Medição de Indutores em Corrente Contínua Baseada no Estimador dos Mínimos Quadrados Não Recursivo

Josué L. da Silva, Jéssica B. Gregório, Paula S. S. Barbosa, Matusalém M. Lanes * **Pedro Henrique C. Lopes, Pedro S. Almeida** **

* *Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG, MG, (e-mail: josuelima@cefetmg.br; jessicagregoriob@gmail.com; paulastael@gmail.com; mmlanes@cefetmg.br).*
** *Universidade Federal de Juiz de Fora, MG, (e-mail: p.henrique.lopes7@gmail.com; pedro.almeida@ufjf.edu.br).*

Abstract: This work presents a measurement technique developed with the goal of obtaining specifications for inductors involved in the design of direct current (DC-DC) converters, which are widely used in the context of power electronics and are of noted importance in various literatures. The identification method consists of an algorithm based on the non-recursive least squares estimator. Tests were conducted using an implemented experimental apparatus, which made it possible to analyze saturation, as well as measure voltage and current under the nominal operating conditions of the inductors. These quantities were applied to the algorithm, which in turn specified the inductors through their values of inductance and resistance. These values were compared with those provided by a commercial LCR meter. The results obtained assess the viability of the proposed inductor measurement technique.

Resumo: Esse trabalho apresenta a técnica de medição desenvolvida com o objetivo de obter especificações de indutores envolvidos no projeto de conversores de corrente contínua (CC-CC), largamente utilizados no contexto da eletrônica de potência e de importância evidenciada em diversas literaturas. O método de identificação consiste em um algoritmo baseado no estimador dos mínimos quadrados não recursivo. Foram realizados ensaios, onde com o uso de um aparato experimental implementado, foi possível analisar a saturação, bem como medir a tensão e a corrente nas condições nominais de operação de indutores. Essas grandezas foram aplicadas no algoritmo, que por sua vez especificou os indutores através dos seus valores de indutância e resistência, valores esses, que foram comparados com os fornecidos por um medidor LCR comercial. Os resultados obtidos avaliam a viabilidade da técnica de medição de indutores proposta.

Keywords: Inductors; DC-DC Converters; Modeling; Non-Recursive Least Squares Estimator.

Palavras-chaves: Indutores; Conversores CC-CC; Modelagem; Estimador dos Mínimos Quadrados Não Recursivo.

1. INTRODUÇÃO

Na eletrônica de potência, os conversores CC-CC representam um ramo importante no desenvolvimento desta ciência, possuindo grandes aplicabilidades, dentre elas, a utilização em carregamento de baterias, sistemas de iluminação, computadores, sistemas médicos, áreas de geração de energia, entre outras (Rashid, 2014). Com o grande crescimento deste setor, há sempre uma preocupação de projetar equipamentos cada vez mais eficientes.

Um conversor estático pode ser definido como um sistema composto por semicondutores de potência e por elementos passivos (normalmente indutores e capacitores), combinados de tal maneira a controlar o fluxo de potência elétrica da fonte de entrada para a fonte de saída (Mohan et al., 1995).

Nos conversores, os indutores são empregados em filtro de saída, na entrada ou para armazenamento de energia. Assim, esses elementos sejam de baixa ou alta frequência são essenciais para o funcionamento dos conversores CC-CC, uma vez que o conversor é menos eficiente sem projeto adequado do indutor (Mu e Lee, 2011).

Em decorrência do exposto, a caraterização de um indutor por meio de medidas é extremamente importante no âmbito da implementação de conversores. Esta informação é obtida, tipicamente, através de medidores LCR, que são equipamentos caros e nem sempre disponíveis (Assunção, 2014).

⋆ Este projeto foi parcialmente financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação de Minas Gerais (FAPEMIG), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior(CAPES).

O medidor LCR disponível no laboratório de eletrônica do CEFET-MG Campus Leopoldina é o modelo U1733C, da *Agilent*. O mesmo caracteriza-se por realizar as medições em corrente alternada com amplitude limitada em $1V$ $(0,7V_{RMS})$. Assim, a mensuração dos indutores é restrita a baixas correntes, considerando apenas as melhores condições do núcleo.

Este artigo tem como objetivo apresentar a aplicação do algoritmo dos mínimos quadrados na estimação da resistência e indutância série de indutores operando em corrente contínua. A análise será realizada com base em dados de tensão e corrente coletados das curvas de magnetização e desmagnetização do componente, sob condições operacionais próximas às nominais. Adicionalmente, o estudo investigará a saturação dos indutores para determinar o limite máximo de corrente que podem suportar antes de perderem suas características lineares.

Na revisão bibliográfica, diversos estudos têm demonstrado a aplicabilidade do método dos mínimos quadrados na estimação de parâmetros essenciais em diversos equipamentos elétricos. Especificamente, esse método foi utilizado para estimar parâmetros em máquinas síncronas de ímãs permanentes, conforme relatado em múltiplas fontes (Shao e Huang, 2020; Lu et al., 2017; Hu et al., 2023; Zeng et al., 2020; Wu et al., 2019). Adicionalmente, essa técnica também foi aplicada com sucesso na estimação dos parâmetros de máquinas de indução (Reddy Siddavatam e Loganathan, 2019; Nachtsheim et al., 2023) e na caracterização de transformadores (Mukherjee e Satish, 2018; Dirik et al., 2014; He et al., 2022).

Além disso, há registros de seu uso na estimação de parâmetros em bobinas semicondutoras de alta temperatura, incluindo a análise das perdas AC (Long et al., 2024), e na identificação em tempo real de indutâncias em conversores DAB (Dual Active Bridge) (Guo et al., 2021). O método ainda se mostra eficaz em aplicações mais genéricas, como a estimação de parâmetros em circuitos ressonantes (De Angelis et al., 2018) e na medição da auto-capacitância de bobinas (Koptev e Ryabchinskiy, 2018).

O presente trabalho está estruturado da seguinte maneira: a Seção 2 detalha a metodologia para a identificação dos parâmetros dos indutores, incluindo a modelagem do circuito de magnetização e desmagnetização. A Seção 3 apresenta os resultados experimentais da técnica proposta. Finalmente, a Seção 4 discute as conclusões e sugestões para futuros trabalhos.

2. METODOLOGIA PARA IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS INDUTORES

2.1 Determinação do Modelo

Para obter os parâmetros do indutor, é necessário um aparato experimental que realize a excitação do componente, possibilitando a aquisição de suas medidas de tensão e corrente (entrada e saída). Para isso, será utilizado um circuito de magnetização e desmagnetização de indutores em corrente contínua, cujo diagrama esquemático é apresentado na Figura 1. O circuito é alimentado por uma tensão contínua V_{cc}, associada a uma célula de comutação formada por um interruptor controlado S (que na prática pode ser um IGBT, Insulated-gate Bipolar Transistor) e um diodo D. O circuito possui duas etapas de funcionamento:

- **Magnetização:** Nesta fase, com o interruptor S fechado e o diodo D polarizado reversamente, o indutor é alimentado por uma tensão praticamente constante. Isso faz com que a corrente no indutor cresça seguindo as equações clássicas de um circuito RL série (desde que o indutor não esteja na região de saturação).
- **Desmagnetização:** Nesta etapa, o interruptor S é aberto e a corrente passa a circular através do diodo D. A energia armazenada no indutor é então dissipada tanto na resistência série do indutor quanto no diodo D.

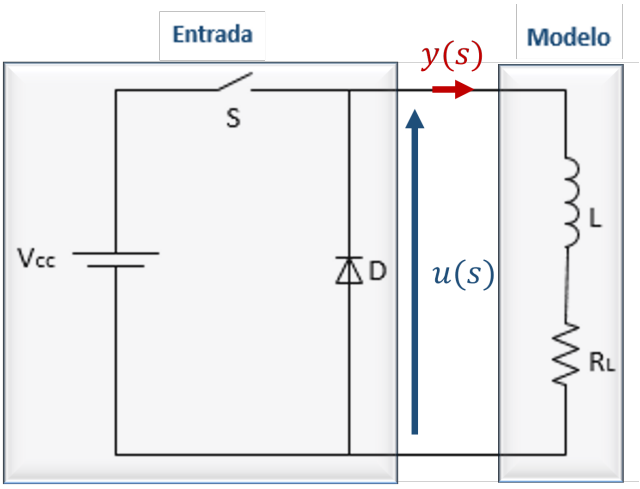

Figura 1. Diagrama esquemático do circuito de magnetização e desmagnetização de indutores em corrente contínua.

Na prática, as quedas de tensão no interruptor e no diodo podem afetar significativamente as formas de onda do circuito, em especial quando as tensões de entrada e saída são de baixa magnitude. Dessa forma, ao descrever as duas etapas de funcionamento do circuito por meio de equações diferenciais ordinárias (EDOs), seria necessário considerar as não idealidades dos semicondutores que são função do ponto de operação, da temperatura e das tolerâncias de fabricação. Porém, a abordagem utilizada neste trabalho consiste em modelar o indutor por uma função de transferência, ou seja a partir somente da transformada de Laplace dos sinais de entrada $u(s)$ (tensão no indutor) e saída $y(s)$ (corrente no indutor) ou seja, todas as distorções na forma de onda da tensão já encontram-se sintetizadas no sinal de entrada e serão propagadas para a saída por meio da própria função de transferência. Outra vantagem é que ao fazer essa consideração pode-se obter uma única função de transferência, independente da etapa de operação do circuito.

O indutor por sua vez é modelado por uma função de transferência de um circuito RL série de indutância L e resistência R_L. A resistência R_L é responsável por modelar as perdas no núcleo e perdas no cobre do indutor.

As capacitâncias parasitas do indutor foram desprezadas, visto que as mesmas só se manifestam em frequências elevadas (da ordem de MHz) (Frenzel, 2015) e a medi-

ção proposta neste trabalho limita-se a faixa de algumas centenas de kHz.

A Figura 2 ilustra a relação entre o modelo estabelecido e os seus dados de identificação.

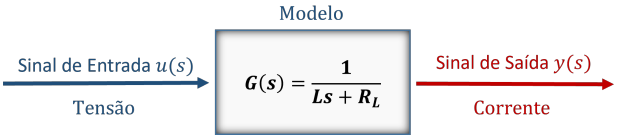

Figura 2. Representação em diagrama de blocos do Modelo.

Para a aplicação da função de transferência é necessário também que o indutor opere em sua região linear, ou seja antes da saturação do núcleo, que para núcleos de ferrite como os utilizados nesse trabalho ocorre em uma densidade de fluxo de $0,3T$ (LTDA., 2015). Posteriormente, será mostrada nesse trabalho uma forma de se identificar a saturação do indutor.

Como é objetivo do trabalho aplicar o método dos mínimos quadrados em um modelo discreto, convém representar a função de transferência $G(s)$ no domínio discreto, com coeficientes a_1 e b_1 desconhecidos:

$$G(z) = \frac{b_1}{z + a_1} \tag{1}$$

A Equação 2 pode ainda ser reescrita como uma equação a diferenças finitas:

$$y(t) = -a_1 \cdot y(t-1) + b_1 \cdot u(t-1) \tag{2}$$

Para realizar o mapeamento da função de transferência contínua (Equação 1) na função de transferência discreta (Equação 2) pode-se utilizar métodos de discretização como: Tustin, Backward Euler e Forward Euler (Coelho e dos Santos Coelho, 2004). Especificamente nesse trabalho, optou-se por simplicidade pelo método Forward Euler, descrito matematicamente por:

$$z = 1 + T_s \cdot s \tag{3}$$

Em que T_s é o período de amostragem [s].

Aplicando o método de Forward Euler e comparando as Equações 1 e 2, pode-se derivar o valor de L e R_L:

$$L = \frac{T_s}{b_1} \tag{4}$$

$$R_L = \frac{1 + a_1}{b_1} \tag{5}$$

Portanto, para estimar os parâmetros do indutor basta somente conhecer o período de amostragem T_s e estimar os coeficientes a_1 e b_1.

2.2 Estimação dos Parâmetros

Uma vez selecionada a estrutura do sistema e o seu modelo, a etapa seguinte consiste em a partir de vetores de observações de entrada e saída, obter os parâmetros do modelo que melhor descrevem o processo, a fim de caracterizar completamente o sistema em estudo.

Os parâmetros serão estimados pelo método do Estimador dos Mínimos Quadrados aplicado à função de transferência que representa o modelo.

Os elementos fundamentais do estimador dos mínimos quadrados foram propostos inicialmente por Carl Friedrich Gauss (1777-1855) em trabalhos publicados no século XIX sobre estudos astronômicos. A ideia básica de Gauss foi demonstrar que o melhor método de determinar um parâmetro desconhecido de uma equação é minimizando a soma dos quadrados dos resíduos (Coelho e dos Santos Coelho, 2004).

Conforme Coelho A. e Coelho L.(2004), um processo físico caracterizado por uma entrada u(t), uma saída y(t), uma perturbação e(t), e com função de transferência discreta linear da forma:

$$A(z^{-1})y(t) = z^{-d}B(z^{-1})u(t) + e(t) \tag{6}$$

onde:

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + \cdots + a_n a z^{-na} \tag{7}$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + \cdots + b_n z^{-nb} \tag{8}$$

A mesma pode ser representada por uma equação a diferenças, possibilitando assim, a simulação computacional.

$$\begin{aligned} y(t) = & \\ & - a_1 y(t-1) - a_2 y(t-2) - \ldots - a_{na} y(t-na) \\ & + b_0 u(t-d) + b_1 u(t-d-1) + \ldots + b_{nb} u(t-d-nb) + \\ & + e(t) \end{aligned} \tag{9}$$

É relevante ressaltar algumas observações quanto ao modelo da Equação 9:

- Tem-se $(na + nb + 1)$ parâmetros a estimar;
- Para determinar os $a_i (i = 1, \ldots, na)$ e $b_j (j = 0, \ldots, nb)$, deve-se utilizar as medidas de entrada e saída do processo;
- O termo $e(t)$ pode representar o erro de modelagem, o erro de medição ou o ruído na saída do tipo estocástico, determinístico ou *offset*.

Definindo-se um vetor de regressores $\phi(t)$ (vetor de medidas), de dimensão $(na + nb + 1) \times 1$:

$$\phi^T(t) = [-y(t-1) \ldots - y(t-na)\ u(t-d) \ldots u(t-d-nb)] \tag{10}$$

E o vetor de parâmetros $\theta(t)$ a serem identificados, de dimensão $(na + nb + 1) \times 1$:

$$\hat{\theta} = [a_1\ a_2\ \ldots\ a_{na}\ b_1\ b_{nb}]^T \tag{11}$$

Pode-se reescrever a equação (2.13), pelo Modelo de Regressão Linear (Ljung, 1999)

$$Y = \phi\theta + E \tag{12}$$

Utilizando a estimativa $\hat{\theta}$, a melhor previsão da saída do sistema, $\hat{y}$, é calculada por:

$$\hat{Y} = \phi\hat{\theta} \tag{13}$$

E o erro de previsão, ϵ, é avaliado de acordo com:

$$\epsilon = Y - \hat{Y} = -\phi\hat{\theta} \tag{14}$$

A partir do estimador de Markov, pode-se calcular então o estimador $\hat{\theta}$ que minimiza a soma dos quadrados de ϵ.

$$\hat{\theta} = [\phi^T\phi]^{-1}\phi^T Y \tag{15}$$

Estimada a função de transferência discreta, a determinação da função de transferência contínua é obtida pelas relações de *Backward*, *Forward* ou Trapezoidal (Coelho e dos Santos Coelho, 2004).

Os dados medidos nos indutores são carregados como variáveis no *Workspace* e aplicados ao algoritmo, cujo esquema básico está apresentado no fluxograma da Figura 3.

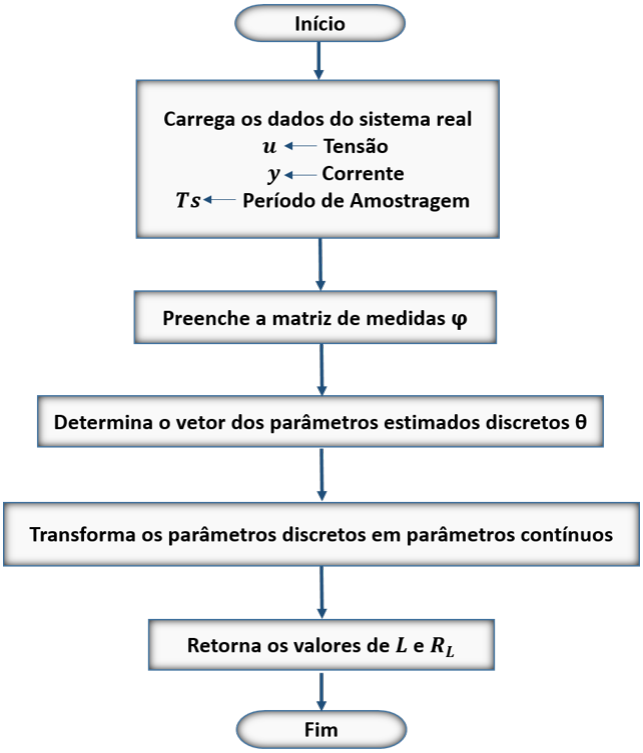

Figura 3. Fluxograma do algoritmo desenvolvido para estimação dos parâmetros.

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nesta seção serão exibidos os resultados experimentais obtidos com a modelagem e implementação da técnica de medição desenvolvida. Para levantar os dados experimentais é utilizada a bancada de testes da Figura 4.

O sistema eletrônico utilizado é detalhado em Gregorio (2016). As informações coletadas são transferidas para o computador onde os parâmetros são estimados e os resultados apresentados através do software *MATLAB/Simulink*.

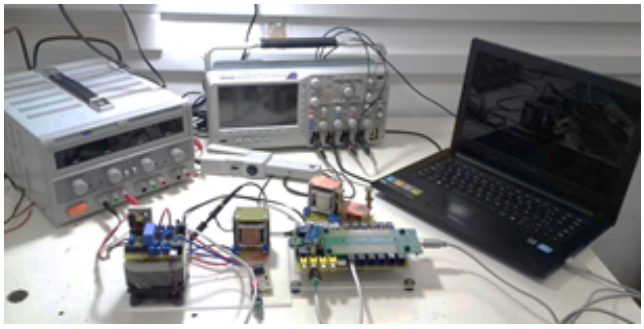

Figura 4. Fotografia com a imagem do sistema desenvolvido montado para experimentação dos indutores.

3.1 Aquisição de Dados

O teste de obtenção dos dados foi executado nas condições nominais do indutor e consistiu em chaveá-lo por meio da aplicação de um pulso de tensão e medir simultaneamente a tensão e a corrente sobre os seus terminais. Os vetores de tensão e de corrente obtidos, correspondem aos dados de entrada e saída do modelo e foram armazenados para serem posteriormente aplicados ao estimador.

Esse procedimento experimental foi realizado individualmente para dois indutores A e B em análise, submetidos a uma excitação de 15 V. A Figura 5 exibe as curvas de corrente dos indutores em resposta a cada um dos respectivos pulsos de tensão aplicados em seus circuitos.

Pode-se notar que todas as não linearidades do circuito, como as quedas de tensão no IGBT (1,3 V) e no diodo (1,2 V) que poderiam interferir na resposta do modelo, caso não fossem modeladas, estão sendo consideradas no vetor de entrada. As condições experimentais em que o sistema real é submetido influenciam fortemente a qualidade final do modelo. O modelo poderá aproximar somente as características que estejam contidas nos dados. Em virtude disso, os dados foram aquisitados com um período de amostragem de $3,2 \cdot 10^{-7}s$, suficientemente pequeno, de forma que os sinais amostrados pudessem reter as características dos sinais reais.

3.2 Estimação dos Parâmetros e Validação do Modelo

Os vetores com os dados de tensão e de corrente foram transferidos para o MATLAB e processados pelo algoritmo de estimação descrito na Seção 2. O modelo resultante do processo de identificação para cada um dos dois indutores é apresentado graficamente na Figura 6.

A contraposição gráfica da curva do modelo com a curva do indutor experimental permite analisar qualitativamente a capacidade do modelo de reproduzir de forma adequada o comportamento dinâmico dos indutores reais. Observa-se que os modelos resultantes tendem a acompanhar a resposta real dos indutores. No entanto, é possível notar que para os dois indutores analisados houve uma discrepância entre as saídas estimadas e a real e que essa dissonância não pode ser generalizada, uma vez que ocorrem em trechos diferentes para cada um dos indutores.

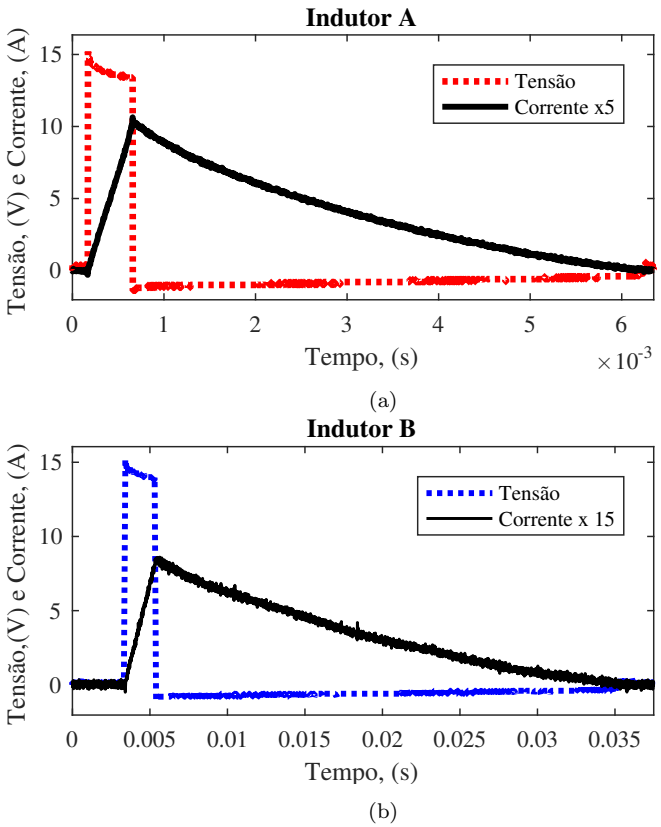

Figura 5. Dados de identificação medidos nos indutores (Tensão e Corrente): a) Indutor A e b) Indutor B.

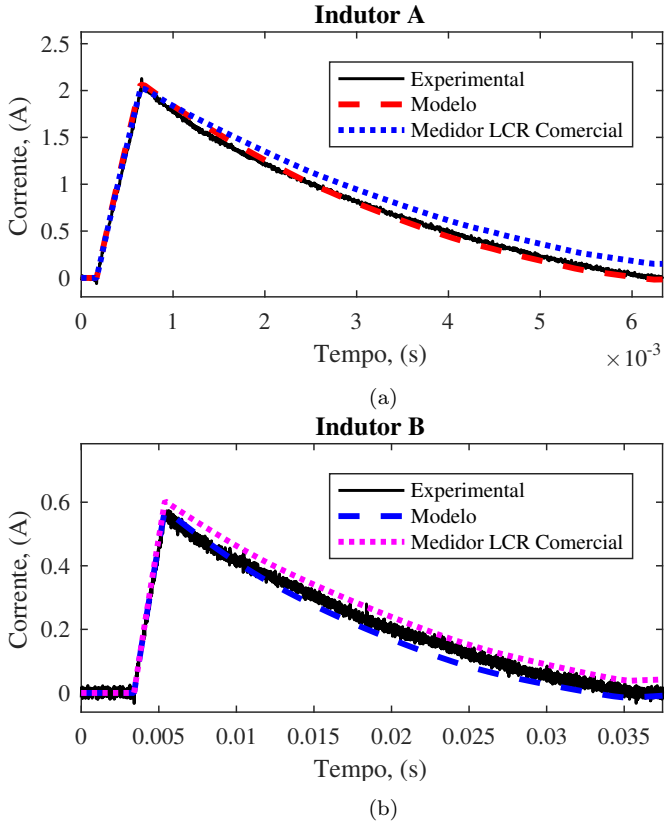

Figura 6. Comparação entre o comportamento dinâmico do modelo identificado pela proposta, o modelo medido pelo LCR comercial e o indutor experimental: a) Indutor A e b) Indutor B.

Essas diferenças encontram-se analiticamente dentro do esperado, uma vez que por definição, nenhum modelo representa o sistema real de forma perfeita. Acredita-se que essas divergências constatadas estejam atreladas a dinâmicas dos indutores reais que não foram modeladas. Elas podem ser quantificadas pelos erros, ferramentas que permitem avaliar estatisticamente o modelo. Os valores de indutância e resistência identificados através do modelo e os erros a ele associados são apresentados na Tabela 1. Nessa análise são empregados dois índices de desempenhos, a saber Erro Médio Quadrático (MSE) e Coeficiente de Correlação (R^2).

Tabela 1. Parâmetros resultantes e índices de desempenho do modelo.

Indutor	Indutância	Resistência	MSE	R^2
A	3,0564 mH	0,4909 Ω	0,0041	0,9995
B	47,1056 mH	1,9332 Ω	0,0056	0,9971

O MSE permite avaliar a diferença entre o estimador e o verdadeiro valor do indutor e o R^2 mede a qualidade do ajuste. Uma vez que os índices encontram-se dentro das faixas estabelecidas como válidas pela literatura, o valor do MSE foi pequeno (menor que 0,5%) e o R^2 foi grande (maior que 0,9), pode-se dizer que o modelo é estatisticamente válido (Montgomery e Runger, 2009).

O fato de ser considerado estatisticamente válido não qualifica o modelo como a melhor opção para uma determinada aplicação. Segundo Coelho e dos Santos Coelho (2004) a qualidade de um modelo está fortemente relacionada com a finalidade pela qual o mesmo foi obtido. No contexto deste trabalho, o objetivo é identificar um modelo para indutores, a partir do qual consiga-se determinar os valores de indutância e resistência dos mesmos. Dessa forma, o que importa, neste caso, é o desempenho quando o modelo for aplicado na estimação desses parâmetros.

Dado o exposto, a título de comparação, utilizou-se um aparelho para medir os parâmetros dos indutores, cujo modelo é o LCR Meter U1730C, da Agilent. Os valores dos parâmetros estimados através estimador com a técnica proposta e os resultados da medição com o referido aparelho são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Comparação entre os resultados do modelo e do medidor LCR.

Indutor	MSE		R^2	
	Estimador	Medidor LCR	Estimador	Medidor LCR
A	0,0041	0,0143	0,9995	0,9405
B	0,0056	0,0084	0,9971	0,9261

A comparação entre os valores demonstra a adequação do modelo no cálculo dos parâmetros, haja vista que os valores retornados pelo mesmo são condizentes com os medidos pelo medidor comercial. Visando uma comparação gráfica das duas técnicas de medição, simulou-se os indutores com os valores medidos pelo medidor comercial, considerando as mesmas condições de entrada do ensaio experimental e comparou-se a resposta da simulação com a resposta do modelo e as curvas já obtidas experimentalmente, conforme ilustrado na Figura 6.

Verifica-se que a resposta do medidor LCR comercial também tende a acompanhar o modelo real do indutor. Porém, a divergência percebida em relação ao experimental é maior quando comparada ao estimador, para os dois indutores, conforme os índices métricos denotados na Tabela 3

Tabela 3. Comparação entre os resultados do modelo e do medidor LCR.

Indutor	Indutância		Resistência	
	Estimador	Medidor LCR	Estimador	Medidor LCR
A	3,072 mH	3,164 mH	0,491 Ω	0,334 Ω
B	47,810 mH	45,680 mH	2,090 Ω	1,136 Ω

Essa diferença pode estar relacionada ao fato do medidor LCR só ensaiar os indutores no valor limitado de aproximadamente $1V$, não reproduzindo as condições de excitação da técnica de medição desenvolvida neste trabalho, que permite a operação com tensões de magnitude maiores. Em suma, tanto pela avaliação visual, quanto pelo valor dos índices calculados, o modelo incorpora as principais características dinâmicas do sistema real, de modo que o mesmo é suficientemente representativo, tendo-se em vista a aplicação para identificação dos parâmetros do indutor, atendendo a princípio as expectativas.

3.3 Análise da Saturação

Todas as situações envolvendo a análise de indutores até aqui discutidas, não foram realizadas considerando a saturação magnética no modelo dos indutores, resultando em pontos de operação sempre na região linear da curva de saturação. Como abordado na Seção 2.1, essa condição prévia é necessária para que a estruturação do modelo em função de transferência e o uso do estimador dos mínimos quadrados apresente resultados satisfatórios.

Esta seção por sua vez, tem por finalidade apresentar uma sucinta análise da saturação dos mesmos indutores A e B considerados anteriormente. O propósito dessa discussão é demonstrar a vantagem da técnica de medição em corrente contínua e a utilização do sistema implementado no tocante estudo de saturação, o que permitirá que pesquisas mais aprofundadas nesse tema possam ser desenvolvidas em trabalhos futuros.

Inicialmente coletaram-se os dados. A bancada experimental e as condições de ensaio foram as mesmas supracitadas, sendo submetidos a uma excitação de 15 V. A Figura 8 exibe as curvas de corrente saturadas dos indutores em resposta a cada um dos respectivos pulsos de tensão aplicados em seus circuitos.

Os vetores de tensão e corrente medidos foram transferidos para o MATLAB, onde traçou-se uma metodologia que permitisse identificar as regiões lineares (nominais) e de saturação dos indutores: Quando um indutor linear é submetido a uma tensão aproximadamente constante, a corrente cresce com taxa constante (quando se considera uma resistência R_L pequena). Se em algum momento a corrente deixa de crescer com taxa constante, significa que a partir daquele instante, o indutor sai da sua região linear de operação. O procedimento adotado para definir a região de saturação consiste em analisar a taxa ao longo de toda a curva de magnetização delimitada e determinar o ponto onde esta taxa muda bruscamente.

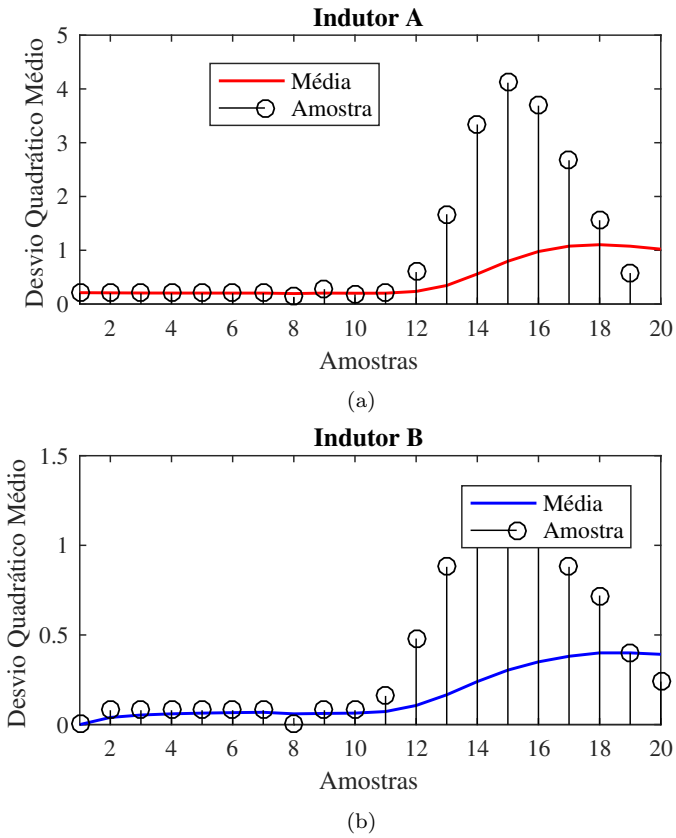

Figura 7. Taxa de variação das amostras de corrente do indutor a) A e b) B em relação à média.

Isto posto, a curva de magnetização é dividida em 20 amostras de corrente igualmente espaçadas. Essa divisão tem por finalidade diminuir problemas de flutuação da taxa, uma vez que a mesma é muito sensível a ruídos. Calculou-se a taxa de variação da corrente em relação ao tempo (ou inclinação da reta) de cada uma dessas amostras. A taxa de variação deveria ser constante ao longo da região linear. Com base nesse princípio, uma variação dessa taxa representaria que a hipótese da linearidade não era mais válida no ponto em questão. Na Figura 7 são, respectivamente, apresentados os resultados gráficos da taxa de variação para os indutores A e B.

No entanto, como pode ser percebido nas figuras anteriores, os dados experimentais são contaminados por ruídos que provocam a subida ou descida aleatória dos pontos ao longo da reta, fazendo com que a taxa varie ao longo de toda a curva e não só a partir do ponto de saturação.

Em virtude do exposto, calculou-se o Desvio Quadrático Médio da taxa de variação de cada uma das amostras. Estabeleceu-se um limiar de 0,1 como desvio tolerável. Taxas de variação com desvios até o limiar são consideradas constantes e caracterizam a região linear de operação dos indutores. Valores acima de 0,1 são considerados desvios significativos e correspondem a região de saturação, onde a proporção entre o aumento da tensão e da corrente deixa de ser válida e a corrente tende a crescer mais rápido.

Na sequência é feita a comparação dos desvios. Quando o limiar é atingido, o algoritmo retorna a amostra anterior em relação a primeira que ultrapassou o Desvio Quadrático

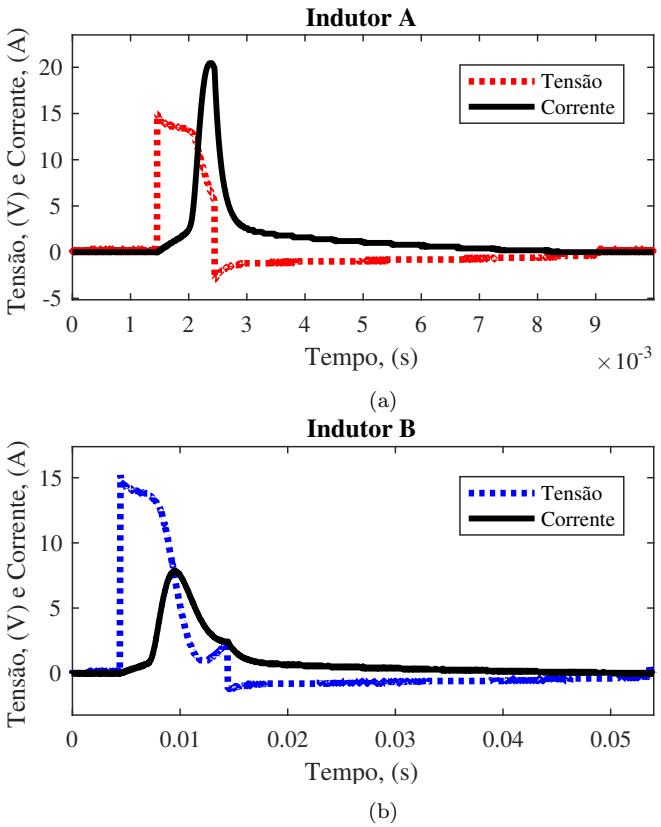

Figura 8. Dados de identificação medidos nos indutores (Tensão e Corrente): a) Indutor A, b) Indutor B.

Médio aceitável. Conclui-se que até essa amostra, o indutor opera na região linear, em condições nominais. Calcula-se então a corrente máxima e o tempo máximo de operação onde consegue-se assegurar a linearidade, denominados corrente de saturação e tempo de saturação. A partir desses valores, a curva atinge uma região de instabilidade e tende a entrar na região de saturação, onde a hipótese de linearidade dos indutores não pode mais ser considerada. A Figura 8 apresenta essas especificações calculadas para cada um dos dois indutores em análise.

Por fim apresenta-se a Tabela 4 que indica a magnitude da corrente bem como o instante de tempo em que cada um dos indutores atingiu a saturação.

Tabela 4. Dados de Saturação dos Indutores

Indutor	Corrente de Saturação (A)	Tempo de Saturação (ms)
A	2,2026	1,9002
B	0,8829	6,940

4. CONCLUSÃO

Com base neste trabalho, pode-se concluir que a técnica proposta para a medição de indutores em corrente contínua é relevante no campo da eletrônica de potência. Os experimentos realizados validam a eficácia do método, que se compara favoravelmente com medidores LCR comerciais. Essa abordagem prática permite a medição de indutores sob condições nominais de operação, contribuindo para o projeto de conversores CC-CC mais eficientes. Além disso, o estudo abre caminho para futuras pesquisas, especialmente na análise de saturações de indutores, destacando a importância contínua do aprimoramento das ferramentas de medição na eletrônica de potência.

Como trabalhos futuros sugere-se a estimação de parâmetros de capacitores, indutores acoplados e transformadores, também muito utilizados em conversores CC-CC.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as agências de fomento CAPES, FAPEMIG (Projeto PCE-00383-24), CNPq, UFJF e INERGE/UFJF.

REFERÊNCIAS

Assunção, M.R. (2014). Estudo e implementação de um conversor cc-cc boost entrelaçado em um regime de condução contínua.

Coelho, A. e dos Santos Coelho, L. (2004). *Identificação de sistemas dinâmicos lineares*. Editora da UFSC. URL `https://books.google.com.br/books?id=RJujAAAACAAJ`.

De Angelis, G., De Angelis, A., Moschitta, A., e Carbone, P. (2018). Identification of resonant circuits' parameters using weighted-least-squares fitting. In *2018 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, 1–5. doi:10.1109/I2MTC.2018.8409764.

Dirik, H., Gezegin, C., e Özdemir, M. (2014). A novel parameter identification method for single-phase transformers by using real-time data. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 29(3), 1074–1082. doi:10.1109/TPWRD.2013.2284243.

Frenzel, L. (2015). *Eletrônica Moderna*. McGraw Hill Brasil. URL `https://books.google.com.br/books?id=MHDOCgAAQBAJ`.

Gregorio, J.B. (2016). Sistema eletronico flexivel baseado em dsp aplicado a medicoes de indutores. Trabalho de conclusão de curso, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

Guo, Z., Luo, Y., e Sun, K. (2021). Parameter identification of the series inductance in dab converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36(7), 7395–7399. doi:10.1109/TPEL.2020.3045931.

He, Q., Chen, L., Wang, L., Han, M., Jiang, L., e Zhao, Z. (2022). Identification method of transformer leakage reactance based on recursive least squares. In *2022 Asian Conference on Frontiers of Power and Energy (ACFPE)*, 158–164. doi:10.1109/ACFPE56003.2022.9952241.

Hu, Y., Liu, K., Hua, W., e Hu, M. (2023). First-order model based inductance identification with least square method for high-speed sensorless control of permanent magnet synchronous machines. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 38(7), 8719–8729. doi:10.1109/TPEL.2023.3263518.

Koptev, E. e Ryabchinskiy, D. (2018). Decrease of the error of measurement of self-capacitance with least squares method. In *2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE)*, 252–254. doi:10.1109/APEIE.2018.8545293.

Ljung, L. (1999). *System Identification: Theory for the User*. Prentice Hall information and system sciences series. Prentice Hall PTR. URL https://books.google.com.br/books?id=nHFoQgAACAAJ.

Long, F., Xu, Y., Li, X., Ren, L., Shi, J., Tang, Y., Song, M., e Li, L. (2024). Instantaneous ac loss and inductance measurement of hts coil with finite-data-window least squares. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 34(5), 1–5. doi:10.1109/TASC.2023.3347175.

LTDA., T.E. (2015). *Catálogo de Ferrite*. URL https://www.thornton.com.br/pdf/CATALOGO%20THORNTON.pdf.

Lu, H., Wang, Y., Yuan, Y., Zheng, J., Hu, J., e Qin, X. (2017). Online identification for permanent magnet synchronous motor based on recursive fixed memory least square method under steady state. In *2017 36th Chinese Control Conference (CCC)*, 4824–4829. doi:10.23919/ChiCC.2017.8028116.

Mohan, N., Undeland, T., e Robbins, W. (1995). *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*. Wiley. URL https://books.google.com.br/books?id=KbkQAQAAMAAJ.

Montgomery, D. e Runger, G. (2009). *Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros*. Livros Técnicos e Científicos. URL https://books.google.com.br/books?id=02gkPwAACAAJ.

Mu, M. e Lee, F.C. (2011). A new high frequency inductor loss measurement method. In *2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 1801–1806. doi:10.1109/ECCE.2011.6064003.

Mukherjee, P. e Satish, L. (2018). Estimating the equivalent air-cored inductance of transformer winding from measured fra. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 33(4), 1620–1627. doi:10.1109/TPWRD.2017.2735627.

Nachtsheim, M., Ernst, J., Endisch, C., e Kennel, R. (2023). Performance of recursive least squares algorithm configurations for online parameter identification of induction machines in an automotive environment. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 9(3), 4236–4254. doi:10.1109/TTE.2023.3244619.

Rashid, M. (2014). *Eletrônica de Potência: Dispositivos, Circuitos e Aplicações*. Pearson Universidades. URL https://books.google.com.br/books?id=NuZf0AEACAAJ.

Reddy Siddavatam, R.P. e Loganathan, U. (2019). Identification of induction machine parameters including core loss resistance using recursive least mean square algorithm. In *IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, volume 1, 1095–1100. doi:10.1109/IECON.2019.8926755.

Shao, D. e Huang, Y. (2020). Parameter identification of permanent magnet synchronous motor based on multi-innovation least square method. In *2020 IEEE 9th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC)*, volume 9, 1810–1814. doi:10.1109/ITAIC49862.2020.9339029.

Wu, X., Fu, X., Lin, M., e Jia, L. (2019). Offline inductance identification of ipmsm with sequence-pulse injection. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(11), 6127–6135. doi:10.1109/TII.2019.2932796.

Zeng, Q., Zhang, Q., Wu, Y., Su, F., Hu, K., e Zhou, N. (2020). Parameter identification of surface mount permanent magnet synchronous motor based on recursive least square method. In *2020 Chinese Automation Congress (CAC)*, 593–596. doi:10.1109/CAC51589.2020.9327379.