

## **Aplicação de algoritmos genéticos para estimação de parâmetros de painéis fotovoltaicos**

### **Application of genetic algorithms for parameter estimation of photovoltaic panels**

DOI:10.34117/bjdv7n1-448

Recebimento dos originais: 15/12/2020

Aceitação para publicação: 15/01/2021

#### **Gilberto Lopes Filho**

Mestrado

E-mail: gilbertofilho93@gmail.com

#### **Flávio Henrique Teles Vieira**

Doutorado

E-mail: flavio@eee.ufg.br

#### **Ricardo Augusto Pereira Franco**

Doutorado

E-mail: ricardofranco3@gmail.com

#### **Ana Cláudia Barbosa Rezende**

Mestrado

E-mail: anacbrz@gmail.com

#### **Henrique Pires Corrêa**

Mestrado

E-mail: henriquepires19@hotmail.com

#### **Maykon Renan Pereira da Silva**

Mestrado

E-mail: maykoon.renan@gmail.com

#### **Alisson Assis Cardoso**

Doutorado

E-mail: alsnac@gmail.com

#### **Marcelo Stehling de Castro**

Doutorado

E-mail: mcastro@ufg.br

### **RESUMO**

A geração de energia fotovoltaica tem se tornado uma ótima opção para a geração de energia elétrica limpa, visto que ela possui alto potencial de produção de energia elétrica em todo o mundo. O equipamento responsável pela transformação dos raios solares em energia elétrica é o painel fotovoltaico. Sua simulação computacional é essencial para a realização de projetos de sistemas fotovoltaicos. Contudo, os datasheets dos painéis não

forneem todas as informaões necessrias para a simulaão computacional. Portanto, torna-se necessrio desenvolver mtoos para estimar alguns parmetros dos painis. Este trabalho propoe um mtooo de estimaaõ de parmetros de painis foto- voltaicos utilizando o Algoritmo Genético, desenvolvido no ambiente MATLAB. A funão objetivo do Algoritmo Genético corresponde à minimizaão do erro quadrático médio entre a curva característica IxV experimental do painel em relaão à curva IxV gerada pelos parmetros estimados. Os resultados obtidos com o Algoritmo Genético sãoo comparados com outros mtoos presentes na literatura.

**Palavras chaves:** Algoritmo Genético, Estimaaõ de parmetros, Painel Fotovoltaico.

## ABSTRACT

The photovoltaic energy is an interesting option for clean energy generation in the entire world, since it has a high potential for electricity generation worldwide. The equipment responsible for transforming the solar rays into electrical energy is the photovoltaic panel. The computational simulation of photovoltaic panels is essential to design photovoltaic systems. However, the datasheets of the panels does not provide all information necessary for the computational simulation. Therefore, it becomes necessary to develop methods to estimate some parameters of the panels. This work proposes the application of the Genetic Algorithm to estimate parameters of photovoltaic systems, in the MATLAB environment. The objective function of the Genetic Algorithm corresponds to the minimization of the root mean square error between the IxV experimental curve and the IxV curve generated by the estimated parameters. The results obtained with the Genetic algorithm are compared to those of some methods present in the literature.

**Keywords:** Genetic Algorithm, Parameter Estimation, Photovoltaic Panel.

## 1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por energia elétrica demonstra a dependência da sociedade por este tipo de energia. O setor elétrico vem desenvolvendo novos sistemas para aumentar a confiabilidade na rede elétrica, aprimorando suas funcionalidades e sua infraestrutura [Martinuzzi and Roos 2020]. Há, também, a preocupação com o impacto ambiental na geração de energia, impactos estes que podemos citar a elevação da temperatura como um dos tópicos mais abordados [Aramizu 2010], [da Costa 2010]. Portanto, a geração de energia através da luz solar é uma medida que beneficia tanto a concessionária de energia, o consumidor e o meio ambiente.

A energia solar é uma fonte de energia renovável. Essa geração é realizada por meio da captação da radiação solar, na qual é feita sua conversão em energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico na célula fotovoltaica [Aramizu 2010]. Nesse efeito há a excitação de elétrons, devido às características de alguns materiais semicondutores na

presença de luz solar, ocorrendo o efeito fotovoltaico e gerando a corrente elétrica desse sistema.

Um conjunto de células fotovoltaicas formam um painel fotovoltaico. O painel fotovoltaico pode ser representado por meio de um circuito elétrico que possui 5 parâmetros desconhecidos [Villalva et al. 2009]. Estes parâmetros não são fornecidos pelo *datasheet*, que é um material contendo informações sobre a placa fotovoltaica e é cedido pelo seu fabricante, sendo necessário, portanto, a sua estimação. Essa estimação trata-se de um problema envolvendo modelagem matemática e algoritmos de otimização. Alguns trabalhos, como o de [Cubas et al. 2014], utilizam formas analíticas aproximadas para o cálculo dos parâmetros. Outros trabalhos, como o de [El-Naggar et al. 2012] e [Askarzadeh and Rezaeadeh 2013], utilizam algoritmos de busca e otimização a fim de se estimar esses parâmetros.

Uma grande parte dos algoritmos de otimização convencionais são do tipo determinístico, e dentre eles, existem aqueles que são baseados na informação do gradiente da função. Um exemplo é o método de Newton-Raphson, que possui uma boa performance para funções bem comportadas. Porém, quando se trata de problemas altamente não lineares, não convexos, não diferenciáveis e não suaves, estes métodos determinísticos baseados em gradiente apresentam problemas na convergência, e por muitas vezes ficam presos em ótimos locais. Para contornar esse problema, é necessário utilizar algoritmos que não sejam baseados no gradiente da função, como por exemplo, algoritmos estocásticos. Estes algoritmos, também chamados de algoritmos heurísticos, fazem uma busca aleatória pela melhor solução. Essa busca muitas vezes é, de certa forma, direcionada e garante que o método convirja para uma boa solução [Yang 2008].

Um tipo de algoritmo heurístico é o algoritmo genético. Este algoritmo é baseado em métodos heurísticos de busca aleatória inspirados pela biologia evolutiva como hereditariedade, mutação, seleção natural e recombinação. Os algoritmos genéticos são implementados de tal forma que uma população de representações abstratas de solução é selecionada em busca de soluções melhores. Os algoritmos genéticos utilizam transições probabilísticas e não regras determinísticas [Holland 1992].

Neste trabalho serão utilizadas equações analíticas, propostas pela literatura, para o cálculo de três parâmetros dos módulos e será proposto um algoritmo de busca e otimização dos outros dois parâmetros restantes. A seção 2 mostra a modelagem do painel fotovoltaico utilizada neste trabalho. A seção 3 descreve o algoritmo genético utilizado.

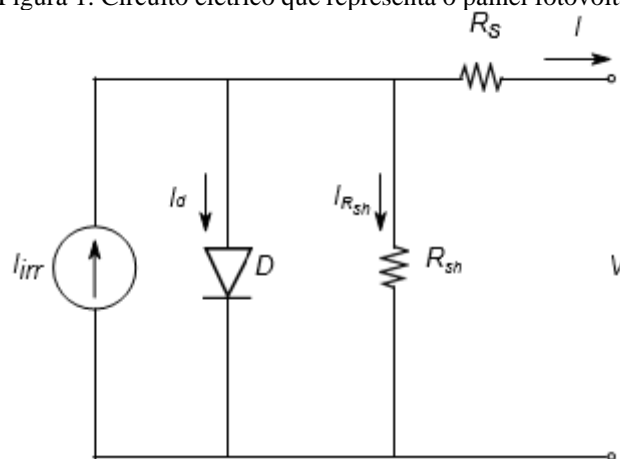
A seção 4 apresenta os resultados deste trabalho, comparando-os com outros presentes na literatura.

## 2 MODELO DO PAINEL FOTOVOLTAICO

O modelo de um painel fotovoltaico é representado por meio de um circuito elétrico que o define. Essa modelagem se justifica porque é necessário realizar simulações precisas e confiáveis acerca do sistema a ser instalado, devido ao seu alto custo de implantação. A modelagem matemática é definida em função do modelo do painel fotovoltaico escolhido.

O modelo do painel fotovoltaico com um diodo é o modelo escolhido para este trabalho. Este modelo é um modelo complexo, preciso e confiável, satisfazendo os requisitos a confiabilidade da simulação do sistema fotovoltaico ([da Costa 2010]). O circuito elétrico do modelo é apresentado na Figura 1.

Figura 1. Circuito elétrico que representa o painel fotovoltaico



onde os parâmetros a serem estimados do modelo são: a corrente fotogerada ( $I_{irr}$ ), a corrente de saturação do diodo ( $I_0$ ), a resistência em série ( $R_s$ ), a resistência em paralelo ( $R_{sh}$ ) e o fator de idealidade do diodo ( $n$ ). O parâmetro  $I$  é a corrente gerada pelo painel, a ser calculada, e  $V$  é a tensão entre os terminais do painel. O modelo do painel fotovoltaico escolhido influencia diretamente o comportamento do sistema fotovoltaico a ser simulado, porque a expressão matemática que define o modelo é determinada pelo circuito elétrico escolhido ([de Blas et al. 2002]). A equação da corrente resultante é chamada de equação característica dada pela Eq. 1.

$$I = I_{irr} - I_0 \left[ e^{\left( \frac{V+IR_s}{N_s n V_t} \right)} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

onde  $I_d = I_0 \left[ e^{\left( \frac{V+IR_s}{N_s n V_t} \right)} - 1 \right]$ .

Portanto, como alguns dados não são fornecidos pelo datasheet, eles devem ser estimados ( $I_{irr}$ ,  $I_0$ ,  $R_s$ ,  $R_{sh}$  e  $n$ ). O trabalho [Laudani et al. 2014] propõe obter valores analíticos para alguns parâmetros por meio da manipulação da Eq. 1 no ponto de circuito aberto ( $I = 0$ ,  $V = V_{ca}$ ), no ponto de curto circuito ( $I = I_{cc}$ ,  $V = 0$ ), no ponto de máxima potência ( $I = I_{mp}$ ,  $V = V_{mp}$ ) e por meio da derivada da potência em função da tensão no ponto de máxima potência ( $\partial P / \partial V \Big|_{V=V_{mp}} = 0$ ). Gerando, assim, equações para três dos cinco parâmetros a serem estimados. Os valores da corrente fotogerada ( $I_{irr}$ ), da corrente de saturação do diodo ( $I_0$ ) e da condutância em paralelo ( $G_{sh}$ ) são dados, respectivamente, por:

$$I_{irr} = \frac{I_{cc} V_{ca} \left( e^{\left( \frac{V_{mp} + R_s I_{mp}}{N_s n V_t} \right)} - 1 \right) + I_{cc} V_{mp} \left( 1 - e^{\left( \frac{V_{ca}}{a} \right)} \right) + I_{mp} V_{ca} \left( 1 - e^{\left( \frac{R_s I_{cc}}{a} \right)} \right)}{A_1 e^{\left( \frac{R_s I_{cc}}{a} \right)} + A_2 e^{\left( \frac{V_{mp} + R_s I_{mp}}{a} \right)} + A_3 e^{\left( \frac{V_{ca}}{a} \right)}} \quad (2)$$

$$I_0 = \frac{V_{ca} (I_{cc} - I_{mp}) - V_{mp} I_{cc}}{A_1 e^{\left( \frac{R_s I_{cc}}{a} \right)} + A_2 e^{\left( \frac{V_{mp} + R_s I_{mp}}{a} \right)} + A_3 e^{\left( \frac{V_{ca}}{a} \right)}} \quad (3)$$

$$G_{sh} = \frac{(I_{mp} - I_{cc}) e^{\left( \frac{V_{ca}}{a} \right)} + e^{\left( \frac{V_{mp} + R_s I_{mp}}{a} \right)} - (I_{mp}) e^{\left( \frac{R_s I_{cc}}{a} \right)}}{A_1 e^{\left( \frac{R_s I_{cc}}{a} \right)} + A_2 e^{\left( \frac{V_{mp} + R_s I_{mp}}{a} \right)} + A_3 e^{\left( \frac{V_{ca}}{a} \right)}} \quad (4)$$

onde  $G_{sh} = 1/R_{sh}$ ;  $A_1 = V_{mp} + R_s I_{mp} - V_{ca}$ ;  $A_2 = V_{ca} - R_s I_{cc}$ ;  $A_3 = R_s I_{cc} - R_s I_{mp} - V_{mp}$  e  $a = N_s n V_t$ .

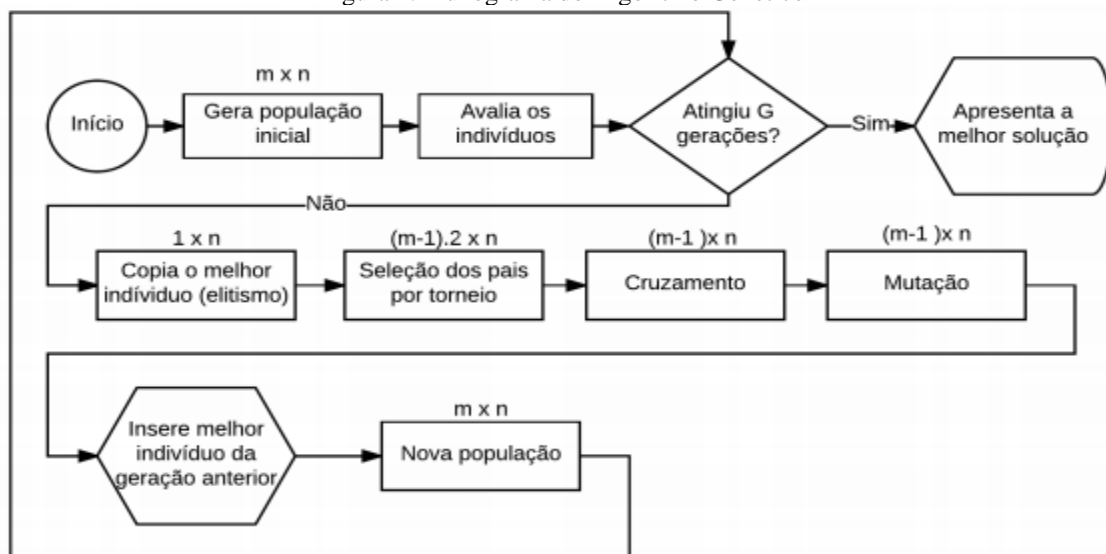
É necessário desenvolver novos métodos para calcular os demais parâmetros ( $R_s$  e  $n$ ) que não possuem equações analíticas. Assim, este trabalho utiliza o conceito de Algoritmos Genéticos para desenvolver um algoritmo que otimize a estimação dos parâmetros  $R_s$  e  $n$ , minimizando o erro ( $RMSE$ ) entre os pontos experimentais e calculados da curva característica.

### 3 ALGORITMO GENÉTICO

O conjunto das possíveis soluções de um algoritmo genético é denominado população. A população é composta por indivíduos, que por sua vez são compostos de genes. Cada indivíduo é uma abstração de uma possível solução, de forma que o número de genes dos indivíduos depende de cada problema [Holland 1992]. O algoritmo genético possui as etapas de seleção, cruzamento e mutação. Na etapa de seleção, são escolhidos os melhores indivíduos para serem os progenitores. [Linden 2006] mostra que há várias formas de se fazer essa seleção, como por exemplo a roleta viciada ou torneio. Na etapa de cruzamento ocorre uma combinação dos genes dos indivíduos escolhidos para serem os progenitores, de forma a gerar um novo indivíduo. A mutação é uma perturbação adicionada aos genes do novo indivíduo, o que faz com que novos tipos de genes sejam introduzidos na população, aumentando o espaço de busca e evitando mínimos locais [Linden 2006]. Foi implementado neste trabalho um algoritmo genético a fim de se estimar os parâmetros  $n$  e  $Rs$  do circuito mostrado na Figura 1. Para tal fim, utilizou-se as Equações 4, 3 e 2, que estão em função de  $n$  e  $Rs$ . Para cada iteração, onde se calcula estes dois parâmetros, os outros três parâmetros também são obtidos.

A Figura 2 apresenta um fluxograma do algoritmo. No início é gerado uma população inicial com 30 indivíduos, cada indivíduo com 2 genes. Cada gene representa um dos parâmetros que estão sendo estimados. Em seguida os indivíduos passam pelo simulador, onde cada um é avaliado por uma função de avaliação, que ordena os indivíduos do melhor para o pior.

Figura 2. Fluxograma do Algoritmo Genético



A função de avaliação utilizada foi a raiz quadrada do erro quadrático médio, doravante chamada de *RMSE* (do inglês root mean square error). O *RMSE* foi calculado em relação aos pontos de corrente e tensão disponibilizados no datasheet do módulo fotovoltaico Kyocera KC200GT. Isto é, para cada valor do parâmetro  $n$  e do parâmetro  $R_s$ , plota-se uma curva, e o *RMSE* é calculado entre esta curva e os pontos do datasheet. Quanto menor o *RMSE*, mais adequados estão os parâmetros  $n$  e  $R_s$ , e mais a curva encontrada se aproxima da curva real. O critério de parada desse algoritmo foi especificado como um limite de gerações. Neste trabalho adotou-se o número máximo de gerações como 100. Foi adotado também a técnica de elitismo, isto é, a manutenção do melhor indivíduo da geração anterior na próxima geração. Isso garante que no pior caso, o pior indivíduo de uma determinada geração ainda será melhor ou igual que o melhor indivíduo da geração anterior. Isso faz com que o algoritmo convirja para uma boa solução. A seleção para os progenitores da próxima geração é realizada por torneio, onde se escolhe  $k$  indivíduos aleatoriamente, e os dois melhores serão os pais de um indivíduo da próxima geração. O processo é repetido até que haja a quantidade de pais suficientes para manter o número de indivíduos da próxima geração igual aos da geração anterior.

A quantidade  $k$  de indivíduos é determinado pelo parâmetro  $\tau$ . Este parâmetro define a porcentagem da população total que irá participar do torneio. Neste trabalho foi adotado  $\tau = 70\%$ , isto é, dos 30 indivíduos da população, são escolhidos 21 aleatoriamente para cada torneio. Na etapa de cruzamento ocorre a troca de genes entre os progenitores para gerar os filhos. Escolhe-se aleatoriamente um número  $\eta$ , que é a variável probabilística de decisão. O valor de  $\eta$  diminui de acordo com o aumento das gerações, porém é um valor randômico, conforme mostra a Figura 3. Caso  $\eta$  seja maior que um  $\beta$ , onde  $\beta$  é um número aleatório entre 0 e 1, o filho receberá o gene do primeiro pai, e caso contrário, receberá o gene do segundo pai. Esse processo ocorre até que o filho tenha a mesma quantidade de cromossomos dos pais. Na etapa de mutação ocorre uma perturbação que se provoca em um determinado gene para a promoção da exploração no espaço de busca. Nesta etapa foi definido que há 50% de chance dos indivíduos sofrerem mutação. Caso haja mutação, é sorteado um  $\Delta$  de mutação que é aplicado ao gene. Neste trabalho foi adotado um  $\Delta = 5\%$ , ou seja, quando ocorre mutação, cada gene pode ter seu valor alterado em até 5%. Este processo é ilustrado na Figura 4. A nova população é constituída dos filhos gerados pelos pais, adicionado também do melhor indivíduo da geração

anterior. Novamente se avalia os indivíduos conforme o *RMSE*, e o algoritmo é recomeçado.

Figura 4. Detalhe da mutação do Algoritmo Genético

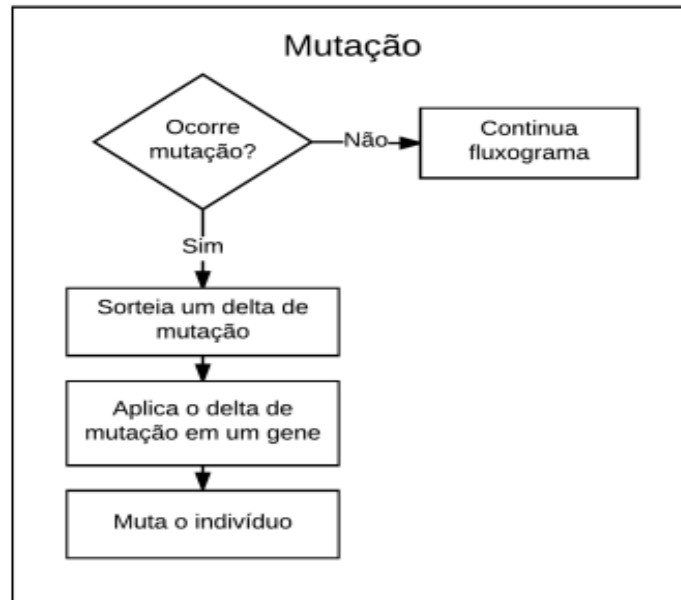
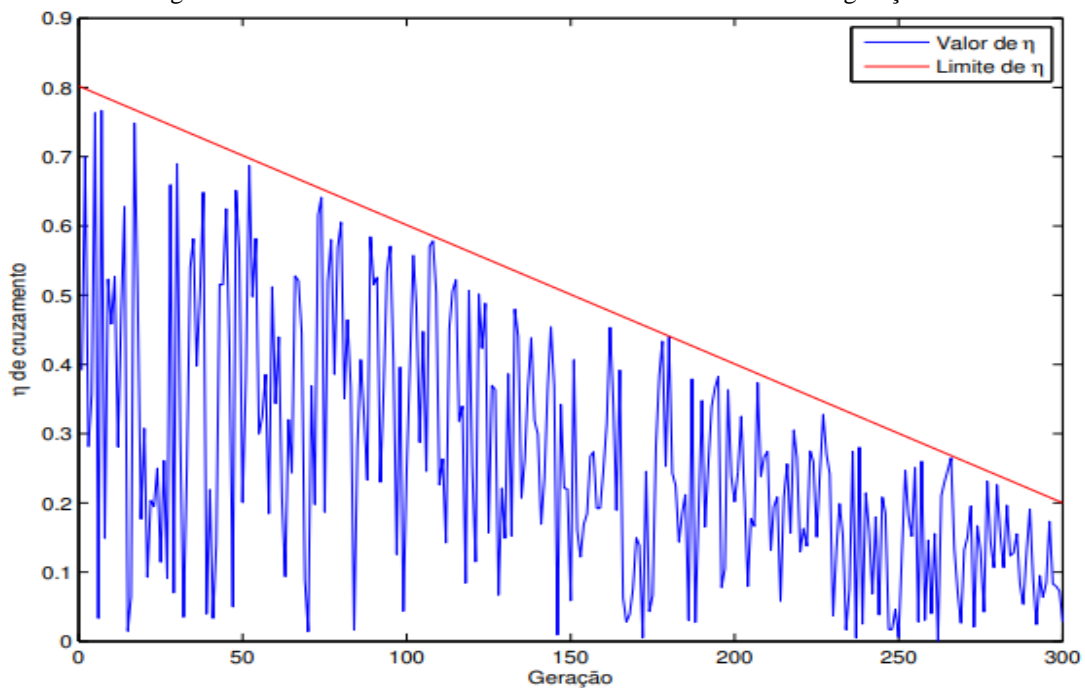


Figura 3. Decréscimo da taxa de cruzamento com o aumento das gerações



#### 4 RESULTADOS

Os resultados foram obtidos por meio do software MATLAB e comparados com quatro trabalhos da literatura [Cubas et al. 2014], [Laudani et al. 2014], [Majdoul et al. 2015] e [Villalva et al. 2009]. Como o algoritmo genético provê um resultado cada vez



que ele é executado, para garantir a confiabilidade na solução obtida com o algoritmo, executou-se o algoritmo 10 vezes. Fazendo a média das respostas fornecidas pelo algoritmo, evita-se que os parâmetros obtidos sejam oriundos de um mínimo local da superfície de erro *RMSE*, por exemplo. Tal como *n* e *Rs*, analisou-se as estatísticas do *RMSE* com o intuito de se mostrar que este converge para um certo valor. Mesmo o maior valor obtido, ou seja, no pior caso, o desempenho do algoritmo genético ainda foi superior ao de outros trabalhos da literatura, como será mostrado adiante. A Tabela 1 apresenta uma análise estatística dos dados.

Tabela 1. Estatísticas dos parâmetros estimados

| Parâmetro   | Média                  | Desvio Padrão          | Variância               | Máximo                 | Mínimo                 |
|-------------|------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| <b>n</b>    | 1,2275                 | $3,4398 \cdot 10^{-3}$ | $11,8327 \cdot 10^{-6}$ | 1,2333                 | 1,2230                 |
| <b>Rs</b>   | 0,1477                 | $1,0730 \cdot 10^{-3}$ | $1,1514 \cdot 10^{-6}$  | 0,1493                 | 0,1459                 |
| <b>RMSE</b> | $9,7369 \cdot 10^{-2}$ | $2,9054 \cdot 10^{-6}$ | $8,4415 \cdot 10^{-12}$ | $9,7374 \cdot 10^{-2}$ | $9,7366 \cdot 10^{-2}$ |

A Tabela 2 apresenta uma comparação dos valores do erro (*RSME*) e parâmetros do painel fotovoltaico obtidos neste trabalho com os de outros presentes na literatura. É possível perceber que o *RMSE* deste trabalho foi o menor registrado até então na literatura. Nota-se, também, que o valor do fator de idealidade do diodo (*n*) está mais próximo dos valores obtidos pelos trabalhos [Cubas et al. 2014], [Villalva et al. 2009] e [Majdoul et al. 2015], mostrando similaridade de valores, ao contrário do valor de (*n*) obtido por [Laudani et al. 2014]. Os valores deste trabalho dispostos na Tabela 2 são a médias das 10 vezes que o algoritmo foi executado.

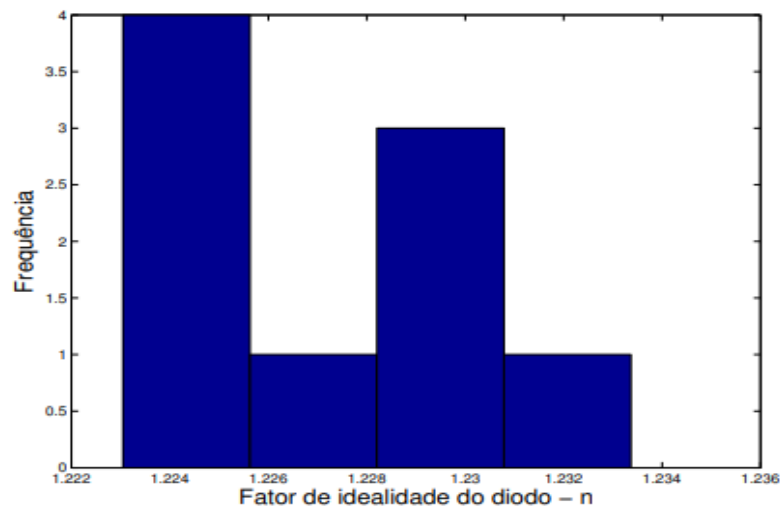
Tabela 2. Comparação dos parâmetros obtidos neste trabalho com outros obtidos na literatura

| Trabalhos                   | RMSE                  | <i>n</i> | <i>R<sub>s</sub></i> (Ω) | <i>R<sub>sh</sub></i> (Ω) | <i>I<sub>0</sub></i> (μA) | <i>I<sub>irr</sub></i> (A) |
|-----------------------------|-----------------------|----------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|
| Algoritmo Genético Proposto | $9,74 \cdot 10^{-2}$  | 1,2275   | 0,1477                   | 92,2464                   | 32.1221                   | 8,2231                     |
| [Laudani et al. 2014]       | $9,77 \cdot 10^{-2}$  | 1,1145   | 0,1578                   | 72,05                     | 4,4279                    | 8,2280                     |
| [Cubas et al. 2014]         | $25,01 \cdot 10^{-2}$ | 1,3000   | 0,2309                   | 594,63                    | 96,930                    | 8,2132                     |
| [Villalva et al. 2009]      | $21,77 \cdot 10^{-2}$ | 1,3000   | 0,2300                   | 566,90                    | 97,561                    | 8,2135                     |
| [Majdoul et al. 2015]       | $21,17 \cdot 10^{-2}$ | 1,3000   | 0,2310                   | 598,00                    | 96,896                    | 8,2100                     |

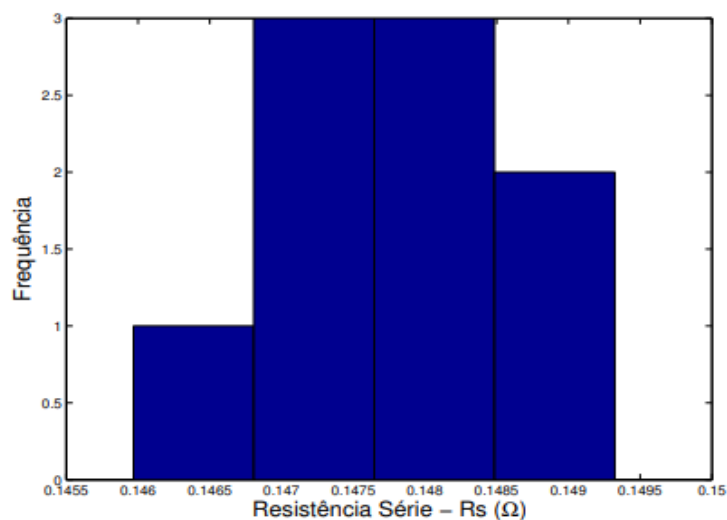
As Figuras 5a e 5b apresentam os histogramas dos valores do fator de idealidade do diodo (*n*) e da resistência série (*Rs*) para as 10 execuções do algoritmo. O histograma mostra que os valores obtidos para estes dois parâmetros estão concentrados próximos da média (apresentada na Tabela 2), confirmando que o desvio padrão é realmente pequeno, na ordem de  $10^{-3}$  como foi mostrado na Tabela 1. Para mostrar a eficiência do algoritmo

genético proposto, plotou-se os valores do *RMSE* a cada iteração, e esta foi comparada com o menor erro obtido da literatura, isto é, o erro foi comparado com o trabalho [Laudani et al. 2014]. Analisando a Figura 6, é possível perceber que o *RMSE* obtido com a aplicação proposta de algoritmo genético tende a ser menor em todas as gerações. Adotou-se a escala logarítmica nos dois eixos a fim de fornecer melhor visualização do gráfico. Utilizando os parâmetros obtidos neste trabalho, apresentados na Tabela 2, plotouse a curva de corrente e tensão utilizando a Equação 1. Essa curva característica é mostrada na Figura 7. Os pontos em círculo foram extraídos do datasheet, a curva tracejada é a curva estimada por [Laudani et al. 2014] e a contínua é a curva proposta por este trabalho, obtida por meio da Equação 1.

Figura 5. Histogramas do fator de idealidade do diodo ( $n$ ) e da resistência série ( $R_s$ )



(a) Histograma do fator de idealidade do diodo ( $n$ )



(b) Histograma da resistência série ( $R_s$ )

Figura 6. Comparação da convergência do *RMSE*

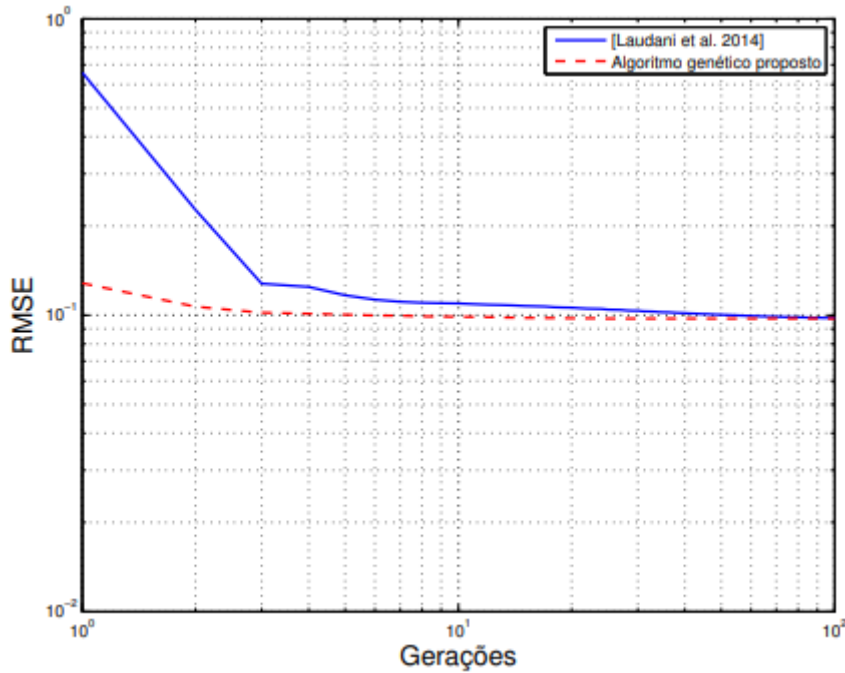
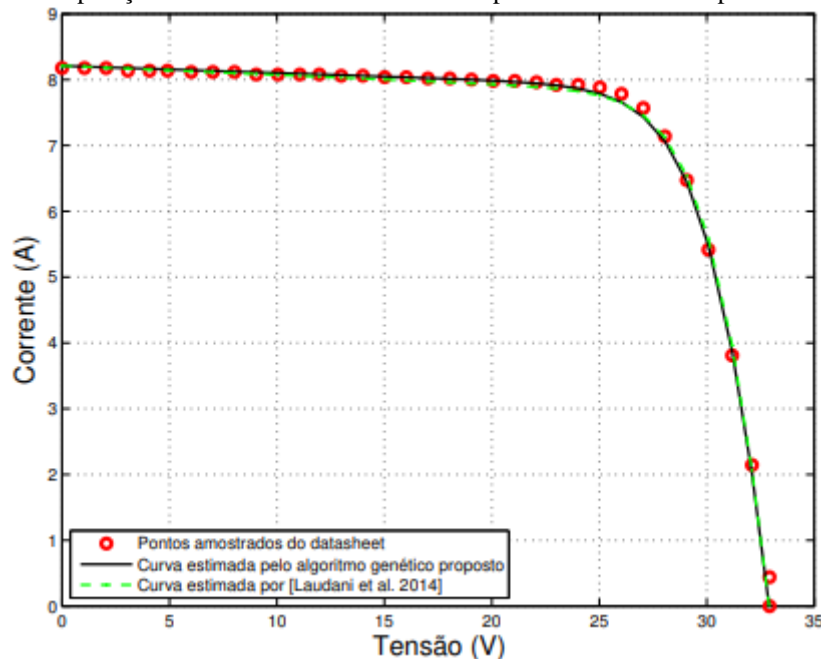


Figura 7. Comparação da Curva calculada de Tensão por Corrente com os pontos amostrados



#### 4 CONCLUSÃO

Neste artigo foi proposta a aplicação de um algoritmo genético para realizar a busca dos parâmetros fator de idealidade do diodo ( $n$ ) e resistência série ( $R_s$ ) de um painel fotovoltaico. Para avaliar o algoritmo proposto, utilizou-se como métrica a raiz quadrada do erro quadrático médio. Foi mostrado que o desempenho do algoritmo deste trabalho se mostrou superior a outros comparados na literatura, tanto no quesito convergência

quanto no valor final. O algoritmo proposto se mostrou estável e tendendo, na média, para um mesmo valor de erro. Os valores de  $n$  e  $RS$  obtidos foram comparados com os de outros trabalhos, e se mostraram coerentes. Como trabalhos futuros, pretende-se testar outro método de seleção de pais no algoritmo genético, como por exemplo o da roleta viciada. Pretende-se ainda: comparar os resultados do algoritmo genético proposto com os de outros algoritmos evolutivos, como o algoritmo firefly; e utilizar outras equações analíticas para o cálculo dos três parâmetros,  $Gsh$ ,  $I0$  e  $Iirr$ .

### **AGRADECIMENTOS**

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), à Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC-UFG), e ao Projeto Prioritário de Eficiência Energética e Estratégico de P&D: "Eficiência Energética e Minigeração na Universidade Federal de Goiás - UFG".

## REFERENCIAS

Aramizu, J. (2010). Modelagem e Análise de Desempenho de um Sistema Fotovoltaico em Operação Isolada e em Paralelo com uma Rede de Distribuição de Energia Elétrica. USP, São Paulo.

Askarzadeh, A. and Rezaadeh, A. (2013). Artificial bee swarm optimization algorithm for parameters identification of solar cell models. *Applied Energy*, 102(Supplement C):943 – 949. Special Issue on Advances in sustainable biofuel production and use - XIX International Symposium on Alcohol Fuels - ISAF.

Cubas, J., Pindado, S., and Victoria, M. (2014). On the analytical approach for modeling photovoltaic systems behavior. *Journal of Power Sources*, 247(Supplement C):467 – 474.

da Costa, W. T. (2010). Modelagem, estimação de parâmetros e método MPPT para módulos fotovoltaicos. UFES, Vitória.

de Blas, M., Torres, J., Prieto, E., and Garcı, A. (2002). Selecting a suitable model for characterizing photovoltaic devices. *Renewable Energy*, 25(3):371 – 380.

El-Naggar, K., AlRashidi, M., AlHajri, M., and Al-Othman, A. (2012). Simulated annealing algorithm for photovoltaic parameters identification. *Solar Energy*, 86(1):266 – 274.

Holland, J. H. (1992). *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*. The MIT Press.

Laudani, A., Fulginei, F. R., and Salvini, A. (2014). High performing extraction procedure for the one-diode model of a photovoltaic panel from experimental *i-v* curves by using reduced forms. *Solar Energy*, 103:316 – 326.

Linden, R. (2006). *Algoritmos Genéticos (2a edição)*. BRASPORT.

Majdoul, R., Abdelmounim, E., Aboufatah, M., Touati, A. W., Moutabir, A., and Abouloifa, A. (2015). Combined analytical and numerical approach to determine the four parameters of the photovoltaic cells models. In 2015 International Conference on Electrical and Information Technologies (ICEIT), pages 263–268.

Martinuzzi, R. K. and Roos, C. (2020). Photovoltaic system applied in a medium-sized industry in brazil: economic analysis. *Brazilian Journal of Development*, 6(11):84986–85000.

Villalva, M. G., Gazoli, J. R., and Filho, E. R. (2009). Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24(5):1198–1208.

Yang, X.-S. (2008). *Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms*. Luniver Press.