

Análisis paramétrico de bobinas espirales EMAT mediante simulaciones multifísicas en COMSOL

Parametric analysis of EMAT spiral coils through multiphysics simulations in COMSOL

Ing. Miguel Ángel Ríos Tarazona ¹, Dr. Jhon Jairo Padilla Aguilar ²,
MSc. Sandra Johana Benítez Muñoz ¹, Dr. Luis Ángel Silva ³,
MSc. Juan Carlos Villamizar Rincón ³, Ing. Daniel Felipe Bernal Mejía ²,
Dr. Mauricio Barrios Castellanos ³

¹  Fundación Universitaria de San Gil, IDENTUS, San Gil, Santander, Colombia.

²  Corporación para la Investigación de la Corrosión, Tecnologías de Inspección, Piedecuesta, Santander, Colombia.

³  Universidad Pontificia Bolivariana, Bisemic, Piedecuesta, Santander, Colombia.

Correspondencia: investigadordit1.bga@upb.edu.co

Recibido: 02 junio 2026. **Revisado:** 18 agosto 2026. **Aceptado:** 07 septiembre 2026. **Publicado:** 09 septiembre 2026.

Cómo citar: M. A. Ríos Tarazona, J. J. Padilla Aguilar, S. J. Benítez Muñoz, L. A. Silva, J. C. Villamizar Rincón, D. F. Bernal Mejía, and M. Barrios Castellanos, "Análisis paramétrico de bobinas espirales EMAT mediante simulaciones multifísicas en COMSOL", *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada (RCTA)*, vol. 2, no. 48, pp. 236–250, sept. 2026, doi: [10.24054/rcta.v2i48.4522](https://doi.org/10.24054/rcta.v2i48.4522)

Esta obra está bajo una licencia internacional
Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0.



Resumen: Este trabajo presenta un análisis paramétrico de transductores acústicos electromagnéticos (EMAT) de bobina en espiral mediante simulaciones multifísicas en COMSOL Multiphysics. El modelo integra una bobina en espiral, un imán permanente y una placa conductora de ensayo y se resuelve en un dominio bidimensional plano en el que la espiral se representa mediante la sección transversal de sus conductores. El estudio evalúa la influencia de los parámetros de la señal de excitación y de la geometría de la bobina y del imán sobre la generación y propagación de ondas ultrasónicas en placas metálicas. La campaña comprende diez parámetros evaluados en seis niveles cada uno, mediante un diseño de variación de un factor a la vez, con una condición base común situada en el punto medio de cada intervalo. Los resultados muestran que tanto el coeficiente de la envolvente del pulso de excitación como la amplitud de la corriente aplicada producen variaciones cuantificables en la magnitud y la duración de la respuesta. Las relaciones de aspecto del imán y los parámetros del devanado modifican la distribución del campo magnético y, en consecuencia, la respuesta mecánica simulada. Las variaciones de la frecuencia central de la portadora evidencian un compromiso entre la amplitud de la señal y la resolución temporal, lo cual resulta determinante para la detección de defectos. Estos hallazgos proporcionan lineamientos prácticos para optimizar el diseño de EMATs de bobina en espiral, lo que contribuye a mejorar la calidad de la señal y la confiabilidad en aplicaciones de ensayos no destructivos.

Palabras clave: transductor acústico electromagnético, ensayos no destructivos, ultrasonido, mantenimiento predictivo, diseño mecánico.

Abstract: This work presents a parametric analysis of spiral-coil electromagnetic acoustic transducers (EMATs) using multiphysics simulations in COMSOL Multiphysics. The model integrates a spiral coil, a permanent magnet, and a conductive test plate, and is solved

on a two-dimensional planar domain in which the cross-section of its conductors represents the spiral. The study evaluates the influence of excitation-signal parameters and coil and magnet geometry on the generation and propagation of ultrasonic waves in metallic plates. The campaign comprises ten parameters, each evaluated at six levels, using a one-factor-at-a-time design, with a common base condition at the midpoint of each interval. The results show that both the envelope coefficient of the excitation pulse and the amplitude of the applied current yield quantifiable variations in the response magnitude and duration. The magnet aspect ratios and the winding parameters modify the magnetic field distribution and, consequently, the simulated mechanical response. Variations of the carrier central frequency reveal a trade-off between signal amplitude and temporal resolution, which is decisive for defect detection. These findings provide practical guidelines for optimizing the design of spiral-coil EMATs, thereby improving signal quality and reliability in non-destructive testing applications.

Keywords: electromagnetic acoustic transducer, non-destructive testing, ultrasound, predictive maintenance, mechanical design.

1. INTRODUCCIÓN

Las tuberías utilizadas en la industria del petróleo y gas son componentes críticos que requieren inspecciones periódicas para garantizar su integridad y seguridad [1]. La presencia de grietas o defectos puede provocar fugas, fallas catastróficas y riesgos ambientales, por lo que resulta indispensable contar con técnicas de inspección eficaces [2]-[4].

Los Ensayos no Destructivos (END o NDT, por sus siglas en inglés) constituyen un conjunto de técnicas empleadas para evaluar las propiedades de un material o sistema sin ocasionar daño. Estas metodologías se emplean ampliamente en diversos sectores industriales, especialmente en el transporte de hidrocarburos, para detectar discontinuidades en las tuberías. Entre las técnicas más comunes se encuentran la inspección visual, el ultrasonido, la radiografía, las partículas magnéticas y los líquidos penetrantes [5], [6]. Actualmente, los NDT permiten mejorar la eficiencia en la inspección de componentes metálicos y la confiabilidad operativa de las instalaciones.

Entre los distintos tipos de transductores ultrasónicos empleados en la industria, el transductor acústico electromagnético (EMAT) constituye una alternativa al ultrasonido convencional. A diferencia del transductor ultrasónico convencional, el EMAT no requiere acoplante para transmitir ondas al material y puede operar en un rango muy amplio de temperaturas [7], [8]. El sistema EMAT está compuesto principalmente por un imán permanente, una bobina de excitación y una muestra de prueba. La bobina genera un campo electromagnético variable que, al interactuar con el campo magnético del imán

permanente, produce fuerzas de Lorentz capaces de generar ondas acústicas en el material.

Estas ondas acústicas se propagan a través de la pieza hasta encontrar una discontinuidad o el límite del material, lo que genera reflexiones que permiten identificar defectos o estimar el espesor de la muestra [9]-[11]. La amplitud del desplazamiento condiciona la relación señal-ruido alcanzable y el tiempo de vuelo condiciona la resolución en espesor [12].

El funcionamiento del EMAT puede modelarse mediante fuerzas de Lorentz en el software *COMSOL Multiphysics*, lo que permite optimizar su diseño y mejorar su desempeño en la detección de defectos en materiales metálicos. En la tecnología EMAT se emplean diversas configuraciones de bobinas para generar distintos tipos de ondas, tanto longitudinales como transversales. Entre ellas, las bobinas espirales se emplean ampliamente por su capacidad de directividad y focalización de la onda generada.

El diseño de un EMAT de bobina espiral obliga a fijar simultáneamente parámetros eléctricos y geométricos cuyos efectos sobre la amplitud y el tiempo de vuelo de la señal no están documentados de forma conjunta, por lo que la selección no se realiza con base en el comportamiento de la señal, sino mediante la transferencia desde geometrías distintas. Los antecedentes disponibles abordan el problema de manera parcial, como lo resume la Tabla 1.

La literatura reporta configuraciones alternativas de bobina orientadas a modos de onda específicos. La medición de la directividad del campo acústico de

una bobina tipo mariposa en una placa [13], la combinaron con una bobina multicapa con imanes permanentes periódicos para generar ondas horizontales de corte [14] y con una bobina de línea serpenteante para excitar un único modo de onda de Lamb [15].

La geometría del imán también condiciona la respuesta del transductor. Du et al. [16] simularon mediante elementos finitos un EMAT con imanes permanentes dispuestos de forma periódica. El estudio evaluó el efecto de los parámetros del imán sobre la relación de amplitudes entre los modos de onda de Lamb. Strizhak y Pryakhin [17] optimizaron la masa y las dimensiones del dispositivo de magnetización y redujeron el peso del transductor.

La fuerza de Lorentz no constituye el único mecanismo de transducción. En materiales ferromagnéticos, la magnetostricción también contribuye a la generación de sonido. Liang et al. reportan un EMAT de base magnetostrictiva con una elevada eficiencia de transducción magnetoacústica [18].

La separación entre la bobina y la pieza condiciona la amplitud registrada. Xiang et al. caracterizaron experimentalmente el efecto del *lift-off* sobre la generación de ondas acústicas superficiales [19].

La contribución de este trabajo no consiste en simular un EMAT mediante elementos finitos [7]–[11], sino en evaluar diez parámetros en un mismo modelo y bajo una condición base común, lo que permite comparar la sensibilidad de los parámetros

heterogéneos (eléctricos, de geometría de bobina y de geometría de imán) dentro del mismo marco de simulación.

Los objetivos de este trabajo son: (i) formular un modelo multifísico bidimensional plano del conjunto bobina–imán–placa que acople el problema electromagnético con el mecánico mediante la fuerza de Lorentz; (ii) cuantificar la influencia individual de los parámetros de la señal de excitación y de la geometría del transductor sobre el desplazamiento mecánico y el esfuerzo de von Mises; y (iii) delimitar las condiciones favorables dentro de los intervalos simulados.

El análisis se centra en la amplitud del desplazamiento generado y en la del eco en el punto de análisis. La geometría plana adoptada no considera el efecto de la directividad, por lo que las propiedades de directividad reportadas para las bobinas espirales [5], [20] se citan como antecedentes y no como objeto de evaluación de este modelo.

Este documento está organizado de la siguiente manera: la Sección 2 presenta la metodología, que abarca la formulación de los modelos multifísicos y geométricos, las propiedades de los materiales, la discretización, la señal de excitación, el diseño experimental, las métricas empleadas y las limitaciones del modelo. La Sección 3 expone los resultados obtenidos y su respectiva discusión. Finalmente, la Sección 4 presenta las conclusiones del estudio.

Tabla 1: Comparación con los trabajos utilizados como antecedentes.

Trabajo	Qué parámetro varía	Condiciones	Resultado principal	Diferencia con este estudio
[8] Zhai et al. (2017)	Estructura de la bobina de un arreglo por fases	Placa metálica, barrido sectorial	Diseño de bobina para formación de imagen sectorial	No evalúa relaciones de aspecto del imán ni parámetros de la señal de excitación
[9] Guo et al. (2023)	Bobina <i>racetrack</i> con imanes permanentes periódicos	Generación selectiva de ondas de Lamb	Realce selectivo de un modo de onda	Optimiza un modo concreto, no la sensibilidad paramétrica del transductor
[11] Wu et al. (2025)	Geometría de bobina y circuito de detección	EMAT sin imán, acero inoxidable 304	Diseño conjunto de transductor y circuito	No evalúa la geometría del imán, ausente en su configuración
Este trabajo	Diez parámetros, seis niveles cada uno	Modelo plano, placa de acero, condición base en el punto medio de cada intervalo	Sensibilidad individual de cada parámetro bajo una referencia común	Cobertura paramétrica y condición base compartida entre familias de parámetros

Fuente: elaboración propia.

2. METODOLOGÍA

2.1. Formulación multifísica

El estudio estableció los parámetros de entrada con base en los resultados reportados en investigaciones previas, con el propósito de garantizar la validez de las simulaciones realizadas.

Las simulaciones se ejecutaron en COMSOL *Multiphysics* mediante el módulo de electromagnetismo, gobernado por las ecuaciones de Maxwell, y el módulo de mecánica estructural para evaluar la respuesta mecánica del material.

El modelo se resolvió en COMSOL *Multiphysics* 6.2.0.415 (win64). La interfaz electromagnética es *Magnetic Fields* (mf), con formulación de potencial vectorial fuera del plano, y la mecánica es *Solid Mechanics* (solid) en aproximación de deformación plana con espesor unitario. Ambas se acoplan mediante el nodo multifísico *Magnetomechanics* (mmcpl1), que emplea los módulos AC/DC y MEMS. El estudio consta de dos pasos: uno estacionario, que establece la polarización del imán permanente, y otro dependiente del tiempo, que resuelve la propagación.

Las ecuaciones que describen el comportamiento del modelo son las siguientes:

$$J = \sigma(E + v \times B) \quad (1)$$

Esta ecuación describe la densidad de corriente inducida en el material. El término σ representa la conductividad eléctrica, E el campo eléctrico, v la velocidad de las partículas y B la densidad de flujo magnético.

$$E = -\frac{\partial A}{\partial t} \quad (2)$$

La ecuación anterior relaciona el campo eléctrico E con el potencial vector magnético $\frac{\partial A}{\partial t}$ en función del tiempo.

$$\nabla \times H = J \quad (3)$$

Esta expresión corresponde a la ley de Ampère, donde H representa la intensidad del campo magnético y J la densidad de corriente.

$$B = \nabla \times A \quad (4)$$

La ecuación define la densidad de flujo magnético B a partir del potencial vectorial magnético A .

$$J = \sigma E + \sigma v \times B + J_e \quad (5)$$

Esta relación incorpora la densidad de corriente externa J , correspondiente a la excitación aplicada a la bobina del transductor EMAT.

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \nabla \cdot (FS)^T + F_v \quad (6)$$

La ecuación anterior describe el comportamiento mecánico del material. El término ρ representa la densidad del material, u el desplazamiento mecánico; S , el tensor de esfuerzos; y F , la fuerza volumétrica aplicada sobre el dominio.

$$F_v = J \times B \quad (7)$$

Esta última ecuación corresponde a la fuerza de Lorentz y representa el acoplamiento electromecánico del modelo. La interacción entre la densidad de corriente J y el campo magnético B genera fuerzas sobre la placa de ensayo, lo que induce vibraciones mecánicas que permiten la propagación de ondas ultrasónicas mediante el transductor EMAT.

2.2. Modelado geométrico y representación de la bobina

El modelo EMAT consta de tres componentes principales: la placa de ensayo, la bobina en espiral, mostrada en las Figuras 2 y 3, y el imán, mostrado en la Figura 4. La Figura 1 presenta el modelo completo.

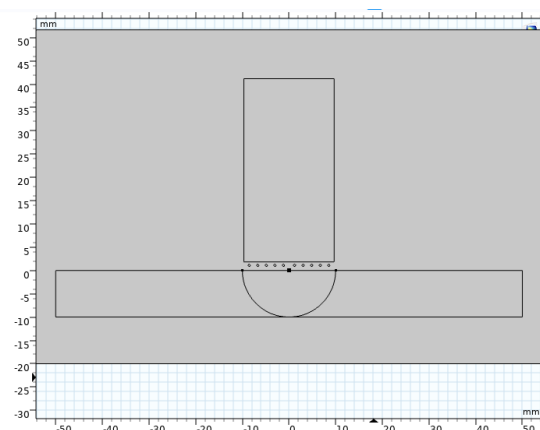


Fig. 1. Modelo EMAT en COMSOL Multiphysics
Fuente: elaboración propia.

En este trabajo se analizan: el diámetro interno y externo, el diámetro del conductor y el espaciado entre espiras. También se consideró

la distancia de *lift-off* entre la bobina y la placa de ensayo. La geometría del imán se evaluó mediante relaciones de aspecto asociadas a su ancho y su altura.

El modelo se resuelve en un dominio bidimensional plano, en aproximación de deformación plana y con espesor unitario fuera del plano. La interfaz electromagnética resuelve el potencial vectorial fuera del plano y la geometría se construye reflejando el devanado respecto del plano central, de modo que se calcula el corte transversal completo. En consecuencia, la bobina en espiral no se representa como una espiral plana ni como un conjunto de espiras circulares: cada círculo de las Figuras 2 y 3 corresponde a la sección transversal de un conductor recto, y los dos grupos de diez son las ramas de ida y de vuelta del devanado.

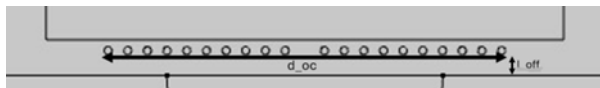


Fig. 2. Modelo de la bobina EMAT en COMSOL Multiphysics. Cada círculo representa la sección transversal de un conductor recto del devanado; el dominio es plano, no axisimétrico.
Fuente: elaboración propia.



Fig. 3. Acercamiento al modelo de la bobina EMAT en COMSOL Multiphysics, con la separación entre conductores l_c y el diámetro del conductor d_w que definen la relación k_{lc} .
Fuente: elaboración propia.

Esta simplificación delimita el alcance de los resultados. El modelo representa el corte transversal del conjunto bobina-imán-placa y no reproduce ni el paso de la espiral ni el cierre del devanado. La distribución de campo obtenida corresponde al plano de corte, de modo que los efectos fuera de ese plano quedan excluidos y el modelo no sustenta afirmaciones sobre focalización radial hacia un eje ni sobre directividad azimutal, porque ninguna de las dos está representada en la geometría resuelta. Lo que sí permite evaluar, y es lo que se reporta, son la amplitud del desplazamiento y el tiempo de vuelo en el punto de análisis.

En la Figura 1, además de los componentes principales, se observa un punto de análisis empleado para evaluar localmente el esfuerzo de von Mises, el desplazamiento, la densidad de flujo magnético y la densidad de corriente. Este punto permitió analizar las variaciones espaciales de las variables físicas consideradas en el estudio.

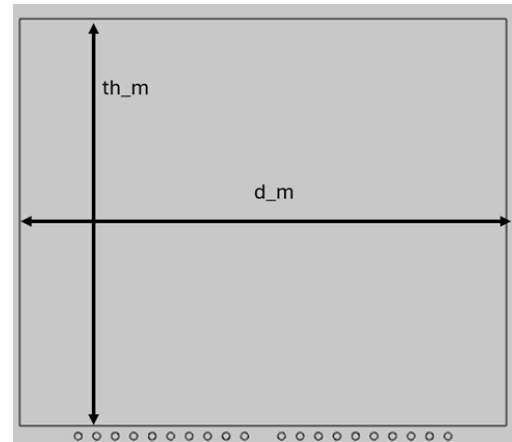


Fig. 4. Modelo del imán en COMSOL Multiphysics, con el ancho d_m y la altura th_m que definen las relaciones de aspecto k_{m1} y k_{m2} . **Fuente:** elaboración propia.

2.3. Propiedades de los materiales

Los parámetros físicos de los materiales fueron los siguientes: para el acero, una conductividad eléctrica de $4,032 \times 10^6$ S/m, una permeabilidad magnética relativa de 1 y una densidad de $7\,850$ kg/m³. Para el aire, se consideró una conductividad eléctrica de 0 S/m, una permeabilidad magnética relativa de 1 y una densidad de $1,225$ kg/m³. Para el cobre se utilizaron una conductividad eléctrica de $5,998 \times 10^7$ S/m, una permeabilidad magnética relativa de 1 y una densidad de $8\,960$ kg/m³.

El modelo computacional desarrollado considera que los efectos de la magnetostricción son mínimos frente a los de la fuerza de Lorentz. Por lo tanto, la fuerza de Lorentz es el único mecanismo de acoplamiento multifísico representado. Esto es coherente con el sistema de ecuaciones (1)–(7), en el que no aparece ningún término magnetostrictivo, y delimita el alcance de los resultados que no son extrapolables a materiales en los que la magnetostricción contribuya de forma apreciable a la generación acústica [18].

El imán es de NdFeB sinterizado N50, con remanencia $B_r = 1,41$ T, permeabilidad de retroceso de 1,05 y conductividad de $7,14 \times 10^5$ S/m; su orientación se define especificando las caras norte y sur.

2.4. Discretización

Para mejorar el comportamiento numérico de las simulaciones, la geometría se discretizó con tres niveles de malla. La malla más fina se aplicó en la placa de prueba y en la bobina, ya que estas regiones presentan mayores gradientes de campo. La malla más gruesa se utilizó en el dominio del aire, donde

no se generan corrientes inducidas significativas. Finalmente, se empleó una malla intermedia en el imán.

Los tamaños de malla se seleccionaron con el objetivo de reducir el tiempo de simulación sin comprometer la precisión de los resultados. En la Figura 5 se muestra la diferencia entre las mallas utilizadas.

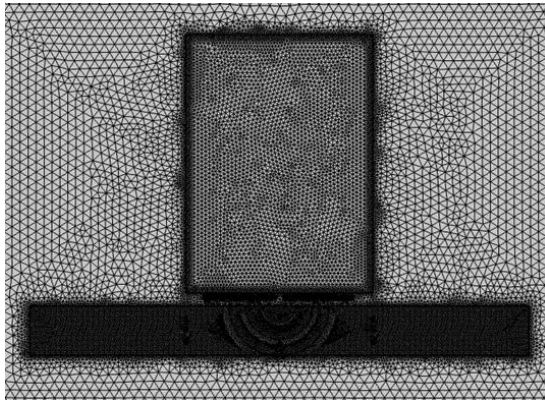


Fig. 5. Malla de la geometría del modelo EMAT
Fuente: elaboración propia.

La malla fina se construyó con parámetros de relación de aspecto personalizados, con el objetivo de representar adecuadamente las regiones de alto gradiente del campo. El tamaño máximo del elemento se estableció en 0,4 mm y el mínimo en 0,001 mm.

La tasa máxima de crecimiento de los elementos se configuró en 2, lo que garantiza una transición gradual entre regiones refinadas y regiones de mayor tamaño de elemento. El factor de curvatura se definió en 0 y 2, lo que permitió un refinamiento adicional en superficies curvas. Finalmente, la resolución en regiones angostas se estableció en 0,4, lo que mejoró la representación de capas delgadas y de regiones afectadas por el efecto piel.

La malla gruesa se generó con parámetros de tamaño personalizados para reducir el costo computacional en las regiones de menor interés electromagnético. El tamaño máximo del elemento se fijó en 2 mm y el mínimo en 0,001 mm.

La tasa máxima de crecimiento se configuró en 2, mientras que el factor de curvatura se definió en 0,2. La resolución en regiones angostas se estableció en 0,4, lo que garantiza una representación geométrica adecuada sin incrementar de forma excesiva el número de elementos.

La malla intermedia aplicada al imán utilizó un tamaño máximo de elemento de 1 mm y un tamaño mínimo de 0,001 mm. La tasa máxima de crecimiento se configuró en 1,3, lo que permite una transición suave entre las regiones refinadas y las de menor resolución.

El factor de curvatura se definió en 0,3, mientras que la resolución en regiones angostas se estableció en 1. Esta configuración permitió representar adecuadamente la geometría del imán sin generar un número excesivo de elementos.

La Figura 6 compara el campo de magnitud de desplazamiento obtenido con dos discretizaciones distintas del dominio interno. Los valores empleados para la discretización de la Figura 6a fueron: tamaño máximo del elemento de 2 mm, tamaño mínimo de 0,25 mm, tasa máxima de crecimiento de 2 y factor de curvatura de 0,2. Los parámetros de la Figura 6b corresponden a los previamente descritos para el modelo del estudio. Ambos mapas comparten la misma escala de color, de $3,05 \times 10^{-16}$ m a $1,3 \times 10^{-10}$ m, de modo que las diferencias apreciables se concentran en la textura del frente de onda y no en el valor máximo del campo.

La malla resultante consta de 53 676 elementos triangulares y 26 964 vértices, con calidad mínima de 0,0124 y calidad media de 0,8743 sobre un área de 15 450 mm². El problema discretizado tiene 175 398 grados de libertad. Estas cifras describen la discretización empleada, pero no constituyen un estudio de convergencia: el modelo se resolvió con una única malla, de modo que la incertidumbre asociada al tamaño de elemento no está acotada.

Los parámetros de la malla mostrada en (la Figura 6b) corresponden a los definidos previamente para el modelo empleado en el estudio.

Por último, el análisis evaluó la influencia individual de cada variable sobre la respuesta del sistema mediante simulaciones independientes.

Para validar el modelo computacional, los resultados obtenidos se contrastaron con las tendencias reportadas en la literatura [8], [9], [11]. Los trabajos referenciados indican que parámetros como el lift-off, la corriente inducida y la geometría del imán producen variaciones cuantificables en el comportamiento del sistema, en concordancia con las tendencias observadas en el presente estudio.

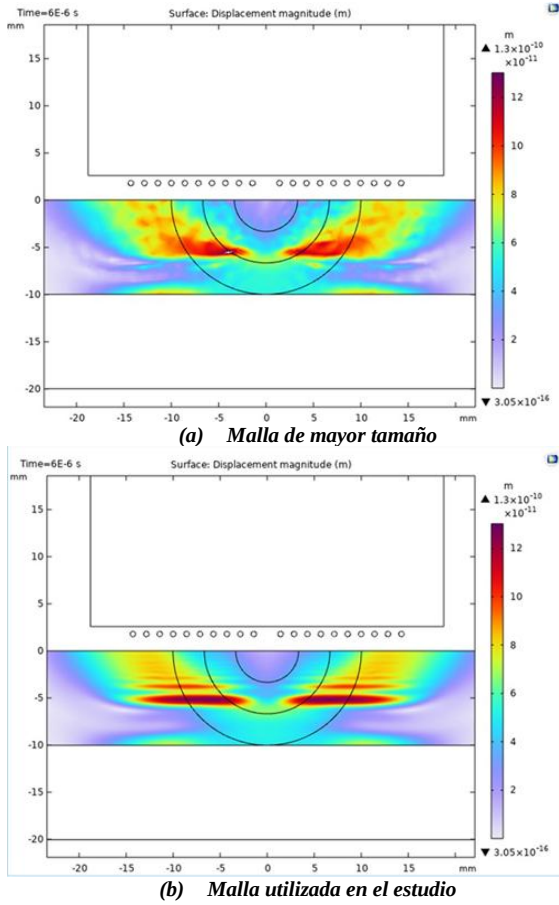


Fig. 6. Campo de magnitud de desplazamiento en $t = 6 \mu s$ obtenido con (a) una discretización más gruesa y (b) la discretización empleada en el estudio. Ambos mapas comparten la misma escala de color. La malla propiamente dicha se muestra en la Figura 5.

Fuente: elaboración propia.

2.5. Modelado de la señal de excitación

La señal de excitación empleada en las simulaciones se define mediante una función conocida como pulso de Gabor (Gabor pulse) o *tone burst* con envolvente gaussiana, cuya expresión matemática es:

$$y(t) = \beta e^{\{-\alpha_f(t-\tau)^2\}} \cos(2\pi f_0(t-\tau)) \quad (8)$$

donde β representa la amplitud máxima de la corriente [A], α_f es el factor de decaimiento gaussiano que controla el ancho temporal del pulso, f_0 es la frecuencia central de la portadora [Hz] y τ es el retardo temporal (delay) que desplaza el centro del pulso respecto del origen [s]. Esta formulación combina una envolvente gaussiana, que delimita la energía del pulso en un intervalo finito de tiempo, con una oscilación coseno a la frecuencia de operación del transductor EMAT, lo que garantiza un contenido espectral concentrado en torno a f_0 .

En la Figura 7 se ilustra el comportamiento de esta señal en una configuración base definida por $\beta = 300$ A, $f_0 = 2$ MHz, $\alpha = 4$ y $\tau = 4 \mu s$ variando los parámetros de la señal.

La Figura 7 ilustra las variaciones individuales de cada parámetro: primero se incrementó la amplitud a $\beta = 400$ A manteniendo los demás valores constantes, luego se modificó la frecuencia a $f_0 = 4$ MHz y, finalmente, se varió el factor de decaimiento α_f ; mostrando la influencia aislada de cada parámetro sobre la forma de onda.

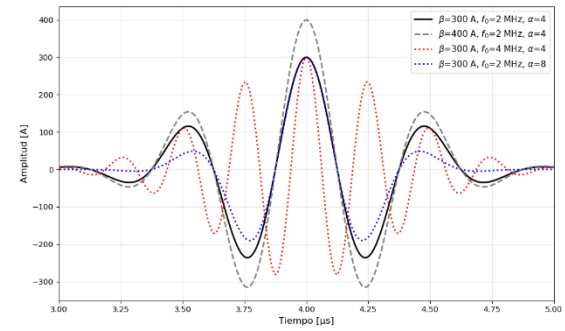


Fig. 7. Señal de entrada de la simulación. Las curvas se generaron con valores redondeados con fines ilustrativos ($\beta = 300$ A, $f_0 = 2$ MHz, $\alpha_f = 4$, $\tau = 4 \mu s$) y no reproducen la condición base de la Tabla 2: su propósito es mostrar el efecto aislado de cada término del pulso de Gabor sobre la forma de onda, no representar una simulación de la campaña paramétrica. **Fuente:** elaboración propia.

El estudio transitorio recorre de 0 a 12 μs con un paso de salida de 0,1 μs , es decir, 121 instantes. El integrador es de tipo *Generalized-alpha* con paso interno adaptativo, tolerancia relativa de 0,001 y tolerancia absoluta por campo de 0,1; el paso interno inicial es de $1,2 \times 10^{-8}$ s. La geometría no lineal está activada. Cada simulación requiere 48 s de cómputo.

2.6. Diseño experimental, condición base y rangos de variación

El estudio empleó una metodología de variación de un factor a la vez (*One-Factor-at-a-Time*, OFAT), en la que cada parámetro se modificó de forma individual, mientras que los demás permanecieron constantes en un valor de referencia. Este enfoque permitió evaluar de manera aislada la influencia directa de cada variable sobre la respuesta del transductor. Los parámetros a analizar se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2: Parámetros de entrada del modelo EMAT

Parámetro	Valor	Descripción
β	305 A	Amplitud de la señal.
f_0	2,25 MHz	Frecuencia central de la señal.
α_f	5,2	Coeficiente de la envolvente de la señal.
k_{lc}	1,5	Relación entre la separación de conductores y su diámetro.
k_{m1}	1,25	Relación entre el ancho del imán y el diámetro de la bobina.
k_{m2}	1,65	Relación entre la altura del imán y su ancho.
d_w	0,57 mm	Diámetro de los conductores.
k_{dic}	2,5	Relación entre el diámetro interno de la bobina y el diámetro de los conductores.
l_{off}	1,5 mm	Separación entre la placa de prueba y la bobina (<i>lift-off</i>).
d_{oc}	30 mm	Diámetro exterior de la bobina.

Fuente: elaboración propia

El análisis incluyó un total de 60 simulaciones. Este número se obtiene del producto de los diez parámetros evaluados en los seis niveles definidos para cada uno, según la Tabla 3. Las simulaciones se realizaron en COMSOL *Multiphysics* según las especificaciones previamente descritas.

Tabla 3: Niveles de variación de los parámetros evaluados

β [A]	10,00	128,00	246,00	364,00	482,00	600,00
f_0 [MHz]	0,50	1,20	1,90	2,60	3,30	4,00
α_f	0,50	2,40	4,30	6,20	8,10	10,00
k_{lc}	0,00	0,60	1,20	1,80	2,40	3,00
k_{m1}	0,50	0,80	1,10	1,40	1,70	2,00
k_{m2}	0,30	0,84	1,38	1,92	2,46	3,00
d_w [mm]	0,15	0,32	0,49	0,66	0,83	1,00
k_{dic}	1,00	1,60	2,20	2,80	3,40	4,00
l_{off} [mm]	0,00	0,60	1,20	1,80	2,40	3,00
d_{oc} [mm]	12,00	19,00	26,00	34,00	41,00	48,00

Fuente: elaboración propia

El diámetro de la bobina y las relaciones de aspecto del imán permanente reproducen los valores reportados en diseños con imán estrecho y ancho [3], [20]. El diámetro de los conductores corresponde a los calibres empleados en los devanados de EMAT [14]. El diámetro exterior de la bobina coincide con los valores empleados en la

inspección de placa con bobina espiral [8]. El intervalo de *lift-off* corresponde al caracterizado experimentalmente [19] y su nivel nulo constituye un caso límite, no una condición de operación. La relación entre el diámetro de la bobina y el de los conductores es exploratoria y evalúa la sensibilidad del diámetro interno de la bobina.

El parámetro k_{lc} representa la relación entre la separación de conductores l_c y su diámetro d_w :

$$k_{lc} = \frac{l_c}{d_w} \quad (9)$$

El parámetro k_{m1} define la relación entre el ancho del imán d_m y el diámetro de la bobina d_{oc} , y el parámetro k_{m2} la relación entre la altura del imán th_m y su ancho:

$$k_{m1} = \frac{d_m}{d_{oc}} \quad (10)$$

$$k_{m2} = \frac{th_m}{d_m} \quad (11)$$

El parámetro k_{dic} representa la relación entre el diámetro interno de la bobina y el diámetro de los conductores, y l_{off} corresponde a la separación entre la placa de prueba y la bobina.

El factor de decaimiento de la señal de entrada está dado por

$$\alpha = \alpha_f f_0^2 \quad (12)$$

que no es independiente de la frecuencia. La envolvente del pulso se estrecha con el cuadrado de la frecuencia, mientras que el número de ciclos contenidos en ella permanece constante. El barrido de f_0 modifica, por tanto, la portadora y la envolvente a la vez, y sus resultados no deben interpretarse como el efecto aislado de la frecuencia.

Como condiciones base del modelo se adoptaron los valores de la Tabla 2, que corresponden a las condiciones empleadas en la campaña de simulación. Estos valores se construyeron mediante una regla explícita: cada uno es el punto medio del intervalo barrido para ese parámetro, es decir, la media de los dos niveles centrales de la Tabla 3.

Los seis niveles de cada parámetro están uniformemente espaciados entre el mínimo y el máximo del intervalo. Las conclusiones derivadas de este barrido son estrictamente válidas dentro de los intervalos simulados; no se asume linealidad,

proporcionalidad ni extrapolabilidad fuera del dominio estudiado.

Cada efecto reportado en la Sección 3 corresponde a un efecto marginal evaluado en la condición base de la Tabla 2. El diseño de variación de un factor a la vez permite aislar la influencia individual de cada variable en condiciones controladas, pero no permite estimar las interacciones entre parámetros.

Dos acoplamientos son previsibles a partir de las propias definiciones: k_{m1} y k_{m2} comparten el ancho del imán d_m (Ecuaciones (10) y (11)). Por lo tanto, son geoméricamente dependientes entre sí, y k_{m1} relaciona el imán con el diámetro de la bobina d_{oc} , por lo que la geometría del imán y la de la bobina tampoco son separables. La estimación de estas interacciones requiere un diseño factorial o de superficies de respuesta, lo cual se plantea como trabajo futuro.

El estudio establece una jerarquía entre las variables de salida para facilitar la interpretación de los fenómenos observados. El desplazamiento mecánico constituye el indicador principal del rendimiento acústico del transductor, ya que refleja directamente la generación y la magnitud de la onda ultrasónica propagada en el material. El esfuerzo de von Mises, la densidad de flujo magnético y la densidad de corriente se consideran variables complementarias, que permiten interpretar el mecanismo físico subyacente y evidencian cómo la interacción electromagnética y la fuerza de Lorentz resultante se transforman en una respuesta mecánica observable.

La literatura reporta una correlación positiva entre el esfuerzo de von Mises y la densidad del campo magnético [8], [11]. No se trata de una relación de proporcionalidad física general: la fuerza de Lorentz de la Ecuación (7) es el producto $J \times B$, de modo que la proporcionalidad con B solo puede sostenerse cuando J permanece constante, condición que no se cumple al modificar la geometría de la bobina. En este trabajo, la relación se expresa como una correlación observada en las condiciones simuladas.

2.7. Métricas y procedimiento de extracción

Todas las métricas se extraen de la señal registrada en el punto de análisis, ubicado en la cara inferior de la placa, sobre el eje del devanado. El registro se divide en dos ventanas:

- La de **emisión**, $t < 8 \mu s$, que recoge la excitación directa, y

- La del **eco**, $t > 8 \mu s$, que recoge la señal reflejada en la cara opuesta.

El desplazamiento es negativo en todo el registro debido a la orientación del sistema de referencia, por lo que se analiza en valor absoluto.

El **tiempo de vuelo** es el instante del extremo local que marca la llegada del eco dentro de su ventana, medido desde el origen del registro:

$$t_x = t|_{\min(|u|), t > 8 \mu s} \quad (13)$$

y de manera análoga para el esfuerzo de von Mises, cuyo eco se marca con un máximo:

$$t_\sigma = t|_{\max(\sigma), t > 8 \mu s} \quad (14)$$

La **amplitud** de cada señal es su valor eficaz en la ventana del eco, sobre los N instantes que la componen. Es una magnitud estable, que no depende de cuál de las oscilaciones resulte mayor:

$$A_x = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_k |u_k|^2}, \quad A_\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_k \sigma_k^2} \quad (15)$$

La amplitud normalizada compara los seis niveles de un mismo parámetro y se define como el cociente entre la amplitud de cada nivel y la mayor de las seis, de modo que vale 1 en el nivel de mayor amplitud:

$$x_{norm} = \frac{A_{x,i}}{\max_i(A_{x,i})}, \quad \sigma_{norm} = \frac{A_{\sigma,i}}{\max_i(A_{\sigma,i})} \quad (16)$$

La definición del tiempo de vuelo admite una comprobación física independiente. El punto de análisis está en la cara inferior de una placa de 10 mm y el pulso lleva un retardo $\tau = 4 \mu s$. Con $E \approx 200 \text{ GPa}$, $\nu \approx 0,33$ y $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$, la velocidad de onda de corte es de 3095 m/s, de modo que el recorrido de ida y vuelta de 20 mm sitúa el eco en 10,46 μs . Es el valor de 10,4 μs que aparece en las Figuras 11 a 13, que hasta ahora se citaba como valor esperado sin justificarlo. La Tabla 4 presenta las métricas utilizadas para cada variable analizada.

Tabla 4: Métricas empleadas en el análisis de resultados.

Métrica	Definición	Unidad	Ventana
t_x, t_σ	Ecuaciones (13) y (14)	μs	Eco, $t > 8 \mu s$
A_x, A_σ	Ecuación (15), valor eficaz	m y Pa	Eco, $t > 8 \mu s$
x_{norm}, σ_{norm}	Ecuación (16)	adimensional	Seis niveles de un parámetro

Métrica	Definición	Unidad	Ventana
Ancho de la envolvente	$2\sqrt{\ln 2/\alpha}$, anchura a media altura	μs	Señal de excitación

Fuente: elaboración propia. Todas se extraen en el punto de análisis de la Figura 1.

2.8. Limitaciones del modelo

El modelo se resolvió con una única discretización: no se dispone de un estudio cuantitativo de convergencia, por lo que la incertidumbre asociada al tamaño del elemento no está acotada.

El estudio emplea un integrador *Generalized-alpha* con tolerancia relativa de 0,001 y un paso de salida de 0,1 μs durante 12 μs de simulación. Estos ajustes se documentan en la Sección 2.5, pero no fueron sometidos a un análisis de sensibilidad, por lo que no se atribuye al modelo una precisión numérica demostrada en este aspecto.

El acero se modela mediante la permeabilidad relativa unitaria, y el acoplamiento restringe la transducción a la fuerza de Lorentz. La validez de los resultados queda limitada a materiales en los que la magnetostricción no contribuya de manera apreciable.

La bobina en espiral se representa mediante secciones de conductores rectos en un dominio plano, lo que impide resolver los efectos fuera del plano de corte y, en particular, la directividad del haz. Las fronteras mecánicas son libres, sin condición absorbente, de modo que las reflexiones en los bordes de la placa de $100 \times 10 \text{ mm}$ forman parte de la señal registrada.

El esquema OFAT no estima interacciones entre parámetros. El estudio es exclusivamente computacional. Las tendencias obtenidas describen el comportamiento del modelo bajo las hipótesis adoptadas y no constituyen, por sí solas, evidencia del desempeño de un sistema físico de inspección; su transferencia a la práctica requiere una validación experimental posterior.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Variación de los parámetros de la señal de excitación

La Tabla 5 resume la variación de las dos magnitudes de salida entre el primer y el último nivel de cada parámetro, calculada mediante las métricas de la Sección 2.7. Es la base cuantitativa de las tendencias que se describen a continuación.

Los resultados se presentan en función de la variación observada en cada uno de los factores evaluados durante las simulaciones. El primer parámetro analizado fue α_f , que determina el comportamiento de la señal transmitida. Al aumentar el valor de este factor, la amplitud de la señal registrada aumenta, acompañada de una disminución de la dispersión de la respuesta.

Tabla 5: Variación de la amplitud del eco entre el primer y el último nivel de cada parámetro.

Parámetro	Rango	Amplitud del desplazamiento	Esfuerzo de von Mises
α_f	0,5 a 10	-98,8 %	-97,7 %
β	10 a 600 A	+4353 %	+6982 %
f_0	0,5 a 4 MHz	-89,7 %	-95,0 %
k_{m1}	0,5 a 2	-53,6 %	-39,6 %
k_{m2}	0,3 a 3	+338,0 %	+106,8 %
k_{lc}	0 a 3	-69,9 %	-77,3 %
d_w	0,15 a 1 mm	-49,8 %	-87,0 %
k_{dic}	1 a 4	+15,9 %	-8,6 %
l_{off}	0 a 3 mm	-42,1 %	-93,8 %
d_{oc}	12 a 48 mm	+85,6 %	-11,8 %

Fuente: elaboración propia.

Este comportamiento favorece la identificación de la señal reflejada, ya que una mayor amplitud y una menor dispersión de los picos permiten distinguir los fenómenos asociados a la reflexión. La Figura 8 muestra la señal obtenida para distintos valores de α_f .

La Figura 8 excluye la señal de $\alpha_f = 0$, cuya amplitud elevada dificulta la visualización de las demás señales. Un valor de $\alpha_f = 0$ suprime el coeficiente de la envolvente, lo que produce una señal senoidal de alta amplitud.

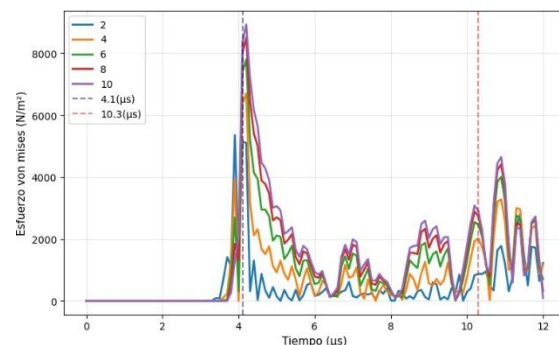


Fig. 8. Señal obtenida para diferentes valores de α_f .

Fuente: elaboración propia.

La Figura 9 compara directamente las señales correspondientes a cada valor de α_f mediante un mapa de colores. Los resultados confirman que un

mayor valor de este parámetro reduce la amplitud del eco: entre $\alpha_f = 0,5$ y $\alpha_f = 10$, la amplitud del desplazamiento cae un 98,8 % y la del esfuerzo de von Mises un 97,7 %.

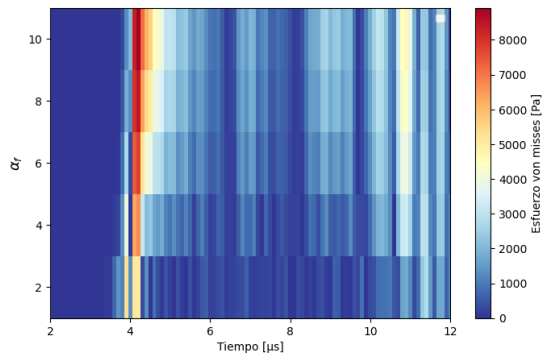


Fig. 9. Comparación de amplitudes para diferentes valores de α_f . **Fuente:** elaboración propia.

Estos resultados indican que el nivel del coeficiente de la envolvente determina la calidad de la señal obtenida y, en consecuencia, la precisión del análisis.

En el caso de la frecuencia central (f_0), al aumentar la frecuencia, la amplitud de la señal disminuye y el ancho temporal se reduce, lo que mejora la resolución temporal, aunque a costa de una menor intensidad.

La Figura 10 muestra la señal obtenida para diferentes valores de f_0 . El incremento del parámetro produce señales de menor ancho temporal y de menor amplitud. El mapa de colores confirma que valores altos de f_0 generan mayor precisión en la localización de la señal reflejada, aunque reducen su magnitud.

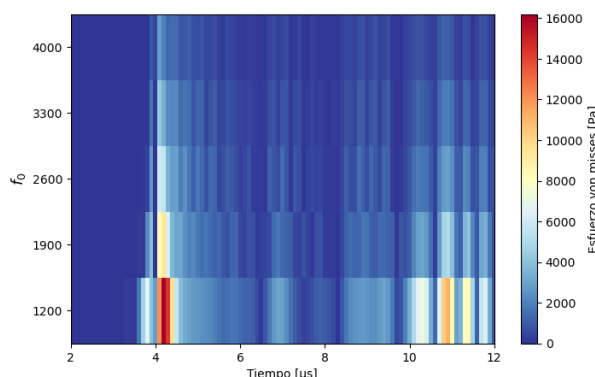


Fig. 10. Señal obtenida para diferentes valores de f_0 . **Fuente:** elaboración propia.

Las simulaciones de f_0 también permiten evaluar la densidad del campo magnético y la densidad de corriente. El análisis de estas variables registra

únicamente la emisión de la señal. El incremento de f_0 produce un estrechamiento de la amplitud de la señal emitida.

El parámetro β representa la amplitud de la excitación de la señal. Al aumentar β , la amplitud de la señal registrada aumenta, lo que mejora la visibilidad de la respuesta del material. La forma de la señal no presenta variaciones apreciables, lo que indica que β no altera la naturaleza de la respuesta, sino únicamente su intensidad. El incremento de β no siempre resulta viable en la práctica, ya que corrientes elevadas pueden dañar el equipo.

3.2. Geometría del imán

La influencia de los parámetros geométricos del imán se analiza en función de dos parámetros de la simulación: el tiempo de vuelo y la amplitud normalizada.

La relación de aspecto entre el ancho del imán y el diámetro de la bobina (k_{m1}) modifica la respuesta del modelo: al aumentar k_{m1} la amplitud de la señal de desplazamiento disminuye y el esfuerzo de von Mises también disminuye, lo que indica una menor intensidad de la respuesta mecánica. La Figura 11 muestra que el tiempo de vuelo tiende a valores inferiores al valor esperado de 10,4 μs para relaciones k_{m1} menores de 1,4, a pesar de presentar amplitudes mayores, lo que indica una relación inversa entre resolución e intensidad de la señal dentro del rango evaluado.

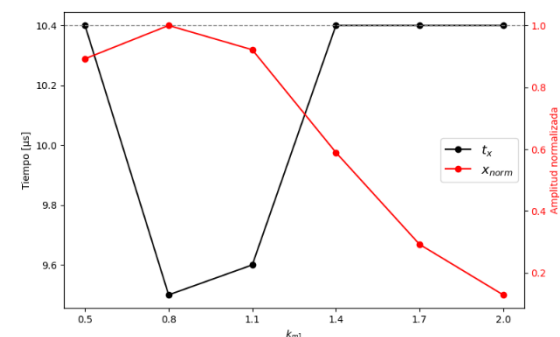


Fig. 11. Variación del tiempo de vuelo y amplitud en desplazamiento mecánico (x) en función del parámetro k_{m1} . Eje izquierdo en microsegundos; eje derecho adimensional (amplitud normalizada, Ecuaciones 15 y 16).

Fuente: elaboración propia.

Al incrementar k_{m2} el parámetro de relación de aspecto entre el ancho del imán y su altura: la amplitud de la señal aumenta. La Figura 12 muestra que este incremento presenta un comportamiento asintótico, donde la ganancia en amplitud disminuye a medida que k_{m2} aumenta.

La relación de aspecto del imán determina la amplitud de la señal generada, con un efecto asintótico que limita la ganancia a partir de ciertos valores de k_{m2} . Valores elevados de k_{m2} pueden generar dificultades prácticas en la manipulación del equipo.

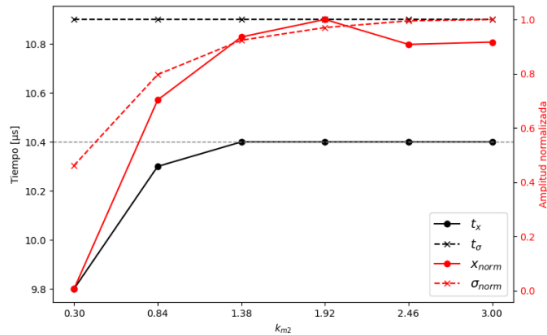


Fig. 12. Variación del tiempo de vuelo y amplitud en desplazamiento mecánico (x), el esfuerzo de von Mises (σ) en función del parámetro k_{m2} . Eje izquierdo en microsegundos; eje derecho adimensional. **Fuente:** elaboración propia.

3.3. Geometría de la bobina

El parámetro k_{lc} representa la relación entre la separación entre conductores y el diámetro de los conductores. Al aumentar k_{lc} la amplitud de la señal disminuye, lo que indica que una mayor separación entre los conductores reduce la intensidad de la señal generada. Una menor separación entre conductores produce señales más altas en el modelo. Una separación reducida puede generar dificultades en la fabricación.

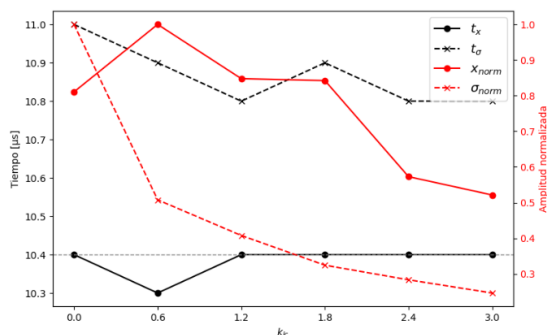


Fig. 13. Variación del tiempo de vuelo y amplitud en desplazamiento mecánico (x), el esfuerzo de von Mises (σ) en función del parámetro k_{lc} . Eje izquierdo en microsegundos; eje derecho adimensional. **Fuente:** elaboración propia.

El parámetro d_w corresponde al diámetro de los conductores. Al aumentar d_w la amplitud del desplazamiento y del esfuerzo de von Mises disminuye (Figura 14). Esta reducción se debe a la disminución del número de vueltas de la bobina, lo que disminuye la corriente que circula por ella. El

aumento de d_w incrementa la distancia respecto al imán, lo que reduce la densidad del campo magnético y la amplitud de la señal. Este es un ejemplo de variable que no cambia de forma aislada: modificar d_w altera indirectamente el número de vueltas del devanado.

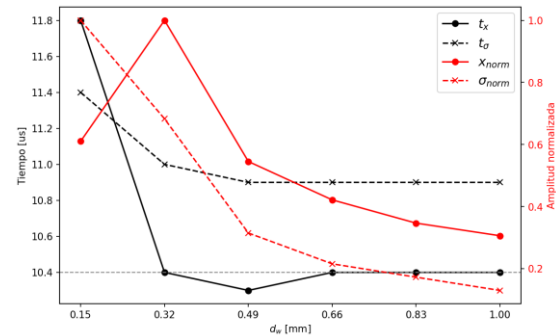


Fig. 14. Variación del tiempo de vuelo y de la amplitud normalizada en función del diámetro de los conductores d_w . **Fuente:** elaboración propia.

Como se observa en la Figura 15, el análisis del campo magnético muestra que el offset de la señal solo varía al modificar el tamaño del imán o al aumentar la distancia al imán.

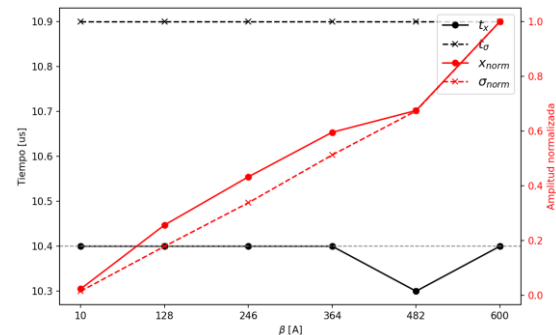


Fig. 15. Variación del tiempo de vuelo y de la amplitud normalizada en función de la amplitud de excitación β . **Fuente:** elaboración propia.

La Tabla 6 presenta la variación del campo de polarización en el punto de análisis y su correlación de Pearson con la amplitud del esfuerzo de von Mises. Los parámetros que modifican la geometría del imán o las distancias del conjunto a la placa presentan una correlación positiva. En los cuatro restantes el campo permanece constante y la correlación queda indefinida, pese a que la amplitud cambia en órdenes de magnitud.

Tabla 6: Variación del campo de polarización en el punto de análisis y su correlación con la amplitud del esfuerzo.

Parámetro	Variación de B [%]	$r(B, \sigma)$
k_{m2}	71,7	0,998
d_{oc}	38,9	0,768
k_{m1}	38,8	0,972
l_{off}	15,0	0,757
d_w	4,0	0,920
k_{lc}	0,2	—
f_0	0,02	—
β	0,00	—
k_{dic}	0,00	—

Fuente: elaboración propia.

El esfuerzo de von Mises es proporcional a la densidad del campo magnético cuando este varía. Cuando el campo se mantiene constante, la amplitud varía en función de la corriente aplicada.

En el caso del parámetro lift-off (Figura 16), los resultados muestran que una menor separación entre la placa y la bobina favorece la interacción electromagnética, lo que aumenta la eficiencia en la generación de la respuesta mecánica y mejora el desempeño del transductor. Esta tendencia coincide cualitativamente con la caracterización experimental reportada en [12]; las condiciones de ese trabajo no son directamente equivalentes a las de este modelo, por lo que dicha coincidencia no constituye una validación cuantitativa.

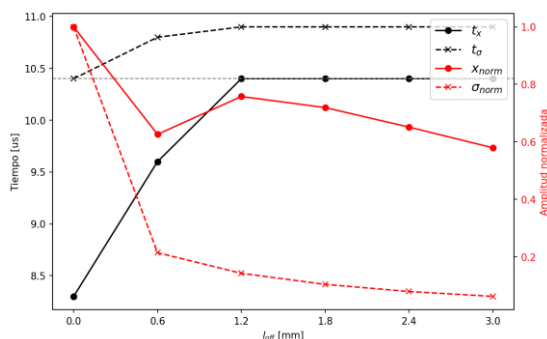


Fig. 16. Variación del tiempo de vuelo y de la amplitud normalizada en función del lift-off l_{off} .

Fuente: elaboración propia.

El parámetro d_{oc} (Figura 17) presenta un comportamiento más favorable en el rango de 12 a 19 mm, ya que en ese intervalo la distribución de la corriente y la interacción del campo magnético inducido alcanzan un equilibrio adecuado. Se considera como criterio de favorabilidad la máxima amplitud de desplazamiento en el punto de análisis, dentro del rango simulado.

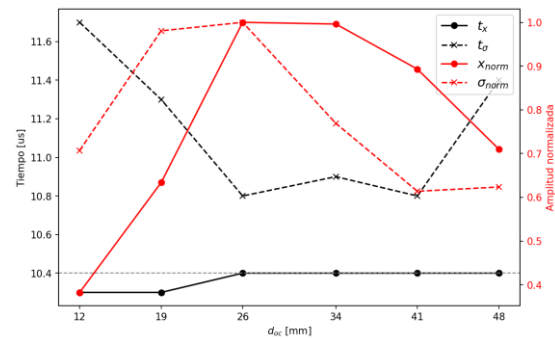


Fig. 17. Variación del tiempo de vuelo y de la amplitud normalizada en función del diámetro de la bobina d_{oc} .

Fuente: elaboración propia.

El análisis del parámetro k_{dic} no evidenció cambios cuantificables en la respuesta global del sistema dentro del rango evaluado, lo que indica una baja sensibilidad de esta variable frente a las demás condiciones del modelo.

3.4. Síntesis de sensibilidad

La Tabla 7 ordena los diez parámetros según el rango que recorre la amplitud normalizada del eco dentro de su intervalo y indica el nivel más favorable de cada uno según el criterio declarado en la Sección 2.6: la máxima amplitud del desplazamiento en el punto de análisis. Esta tabla muestra una jerarquía de efectos marginales evaluados en la condición base, no en una configuración óptima conjunta. Varios de los niveles favorables son extremos del intervalo evaluado, lo que indica una orientación de diseño. La baja sensibilidad de k_{dic} , con un rango de 0,137 frente a valores superiores a 0,6 en el resto, confirma cuantitativamente su baja influencia.

Tabla 7: Sensibilidad de cada parámetro y del nivel más favorable dentro del intervalo simulado.

Parámetro	Rango de amplitud normalizada	Nivel favorable	Sensibilidad
α_f	0,997	0,5	alta
β	0,978	600 A	alta
f_0	0,897	0,5 MHz	alta
k_{m2}	0,781	1,92	alta
k_{lc}	0,699	0	alta
d_w	0,694	0,32 mm	alta
d_{oc}	0,617	26 mm	alta
k_{m1}	0,613	0,80	alta
l_{off}	0,421	0 mm	media
k_{dic}	0,137	4	baja

Fuente: elaboración propia.

Al aumentar el lift-off de 0 a 3 mm, la amplitud del eco cae un 42,1 %, con una tendencia del mismo signo que la observada en la caracterización experimental de [12]. Al recorrer la frecuencia central de 0,5 a 4 MHz, la amplitud disminuye en un

89,7 %, en línea con el compromiso amplitud–resolución descrito en [8] y [9]. Y al pasar k_{m1} de 0,5 a 2, la amplitud cae un 53,6 %, con un comportamiento del mismo signo que el realce por geometría de imán reportado en [9]. Las condiciones de esos trabajos (material, espesor, tipo de onda y frecuencia) no son equivalentes a las de este modelo, de modo que la coincidencia es de tendencia y no de valor. La Tabla 8 resume estos resultados.

Tabla 8: *Magnitudes propias comparables con la literatura.*

Magnitud comparada	Resultado de este trabajo	Referencia
Amplitud frente al lift-off, de 0 a 3 mm	caída del 42,1 %	[12]
Amplitud frente a f_0 , de 0,5 a 4 MHz	caída del 89,7 %	[8], [9]
Amplitud frente a k_{m1} , de 0,5 a 2	caída del 53,6 %	[9]

Fuente: elaboración propia. Las condiciones de las referencias —material, espesor, tipo de onda y frecuencia— no son equivalentes a las del modelo, por lo que la comparación es de tendencia y no de valor.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos a partir de las simulaciones demuestran que el factor de decaimiento α_f produce variaciones en la calidad de la señal; su incremento reduce la dispersión y mejora la resolución de la señal reflejada, lo que facilita la identificación de los fenómenos asociados a la reflexión. La frecuencia central f_0 determina la resolución temporal: valores mayores generan señales de menor ancho temporal, aunque con una disminución de la amplitud, lo que establece un compromiso entre resolución y energía de la señal.

El parámetro β determina la magnitud de la señal sin alterar su forma, lo que mejora la visibilidad de la respuesta del material. No obstante, el equipo impone restricciones prácticas a su implementación, en particular debido a los altos niveles de corriente.

Las relaciones de aspecto k_{m1} y k_{m2} producen variaciones en la amplitud de la señal y en la medición del tiempo de vuelo, lo que indica la necesidad de seleccionar las dimensiones del imán en función del compromiso entre amplitud y tiempo de vuelo, dado que estas determinan el desplazamiento y la intensidad de la respuesta.

Los parámetros de configuración de la bobina k_{lc} y d_w producen efectos cuantificables en la respuesta del modelo, mientras que k_{dic} muestra baja sensibilidad en el rango evaluado.

Dentro de las condiciones evaluadas se observa una correlación positiva entre el esfuerzo de von Mises y la densidad del campo magnético, lo que vincula la respuesta electromagnética con el comportamiento mecánico del material en el modelo, sin que ello constituya una relación de proporcionalidad general.

Los resultados indican que la respuesta del sistema depende del equilibrio entre los parámetros analizados, ya que el ajuste individual de cualquiera de ellos puede afectar negativamente a los demás. La selección de estos parámetros requiere un análisis integral para orientar el diseño dentro del alcance del modelo.

Cuantitativamente, los parámetros de mayor influencia sobre la amplitud del eco son el coeficiente de la envolvente, la amplitud de excitación y la frecuencia central, con rangos de amplitud normalizada de 0,997, 0,978 y 0,897 respectivamente. La de menor influencia es la relación entre el diámetro interno de la bobina y el del conductor, con 0,137, un valor cuatro veces inferior al del siguiente parámetro. Entre las variables geométricas del imán y del devanado, la relación de aspecto k_{m2} y la separación entre conductores k_{lc} presentan rangos de 0,781 y 0,699. Estas cifras corresponden a efectos marginales evaluados en la condición base de la Tabla 2 y son válidas dentro de los intervalos de la Tabla 3.

Este estudio es exclusivamente computacional. Sus conclusiones describen el comportamiento del modelo bajo las hipótesis adoptadas y son válidas estrictamente dentro de los intervalos simulados de la Tabla 3. El diseño OFAT no estima interacciones entre parámetros. La bobina en espiral se representa mediante secciones de conductores rectos en un dominio plano, lo que excluye del análisis los efectos fuera del plano de corte y la directividad del haz. El trabajo no incluye validación experimental, por lo que la transferencia de estas tendencias a un sistema físico de inspección requiere mediciones adicionales.

Como trabajo futuro, el estudio propone implementar metodologías estadísticas, como el diseño de experimentos (DoE) factorial o los métodos de superficies de respuesta (RSM), que permitan cuantificar las interacciones entre los parámetros de simulación, así como la validación experimental del modelo en una placa instrumentada.

Agradecimientos: La investigación fue financiada por el Fondo Nacional de Financiamiento para la Ciencia, la Tecnología y la Innovación, Fondo Francisco José de Caldas, a través del contrato de financiamiento de recuperación contingente No. 112721-400-2023.

REFERENCIAS

- [1] Z. Wang y T. Pan, "Simulation study of continuous casting shell defect detection based on EMAT," en *Proc. 39th Chinese Control Conf. (CCC)*, 2020, doi: 10.23919/CCC50068.2020.9188624.
- [2] Y. Zhao, S. Wang, Y. Wang, H. Li y S. Huang, "Hybrid 2D-3D modeling method for electromagnetic acoustic phased array," in *Proc. IEEE Int. Conf. Electronic Measurement & Instruments (ICEMI)*, 2023, doi: 10.1109/ICEMI59194.2023.10270395.
- [3] J. Liu, S. Liu, C. Zhang, L. Jin y G. Zhao, "A new focused EMAT design with narrow magnet to achieve both A0-Lamb signal enhancement and waveform distortion correction," *IEEE Sensors Journal*, vol. 22, 2022, pp. 14786–14798, doi: 10.1109/JSEN.2022.3185616.
- [4] J. Wu y C. Wang, "Simulation analysis of EMAT shear wave in pipeline and research of defect detection characteristics," in *Proc. Int. Conf. Intelligent Control, Measurement and Signal Processing (ICMSP)*, 2021, pp. 129–133, doi: 10.1109/ICMSP53480.2021.9513224.
- [5] S.-J. Wang, Z.-J. Ma, Y.-Q. Li y Z.-Y. Qu, "3-D simulation for the acoustic field directivity of SH-wave EMATs," en *Proc. Far East NDT New Technology & Application Forum (FENDT)*, 2017, doi: 10.1109/FENDT.2017.8584597.
- [6] T. Zhang, X. Yang, M. Li, H. Peng y W. Peng, "Enhancing unilateral EMAT performance through topological optimization of Halbach permanent magnet arrays," *NDT & E International*, 2024, art. no., doi: 10.1016/j.ndteint.2024.103172.
- [7] S. Thomas, H. Muazu, T. A. Zarma y A. Galadima, "Finite element analysis of EMAT using COMSOL Multiphysics," in *Proc. Int. Conf. Electronics, Computer and Computation (ICECCO)*, 2017, doi: 10.1109/ICECCO.2017.8333338.
- [8] G.-F. Zhai, W.-B. Jia, B. Liang, J.-X. Yang y C. Li, "EMAT phased array system for plate inspection," in *Proc. Far East NDT New Technology & Application Forum (FENDT)*, 2017, pp. 40–44, doi: 10.1109/FENDT.2017.8584609.
- [9] X. Guo, W. Zhu, X. Qiu y Y. Xiang, "A Lorentz force EMAT design with racetrack coil and periodic permanent magnets for selective enhancement of ultrasonic Lamb wave generation," *Sensors*, 2023, art. no., doi: 10.3390/s23010096.
- [10] J. Lan, J. Zhang, X. Jia y R. Gao, "Optimization design of surface wave electromagnetic acoustic transducers based on simulation analysis and orthogonal test method," *Sensors*, 2022, art. no., doi: 10.3390/s22020524.
- [11] D. Wu et al., "Design optimization of coil-only electromagnetic acoustic transducers and their detection circuits for stainless steel 304," *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2025, art. no., doi: 10.1134/S1061830925603551.
- [12] Y. Li, Z. Liu, Y. Zheng, X. Guo, W. Yuan, y P. Zhao, "Transverse crack detection of rail base considering wedge-like structure and using a bulk-wave electromagnetic acoustic transducer," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 71, pp. 1–9, 2022, doi: 10.1109/TIM.2022.3154809.
- [13] C. Wang, J. Ma, X. Bai, y J. Chen, "Defect detection and imaging using electromagnetic acoustic transducer with butterfly coil," *Review of Scientific Instruments*, vol. 95, 2024, doi: 10.1063/5.0198404.
- [14] A. K. Gautam, C. C. Yin, y B. Bhattacharya, "Enhancing shear horizontal wave generation with a multilayer coil electromagnetic acoustic transducer," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 73, pp. 1–8, 2024, doi: 10.1109/TIM.2024.3476617.
- [15] Z. Lv, W. Guan, Y. Zhang, W. Li, y M. Que, "An innovative meander line coil-based electromagnetic acoustic transducer for single-mode Lamb wave excitation," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 399, art. 117445, 2026, doi: 10.1016/j.sna.2025.117445.
- [16] L. Du, R. Gao y X. Jia, "Antisymmetric Lamb wave simulation study based on electromagnetic acoustic transducer with periodic permanent magnets," *Sensors*, vol. 23, art. 7117, 2023, doi: 10.3390/s23167117.
- [17] V. A. Strizhak y A. V. Pryakhin, "Optimization of the parameters of the magnetizing device of the electromagnetic-acoustic transducer," *Devices and Methods of Measurements*, vol. 14, pp. 81–95, 2023, doi: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-81-95.
- [18] B. Liang, Z. Li, W. Tao, Q. Wang, Y. Yu y G. Zhai, "Giant magneto-acoustic transduction efficiency of a novel magnetostrictive-based electromagnetic acoustic transducer," *Measurement*, vol. 246, art. 116720, 2025, doi: 10.1016/j.measurement.2025.116720.
- [19] L. Xiang, S. Dixon, C. B. Thring, Z. Li y R. S. Edwards, "Lift-off performance of electromagnetic acoustic transducers (EMATs) for surface acoustic wave generation," *NDT & E International*, vol. 126, art. 102576, 2022, doi: 10.1016/j.ndteint.2021.102576.
- [20] X. Zhang, W. Li, B. Li, J. Tu, C. Liao, Q. Wu, S. Feng y X. Song, "A new design of the dual-mode and pure longitudinal EMAT by using a radial-flux-focusing magnet," *Sensors*, vol. 22, art. 1316, 2022, doi: 10.3390/s22041316.