



Propuesta metodológica mediante la simulación con el software FEMM de los circuitos magnéticos

Methodological proposal through the simulation of magnetic circuits with FEMM software

Dr. C. Maykop Pérez Martínez*

<maykoperez@udec.cl>

<https://orcid.org/0000-0003-3073-1675>

Ing. M. Sc. Josnier Ramos Guardarrama**

<josnier@electrica.cujae.edu.cu>

<https://orcid.org/0000-0002-8796-8481>

* Universidad de Concepción, Chile y ** Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE), La Habana, Cuba.

RESUMEN

El objetivo del trabajo es proponer una metodología analítica y mediante la simulación con el software FEMM para la resolución de circuitos magnéticos. Para el estudio se propone una metodología de cálculo analítica apoyada por las prestaciones del software Scilab y además se realizó una comparación mediante la simulación con el software FEMM de la variación de la inductancia utilizando materiales M-19 e Hypercor 50 con una variación de la corriente de excitación de 1 a 50 A y valores de la permeabilidad magnética infinita y 4000 respectivamente. Como resultado principal, se reconoce la utilidad del software propuesto para obtener la solución exacta, además se verifican los contenidos teóricos con los prácticos posibilitando a los estudiantes el autoaprendizaje, el aprendizaje colaborativo y la autoevaluación. **Palabras clave:** FEMM, circuitos magnéticos, inductancia, simulación, metodología, Scilab

ABSTRACT

The objective of this work is to propose an analytical methodology and simulation using FEMM software for the resolution of magnetic circuits. For the study, an analytical calculation methodology is proposed, supported by the capabilities of Scilab software, and a comparison is made through simulation with FEMM software of the variation of inductance using M-19 and Hypercor 50 materials with an excitation current variation from 1 to 50 A and infinite magnetic permeability values of 4000, respectively. The main result recognizes the usefulness of the proposed software to obtain the exact solution; furthermore, the theoretical content is verified with practical applications, enabling students to engage in self-learning, collaborative learning, and self-assessment.

Keywords: FEMM, magnetic circuits, inductance, simulation, methodology, Scilab.



INTRODUCCIÓN

En el campo de la ingeniería eléctrica, la inductancia es un fenómeno fundamental que se manifiesta en componentes como bobinas y transformadores, los cuales son esenciales en sistemas de generación, transmisión y distribución de energía. Los materiales ferromagnéticos, debido a sus propiedades únicas, son utilizados para mejorar la eficiencia de estos sistemas.

La inductancia es la propiedad que tienen los circuitos eléctricos para generar una fuerza electromotriz inducida cuando hay una variación en la corriente que circula a través de ellos. Esta propiedad está intrínsecamente ligada a la interacción entre el campo magnético generado por una corriente y el medio material que lo rodea. En ese sentido en la referencia ⁽¹⁾ se afirma que la inductancia es una medida de la capacidad de un circuito para almacenar energía en un campo magnético ante cambio de corriente.

De igual forma, los autores de la obra ⁽²⁾ aseguran que la inductancia se produce debido a la variación del flujo magnético a través de un circuito cerrado, lo que resulta en la generación de una fuerza electromotriz. Esta interacción entre la corriente y el campo magnético es fundamental para el funcionamiento de dispositivos como transformadores, inductores y máquinas eléctricas.

Por otro lado, la inductancia mide la capacidad de un inductor para almacenar energía en un campo magnético e influye directamente en cómo los dispositivos manejan esta energía eléctrica, por lo que resulta importante destacar los siguientes aspectos:

- **Almacenamiento de Energía:** Un inductor almacena energía en forma de campo magnético cuando la corriente aumenta y la devuelve cuando disminuye. Este proceso es esencial para el funcionamiento eficiente de transformadores e inductores, donde se busca maximizar el almacenamiento de energía con el mínimo consumo eléctrico.
- **Reducción de Pérdidas:** Los inductores son componentes clave en la electrónica de potencia, donde su función es filtrar las formas de onda de corriente y limitar procesos transitorios. Esto ayuda a reducir las pérdidas energéticas que pueden ocurrir durante el funcionamiento del circuito, mejorando así la eficiencia general del sistema. La correcta selección de inductores con características adecuadas puede minimizar la resistencia y las pérdidas por calor, lo que resulta en un uso más eficiente de la energía.
- **Efecto de los materiales ferromagnéticos:** La incorporación de materiales ferromagnéticos en los núcleos de los inductores aumenta significativamente la inductancia debido a su alta permeabilidad magnética. Esto permite que se concentren más líneas de flujo magnético, lo que a su vez mejora la capacidad del inductor para almacenar energía. Como resultado, se puede operar a niveles más altos de eficiencia energética. Sin embargo, es crucial evitar la saturación del núcleo, ya que esto puede llevar a un rendimiento deficiente y a pérdidas adicionales.

Es importante destacar que la comprensión de cómo la inductancia afecta el comportamiento del circuito permite a los ingenieros optimizar el diseño de dispositivos electromagnéticos para mejorar su eficiencia energética. Esto incluye ajustar parámetros como el número de vueltas en una bobina y seleccionar materiales adecuados para los núcleos.

El valor de la inductancia depende de varios factores, entre ellos la geometría del circuito, la cantidad de espiras y el material que se emplea como núcleo. En este aspecto es donde los materiales ferromagnéticos juegan un papel fundamental, ya que poseen una permeabilidad magnética mucho mayor que otros materiales, lo que permite aumentar la inductancia sin necesidad de incrementar significativamente el tamaño del dispositivo.

Es fundamental resaltar que los materiales ferromagnéticos, como el hierro, níquel y cobalto, tienen la capacidad de concentrar líneas de flujo magnético debido a su alta permeabilidad. Esto los convierte en una elección ideal para núcleos de transformadores, motores eléctricos y otros dispositivos inductivos. Las principales ventajas de los materiales ferromagnéticos son:

- **Aumento de la eficiencia electromagnética:** Un núcleo ferromagnético mejora la inductancia en comparación con núcleos de aire o materiales de baja permeabilidad, permitiendo almacenar más energía magnética en un volumen compacto.
- **Reducción de pérdidas:** La alta permeabilidad magnética de los materiales ferromagnéticos minimiza las pérdidas de energía en forma de calor, pérdidas por corrientes de Foucault, cuando se utilizan núcleos de alta calidad, como en transformadores de potencia.
- **Comportamiento no lineal:** Los materiales ferromagnéticos muestran una relación no lineal entre la intensidad de campo magnético (H) y la densidad de flujo magnético (B), lo que puede ser aprovechado en aplicaciones como inductores variables o para diseñar dispositivos con propiedades específicas de saturación magnética.

En correspondencia, El estudio de la inductancia en los materiales ferromagnéticos tiene múltiples aplicaciones en la ingeniería eléctrica:

- **Transformadores:** Son dispositivos que dependen de la inductancia mutua entre dos o más bobinas enrolladas sobre un núcleo ferromagnético. El uso de materiales con alta permeabilidad magnética permite que los transformadores sean más eficientes al minimizar las pérdidas por dispersión del flujo magnético y mejorar la transmisión de energía eléctrica.
- **Motores eléctricos:** Los núcleos ferromagnéticos en los estatores y rotores aumentan la inductancia de los circuitos magnéticos internos, mejorando el acoplamiento electromagnético entre las bobinas de excitación y el rotor.
- **Inductores y filtros:** Los inductores, que se usan ampliamente en circuitos eléctricos y electrónicos, dependen de núcleos ferromagnéticos para aumentar la inductancia sin

aumentar el tamaño físico del dispositivo. Estos inductores son claves en filtros de señal y sistemas de alimentación de energía.

- **Sistemas de almacenamiento de energía:** Dispositivos como las bobinas superconductoras (SMES) y los sistemas de almacenamiento magnético se benefician del uso de materiales ferromagnéticos para aumentar la inductancia, permitiendo una mejor acumulación de energía.

Es importante destacar que a pesar de los beneficios que ofrecen los materiales ferromagnéticos, también presentan ciertos desafíos:

- **Saturación magnética:** Los materiales ferromagnéticos tienen un límite de saturación, más allá del cual la inductancia no puede incrementarse. Esto impone restricciones al diseño de dispositivos electromagnéticos, ya que si el material entra en saturación, las propiedades inductivas disminuyen drásticamente.
- **Pérdidas por histéresis:** En los ciclos de magnetización y desmagnetización de un material ferromagnético, parte de la energía se disipa en forma de calor debido al fenómeno de histéresis, lo que puede reducir la eficiencia en aplicaciones de alta frecuencia.
- **Corrientes parásitas:** Los materiales ferromagnéticos generan corrientes de Foucault, lo que también contribuye a las pérdidas de energía. Para mitigar esto, se utilizan núcleos laminados o con materiales de grano fino.

Ahora bien, el fenómeno del ferromagnetismo se caracteriza por el alineamiento de momentos magnéticos en una dirección común cuando se aplica un campo magnético, lo que resulta en una alta inducción magnética y la capacidad de concentrar líneas de campo magnético. La variabilidad de la inductancia en materiales ferromagnéticos, como se señala en ^(3,4), está relacionada con su permeabilidad magnética, que puede cambiar significativamente bajo diferentes condiciones de operación.

En las obras investigativas ^(5,6), se realiza un estudio sobre el diseño de inductores destacándose que la inductancia puede alcanzar un valor máximo con excitaciones moderadas, pero disminuir al saturarse el material. Esto implica que se debe considerar cuidadosamente el nivel de corriente continua en los circuitos para evitar la saturación, lo que podría comprometer la funcionalidad del dispositivo. Además, el diseño de inductores con núcleos ferromagnéticos requiere un análisis profundo de las características no lineales de estos materiales.

En ese sentido, como se plantea en ⁽⁷⁾, la inductancia es un parámetro crítico que determina cómo los circuitos responden a cambios en la corriente y el voltaje, especialmente en aplicaciones que involucran transformadores, motores y generadores eléctricos. Por lo que, conocer las variaciones de la inductancia en materiales ferromagnéticos es crucial para estudiar el impacto directo que tienen sus variaciones en el diseño y la eficiencia de estos dispositivos.

Además, el estudio de la inductancia en materiales ferromagnéticos, como se menciona en la referencia ⁽⁸⁾ revela que el valor de la permeabilidad magnética de estos materiales puede afectar significativamente la capacidad de un dispositivo para almacenar energía magnética. Este parámetro es decisivo para optimizar el rendimiento de las máquinas eléctricas permitiendo a los ingenieros anticipar y mitigar problemas relacionados con la saturación y la eficiencia energética. Por otro lado, los autores de ⁽⁹⁻¹¹⁾ afirman que la geometría de la bobina influye significativamente en la eficiencia energética de los inductores. En correspondencia destacan aspectos a tener en cuenta como:

- **Forma y razón de aspecto:** la forma geométrica de la bobina, también llamada razón de aspecto, se define como la relación entre el diámetro medio y la longitud. Una bobina larga y estrecha no tendrá la misma inductancia que una corta y ancha, aunque tengan igual número de espiras y diámetro interior. Esto se debe a que la distribución de las espiras en capas afecta la inductancia.
- **Número de capas:** al distribuir el mismo número de espiras en un arreglo multicapa para reducir la longitud (mayor razón de aspecto), el valor de la inductancia varía. Un mayor número de capas concentra mejor el campo magnético, aumentando la inductancia y mejorando la eficiencia.
- **Espaciamiento entre espiras:** si las espiras no se enrollan de forma compacta sino separadas, se reduce el número de espiras por unidad de longitud. Esto disminuye la inductancia y la eficiencia. Las bobinas multicapa con espiras separadas se recomiendan para aplicaciones con espacio reducido o para suavizar la conmutación en convertidores de potencia.
- **Sección transversal:** una sección transversal cuadrada del enrollado con un radio interior que tenga la misma área conduce a un inductor óptimo. Esto permite una distribución uniforme del campo magnético y máxima eficiencia.

Los circuitos magnéticos son sistemas en los cuales se guía el flujo magnético a través de un medio, generalmente un material ferromagnético, de manera análoga a los circuitos eléctricos que conducen corriente. Al igual que en los circuitos eléctricos, donde la corriente sigue un trayecto a través de conductores, en un circuito magnético el flujo magnético sigue un trayecto a través de un núcleo magnético. El análisis de los circuitos magnéticos es fundamental en la ingeniería eléctrica para diseñar transformadores, motores, generadores y otros dispositivos electromagnéticos.

Los circuitos magnéticos pueden analizarse mediante una analogía con los circuitos eléctricos. A continuación, se detallan los parámetros equivalentes entre ambos tipos de circuitos:

- **Fuerza Magnetomotriz (FMM):** Es la fuerza que impulsa el flujo magnético, análoga a la tensión eléctrica (V) en un circuito eléctrico. La FMM se mide en amper-vuelta y se define como se muestra en la ecuación 1:

$$FMM = N \cdot I \quad (1)$$

- **Reluctancia:** Es la oposición que ofrece un circuito magnético al flujo magnético, análoga a la resistencia en un circuito eléctrico. Se mide en A·v/Wb (amper-vuelta por weber) y se define como se muestra en la ecuación 2:

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu A} \quad (2)$$

- **Flujo Magnético (Φ):** Análogo a la corriente en un circuito eléctrico, el flujo magnético es la cantidad de flujo que atraviesa una sección del material y se mide en webers (Wb). El flujo magnético en un circuito magnético depende de varios factores, como el número de vueltas de la bobina, la corriente que fluye a través de la bobina, las propiedades del núcleo magnético, es decir su permeabilidad y la geometría del circuito. Para un núcleo magnético de longitud l , sección transversal A , y con una bobina de N espiras que conduce una corriente I , el flujo magnético se puede calcular como se muestra en la ecuación 3:

$$\Phi = \frac{FMM}{\mathfrak{R}} = \frac{N \cdot I}{\mathfrak{R}} = \frac{N \cdot I \cdot \mu \cdot A}{l} \quad (3)$$

A partir de los parámetros anteriores se puede calcular la inductancia del circuito, que es el objetivo principal de este trabajo de investigación, como se muestra en la ecuación 4:

$$L = \frac{\Phi}{I} \quad (4)$$

Es importante destacar que a pesar de esta analogía en ocasiones se torna muy complejo realizar estos análisis de forma analítica por lo que se recurre al método de los elementos finitos. Este método permite modelar de manera precisa la distribución del campo magnético en geometrías complejas, especialmente en dispositivos que involucran materiales ferromagnéticos no lineales, heterogéneos o en condiciones de saturación, por lo que es una herramienta poderosa para resolver problemas complejos en ingeniería que no pueden abordarse adecuadamente mediante cálculos manuales.

En este sentido surge el software FEMM “*Finite Element Method Magnetics*”, por sus siglas en inglés, como respuesta a la necesidad de herramientas eficaces para resolver problemas electromagnéticos complejos mediante la aplicación del método de elementos finitos.

El software FEMM es de código abierto es accesible sin costo, lo que lo convierte en una opción muy útil para estudiantes e investigadores. Su interfaz permite a los usuarios crear modelos fácilmente y realizar simulaciones sin requerir un conocimiento profundo en programación.

FEMM puede abordar problemas magnéticos, electrostáticos y de flujo térmico, lo que lo hace versátil para diversas aplicaciones en ingeniería.

La metodología propuesta se obtuvo como resultado de realizar el estudio del cálculo del parámetro inductancia a través de la aproximación de la analogía eléctrica-magnética considerando material magnético en circuitos magnéticos del curso de postgrado Fundamento de Electromagnetismo Aplicado del programa de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería con Mención en Ingeniería Eléctrica en la Universidad de Concepción, Chile.

Debido a todo lo planteado anteriormente, el objetivo de este artículo es proponer una metodología analítica y mediante la simulación con el software FEMM para la resolución de circuitos magnéticos.

DESARROLLO

Para poder desarrollar el objetivo de la presente investigación, fue necesario la constatación de los estudios teóricos existentes y la búsqueda de los conocimientos científicos acumulados en torno a la resolución de circuitos magnéticos por métodos analíticos y mediante la simulación.

El estudio se basó en una metodología descriptiva en la que se utilizaron los métodos del nivel teórico analítico–sintético e inductivo–deductivo para examinar las posiciones teóricas existentes en cuanto al empleo de software libres para el análisis de los circuitos magnéticos, específicamente el software FEMM.

Este es ampliamente utilizado en la investigación y desarrollo de motores eléctricos, generadores y otros dispositivos que dependen de campos electromagnéticos. Su uso en entornos académicos ayuda a los estudiantes a comprender conceptos complejos de electromagnetismo y métodos numéricos. Por otro lado, puede ser empleado para validar teorías y modelos mediante simulaciones precisas, facilitando el avance en el campo del electromagnetismo.

Del trabajo metodológico realizado se obtuvo como resultado el desarrollo de una metodología analítica y su comprobación mediante la simulación con el software FEMM para la resolución de circuitos magnéticos, como se muestra en la Figura 1.

También se elaboró script en el software Scilab que permite corroborar los resultados analíticos.

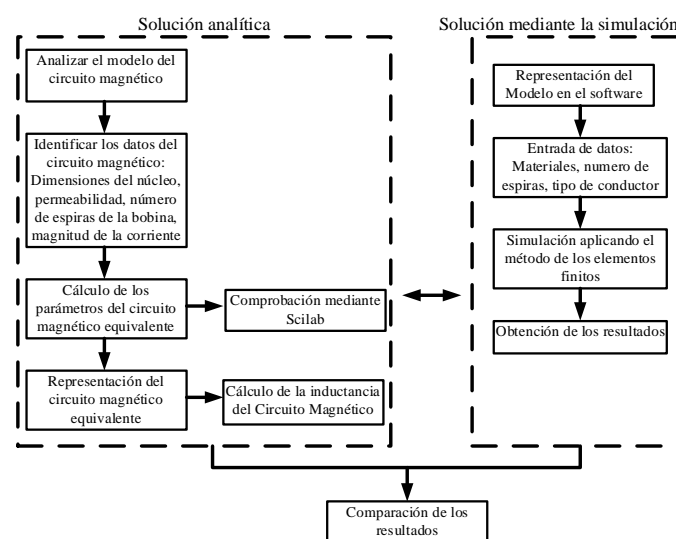


Figura 1. Metodología propuesta para la comprobación analítica y mediante la simulación con el software FEMM de circuitos magnéticos

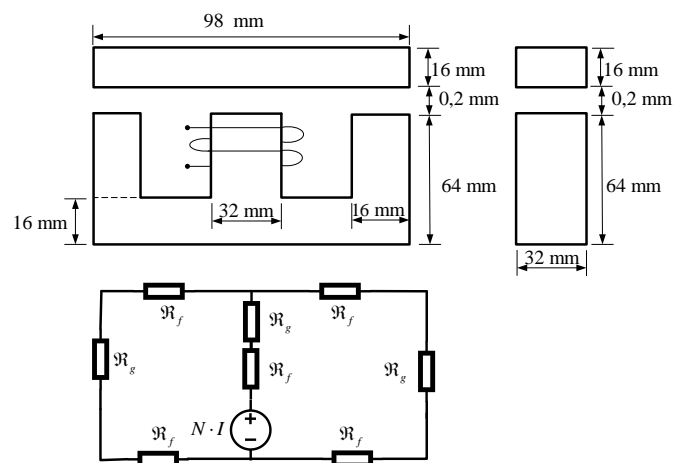
Con el objetivo de exponer la metodología aquí propuesta se desarrolla a modo de ejemplo el modelo de inductor del archivo tutorial brindado por el software FEMM. En la Figura 2 y en el anexo 1, se muestra el modelo analítico del circuito magnético y su circuito eléctrico equivalente y en la b) se muestra el modelo implementado en el software FEMM.

Es importante destacar que para realizar el estudio del cálculo de la inductancia se consideró valores de permeabilidad magnética 4000 e infinita, materiales M-19 e Hypercor 50 de la librería del software dicho programa y una variación de corriente de 1 a 50 A.

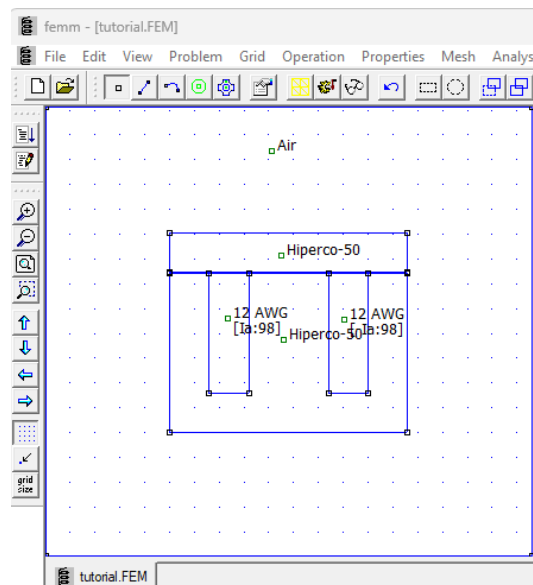
En las Tablas 1, 2, 3 y 4 se muestran los resultados del cálculo de la inductancia por métodos analíticos y mediante la simulación para cada uno de los casos de estudios.

Además, en la sección de anexos se muestra el procedimiento seguido para obtener el valor de la inductancia desde el punto de vista analítico.

Se debe señalar que se mantendrá fijo el número de vueltas en 98 y la corriente se variará en pasos de a 10.



a)



b)

Figura 2. Modelo de inductor tomado como ejemplo del software FEMM

TABLA 1. RESULTADOS ANALÍTICOS N=98

μ	Flujo Magnético (Wb)				
	Variación de la corriente (A)				
	10	20	30	40	50
4000	$1.9 \cdot 10^{-3}$	$3.8 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-3}$
∞	$2.1 \cdot 10^{-3}$	$4.2 \cdot 10^{-3}$	$6.3 \cdot 10^{-3}$	$8.4 \cdot 10^{-3}$	$10.5 \cdot 10^{-3}$

Del análisis de la tabla 1 se puede concluir que al aumentar la corriente por la bobina aumenta el flujo magnético pues se genera un mayor campo magnético, lo que resulta en un aumento del flujo magnético a través de la bobina.

Sin embargo, el valor de la inductancia, que se define como se mencionó en la ecuación 4, no varía.

Esto se debe a que la inductancia es una propiedad del diseño del inductor y del material del núcleo, y no cambia con la corriente en condiciones normales de operación. A pesar de que el flujo magnético aumenta con la corriente, la inductancia se mantiene constante pues la relación entre ellos se mantiene constante, lo que lleva a confirmar que se está trabajando en un rango de operación normal es decir en la Región Lineal o de No Saturación del núcleo, lo que resulta en una inductancia constante.

Por otro lado al aumentar a infinito el valor de la permeabilidad magnética del material se observa que el valor del flujo magnético aumenta para el mismo valor de corrientes lo cual corrobora que la

permeabilidad es una medida de la capacidad de un material para conducir líneas de flujo magnético. Un aumento en la permeabilidad significa que el material puede soportar un campo magnético más fuerte sin saturarse, lo que permite que más flujo magnético pase a través del núcleo. Esto se traduce en una mayor capacidad del circuito para almacenar energía magnética, lo que significa que el mismo devanado puede almacenar más energía magnética. Esto es especialmente importante en aplicaciones como transformadores e inductores, donde se busca maximizar la eficiencia y la capacidad de almacenamiento de energía.

Al igual que el caso anterior el flujo magnético aumenta la aumentar la corriente.

En correspondencia con el análisis anterior se pudo determinar que la inductancia para una permeabilidad magnética de 4000 es igual a 0.00019 H y para la permeabilidad magnética igual a infinito es 0.0002 H

Ahora bien, en el análisis anterior el número de vueltas de la bobina se encontraba fijo en 98 vueltas, cabe preguntarse ¿qué sucederá con el flujo magnético y con la inductancia si se aumenta el número de vuelta de la bobina?

Para responder a la pregunta, se tomará como ejemplo por su simplificación, aspecto que no quita generalidad en el análisis, el caso cuna la permeabilidad magnética es infinita y se aumentará el número de vueltas a 3 veces el valor anterior, a continuación se resume el análisis.

TABLA 2. RESULTADOS ANÁLITICOS N=294

μ	Flujo Magnético (Wb)				
	Variación de la corriente (A)				
	10	20	30	40	50
∞	6.3·10 ⁻³	12.6·10 ⁻³	19·10 ⁻³	25·10 ⁻³	31.5·10 ⁻³

Como puede observarse, el valor del flujo magnético aumenta con el aumento del número de vueltas, por ejemplo para un valor de corriente de 10 A aumentó en 3 veces su valor en relación directa con el aumento del número de vueltas de la bobina.

Por otro lado la inductancia también aumento su valor a 0.00063 H en misma proporción que el flujo magnético.

Esto se debe a que al aumentar el número de vueltas de la bobina, se incrementa el campo magnético generado por la corriente, lo que resulta en un mayor flujo magnético a través de la bobina. La inductancia aumenta porque es directamente proporcional al flujo magnético total y al número de vueltas, lo que significa que una mayor cantidad de vueltas genera más flujo magnético para una misma corriente.

Dicho esto, se procederá a realizar las simulaciones con el software FEMM, cabe mencionar que para simular una permeabilidad magnética de infinita se usará un valor de 10^{10} .

Los resultados se muestran a continuación son para los materiales M-19 e Hypercor 50, el valor de inductancia fue de 0.0067 H y 0.007 H para permeabilidad magnética de 4000 y 10^{10} respectivamente para el M-19 y para el Hypercor 50 de 0.0067 H y 0.007 H.

TABLA 3. RESULTADOS MEDIANTE LA SIMULACIÓN CON EL SOFTWARE FEMM, PARA UN MATERIAL M-19

μ	Flujo magnético (Wb)				
	Variación de la corriente (A)				
	10	20	30	40	50
400	0.067	0.134	0.201	0.268	0.33
0	135	27	405	54	568
10^{10}	0.070	0.140	0.210	0.281	0.35
	29	58	869	158	145

TABLA 4. RESULTADOS MEDIANTE LA SIMULACIÓN CON EL SOFTWARE FEMM, PARA UN MATERIAL HYPERCOR 50

μ	Flujo magnético (Wb)				
	Variación de la corriente (A)				
	10	20	30	40	50
400	0.067	0.134	0.201	0.268	0.33
0	195	39	586	781	598
10^{10}	0.070	0.140	0.210	0.281	0.35
	29	58	869	158	145

Al analizar las tablas 3 y 4 se puede concluir que los valores de flujo magnético no sufren cambios significativos al utilizar permeabilidad magnética de 4000 lo que se puede concluir que ambos materiales están trabajo en la región lineal. Además, se ha supuesto que la geometría del núcleo, las condiciones de operación y la frecuencia de operación son iguales aspectos que pueden contribuir a que los valores de flujo e inductancia no cambien sustancialmente.

Por otro lado, se puede observar que para valores de permeabilidad infinita los valores de flujo son idénticos lo que lleva a inferir que ambos materiales estén trabajando en la zona de saturación magnética para ese valor de permeabilidad.

Comparación entre el método analítico y la simulación con el software FEMM

En el cálculo analítico de la inductancia de un circuito magnético, se utilizan ciertos supuestos y simplificaciones que pueden no tener en cuenta todos los efectos que se consideran en métodos más avanzados como el de los elementos finitos.

Se pueden mencionar aspectos clave sobre los parámetros que se pueden despreciar en el cálculo analítico y cómo se comparan con el método de elementos finitos:

- **Homogeneidad del Material:**

En el cálculo analítico, a menudo se asume que el material del núcleo es homogéneo y tiene propiedades constantes (como la permeabilidad) en toda su extensión. Esto puede no ser cierto en materiales compuestos o en núcleos que presentan variaciones en la microestructura.

- **Efectos de Saturación:**

La saturación magnética del material se puede despreciar en cálculos analíticos simples. Sin embargo, en la práctica, muchos materiales magnéticos no se comportan linealmente a altas densidades de flujo magnético, y la saturación puede tener un efecto significativo en la inductancia.

- **Pérdidas Magnéticas:**

Las pérdidas por histéresis y corrientes parásitas se desprecian en los cálculos analíticos. Estas pérdidas pueden ser significativas en materiales conductores y afectan la eficiencia del circuito magnético.

- **Geometría Idealizada:**

Se suele asumir que la geometría del circuito magnético es ideal. En la práctica, las imperfecciones en la geometría pueden afectar el flujo magnético y, por lo tanto, la inductancia.

- **Efectos de Bordas:**

En el cálculo analítico se ignoran los efectos de los bordes y las esquinas del núcleo, que pueden influir en el campo magnético.

El método de elementos finitos tiene en cuenta estos factores que se desprecian en el cálculo analítico.

Se puede concluir que el cálculo analítico de la inductancia simplifica muchos aspectos del circuito magnético, asumiendo homogeneidad, despreciando la saturación y las pérdidas, y utilizando geometrías ideales. En contraste, el método de elementos finitos proporciona un análisis más detallado y preciso al considerar variaciones en el material, efectos de saturación, pérdidas y geometrías complejas. Esto hace que el FEM sea una herramienta valiosa para el diseño y análisis de circuitos magnéticos en aplicaciones prácticas.

CONCLUSIONES

A partir de los resultados del trabajo se puede concluir que:

- Se utilizó un modelo de inductor del software FEMM para estudiar la inductancia, considerando diferentes valores de permeabilidad magnética y variaciones de corriente.

- Se presentaron resultados analíticos que mostraron cómo el flujo magnético aumenta con la corriente, pero la inductancia se mantuvo constante en condiciones normales de operación, confirmando que se trabaja en la región lineal del núcleo.
- Se observó que, al aumentar la permeabilidad magnética, el flujo magnético también aumentó, lo que indica que materiales con mayor permeabilidad pueden soportar campos magnéticos más fuertes sin saturarse.
- Se analizó el efecto de aumentar el número de vueltas de la bobina, lo que resultó en un aumento proporcional tanto del flujo magnético como de la inductancia.
- Los resultados mediante simulación en FEMM mostraron que los valores de flujo magnético y inductancia eran consistentes con los resultados analíticos, aunque el método de elementos finitos proporcionó un análisis más detallado.
- La comparación entre los métodos analíticos y de simulación mostró que, aunque ambos enfoques proporcionan resultados similares en condiciones normales, el método de elementos finitos ofrece una mayor precisión al considerar factores que el análisis analítico simplifica o ignora.
- La permeabilidad magnética es un factor crítico en el diseño de inductores, ya que influye directamente en la capacidad del núcleo para manejar flujos magnéticos y, por ende, en la inductancia.
- El análisis analítico, aunque útil para obtener una comprensión básica, no captura todos los efectos presentes en un sistema real, como la saturación magnética y las pérdidas, lo que puede llevar a resultados menos precisos en aplicaciones prácticas.
- El uso de software como FEMM es esencial para el diseño y análisis de circuitos magnéticos complejos, ya que permite simular condiciones reales y obtener resultados más precisos que son cruciales para aplicaciones en ingeniería.
- Este estudio es importante para el diseño de transformadores, inductores y otros dispositivos electromagnéticos, donde la eficiencia y la capacidad de almacenamiento de energía son fundamentales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 Chapman SJ. Máquinas Eléctricas. Mc Graw-Hill/Interamericana Editores, SA; 2003.
- 2 Hayt E y Kemmerly J. Engineering Circuit Analysis, 8th ed. New York, USA: McGraw-Hill; 2012.
- 3 Viego PR, Sousa SV, Gómez SJ y Quispe OE. Motores sincrónicos de reluctancia asistidos por iman permanente: Un nuevo avance en el desarrollo de los motores eléctricos. Ingeniería Investigación y Tecnología. 2018; XIX (3): 267 -277.

- 4 Chiguano B, Ramírez JD, Quilumba FL y Gallardo C. Estimation of the Synchronous Machine Electrical Parameters based on Laboratory Measurements using Nonlinear Optimization Methods. *Técnica energía*. 2018; 15(1): 30-43.
- 5 Norbey SJ. Diseño y parametrización de inductores con núcleo de hierro. *Scientia et Technica*. 2009; XV(41): 19-24.
- 6 Acosta RG. Inversor resonante para ahorro de energía en un calentador de agua mediante inducción magnética. *Uisarel Revista Científica*. 2019; 6(1): 1 - 20.
- 7 Corson DR y Lorrain F. *Electromagnetic Fields and Waves*, New York: W. H. Freeman and Company; 1988.
- 8 Spaldin NA. *Magnetic materials: Fundamentals and device applications*, Printed in the United Kingdom at the University Press, Cambridge; 2003.
- 9 Martínez F y Morenas J. Optimización del rotor de un alternador inductor heteropolar con inversión de flujo. *Información tecnológica*. 2020; 31(2): 239-252,.
- 10 Reider BN. Método práctico para diseño de inductores. *Pistas Educativas*. 2006; XXXVII(120): 484 - 500.
- 11 González M, Perez L, Santiago G y Veiras F. Materiales ferromagnéticos: ¿Cómo es eso que el vector H se da vuelta?. *Revista Brasileira de Ensino de Física*. 2017; 39 (2):1 - 10.

ANEXOS

Anexo 1. Procedimiento seguido para el cálculo de la solución analítica.

Paso 1: Representación del circuito eléctrico equivalente al modelo del circuito magnético bajo estudio.

Ver Figura 2.

Paso 2: Cálculo de las reluctancias equivalentes por tramo.

Es importante destacar que \mathfrak{R}_f representa la reluctancia equivalente por cada tramo del material ferromagnético, dependerá de la longitud media y el área de la sección transversal que atravesará el flujo magnético así como de la permeabilidad magnética del material ferromagnético, como se muestra en la ecuación 2. De igual manera \mathfrak{R}_g representa la reluctancia del entrehierro pero hay que tener en cuenta que en este caso el valor de la permeabilidad magnética será la del aire. A modo de ejemplo se mostrará el cálculo de la reluctancia del entrehierro y de uno de los tramos.

Entre hierro:

$$l = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$A = 16 \cdot 32 \cdot 10^{-6} = 512 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}}$$

$$\mathfrak{R}_g = \frac{0,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{512 \cdot (10^{-3})^2 \text{ m}^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}}} \approx \boxed{310\,849 \text{ A/Wb}}$$

Material ferromagnético:

$$\mathfrak{R}_f = \frac{105 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{512 \cdot (10^{-3})^2 \text{ m}^2 \cdot 4000 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}}} \approx \boxed{40\,799 \text{ A/Wb}}$$

A partir de este procedimiento y utilizando las prestaciones del software libre Scilab se realizó un Script que permite optimizar este proceso, el código se muestra en la Figura 3.

```

Cálculo_de_Reluctancia.sci (C:\Users\Maykop Pérez Mtnez\Desktop\Cálculo_de_Reluctancia.sci) - SciNotes
Cálculo_de_Inductancia.sci x Cálculo_de_Reluctancia.sci x
1 clear all
2 clc
3 l=input("Entre la longitud del tramo en m:");
4 a=input("Entre el ancho de la sección transversal en m:");
5 b=input("Entre el largo de la sección transversal en m:");
6 mu=input("Entre el valor de permeabilidad magnética:");
7 mo=4*pi*1e-7;
8 area=b*a;
9 R=1/(mu*mo*area);
10 // Muestra el resultado
11 disp("El valor de la reluctancia es: ." + string(R) + ". A/Wb");

```

Figura 3. Script en Scilab que permite calcular el valor de la Reluctancia por cada tramo

En correspondencia, el valor de la reluctancia por cada tramo se muestra en el circuito equivalente de la Figura 4. Es importante aclarar que para este ejemplo se tomó como valor de corriente 10 A y 98 vueltas en la bobina.

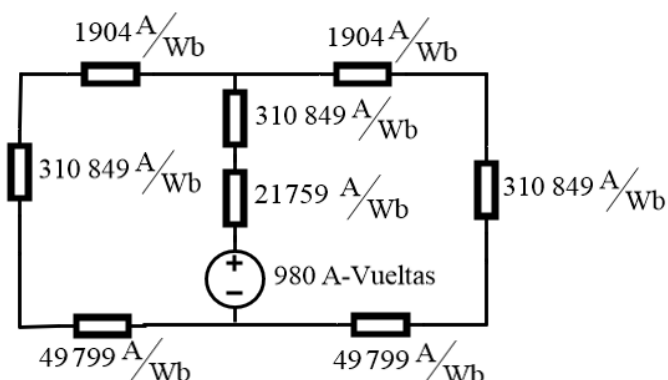


Figura 4. Circuito eléctrico equivalente del modelo magnético tomado como ejemplo

Se debe aclarar que el para el cálculo de las reluctancias del circuito de la Figura anterior se tuvo en cuenta el valor de 4000 ya que para cuando esta sea infinito solo se tendrán en cuenta la reluctancias del entrehierro pues la del material ferromagnético será 0.

Ahora bien para calcular la inductancia es necesario reducir el circuito de la Figura 4 a un solo lazo para después aplicar una ley de Ohm, el procedimiento es el siguiente:

Paso 1: Como las reluctancias a la derecha y a la izquierda de la rama donde se encuentra la bobina son iguales, basta con sumar las de una rama en serie y después dividir las entre dos, el circuito de la Figura 5 muestra los valores. Como será una generalidad para cada caso de estudio se desarrolló el código que se muestra en la Figura 6.

Paso 2: Aplicar ley de Ohm y calcular el valor de Flujo magnético.

Paso 3: Calcular la Inductancia del circuito

Las ecuaciones que describen el procedimiento de cálculo tomado como ejemplo son las siguientes:

$$\mathcal{R} = \frac{(1904 + 310849 + 49799)}{2} \approx 181276 \text{ A/Wb}$$

$$\Phi = \frac{980}{(332608 + 181276)} = 1.9 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$$

$$L = \frac{1.9 \cdot 10^{-3}}{10} \approx 0.00019 \text{ H}$$

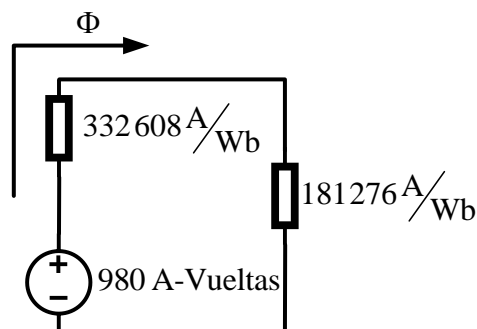


Figura.5. Circuito eléctrico simplificado

```

Cálculo_de_Inductancia.sci (C:\Users\Maykop Pérez Mtnez\Desktop\Cálculo_de_Inductancia.sci) - SciNotes
Cálculo_de_Inductancia.sci x Cálculo_de_Reluctancia.sci x
1 clear all
2 clc
3 N=input("Entre el número de vueltas:");
4 I=input("Entre el valor de la corriente:");
5 R1=input("Entre el valor de la reluctancia 1:");
6 R2=input("Entre el valor de la reluctancia 2:");
7 R3=input("Entre el valor de la reluctancia 3:");
8 R=(R1+R2+R3)/2;
9 R4=input("Entre el valor de la reluctancia en serie con la fuente:");
10 Flujo=(N*I)/(R+R4);
11 disp("El valor del flujo magnético es: " + string(Flujo) + " Wb");
12 L=Flujo/I;
13 disp("El valor de la inductancia es: " + string(L) + " H");

```

Figura 6. Script para calcular la inductancia

Recibido: 16 de julio de 2024

Aceptado con recomendaciones: 2 de noviembre de 2024

Aceptado: 12 de diciembre de 2024

El (los) autor(es) de este artículo declara(n) que:

Este trabajo es original e inédito, no ha sido enviado a otra revista o soporte para su publicación.

Está(n) conforme(s) con las prácticas de comunicación de Ciencia Abierta.

Ha(n) participado en la organización, diseño y realización, así como en la interpretación de los resultados.

Luego de la revisión del trabajo, su publicación en la revista Pedagogía Profesional.

NO HAY NINGUN CONFLICTO DE INTERÉS con otras personas o entidades