

CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL E SIMULAÇÃO DE NÚCLEOS MAGNÉTICOS PARA APLICAÇÕES EM ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

Gabriel Soares Faria¹, Cláudio Henrique Gomes dos Santos², Raul Vieira da Silva³

¹ Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Divinópolis, Brasil
(gabrielsoaresfaria7@gmail.com)

² Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Divinópolis, Brasil

³ Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Divinópolis, Brasil

Resumo: Este trabalho apresenta uma metodologia para caracterização experimental e modelagem de núcleos magnéticos aplicados à eletrônica de potência. Foram analisados núcleos de aço laminado, ferrite e pó de ferro, cujos parâmetros magnéticos foram obtidos experimentalmente e implementados no PSIM. Um conversor Buck foi utilizado para avaliar os efeitos da saturação magnética, demonstrando que modelos não lineares representam com maior precisão o comportamento do indutor.

Palavras-chave: Núcleos magnéticos; saturação magnética; histerese; conversor buck.

INTRODUÇÃO

O avanço da eletrônica de potência tem impulsionado o desenvolvimento de sistemas de conversão de energia cada vez mais eficientes, compactos e confiáveis. Conversores estáticos são atualmente empregados em diversas aplicações, como fontes chaveadas, acionamentos elétricos, sistemas fotovoltaicos, veículos elétricos, sistemas de armazenamento de energia e integração de fontes renováveis ao sistema elétrico. Nesses sistemas, os componentes magnéticos, especialmente indutores e transformadores, desempenham funções fundamentais no armazenamento temporário de energia, filtragem de corrente, isolamento galvânico e adequação dos níveis de tensão. Dessa forma, o projeto adequado desses componentes influencia diretamente parâmetros como eficiência energética, densidade de potência, confiabilidade e desempenho térmico dos conversores eletrônicos de potência (Mohan et al., 2003; Erickson e Maksimović, 2001).

Embora frequentemente representados por modelos lineares em análises simplificadas, os componentes magnéticos reais apresentam comportamento fortemente dependente das características do material empregado no núcleo e das condições de operação. Materiais ferromagnéticos apresentam fenômenos não lineares associados principalmente à saturação magnética e à histerese. A saturação ocorre quando o aumento da força magnetomotriz aplicada ao enrolamento deixa de produzir um aumento proporcional da densidade de fluxo magnético, ocasionando redução da permeabilidade efetiva e da indutância do componente. Como consequência,

podem ocorrer elevação da corrente elétrica, aumento das perdas por condução e degradação da eficiência do conversor. Além disso, o fenômeno da histerese representa a dependência da resposta magnética em relação ao histórico de magnetização do material, resultando em perdas energéticas durante os ciclos de operação. Esses efeitos tornam-se ainda mais relevantes em aplicações de alta frequência, nas quais os componentes magnéticos são submetidos a variações rápidas de fluxo e elevados níveis de excitação (Hur et al., 2010; Sullivan, 1999; McLyman, 2011).

A utilização de modelos lineares ou parâmetros constantes para representação dos componentes magnéticos pode resultar em discrepâncias entre os resultados simulados e o comportamento experimental, principalmente quando o núcleo opera próximo à região de saturação ou sob diferentes níveis de corrente contínua de polarização. Nesse contexto, modelos mais realistas, baseados em características experimentais dos materiais magnéticos, tornam-se essenciais para melhorar a precisão das análises computacionais e auxiliar no desenvolvimento de conversores mais eficientes. Estudos recentes destacam que a modelagem adequada de elementos magnéticos deve considerar características como curvas de magnetização, perdas dependentes da frequência, efeitos de saturação e influência das condições reais de operação. Além disso, abordagens baseadas em identificação experimental e modelos não lineares têm sido exploradas para representar com maior fidelidade o comportamento de indutores e transformadores

empregados em sistemas de eletrônica de potência (Wilson et al., 2002; Górecki e Detka, 2023; Motomatsu et al., 2023).

Apesar dos avanços relacionados à modelagem de componentes magnéticos, ainda existe uma dificuldade na obtenção de modelos que conciliem precisão, simplicidade computacional e facilidade de implementação em ferramentas de simulação de circuitos. Muitos projetos continuam baseados em dados fornecidos pelos fabricantes ou aproximações lineares, os quais podem não representar adequadamente o comportamento do núcleo quando submetido a diferentes condições de excitação. Dessa forma, torna-se necessária a realização de procedimentos experimentais capazes de caracterizar os materiais magnéticos e fornecer parâmetros que possam ser incorporados diretamente aos modelos computacionais.

Nesse contexto, este trabalho apresenta uma metodologia integrada de caracterização experimental e modelagem computacional de diferentes materiais utilizados em núcleos magnéticos aplicados à eletrônica de potência. Inicialmente, são obtidos experimentalmente parâmetros magnéticos de três diferentes tipos de núcleos toroidais: aço elétrico laminado, ferrite e pó de ferro. Posteriormente, os dados obtidos são utilizados para desenvolvimento de modelos não lineares implementados no ambiente de simulação PSIM, permitindo representar os efeitos associados à saturação magnética durante a operação do componente. Como validação da metodologia proposta, realiza-se um estudo de caso utilizando um conversor Buck, comparando o comportamento de um indutor ideal com um modelo baseado em características experimentais do núcleo magnético. Assim, busca-se demonstrar a influência dos efeitos não lineares dos materiais magnéticos sobre o desempenho do conversor e contribuir para o desenvolvimento de modelos mais precisos aplicados ao projeto de sistemas de eletrônica de potência.

MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia desenvolvida neste trabalho foi estruturada em três etapas principais, caracterização física e extração dos parâmetros magnéticos dos núcleos toroidais, caracterização experimental do comportamento não linear dos materiais magnéticos; e implementação dos modelos obtidos em ambiente computacional e validação em uma aplicação de eletrônica de potência.

Inicialmente, foram analisados três tipos de materiais magnéticos empregados na construção de componentes indutivos: núcleo metálico laminado, núcleo de ferrite e núcleo de pó de ferro. A partir das

características geométricas e dos ensaios experimentais, foram determinados parâmetros fundamentais para a modelagem dos componentes, como relutância magnética, permeabilidade relativa e constante geométrica A_L .

Posteriormente, os dados experimentais obtidos foram utilizados para implementação de modelos não lineares no software PSIM, permitindo avaliar a influência dos fenômenos magnéticos no comportamento de um conversor Buck.

Inicialmente, foram realizadas medições das características geométricas dos núcleos toroidais, incluindo diâmetro externo, diâmetro interno, altura e área efetiva da seção transversal. Essas informações foram utilizadas para determinação do comprimento médio do caminho magnético e da área efetiva do núcleo.

Para a obtenção dos parâmetros elétricos dos componentes, foram confeccionados enrolamentos contendo diferentes quantidades de espiras, utilizando configurações de 10 e 14 espiras. A indutância dos enrolamentos foi medida experimentalmente utilizando um medidor LCR, permitindo determinar a relutância magnética equivalente do circuito. A partir da relutância obtida e das dimensões físicas dos núcleos, foi calculada a permeabilidade magnética relativa dos materiais.

Além disso, foi determinado o parâmetro A_L , utilizado frequentemente pelos fabricantes de núcleos magnéticos para relacionar a indutância ao número de espiras. Os valores obtidos durante a caracterização experimental são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros Magnéticos Obtidos

Parâmetro	Metálico	Ferrite	Pó de Ferro
Relutância ($A \cdot c/Wb$)	26k	333k	5,9M
μ_r	76,67	3,50	98,00
A_L (nH/e ²)	37,37	37,37	167,00

Observa-se que cada material apresenta características distintas de permeabilidade, relutância e capacidade de armazenamento de energia magnética. O núcleo metálico apresentou a maior permeabilidade relativa, resultando em menor relutância magnética e maior valor de A_L . Esse comportamento está associado à elevada facilidade de condução do fluxo magnético pelo material. Entretanto, essa característica também implica menor capacidade de suportar elevados níveis de força magnetomotriz antes da saturação.

O núcleo de ferrite apresentou valores intermediários de permeabilidade, característica associada à sua aplicação em frequências elevadas devido às menores perdas magnéticas. Já o núcleo de pó de ferro apresentou menor permeabilidade relativa, porém maior capacidade de armazenamento de energia devido ao entreferro distribuído em sua estrutura.

Após a determinação dos parâmetros magnéticos iniciais, foram realizados ensaios experimentais para obtenção das curvas de magnetização dos materiais. Para isso, foi montado um circuito elétrico composto por uma fonte de excitação alternada, resistência de limitação e o indutor sob teste, formando uma configuração RLC série.

Durante os ensaios, foram medidas simultaneamente a tensão aplicada ao componente magnético (V_L) e a corrente elétrica no enrolamento (I) utilizando um osciloscópio digital. Esses sinais foram posteriormente processados para determinação da força magnetomotriz aplicada ao núcleo e do fluxo magnético associado.

A partir desses valores, foram construídas as curvas experimentais de magnetização relacionando a força magnetomotriz aplicada ao fluxo magnético produzido no núcleo. Essas curvas permitem observar os efeitos de saturação e histerese característicos de cada material.

A modelagem computacional foi realizada utilizando o software PSIM, empregado para implementação dos circuitos equivalentes e simulação dos componentes magnéticos.

Os dados experimentais obtidos nas etapas anteriores foram utilizados para representar o comportamento não linear dos indutores por meio das curvas de magnetização dos respectivos materiais. Diferentemente dos modelos convencionais baseados em indutâncias constantes, os modelos desenvolvidos permitem representar a variação da permeabilidade magnética em função da intensidade da excitação aplicada.

A partir desses modelos, foram implementados circuitos de simulação para cada núcleo analisado, permitindo reproduzir numericamente as características observadas nos ensaios experimentais, incluindo a redução da indutância causada pela saturação magnética.

Posteriormente, foi realizado um estudo de caso utilizando um conversor CC-CC do tipo Buck, comparando o desempenho de um indutor representado por um modelo ideal com um modelo baseado em características reais do núcleo magnético. Essa análise teve como objetivo avaliar o impacto da não linearidade magnética sobre a

corrente do indutor e sobre a ondulação de corrente do conversor.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir das medições das características geométricas dos núcleos e dos ensaios de indutância realizados com diferentes configurações de enrolamento, foram determinados os principais parâmetros magnéticos dos materiais analisados.

A deformação observada na forma de onda da corrente representa a influência dos efeitos não lineares presentes nos materiais magnéticos, principalmente devido à variação da permeabilidade durante o processo de magnetização. Em um núcleo ideal, a relação entre fluxo magnético e corrente seria linear; entretanto, os resultados experimentais evidenciam a alteração dessa relação quando o material se aproxima da região de saturação.

No núcleo metálico laminado, conforme ilustrado na Figura 1, observa-se uma distorção mais acentuada na corrente, caracterizada pelo surgimento de picos elevados durante os períodos de maior excitação. Esse comportamento está associado à elevada permeabilidade inicial do material, que permite grande variação de fluxo para baixos níveis de força magnetomotriz, porém apresenta redução abrupta da permeabilidade após atingir a região de saturação.

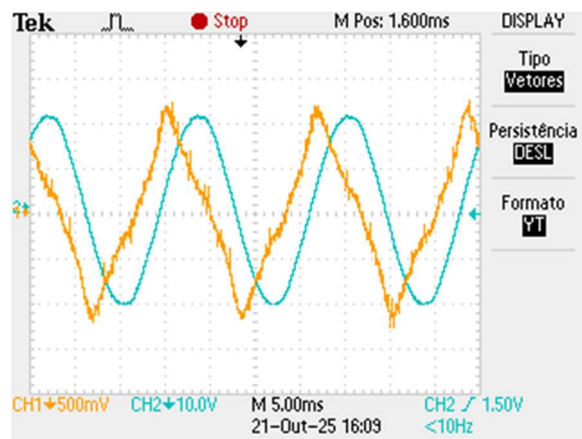


Figura 1. Formas de onda do núcleo metálico.. Fonte: Autor, 2026.

O núcleo de ferrite, ilustrado na Figura 2, apresenta comportamento intermediário, com menor distorção da corrente quando comparado ao núcleo metálico. Esse resultado está relacionado à menor permeabilidade relativa do material, proporcionando uma variação mais gradual do fluxo magnético.

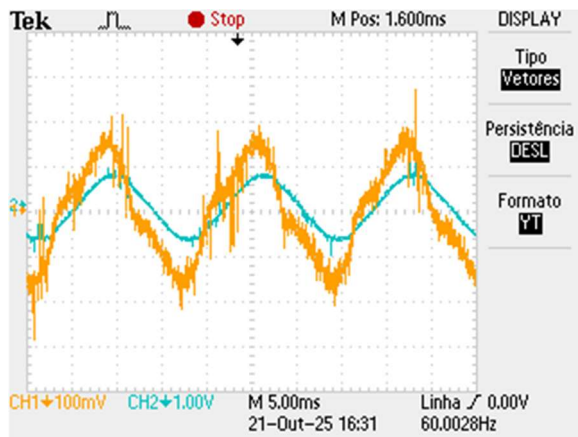


Figura 2. Formas de onda do núcleo de ferrite. Fonte: Autor, 2026.

Já o núcleo de pó de ferro, ilustrado na Figura 3, apresenta uma forma de onda de corrente mais próxima da característica senoidal, indicando uma saturação mais suave. Esse comportamento é consequência do entreferro distribuído presente na estrutura do material, que reduz a variação abrupta da permeabilidade e permite uma operação mais estável sob elevados níveis de corrente.

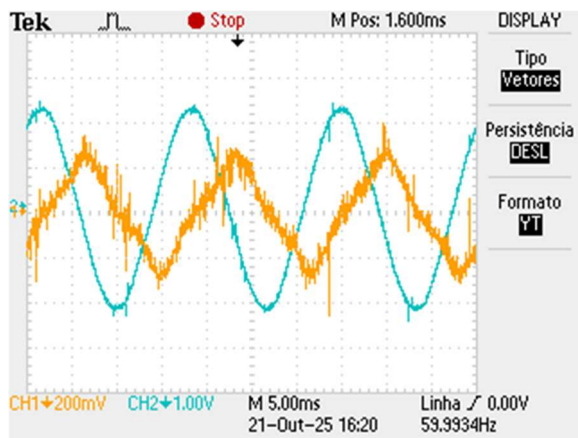


Figura 3. Formas de onda do núcleo de pó de ferro. Fonte: Autor, 2026.

Após o processamento dos dados experimentais, as relações entre força magnetomotriz e fluxo magnético foram utilizadas para implementação dos modelos não lineares no ambiente PSIM. A Figura 4 apresentam os circuitos de simulação desenvolvidos para cada núcleo analisado.

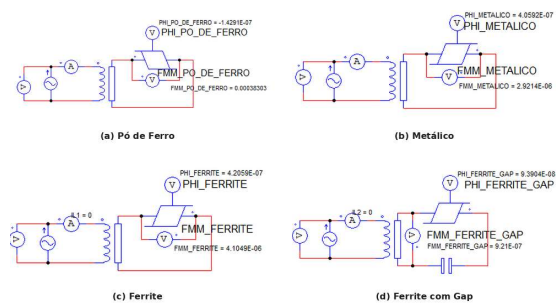


Figura 4. Circuitos experimentais para núcleos magnéticos (a) Pó de Ferro, (b) Metálico, (c) Ferrite e (d) Ferrite com Gap. Fonte: Autor, 2026.

Os modelos implementados permitem representar a variação da característica magnética do material durante a operação do componente, diferentemente da abordagem convencional baseada em uma indutância constante. Dessa forma, os efeitos associados à saturação magnética podem ser observados diretamente durante a simulação do circuito elétrico.

A Figura 8 apresenta a comparação das curvas de magnetização obtidas para todos os núcleos analisados.

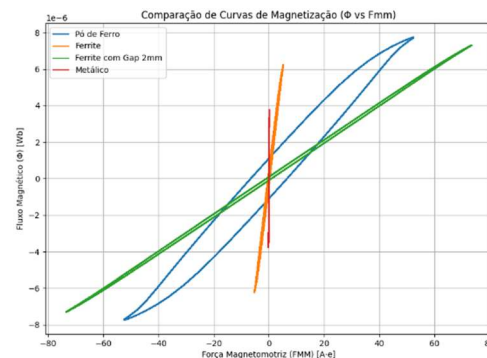


Figura 8. Curvas de magnetização obtidas a partir dos modelos não lineares dos núcleos analisados.

Verifica-se que a inclinação inicial das curvas apresenta relação direta com os valores de permeabilidade relativa obtidos experimentalmente. O núcleo metálico apresenta a maior inclinação inicial, indicando maior permeabilidade magnética e maior capacidade de produzir fluxo para uma mesma força magnetomotriz aplicada.

Entretanto, observa-se também que esse material apresenta uma redução mais acentuada da variação do fluxo quando submetido a elevados níveis de excitação, caracterizando uma saturação mais abrupta. O núcleo de ferrite apresenta comportamento intermediário, enquanto o núcleo de pó de ferro apresenta menor inclinação inicial, porém

uma transição mais gradual para a região de saturação.

Além disso, foi analisado um núcleo de ferrite com entreferro, cuja curva apresenta menor inclinação devido ao aumento da relutância magnética do circuito. A inserção do entreferro reduz a permeabilidade efetiva do conjunto, permitindo maior capacidade de armazenamento energético antes da saturação do material.

Os resultados obtidos demonstram que os modelos desenvolvidos conseguem representar adequadamente as diferenças de comportamento entre os materiais magnéticos analisados, possibilitando sua aplicação em estudos mais realistas de conversores eletrônicos.

Com o objetivo de avaliar o impacto prático dos efeitos não lineares dos núcleos magnéticos, foi realizado um estudo de caso utilizando um conversor CC-CC do tipo Buck. Para essa análise, foi utilizado um modelo não linear baseado no núcleo de pó de ferro MMT034T7725, cujas características foram obtidas a partir dos dados experimentais e das informações disponibilizadas pelo fabricante.

A Figura 10 mostra os circuitos simulados no PSIM considerando duas condições distintas: um modelo convencional utilizando um indutor ideal com indutância constante e um modelo não linear baseado nas características reais do núcleo magnético.

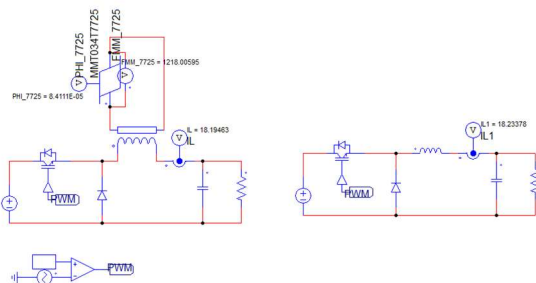


Figura 9. Circuitos do conversor Buck no PSIM. Esquerda: com indutor não linear. Direita: com indutor ideal. Fonte: Autor, 2026.

A Figura 10 apresenta a comparação entre as correntes no indutor para os dois modelos analisados. O modelo ideal, representado pela corrente I_{L1} , apresenta uma ondulação aproximadamente constante durante a operação do conversor. Entretanto, o modelo realista, representado pela corrente I_L , apresenta aumento da ondulação de corrente para valores elevados de corrente.

Esse comportamento ocorre devido à aproximação do núcleo à região de saturação magnética. Com o aumento da corrente no enrolamento, ocorre redução da permeabilidade efetiva do material e,

consequentemente, diminuição da indutância do componente, a redução da indutância provoca aumento da inclinação da corrente durante os intervalos de condução do conversor, resultando em maior ripple de corrente.

Os resultados evidenciam que modelos baseados em indutores ideais podem subestimar os esforços elétricos presentes nos componentes magnéticos, principalmente em condições próximas à saturação. Dessa forma, a utilização de modelos não lineares obtidos experimentalmente apresenta-se como uma alternativa importante para melhorar a precisão das simulações e auxiliar no desenvolvimento de projetos mais confiáveis em eletrônica de potência.

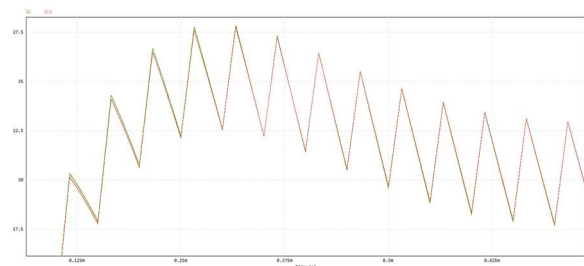


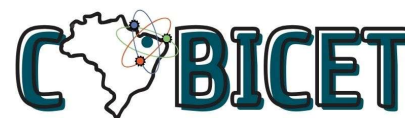
Figura 6. Comparação da corrente no indutor: I_L (realista, verde) vs. I_{L1} (ideal, vermelha). A saturação aumenta o *ripple* da corrente real. Fonte: Autor, 2026.

CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma metodologia para caracterização experimental e modelagem computacional de diferentes materiais magnéticos aplicados a componentes indutivos em eletrônica de potência. Foram analisados núcleos metálicos laminado, ferrite e pó de ferro, permitindo avaliar suas características magnéticas e seus efeitos no comportamento não linear dos indutores.

Os resultados experimentais evidenciaram diferenças significativas entre os materiais, principalmente em relação à permeabilidade magnética e ao comportamento de saturação. A implementação dos modelos não lineares no PSIM permitiu representar adequadamente essas características, demonstrando maior fidelidade em comparação aos modelos ideais.

A aplicação em um conversor Buck mostrou que a consideração dos efeitos de saturação é fundamental, uma vez que a redução da indutância em condições de elevada corrente provoca aumento da ondulação de corrente no indutor. Dessa forma, a metodologia proposta contribui para o desenvolvimento de modelos mais precisos e para o dimensionamento adequado de componentes magnéticos utilizados em sistemas de eletrônica de potência.



AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Campus Divinópolis, pelo suporte estrutural e disponibilização dos recursos laboratoriais necessários para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ERICKSON, R. W.; MAKSIMOVIĆ, D. Fundamentals of Power Electronics. 2. ed. Springer, 2001.

MOHAN, N.; UNDELAND, T. M.; ROBBINS, W. P. Power Electronics: Converters, Applications, and Design. 3. ed. Wiley, 2003.

MCLYMAN, C. W. T. Transformer and Inductor Design Handbook. 4. ed. CRC Press, 2011.

SULLIVAN, C. R. Computationally efficient winding loss calculation with multiple windings, arbitrary waveforms, and two-dimensional field geometry. IEEE Transactions on Power Electronics, 1999.

WILSON, P. R.; ROSS, J. N.; BROWN, A. D. Simulation of magnetic component models in electric circuits including dynamic thermal effects. IEEE Transactions on Power Electronics, 2002.

GÓRECKI, K.; DETKA, K. SPICE-Aided Models of Magnetic Elements—A Critical Review. Energies, 2023.

MOTOMATSU, T. et al. A Data-Driven Inductor Modeling Technique Using Parametric Circuit Simulation and Deep Learning. IEEE Transactions on Magnetics, 2023.