40 °C/W	17.30 J/°C	2.18 °C/W	1898.3 J/°C

Para describir los procedimientos realizados en este capítulo, estos son organizados en cinco etapas: i) implementación del circuito equivalente completo del altavoz; ii) implementación de los modelos de inductancia con pérdidas de la bobina móvil; iii) implementación de modelos de la impedancia acústica de radiación; iv) implementación del modelo lineal térmico del altavoz y; v) implementación del modelo de resistencia con variación de temperatura en el circuito equivalente. Las etapas se describen en detalle a continuación.

3.1.- IMPLEMENTACIÓN DEL CIRCUITO EQUIVALENTE COMPLETO DEL ALTAVOZ

En primera instancia se implementó el circuito equivalente completo más simple del altavoz, en donde para el circuito eléctrico se consideró el valor de la inductancia eléctrica de la bobina sin pérdidas, la cual se midió como referencia para la

frecuencia de 1kHz. En el circuito mecánico se utilizó el valor de la masa mecánica del diafragma M_{MD} , la cual no considera la masa mecánica de radiación M_{MR} en el cálculo de la masa mecánica total del altavoz M_{MS} . Para el circuito acústico, se consideraron los elementos de masa y resistencia acústica de radiación para bajas y altas frecuencias, respectivamente. El acoplamiento propuesto para la transducción electromecánica consiste en dos fuentes de voltajes controladas por corriente, en que la primera, para la parte eléctrica, el voltaje es controlado por la velocidad del circuito mecánico, y en el segundo, para la parte mecánica, la fuerza es controlada por la corriente del circuito eléctrico. La transducción mecanoacústica se realiza, para la parte mecánica, con una fuente de voltaje controlada por voltaje, en que la fuerza es controlada por la presión, y, para la parte acústica, una fuente de corriente controlada por corriente, en que la velocidad de volumen es controlada por la velocidad lineal (ver Figura 2.a). El análisis se realizó en el dominio de la frecuencia, en un rango comprendido entre 5 Hz y 20kHz, con 1000 puntos por década. Además, en el circuito se incluyeron dos sub-circuitos que permitieron obtener el desplazamiento y nivel de presión sonora generado a un metro del diafragma, a través de la medición de voltaje en los puertos de salida *Dis* y *dB SPL*, respectivamente (ver Figura 2.b).

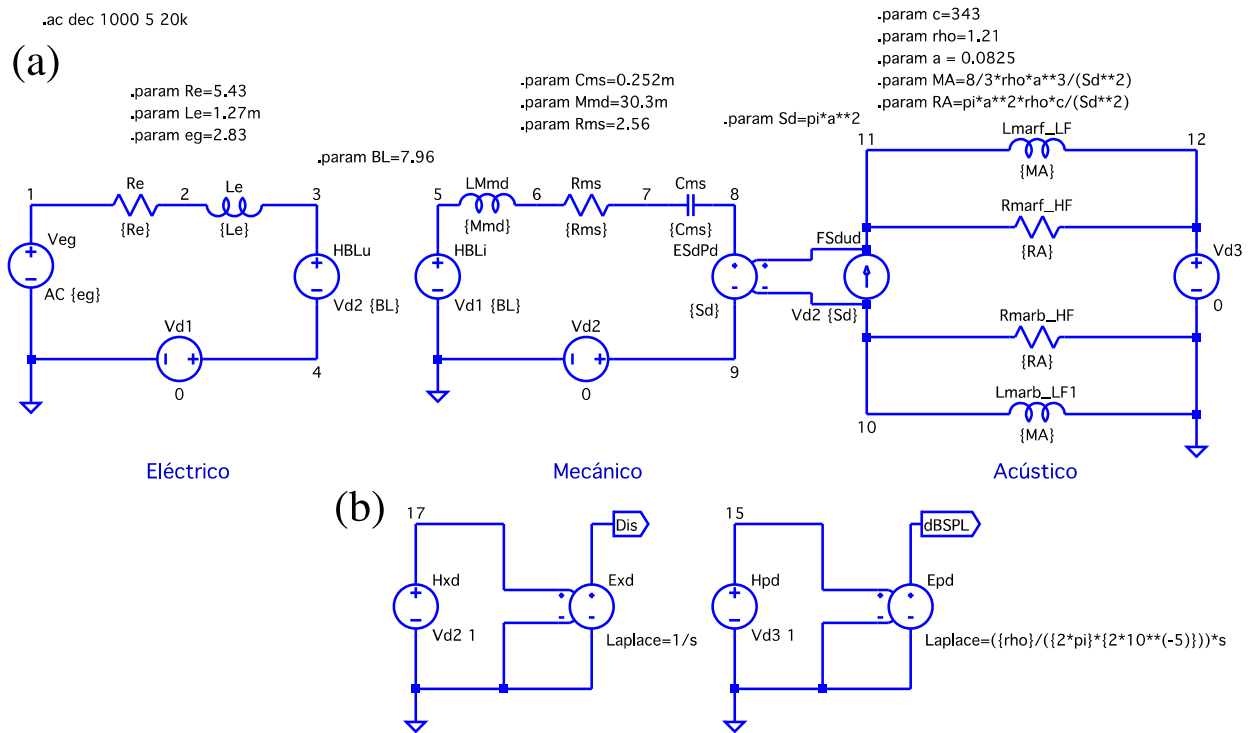


Figura 2

Circuito equivalente completo del altavoz, y sub-circuitos para la medición directa de la respuesta del altavoz implementado en LTspice. (a) Circuito electro-mecano-acústico equivalente completo del altavoz (b) Sub-circuito para medición del desplazamiento y nivel de presión sonora.

Cabe mencionar que en este circuito no es posible utilizar sub-circuitos para obtener directamente la impedancia eléctrica de entrada y la eficiencia del altavoz, debido a la naturaleza del análisis AC, ya que, por un lado, la medición de la impedancia eléctrica de entrada es la razón entre el voltaje y la corriente, y por otro, la medición de la eficiencia se basa en la razón de potencias, en la cual se utiliza la multiplicación entre voltaje y corriente. A pesar de lo anterior, el software permite obtener los resultados a través de la composición de expresiones y/o la exportación de las distintas variables en un archivo de texto. Adicionalmente, con el objetivo de explorar el circuito completo, se implementó el circuito eléctrico equivalente del altavoz, el cual permite obtener los mismos resultados de la impedancia eléctrica de entrada (ver Figura 3). Además, se implementó el circuito mecánico equivalente del altavoz (ver Figura 4.a), el cual permite obtener los mismos resultados de desplazamiento, velocidad, velocidad de volumen emitida por el diafragma y nivel de presión sonora, mediante la utilización de sub-circuitos (ver Figura 4.b). Para obtener el circuito equivalente acústico basta hacer las transformaciones $Z_A = Z_M/S_D^2$ y $p_D = f_D/S_D$ en todas las fuentes generadoras y elementos del circuito mecánico.

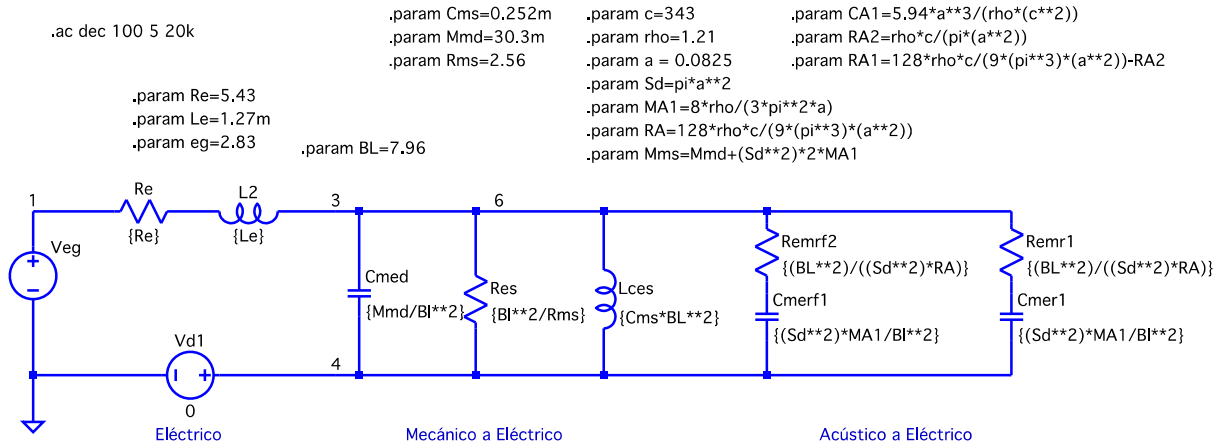


Figura 3

Circuito eléctrico equivalente del altavoz implementado en LTspice.

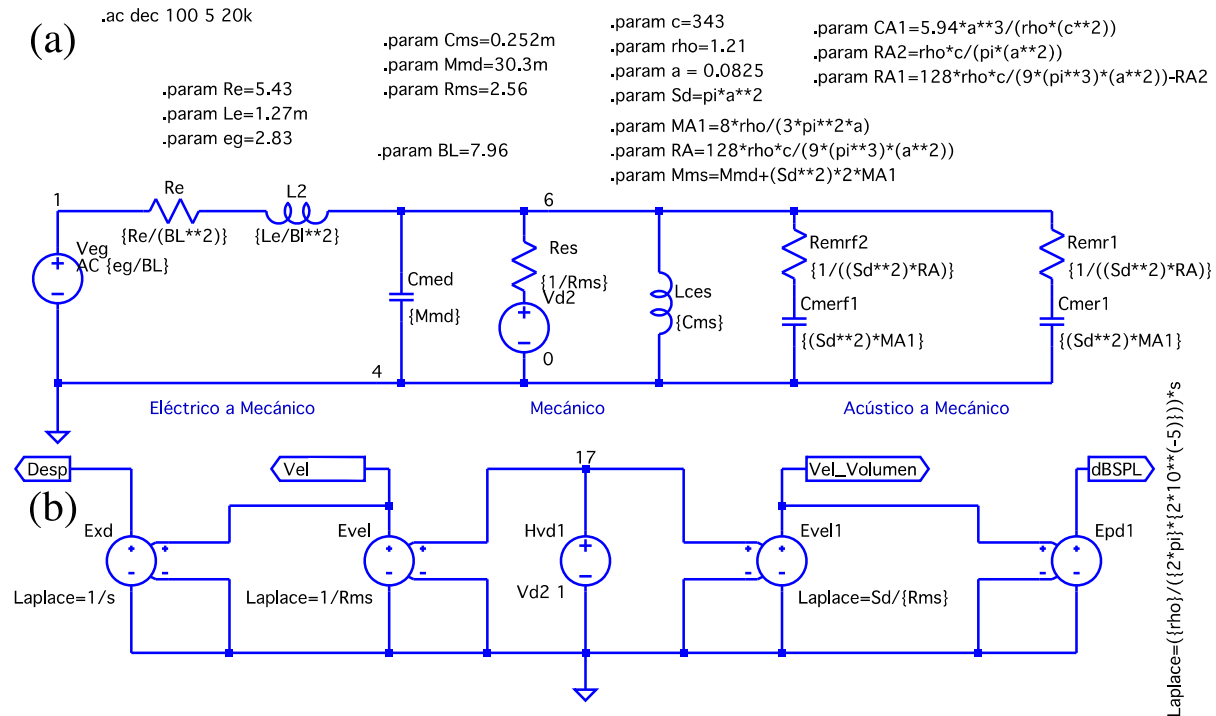


Figura 4

Circuito mecánico equivalente del altavoz y sub-circuitos para la medición directa de la respuesta del altavoz implementado en LTspice. (a) Circuito mecánico equivalente del altavoz (b) Sub-circuitos para medición de desplazamiento, velocidad, velocidad de volumen y nivel de presión sonora.

3.2.- IMPLEMENTACIÓN DE MODELOS INDUCTANCIA CON PÉRDIDAS DEL ALTAVOZ DE BOBINA MÓVIL

En el circuito eléctrico del circuito equivalente completo, es posible implementar los distintos modelos de inductancia con pérdidas de la bobina móvil del altavoz. En la Figura 5.a se puede observar que el modelo de inductancia sin pérdidas eléctricas, sólo está representado por un inductor de valor L_E . Sin embargo, tanto el modelo de Leach como el de Wright, fueron implementados por generadores de corriente controlado por voltaje, debido a que no hay elementos eléctricos puros que permitan implementar ambos modelos (ver Figuras 5.b y 5.c respectivamente). Los generadores de voltaje independiente

de valor nulo permiten medir directamente la corriente.

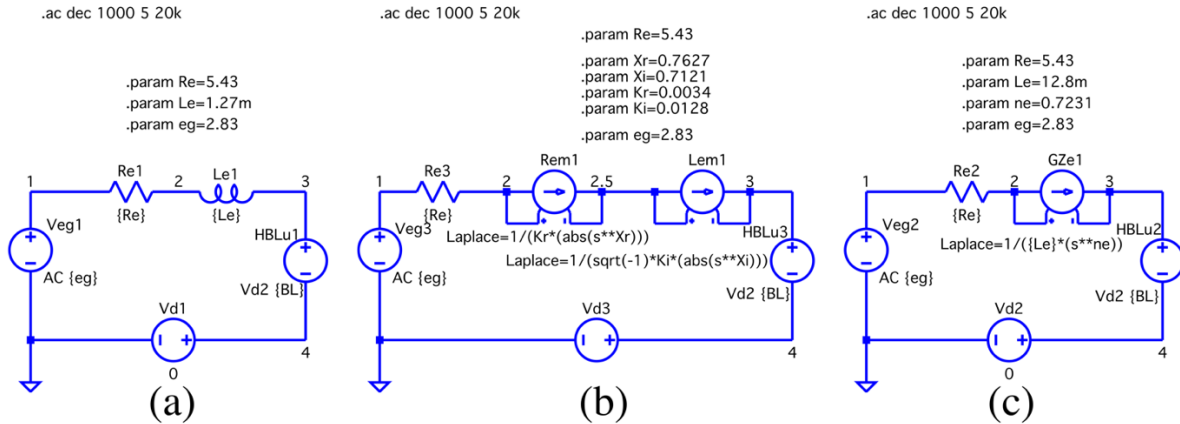


Figura 5

Diferentes modelos de inductancia con pérdidas pertenecientes a la parte eléctrica del circuito equivalente del altavoz implementado en LTspice. (a) Modelo inductancia sin pérdidas (b) Modelo inductancia con pérdidas de Wright (c) Modelo inductancia con pérdidas de Leach.

3.3.- IMPLEMENTACIÓN DE MODELOS DE LA IMPEDANCIA ACÚSTICA DE RADIACIÓN

En la Figura 6 se puede observar la implementación de tres modelos relevantes de la impedancia acústica de radiación [2,4], con los elementos acústicos para su aproximación sobre ambas caras del pistón montado en pantalla infinita. Puesto que se considera la impedancia sobre ambas caras del pistón, la magnitud de ésta aumenta al doble, entonces, los elementos acústicos utilizados para la resistencia e inductancia aumentan al doble. Por otro lado, la capacitancia disminuye a la mitad. Las fuentes de corriente controladas por voltaje del circuito del centro (Rmarf LF1 y Lmarf HF1), representan la resistencia acústica (resistor) en la aproximación en bajas frecuencias, y la masa acústica (inductor) en la aproximación de altas frecuencias, donde ambas son dependientes de la frecuencia y por ello, la razón de la implementación de estas fuentes controladas. Para obtener la impedancia acústica se dividió el voltaje en el nodo 1 (V1) en la corriente por el generador Vd3.

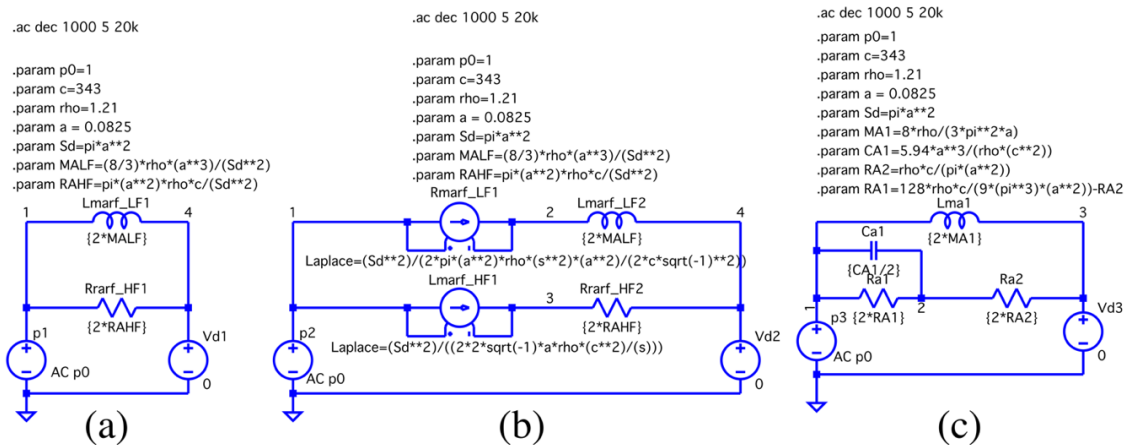


Figura 6

Diferentes modelos de la impedancia acústica de radiación sobre ambas caras del pistón montado en pantalla infinita pertenecientes a la parte acústica del circuito equivalente del altavoz implementado en LTspice. (a) Impedancia acústica de radiación aproximada simple (b) Impedancia acústica de radiación aproximada (c) Impedancia acústica de radiación de Leach.

3.4.- IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO LINEAL TÉRMICO DEL ALTAVOZ DE BOBINA MÓVIL

En la cuarta etapa, se implementó el modelo lineal térmico del altavoz con los parámetros térmicos obtenidos del altavoz. La implementación se caracterizó por la utilización del análisis transitorio, el cual se realiza en el dominio del tiempo y calcula lo que sucede cuando el circuito se enciende y se ejecuta. Además, se utilizaron un generador de corriente para simular el calor de entrada, con una señal de excitación del tipo lineal a trozos (*Piecewise Linear*, PWL) para entregar calor durante las primeras horas y luego dejar de actuar y; un generador de voltaje para simular la temperatura ambiente (ver Figura 7).

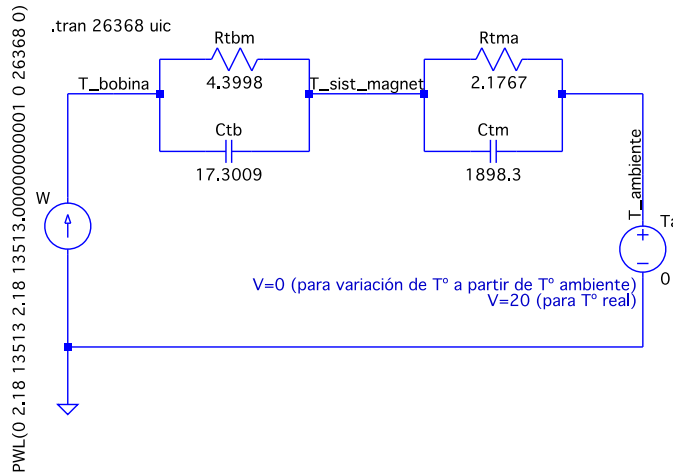


Figura 7

Modelo lineal térmico del altavoz dinámico de bobina móvil implementado en LTspice.

3.5.- IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DE RESISTENCIA CON VARIACIÓN DE TEMPERATURA EN CIRCUITO EQUIVALENTE

Finalmente, se implementó el modelo clásico de resistencia con variación de temperatura en el circuito equivalente del altavoz de bobina móvil, considerando los parámetros obtenidos en el capítulo anterior, todo ello a temperatura ambiente de 20°C (ver Tabla 3). Para la simulación se utilizaron intervalos de 10°C, con una temperatura mínima de 0°C y una máxima de 200°C (ver Figura 8).

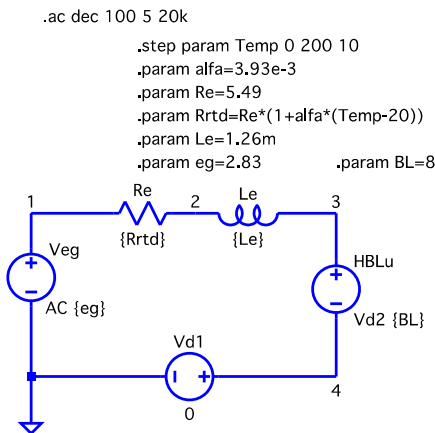


Figura 8

Circuito eléctrico del altavoz, considerando el modelo clásico de resistencia con variación de temperatura en LTspice.

4.- RESULTADOS

Los resultados son presentados siguiendo las cinco etapas descritas en la sección anterior.

4.1.- RESULTADOS DE SIMULACIÓN DEL CIRCUITO EQUIVALENTE DEL ALTAVOZ

Los resultados obtenidos, a través de la simulación de la impedancia eléctrica de entrada del circuito equivalente del altavoz de las Figuras 2-4, dan cuenta de la equivalencia de la simulación en LTspice con respecto a los resultados analíticos obtenidos a través de la teoría de altavoces (ver Figura 9).

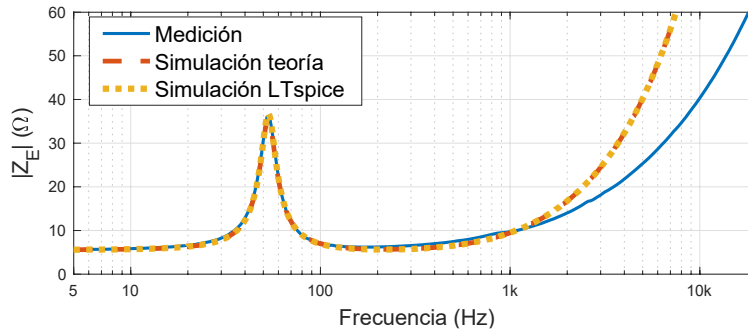


Figura 9

Magnitud de la impedancia eléctrica de entrada del altavoz $|Z_E|$ medida, y simulaciones teórica y en LTspice.

A partir de las simulaciones del circuito equivalente del altavoz de la Figuras 2 y 4, también se evidencian respuestas similares a las obtenidas a través de la teoría analítica, para el desplazamiento x_D , velocidad u_D y velocidad de volumen U_D (ver Figura 10).

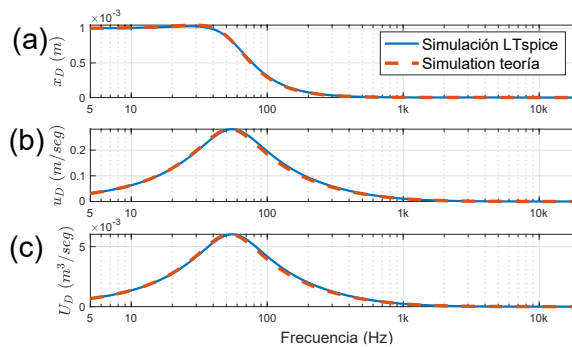


Figura 10

Respuestas mecano-acústicas del altavoz mediante simulación en LTspice. (a) Desplazamiento x_D , (b) Velocidad del diafragma u_D , (c) Velocidad de volumen emitida por el diafragma U_D (abajo).

Por otro lado, en la Figura 11 también se observa que la respuesta de nivel de presión sonora da resultados bastante similares a los obtenidos anteriormente. No obstante, para el caso de la eficiencia, el comportamiento no es plano en el rango de frecuencias medias como en la respuesta obtenida a través de la teoría, a pesar de ser cercano al valor de eficiencia de semiespacio para la banda de frecuencias medias de un 0,214%. La máxima eficiencia encontrada en la banda de la frecuencia de resonancia mecánica f_s , es aproximadamente de un 1,5%. Por lo tanto, la eficiencia máxima también aumenta, en un 41%. Estas leves diferencias en la eficiencia del altavoz se deben, principalmente, a la determinación de la potencia acústica radiada, puesto que en el modelo simple implementado se utilizó la resistencia acústica de radiación a través de la aproximación sólo en alta frecuencia. Sin embargo, anteriormente, la eficiencia se obtuvo a través de la función de Bessel de primer orden J_1 , la cual considera el comportamiento en baja y alta frecuencia de manera más exacta. Se evidencia que ambas respuestas de la eficiencia resultan más similares sobre el rango del pistón, rango en el cual se modela la resistencia acústica de radiación (ver

Figura 12).

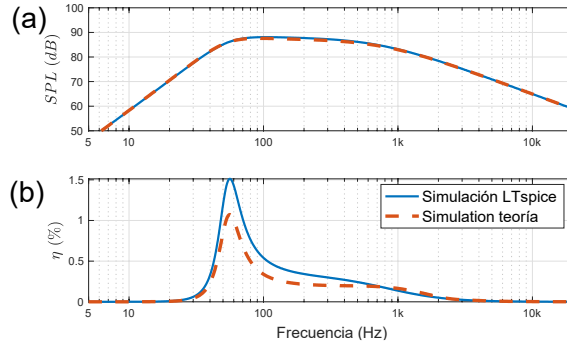


Figura 11

Respuestas del altavoz montado en pantalla infinita, medidas a 1 metro de distancia del diafragma mediante simulación en LTspice. (a) Nivel de presión de presión sonora SPL (b) Eficiencia η .

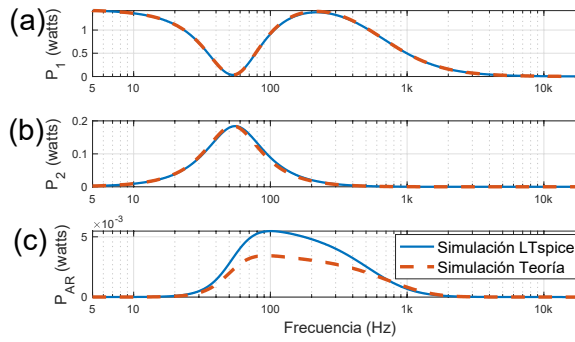


Figura 12

Respuesta potencia eléctrica de entrada disipada en el altavoz mediante simulación en LTspice. (a) Potencia disipada en la resistencia eléctrica de la bobina (b): Potencia disipada en la resistencia mecánica del diafragma (c) Potencia disipada en la resistencia acústica sobre la cara frontal del diafragma.

4.2.- RESULTADOS DE SIMULACIÓN DE LOS MODELOS DE INDUCTANCIA CON PÉRDIDAS DE LA BOBINA MÓVIL

En la Figura 13 se observa la impedancia eléctrica de entrada, considerando el circuito equivalente completo del altavoz para cada uno de los modelos implementados de la Figura 4.

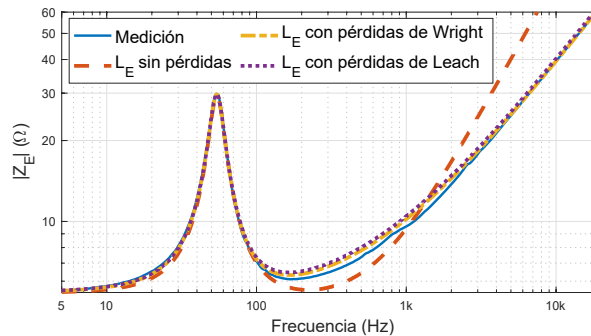


Figura 13

Respuesta magnitud impedancia eléctrica de entrada $|Z_E|$ considerando distintos modelos para la inductancia de la bobina móvil implementado en LTspice.

4.3.- RESULTADOS DE SIMULACIÓN DE LOS MODELOS DE LA IMPEDANCIA ACÚSTICA DE RADIACIÓN

En la Figura 14 se puede observar la impedancia acústica de radiación Z_{AR} sobre las dos caras del diafragma montado sobre pantalla infinita de los distintos modelos. Cabe mencionar que estos modelos se compararon con la impedancia acústica de la Ecuación 1, que utiliza las funciones de Bessel y Struve. Puesto que la impedancia es sobre ambas caras del pistón, su magnitud también aumenta al doble, lo que implica que el nivel de impedancia aumenta en 6 dB. En la misma Figura 14 se puede apreciar que, omitiendo las ondulaciones, los modelos difieren sobre el rango del pistón ($ka = 1$). Al comparar cada modelo, se evidencia que el circuito acústico que propone Leach es más preciso y, el modelo más simple (aproximado) el menos preciso sobre el rango del pistón. No obstante, al considerar el rango completo de frecuencias, ambos modelos entregan una respuesta satisfactoria y similar.

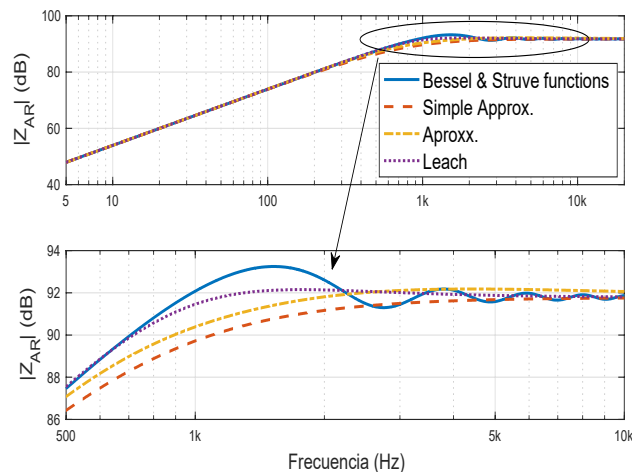


Figura 14

Impedancia acústica de radiación $|Z_{AR}|$ sobre dos caras del diafragma montado sobre pantalla infinita, de distintos modelos implementados en LTspice.

4.4.- RESULTADO DE SIMULACIÓN DEL MODELO LINEAL TÉRMICO DEL ALTAVOZ DE BOBINA MÓVIL

Los resultados de la simulación del modelo lineal térmico del altavoz, dan cuenta de la variación de la temperatura de la bobina móvil y del imán, respecto de la temperatura ambiente, con un comportamiento similar al descrito en los resultados del capítulo de caracterización. Adicionalmente, los resultados dan cuenta del pequeño intervalo de tiempo en el cual fluye calor por la capacidad térmica de la bobina móvil, y el largo intervalo de tiempo en el cual fluye calor por la capacidad térmica de la estructura magnética (ver Figura 15.a). Por otro lado, los resultados del flujo de calor por la resistencia térmica, entre la bobina y la estructura magnética, demuestran que, en un pequeño intervalo de tiempo al calentarse la bobina, comienza a fluir todo el calor por ésta, dejando de fluir al enfriarse. Los resultados del flujo de calor por la resistencia térmica entre la estructura magnética y el ambiente, dan cuenta que en un largo intervalo de tiempo el flujo comienza a aumentar hasta alcanzar el equilibrio térmico en funcionamiento del altavoz y, comienza a disminuir hasta alcanzar el equilibrio térmico al dejar de funcionar el altavoz (ver Figura 15.b).

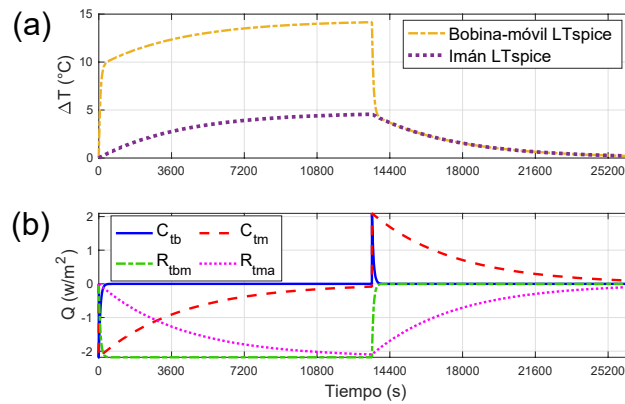


Figura 15

Simulación del modelo lineal térmico del altavoz en LTspice. (a) Variación de la temperatura de la bobina móvil y estructura magnética con respecto a la temperatura ambiente (b) Flujo de calor a través de las capacidades y resistencias térmicas.

En la Figura 16 se pueden observar los resultados de la comparación de las temperaturas medidas con las simuladas en LTspice, los cuales dan cuenta que, al igual que en el capítulo de caracterización, el modelo se ajusta correctamente al comportamiento real, excepto para la caída de la temperatura de la bobina móvil, posterior al inicio del enfriamiento.

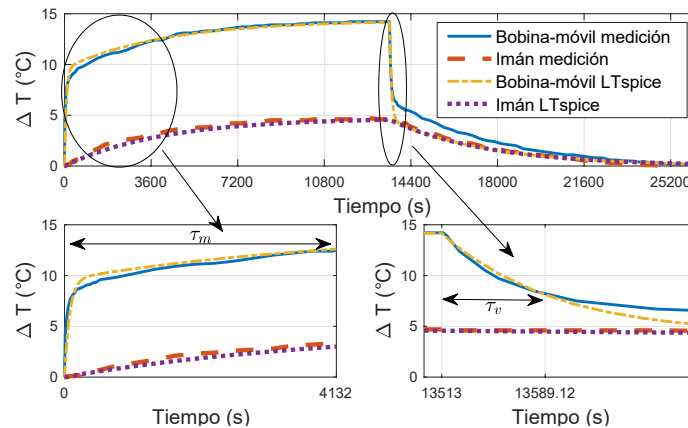


Figura 16

Medición y simulación de la variación de temperatura de la bobina móvil y del imán del altavoz hasta alcanzar el equilibrio térmico mediante calentamiento y enfriamiento LTspice.

4.5.- RESULTADOS DE SIMULACIÓN DE LOS MODELOS DE RESISTENCIA CON VARIACIÓN DE TEMPERATURA EN CIRCUITO EQUIVALENTE

Los resultados de la simulación del modelo clásico de resistencia, con variación de temperatura en la parte eléctrica del circuito equivalente del altavoz, dan cuenta de similitudes obtenidas con el capítulo anterior en relación a: el aumento de la temperatura, el aumento de la impedancia eléctrica, la disminución del desplazamiento, velocidad y velocidad de volumen del diafragma y, disminución de la sensibilidad y eficiencia del altavoz. A pesar de estas similitudes, se observa una diferencia importante, pues la frecuencia de resonancia mecánica no varía con el aumento de la temperatura, debido a la no variación de los parámetros mecánicos del altavoz [6].

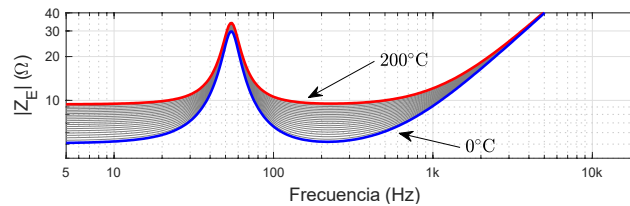


Figura 17

Simulación de la magnitud de la impedancia eléctrica de entrada del altavoz según modelo de resistencia con variación de temperatura en LTspice.

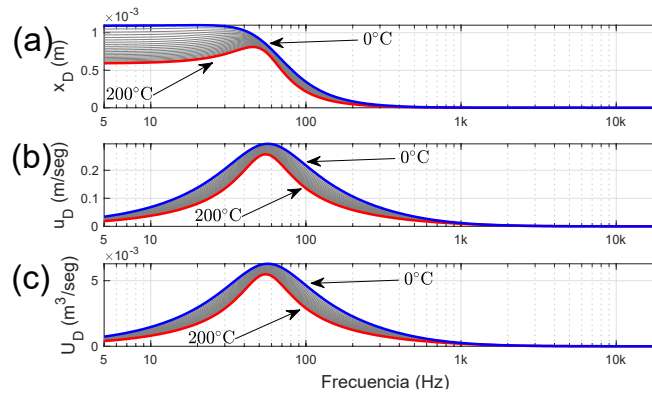


Figura 18

Simulación del comportamiento del diafragma del altavoz según modelo de resistencia con variación de temperatura en LTspice. (a) Desplazamiento del diafragma (b) Velocidad del diafragma (b) Velocidad de volumen emitida por el diafragma.

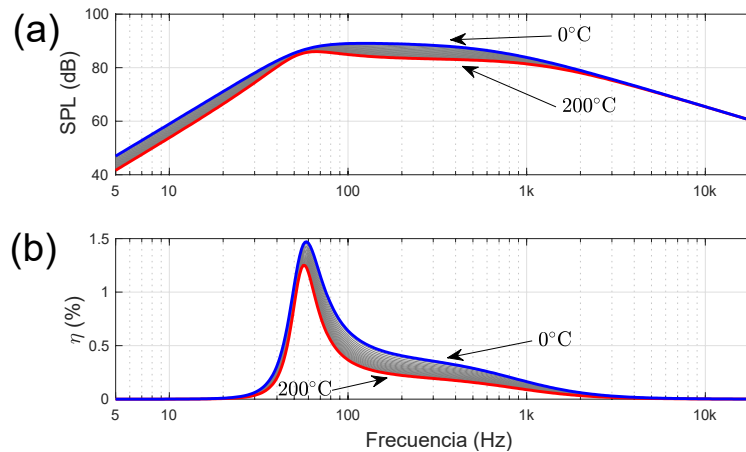


Figura 19

Simulación de la sensibilidad y eficiencia del altavoz según modelo de resistencia con variación de temperatura en LTspice. (a) Sensibilidad. (b) Eficiencia.

5.- DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La presente investigación tuvo por objetivo generar una propuesta práctica, a través de la implementación y simulación del altavoz dinámico de bobina móvil en LTspice, con el fin de ser utilizado como una herramienta pedagógica en el estudio del

comportamiento de altavoces. Esta implementación permite concluir que los resultados obtenidos de la simulación son consistentes con los obtenidos mediante medición y a través de la teoría clásica de altavoces, comprobándose que la eficiencia, por la simplificación del modelo de impedancia de radiación, es el único resultado que no coincidió.

La implementación del circuito equivalente completo del altavoz, basado en el trabajo desarrollado por Leach [4,6,7], permitió el desarrollo de los circuitos eléctricos, mecánicos y acústicos equivalentes completos. Además, permitió explorar modelos de inductancia con pérdidas y modelos de impedancia acústica de radiación. Adicionalmente, se desarrollaron sub-circuitos que permitieron la medición inmediata de los distintos comportamientos y respuestas del altavoz. Por otro lado, la implementación del modelo lineal térmico en LTspice, permite observar no sólo la variación de la temperatura, sino también como fluye el calor a través de los distintos elementos.

Finalmente, se puede señalar que LTspice es una herramienta simple, pero poderosa. La que puede considerarse como una herramienta de gran valor pedagógico en el proceso de aprendizaje del comportamiento de un transductor electroacústico, como fue en este caso un altavoz dinámico de bobina móvil de tipo *overhung*. Lo anterior, pues permite visualizar y simular diversos comportamientos ligados a la teoría de circuitos eléctricos y todo ello, a partir de código abierto, al alcance de estudiantes y docentes.

REFERENCIAS

1. Rice CW, Kellogg EW. Notes on the Development of a New Type of Hornless Loud Speaker. *Trans Am Inst Electr Eng.* 1925;XLIV:461–80.
2. Ortega BP, Romero MR. *Electroacústica, altavoces y micrófonos*. Pearson Prentice Hall; 2003.
3. Newell P, Holland K. *Loudspeakers: for music recording and reproduction*. 2ª ed. Routledge; 2019.
4. Leach Jr. WM. *Introduction to electroacoustics and audio amplifier design*. 4th ed. Kendall/Hunt Publishing Company; 2010.
5. Beranek LL, Mellow T. *Acoustics: Sound Fields and Transducers*. 2da ed. Acoust. Sound Fields Transducers. Academic Press; 2019.
6. Leach Jr. WM. Computer-Aided Electroacoustic Design with SPICE. *J Audio Eng Soc* [Internet]. 1991;39:551–63. Recuperado a partir de: <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=5974>
7. Leach Jr. WM. Loudspeaker voice-coil inductance losses: circuit models, parameter estimation, and effect on frequency response. *J Audio Eng Soc. Audio Engineering Society*; 2002;50:442–50.
8. Aguirre FL, Suñé J, Miranda E. SPICE Implementation of the Dynamic Memdiode Model for Bipolar Resistive Switching Devices. *Micromachines*. 2022;13.
9. Mladenov V, Kirilov S. A Simplified Tantalum Oxide Memristor Model, Parameters Estimation and Application in Memory Crossbars. *Technologies*. 2022;10.
10. Dvornikov O V, Dziatlau VL, Tchekhovski VA, Prokopenko NN, Zhuk AA, Bugakova A V. Modernization of Low-Temperature JFET Models Built into LTspice CAD Systems, Taking into Account the Results of their Experimental Study. *2020 IEEE Lat Am Electron Devices Conf.* 2020. p. 1–4.
11. Hossain MM, Ceccarelli L, Rashid AU, Kotecha RM, Mantooth HA. An improved physics-based LTSpice compact electro-thermal model for a SiC power MOSFET with experimental validation. *IECON 2018-44th Annu Conf IEEE Ind Electron Soc.* 2018. p. 1011–6.
12. Dautovic S, Samardzic N, Juhas A, Ascoli A, Tetzlaff R. Simscape and LTspice models of HP ideal generic memristor based on finite closed form solution for window functions. *2021 28th IEEE Int Conf Electron Circuits, Syst.* 2021. p. 1–6.
13. Ferreira, Mariana Marques and Miguel, Maria Paula Medeiros Gomes and de Souza, Cleonilson Protasio and Baiocchi O. An Experimental Validation of a Thermoelectric Generator LTspice Model for Energy Harvesting. *2021 IEEE 12th Annu Inf Technol Electron Mob Commun Conf.* 2021;1046--1051.
14. Solovyeva, Elena B and Azarov VA. Comparative Analysis of Memristor Models with a Window Function Described in LTspice. *2021 IEEE Conf Russ Young Res Electr Electron Eng.* 2021;1097--1101.
15. Sixdenier, Fabien and Scorretti, Riccardo and Davister, Nicolas and Geuzaine, Christophe and Henrotte F. Energetic based hysteresis model implementation in LTspice. *23rd Conf Comput Electromagn Fields (COMPUMAG 2021)*. 2022;
16. Schulze, Steffen and Al-Hamid, Moawia and Leone M. Network Model of a Transmission Line with a Cable Ferrite for Simulation in LTspice. *2021 IEEE Int Jt EMC/SI/PI EMC Eur Symp.* 2021. p. 1099--1104.
17. Vanderkooy J. A model of loudspeaker driver impedance incorporating eddy currents in the pole structure. *J audio Eng Soc.* 1988;
18. Wright JR. An empirical model for loudspeaker motor impedance. *J audio Eng Soc.* 1990;38:749–54.
19. Dodd M, Klippel W, Oclew-Brown J. Voice coil impedance as a function of frequency and displacement. *J audio Eng Soc.*

- 2004;
20. Davis D, Patronis E, Brown P. Sound system engineering. 4ª ed. Ballou G, editor. Taylor & Francis; 2013.
 21. Kleiner M. Electroacoustics. CRC Press; 2013.
 22. Henriksen CA. Heat Transfer Mechanisms in Loudspeakers; Analysis, Measurement and Design. Audio Eng Soc Conv 80. 1986.
 23. Zuccatti C. Thermal parameters and power ratings of loudspeakers. J Audio Eng Soc. Audio Engineering Society; 1990;38:34–9.
 24. Penkov G, Valtchev P. Overheat Protection Circuits for Moving-Coil Loudspeakers. Audio Eng Soc Conv 90 [Internet]. 1991. Recuperado a partir de: <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=5657>
 25. Button DJ. A Loudspeaker Motor Structure for Very High Power Handling and High Linear Excursion. J Audio Eng Soc [Internet]. 1988;36:788–97. Recuperado a partir de: <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=5128>
 26. Button DJ. Heat dissipation and power compression in loudspeakers. J Audio Eng Soc. Audio Engineering Society; 1992;40:32–41.
 27. Chapman PJ. Thermal simulation of loudspeakers. Audio Eng Soc Conv 104. 1998.
 28. Klippel W. Nonlinear modeling of the heat transfer in loudspeakers. J Audio Eng Soc. Audio Engineering Society; 2004;52:3–25.
 29. Danley T, Jones D. Handbook for sound engineers. En: Ballou G, editor. 5ª ed. Hoboken, NJ: Taylor and Francis; 2015. p. 703–61. Recuperado a partir de: <https://cds.cern.ch/record/2010082>
 30. Klippel W. Thermal parameter measurement [Internet]. 2012. Recuperado a partir de: http://www.klippel.de/fileadmin/klippel/Files/Know_How/Application_Notes/AN_18_Measurement_of_Linear_Thermal_Parameters.pdf
 31. Eargle J. Loudspeaker handbook. 2ª ed. Springer Science & Business Media; 2003.
 32. Logvin D. Test and Measurement Focus. 2020 mar.

CONFLICTO DE INTERÉSES

No existe conflicto de intereses entre los autores, ni con ninguna institución a la que cada uno está afiliado, ni con ninguna otra institución. Las opiniones expresadas aquí son únicamente responsabilidad de los autores y no representan la posición de la Institución o las instituciones a las que están afiliados.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Nicolás F. Quinteros: Conceptualización, Análisis Formal, Investigación, Metodología, Validación - Verificación, Visualización, Software, Recursos, Redacción - borrador original y Redacción – revisión y edición.

Víctor M. Espinoza: Conceptualización, Supervisión, Validación – Verificación, Redacción – revisión y edición.

AUTORES

Nicolás F. Quinteros, Ingeniero en Sonido con mención en Señales y Sistemas Sonoros, Magíster en Acústica y Vibraciones, Universidad de Chile, Santiago, Chile, nicolasquinteros@uchile.cl, <https://orcid.org/0000-0002-8813-4833>. Sus intereses de investigación son procesamiento de señales, transductores de audio, y vibroacústica.

Víctor M. Espinoza, Ingeniero Civil en Sonido y Acústica, Doctor en Ingeniería Electrónica, Universidad de Chile, Santiago, Chile, vespinoza@uchile.cl, <https://orcid.org/0000-0001-9013-6830>. Sus intereses de investigación son procesamiento de audio, electroacústica, ingeniería biomédica, procesamiento de voz, y evaluación clínica de la voz.



Esta revista se publica bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Sin Derivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)