

## Estimação de parâmetros de um motor de indução trifásico utilizando evolução diferencial

### Parameters estimation of three-phase induction motor using differential evolution

#### RESUMO

Este trabalho consiste no estudo sobre a estimação dos parâmetros elétricos de um motor de indução trifásico, em regime permanente, por meio de um algoritmo de evolução diferencial (ED). Tendo em vista que este motor apresenta grande importância no cenário energético nacional, seu controle e acionamento devem ser adequados e para isso seus parâmetros devem ser considerados. Assim, o algoritmo tem a finalidade de estimar os parâmetros através da minimização de uma função objetivo que compara a corrente estatórica de fase estimada com a corrente estatórica de fase real adquirida. Para isso, simulações computacionais foram realizadas no software MATLAB® para o motor de 1CV. Os valores obtidos para os parâmetros via ED apresentaram erros relativamente altos, porém o desempenho do algoritmo não foi afetado próximo aos pontos de operação considerados, devido à sensibilidade dos parâmetros estimados. Ou seja, os dois parâmetros com maior sensibilidade em relação aos demais,  $R_2$  e  $L_M$ , foram bem estimados independentemente da frequência de amostragem utilizada.

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

#### ABSTRACT

This work consists of the study about the electrical parameters estimation of a three-phase induction motor, at permanent scheme, through a differential evolution algorithm, classified as an evolutionary algorithm of the population metaheuristic group. Given that this motor has great importance in the national energy scenario, its control and drive must be appropriate and for that its parameters must be considered. Thus, the algorithm will have the purpose of estimating them through the minimization of an objective function that compares the estimated phase stator current with the acquired real phase stator current. For this purpose, computer simulations were performed using MATLAB® software for the 1CV motor. The values obtained for the parameters via ED were relatively high errors, but the performance of algorithm was not affected near the operating points, due to the sensitivity of the estimated parameters. That is, the two parameters with the highest sensitivity to the other,  $R_2$  and  $L_M$ , were well estimated regardless of the sampling frequency used.

**KEYWORDS:** Parameters estimation. Differential evolution. Three-phase induction motor.

**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

**Recebido:** 19 ago. 2019.

**Aprovado:** 01 out. 2019.

**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 considerado como a principal máquina de conversão de energia elétrica em mecânica motriz (KOSOW, 2005). Isso ocorre devido ao seu baixo custo, robustez, simplicidade de construção e alto grau de confiabilidade (DOS SANTOS et al., 2014). Só no Brasil, esses motores são responsáveis por aproximadamente 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 dimensionamento inadequado do MIT, aumentando radicalmente o consumo de energia elétrica. Portanto, para que o motor funcione de forma eficaz são necessários acionamento e controle 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).

Nesse sentido, dentre as técnicas utilizadas para estimação de parâmetros de máquinas elétricas, existe a Evolução Diferencial (ED), do inglês *Differential Evolution*, (STORN e PRICE, 1997; PRICE et al., 2006). Nos trabalhos de Ursem e Vadstrup (2003) e Guedes et al. (2018), por exemplo, a ED foi utilizada para estimar os parâmetros de MITs e os resultados foram bastante satisfatórios. Dessa maneira, a proposta desse trabalho consiste em avaliar o algoritmo de ED como método para a estimação dos parâmetros elétricos de um MIT, operando em regime permanente, através da minimização de uma função objetivo adotada.

## EVOLUÇÃO DIFERENCIAL

A Evolução Diferencial (ED) consiste em um algoritmo evolucionário baseado em teorias darwinianas sobre a evolução das espécies e conceitos relacionados à genética no qual uma população de cromossomos evolui a partir da aplicação de três operadores genéticos na seguinte ordem: mutação, cruzamento e seleção (STORN e PRICE, 1997; COSTA, 2015). A ED foi desenvolvida por Storn e Price em 1995 para ser um otimizador de função bastante simples, confiável, versátil e extremamente eficiente para otimização contínua e, inclusive, em algumas literaturas, é visto como uma versão melhorada do 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).

As equações que descrevem a dinâmica do algoritmo são:

$$x_{i,j} = x_{i,L} + rand(0,1) \cdot (x_{i,U} - x_{i,L}), \quad (1)$$

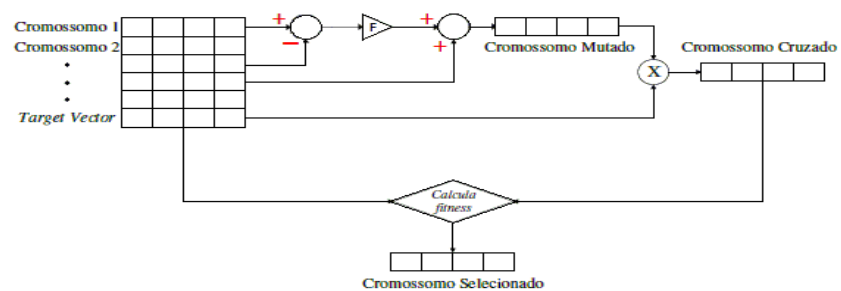
$$v_{i,g} = x_{r1,g} + F(x_{r2,g} - x_{r3,g}), \quad (2)$$

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

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

Na Eq. (1)  $x_{i,j}$  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  $FO$  seja menor que o valor da função objetivo do vetor população inicial ( $x_{i,g}$ ), caso contrário quem ocupa a posição  $i$  é  $x_{i,g}$ , quando 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, normalmente especificado 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).

## MATERIAL E MÉTODOS

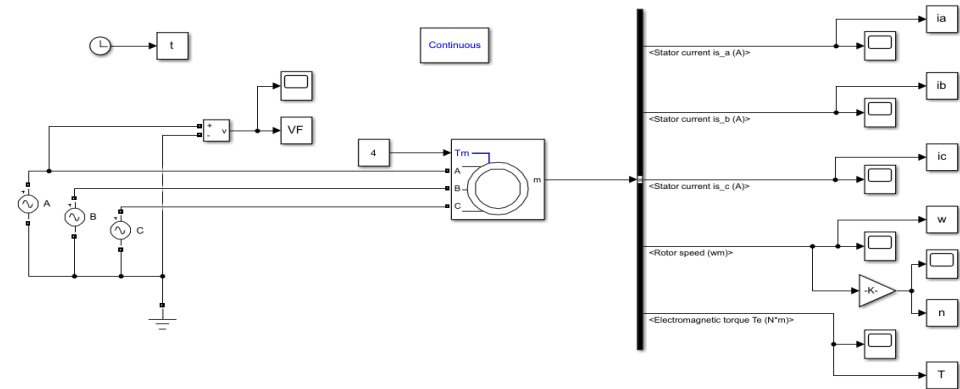
Neste trabalho foi considerado apenas um MIT de 1CV implementado na plataforma Simulink do programa MATLAB®. A Figura 2 exemplifica o modelo desenvolvido, onde 'ia', 'w', 'n', 'VF' e 't' ficaram em função do tempo de amostragem, de acordo com cada frequência usada, e representam respectivamente a corrente de fase na fase A, a velocidade do motor em rad/s, a velocidade do motor em rpm, a tensão de fase e o tempo, que atuam como 'saídas' da simulação e por outro lado como 'entradas' no algoritmo de ED.

Sendo assim, com esses dados obtidos, o objetivo da ED foi estimar os valores dos parâmetros elétricos do MIT através da minimização da função objetivo ( $FO$ ) proposta, obtendo o melhor valor de *fitness* (menor valor de  $FO$ ). Tal função consiste na diferença entre as curvas de corrente simulada e estimada, ponto a ponto, em regime permanente e considerando apenas dois períodos das curvas. Essa comparação foi feita pelo do método dos mínimos quadrados apresentado na Eq. (5).

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

onde  $N$  corresponde ao número de pontos analisados;  $IS$  à corrente simulada; e  $IE$  à corrente estimada pelo algoritmo.

Figura 2 – Modelo do MIT utilizado na simulação.



Fonte: Autoria própria (2019).

Foram realizadas 4 implementações do algoritmo com diferentes frequências de amostragem: 3, 6, 9 e 12 kHz e considerando 3 condições de operação do motor, sendo elas 100%, 75% e 50% de carga nominal. Os valor de  $F$  foi de 0,8 quando o *fitness* assumisse valores maiores que 0,001 e 0,2 quando o *fitness* fosse igual ou menor a 0,001, enquanto que o valor considerado para  $CR$  foi de 0,5. Além disso, para as implementações, os parâmetros do MIT foram pré-definidos entre os seguintes intervalos:  $0 \leq R_1 \text{ e } R_2 \leq 10$ ;  $0 \leq L_1 \text{ e } L_2 \leq 0,04$ ; e  $0 \leq L_M \leq 0,5$ . A população inicial foi constituída por 18 cromossomos com 5 genes cada, correspondendo, respectivamente a  $R_1, R_2, L_1, L_2 \text{ e } L_M$ . Esta foi submetida aos operadores genéticos e como critério de parada foi considerado um número máximo de 100 gerações. A Tabela 1 apresenta os dados do motor de 1CV.

Tabela 1 – Parâmetros do motor de 1CV.

Potência [W]	746
Frequência [Hz]	60
Tensão de alimentação [V]	220/380
Número de polos	4
Velocidade síncrona [rpm]	1740
Torque nominal [N.m]	4,1
$R_1$ [ $\Omega$ ]	7,8667
$R_2$ [ $\Omega$ ]	6,0840
$L_1$ [H]	0,0210
$L_2$ [H]	0,0210
$L_M$ [H]	0,4382

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta os melhores valores para os parâmetros estimados do MIT simulado através da ED nas quatro frequências de amostragem consideradas. No total, o algoritmo foi executado 100 vezes para cada frequência, assim, através dessas execuções foram escolhidos os 10 melhores conjuntos de parâmetros a partir dos melhores valores de *fitness* e calculou-se a mediana, tomando os valores medianos obtidos como os dados finais estimados pela ED. Vale ressaltar que o tempo computacional descrito na Tabela 2 equivale ao tempo gasto pelo algoritmo

para obter um único conjunto de melhores parâmetros, ou seja, esse tempo não considera as 100 execuções, mas sim apenas uma delas.

Tabela 2 – Parâmetros estimados através da ED para o motor simulado de 1 CV.

	Análise 1		Análise 2		Análise 3		Análise 4	
	3 kHz		6 kHz		9 kHz		12 kHz	
	Valor	Erro [%]	Valor	Erro [%]	Valor	Erro [%]	Valor	Erro [%]
$R_1$ [ $\Omega$ ]	8,2512	4,89	6,5294	17,00	7,0810	9,99	8,7421	11,13
$R_2$ [ $\Omega$ ]	6,1721	1,44	6,2393	2,55	6,1814	1,60	6,0970	0,21
$L_1$ [H]	0,0147	29,97	0,0188	10,57	0,0209	0,69	0,0204	3,09
$L_2$ [H]	0,0240	14,44	0,0246	17,26	0,0250	19,10	0,0262	24,72
$L_M$ [H]	0,4409	0,61	0,4412	0,68	0,4382	0,00	0,4385	0,0685
Fitness	$8 \cdot 10^{-5}$		$3 \cdot 10^{-5}$		$1 \cdot 10^{-5}$		$4 \cdot 10^{-6}$	
Tempo computacional [s]	3		7		11		16	

Fonte: Autoria própria (2019).

Analisando a Tabela 2 pode-se observar que quanto maior a frequência de amostragem melhores são os parâmetros estimados e, conseqüentemente, menor é o valor do fitness, mas, por outro lado, o tempo computacional aproximado de execução do algoritmo também aumenta, deixando a estimação mais lenta.

De modo geral nota-se que há uma grande dificuldade em estimar os parâmetros do motor, tendo em vista que alguns parâmetros apresentaram erro percentual muito próximo a 30%, principalmente  $L_1$  e  $L_2$ . Por outro lado, pode-se perceber que o algoritmo não teve dificuldades em estimar  $R_2$  e  $L_M$ , apresentando sempre erros relativos percentuais abaixo de 3%, ou seja, estes dois parâmetros apresentam maior sensibilidade em relação aos demais, uma vez que são bem estimados independentemente da frequência de amostragem.

## CONCLUSÃO

O trabalho apresentou resultados satisfatórios via evolução diferencial para a estimação dos parâmetros elétricos do MIT de 1CV. Esse fato pode ser confirmado pelos dados descritos na Tabela 2, na qual nota-se que com o aumento da frequência de amostragem todos os parâmetros estimados ficaram mais próximos dos valores reais, exceto  $L_2$ . Por isso, pode-se optar pela frequência de 9kHz como frequência padrão para estimação dos parâmetros elétricos de um motor de 1 CV. Além disso, pode-se perceber que com apenas três pontos de operação a estimação não foi muito boa, sendo assim, uma alternativa, na tentativa de melhorar a estimação de parâmetros, seria aumentar a quantidade de condições de operação do motor impostas ao algoritmo. Portanto, a pesquisa terá continuidade visando modificações no algoritmo, a fim de melhorar sua performance, e, em sequência, utilizá-lo para estimar os parâmetros elétricos de MITs de carga nominal maior (5HP, 10 HP), além dos motores reais presentes em laboratório, comprovando, assim, a robustez do mesmo.

## AGRADECIMENTOS

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

## REFERÊNCIAS

- COSTA, Bruno Leandro Galvão. **Metaheurísticas de otimização aplicadas na sintonia de controladores PI de um acionamento DTC-SVM para motores de indução trifásicos**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2015.
- DOS SANTOS, Tiago Henrique 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.
- 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, 2013. ISSN 1548-0992.
- GUEDES, Jacqueline Jordan. **Identificação de falhas de curto-circuito de estator em motores de indução trifásicos utilizando evolução diferencial**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2016.
- GUEDES, Jacqueline Jordan 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, Irving L. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. 15 ed. São Paulo: Globo, 2005.
- LOPES, Heitor Silvério; TAKAHASHI, Ricardo Hiroshi Caldeira. **Computação evolucionária em problemas de engenharia**. Curitiba, PR: Omnipax, 2011.
- PRICE, Kenneth; STORN, Rainer M; LAMPINEN, Jouni A. **Differential evolution: a practical approach to global optimization**. Springer Science & Business Media, 2006. ISBN 3540313060.
- SAUER, Ildo 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.
- STORN, Rainer; PRICE, Kenneth. Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces. **Journal of Global Optimization**, v. 11, n. 4, p. 341-359, 1997. ISSN 1573-2916.
- URSEM, Rasmus K; VADSTRUP, Pierré. Parameter identification of induction motors using differential evolution. **Evolutionary Computation, 2003. CEC'03. The 2003 Congress on**, IEEE, p.790-796, 2003.
- VIANA, Augusto Nelson Carvalho et al. Eficiência energética: fundamentos e aplicações. **Elektro, Universidade Federal de Itajubá, Excen, Fupai**, v. 1, 2012.