

## Estimação de parâmetros de um circuito RL utilizando evolução diferencial

### Parameters estimation of a RL circuit using differential evolution

**Iolanda Ortiz Bernardes**  
[ibernardes@alunos.utfpr.edu.br](mailto:ibernardes@alunos.utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil.

**Marcelo Favoretto Castoldi**  
[marcastoldi@utfpr.edu.br](mailto:marcastoldi@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil.

**Alessandro Goedel**  
[agoedel@utfpr.edu.br](mailto:agoedel@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil.

#### RESUMO

Esse trabalho consiste no estudo sobre métodos heurísticos de otimização que, posteriormente, serão aplicados na estimação de parâmetros de um motor de indução trifásico (MIT). Dentre os métodos de otimização existem os algoritmos heurísticos, em que se destacam os métodos naturais baseados em população. Desse modo, a evolução diferencial (ED), classificada como algoritmo evolucionário no grupo de metaheurística populacional, foi o método escolhido no estudo para a resolução de um problema de minimização, a estimação dos parâmetros de um circuito RL. Os valores obtidos para os parâmetros via ED foram satisfatórios alcançando erros relativos inferiores a 4% para a menor frequência de amostragem considerada. O sucesso dos resultados é evidenciado pela sobreposição das curvas de corrente simulada e estimada, através da minimização de uma função objetivo, comprovando a robustez do algoritmo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Algoritmos evolutivos. Estimação de parâmetros. Evolução diferencial. Motor de indução trifásico.

#### ABSTRACT

This work consists of studying about optimization heuristic methods that later will be applied in the estimation of parameters of a three-phase induction motor (MIT). Among the optimization methods, there are heuristic algorithms, in which the natural methods based on population are highlighted. Thus, the differential evolution (ED), classified as an evolutionary algorithm in the populational metaheuristic group, was the method chosen in the study to resolution of a minimization problem, the parameters estimation of a RL circuit. The values obtained for the parameters via ED weresatisfactory reaching relative errors of less than 4% for the lower frequency of the considered sampling. The success of the results is evidenced by the overlapping of the curves of simulated and estimated current, through the minimization of an objective function, proving the robustness of the algorithm.

**KEYWORDS:** Evolutionary algorithms. Estimation of parameters. Differential evolution. Three-phase induction motor.

**Recebido:** 31 ago. 2018.

**Aprovado:** 04 out. 2018.

#### Direito autorial:

Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.





## INTRODUÇÃO

O motor de indução trifásico (MIT) é utilizado em muitos setores industriais como a principal máquina de conversão de energia elétrica em mecânica motriz (Kosow, 2005). Isso ocorre devido ao seu baixo custo, robustez, alto grau de confiabilidade e boa relação de potência-peso (Dos Santos *et al.*, 2014), além da capacidade de adotar diretamente a corrente alternada como fonte de alimentação (Fitzgerald *et al.*, 2006).

Por isso, os MITs são responsáveis por grande parte do consumo de energia elétrica no Brasil e no mundo. No mercado mundial correspondem a mais de 85% dos motores elétricos (Alsofyani e Idris, 2013). No Brasil, esses motores são responsáveis por aproximadamente 68% do consumo industrial e 35% do consumo total de eletricidade (Sauer *et al.*, 2015). Além disso, estes podem apresentar elevado rendimento, em torno de 90%, mas em algumas situações este número pode ser bem menor (Viana *et al.*, 2012).

Uma das causas principais da baixa eficiência é o projeto de aplicação inadequado do MIT, aumentando radicalmente o consumo de energia elétrica. Portanto, para que o motor funcione de forma eficaz são necessários controle e acionamento adequados e, para isso, seus parâmetros devem ser considerados. No entanto, devido à alta aplicação, os MITs estão sujeitos a desgastes, fazendo com que seus parâmetros variem ao longo do tempo (Fortes *et al.*, 2013). Ou ainda, em alguns casos não é possível obtê-los, pois podem não ser fornecidos pelo fabricante (Guedes *et al.*, 2018). Dessa maneira, o foco do trabalho foi desenvolver um algoritmo de evolução diferencial (ED) para estimar os parâmetros de um circuito RL, através da minimização de uma função objetivo. O intuito é que este possa, futuramente, ser utilizado na estimação dos parâmetros elétricos de um MIT, uma vez que seu circuito equivalente é basicamente um circuito RL, apresentando como parâmetros apenas resistências e indutâncias.

## EVOLUÇÃO DIFERENCIAL

De acordo com Costa (2015), o algoritmo de evolução diferencial, do inglês *differentialevolution* (ED), é um algoritmo evolutivo baseado em teorias darwinianas sobre a evolução das espécies e conceitos relacionados à genética. A ED foi desenvolvida por Storn e Price em 1995 para ser um otimizador de função confiável, versátil e baseado em população que ataca o problema do ponto de partida ao amostrar a função objetivo em vários pontos iniciais escolhidos aleatoriamente (Price *et al.*, 2006), inclusive, em algumas literaturas é visto como uma versão melhorada do algoritmo genético (AG). Sendo assim, a ED é uma das estratégias mais utilizadas para a resolução de problemas da ciência e da engenharia (Lopes e Takahashi, 2011).

Em resumo, na ED, uma população de cromossomos, vetores de soluções candidatas ao problema, evolui através da aplicação de três operadores genéticos: mutação, cruzamento e seleção, nesta sequência.

As equações que descrevem a dinâmica do algoritmo são:

$$x_{i,j} = x_{i,L} + rand(x_{i,U} - x_{i,L}), \quad (1)$$

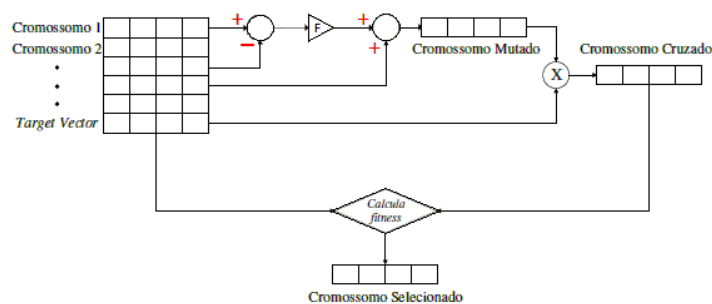
$$v_{i,g} = x_{r1,g} + F(x_{r2,g} - x_{r3,g}), \quad (2)$$

$$u_{i,g} = \begin{cases} v_{i,g} & \text{se } rand \leq CR \\ x_{i,g} & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3)$$

$$x_{i,g+1} = \begin{cases} u_{i,g} & \text{se } FO(u_{i,g}) \leq FO(x_{i,g}) \\ x_{i,g} & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4)$$

Na Eq. (1) o elemento  $x_{i,j}$  representa o vetor população inicial,  $x_{i,U}$  o limite superior e  $x_{i,L}$  o limite inferior. A Eq. (2) representa a mutação, onde  $v_{i,g}$  é o vetor mutado,  $F$  é o fator de ponderação e  $x_{r1,g}, x_{r2,g}$  e  $x_{r3,g}$  são vetores escolhidos aleatoriamente da população. A Eq. (3) resume o operador cruzamento, sendo  $u_{i,g}$  o vetor cruzado e  $CR$  a probabilidade de cruzamento definida pelo usuário e contida no intervalo  $[0,1]$ , tendo a função de controlar as informações que são transmitidas dos vetores pais aos filhos. A Eq. (4) corresponde ao operador seleção, em que  $x_{i,g+1}$  é um novo vetor população inicial que pode ser igual ao vetor cruzado ( $u_{i,g}$ ) caso o valor da sua função objetivo  $FO$  for menor que o valor da função objetivo do vetor população inicial ( $x_{i,g}$ ), caso contrário quem ocupa a posição  $i$  é  $x_{i,g}$ , mas isso acontece apenas para casos em que se deseja minimizar a função objetivo. Dessa maneira, terminado o processo de atualização da população que será considerada na próxima geração, os operadores genéticos (mutação, cruzamento e seleção) são repetidos até que seja atingido algum critério de parada, dado, normalmente, pelo número máximo de gerações. A Figura 1 exemplifica todo o processo de evolução diferencial.

Figura 1 – Processo de mutação, cruzamento e seleção.



Fonte: Adaptado de Guedes (2016).

## MÉTODOS

O circuito RL analisado neste trabalho, Figura 2, foi desenvolvido no Simulink, ferramenta integrada do MATLAB®, obtendo-se como saída as variáveis de “tempo”, “corrente” e “tensão” em função da frequência de amostragem utilizada. Os dados do circuito são: tensão de pico da fonte igual a  $10 \angle 139^\circ \text{V}$ ; frequência de 5 Hz; resistência de  $5,3000 \Omega$  e indutância de  $0,2500 \text{H}$ .

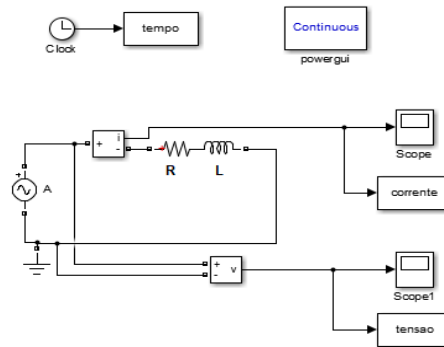
Em seguida, aplicando as etapas da ED, o algoritmo foi criado no MATLAB® e empregado na estimação dos parâmetros do circuito RL (resistência e indutância), utilizando como elemento de comparação as curvas de corrente simulada e estimada. Com isso, para determinar os parâmetros foi necessário minimizar a função objetivo ( $FO$ ) proposta, obtendo o valor de  $fitness$  (menor valor de  $FO$ ). Tal função consiste na diferença entre as curvas de corrente

simulada e estimada, ponto a ponto, em um período, e a comparação é realizada pelo método dos mínimos quadrados apresentado na Eq. (5):

$$FO = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{IS_i - IE_i}{IS_i} \right)^2 \quad (5)$$

em que  $IS$  corresponde a corrente simulada,  $IE$  a corrente estimada pelo algoritmo e  $N$  o número de pontos analisados.

Figura 2 – Circuito RL utilizado na simulação.



Fonte: Autoria própria via Simulink.

Foram realizadas quatro implementações do algoritmo com diferentes frequências de amostragem com o intuito de se analisar não só a veracidade dos parâmetros estimados, como também o tempo computacional e o valor do *fitness*. As frequências selecionadas foram de 1kHz, 3kHz, 6kHz e 9kHz. Os valores de  $FeCR$  foram de 0,8 e 0,5, respectivamente.

Além disso, para as implementações, os parâmetros do circuito foram pré-definidos entre os seguintes intervalos:  $0 \leq R \leq 20$  e  $0 \leq L \leq 1$ .

A população inicial foi constituída por 10 cromossomos com 2 genes cada, correspondendo, respectivamente a  $R$  e  $L$ . Esta foi submetida aos operadores de mutação, cruzamento e seleção e como critério de parada foi considerado um número máximo de 1000 gerações.

## RESULTADOS

A Tabela 1 apresenta os melhores valores para os parâmetros do circuito RL estimados através da ED nas quatro frequências de amostragem consideradas. No total, o algoritmo foi executado 300 vezes para cada frequência, assim, por meio dessas execuções foram escolhidos os 10 melhores valores de  $R$  e  $L$  e calculou-se a média aritmética entre eles, tomando os valores médios obtidos como dados estimados para os parâmetros. Essa estratégia pode ser realizada, pois ainda que o algoritmo seja estocástico, de modo que a cada execução são estimados valores diferentes para os parâmetros, estes valores ficaram bem próximos de acordo com cada frequência de amostragem (FA) usada, permitindo a utilização dessa medida de posição da estatística descritiva.

A Figura 3 mostra a sobreposição das curvas de corrente simulada e estimada na frequência de 9kHz, por exemplo, comprovando a robustez do

método, uma vez que o erro absoluto entre as curvas foi de 0,001 no eixo das ordenadas.

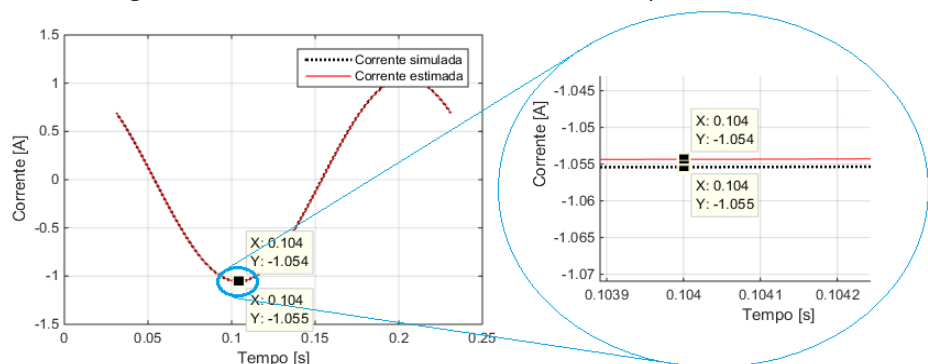
Tabela 1 – Parâmetros estimados através da ED.

	FA = 1kHz		FA = 3kHz		FA = 6kHz		FA = 9kHz	
	R [ $\Omega$ ]	L [H]	R [ $\Omega$ ]	L [H]	R [ $\Omega$ ]	L [H]	R [ $\Omega$ ]	L [H]
Dados estimados	5,1503	0,2591	5,2698	0,2527	5,2715	0,2525	5,2797	0,2508
Erro relativo [%]	2,83	3,65	0,57	1,08	0,54	1,00	0,38	0,32
<i>Fitness</i>	0,0081		0,0040		0,0036		0,0011	
Tempo computacional [min]	1,42		4,18		5,89		10,19	

Fonte: Autoria própria.

Analisando a Tabela 1 é possível notar que o método é bom, pois o maior erro obtido foi de 3,65% para a indutância na menor frequência de amostragem utilizada. Além disso, verifica-se que com o aumento da frequência tanto o *fitness* quanto os erros diminuem, comprovando que a estimação dos parâmetros vai melhorando com esse aumento. Por outro lado, o tempo computacional também foi aumentando e, conseqüentemente, deixando o algoritmo mais lento.

Figura 3 – Curva de corrente do circuito RL na frequência de 9kHz.



Fonte: Autoria própria via Simulink.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho apresentou resultados satisfatórios via evolução diferencial para a estimação dos parâmetros do circuito RL proposto. Esse fato pode ser confirmado tanto pelos dados descritos na Tabela 1, por exemplo os baixos valores dos erros e do *fitness*, quanto pela sobreposição das curvas de corrente na Figura 3. Assim, pode-se perceber que quanto maior a frequência de amostragem melhor é o *fitness* e, conseqüentemente, mais precisa é a estimação. No entanto, o tempo computacional total de execução do algoritmo aumenta, deixando-o mais lento, mas ainda assim é vantajoso, pois frequências mais altas contribuem com valores mais precisos. Por isso, a pesquisa terá



continuidade e, futuramente, pretende-se utilizar a ED para estimar os parâmetros elétricos de um MIT em regime permanente.

## REFERÊNCIAS

ALSOFYANI, I. M.; IDRIS, N. R. N. A review on sensorless techniques for sustainable reliability and efficient variable frequency drives of induction motors. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 24, p. 111-121, 2013. ISSN 1364-0321.

COSTA, B. L. G. **Metaheurísticas de otimização aplicadas na sintonia de controladores PI de um acionamento DTC-SVM para motores de indução trifásicos**. 2015. 127 f. Dissertação de Mestrado. PPGEE, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio.

DOS SANTOS, T. H. et al. Scalar control of an induction motor using a neural sensorless technique. **Electric power systems research**, v. 108, p. 322-330, 2014. ISSN 0378-7796.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, J. C.; UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas: com introdução à eletrônica de potência**. 6 ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

FORTES, M. Z.; FERREIRA, V. H.; COELHO, A. P. F. The induction motor parameter estimation using genetic algorithm. **IEEE Latin America Transactions**, v. 11, n. 5, p. 1273-1278, 2013. ISSN 1548-0992.

GUEDES, J. J. **Identificação de falhas de curto-circuito de estator em motores de indução trifásicos utilizando evolução diferencial**. 2016. 69 f. Dissertação de Mestrado. PPGEE, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio.

GUEDES, J. J. et al. Parameters estimation of three-phase induction motors using differential evolution. **Electric Power Systems Research**, v. 154, p. 204-212, 2018. ISSN 0378-7796.

KOSOW, I. L. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. 15 ed. São Paulo: Globo, 2005.

LOPES, H. S.; TAKAHASHI, R. H. C. **Computação evolucionária em problemas de engenharia**. Curitiba, PR: Omnipax, 2011.

PRICE, K.; STORN, R. M.; LAMPINEN, J. A. **Differential evolution: a practical approach to global optimization**. Springer Science & Business Media, 2006. ISBN 3540313060.

SAUER, I. L. et al. A comparative assessment of Brazilian electric motors performance with minimum efficiency standards. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 41, p. 308-318, 2015. ISSN 1364-0321.



VIANA, A. N. C. et al. Eficiência energética: fundamentos e aplicações. **Elektro, Universidade Federal de Itajubá, Excen, Fupai**, v. 1, 2012.

### AGRADECIMENTOS

Os envolvidos neste trabalho agradecem à UTFPR pela bolsa de iniciação científica e pelo ambiente disponível para estudo, e ao Laboratório de Sistemas Inteligentes (LSI) da UTFPR – *Campus* Cornélio Procópio por toda estrutura fornecida à pesquisa.