

INFLUÊNCIA DE PONTOS QUENTES NA CURVA CARACTERÍSTICA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Henrique Silveira Alves Marques (UFS) - henriquemarques.eng@gmail.com

Ézio Soares de Moura (UFS) - eziomoura@academico.ufs.br

José Raymundo De Alcântara Neto (UFS) - alcantara.neto7@gmail.com

Adriano Moraes Silva (UFS) - amoraes.eng@gmail.com

Douglas Bressan Riffel (UFS) - dbr.ufs@gmail.com

Resumo:

A temperatura apresenta uma forte influência no comportamento de um gerador fotovoltaico, sendo o ponto quente um fator que reforça essa influência. Neste trabalho foi realizado um experimento afim de analisar os impactos de ponto quente na curva corrente-tensão I-V e avaliar a influência nos parâmetros elétricos para o modelo de um diodo do módulo fotovoltaico, além de buscar determinar a temperatura eficaz de operação. Os ensaios consistiram na provocação de pontos quentes de 25°C até 75°C com intervalos de 10°C, em módulo de 5W com 36 células ligadas em séries e área do ponto quente equivalente a 4 células, fazendo uso de um sistema de aquecimento e resfriamento controlado por Arduino utilizando-se de pastilha Peltier como atuador do sistema térmico. O experimento foi realizado em condições de sol real e fazendo uso de um sistema de rastreamento solar para garantir que a irradiância fosse sempre perpendicular. As curvas I-V foram obtidas e corrigidas de acordo a norma internacional (IEC-61625, 2005), que determina as condições padrões de testes (STC). Quatro parâmetros do modelo elétrico de um diodo, resistência em série (R_s), resistência em paralelo (R_{sh}), corrente de saturação (I_d) e corrente fotogerada (I_{ph}) foram obtidos através de procedimentos numéricos baseado em algoritmo genético Jaya e o fator de idealidade do diodo (n), foi obtido deterministicamente. Através da análise dos resultados, pôde-se perceber uma boa aderência do algoritmo JAYA apresentando um erro quadrático médio (RMSE) de $2,95 \times 10^{-3}$. Pode-se concluir que uma elevação da temperatura do ponto quente, ocasionou uma redução no valor da (R_{sh}) e conseqüente uma redução no valor da tensão de circuito aberto. O valor da (R_s) acabou influenciando na (I_{ph}) mas de maneira pouco significativa. Além disso, realizou-se um estudo para obter uma temperatura eficaz do módulo, onde a aplicação da média ponderada melhor representou os dados medidos.

Palavras-chave: *Ponto quente; Caracterização curva I-V; Modelo elétrico fotovoltaico.*

Área temática: *Conversão Fotovoltaica*

Subárea temática: *Tecnologias e ensaios de módulos fotovoltaicos*

INFLUÊNCIA DE PONTOS QUENTES NA CURVA CARACTERÍSTICA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Henrique Silveira Alves Marques – henriquemarques.eng@gmail.com
Ézio Soares de Moura – eziomoura@academico.ufs.br
José Raymundo de Alcântara Neto – alcantara.neto7@gmail.com
Adriano Moraes da Silva – amoraes.eng@gmail.com
Universidade Federal de Sergipe, Departamento de Engenharia Elétrica
Douglas Bressan Riffel – dbr.ufs@gmail.com
Universidade Federal de Sergipe, Departamento de Engenharia Mecânica

Resumo. A temperatura apresenta uma forte influência no comportamento de um gerador fotovoltaico, sendo o ponto quente um fator que reforça essa influência. Neste trabalho foi realizado um experimento afim de analisar os impactos de ponto quente na curva corrente-tensão I-V e avaliar a influência nos parâmetros elétricos para o modelo de um diodo do módulo fotovoltaico, além de buscar determinar a temperatura eficaz de operação. Os ensaios consistiram na provocação de pontos quentes de 25°C até 75°C com intervalos de 10°C, em módulo de 5W com 36 células ligadas em séries e área do ponto quente equivalente a 4 células, fazendo uso de um sistema de aquecimento e resfriamento controlado por Arduino utilizando-se de pastilha Peltier como atuador do sistema térmico. O experimento foi realizado em condições de sol real e fazendo uso de um sistema de rastreamento solar para garantir que a irradiância fosse sempre perpendicular. As curvas I-V foram obtidas e corrigidas de acordo a norma internacional (IEC-61625, 2005), que determina as condições padrões de testes (STC). Quatro parâmetros do modelo elétrico de um diodo, resistência em série (R_s), resistência em paralelo (R_{sh}), corrente de saturação (I_a) e corrente fotogerada (I_{ph}) foram obtidos através de procedimentos numéricos baseado em algoritmo genético Jaya e o fator de idealidade do diodo (n), foi obtido deterministicamente. Através da análise dos resultados, pôde-se perceber uma boa aderência do algoritmo JAYA apresentando um erro quadrático médio (RMSE) de $2,95 \times 10^{-3}$. Pode-se concluir que uma elevação da temperatura do ponto quente, ocasionou uma redução no valor da (R_{sh}) e conseqüente uma redução no valor da tensão de circuito aberto. O valor da (R_s) acabou influenciando na (I_{ph}) mas de maneira pouco significativa. Além disso, realizou-se um estudo para obter uma temperatura eficaz do módulo, onde a aplicação da média ponderada melhor representou os dados medidos.

Palavras-chave: Ponto quente; Caracterização curva I-V; Modelo elétrico fotovoltaico.

1. INTRODUÇÃO

A confiabilidade no desempenho de módulos fotovoltaicos tem ganhado destaque na indústria e está diretamente relacionada com a eficiência de células solares. Nesse contexto, falhas provenientes de sombras dinâmicas ou materiais dispostos na superfície do módulo resultam em pontos quentes e não são previsíveis para o processo de conversão elétrica com tecnologia fotovoltaica (Wang; Xuan, 2020; Zhang *et al.*, 2020).

O ponto quente ocorre quando uma célula do módulo fotovoltaico opera com temperatura anormal, esta anomalia degrada os módulos e em eventos extremos podem provocar incêndio inesperado em sistemas fotovoltaicos (Chen *et al.*, 2019). Ainda, Niazi *et al.* (2018) afirmam que casos graves de pontos quente em células solares resultaram em mau funcionamento dos sistemas que alguns casos podem ser irreversíveis, além disso danos no vidro de células tornam-se comuns e impactam negativamente no desempenho de sistema. Destaca-se ainda que pontos quentes em conjuntos de células podem causar a redução da potência na *string* no qual esteja conectada.

Estudos recentes realizados por Zhang *et al.* (2020) analisam através de simulação a invalidação de temperatura de ponto quente distribuição em células solares de silício cristalino micro defeituosas e verificam que pontos quentes ocorre quando a potência térmica é máxima com taxa de sombreamento relativa de 10 e 20%. Em módulos defeituosos quando a potência térmica não é máxima e a taxa de sombreamento é de cerca de 50 e 60%.

Wang e Xuan (2020) através de simulações verificam que o ponto quente em células fotovoltaicas pode atingir condutividade térmica de 372 W/(m.K). Em Dhimish *et al.* (2019) foi desenvolvido um algoritmo para identificação de pontos quentes com precisão quase acima de 80%. Chen *et al.* (2019) apresenta as principais vantagens para a identificação de pontos quentes a partir de simulações e testes com módulos fotovoltaicos.

Nesse sentido, este trabalho tem como propósito investigar a influência do ponto quente nas curvas I-V dos módulos fotovoltaicos, fazendo uso de algoritmo determinístico para modelagem estimação dos parâmetros elétricos representado por um diodo do módulo fotovoltaico e obter qual a temperatura eficaz do módulo fotovoltaico que melhor representa as suas características de geração. É esperado que se possa observar a modificação dos principais parâmetros à medida em que se varia a temperatura e responder ao questionamento de qual a temperatura que estava operando o módulo no momento do experimento? Ou seja, a temperatura média, a do centro do módulo, do ponto quente ou outra temperatura que melhor represente a temperatura de operação do módulo? Serão apresentadas como resultados a estes

questionamentos. Para isso, foi montado um sistema com traçador de curva e módulo fotovoltaico, onde se criou um ponto de aquecimento no módulo, enquanto o traçador fazia o registro das mudanças.

2. CARACTERIZAÇÃO, INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E MODELO DO GERADOR FOTOVOLTAICO

O funcionamento de um módulo fotovoltaico pode ser estudado observando a curva que relaciona a corrente com a tensão com à saída do mesmo. Esta curva é conhecida como a característica I-V (corrente – tensão) e apresenta a mesma forma geral para qualquer painel fotovoltaico. A determinação desta curva, segundo a *International Electrotechnical Commission* - (IEC-60891, 2009), deve ser realizada dentro de condições específicas e constantes de temperatura e irradiância, denominada condição padrão de ensaio, *Standard Test Conditions* (STC) de ($G = 1000 \text{ W/m}^2$, $AM = 1,5$ e $T = 25^\circ\text{C}$). Sendo (G) a intensidade de irradiância, (AM) o coeficiente de massa de ar que caracteriza o espectro solar e (T) a temperatura dentro da célula.

A temperatura apresenta uma forte influência no comportamento de um gerador fotovoltaico. Com o aumento desta, ocorre a diminuição da tensão de circuito aberto (V_{oc}) e o aumento da corrente de curto-circuito (I_{sc}), afetando, conseqüentemente, a máxima potência do módulo e sua eficiência. Posto isso, a Figura 1b) ilustra a curva I-V para diversas temperaturas de célula de silício cristalino, deixando evidente que há uma queda de tensão importante com o aumento da temperatura da célula. E a Figura 1a) apresenta a influência da irradiância sobre a curva I-V.

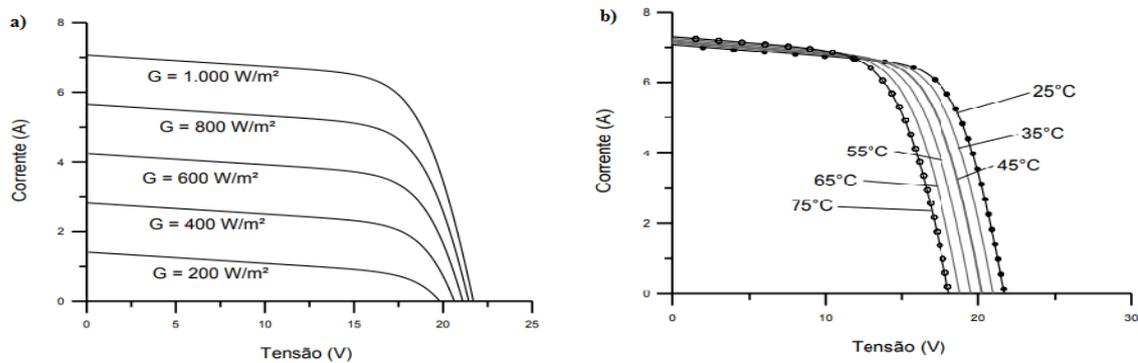


Figura 1 – a) Efeito causado pela variação da irradiância solar à 25°C . b) Efeito causado pela variação da temperatura das células sob irradiância de 1000 W/m^2 . Fonte: (Pinho; Galdino, 2014)

O coeficiente de variação da corrente de curto-circuito com a temperatura é denominado (α). Este coeficiente é positivo e expressa a variação da corrente de curto-circuito (I_{sc}) para uma variação de temperatura de célula (ΔT) (Pinho; Galdino, 2014).

Já o coeficiente de variação da tensão de circuito aberto (β) é negativo e segundo Pinho e Galdino (2014), para os módulos de silício cristalino (*c-Si*), um valor típico é de $-0,37\%/^\circ\text{C}$, enquanto que para os de silício amorfo (*a-Si*) é de $-0,32\%/^\circ\text{C}$.

2.1 Modelo Elétrico do gerador fotovoltaico

A representação do comportamento de uma célula fotovoltaica através de circuitos elétricos equivalentes tem se tornado um hábito bastante comum no estudo e determinação dos parâmetros desta tecnologia. O modelo de um diodo e 5 parâmetros tem sido amplamente utilizado, devido a sua simplicidade e precisão (Yu *et al.*, 2017), de onde é possível obter a característica I-V do painel em determinadas circunstâncias, o modelo elétrico para um diodo é apresentado na Figura 2.

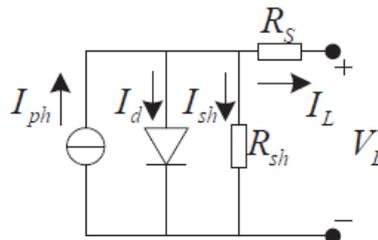


Figura 2 – Circuito equivalente modelo 1 diodo, padrão para a descrição eléctrica de células e módulos fotovoltaicos. Fonte: (Yu *et al.*, 2017)

De um modo ideal, a célula poderia ser apenas representada pela fonte de corrente (I_{ph}) em paralelo com um diodo ideal, onde (I_{ph}) representa a corrente elétrica que é gerada na célula sob a presença de luz quando a mesma é ligada a um condutor externo. Na ausência de luz, a célula comporta-se como um diodo, não produzindo qualquer tensão ou corrente.

Mas, dado ao comportamento não ideal da célula, acresce-se ao modelo a resistência em série (R_s), representando as perdas nos contatos, e a resistência paralelo (R_{sh}), *shunt resistance*, que representa a existência de correntes de fuga. Os 5 parâmetros a determinar para o modelo apresentado são as duas resistências, (R_s) e (R_{sh}), o fator de idealidade do diodo (n), a corrente (I_{ph}) e a corrente inversa de saturação do diodo (I_d).

A corrente de saída (I_L) pode ser calculada da seguinte forma Eq. (1):

$$I_L = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (1)$$

$$I_d = I_{sh} \left[\exp \left(\frac{q(V_L + R_s I_L)}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (2)$$

$$I_{sh} = \frac{V_L + R_s I_L}{R_{sh}} \quad (3)$$

Onde, (I_{ph}) é a corrente total fotogerada pela célula solar, (I_d) representa a corrente reversa do diodo calculada por Shockley, através da Eq. (2) e (I_{sh}) é a corrente em paralelo calculado pela Eq. (3). A resistência em série e a resistência em paralelo são respectivamente (R_s) e (R_{sh}), (V_L) é a tensão de saída da célula, e (n) é o fator idealidade do diodo. Além dos termos: (k) que é a constante de Boltzmann ($1,38064852 \times 10^{-23}$ J/K); (q) é a carga do elétron ($1,60217662 \times 10^{-19}$ C); e (T) é a temperatura absoluta em Kelvin ($T = 273,15$ K + Temperatura da célula).

A identificação de parâmetros dos modelos fotovoltaicos é geralmente convertida em um problema de otimização, no qual o objetivo é minimizar diferença entre os dados experimentais e os dados simulados através dos parâmetros estimados (Yu *et al.*, 2017). Desta forma, a função objetivo a ser minimizada para o modelo de um diodo é apresentada na Eq. (4).

$$\begin{cases} f_k(V_L, I_L, X) = I_{ph} - I_d \left[\exp \left(\frac{q(V_L + R_s I_L)}{nkT} \right) - 1 \right] - \frac{V_L + R_s I_L}{R_{sh}} - I_L \\ x = \{I_{ph}, I_d, R_s, R_{sh}, n\} \end{cases} \quad (4)$$

Neste estudo, a raiz do erro médio quadrático ou, *Root Mean Square Error (RMSE)* definido pela Eq. (5) é usada como função objetiva para quantificar a diferença geral entre os dados atuais experimentais e simulados. Desta forma, deve-se minimizar a função objetiva $RMSE(x)$ pesquisando o vetor de solução x dentro do intervalo especificado.

$$RMSE(x) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N f_k(V_L, I_L, x)^2} \quad (5)$$

Onde (x) é o vetor da solução que consiste em parâmetros desconhecidos, (N) é o número de dados experimentais.

3. MATERIAS E MÉTODOS

A investigação da influência de ponto quente em curvas I-V e obtenção da temperatura eficaz do módulo foram realizadas em um módulo fabricado por Komares® Solar, modelo KM(P)5, com 36 células ligadas em séries e parâmetros técnicos conforme descrito na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros elétricos e especificações do módulo fotovoltaico.

Modelo	KM(P)5	
Máxima Potência	$P_{max}(W)$	5W
Tolerância	%	±5%
Tensão de Máxima Potência	$V_m(V)$	17,56V
Corrente de Máxima Potência	$I_m(A)$	0,284A
Tensão de Circuito Aberto	$V_{oc}(V)$	21,52V
Corrente de Curto Circuito	$I_{sc}(A)$	0,31A
Eficiência da Célula	%	12,63
Eficiência do Módulo	%	8,49
Número de Células	Pcs	36
Tipo de Célula	Silício Policristalino	
Coefficiente de Temperatura I_{sc} (α_{rel})	%/°C	+0,05
Coefficiente de Temperatura V_{oc} (β_{rel})	%/°C	-0,34
Coefficiente de Temperatura da Potência (γ)	%/°C	-0,5

Fonte: (Komares®, 2019)

Os ensaios foram realizados na cidade de Aracaju-SE nos meses de outubro e novembro de 2019, nas condições de sol real. Nesta etapa, para não só garantir que a orientação do módulo em relação ao sol fosse sempre a mesma durante o período de realizações das medições e como também que a massa de ar (AM) não se modificasse, foi utilizado um sistema de rastreador solar de dois eixos, um para elevação e outro para angulação azimute, desenvolvido por Santos (2019), e aprimorado para atender as necessidades do experimento. Esse sistema foi utilizado a fim de otimizar a captação da radiação direta incidente, através de ajustes dos ângulos de inclinação durante as mudanças sazonais e movimentação do sol. Rastreadores são mecanismos eletromecânicos com capacidade de se manterem orientados para o sol ao longo do dia independente da época do ano, este fato contribui de forma significativa para a melhora do desempenho na conversão de energia, tal como com a melhoria da eficiência energética (Kottas; Boutalis; Karlis, 2006; Masih *et al.*, 2019).

Para simular o ponto quente foi utilizado uma pastilha Peltier, dispositivo composto de semicondutores do tipo $p-n$ capazes de produzir calor tendo como base uma fonte de energia. Quando uma corrente contínua passa pelos os pares dos elementos $p-n$, os mesmos são unidos e consequentemente ocorrerá excesso ou deficiência de energia térmica a depender do volume de corrente (Chen *et al.*, 2003). Nesse sentido, a tecnologia Peltier liberou excesso de energia na treliça da junção, provocando o ponto quente presente no módulo.

O ponto quente foi produzido no canto superior esquerdo em uma área equivalente a 4 células fotovoltaicas das 36 que compõe o módulo, e a fim de se obter valores desejáveis de temperatura para o elemento Peltier, foi implementado o Controlador Proporcional Integral Derivativo (PID), com o auxílio do Arduino® Mega 2560. Foi utilizado um circuito de ponte H, alimentado por 12V recebendo um sinal *Pulse Width Modulation* (PWM) do Arduino® que controla o valor médio de tensão entregue à Peltier de modo a atingir os valores de temperatura desejado (*Setpoint*).

Na sequência, foram obtidas experimentalmente as curvas característica I-V do módulo fotovoltaico com o auxílio do traçador de curva de carga PV-KLA 4.4® do fabricante *Mencke & Tegtmeyer GmbH*. Foram realizadas cerca de 400 medições com o sistema de ponto quente desligado, com a finalidade de se obter parâmetros de ajustes e correções para o STC. Na obtenção das curvas de ponto quente, foram estabelecidos *setpoints* de temperatura entre 25°C até 75°C com intervalos de 5°C entre cada, tomando 5 medições com irradiâncias próximas a 1000W/m², para que houvessem menor dependência da variação da irradiância no momento das correções das curvas para cada valor de *setpoint* de temperatura.

As medições em condição de sol real ficam sujeitas a diversas variações que não são controláveis, mesmo com uso do sistema de rastreamento, tais como irradiância e temperatura. Desta forma, a *International Electrotechnical Commission* (IEC) determina que os ensaios realizados em módulos fotovoltaicos devem estar sujeitos a radiação de 1000 W/m² e temperatura de 25° Celsius e massa de ar de 1.5 (IEC-61625, 2005), entretanto, o experimento não obedece a esses valores, precisando de correções em suas medidas. Posto isso, utilizou-se o procedimento 2 estabelecido na norma IEC-60891 (2009) que determina os procedimentos para correção de temperatura e irradiância da curva I-V.

O procedimento é baseado no modelo simplificado de um diodo, com equações de correção da curva I-V em diferentes condições de temperatura e irradiância, considerando os coeficientes de temperatura para corrente de curto-circuito (α) e tensão de circuito aberto (β), além do fator de correção da curva (κ'), o fator de correção de irradiância para a tensão de circuito aberto (a), que tem relação com a tensão térmica da junção $p-n$ no diodo e com o número de células conectadas em série no módulo (N_s), e a resistência em série interna ($R's$) do módulo utilizado em teste.

Os coeficientes α e β foram obtidos através dos dados do fabricante, conforme apresentado na Tabela 1, já os coeficientes (k' , a e $R's$), foram calculados conforme estabelece o capítulo 4 procedimento 2 da norma IEC-60891, no qual é estabelecido que para a determinação de ($R's$) e (a), deve-se obter ao menos 03 curvas com temperaturas constantes ($\pm 2^\circ\text{C}$) e com diferentes irradiâncias cobrindo a faixa de interesse. Após identificar e separar curvas sobre essas condições, foram fixados os valores de ($R's$) = 0 e (a) = 0, e transladadas as curvas para a de maior irradiância, fazendo uso das Eq. 6 e Eq. 7. Em seguida o valor de a é incrementado até o momento que todas as tensões de circuito aberto coincidam entre si em um limite de $\pm 0,5\%$ ou melhor. Atendido este critério, foi fixado o valor de (a) encontrado, e incrementado ($R's$) até o ponto de máxima potência coincidir entre si em $\pm 0,5\%$ ou melhor. Para a determinação do coeficiente (k'), foram selecionadas ao menos 3 curvas com temperaturas diferentes, cobrindo a faixa de interesse, e com uma irradiância constante ($\pm 1\%$) da faixa de interesse (1000W/m²). Em seguida, foram transladadas as curvas para a curva de menor temperatura com ($k' = 0$) fazendo uso da Eq. 7, e posteriormente foi incrementado o valor de (k') até que o ponto de máxima potência entre as curvas coincidissem em $\pm 0,5\%$ ou melhor.

$$I_2 = I_1 \left(1 + \alpha_{Rel} (T_2 - T_1) \right) \frac{G_2}{G_1} \quad (6)$$

$$V_2 = V_1 + V_{oc1} \left(\beta_{Rel} (T_2 - T_1) + \alpha \ln \left(\frac{G_2}{G_1} \right) \right) - R's (I_2 - I_1) - k' I_2 (T_2 - T_1) \quad (7)$$

Onde I_2 , V_2 , T_2 e G_2 , representam corrente, tensão, temperatura e irradiância para qual se deseja corrigir e obter os novos valores. Enquanto que os valores I_1 , V_1 , T_1 e G_1 representam os valores das respectivas grandezas obtidos experimentalmente no momento da medição. V_{oc1} representa a tensão de circuito aberto na condição de teste, α_{Rel} e β_{Rel} são os coeficientes relativos de temperatura de corrente e tensão do corpo de prova medido a 1000 W/m². Eles estão relacionados à corrente de curto-circuito e tensão de circuito aberto no STC, respectivamente. Após obtidos todos os coeficientes presentes nas Eq. 6 e Eq. 7, pôde-se transladar todos os pontos das curvas selecionadas para realização da análise de ponto quente, obtendo as curvas I-V corrigidas em condições padrões de teste (STC), sendo assim possível observar a influência do ponto quente.

Para avaliar o comportamento de operação do módulo fotovoltaico foram extraídos os parâmetros do modelo de um diodo utilizando o algoritmo de otimização heurístico *JAYA* cujo o objetivo é a minimização do *RMSE* entre os valores medidos e estimados através do modelo. Este algoritmo proposto por Venkata Rao (2016) é um poderoso recurso que busca ajustar a tendência de maior aproximação para melhor solução, tal como evitar soluções indesejadas em diferentes estágios de análise. Além disso é consolidado na literatura como uma alternativa promissora às técnicas determinísticas de estimação de parâmetros de módulo fotovoltaicos (Huang *et al.*, 2018; Kumar *et al.*, 2017; Mishra; Ray, 2016; Yu *et al.*, 2017, 2019). Assim sendo, foi implementado para estimar quatro parâmetros elétricos, (R_s), (R_{sh}), (I_{ph}) e (I_d), para a representação do modelo de um diodo, dada sua curva I-V em determinadas condições de temperatura e irradiância

Dentre os 5 parâmetros a serem estimados, o índice de idealidade (n) do diodo, foi calculado usando-se uma técnica determinística, tendo em vista a sua invariabilidade para diferentes condições de teste (De Soto; Klein; Beckman, 2006). Desse modo, usando a relação entre a tensão de circuito aberto e irradiância dada pela Eq. 8, conforme procedimento realizado por Hansen (2015), o fator de idealidade pode ser obtido através de uma regressão linear da tensão de circuito aberto com o logaritmo natural da irradiância, considerando-se curvas com diferentes irradiâncias.

$$V_{OC} = V_{OC0} + nV_{th} \ln\left(\frac{E}{E_0}\right) + \beta(T_c - T_0) \quad (8)$$

O algoritmo *JAYA* é um método de otimização estocástico baseado em população. Seus parâmetros de controle da execução são: tamanho da população (*popSize*), o máximo de gerações (*GenMax*), número de repetições da execução do algoritmo (*Runs*) e os limitantes inferiores (*lim_inf*) e superiores (*lim_sup*) de cada parâmetro. O conjunto de parâmetros que melhor representa uma curva IV, será aquele que apresentar o menor *RMSE*. Para cada curva foram utilizados (*popSize* = 20), (*GenMax* = 2500), (*Runs* = 30) e os limites inferiores e limites superiores conforme a Tabela 2.

Tabela 2 – Limitantes dos parâmetros elétricos do modelo de um diodo para implementação no algoritmo *JAYA*.

Parâmetros	(<i>lim_inf</i>)	(<i>lim_sup</i>)
I_{ph} (A)	0	1
I_d (μ A)	0	50
R_s (Ω)	0	10
R_{sh} (Ω)	0	10000
n	1,2119	1,2119

Fonte: Elaborado pelos autores

Conhecendo o fator de idealidade do modelo, o algoritmo *JAYA* é utilizado para estimar os outros 4 parâmetros restantes (I_{ph} , R_s , R_{sh} , I_d). O fluxograma da Figura 3 descreve as etapas a serem executadas pelo algoritmo.

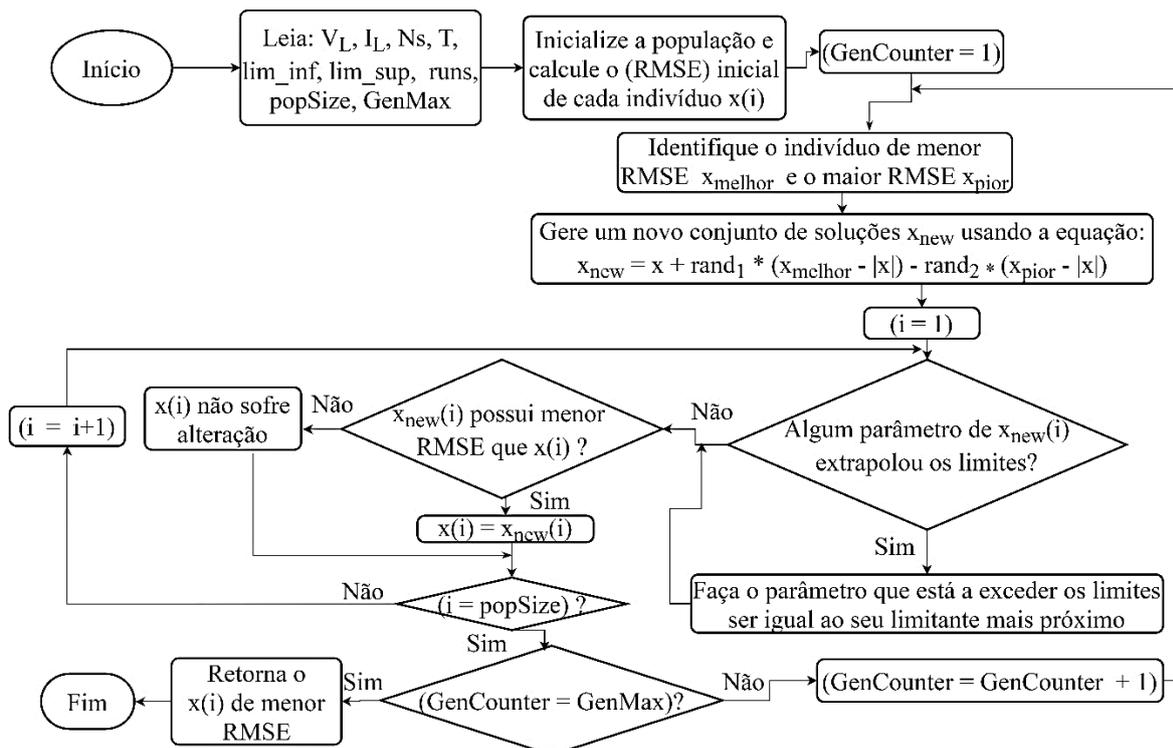


Figura 3 – Fluxograma algoritmo *JAYA* para estimação dos parâmetros elétricos. Fonte: Elaborado pelos autores

Para avaliar a temperatura eficaz de operação do módulo, e obter a temperatura que melhor representasse as curvas medidas para cada situação de ponto quente, foi realizado um procedimento que consistiu em transladar a curva de referência nas condições padrões de teste (STC), fazendo uso das Eq. 6 e Eq. 7, substituindo I_2 , V_2 , T_2 e G_2 , que são os valores objetivos de correção, pelos respectivos valores que foram medidos através das curvas de ponto quente. Assim, o objetivo se tornou transladar os pontos da curva I-V no STC para os valores dos pontos da curva na condição de ponto quente e obter o *RMSE*. Para que esse procedimento pudesse ser aplicado, foi realizada interpolação entre os pontos das curvas transladas e as curvas originais, afim de tornar os pontos correspondentes e realizar a análise do *RMSE*. Após este procedimento, percebeu-se que simplesmente transladar os pontos da curva de referência fazendo uso da temperatura medida em um ponto central do módulo não representava a melhor temperatura de operação do módulo.

Foram então realizados testes na busca de obter a temperatura eficaz do módulo que melhor representasse a temperatura de operação e ao final apresentasse um menor *RMSE* entre os dados calculados e medidos. Foi realizada a transladação fazendo uso da temperatura medida no centro módulo (T_{centro}), da temperatura do ponto quente (T_{PQ}), da diferença logarítmica de temperatura média (*LMTD*) e de uma média ponderada (T_{pond}) da temperatura baseado na quantidade de células submetidas ao ponto quente com relação aos restantes das células do módulo. A (T_{pond}) foi obtida através da Eq. 9.

$$T_{pond} = \frac{N_{sPQ}}{N_s} (T_{PQ}) + \frac{N_s - N_{sPQ}}{N_s} (T_{centro}) \quad (9)$$

Onde (N_s) representa o número de células em série do módulo e (N_{sPQ}) é a quantidade de células em série submetida ao ponto quente durante o experimento.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após o tratamento dos dados conforme definido na metodologia, pôde-se simular a situação de cada curva característica gerada e estimar os parâmetros referentes ao modelo de um diodo. O primeiro elemento a ser calculado após a obtenção das curvas características I-V na condição de STC foi o fator de idealidade (n). Isso deve-se ao fato de após algumas tentativas de obter-se resultados coerentes com o entendimento físico dos parâmetros elétricos do modelo de um diodo, utilizando o algoritmo *JAYA*, pôde-se perceber os parâmetros retornados não eram satisfatórios, pois nesta estimação havia a tendência de se estourar os limites inferiores e superiores, definidos na Tabela 2. Desta forma, ao se calcular o fator de idealidade de forma determinística e mantendo-o constante na execução do algoritmo *JAYA*, os resultados passaram a ser coerentes do ponto de vista físico e deixaram de extrapolar os limites previamente ajustados. Assim, para a regressão utilizada na estimação do valor do fator de idealidade (n), foram utilizadas curvas I-V com um intervalo de irradiância acima de 400W/m² a 1000 W/m², resultando em um fator de idealidade de 1,2119.

Uma análise sobre os impactos do ponto quente nos parâmetros de operação (V_{oc} , I_{sc} , P_{mp}) do módulo fotovoltaico foi realizado. Todas as análises foram realizadas considerando as curvas ajustadas ao STC, ou seja, com temperatura de 25°C e irradiância de 1000W/m². Observando-se o comparativo com da Tabela 3, que traz os pontos de operação do módulo sem o ponto quente, nas condições padrão de teste STC (curva 1), assim como aqueles obtidos ao aplicá-lo, fica evidente sua influência na geração fotovoltaica. Afirma Teixeira (2008) que quando ocorre uma elevação na temperatura, há um leve aumento na corrente de curto-circuito, pois ocorre uma redução do valor do gap de energia do material, tornando mais fácil a geração de pares elétron-buraco por fótons, porém haverá redução na tensão de circuito aberto, pois o valor de (V_{oc}) diminui cerca de 0,4% para cada aumento de um grau Kelvin, uma vez que o valor da tensão de circuito aberto também está relacionado ao valor da energia do gap do semiconductor. Desta forma, pode-se perceber na Tabela 3 que a elevação da temperatura de ponto quente sobre o módulo, fez com que a tensão de circuito aberto descaísse e conseqüentemente houve uma diminuição do ponto de máxima potência. A Figura 4 ilustra as curvas I-V de referência e seis curvas com ponto quente entre 25°C a 75°C variando 10°C entre as curvas.

Tabela 3 - Influência da temperatura de ponto quente sobre os pontos de operação do módulo em condições STC.

Curva	Temp. do ponto quente (°C)	Voc(V)	Isc(A)	Pmp(W)
1	Curva no STC	22,5815	0,3208	5,4772
2	25,0	22,5090	0,3202	5,4597
3	35,0	22,5491	0,3220	5,4556
4	45,0	22,4320	0,3180	5,3755
5	55,0	22,3716	0,3167	5,3229
6	65,0	22,3126	0,3168	5,2763
7	75,0	22,1813	0,3187	5,3085

Fonte: Elaborado pelos autores

Através da Figura 4 e da análise da tabela 3, podemos observar, também, que conforme aponta Costa (2010), a temperatura do módulo possui uma relação não linear com relação a tensão de circuito aberto, que é evidenciado quando

observamos que a tendência que ocorre com a elevação da temperatura do ponto quente é que a tensão de circuito aberto se afaste com passos cada vez maiores da curva de referência, como observado no zoom aplicado na região da tensão de circuito aberto das curvas apresentadas na Figura 4.

Nota-se ainda que os resultados mostrados na Tabela 3 e observados na Figura 4 apresentam semelhança com o apresentado na Figura 1.b), correspondendo ao que é descrito para o comportamento da tensão de circuito aberto com relação a elevação da temperatura. A corrente fotogerada apresentou uma variação pouco significativa em seus valores, permanecendo praticamente estável, não ficando explícito haver uma inversão da relação da temperatura com a corrente fotogerada entre as curvas analisadas no experimento.

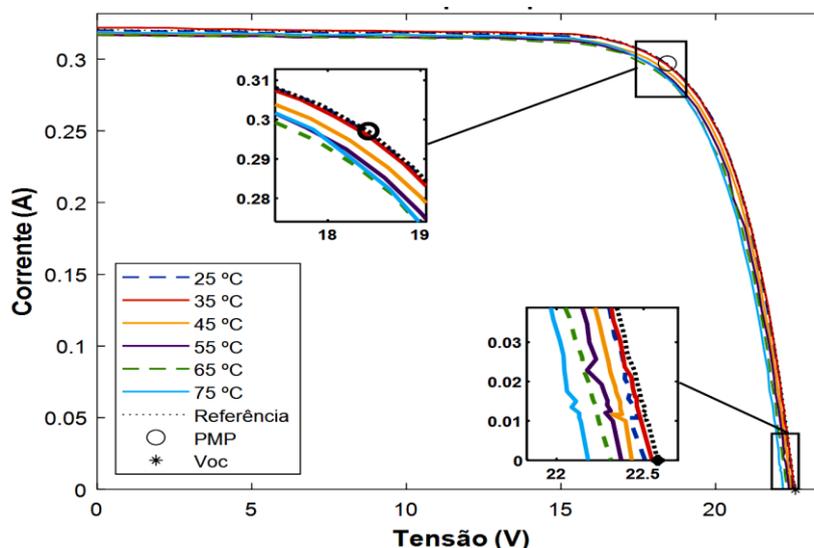


Figura 4: Curva característica I-V estimado para situações de ponto quente em comparação com curva de referência STC e destaque para os pontos de operação V_{oc} e P_{mp} . Fonte: Elaborado pelos autores

Uma outra análise foi realizada, no qual foram estimados os parâmetros elétricos para o modelo de um diodo para cada uma das situações. Desta forma, foram obtidos através do algoritmo JAYA os seguintes parâmetros: (I_{ph}), (I_d), (R_{sh}), (R_s) e $RMSE$. A Tabela 4 mostra os parâmetros estimados para cada uma das situações de ponto quente testada.

Através da análise dos dados apresentados na Tabela 4, pôde-se perceber uma boa aderência da representação do modelo estimado pelo JAYA confirmado quando observamos o $RMSE$, no qual se apresentou entre 0,00211 a 0,00334.

A corrente de saturação no diodo (I_d) apresentou um valor crescente para variações crescente de temperatura, e a medida que se aumentava a temperatura do ponto quente (I_d) apresenta um crescimento não linear conforme aponta a Eq. 2. A (I_{ph}) apresentou uma variação pouco significativa e não mostrou uma tendência quando analisada neste experimento com relação a elevação da temperatura do ponto quente.

Tabela 4 - Valores estimados dos 4 parâmetros, fator de idealidade calculado e $RMSE$ do modelo de um Diodo para os ensaios de ponto quente e curva de referência no STC.

Curva	Temp. do ponto quente (°C)	I_{ph} (A)	I_d (A)	R_{sh} (Ω)	R_s (Ω)	$RMSE$
1	Curva no STC	0,3231	5,54E-10	1993,40	2,2197	0,00211
2	25,0	0,3219	5,78E-10	1800,53	2,1620	0,00295
3	35,0	0,3237	6,01E-10	1742,44	2,3445	0,00277
4	45,0	0,3218	6,31E-10	1738,61	2,3248	0,00278
5	55,0	0,3206	6,54E-10	1610,47	2,3777	0,00303
6	65,0	0,3206	6,95E-10	1483,56	2,4490	0,00253
7	75,0	0,3223	7,76E-10	1608,71	2,4491	0,00334

Fonte: Elaborado pelos autores

Quanto as resistências série e paralelo estimadas pelo modelo, foi notado que a (R_{sh}) apresentou tendência de queda com a elevação da temperatura partindo de 1993,4 Ω quando estimado no STC e apresentando um valor de 1608,71 Ω quando o ponto quente sobre módulo foi de 75°C. Já para a (R_s), pôde-se notar que o seu valor foi crescente, mas de maneira pouco acentuado quando submetidos à temperaturas mais elevadas de ponto quente, de 2,2197 Ω à 2,4491 Ω . Segundo Mertens (2014), podemos observar a influência da resistência série na curva I-V através da figura 5.a), no qual percebe-se que a elevação do valor de (R_s) temos um afastamento em relação a curva ideal, afetando no valor da corrente fotogerada, (I_{ph}). Situação semelhante é observada no caso de queda dos valores da resistência paralelo (R_{sh}), mostrada na Figura 5.b), neste caso, uma diminuição do valor da resistência paralelo (R_{sh}) faz com que a tensão de circuito aberto seja

afetada, pois a corrente na resistência paralelo irá aumentar fazendo com que a tensão do diodo tenha seu valor reduzido. Fato este que pode ser comprovado a partir das análises das (R_{sh}), (R_s) da Tabela 4 com relação as curvas apresentadas na Figura 5.

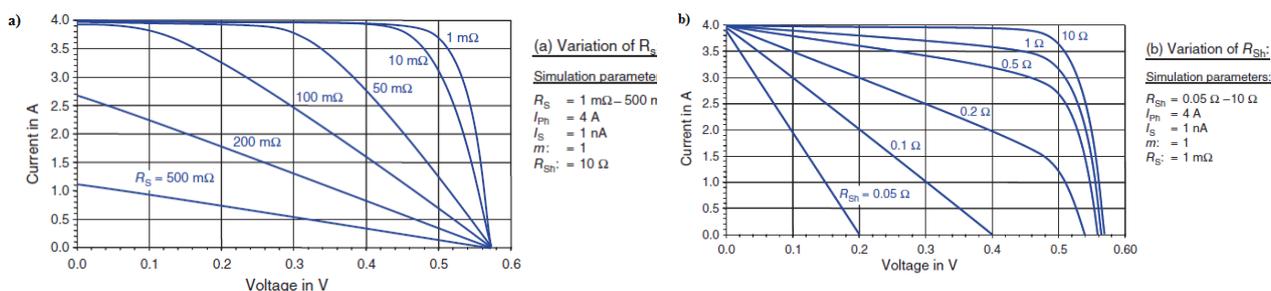


Figura 5: a) Influência da resistência em série R_s ; b) influência da resistência em paralelo R_{sh} na curva característica de células fotovoltaica. Fonte: (Mertens, 2014)

Com o objetivo de se determinar a influência do ponto quente sobre a temperatura de operação do módulo foram realizados os procedimentos conforme apresentados na metodologia para determinação da temperatura eficaz do módulo.

A Tabela 5 apresenta os resultados após realizar a transladação da curva de referência para cada situação de irradiância real de cada curva (G_2), e os resultados do $RMSE$ calculado para cada situação de suposta temperatura de operação do módulo durante os ensaios.

Podemos perceber que atribuir ao módulo a (T_{PQ}) não apresentou resultados satisfatórios, além de ser a que mais se distanciou da realidade entre os dados medidos e calculado, conforme indicado pelo seu $RMSE$ que ficou em média $7,58 \times 10^{-2}$. A utilização da diferença de temperatura média logarítmica ($LMTD$) também apresentou um distanciamento considerável com um $RMSE$ médio de $3,51 \times 10^{-2}$.

Calculando as curvas através da temperatura medido por um sensor no centro do módulo, foi obtido um menor $RMSE$ que os anteriores, $7,93 \times 10^{-3}$. Todavia, nesta condição corre-se o risco de medir uma célula sombreada ou com defeito e acabar atribuindo essa temperatura de uma célula, que não representa a temperatura de operação do módulo. Como no módulo fotovoltaico as células estão conectadas em série, e desta forma a característica de corrente entre elas estará limitada por aquela que apresentar menor condutividade, ou seja, a que estiver submetida às maiores temperaturas. Assim, atribuir ao módulo a temperatura do centro pode apresentar um erro significativo para obtenção da temperatura eficaz do módulo.

Com o intuito de obter a temperatura que melhor representa a temperatura de operação do módulo é proposto o cálculo fazendo uso de uma temperatura ponderada (T_{pond}) e realizado o comparativo por meio do $RMSE$. A (T_{pond}) foi obtida através da Eq. 9. Podemos observar através da Tabela 5 que os valores de (T_{pond}) em $^{\circ}C$ foi variando de forma crescente, mas de forma mais modesta do que para os modelos baseados no $LMTD$ e T_{PQ} e corrigindo a defasagem com relação a temperatura que foi calculado usando a temperatura do centro do módulo. Obtendo desta forma, o menor $RMSE$ as curvas calculadas através da (T_{pond}) que se distanciou dos dados medido em média foi de $4,12 \times 10^{-3}$.

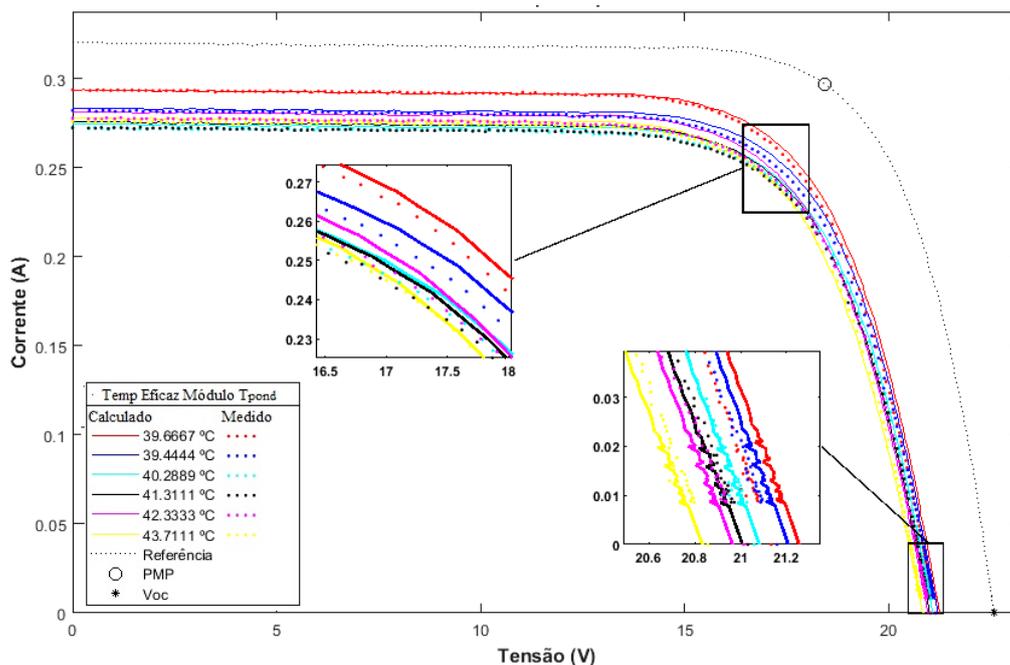


Figura 6: Curva característica I-V estimado para situações de ponto quente em comparação com curva de referência STC e destaque para os pontos de operação V_{oc} e P_{mp} . Fonte: Elaborado pelos autores

A Figura 6 apresenta as curvas I-V medidas e as curvas calculadas para os valores de temperatura ponderada (T_{pond}), no qual podemos perceber o que foi descrito através da Tabela 5, que os valores calculados obtiveram o menor *RMSE* com relação aos dados medidos, mostrando que a correção através da (T_{pond}) foi a que melhor representou a temperatura de operação do módulo fotovoltaico e mais se aproximou aos dados medidos.

Tabela 5 - Comparativo dos valores do RMSE obtidos entre os dados medidos e calculados através da transladação da curva de referência para (G_2) e supostas temperaturas de operação do módulo fotovoltaico submetido à ponto quente.

Curva	T_{PQ} (°C)	G_2 (W/m ²)	T_{centro} (°C)	<i>RMSE</i> (T_{centro})	T_{PQ} (°C)	<i>RMSE</i> (T_{PQ})	<i>LMTD</i> (°C)	<i>RMSE</i> (<i>LMTD</i>)	T_{pond} (°C)	<i>RMSE</i> (T_{pond})
1	25	911,10	41,50	3,06E-03	25,0	8,01E-02	32,56	4,59E-02	39,67	7,47E-03
2	35	879,30	40,00	2,13E-03	35,0	2,75E-02	37,44	1,45E-02	39,44	4,09E-03
3	45	851,20	39,70	4,07E-03	45,0	2,41E-02	42,29	1,02E-02	40,29	2,45E-03
4	55	854,40	39,60	7,94E-03	55,0	6,92E-02	46,88	2,99E-02	41,31	3,32E-03
5	65	871,90	39,50	1,28E-02	65,0	1,10E-01	51,20	4,85E-02	42,33	4,26E-03
6	75	860,80	39,80	1,76E-02	75,0	1,44E-01	55,55	6,18E-02	43,71	3,15E-03
Média	-	-	-	7,93E-03	-	7,58E-02	-	3,51E-02	-	4,12E-03

Fonte: Elaborado pelos autores

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram obtidas as curvas I-V e corrigidas para a condição de STC e analisadas a influência do ponto quente sobre o módulo fotovoltaico. Neste estudo pôde-se perceber uma boa aderência do algoritmo de estimação de parâmetros JAYA com um *RMSE* obtido entre 0,00211 a 0,00334, e podemos concluir que calculando o fator de idealidade e fixando este parâmetro nos limitantes do algoritmo JAYA, os resultados apresentaram-se coerentes com os modelos determinísticos e não extrapolaram os limites previamente ajustados.

Pôde-se concluir com relação aos impactos nos pontos de operação do módulo fotovoltaico (V_{oc} , P_{mp}) que uma elevação de temperatura de ponto quente sobre o módulo fotovoltaico intensificou de forma não linear um decaimento na tensão de circuito aberto, e consequente apresenta uma diminuição no ponto de máxima potência do módulo.

Com relação aos parâmetros elétricos do modelo de um diodo estimado e analisado, pôde-se perceber um impacto pouco significativo na corrente fotogerada, não apresentando uma tendência bem definida para o conjunto de dados analisado. A corrente de saturação do diodo (I_d) apresentou uma tendência de se elevar sobre a influência do ponto quente.

A respeito das resistências (R_{sh}), (R_s), pôde-se perceber o seu comportamento conforme descrito na literatura, no qual foi observado que uma elevação do valor de (R_s) mas de maneira pouco acentuado quando submetidos à temperaturas mais elevadas de ponto quente, de 2,2197 Ω à 2,4491 Ω . E com relação a resistência paralelo (R_{sh}), foi observado um decaimento de 1993,4 Ω quando estimado no STC para 1608,71 Ω quando estimado à 75°C no ponto quente. Fazendo assim que a tensão de circuito aberto seja afetada, pois a corrente na resistência paralelo irá aumentar fazendo com que a tensão do diodo tenha seu valor reduzido.

Pôde-se concluir com relação a temperatura real de operação do módulo foi melhor descrita quando as curvas foram calculadas com valores de temperatura ponderada (T_{pond}), apresentando o menor *RMSE*, mostrando que a correção através da (T_{pond}) melhor representou a temperatura de operação do módulo fotovoltaico e mais se aproximou dos dados medidos.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem a CAPES, FAPITEC, CNPq e a Universidade Federal de Sergipe pelo apoio financeiro e estrutural recebido na realização deste estudo.

REFERÊNCIAS

- Chen, G. *et al.* Recent Developments In Thermoelectric Materials. International Materials Reviews, V. 48, N. 1, P. 45–66, Fev. 2003.
- Chen, H. *et al.* Data-Driven Detection Of Hot Spots In Photovoltaic Energy Systems. IEEE Transactions On Systems, Man, And Cybernetics: Systems, V. 49, N. 8, P. 1731–1738, Ago. 2019.
- Costa, W. T. D. Modelagem, Estimação De Parâmetros E Método Mppt Para Módulos Fotovoltaicos. Tese—Vitória - ES: Universidade Federal Do Espírito Santo, 2010.
- De Soto, W.; Klein, S. A.; Beckman, W. A. Improvement And Validation Of A Model For Photovoltaic Array Performance. Solar Energy, V. 80, N. 1, P. 78–88, Jan. 2006.
- Dhimish, M.; Mather, P.; Holmes, V. Novel Photovoltaic Hot-Spotting Fault Detection Algorithm. IEEE Transactions On Device And Materials Reliability, V. 19, N. 2, P. 378–386, Jun. 2019.
- Hansen, C. Parameter Estimation For Single Diode Models Of Photovoltaic Modules. [S.L: S.N.]. Disponível Em: <Http://Www.Osti.Gov/Servlets/Purl/1177157/>. Acesso Em: 5 Dez. 2019.

- Huang, C. *et al.* A Prediction Model-Guided Jaya Algorithm For The Pv System Maximum Power Point Tracking. IEEE Transactions On Sustainable Energy, V. 9, N. 1, P. 45–55, Jan. 2018.
- IEC-60891. Iec 60891, Photovoltaic Devices – Procedures For Temperature And Irradiance Corrections To Measured I-V Characteristics., 2009.
- IEC-61625. Iec 61215-2005 Crystalline Silicon Terrestrial Photovoltaic (Pv) Modules – Design Qualification And Type Approval International Standard, , 2005.
- Komares®. [Datasheet] Km(P) 5.Pdfkomares® Solar, , 2019.
- Kottas, T. L.; Boutalis, Y. S.; Karlis, A. D. New Maximum Power Point Tracker For Pv Arrays Using Fuzzy Controller In Close Cooperation With Fuzzy Cognitive Networks. IEEE Transactions On Energy Conversion, V. 21, N. 3, P. 793–803, Set. 2006.
- Kumar, N. *et al.* Rapid Mppt For Uniformly And Partial Shaded Pv System By Using Jayade Algorithm In Highly Fluctuating Atmospheric Conditions. IEEE Transactions On Industrial Informatics, V. 13, N. 5, P. 2406–2416, Out. 2017.
- Masih, A. *et al.* Application Of Dual Axis Solar Tracking System In Qurghonteppa, Tajikistan. 2019 IEEE 7th International Conference On Smart Energy Grid Engineering (Sege). Anais... In: 2019 Ieee 7th International Conference On Smart Energy Grid Engineering (Sege). Oshawa, On, Canada: IEEE, Ago. 2019 disponível Em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8859937/>>. Acesso Em: 6 Dez. 2019
- Mertens, K. Photovoltaics: Fundamentals, Technology And Practice. Chichester: Wiley, 2014.
- Mishra, S.; Ray, P. K. Power Quality Improvement Using Photovoltaic Fed Dstatcom Based On Jaya Optimization. IEEE Transactions On Sustainable Energy, V. 7, N. 4, P. 1672–1680, Out. 2016.
- Niazi, K.; Khan, H. A.; Amir, F. Hot-Spot Reduction And Shade Loss Minimization In Crystalline-Silicon Solar Panels. Journal Of Renewable And Sustainable Energy, V. 10, N. 3, P. 033506, Maio 2018.
- Pinho, J. T.; Galdino, M. A. Manual De Engenharia Sistemas Fotovoltaicos. Rio De Janeiro: CEPTEL - CRESESB, 2014.
- Santos, J. O. R. Construção De Um Seguidor Solar De Dois Eixos. Trabalho De Conclusão De Curso—São Critovão - Se: Universidade Federal De Sergipe, 2019.
- Teixeira, T. B. Influência Da Temperatura Em Aglomerados Auto-Reconfiguráveis De Células Solares Fotovoltaicas. Monografia—Belo Horizonte - MG: Universidade Federal De Minas Gerais - UFMG, 2008.
- Venkata Rao, R. Jaya: A Simple And New Optimization Algorithm For Solving Constrained And Unconstrained Optimization Problems. International Journal Of Industrial Engineering Computations, P. 19–34, 2016.
- Wang, A.; Xuan, Y. Multiscale Prediction Of Localized Hot-Spot Phenomena In Solar Cells. Renewable Energy, V. 146, P. 1292–1300, Fev. 2020.
- Yu, K. *et al.* Parameters Identification Of Photovoltaic Models Using An Improved Jaya Optimization Algorithm. Energy Conversion And Management, V. 150, P. 742–753, Out. 2017.
- Yu, K. *et al.* A Performance-Guided Jaya Algorithm For Parameters Identification Of Photovoltaic Cell And Module. Applied Energy, V. 237, P. 241–257, Mar. 2019.
- Zhang, Z. *et al.* The Analysis On Simulation And Invalidation Of Hot-Spot Temperature Distribution In Micro-Defective Crystalline Silicon Solar Cells. Renewable Energy, V. 147, P. 2218–2228, Mar. 2020.

INFLUENCE OF HOT POINTS ON THE CHARACTERISTIC CURVE OF PHOTOVOLTAIC MODULES

Abstract. *The temperature has a strong influence on the behavior of a photovoltaic generator, the hot spot being a factor that reinforces this influence. In this work, an experiment was carried out in order to analyze the hot spot impacts on the current-voltage I-V curve and evaluate the influence on the electrical parameters for the model of a diode of the photovoltaic module, in addition to seeking to determine the effective operating temperature. The tests consisted of provoking hot spots from 25°C to 75°C with 10°C intervals, in a 5W module with 36 cells connected in series and the hot spot area equivalent to 4 cells, using an Arduino controlled heating and cooling system using Peltier insert as the thermal system actuator. The experiment was carried out under real sun conditions and using a solar tracking system to ensure that irradiance was always perpendicular. The I-V curves were obtained and corrected according to the international standard (IEC-61625, 2005), which determines the standard test conditions (STC). Four parameters of the electrical model of a diode, series resistance (R_s), parallel resistance (R_{sh}), saturation current (I_d) and photogenerated current (I_{ph}) were obtained through numerical procedures based on the genetic algorithm Jaya and the factor of ideality of the diode (n), was obtained deterministically. Through the analysis of the results, it was possible to notice a good adherence of the JAYA algorithm with an average square error (RMSE) of 2.95×10^{-3} . It can be concluded that an increase in the temperature of the hot spot, caused a reduction in the value of (R_{sh}) and consequent a reduction in the value of the open circuit voltage. The value of (R_s) ended up influencing (I_{ph}) but in a minor way. In addition, a study was carried out to obtain an effective temperature of the module, where the application of the weighted average better represented the measured data.*

Key words: *Hot Spot; I-V curve characterization; Photovoltaic electric model.*