



## Utilização de degrau de tensão contínua para estimação de parâmetros de um motor de indução trifásico

### Use of DC voltage step to estimate parameters of a three-phase induction motor

Gabriel Lourenço<sup>1</sup>, Henrique Rodrigues Santos<sup>2</sup>, Wesley Angelino de Souza<sup>3</sup>,  
Alessandro Goedtel<sup>4</sup>, Marcelo Favoretto Castoldi<sup>5</sup>

#### RESUMO

O motor de indução trifásico é amplamente utilizado na indústria devido à sua operação robusta, facilidade de manutenção e adequação a ambientes exigentes, como os corrosivos ou empoeirados. Com o uso contínuo, os parâmetros elétricos do motor podem sofrer desgaste e levar a alterações em seus valores ao longo do tempo. Este trabalho propõe um método para estimar os parâmetros elétricos do circuito equivalente do motor de indução trifásico com base na análise das correntes transitórias no estator do motor quando excitado por um degrau de tensão de corrente contínua. Este método de estimativa utiliza um Algoritmo Genético com uma função objetivo de minimização, implementado usando o software MATLAB®. O algoritmo visa comparar as curvas de corrente esperadas no estator com as estimadas para encontrar o conjunto ótimo de parâmetros. Os resultados obtidos por meio deste método são comparados com os valores esperados, analisando o erro entre eles, concluindo, em última instância, que a abordagem proposta produz resultados promissores.

**PALAVRAS-CHAVE:** Algoritmo Evolutivo, Estimação de Parâmetros, Motor de Indução Trifásico.

#### ABSTRACT

The three-phase induction motor is widely employed in the industry due to its robust operation, ease of maintenance, and suitability for demanding environments, such as corrosive or dusty ones. With continuous use, the motor's electrical parameters may experience wear and lead to changes in their values over time. This work proposes a method for estimating the electrical parameters of the equivalent circuit of the three-phase induction motor based on the analysis of transient currents in the motor's stator when excited by a step of direct current voltage. This estimation method utilizes a Genetic Algorithm with a minimization objective function, implemented using MATLAB® software. The algorithm aims to compare the expected stator current curves with the estimated ones to find the optimal parameter set. The results obtained by this method are compared to the expected values, analyzing the error between them, ultimately concluding that the proposed approach yields promising results.

**KEYWORDS:** Evolutionary Algorithm, Parameter Estimation, Three-Phase Induction Motor.

<sup>1</sup> Bolsista PIVIC. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: lourencog@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 1968347137016545.

<sup>2</sup> Bolsista PIVIC. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: henriquerodrigues@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 4305343955083927.

<sup>3</sup> Docente no Departamento Acadêmico de Elétrica (DAELE). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: wesleyangelino@utfpr.edu.br. ID Lattes: 8594457321079718.

<sup>4</sup> Docente no Departamento Acadêmico de Elétrica (DAELE). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: agoedtel@utfpr.edu.br. ID Lattes: 1920650157123774.

<sup>5</sup> Docente no Departamento Acadêmico de Elétrica (DAELE). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: marcastoldi@utfpr.edu.br. ID Lattes: 6178029384175205.



## INTRODUÇÃO

A utilização do motor de indução trifásico (MIT) é essencial no setor industrial devido a sua estrutura simples, robustez e baixo custo (MORFIN et al., 2023). Cerca de 35% da energia elétrica produzida no Brasil é consumida no setor industrial e 70% dessa energia é consumida por sistemas motrizes (ELETROBRAS, 2020).

Devido a vasta utilização dos motores de indução trifásicos em processos complexos, se faz necessário o conhecimento dos parâmetros elétricos do circuito equivalente da máquina para aplicação de métodos de controle como *Direct Torque Control (DTC)* e *Field-Oriented Control (FOC)* (WANG et al., 2018).

A obtenção dos parâmetros elétricos pode ser realizada utilizando métodos convencionais, como o ensaio de rotor bloqueado, ensaio a vazio e o ensaio em corrente contínua (CHAPMAN, 2013) ou através de técnicas computacionais, no qual normalmente são empregados algoritmos baseados em meta-heurísticas, que buscam obter uma solução factível e satisfatória para o problema. Neste trabalho é apresentado uma proposta de estimação dos parâmetros do circuito elétrico equivalente do MIT utilizando o Algoritmo Genético (AG).

Em Fortes, Ferreira e Coelho (2013) é proposto a estimação dos parâmetros elétricos do MIT a partir da corrente e o escorregamento da máquina através do AG, obtendo resultados aproximados do real. Já em Guedes et al. (2018) é proposto a estimação dos parâmetros elétricos e mecânicos do MIT a partir de diferentes sinais de entrada de corrente utilizando um algoritmo baseado na Evolução Diferencial, obtendo resultados satisfatórios.

Em Couto (1996) é proposto a estimação dos parâmetros elétricos e mecânicos do MIT quando excitado por um degrau de tensão de corrente contínua, utilizando o método dos Mínimos Quadrados Recursivo, método dos Mínimos Quadrados Recursivo Estendido, o método de Gauss-Newton e Método Simplex de Nelder-Mead. Apesar de obter resultados satisfatórios, o método proposto não estima todos os parâmetros elétricos, estando limitado aos parâmetros de resistência e indutância de estator, constante de tempo de rotor e fator de dispersão global.

No presente estudo será implementado um modelo baseado no de Couto (1996), adaptando o modelo para realizar a estimação de todos os parâmetros elétricos do MIT, utilizando um Algoritmo Genético via *Matlab*.

## METODOLOGIA

### MODELO DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

Couto (1996) propôs um modelo do MIT quando curto-circuitado os terminais B e C do estator do motor de indução trifásico e a fase A excitada por um degrau de tensão contínua, sendo possível obter função de transferência da corrente no estator em relação ao degrau de tensão contínua de entrada, expressa pela Eq. (1). Em seu modelo é possível estimar alguns dos parâmetros elétricos da máquina, sendo estes a resistência de estator  $R_s$ , fator de dispersão global do motor  $\sigma$ , e as constantes de tempo de rotor e de estator  $T_s$  e  $T_r$ , respectivamente, descritas pelas Eq. (2), Eq. (3) e Eq. (4).

$$G(s) = \frac{I_s(s)}{U(s)} = \frac{2}{3} \frac{1 + T_r \cdot s}{R_s [1 + (T_r + T_s) \cdot s + (T_r \cdot T_s \cdot \sigma) \cdot s^2]} \quad (1)$$



$$\sigma = 1 - \frac{1}{(1 + \sigma_s) \cdot (1 + \sigma_r)} \quad (2)$$

$$T_s = \frac{L_s}{R_s} \quad (3)$$

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} \quad (4)$$

No qual  $\sigma_s$  e  $\sigma_r$  são o fator de dispersão de estator e rotor, respectivamente,  $L_s$  e  $L_r$  são, respectivamente, as indutâncias totais de rotor e de estator, descritas pelas Eq. (5) e Eq. (6), e  $R_r$  é a resistência de rotor.

$$L_s = (L_m + l_{\sigma s}) = L_m \cdot (1 + \sigma_s) \quad (5)$$

$$L_r = (L_m + l_{\sigma r}) = L_m \cdot (1 + \sigma_r) \quad (6)$$

No qual  $l_{\sigma s}$  e  $l_{\sigma r}$  são, respectivamente, as indutâncias de dispersão de estator e rotor e  $L_m$  é a indutância de magnetização. A partir das equações propostas por Couto (1996), é possível substituir a Eq. (3) e Eq. (5) na Eq. (1), obtendo a Eq. (7).

$$G(s) = \frac{I_s(s)}{U(s)} = \frac{2}{3} \frac{1}{R_s} \frac{1 + T_r \cdot s}{1 + \left(T_r + \frac{L_m + l_{\sigma s}}{R_s}\right) \cdot s + \left(T_r \cdot \frac{L_m + l_{\sigma s}}{R_s} \cdot \sigma\right) \cdot s^2} \quad (7)$$

Com essa adaptação no modelo, é possível estimar os parâmetros elétricos de resistência de estator  $R_s$ , fator de dispersão global do motor  $\sigma$ , a constante de tempo de rotor  $T_r$ , a indutância de magnetização  $L_m$  e a indutância de dispersão de estator  $l_{\sigma s}$ . Uma vez com os parâmetros citados estimados, é possível realizar a estimação dos parâmetros faltantes algebricamente, utilizando os resultados do algoritmo nas Eq. (8), Eq. (9), Eq. (10), Eq. (11), Eq. (12) e Eq. (13), estimando assim o fator de dispersão de estator  $\sigma_s$ , fator de dispersão de rotor  $\sigma_r$ , indutância de dispersão de rotor  $l_{\sigma r}$ , indutância total do rotor  $L_r$ , indutância total do enrolamento de estator  $L_s$  e resistência de rotor  $R_r$ .

$$\sigma_s = \frac{l_{\sigma s}}{L_m} \quad (8)$$

$$\sigma_r = \frac{\sigma_s - \sigma - \sigma \cdot \sigma_s}{-1 - \sigma_s + \sigma + \sigma \cdot \sigma_s} \quad (9)$$

$$l_{\sigma r} = \sigma_r \cdot L_m \quad (10)$$

$$L_r = l_{\sigma r} + L_m \quad (11)$$

$$L_s = l_{\sigma s} + L_m \quad (12)$$

$$R_r = \frac{L_r}{T_r} \quad (13)$$



## ALGORITMO GENÉTICO

O Algoritmo Genético faz parte dos Algoritmos Evolutivos baseados na teoria da evolução e da genética de Charles Darwin e combinam os mecanismos de seleção natural de forma estruturada e troca de informação genética entre dois indivíduos para formar uma estrutura heurística de busca (FORTES; FERREIRA; COELHO, 2013).

O funcionamento do AG consiste em quatro etapas, no qual primeiro ocorre a geração de uma população alvo de soluções candidatas, denominada cromossomos, e mede a aptidão em solucionar o problema de acordo com a função objetivo, denominado *fitness*. A segunda etapa é selecionar os indivíduos mais aptos em solucionar o problema e realizar um cruzamento entre eles. A terceira etapa consiste em inserir mutação na população cruzada. A quarta etapa compara o *fitness* da população cruzada e a população alvo e seleciona os indivíduos mais aptos (FORTES; FERREIRA; COELHO, 2013). O processo iterativo ocorre até que um critério de parada seja satisfeito, comumente o número de iterações.

Foi adotado como função objetivo para o cálculo do *fitness* a Eq. (14).

$$fitness = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{IS_i - IE_i}{IS_i} \right)^2 \quad (14)$$

No qual  $N$  é o número de pontos utilizados considerando a frequência de amostragem,  $IS$  é a curva de corrente simulada e  $IE$  é a curva de corrente estimada pelo algoritmo. Os valores dos parâmetros de controle do AG estão expressos na Tabela 1, juntamente do intervalo de busca dos parâmetros estimados. Os valores utilizados para os parâmetros de controle do AG foram escolhidos empiricamente. Foi escolhido 12kHz como frequência de amostragem.

**Tabela 1 – Parâmetros de controle do algoritmo**

Intervalo de busca dos parâmetros	
$0,0001 \leq R_s \leq 5$	
$0,0001 \leq T_r \leq 0,5$	
$0,0001 \leq L_m \leq 0,5$	
$0,0001 \leq l_{\sigma s} \leq 0,008$	
$0,0001 \leq \sigma \leq 1$	
Número de cromossomos	18
Número de genes	5
Critério de parada	150 gerações
Probabilidade de crossover	0,9
Probabilidade de mutação	0,2
Probabilidade de elitismo	0,2

Fonte: Elaborado por autores (2023).

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos para a estimação de parâmetros do motor de indução trifásico, quando excitado por um degrau de tensão contínua de 12 V, utilizando o algoritmo genético estão apresentados na Tabela 2. A Figura 1 mostra a comparação entre as curvas de corrente elétrica esperada e a estimada pelo algoritmo genético.

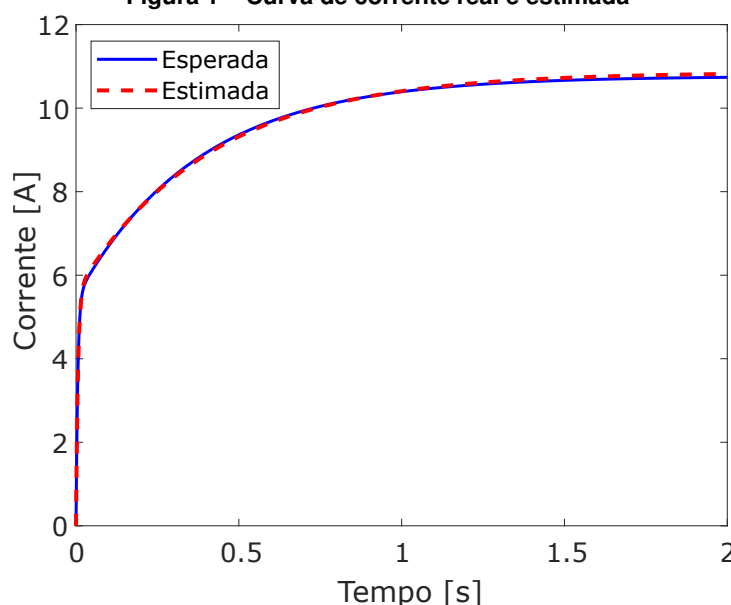


**Tabela 2 – Parâmetros estimados utilizando o algoritmo.**

Resultados apresentados pelo algoritmo					
	$R_s$	$T_r$	$L_m$	$l_{\sigma s}$	$\sigma$
Valor real	1,1150	0,1936	0,2037	0,0059	0,0562
Valor estimado	1,1056	0,2125	0,2156	0,0054	0,0566
Erro	0,84 %	9,77 %	5,85 %	8,47 %	0,71 %
<i>fitness</i>	$6.1629 \cdot 10^{-5}$				

Fonte: Elaborado por autores (2023).

**Figura 1 – Curva de corrente real e estimada**



Fonte: Elaborado por autores (2023)

A partir dos resultados estimados pelo algoritmo exibidos na Tabela 2, utilizando as Eq. (8), Eq. (9), Eq. (10), Eq. (11), Eq. (12) e Eq. (13) foi possível estimar algebricamente os parâmetros faltantes, expressos na Tabela 3:

**Tabela 3 – Valores calculados a partir dos valores estimados.**

Parâmetros calculados				
	$l_{\sigma r}$	$L_r$	$L_s$	$R_r$
Valor real	0,0059	0,2097	0,2097	1,0830
Valor estimado	0,0073	0,2229	0,2211	1,049
Erro	23,73 %	6,29 %	5,44 %	3,14 %

Fonte: Elaborado por autores (2023).

A partir dos resultados da Tabela 2, foi possível alcançar convergência para os valores esperados de todos os parâmetros, no qual o maior erro apresentado foi no parâmetro constante de tempo de rotor  $T_r$ , com 9,77%. O parâmetro estimado que apresentou a maior precisão foi o fator de dispersão global  $\sigma$ , com um erro de 0,71%.

Já os resultados da Tabela 3 apresentaram uma convergência dos parâmetros  $L_r$ ,  $L_s$  e  $R_r$ , no qual o parâmetro que apresentou o maior erro dentre estes foi a indutância total do rotor  $L_r$  com erro de 6,29%. A indutância de dispersão de rotor  $l_{\sigma r}$  apresentou um erro de 23,73%, não convergindo



para o valor esperado. Dentre os parâmetros calculados, o parâmetro que apresentou o menor erro foi a resistência do rotor  $R_r$ , com 3,14%.

## CONCLUSÃO

O trabalho apresentou resultados promissores para estimação dos parâmetros do circuito elétrico equivalente do MIT a partir da análise da corrente em regime transitório quando excitado por um degrau de tensão de corrente contínua. A utilização de métodos computacionais para estimação de parâmetros elétricos do motor de indução trifásico, baseados em meta-heurísticas, podem ser alternativas viáveis aos métodos convencionais, apresentando resultados promissores de estimação.

Nas próximas etapas do trabalho, novas formulações da função objetivo serão investigadas, de forma à mitigar os problemas relacionados à estimação das indutâncias de dispersão estator  $l_{\sigma_s}$  e de rotor  $l_{\sigma_r}$ . Outras abordagens de estrutura de algoritmos também deverão ser testadas com o mesmo objetivo.

## Agradecimentos

Agradecimentos ao Centro Integrado de Pesquisa em Controle e Automação - CIPECA e ao Laboratório de Sistemas Inteligentes - LSI da UTFPR campus Cornélio Procópio pela estrutura e apoio durante o desenvolvimento da pesquisa. Agradeço também aos professores e colegas do laboratório, que sempre incentivaram e ajudaram com considerações pertinentes quando necessários.

## Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

## REFERÊNCIAS

- CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. Porto Alegre: AMGH editora, 2013.
- COUTO, Evandro Boldarini. **Identificação paramétrica de um motor de indução trifásico através de ensaio degrau em corrente contínua**. 1996. Universidade de São Paulo, São Carlos.
- ELETROBRAS. **Relatório de resultados do Procel 2021: ano-base 2020**. Rio de Janeiro: PROCEL, 2020. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/resultadosprocel2021/>. Acesso em: 30 ago. 2022.
- FORTES, Marcio Zamboti; FERREIRA, Vitor Hugo; COELHO, Alex Palma Francisco. The Induction Motor Parameter Estimation Using Genetic Algorithm. **IEEE Latin America Transactions**, v. 11, n. 5, p. 1273–1278, set. 2013.
- GUEDES, Jacqueline Jordan et al. Parameters estimation of three-phase induction motors using differential evolution. **Electric Power Systems Research**, v. 154, 2018.
- MORFIN, Onofre A et al. Robust cascade controller for the power factor of the three-phase supply and the induction motor velocity. **ISA Transactions**, jun. 2023.
- WANG, Fengxiang et al. Advanced Control Strategies of Induction Machine: Field Oriented Control, Direct Torque Control and Model Predictive Control. en. **Energies**, v. 11, n. 1, p. 120, jan. 2018.