

ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS UTILIZANDO O ALGORITMO *FIREFLY* COM ATUALIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA IRRADIÂNCIA E TEMPERATURA

Gilberto Lopes Filho – gilbertofilho93@gmail.com

Ricardo Augusto Pereira Franco – ricardofranco3@gmail.com

Flávio Henrique Teles Vieira – flavio_vieira@ufg.br

Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação

Resumo. Este artigo propõe um método adaptativo de estimação de parâmetros de painéis fotovoltaicos. A atualização dos valores dos parâmetros é realizada em função das condições ambientais (irradiância e temperatura) em que os painéis estão submetidos. O circuito elétrico equivalente utilizado para descrever o painel solar é o modelo de um diodo. Inicialmente, utiliza-se o Algoritmo Firefly para realizar a estimação dos parâmetros nas Condições Padrões de Teste. Em seguida, os valores estimados são corrigidos de acordo com os valores de irradiância e temperatura reais variantes no tempo. Por fim, calcula-se a potência gerada com os parâmetros atualizados comparando-a com a potência gerada pelos parâmetros nas Condições Padrões de Teste. Os resultados obtidos da estimação de parâmetros são comparados com outros trabalhos propostos na literatura.

Palavras-chave: Algoritmo Firefly, estimação de parâmetros adaptativo e, painéis fotovoltaicos.

1. INTRODUÇÃO

A energia solar fotovoltaica é uma energia limpa e renovável. O painel fotovoltaico é constituído por células fotovoltaicas e, quando as células são atingidas pelos raios solares, geram o efeito fotovoltaico. A geração de energia solar fotovoltaica está relacionada diretamente com o nível de irradiância incidente no painel fotovoltaico. O Brasil possui altos índices de irradiância solar e, conseqüentemente, possui alto potencial de aproveitamento da energia solar (Villalva *et al.*, 2012).

Os painéis fotovoltaicos são modelados de forma que o circuito elétrico equivalente represente seu comportamento. Contudo, existem alguns parâmetros indeterminados em seus modelos. A estimação de parâmetros é um problema multivariável, não linear, não convexo, com vários mínimos locais e pode ser representado como um problema de minimização (Majdoul *et al.*, 2015) (Laudani *et al.*, 2014). Dessa forma, é necessário utilizar técnicas para realizar a estimação de parâmetros para que eles representem o painel da melhor forma possível.

O Algoritmo *Firefly* (Vaga-lume) é um algoritmo de otimização que se baseia no comportamento dos vaga-lumes. Cada vaga-lume possui um brilho característico que pode atrair outros vaga-lumes. Esse brilho diminui em relação à distância. Assim, um conjunto de vaga-lumes em um determinado ambiente irá se agrupar de acordo com o brilho de cada um e a distância entre eles. Essas características podem ser modeladas para otimizar problemas de minimização/maximização de funções, de tal forma que o brilho represente uma função objetivo (Yang, 2008).

Além disso, a maioria dos trabalhos sobre estimação de parâmetros, realizam na Condição Padrão de Teste (*Standard Test Condition* – STC) (Villalva *et al.*, 2012) (Cubas *et al.*, 2014) (Laudani *et al.*, 2014). A STC é definida para ensaios de módulos fotovoltaicos com irradiância de 1.000 W/m², temperatura de 298 K, velocidade do vento igual à 1,5 m/s e a distribuição espectral padrão para a massa de ar de 1,5. Contudo, os painéis fotovoltaicos não operam segundo a condição ideal (STC). É necessário, portanto, desenvolver métodos que atualizem os parâmetros em função das variações climáticas para analisar a potência real gerada pelo painel fotovoltaico.

Alguns trabalhos realizam a estimação e ajuste dos parâmetros de acordo com a irradiância e temperatura de operação. Em (Attivissimo *et al.*, 2012), é analisada a incerteza da estimação dos parâmetros resistência em série e da resistência em paralelo. O trabalho (Meza e Ortega, 2013) propõe um método de estimação de parâmetros *on-line* de geradores fotovoltaico em função de sua temperatura. Os autores em (Picault *et al.*, 2010) analisam os impactos que as organizações dos *arrays* de módulos fotovoltaicos terão na sua potência gerada em várias condições ambientais. Em (Marion, 2002) é apresentado um método para modelar a curva característica IxV de módulos fotovoltaicos em condições distintas à STC, comparando a diferença da energia acumulada no período de um ano. Os trabalhos mencionados analisam a influência no sistema fotovoltaico de condições ambientais de diversos modos, contudo, eles não realizam uma análise da influência da variação da irradiância e temperatura nos parâmetros estimados. Portanto, se faz necessário desenvolver métodos de estimação de parâmetros que permitam a atualização de seus valores de acordo com os reais níveis de irradiância e temperatura aplicados nos painéis.

O objetivo deste trabalho é apresentar um método de estimação de parâmetros utilizando o Algoritmo *Firefly* e atualizá-los dinamicamente de acordo com as condições ambientais (irradiância e temperatura). E, por fim, analisar a diferença entre a potência gerada com os parâmetros estáticos e com os parâmetros dinâmicos.

Este trabalho está organizado da seguinte maneira: na Seção 2 é abordado o problema da estimação de parâmetros; a Seção 3 apresenta o Algoritmo *Firefly*; a metodologia utilizada é mostrada na Seção 4; a Seção 5 descreve os resultados obtidos; a conclusão do trabalho é apresentada na Seção 6.

2. MODELO DO PAINEL FOTOVOLTAICO

O painel fotovoltaico pode ser representado por um circuito elétrico equivalente. O modelo de um diodo (*Single Diode Model – SDM*) é um dos modelos mais encontrados na literatura (Petrone *et al.*, 2017). Neste modelo é adicionada uma resistência em série, que representa as perdas dos contatos metálicos entre as células, e uma resistência *shunt* (paralelo), que representa as perdas relacionadas às correntes parasitas que circulam no painel fotovoltaico (da Costa, 2010). A Fig. 1 mostra o circuito elétrico equivalente para o modelo SDM.

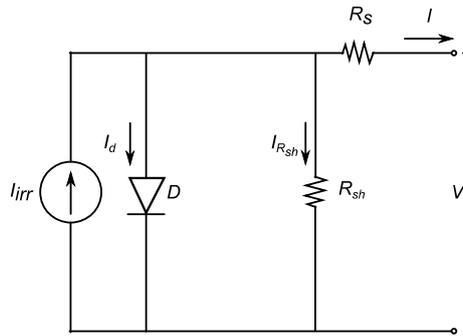


Figura 1- Circuito elétrico equivalente do modelo de um diodo.

O circuito equivalente do modelo SDM é descrito pela seguinte equação:

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

onde I corresponde à corrente gerada pelo painel fotovoltaico (A), I_{irr} corresponde à corrente fotogerada (A), I_d corresponde à corrente do diodo de difusão (A), R_{sh} corresponde à resistência *shunt* do painel fotovoltaico (Ω) e R_s corresponde à resistência em série do painel fotovoltaico (Ω).

A corrente do diodo de difusão é definida pela equação:

$$I_d = I_0 \left[e^{\left(\frac{V+IR_s}{N_s n V_t} \right)} - 1 \right] \quad (2)$$

onde V corresponde à tensão de saída (V), I_0 corresponde à corrente de saturação reversa do diodo de difusão (A), N_s corresponde ao número de células em série que compõem o módulo fotovoltaico, n corresponde ao fator de idealidade do diodo e V_t corresponde à tensão térmica (V).

A tensão térmica é calculada por:

$$V_t = \frac{kT_c}{q} \quad (3)$$

onde k corresponde à constante de Boltzmann ($1,380 \times 10^{-23}$ J/K), q corresponde à carga elementar do elétron ($1,609 \times 10^{-19}$ C) e T_c corresponde à temperatura do módulo (K).

3. ALGORITMO FIREFLY

O Algoritmo *Firefly* foi desenvolvido por (Yang, 2008) e baseia-se na observação da luz de vaga-lumes piscando. Em (Lukasik e Zak, 2008) afirma que os sinais de bioluminescência, processo bioquímico para a produção da luz, dos vaga-lumes têm os seguintes propósitos: servir de ritual de acasalamento; método para atração de presas; ou mesmo como sinal de alerta de predadores próximos. Portanto, os sinais luminosos dos vaga-lumes são de suma importância para a sua sobrevivência. A partir deste comportamento dos vaga-lumes, (Yang, 2008) propôs um algoritmo heurístico de otimização denominado Algoritmo *Firefly*.

Sabe-se que a intensidade de luz diminui com o quadrado da distância (Yang, 2009). Portanto, os vaga-lumes, apesar de atraídos pela luz, tem uma visão limitada da bioluminescência de outros vaga-lumes. A intensidade luminosa $I(r)$ é dada em função da distância r pela Eq. 4.

$$I(r) = I_{fonte} e^{-\gamma r^2} \quad (4)$$

onde I_{fonte} é a intensidade luminosa da fonte, r é a distância da fonte, γ coeficiente de absorção luminosa.

A atratividade de um vaga-lume x_1 por outros vaga-lumes $v_1, v_2, v_3, \dots, v_n$ é proporcional a intensidade luminosa dos vaga-lumes $v_1, v_2, v_3, \dots, v_n$ que o vaga-lume x_1 é capaz de enxergar. Define-se a atratividade β de um vaga-lume por outro de acordo com a equação:

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r^2} \quad (5)$$

onde β_0 é a atratividade em $r = 0$.

Para o cálculo da distância entre dois vaga-lumes quaisquer v_i e v_j , utiliza-se a distância euclidiana em um espaço tridimensional.

A movimentação de um vaga-lume i para mais próximo de um vaga lume j (que possui maior luminosidade) é definida pela equação:

$$p_i = p_i + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (p_j - p_i) + \alpha \epsilon_i \quad (6)$$

onde $p_i = (x_i, y_i, z_i)$ e $p_j = (x_j, y_j, z_j)$ são as coordenadas retangulares dos vaga-lumes v_i e v_j , respectivamente.

O segundo termo da Eq. (6) é relativo a atratividade. O terceiro termo da Eq. (6) refere-se à uma aleatoriedade acrescentada a movimentação, de tal forma que α é um parâmetro da aleatoriedade (peso), e ϵ_i é um vetor de números aleatórios obtidos de uma função de distribuição de probabilidade qualquer, como uma Gaussiana (normal) ou uniforme (Fister, 2013). Se o parâmetro α for igual zero, a movimentação não possui nenhuma aleatoriedade. Por outro lado, se β_0 for igual zero, toda a movimentação é aleatória.

A escolha dos parâmetros do Algoritmo *Firefly* depende do problema a ser otimizado. No entanto, existem algumas sugestões na literatura que se aplicam à maioria dos casos. Sugere-se que $\beta_0 = 1$, $\alpha \in [0, 1]$ e $\gamma \in [0, 1, 10]$.

Pode-se dizer que a função objetivo a ser otimizada é associada à luz intermitente dos vaga-lumes. Para uma simplificação do modelo, três regras foram adotadas: a) presume-se que todos os indivíduos são atraídos por todos, de modo que não haja diferença quanto a sexualidade; b) quanto maior o brilho de um vaga-lume, maior será a sua capacidade de atração, de tal forma que esta decaia com o aumento da distância, devido a absorção de luz pelo meio; c) o brilho de um vaga-lume é afetado pela sua função de avaliação (função objetivo), ou seja, quanto melhor avaliado, maior será o seu brilho. Os vaga-lumes de menor brilho movem-se (são atraídos) para os de maior brilho.

O Algoritmo *Firefly* pode ser sintetizado por meio do fluxograma que descreve suas etapas, conforme Fig. 2.

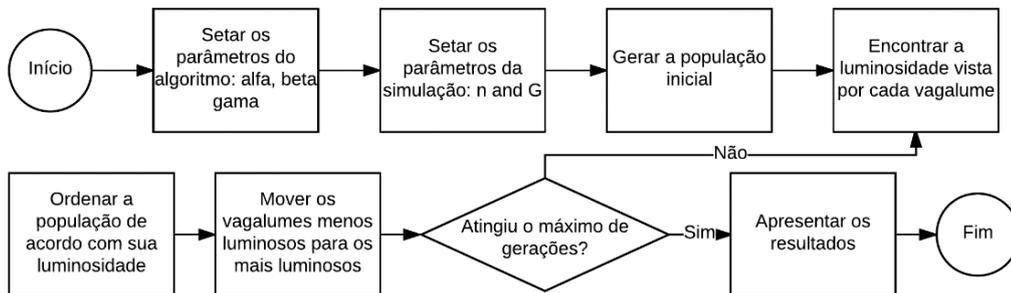


Figura 2- Curvas do fluxo espectral da radiação emitida por um corpo negro em diferentes temperaturas.

4. METODOLOGIA DE ESTIMAÇÃO E ATUALIZAÇÃO DOS PARÂMETROS

4.1 Algoritmo *Firefly* Aplicado à Estimação de Parâmetros

Um painel fotovoltaico é composto por uma certa quantidade de células fotovoltaicas conectadas em série. Um sistema fotovoltaico é formado por uma associação de painéis fotovoltaicos conectados em série e/ou paralelo. O comportamento do painel depende dos materiais utilizados para a produção de suas células fotovoltaicas. Os fornecedores disponibilizam algumas informações sobre o comportamento do painel fotovoltaico em seu *datasheet*. Contudo, existem alguns parâmetros do modelo que não são fornecidos pelo *datasheet*. Assim, os valores desses parâmetros são desconhecidos e, conseqüentemente, deverão ser determinados ou estimados para a modelagem e simulação do painel fotovoltaico.

Foi implementado neste trabalho o Algoritmo *Firefly* a fim de se estimar os parâmetros n e R_s do circuito mostrado na Fig. 1, na STC. Para tal fim, utiliza-se as equações para estimar as variáveis I_0 , I_{irr} e G_{sh} , propostas por (Laudani *et al.*, 2014), que estão em função de n e R_s , onde $G_{sh} = (1/R_{sh})$. Para cada iteração do Algoritmo *Firefly* se estima os dois parâmetros (n e R_s) e, em seguida, os outros três parâmetros (I_0 , I_{irr} e G_{sh}) também são obtidos.

O trabalho (Laudani *et al.*, 2014) propõe equações para estimar alguns parâmetros por meio da manipulação da Eq. (1) no ponto de circuito aberto ($I = 0, V = V_{ca}$), no ponto de curto circuito ($I = I_{sc}, V = 0$), 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 $\left(\frac{dP}{dV}\right)_{V=V_{mp}} = 0$. Gerando, assim, equações para três dos cinco parâmetros a serem estimados. Os valores da corrente de

saturação do diodo (I_0), da corrente fotogerada (I_{irr}) e da condutância em paralelo (G_{sh}) são dados, respectivamente, pelas Eq. (7), (8) e (9).

$$I_0 = \frac{V_{oc}(I_{sc}-I_{mp})-V_{mp}I_{sc}}{A_1 e^{\left(\frac{R_s I_{sc}}{N_s n V_t}\right)} + A_2 e^{\left(\frac{V_{mp}+R_s I_{mp}}{N_s n V_t}\right)} + A_3 e^{\left(\frac{V_{oc}}{N_s n V_t}\right)}} \quad (7)$$

$$I_{irr} = \frac{I_{sc}V_{oc}\left(e^{\left(\frac{V_{mp}+R_s I_{mp}}{N_s n V_t}\right)}-1\right)+I_{sc}V_{mp}\left(1-e^{\left(\frac{V_{oc}}{N_s n V_t}\right)}\right)+I_{mp}V_{oc}\left(1-e^{\left(\frac{R_s I_{sc}}{N_s n V_t}\right)}\right)}{A_1 e^{\left(\frac{R_s I_{sc}}{N_s n V_t}\right)} + A_2 e^{\left(\frac{V_{mp}+R_s I_{mp}}{N_s n V_t}\right)} + A_3 e^{\left(\frac{V_{oc}}{N_s n V_t}\right)}} \quad (8)$$

$$G_{sh} = \frac{(I_{mp}-I_{sc})e^{\left(\frac{V_{oc}}{N_s n V_t}\right)}+e^{\left(\frac{V_{mp}+R_s I_{mp}}{N_s n V_t}\right)}-(I_{mp})e^{\left(\frac{R_s I_{sc}}{N_s n V_t}\right)}}{A_1 e^{\left(\frac{R_s I_{sc}}{N_s n V_t}\right)} + A_2 e^{\left(\frac{V_{mp}+R_s I_{mp}}{N_s n V_t}\right)} + A_3 e^{\left(\frac{V_{oc}}{N_s n V_t}\right)}} \quad (9)$$

onde: $A_1 = (V_{mp} + R_s I_{mp} - V_{oc})$, $A_2 = (V_{oc} - R_s I_{sc})$ e $A_3 = (R_s I_{sc} - R_s I_{mp} - V_{mp})$.

As Eq. (7), (8) e (9) dependem apenas de dois parâmetros do modelo SDM (n e R_s). Reduz-se o número de parâmetros a ser estimado e, conseqüentemente, a complexidade computacional do problema. Neste trabalho, avalia-se o desempenho de técnicas de otimização baseadas em heurísticas, como o Algoritmo Genético e o Algoritmo *Firefly*, para estimar os parâmetros restantes.

Utiliza-se a raiz quadrada do erro quadrático médio normalizado (*RMSE*) como função de avaliação pelo Algoritmo *Firefly*, definido por $RMSE = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (I_s(V) - I_e(V))^2}$, onde $I_s(V)$ corresponde à corrente amostrada pelo *datasheet*, $I_e(V)$ é a corrente estimada por meio do Algoritmo *Firefly* e M corresponde à quantidade de pontos amostrados na curva IxV do *datasheet*.

O *RMSE* foi calculado, então, em relação aos pontos amostrados de corrente e tensão da curva IxV (disponibilizada no *datasheet* do painel fotovoltaico) e a curva IxV traçada com os parâmetros estimados. Isto é, para cada valor do parâmetro n e do parâmetro R_s plota-se uma curva IxV, e o *RMSE* é calculado entre esta curva e os pontos amostrados do *datasheet*. Quanto menor o *RMSE*, mais adequados são os valores estimados para os parâmetros n e R_s , e mais a curva encontrada se aproxima da curva real. Deve-se destacar que a curva IxV do *datasheet* representa o comportamento médio da relação tensão-corrente do modelo do painel fotovoltaico, e cada painel possui uma variação nos parâmetros dentro da tolerância especificada pelo fabricante.

O critério de parada desse algoritmo foi especificado como uma determinada quantidade de gerações. Neste trabalho, adotou-se o número máximo de gerações igual a 100. O parâmetro n pode ser inicializado com qualquer valor do intervalo em que esteja definido, i.e., ($1 \leq n \leq 2$). O parâmetro R_s possui valor próximo de zero, portanto, qualquer valor próximo de zero também é válido.

O algoritmo foi implementado por meio do *software* MATLAB e os resultados foram comparados com quatro trabalhos da literatura (Cubas *et al.*, 2014), (Laudani *et al.*, 2014), (Majdoul *et al.*, 2015) e (Villalva *et al.*, 2009). O painel fotovoltaico escolhido para ser ter os parâmetros estimados foi o painel Kyocera KC200GT.

4.2 Correção dos Parâmetros em Função da Irradiância e da Temperatura

A estimação de parâmetros dos painéis fotovoltaicos geralmente é feita nas condições padrões de teste. No entanto os painéis, quando estão em funcionamento, estão sujeitos às variações ambientais, e com isso não operam na STC. Para se ter uma precisão maior na estimação da energia gerada pelo painel fotovoltaico, é necessário atualizar os valores dos parâmetros. Ou seja, os cinco parâmetros do circuito elétrico que representam o painel fotovoltaico, apresentado na Fig. 1, são atualizados em função da Irradiância (G) e da Temperatura (T). O trabalho de (Picault *et al.*, 2010) propõe um método para correção dos parâmetros conforme as Eq. (10), (11), (12), (13) e (14). É interessante notar que os parâmetros estão diretamente relacionados com a Temperatura e Irradiância.

$$I_{irr}(G, T) = I_{irr, stc} \frac{G}{G_{stc}} [1 + \alpha_i(T - T_{stc})] \quad (10)$$

$$I_0(G, T) = I_{0, stc} \frac{G}{G_{stc}} [1 + \alpha_i(T - T_{stc})] \quad (11)$$

$$n(G, T) = n_{stc} \left[1 + \alpha_v(T - T_{stc}) + \frac{n_{stc} V_t}{V_{oc, stc}} + \ln\left(\frac{G}{G_{stc}}\right) \right] \quad (12)$$

$$R_s(G, T) = R_{s, stc} \left[\frac{1 + \alpha_v(T - T_{stc}) + \frac{n_{stc} V_t}{V_{oc, stc}} + \ln\left(\frac{G}{G_{stc}}\right)}{\frac{G}{G_{stc}} [1 + \alpha_i(T - T_{stc})]} \right] \quad (13)$$

$$R_{sh}(G, T) = R_{sh_{stc}} \left[\frac{1 + \alpha_v(T - T_{stc}) + \frac{n_{stc} V_t}{V_{oc_{stc}}} + \ln\left(\frac{G}{G_{stc}}\right)}{\frac{G}{G_{stc}} [1 + \alpha_i(T - T_{stc})]} \right] \quad (14)$$

onde α_i é o coeficiente de temperatura da corrente de curto-circuito (%/°C), α_v é o coeficiente de temperatura da tensão de circuito aberto (%/°C), T é a Temperatura de operação da célula (°C), T_{STC} é a temperatura da célula nas condições padrões (°C), G é a irradiância que incide sobre o painel (W/m²), G_{STC} é a irradiância nas condições padrões (W/m²).

Neste trabalho foram medidos a temperatura e irradiância no ano de 2016 na cidade de Goiânia - GO, e estas duas séries temporais foram utilizadas para atualizar os parâmetros do painel fotovoltaico.

5. RESULTADOS

Para este trabalho, utilizou-se o painel Kyocera KC200GT. As características deste painel podem ser obtidas por meio de seu *datasheet*, elas são: Máxima Potência = 200 Wp; Tensão de Máxima Potência = 26,3 V; Corrente de Máxima Potência = 7,61 A; Tensão de Circuito Aberto = 32,9 V; Corrente de Curto Circuito = 8,21 A; Número de Células = 54.

Utilizando o Algoritmo *Firefly* para estimar os parâmetros n e R_s nas Eq. 8, 9 e 10, é possível calcular os outros três parâmetros do modelo. As variáveis do Algoritmo *Firefly* foram escolhidas de forma arbitrária. Foram testados 3 valores de aleatoriedade α do algoritmo *Firefly*. A Tab. 1 apresenta os parâmetros utilizados no Algoritmo *Firefly*.

Tabela 1 – Valores dos parâmetros do Algoritmo *Firefly* utilizados.

Parâmetros	Valores
Número de vaga-lumes	20
Número de gerações	100
α	0,2 – 0,5 – 0,8
β	1
γ	5

Como o Algoritmo *Firefly* é um algoritmo heurístico e provê um resultado cada vez que ele é executado, ele foi executado 50 vezes para garantir a confiabilidade na solução obtida. 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*. A Tab. 2 apresenta os valores obtidos dos parâmetros n e R_s , bem como o *RMSE* médio das 50 execuções.

Tabela 2 - Comparação dos parâmetros n , R_s e *RMSE* para três fatores de aleatoriedade diferentes.

Parâmetro	$\alpha = 0,2$	$\alpha = 0,5$	$\alpha = 0,8$
n	1,2266	1,2277	1,2277
R_s	0,1480	0,1477	0,1477
<i>RMSE</i> (médio)	0,097379	0,097367	0,09768

Conforme valores apresentados pela Tab. 2, o algoritmo *Firefly* apresentou menor *RMSE* médio para α igual a 0,5. Assim, neste trabalho, adotou-se os valores dos parâmetros n e R_s obtidos com $\alpha = 0,5$, como os valores nas condições STC.

A fim de se validar os resultados obtidos, estes foram comparados com o de outros trabalhos na literatura. A Tab. 3 apresenta esta comparação. É possível perceber que o algoritmo proposto neste trabalho provê o menor *RMSE* dentre todos os trabalhos registrados 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.

Tabela 3 – Comparação dos resultados obtidos neste trabalho ($\alpha = 0,5$) com outras propostas da literatura (STC).

Trabalhos	<i>RMSE</i>	n	R_s (Ω)	R_{sh} (Ω)	I_0 (10^{-8} A)	I_{irr} (A)
<i>Firefly</i> proposto	$9,736 \cdot 10^{-2}$	1,2277	0,1477	92,31	3,223	8,223
(Laudani <i>et al.</i> , 2014)	$9,760 \cdot 10^{-2}$	1,2645	0,1374	98,08	5,6710	8,2215
(Cubas <i>et al.</i> , 2014)	$25,010 \cdot 10^{-2}$	1,3000	0,2309	594,63	9,6930	8,2132
(Villalva <i>et al.</i> , 2009)	$21,770 \cdot 10^{-2}$	1,3000	0,2300	566,90	9,7561	8,2135
(Majdoul <i>et al.</i> , 2015)	$21,170 \cdot 10^{-2}$	1,3000	0,2310	598,00	9,6896	8,2100

Para mostrar a eficiência do Algoritmo *Firefly* proposto, é apresentado o gráfico da convergência do *RMSE*, na Fig. 3, comparando-o com o menor erro obtido da literatura (Laudani *et al.*, 2014), onde foi utilizado o algoritmo determinístico *Levenberg–Marquadt*. A Fig. 3 apresenta uma comparação do *RMSE* obtido com o Algoritmo *Firefly*, com um Algoritmo Genético e com o Algoritmo *Levenberg–Marquadt* (Gavin, 2017). Observa-se que o erro do Algoritmo *Firefly* tende a ser o menor em todas as gerações. Adotou-se a escala logarítmica no eixo das abscissas a fim de fornecer melhor visualização do gráfico.

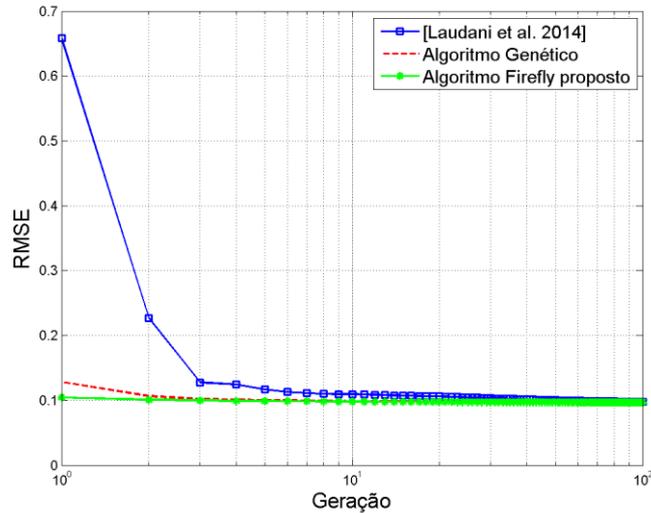


Figura 3 – Comparação da convergência do *RMSE*.

Os parâmetros obtidos pelo Algoritmo *Firefly*, apresentados na Tab. 3, foram nas condições padrões (STC). A partir destes parâmetros, utilizando as Eq. (10), (11), (12), (13) e (14), estes foram corrigidos para qualquer valor de irradiância e temperatura.

A Fig. 4 apresenta a curva característica *IxV*, Eq. 1, do painel KC200GT fixando-se a temperatura em 25°C e variando-se a irradiância. Os pontos em vermelho foram amostrados do *datasheet*, e a curva em verde é a curva *IxV* nas condições padrões deste painel. É possível perceber que diminuindo a irradiância, a corrente elétrica tende a diminuir, enquanto que a tensão fica praticamente a mesma. A Fig. 5 apresenta curva *IxV* fixando a irradiância em 1000 W/m² e variando-se a temperatura. Nota-se que a corrente elétrica fica praticamente inalterada, enquanto que a tensão de circuito aberto decresce a medida que a temperatura aumenta.

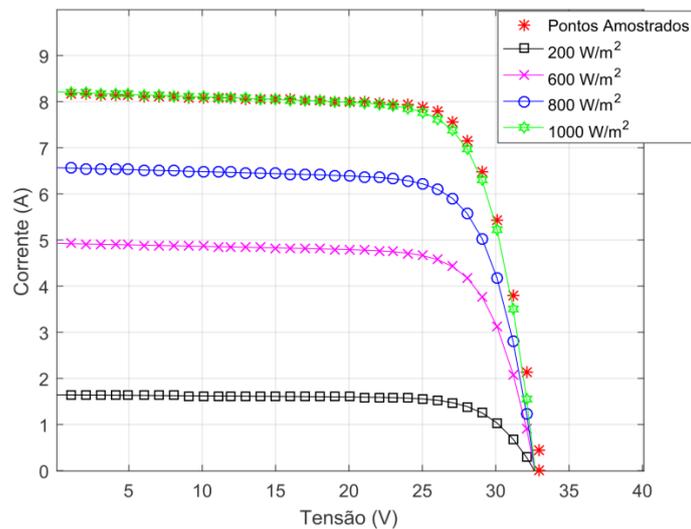


Figura 4 – Comparação da curva característica corrente-tensão variando a irradiância.

Os dados das séries temporais de irradiância e temperatura, apresentados nas Fig. 6 e 7 respectivamente, foram cedidos pelo Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) com o título “Instalação de um Sistema de Geração Solar Fotovoltaica de 34 kWp em telhado de um prédio da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC) Universidade Federal de Goiás (UFG)”, em Goiânia – GO.

Nota-se que nos períodos próximos ao meio do ano, em que ocorre o solstício de inverno, a temperatura e a irradiância são menores, justamente devido a menor incidência solar no Hemisfério Sul nessa época. Por outro lado, nos períodos próximos ao começo e fim do ano, tanto a temperatura quanto a irradiância são maiores, devido à proximidade

do solstício de verão no Hemisfério Sul. No entanto, observa-se que a irradiância sofre mais oscilações, provavelmente devido ao período chuvoso que ocorre normalmente nessa época do ano.

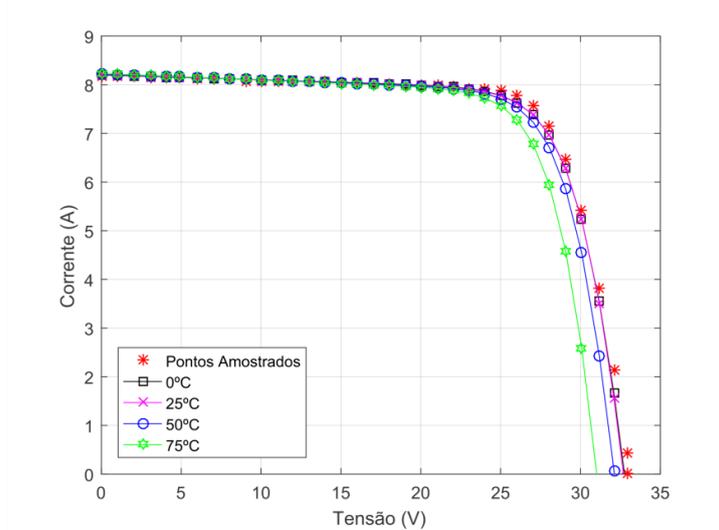


Figura 5 – Comparação da curva característica corrente-tensão variando a temperatura.

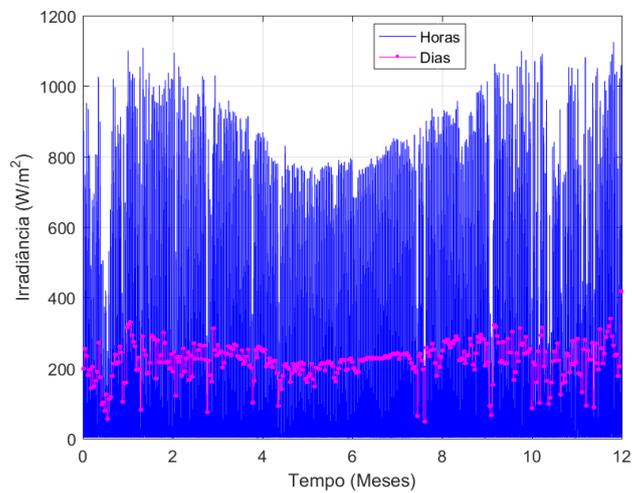


Figura 6 – Valores médios de Irradiância medidos no ano de 2016 em Goiânia – GO.

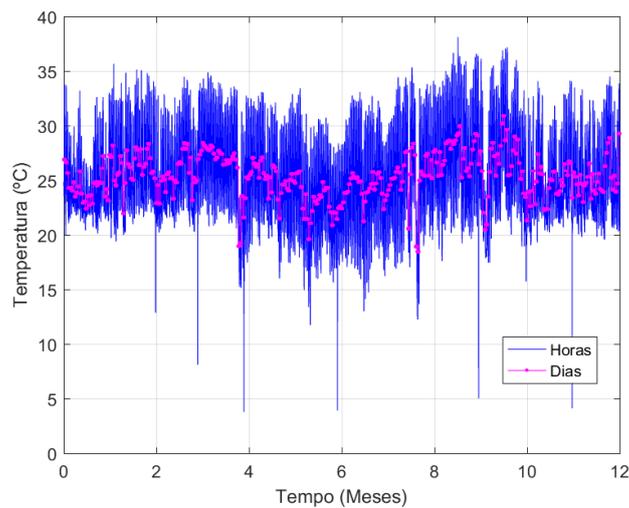


Figura 7 – Valores médios de Temperatura medidos no ano de 2016 em Goiânia – GO.

As Fig. 8 e 9 mostram a variação da tensão, corrente, potência, resistência série e resistência paralela do painel fotovoltaico em função da irradiância incidente, fixando-se a temperatura em 25°C. As Fig. 10 e 11 apresentam os mesmos parâmetros supracitados em função da temperatura, fixando-se a irradiância incidente em 1000 W/m².

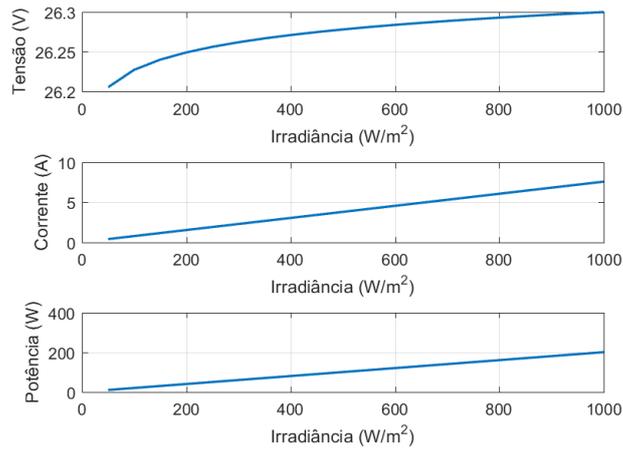


Figura 8 – Comportamento da tensão, corrente e potência do painel fotovoltaico variando-se a irradiância incidente.

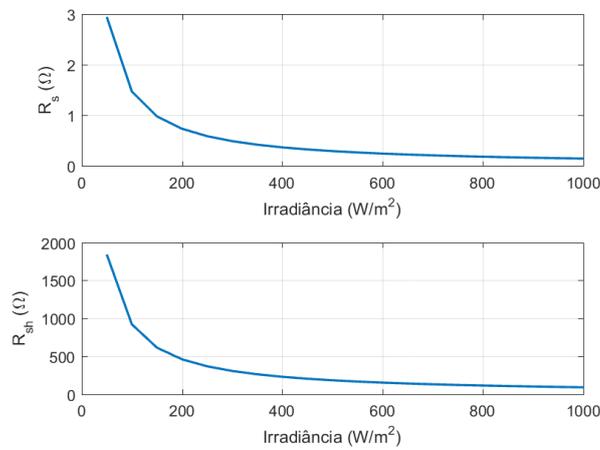


Figura 9 – Comportamento da resistência série (R_s) e resistência paralela (R_{sh}), respectivamente, do painel fotovoltaico variando-se a irradiância incidente.

Observa-se que com o aumento da irradiância, os valores de tensão, corrente e potência do painel aumentam, enquanto que as resistências série e paralela decrescem. Analisando os parâmetros em função da temperatura, observa-se que a tensão elétrica diminui à medida que a temperatura aumenta, conforme esperado, uma vez que o coeficiente térmico α_v é negativo. Por outro lado, a corrente elétrica aumenta com o aumento da temperatura, uma vez que o coeficiente térmico α_i é positivo. Via simulações, verificou-se que os valores das resistências série e paralela decrescem com o aumento da temperatura, o que é condizente com o resultado encontrado por (Sahin, 2016). A potência elétrica tem o seu valor máximo para a temperatura igual a 25°C.

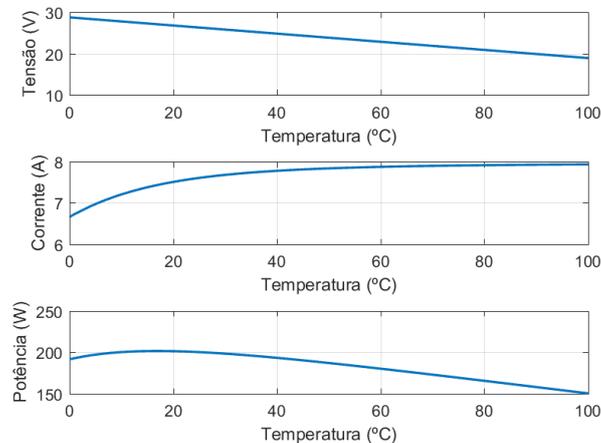


Figura 10 – Comportamento da tensão, corrente e potência do painel fotovoltaico variando-se a temperatura.

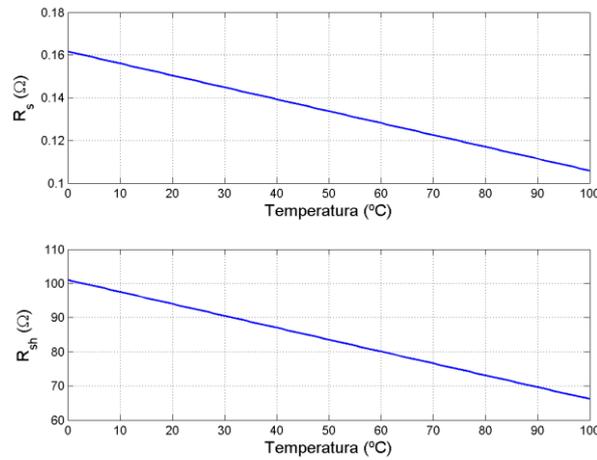


Figura 11 – Comportamento da resistência série (R_s) e resistência paralela (R_{sh}), respectivamente, do painel fotovoltaico variando-se a temperatura.

Para mostrar como a atualização dos parâmetros do painel fotovoltaico, em função da temperatura e irradiância, refletem na potência de saída, foram calculadas as potências médias de saída do painel KC200GT em dois casos. No primeiro caso, considera-se que os parâmetros n , R_s , e R_{sh} são invariantes, de modo que apenas as correntes I_0 e I_{irr} variam com a temperatura e irradiância conforme realizado também em (Salamoni *et al.*, 2003) e (Morcillo-Herrera *et al.*, 2014). No segundo caso, considera-se, ao utilizar o método proposto, que todos os parâmetros do circuito que representa o painel sejam dependentes diretamente da irradiância e temperatura. Os trabalhos de (Singh e Ravindra, 2012) e (Skoplaki and Palyvos, 2009) mostram a dependência da potência elétrica de saída de um painel fotovoltaico em função das condições ambientais, evidenciando a importância de se ajustar os parâmetros do modelo do painel de acordo com a irradiância e temperatura.

A Fig. 12 apresenta a potência média de saída para ambos os casos, e apresenta ainda a diferença de potência entre os dois casos. Os valores de temperatura e irradiância utilizados são os da série temporal de 2016, mostrados anteriormente. Optou-se por plotar o gráfico da potência média diária para uma melhor visualização. Observa-se que há um erro médio próximo de 6 Watts entre a potência com os parâmetros dinâmicos e a potência com os parâmetros estáticos.

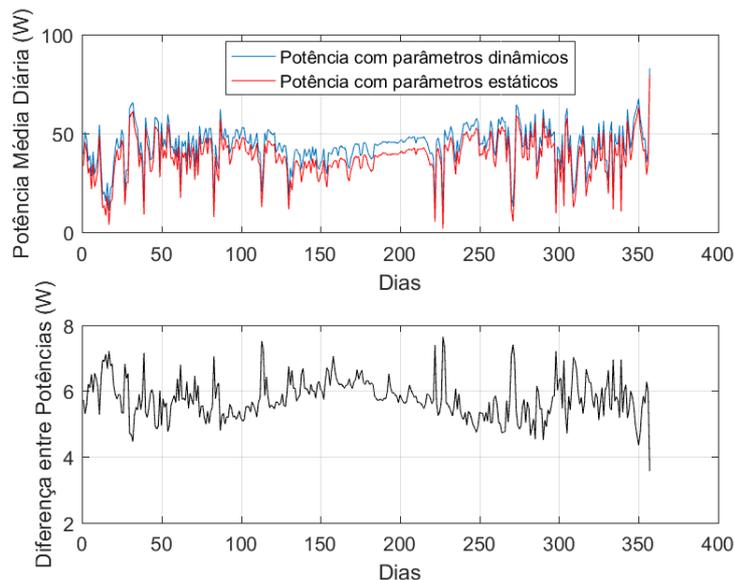


Figura 12 – Potência do painel fotovoltaico considerando os parâmetros estáticos e os parâmetros variando com a Irradiância e Temperatura.

6. CONCLUSÕES

Foi proposto neste trabalho realizar a estimação de parâmetros de painéis fotovoltaicos utilizando o Algoritmo *Firefly*. O Algoritmo *Firefly* realiza a estimação de dois parâmetros utilizando equações oriundas do modelo de um diodo do painel fotovoltaico. A estimação de dois parâmetros do modelo do painel reduz o espaço de busca e diminui a complexidade computacional em comparação aos trabalhos da literatura que propõem estimação de todos os cinco

parâmetros. Os resultados da simulação mostram que o Algoritmo *Firefly* realiza a estimação de parâmetros obtendo o menor erro dentre os trabalhos comparados.

Foi proposto ainda realizar a adaptação dos parâmetros dos painéis fotovoltaicos, estimados nas condições padrões (STC), para diferentes Temperaturas e Irradiâncias. Foi mostrado que a potência média do painel considerando os parâmetros estáticos diverge da potência média considerando os parâmetros dinâmicos.

Como trabalhos futuros pretende-se simular o sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica por meio de inversor, implementando um algoritmo de MPPT. Assim, será possível investigar o comportamento das grandezas elétricas do painel fotovoltaico em função das condições ambientais e da dinâmica da rede elétrica.

REFERÊNCIAS

- Attivissimo, F., Di Nisio A., Savino M., Spadavecchia, M., 2012. Uncertainty Analysis in Photovoltaic Cell Parameter Estimation, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 61, no. 5, pp. 1334-1342.
- Laudani, A., Fulginei, F. R., 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 pp. 316–326
- Cubas, J., Pindado, S., Victoria M., 2014. On the analytical approach for modeling photovoltaic systems behavior, Journal of Power Sources 247, pp. 467-474.
- da Costa, W., Fardin, J., Simonetti, D., Neto, L. V., 2010. Identification of photovoltaic model parameters by differential evolution, Industrial Technology (ICIT), 2010 IEEE International Conference, pp. 931–936.
- Fister, I., Fister Jr., I., Yang, X.S., Brest, J., 2013. A comprehensive review of *Firefly* algorithms. Swarm Evolution Computing.
- Gavin, H. P., 2017. The Levenberg-Marquardt method for nonlinear least squares curve-fitting problems. Department of Civil and Environmental Engineering Duke University.
- Morcillo-Herrera, C., Hernández-Sánchez, F., Flota-Bañuelos, M. Practical Method to Estimate Energy Potential Generated by Photovoltaic Cells: Practice Case at Merida City, In Energy Procedia, Volume 57, 2014, Pages 245-254, ISSN 1876-6102.
- Lukasik, S., Zak, S., 2009. *Firefly* Algorithm for continuous constrained optimization tasks, ICCCI 2009, Lecture Notes in Artificial Intelligence (Eds. N. T. Ngugen, R. Kowalczyk and S.-M. Chen), 5796, pp. 97-106.
- Singh, P., Ravindra, N.M. 2012. Temperature dependence of solar cell performance-an analysis. Solar Energy Mater. Sol. Cells, 101 (2012), pp. 36-45.
- Skoplaki, E., Palyvos, J.A, 2009. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. Solar Energy, 83 (2009), pp. 614-624
- Majdoul, R., Abdelmounim, E., Aboulfatah, M., Touati, A. W., Moutabir, A., Abouloifa, A., 2015. Combined analytical and numerical approach to determine the four parameters of the photovoltaic cells models, 1st International Conference on Electrical and Information Technologies, pp 263-268.
- Petrone, G., Ramos-Paja, C.A. and Spagnuolo, G., 2017. Photovoltaic Sources Modeling, Wiley.
- Picault, D., Raison, B., Bacha, S., de la Casa, J., and Aguilera, J., 2010. Forecasting photovoltaic array power production subject to mismatch losses. Solar Energy, 84 (7), pp. 1301–1309.
- Salamoni, I., Knob, P., Ruther, R. Methodology to Calculate the Potential of Energy Generation in Urban Areas. In: Passive and Low Energy Architecture (PLEA). Santiago do Chile, 2003.
- Yang, X. S., 2008. Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms, Luniver Press.
- Yang, X. S., 2009. *Firefly* algorithms for multimodal optimization, In: Stochastic Algorithms: Foundations and Applications, SAGA 2009, Lecture Notes in Computer Science, 5792, pp. 169 178.
- Meza, C., Ortega R., 2013. On-line estimation of the temperature dependent parameters of photovoltaic generators, IFAC Proceedings Volumes, vol. 46, pp. 653-658.
- Marion, B., 2002. A Method for Modeling the Current–Voltage Curve of a PV Module for Outdoor Conditions. Progress in Photovoltaics: Research and Applications. vol. 10 pp. 205-214.
- Sahin, Gökhan., 2016. Effect of temperature on the series and shunt resistance of a silicon solar cell under frequency modulation. Journal of Basic and Applied Physics 5.1: 21-29.

ESTIMATION OF THE PARAMETERS OF PHOTOVOLTAIC PANELS USING THE *FIREFLY* ALGORITHM UPDATED BY IRRADIANCE AND TEMPERATURE

Abstract. *This paper proposes an adaptive method for the estimation of parameters of photovoltaic panels. The updating of the parameter values is performed according to the environmental conditions (irradiance and temperature) applied to the panels. The equivalent electrical circuit used to model the solar panel is the single diode model. Initially, the Firefly Algorithm is used to perform the parameters estimation in the Standard Test Conditions. Further, the estimated values are updated according to the real irradiance and temperature time series. Finally, the power generated with the updated parameters is calculated and it is compared with the power generated by parameters in the Standard Test Conditions. The results obtained from the parameters estimation are compared with other works proposed in the literature.*

Key words: *Firefly Algorithm, adaptive parameters estimation and photovoltaic panels.*