

ESTIMATIVA DA GERAÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DA MODELAGEM DE UMA UNIDADE FOTOVOLTAICA UTILIZANDO A FOLHA DE DADOS

Rodolfo França Lira – rodolfo.lira@cear.ufpb.br

Kleber Carneiro de Oliveira – kleber.oliveira@cear.ufpb.br

Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Energias Alternativas e Renováveis

Resumo. A utilização de fontes energéticas renováveis está no foco das discussões contemporâneas, dado o caráter finito e os impactos que as fontes tradicionais não renováveis causam ao meio ambiente. Dentre as principais fontes energéticas renováveis, a energia solar é uma das que mais se destaca, principalmente no Brasil, que possui um enorme potencial. Dado o elevado custo da implantação de um sistema fotovoltaico, é imprescindível que o dimensionamento do sistema seja realizado corretamente, pois descuidos nessa etapa influenciam na viabilidade financeira do investimento. Dessa forma, este artigo propõe um método para estimar a quantidade de energia que poderá ser gerada por um sistema fotovoltaico utilizando técnicas de modelagens de células fotovoltaicas na forma de circuitos elétricos. Para alcançar este objetivo, é necessário determinar os parâmetros de uma equação não-linear e transcendental oriunda do modelo utilizado. Devido a não linearidade dessa equação, é necessária a utilização de métodos numéricos para sua solução, permitindo que existam diferentes abordagens para equacionar esta problemática. Sendo assim, foram analisadas três metodologias de parametrização encontradas na literatura, todas elas considerando o modelo de cinco parâmetros, ajustadas em três diferentes pontos da curva característica, ponto de máxima potência, ponto de curto-circuito e ponto de circuito aberto, utilizando os valores experimentais disponíveis na folha de dados do fabricante. De forma comparativa, foi realizado um estudo de análise de erro, tomando como base a curva experimental apresentada na folha de dados. Através dessa análise, foi definida dentre as três metodologias estudadas, aquela que apresentava a melhor aproximação. Observou-se a possibilidade de incrementar a metodologia escolhida, melhorando assim a sua precisão. Como resultado final, é apresentada a estimativa da energia gerada pelo sistema fotovoltaico utilizando dados de medição meteorológicas coletados experimentalmente na cidade de João Pessoa/PB.

Palavras-chave: Modelagem, parametrização, geração fotovoltaica.

1. INTRODUÇÃO

A modelagem é uma das principais etapas para realização de várias análises de comportamento de um módulo fotovoltaico, como: estimar a eficiência do módulo, estudar a interação entre conversores de potência e geradores fotovoltaicos e prever o comportamento dos métodos de rastreamento do ponto de máxima potência (Chin, Salam e Ishaque, 2015). Ao reunir essas várias análises, considerando os parâmetros ambientais de temperatura e irradiância, atrelados aos demais componentes que formam um sistema fotovoltaico, como inversores de potência e cargas, é possível emular o comportamento do sistema fotovoltaico, de tal sorte a influenciar no correto dimensionamento do sistema e nas estratégias de controle (Dezso Sera, 2007).

A utilização de circuitos elétricos é bastante utilizada na modelagem de diversos sistemas graças à flexibilidade em simular comportamentos lineares e não lineares, além da disponibilidade de diversos softwares que permitem realizar análises com vários graus de complexidade. Sistemas mecânicos, térmicos, hidráulicos, químicos e até biológicos são constantemente analisados através de modelos que utilizam circuitos elétricos. Em (Bellia, Youcef e Fatima, 2014) e (Chin, Salam e Ishaque, 2015) são apresentados alguns modelos de células fotovoltaicas na forma de circuitos elétricos, que gradualmente se tornam mais complexos e, conseqüentemente, com comportamento mais próximo das condições reais de funcionamento, na seguinte ordem: modelo do diodo único ideal; modelo do diodo único com uma resistência série; modelo do diodo único com resistência série e em paralelo e modelo dos dois diodos com resistência série e em paralelo. A cada acréscimo desses componentes no modelo são explicados os ganhos e limitações.

Assim como vários dispositivos eletrônicos, a célula fotovoltaica também é produzida usando materiais semicondutores, logo, é natural que seus comportamentos sejam semelhantes, tornando mais intuitiva a utilização de circuitos elétricos em suas modelagens. Dentre esses dispositivos eletrônicos a base de semicondutores, o que mais se assemelha com uma célula fotovoltaica é o diodo, sendo o ponto de partida para desenvolver o modelo. A célula fotovoltaica quando não iluminada funciona como um grande diodo, todavia, quando iluminada tem início a formação de uma corrente, denominada como corrente fotogerada (I_{PV}), que é inserida no modelo através de uma fonte de corrente, conforme é apresentado na Figura 1 (a). Esse é o modelo ideal do diodo único, bastante simples, normalmente utilizado com finalidades pedagógicas, por não considerar uma série de fatores que serão inseridos de forma construtiva nos próximos modelos, essa configuração possui o equacionamento descrito na Eq. (1).

$$I = I_{PV} - I_D = I_{PV} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q \cdot V}{a \cdot k \cdot T} \right) - 1 \right] \quad (1)$$

onde: I_{pV} é a corrente fotogerada [A], I_D é corrente no diodo [A], I_0 é a corrente de saturação do diodo [A], V é a tensão no diodo [V], q é a carga do elétron [$1,60217646 \cdot 10^{-19}$ C], a é o fator de idealidade do diodo, k é a constante de Boltzmann [$1,380653 \cdot 10^{-23}$ J/K] e T a temperatura [K].

Nesse ponto do equacionamento já é possível identificar os três primeiros parâmetros do modelo que deverão ser determinados, são eles: corrente fotogerada (I_{pV}), corrente de saturação do diodo (I_0) e o fator de idealidade (a). À medida que o modelo se torna mais complexo vão surgindo novos parâmetros no equacionamento da modelagem

Para que sejam inseridos efeitos, relativos as perdas na modelagem, são inseridas: uma resistência em série (R_S), responsável pelos efeitos de resistência ao fluxo de corrente no material semiconductor, a resistência de contato entre o material semiconductor e o eletrodo metálico, e a resistência ao fluxo de corrente do material metálico que forma o eletrodo (Chin, Salam e Ishaque, 2015); uma resistência em paralelo (R_P), além de melhorar a precisão do modelo quando consideradas temperaturas elevadas, incrementa perdas inerentes às correntes de fuga na junção PN (Bowden e Honsberg). São esses os novos dois parâmetros a serem definidos no modelo, alterando a topologia do circuito, conforme ilustrado na Figura 1 (c). O equacionamento é então incrementado conforme Eq. (2).

$$I = I_{pV} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V + R_S I)}{a \cdot k \cdot T} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_S I}{R_P} \quad (2)$$

O modelo baseado em circuitos elétricos contendo um diodo e resistências em série e paralelo, também denominado como modelo R_P , é o método mais popular que vem sendo utilizado ao longo dos anos, além de ser bastante preciso, com exceção de condições de níveis muito baixos de irradiância (Lele Peng, 2014), (M.R. Alrashidi, 2011). Sendo assim, esse será o modelo utilizado para desenvolver o algoritmo. Um efeito não considerado nesse modelo são as perdas inerentes à recombinação dos pares elétrons lacunas, que podem ser incluídos na modelagem ao inserir um novo diodo conectado em paralelo. Todavia, é descrito por (Ishaque, Salam, *et al.*, 2011) que o modelo dos dois diodos apesar de se aproximar cada vez mais das condições práticas de operação de um módulo fotovoltaico, apresenta as desvantagens de incluir mais dois parâmetros ao equacionamento (a_2 e I_{02}), elevando de cinco para sete a quantidade de parâmetros a serem definidos, porém, a maior dificuldade acontece devido à introdução de mais um termo exponencial ao equacionamento, aumentando muito o tempo de simulação, sendo necessária uma grande capacidade de processamento para viabilizar a simulação durante um período de tempo considerável.

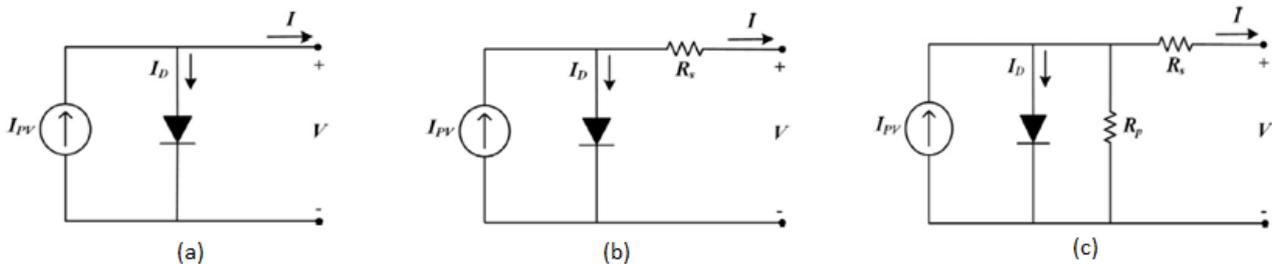


Figura 1. Topologias de modelos de células fotovoltaicas na forma de circuitos elétricos.

2. PARAMETRIZAÇÃO

Parametrizar o modelo, consiste em determinar os cinco parâmetros (a , I_{pV} , I_0 , R_S e R_P), que surgiram no equacionamento, solucionando o equacionamento apresentado na Eq. (2). Porém, dado o caráter não linear e transcendental desse equacionamento, faz necessário utilizar-se de técnicas de solução numéricas. É possível encontrar na literatura diferentes abordagens que propõem solucionar o equacionamento apresentado, mudando apenas os procedimentos adotados. Foram selecionadas três metodologias, aqui apresentadas de forma resumida, que descrevem formas distintas de determinar os parâmetros e foram usadas como referência para desenvolver rotinas computacionais de parametrização do modelo. É importante frisar que a intenção deste estudo não é de replicar os algoritmos e os respectivos resultados apresentados pelos referidos autores, pois está é uma tarefa bastante difícil, dado pouco detalhamento do algoritmo apresentado em cada estudo.

O software Matlab foi escolhido para implementação da rotina de cálculo dos parâmetros, pois é uma ferramenta de fácil manuseio, bastante versátil e que possui também um ambiente de simulação de circuitos elétricos (Simulink) integrado ao software, que pode ser útil caso surja a necessidade de realizar análises de circuitos elétricos mais complexos.

2.1 Metodologia1

O primeiro estudo tomado como referência foi descrito por (Villalva, Gazoli e Filho, 2009). A determinação dos cinco parâmetros tem início analisando o fator de idealidade, que apesar de não existir consenso na literatura estudada, no trabalho proposto por (Tsai, Tu e Su, 2008) e adotado por (Bellia, Youcef e Fatima, 2014), é descrito que este pode

ser definido de acordo com a tecnologia e material ao qual é produzida a célula fotovoltaica. Para células de silício policristalino, como a que foi utilizada no experimento, o valor de $a = 1,3$.

Sabendo que a geração é fortemente afetada pelos níveis de irradiância, e com menos intensidade pela temperatura, a corrente fotogerada é determinada pela Eq. (3).

$$I_{PV} = (I_{SC,N} + K_I \cdot \Delta T) \frac{G}{G_N} \quad (3)$$

onde: $I_{SC,N}$ é a corrente de curto-circuito [A] nas condições padrões de teste (STC), $\Delta T = T - T_N$ [°C], T é a temperatura ambiente [°C], T_N a temperatura ambiente em STC ($T_N = 25^\circ\text{C}$), G é a irradiância [W/m²], G_N a irradiância em STC (1.000 W/m²), K_I é o coeficiente de temperatura de corrente de curto-circuito [A/K], usualmente informado na folha de dados. A corrente de saturação do diodo é determinada solucionando a Eq. (4).

$$I_0 = \left(\frac{I_{SC,N}}{\exp\left(\frac{q \cdot V_{OC,N}}{a \cdot k \cdot T_N}\right) - 1} \right) \left(\frac{T_N}{T} \right)^3 \exp\left[\frac{q \cdot E_g}{a \cdot K} \left(\frac{1}{T_N} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (4)$$

onde: $V_{OC,N}$ é a tensão de circuito aberto em STC [V] e E_g é a energia de *bandgap* do material semiconductor ($E_g \cong 1,12$ eV para o silício policristalino a 25°C)

Dos cinco parâmetros que são impostos pelo modelo escolhido (a, I_{PV}, I_0, R_S e R_P), os valores das resistências série (R_S) e paralelo (R_P) possuem difícil solução analítica. O estudo apresentado por (Chin, Salam e Ishaque, 2015) lista uma série de outros estudos que possuem diferentes soluções para determinação desses parâmetros, descrevendo que a solução analítica, apesar de possível, é bastante complexa e utiliza dados experimentais encontrados na folha de dados do equipamento. Dois outros métodos citados são fundamentados nos efeitos causados nas curvas características $P \times V$ e $I \times V$ quando são alterados os valores de R_S e R_P . Observa-se variação na inclinação da curva característica tanto na região entre os pontos de curto-circuito e máxima potência quanto na região entre os pontos de circuito aberto e de máxima potência, alterando também a posição do ponto de máxima potência da curva. Dessa forma, uma das técnicas citadas faz variar separadamente os valores de R_S e R_P até que a curva obtida, graficamente se encaixe na curva experimental.

Outra forma de aproveitar o comportamento provocado nas curvas características ao variar os valores de R_S e R_P é fazer com que eles variem de forma conjunta, possibilitando que sejam geradas inúmeras curvas, porém, apenas uma delas passará com derivada nula no ponto de máxima potência experimental informado pelo fabricante (Villalva, Gazoli e Filho, 2009) e (Bellia, Youcef e Fatima, 2014). Ou seja, existe um único par (R_S, R_P) que satisfaz a condição de que a potência máxima estimada pelo modelo ($P_{MAX,M}$) é igual a potência máxima experimental ($P_{MAX,E}$) informada pelo fabricante, possibilitando calcular o valor de R_P em função de R_S , dada a Eq. (5).

$$R_P = \frac{V_{MP,E} + R_S \cdot I_{MP,E}}{I_{PV} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V_{MP,E} + R_S \cdot I_{MP,E})}{a \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right] - \frac{P_{MAX,E}}{V_{MP,E}}} \quad (5)$$

onde: $V_{MP,N}$ é a tensão no ponto de máxima potência em STC [V], $I_{MP,N}$ é a corrente no ponto de máxima potência em STC [A], $P_{MAX,E}$ é o ponto de máxima potência em STC [W].

Não sendo possível uma solução analítica simples, deve-se caminhar para uma solução numérica. A estratégia consiste em utilizar toda a formulação matemática proposta até aqui para elaborar uma rotina computacional capaz de encontrar numericamente o par (R_S, R_P) que atendem a igualdade $P_{MAX,M} = P_{MAX,E}$.

A rotina utilizada na simulação computacional pode ser melhor entendida consultando o fluxograma ilustrado na Figura 4 (a). A etapa inicial consiste em alimentar a rotina com os valores das constantes utilizadas no equacionamento, assim como com os valores experimentais fornecidos na folha de dados. É importante entender que os dados experimentais disponibilizados pelo fabricante são geralmente obtidos através de ensaios realizados nas condições padrões de teste (STC), irradiância igual a 1.000 W/m² e da temperatura igual a 25°C. Valores esses que serão utilizados para fins da determinação dos parâmetros R_S e R_P .

A rotina computacional tem continuidade ao serem determinados analiticamente os parâmetros da corrente fotogerada (I_{PV}) e da corrente de saturação (I_0), e tabelado o fator de idealidade (a). Com os três primeiros parâmetros bem definidos, tem início o processo iterativo para determinação dos valores das resistências: o valor da resistência série é iniciado em $R_S = 0$, permitindo que seja calculado através da Eq. (5) um valor para correspondentes para R_P ; com o par (R_S, R_P) é possível definir a corrente para todos os valores de tensão entre $0 \leq V \leq V_{OC}$, usando a Eq. (2), através do método de Newton-Raphson, e consequentemente, definir a curva característica $V \times P$; conforme estratégia definida, o ponto de máxima potência matemático ($P_{MP,M}$) da curva característica $P \times V$ é identificado ($V_{MP,M}; I_{MP,M}$) e verifica-se sua convergência para o ponto de máxima potência experimental ($P_{MP,E}$), definido pelo fabricante do módulo fotovoltaico ($V_{MP,E}; I_{MP,E}$). Caso a convergência não seja identificada, através de um erro mínimo de proximidade aceitável, o valor

de R_S é incrementado para gerar um novo valor equivalente para R_P , repetindo o processo até que exista a convergência dos pontos de máxima potência.

2.2 Metodologia 2

Dando continuidade às análises de metodologias que se baseiam nos dados das células fotovoltaicas disponibilizadas pelos fabricantes, em (Dezso Sera, 2007), também com 5 parâmetros, (a , I_{PV} , I_0 , R_S e R_P), diferente da metodologia apresentada anteriormente, onde o fator de idealidade era tabelado, este autor propõe uma forma analítica de encontrar esse parâmetro, solucionando a Eq. (2) para valores no ponto de máxima potência. Com isso, será encontrado um valor de a para cada par (R_S , R_P) que serão variados no processo iterativo.

Os valores de I_0 e I_{PV} , serão encontrados analiticamente através de um conjunto de equações, dessa vez, diferentes quando tratadas de variações de temperatura e irradiância. Com os valores de I_0 , I_{PV} e a definidos, utiliza-se de duas abordagens para encontrar numericamente R_S e R_P . A primeira delas pode ser entendida que a inclinação da curva de corrente na região de curto circuito é dada por menos o inverso da resistência paralelo. A segunda consideração lembra que a derivada da curva de potência no ponto de máxima potência é nula.

Para o equacionamento que surge dessas duas considerações, o autor sugere a adoção dos métodos numéricos de Newton-Raphson ou da Bissecção, este último foi escolhido para implementar o algoritmo, por ser mais simples e não ser necessário realizar o cálculo da derivada para cada interação feita, o que demandaria um esforço computacional ainda maior, apesar de convergir mais lentamente.

Através da Figura 4 (b), é possível ter uma visão esquemática do passo a passo da rotina computacional utilizada, onde se adota um valor inicial para os parâmetros, que alimentam um método numérico iterativo, calcula-se analiticamente o fator de idealidade (a). Os parâmetros I_{PV} e I_0 não aparecem no fluxograma pois essas equações são inseridas no equacionamento geral para determinação da corrente. Observa-se que os valores das resistências são incrementados separadamente após testadas as premissas das estratégias adotadas.

2.3 Metodologia 3

Essa metodologia, foi proposta por (Lele Peng, 2014), assim como as demais possui 5 parâmetros à serem determinados, (a , I_{PV} , I_0 , R_S e R_P). Diferentemente dos outros modelos, neste artigo é apresentada uma decomposição da Eq. (2) utilizando a Função W de Lambert, resultando na Eq. (6), que é o equacionamento geral para o qual deve ser solucionada para determinação dos referidos parâmetros.

$$I = \frac{R_P(I_{PV} + I_0) - V}{R_P + R_S} - \frac{a \cdot k \cdot T}{R_S \cdot q} W \left\{ \frac{R_S \cdot R_P \cdot I_0 \cdot q}{a \cdot k \cdot T (R_P + R_S)} \exp \left[\frac{R_P \cdot q (R_S \cdot I_{PV} + R_S \cdot I_0 + V)}{a \cdot k \cdot T (R_P + R_S)} \right] \right\} \quad (6)$$

Seguindo o padrão até aqui observado, a corrente fotogerada e a corrente de saturação do diodo apresentam dependência dos níveis de temperatura e irradiância, e foram determinados analiticamente. O autor achou prudente fixar o valor do fator de idealidade ($a = 1$), simplificando o processo de determinação dos parâmetros, e a partir daqui reduzindo-os a dois parâmetros que devem ser encontrados (R_S e R_P). Considerando que a derivada da potência no ponto de máxima potência é nula, é possível chegar a duas novas equações para as resistências em série e em paralelo que não possuem solução analítica e carecem de solução numérica. O método de Newton-Raphson é descartado pelo autor ao considerar que nem sempre existe convergência e que pode existir um grande desvio ao adotar-se valores iniciais não razoáveis (Lele Peng, 2014).

O fluxograma desenhado na Figura 4 (c) detalha o passo a passo da metodologia proposta para a determinação dos parâmetros referentes às resistências. É realizado um cálculo iterativo simples que consiste inicialmente em adotar o valor inicial da resistência série como nulo e dar início ao processo iterativo calculando um novo valor de R_S . Esse, por sua vez, é comparado com o valor encontrado na interação anterior e verificado se apresenta erro de convergência aceitável. Caso isso não aconteça, é repetido o processo de cálculo para um novo R_S até que exista convergência. O valor da resistência série é utilizado para determinar a resistência paralelo, que é então testada utilizando um valor de referência denominado resistência paralelo mínima, que nada mais é do que o valor mínimo da inclinação da curva de corrente na região de curto-circuito. Caso o valor encontrado de R_P seja maior que o valor mínimo de referência, adota-se como valor de R_P o valor de referência, caso contrário, o valor calculado é adotado como sendo aquele da resistência paralelo.

É possível observar que até então esta foi a metodologia que demonstrou apresentar os cálculos mais simples para determinação dos parâmetros, porém, para solucionar o equacionamento decomposto através da Função W de Lambert na Eq. (6), quando no momento de determinar as curvas características, verificou-se que, apesar de o Matlab possuir uma função própria para realizar esse cálculo, em algumas circunstâncias o valor retornado pode ser um número complexo. Essa resposta inesperada surgiu quando o método foi testado usando alguns módulos/células diferentes da célula sugerida no artigo, a Q6LM produzido pela Q.CELLS.

3. METODOLOGIA

Após serem apresentadas algumas metodologias de parametrização da modelagem de células fotovoltaicas na forma de circuitos elétricos, contendo um diodo e resistências série e paralelo, faz-se necessário escolher dentre elas qual deverá ser utilizada no decorrer do estudo. Dessa forma, essas metodologias foram simuladas e comparadas utilizando como mecanismo de escolha uma análise de erro. Outras considerações, como a precisão mínima para simular um sistema fotovoltaico, e o tempo de processamento, foram adotadas no processo de escolha. De posse de uma metodologia de referência, que precisou ser incrementada para melhorar sua precisão, foi dada continuidade ao estudo, desenvolvendo uma rotina computacional capaz de parametrizar e caracterizar o comportamento operacional de uma célula fotovoltaica para diferentes condições de irradiância e temperatura. A evolução desse algoritmo surge da necessidade de simular, em ambiente computacional, utilizando softwares como Matlab, o funcionamento de um sistema de microgeração fotovoltaica, capaz de estimar a quantidade de energia gerada, sob condições reais de temperatura e irradiância aferidos experimentalmente. Com o intuito de validar os resultados dessas simulações, na forma da estimativa da energia gerada pelo sistema, foram calculadas novas estimativas utilizando métodos usuais de dimensionamento de sistemas fotovoltaicos, uma vez que, os dados reais da geração do sistema no período pré-definido, não puderam ser acessados dado problemas técnicos, não superados, no inversor utilizado. Entretanto, essas simulações deverão ser refeitas em momento oportuno, utilizando um inversor mais moderno. Maiores detalhamentos e os resultados dessas etapas são apresentados na sequência.

4. ESCOLHA DA MELHOR METODOLOGIA COM BASE NA ANÁLISE DE ERRO

No tópico anterior foram apresentadas três abordagens distintas que objetivavam a determinação dos parâmetros do modelo de uma célula fotovoltaica utilizando a topologia de circuitos elétricos através de dados experimentais contidos nas folhas de dados. Para cada uma das metodologias escolhidas, foi desenvolvida uma rotina computacional seguindo o escopo apresentado em cada um dos trabalhos referenciados. Os resultados obtidos pelos algoritmos desenvolvidos nesse estudo foram submetidos a uma análise do erro médio quadrático (RMSE) processado ponto a ponto entre as curvas estimadas e experimentais, disponibilizadas nas folhas de dados. Para que exista maior uniformidade nos resultados, ao ponto de os métodos poderem ser comparáveis de forma mais justa, todas as rotinas foram testadas utilizando o mesmo módulo fotovoltaico, a célula policristalina Q6LPT3-G2 produzida pela Q.CELLS. A escolha desta unidade geradora baseia-se na análise do detalhamento de informações apresentadas pelo fabricante na folha de dados da célula, sendo esta a que apresentou o maior número de informações. Os valores calculados dos erros médios quadráticos para cada rotina são apresentados através do gráfico da Figura 2, assim como os respectivos parâmetros que estão detalhados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros encontrados para cada metodologia proposta utilizando a mesma célula fotovoltaica.

Parâmetros	Metodologia 1	Metodologia 2	Metodologia 3
a	1,3	1,24	1
R_s	0,01 Ω	0,001 Ω	$2,8 \times 10^{-3}$ Ω
R_p	20,00 Ω	4,5338 Ω	4,103 Ω
RMSE	0,46 %	0,63 %	1,46 %

A divergência dos valores dos parâmetros estimados pelos diferentes algoritmos quando calculados para uma mesma célula, constata a ideia de que apesar de a inserção de resistências na modelagem incluírem os efeitos de perdas verificadas fisicamente, esses valores não representam uma quantificação física desses efeitos na prática, pois a mesma célula quando submetidas a um mesmo modelo de circuito elétrico, porém com metodologias diferentes de cálculo, estimaram valores distintos para cada parâmetro.

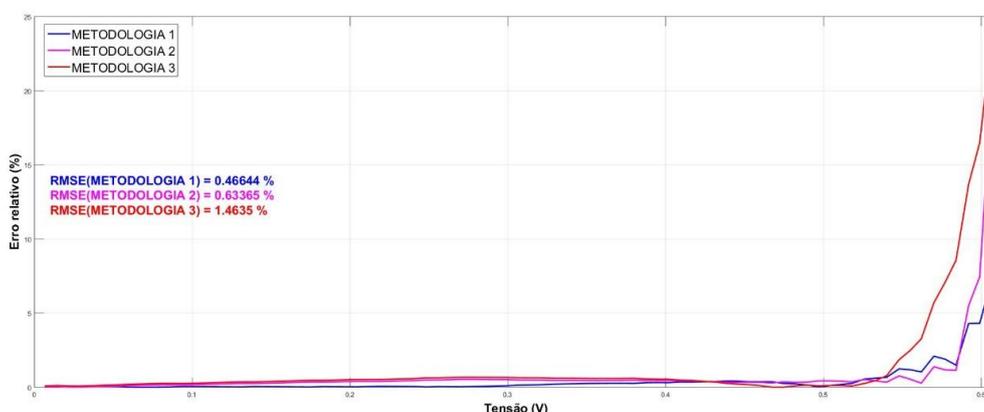


Figura 2. Curvas de erro relativo calculadas ponto a ponto entre as curvas de potência estimadas e experimentais para cada metodologia proposta utilizando a célula fotovoltaica Q6LPT3-G2.

Observou-se que a convergência obtida pelas rotinas computacionais desenvolvidas, para cada metodologia proposta, alcançaram baixos valores de erro médio quadrático. Podendo ser consideradas, como exitosas para o que propunham. O algoritmo desenvolvido seguindo o escopo da Modelo 1, demonstrou a melhor convergência, apresentou o menor erro, além de conciliar precisão com simplicidade e pouco esforço computacional. A boa relação entre simplicidade e precisão apresentada pela metodologia escolhida já foi evidenciada por (Salmi, Bouzguenda, *et al.*, 2012).

É importante salientar que cada vez que é alterada a célula a ser caracteriza pelo algoritmo, é necessário que também sejam realizados vários ajustes em sua rotina, pois pequenos ajustes podem provocar distorções significativas nos resultados finais. Alguns dos parâmetros que podem ser citados e que provocam essas alterações são o passo de discretização das curvas e os limites de erro de convergência para os critérios de parada, que são bastante sensíveis e tornam a tarefa de configurá-los algo pouco trivial de ser alcançado. Desse modo, apesar do erro verificado na modelagem escolhida ser relativamente pequeno, foi possível realizar um ajuste fino nos parâmetros encontrados, para que esses pudessem ser suficientes para reduzir ainda mais o erro. Logo, foi desenvolvida uma nova rotina com base nos gráficos experimentais disponibilizados nas folhas de dados dos fabricantes.

5. METODOLOGIA MELHORADA

Para essa nova rotina, ao invés de utilizar apenas três pontos da curva característica, foi realizado um rastreamento utilizando 100 pontos das curvas desenhadas na folha de dados. Tal iniciativa foi estimulada ao perceber que fixando o valor do fator de idealidade nem sempre existe convergência da Metodologia 1. Esse tipo de comportamento foi observado em alguns casos quando alterado o modelo da célula fotovoltaica analisada, necessitando reajustar todo o algoritmo. Constatou-se que ao variar os valores dos parâmetros do fator de idealidade, resistência série e resistência paralelo, foi possível reduzir o erro médio quadrático (RMSE).

Dada essa problemática, e com foco em alcançar aos valores dos parâmetros que melhor representam o comportamento do módulo, foi proposta uma estratégia parecida com o que foi feito pela Metodologia 1, porém diferenciando desta ao variar o fator de idealidade. O passo a passo da rotina segue esquematizado no fluxograma da Figura 4 (d).

A rotina é alimentada com os parâmetros iniciais, constantes e com os valores experimentais da folha de dados. Dando continuidade, são determinados os valores de I_{PV} e I_0 , da mesma forma como apresentado na Metodologia 1. Com esses parâmetros definidos, tem início o processo iterativo: O valor da resistência série é iniciado em $R_s = 0$, calcula-se um valor para R_p correspondente, através da Eq. (5); com o par R_s e R_p , é possível plotar as curvas características para todos os valores de tensão entre $0 \leq V \leq V_{OC}$, usando a Eq. (2), através do método numérico de Newton-Raphson; é calculado o RMSE entre a curva estimada e a curva experimental gerados para os parâmetros $(a(i, j), R_s(i, j), R_p(i, j))$. Esse processo é repetido para todas as combinações possíveis desses parâmetros buscando o menor valor de RMSE dentre eles.

Considerando o módulo fotovoltaico KC200GT da fabricante Kyocera, mesmo módulo usado por (Villalva, Gazoli e Filho, 2009), foi realizada a comparação entre a metodologia que apresentou o menor erro, Metodologia 1, e a metodologia melhorada. Segue apresentado na Fig. 3(a), a curva RMSE encontrada para cada combinação dos parâmetros $(a(i, j), R_s(i, j), R_p(i, j))$ que geraram o menor erro médio quadrático utilizando a metodologia melhorada. Na Fig. 3(b), seguem os gráficos do erro relativo para a Metodologia 1 e a Metodologia Melhorada.

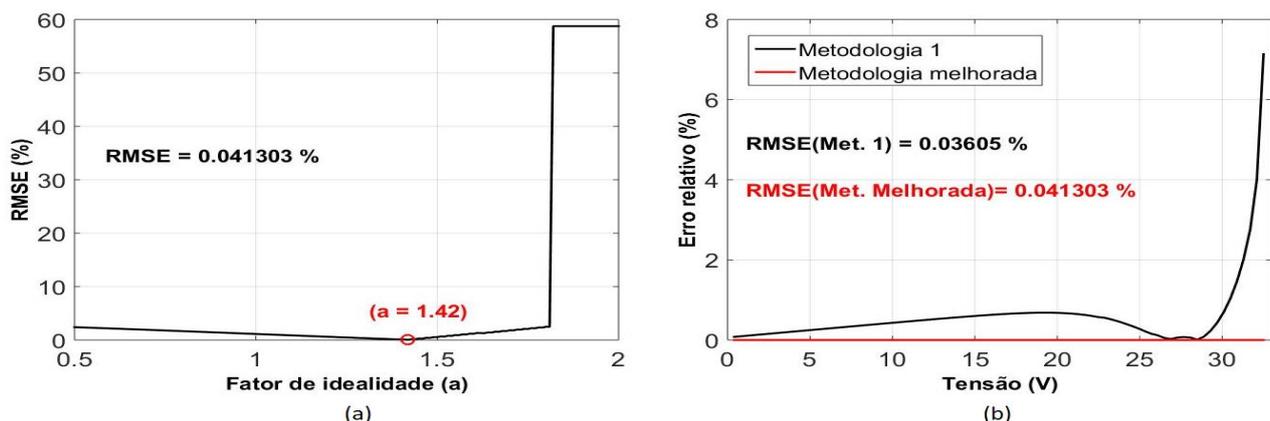


Figura 3. Curvas: (a) do erro médio quadrático ao variar o fator de idealidade; (b) erro relativo entre metodologias.

Foram encontrados parâmetros que levaram o erro médio quadrático à 0,041 %, valor muito próximo de zero, e mais de cinco vezes menor que o menor erro encontrado anteriormente, 0,36 %. É notório que a modelagem inicial apresenta uma ótima aproximação, porém, a metodologia melhorada além de apresentar melhor precisão, se apresenta mais robusta quando é necessário fazer análises de diferentes modelos de células fotovoltaicas, não sendo necessário realizar diversas mudanças nas configurações iniciais do algoritmo.

A sequência do estudo consiste em estimar a energia gerada por um sistema fotovoltaico, já conhecido e montado experimentalmente, durante um certo período de tempo em que foram coletados dados de medições meteorológicas.

Diante da análise de erro apresentada, as demais simulações que serão realizadas na continuidade do estudo utilizarão o algoritmo baseado na metodologia melhorada.

6. ESTIMATIVA DA ENERGIA GERADA PELO SISTEMA FOTOVOLTAICO

6.1 Apresentação dos dados experimentais

Foi montado um sistema fotovoltaico contendo 14 módulos, m-Si Isotopon IS-70/12 de 70 Wp, sobre um telhado do Centro de Energias Alternativas e Renováveis (CEAR), da Universidade Federal da Paraíba, localizado na Cidade Universitária, na cidade de João Pessoa – PB. Este, por sua vez, conectado à rede elétrica através de um inversor de potência, SonnyBoy 1100. Junto ao sistema fotovoltaico foi montada uma estação meteorológica contendo: um rastreador solar (Suntracker EKO®) que suporta sensores de medição de radiação global, direta e difusa. A este está acoplado um pireliômetro para medição da radiação direta e dois piranômetros responsáveis por medir a radiação global e radiação difusa; um sensor fotovoltaico de teste (Ingenieurburö Mencke & Tegtmeier GmbH) capaz de medir a radiação no plano inclinado de 9° para o norte geográfico, mesma inclinação dos módulos fotovoltaicos; um piranômetro para medição da radiação global incidente no plano horizontal; um anemômetro para medições da velocidade do vento; uma biruta para registros do comportamento da direção do vento; um sensor de temperatura e umidade e um pluviômetro para marcação dos níveis de pluviosidade. Todos esses sensores estão conectados a um *datalogger* (Ammonitor® Meteo-40), que registra todos os dados das medições. Apesar do experimento possuir diversos tipos de sensores, para esse estudo serão utilizados apenas a temperatura ambiente e a irradiância incidente no plano inclinado.

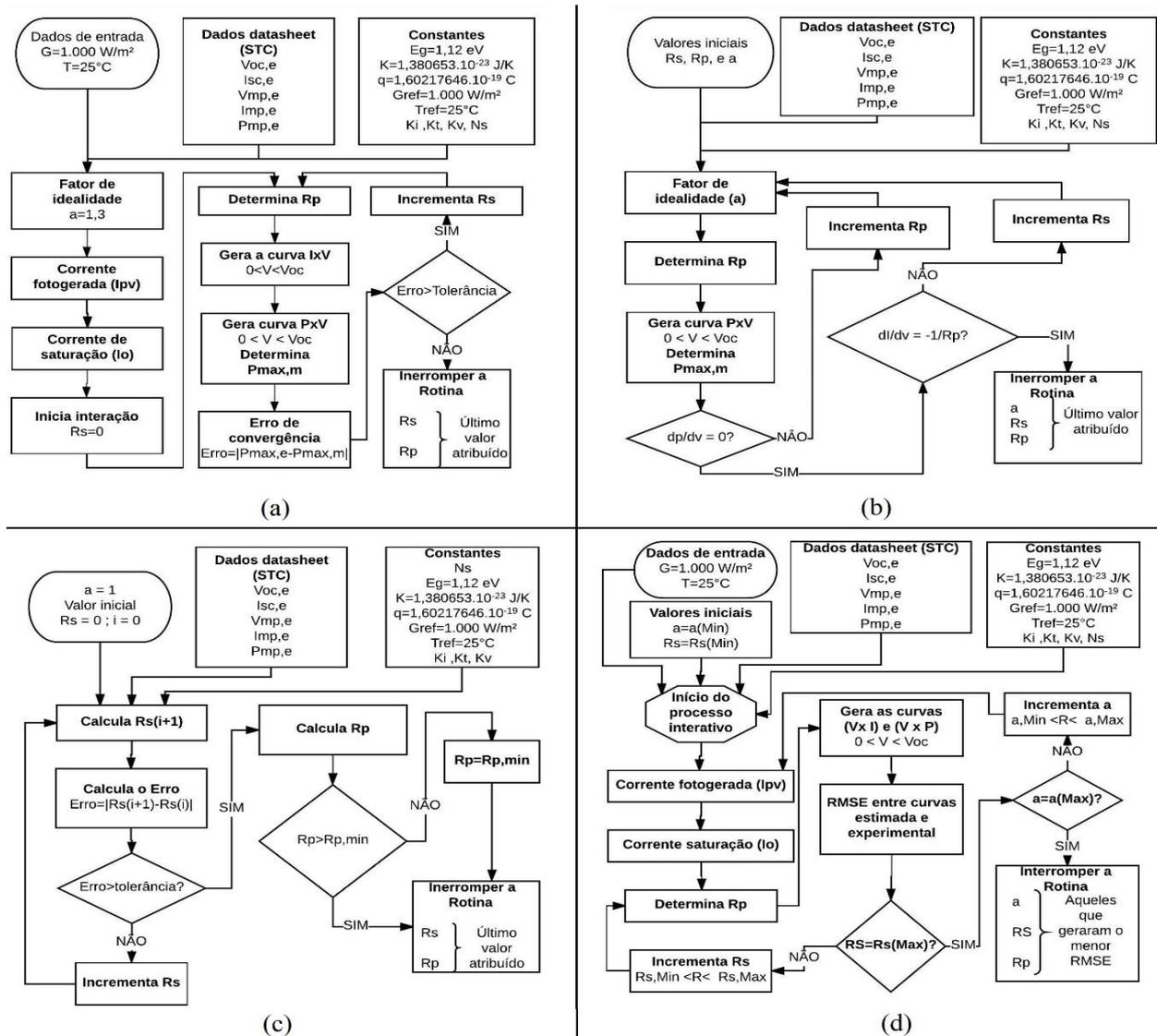
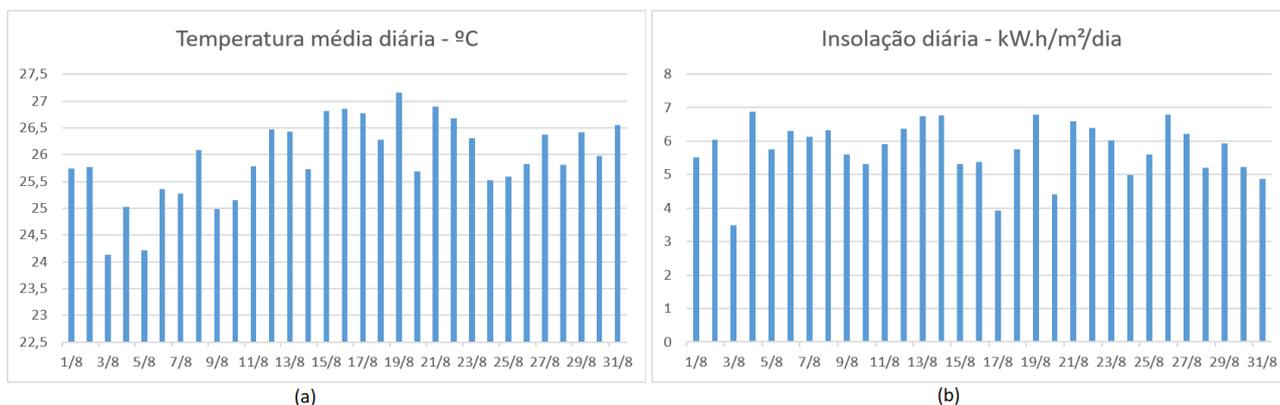


Figura 4. Fluxogramas das metodologias para determinação dos parâmetros de módulo fotovoltaico. (a) Metodologia 1; (b) Metodologia 2; (c) Metodologia 3; (d) Metodologia Melhorada.

Foi selecionado o período de 31 dias durante o mês de agosto de 2016, com médias de medições registradas a cada 10 minutos, totalizando mais de oito mil pontos de medições de temperatura e irradiância, que serão inseridos aos pares

no algoritmo para simular o funcionamento de um sistema fotovoltaico. Devido à grande quantidade de leituras que deverão ser inseridas e processadas, é essencial que, além de precisa, a metodologia escolhida apresente boa eficiência no tempo de processamento.

A cidade de João Pessoa/PB, localizada no litoral do nordeste brasileiro à Latitude: $-7,10$ e Longitude: $-34,87$, apresenta clima tropical, com um curto período de seca e pluviosidade média anual de 1.888 mm, com temperatura média anual de $25,2$ °C. No mês de agosto, a temperatura média mensal calculada entre os anos de 1931 e 1990 varia entre $25,1$ °C e $24,7$ °C (INMET). Já a insolação média para um dia do mês de agosto, é de $5,69$ kWh/m²/dia (CRESESB). O experimento registrou para o mês de agosto de 2016 uma temperatura média de $25,9$ °C, com menor média diária registrada em $24,1$ °C e com maior média diária em $27,1$ °C, nos dias 03 e 19 de agosto respectivamente. A insolação média aferida foi de $5,76$ kWh/m²/dia, com mínima de $3,48$ kWh/m²/dia e máxima de $6,86$ kWh/m²/dia, nos dias 03 e 04 de agosto, respectivamente. A temperatura média diária e a insolação diária, para cada dia do referido período, seguem demonstradas nos gráficos da Figura 5.



6.2 Energia estimada

Vários fatores ambientais podem alterar o funcionamento de uma célula fotovoltaica, alguns deles são afetados principalmente pela localização geográfica, pelo dia do ano ou pelas condições climáticas. Dentre eles, a temperatura e irradiância são apontados como mais relevantes, tanto que os seus efeitos já foram incluídos no equacionamento da modelagem proposta, e podem ser entendidos como dados de entrada do modelo.

A primeira etapa para calcular a estimativa da energia gerada pelo sistema consiste em caracterizar o módulo fotovoltaico utilizado no sistema que compõe o experimento. Para isso, é preciso encontrar os parâmetros do modelo. Seguindo a rotina da Metodologia melhorada, descrita no fluxograma da Figura 4 (d), o módulo fotovoltaico utilizado no experimento teve seus parâmetros encontrados ($a = 1,08$; $R_S = 0,32$ Ω; $R_P = 242,5$ Ω, e $RMSE = 0,084\%$).

Após parametrizar o módulo fotovoltaico, a próxima etapa do processo é a sua caracterização, que consiste em determinar as curvas características para diferentes condições de temperatura e irradiância, conforme apresentadas nas Figura 6 (a) e Figura 6 (b), respectivamente. A modelagem obteve sucesso ao que se propunha para caracterizar o módulo fotovoltaico, pois além das curvas apresentarem os padrões esperados, elas convergiram para as curvas experimentais apresentadas na folha de dados.

Com o módulo devidamente parametrizado e caracterizado, foram utilizados como dados de entrada da simulação todos os 4.464 pares de medições de temperatura e irradiância aferidos experimentalmente ao longo do mês de agosto de 2016. A simulação tem início ao levantar as curvas características para cada par temperatura e irradiância aferidos. Adota-se que o sistema possui um mecanismo ideal de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT, do inglês *Maximum Power Point Tracking*), garantindo que o módulo trabalhe sempre no ponto de operação que entrega a máxima potência possível ao sistema. Isto é, no joelho da curva de potência. Com esses dados foram plotadas as curvas de potência e assim calculada a quantidade de energia gerada pelo sistema. Utilizando a regra dos trapézios foi feita a integração numérica sob as curvas de potência dos 31 dias do mês de agosto, chegando à estimativa total de $180,1$ kW.h.

Com o objetivo de validar o cálculo da estimativa de geração do sistema através da rotina apresentada, foi calculada uma outra estimativa utilizando o método da insolação, amplamente utilizados, conforme descrito por (Villalva e Gazoli, 2014), (Lopes, 2012) e (Pinho e Galdino, 2014). Dessa forma, a geração total do mês, considerando a insolação medida aferida experimentalmente, através do método da insolação, foi de $187,715$ kW.h. Nota-se uma estimativa de geração maior que aquelas estimadas através do algoritmo desenvolvido. A Fig. 7 mostra ambas as estimativas de geração do sistema para cada dia.

Apesar de existir diferenças entre o quantitativo de energia gerado para as diferentes metodologias, essa é pequena, chegando no máximo a $4,05$ %. Na metodologia melhorada, como é baseada no modelo do diodo com resistência em série e em paralelo, as resistências introduzem ao modelo as perdas resistivas inerentes ao fluxo de corrente no material semicondutor, ao contato entre o material semicondutor e o eletrodo metálico, ao fluxo de corrente do material metálico que forma o eletrodo e as correntes de fuga na junção PN. Não são inseridas nessa modelagem as perdas por recombinação dos pares elétrons lacunas.

A estimativa elaborada utilizando o método da insolação apresentou valores um pouco mais elevados, sendo que nesse método já está sendo considerada a eficiência do módulo fotovoltaico. Talvez essa diferença aconteça pelo fato de como a eficiência do modo é calculada, levando em consideração apenas a operação do módulo exclusivamente nas condições padrões de testes, quando na verdade, esta, também deveria variar para diferentes condições de temperatura e irradiância.

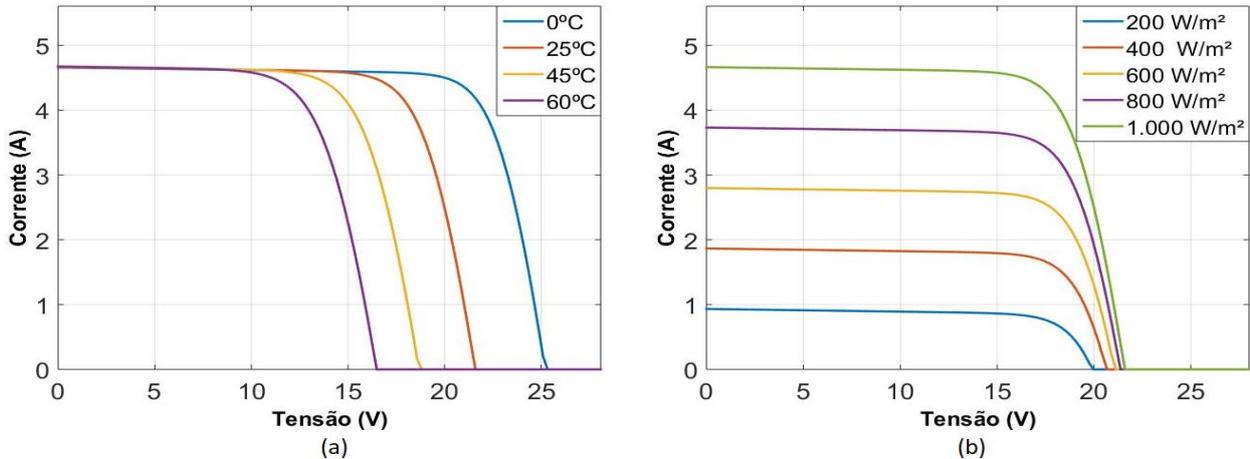


Figura 6. Curvas características $I \times V$ da célula fotovoltaica IS-70/12 obtidas para: (a) diferentes condições de temperatura e (b) diferentes condições de irradiância.

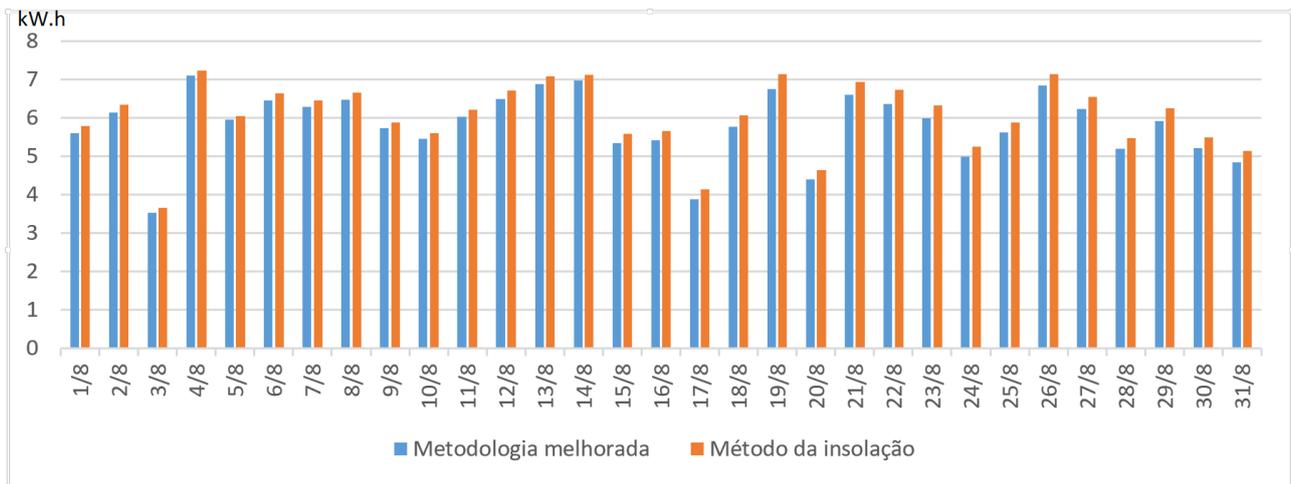


Fig. 7. Curvas da geração de energia estimada do sistema fotovoltaico do experimento, utilizando a metodologia melhorada e o método da insolação.

7. CONCLUSÃO

Partindo da modelagem de uma célula fotovoltaica na forma de circuitos elétricos, foi possível analisar metodologias de parametrização dos modelos de acordo com as informações disponibilizadas pelo fabricante na folha de dados, e compará-las através de análises do erro médio quadrado. Através de tentativas de melhorar a parametrização para que o erro de convergência entre as curvas características estimadas e aquelas da folha de dados fosse reduzido, foi possível alterar a metodologia escolhida que apresentou a melhor relação entre precisão e simplicidade. De posse de um modelo bem parametrizado o módulo é então caracterizado através de suas curvas características para diferentes condições de irradiância e temperatura, possibilitando que a metodologia fosse utilizada para simular o comportamento de um sistema fotovoltaico em reais condições de funcionamento, utilizando como dados de entrada valores de temperatura e irradiância aferidos e com médias registradas a cada 10 minutos durante o período de um mês.

Após a simulação do funcionamento do sistema fotovoltaico, foi possível comparar os resultados obtidos, na forma de energia gerada, com as estimativas de geração do mesmo sistema utilizando a metodologia melhorada e um método de dimensionamento bastante utilizado, baseado na insolação da região. Para que a comparação fosse realizada de forma justa, foi utilizada a insolação calculada através dos dados experimentais aferidos no experimento de medição meteorológica, ao invés de utilizar valores de insolação de tabelas e mapas de insolação que apresentam uma média da insolação anual. Estava previsto no início desse estudo, incluir na comparação a curva de energia efetivamente gerada pelo sistema, o que possibilitaria atestar os resultados simulados. Porém, devido a um defeito do inversor utilizado, não foi possível realizar tal análise.

Entende-se que os objetivos propostos por esse estudo tiveram êxito em sua formulação, pois se formou um arcabouço de conhecimentos que serviram de base para o desenvolvimento de uma análise detalhada da modelagem, caracterização e simulação do comportamento de uma célula fotovoltaica, sugerindo mudanças que vieram a melhorar a eficiência das metodologias, de forma a aproximar as curvas características estimadas daquelas disponibilizadas pelos fabricantes dos módulos. Outro ponto positivo que pode ser citado é que a metodologia proposta e o algoritmo desenvolvido pode ser facilmente incrementado com outros fatores que venham a tornar mais real o modelo do sistema como um todo, permitindo a realização de outras muitas análises, como monitorar uma planta fotovoltaica em tempo real.

REFERÊNCIAS

- Bellia, H., Youcef, R., Fatima, M., 2014. A detailed modeling of photovoltaic module using MATLAB. National Research Institute of Astronomy and Geophysics - NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics, Vol. 3, n. 1, pp. 53-61.
- Bowden, S., Honsberg, C. PV education. Disponível em: <<http://www.pveducation.org/>>. Acesso em: 10 Outubro 2015. Stuart Bowden and Christiana Honsberg work at the Solar Power Labs at ASU.
- Chin, V. J., Salam, Z., Ishaque, K., 2015. Cell modelling and model parameters estimation techniques for photovoltaic simulator application: A review, Applied Energy, Vol. 154, pp. 500-519.
- CRESESB. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito, 11 Junho 2008. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&cid=301>. Acesso em: 08 Fevereiro 2016.
- CRESESB. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito, 2015. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>>. Acesso em: 02 Junho 2015.
- Dezso Sera, R. T. P. R., 2007. PV panel model based on datasheet values, IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Vigo – Espanha, pp. 2392-2396.
- INMET, I. N. D. M.-. INMET. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br>>. Acesso em: 12 Julho 2017.
- Ishaque, K. et al., 2011. Modeling and simulation of photovoltaic (PV) system during partial shading based on a two-diode model. Simulation Modelling Practice and Theory, Vol. 19, pp. 1613-1626.
- Lele Peng, Y. S. Z. M., 2014. An improved model and parameters extraction for photovoltaic cells using only three state points at standard test condition, Journal of Power Sources, Vol. 248, pp. 621-631.
- Lopes, R. A. Energia Solar para Produção de Eletricidade. São Paulo: Artliber Editora, 2012.
- Alrashidi, M.R., Alhajri, M. F., El-Naggar, K. M., Al-Othman, A. K., 2011. A new estimation approach for determining the I-V characteristics of solar cells, Solar Energy, Vol. 85, n. 7, pp. 1543-1550.
- Pinho, J. T., Galdino, M. A., 2014. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos, CEPEL – CRESESB, Rio de Janeiro.
- Tsai, H.-L., Tu, C.-S.; Su, Y.-J., 2008. Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK, World Congress on Engineering and Computer Science 2008 - WCECS 2008. San Francisco: pp. 6.
- Villalva, M. G., Gazoli, J. R., 2014. Energia Solar Fotovoltaica, Conceitos e Aplicações, Sistemas Isolados e Conectados à Rede, São Paulo: Érica Ltda..
- Villalva, M. G., Gazoli, J. R., Filho, E. R., 2009. Modeling and circuit-based simulation of photovoltaic arrays, COBEP '09 - Power Electronics Conference IEEE, Brazilian, pp. 1244-1254.

ESTIMATION OF ENERGY GENERATION THROUGH MODELING A PHOTOVOLTAIC UNIT USING THE DATASHEET

Abstract. The use of renewable energy sources is the focus of contemporary discussions, given the finite character and impacts that nonrenewable traditional sources cause to the environment. Among the main renewable energy sources, solar energy is one of the most outstanding, especially in Brazil, which has enormous potential. Given the high cost of implementing a photovoltaic system, it is indispensable that the system design is carried out correctly, since carelessness at this stage influences the financial viability of the investment. Thus, this paper proposes a method to estimate the amount of energy that can be generated by a photovoltaic system using modeling techniques of photovoltaic cells in the form of electric circuits. To reach this goal, it is necessary to determine the parameters of a non-linear and transcendental equation derived from the model used. Due to the nonlinearity of this equation, it is necessary to use numerical methods for its solution, allowing different approaches to solve this problem. Thus, three parametrization methodologies found in the literature were analyzed, all of them considering the five parameters model, adjusted in three different points of the characteristic curve, maximum power point, short circuit point and open circuit point, using the values available on the manufacturer's datasheet. In a comparative way, an error analysis study was performed, based on the experimental curve presented in the datasheet. Through this analysis, one of the three methodologies studied was defined as the one that presented the best approximation. It was observed the possibility of increasing the chosen methodology, thus improving its accuracy. As a final result, the estimation of the energy generated by the photovoltaic system is presented using meteorological data collected experimentally in the city of João Pessoa / PB.

Keywords: Modeling, parameterization, photovoltaic power generation.