

Simulação e análise da influência da radiação e temperatura no desempenho de módulos fotovoltaicos

Amanda Santiago Beserra
Departamento de Engenharia e Tecnologia
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Mossoró, Brasil
amandynha_2008@hotmail.com

Herick Talles Queiroz Lemos
Departamento de Engenharia e Tecnologia
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Mossoró, Brasil
herick.lemos@ufersa.edu.br

Resumo — Em virtude da preocupação com o meio ambiente e com a redução da utilização de fontes não renováveis de energia, tem-se dado mais atenção ao avanço e estudo em tecnologias para recursos renováveis. Uma alternativa promissora às fontes convencionais e que vem ganhando destaque considerável na matriz energética mundial é a energia solar fotovoltaica. Trata-se de uma tecnologia que converte diretamente luz solar em eletricidade. A célula solar, feita de material semicondutor, é o dispositivo elementar dessa forma de energia e possui desempenho influenciado, principalmente, pela intensidade luminosa e sua temperatura de operação. Na literatura, vários métodos têm sido propostos para modelagem de células e módulos fotovoltaicos a fim de estimar o desempenho desses dispositivos para variadas condições de operação. Neste trabalho, é apresentado a simulação e análise da influência de variações na intensidade de radiação solar e temperatura no desempenho de um modelo comercial de módulo fotovoltaico, utilizado no projeto de sistemas fotovoltaicos conectados à rede. O modelo de simulação utilizado foi validado a partir da comparação entre curvas geradas com as curvas fornecidas pelo *datasheet* do módulo, podendo assim ser aplicado para avaliar o desempenho de painéis e arranjos fotovoltaicos do módulo utilizado no estudo para condições reais de operação.

Palavras-chave — Energia solar fotovoltaica, desempenho de módulos fotovoltaicos, modelagem de células fotovoltaicas.

I. INTRODUÇÃO

A energia é o alicerce do desenvolvimento de um país, de uma civilização e de qualquer tecnologia. Cada vez mais as pessoas têm acesso a energia elétrica, seja através da iluminação artificial, de utensílios domésticos, de aparelhos celulares, entre outros.

Em meio a esse cenário atual – aumento populacional, desenvolvimento econômico dos países, avanços tecnológicos – faz-se necessário o aumento do consumo de energia elétrica. Deste modo, a necessidade de suprir essa demanda tem impulsionado a busca por alternativas para a diversificação da matriz energética mundial e nacional, especialmente do que diz respeito às fontes limpas de geração de energia [1].

A energia solar fotovoltaica, capaz de gerar eletricidade através do efeito fotovoltaico, surge como uma das alternativas às fontes não renováveis e tradicionais

utilizadas atualmente no Brasil e no mundo, fornecendo energia limpa, com poucos impactos ambientais e menores perdas associados às redes de transmissão (devido à característica distribuída dessa fonte), principalmente no Brasil que possui altos índices de irradiação solar [2].

Além do papel ambiental, o sistema fotovoltaico também é vantajoso por não necessitar de controle humano e por apresentar alta durabilidade, com pouca necessidade de manutenção [3]. Tal sistema é composto basicamente pelas células fotovoltaicas, inversores e, no caso de sistemas isolados, controladores de carga e baterias.

A célula fotovoltaica, feita de materiais semicondutores como o silício cristalino, é o elemento fundamental deste tipo de tecnologia. Através do efeito fotovoltaico, as células convertem luz solar em energia elétrica. Para obtenção de potências comerciais, as células fotovoltaicas são eletricamente conectadas em associações série e paralelo, encapsuladas e montadas em uma única estrutura suporte, denominada módulo fotovoltaico [2]. Vários módulos podem ainda ser conectados e associados formando um painel solar.

Um problema recorrente em aplicações fotovoltaicas é a previsão do comportamento elétrico de um gerador fotovoltaico, visto que existem influências externas que afetam diretamente a sua operação. Sabe-se que, a maioria dos equipamentos são fabricados e testados sob condições padrões, desta forma a análise dos efeitos recorrente de variações nas condições externas, como temperatura e irradiação, em células fotovoltaicas é de suma importância para o projeto de sistemas cada vez mais eficientes e adequados à sua aplicação, visando sempre o melhor desempenho de energia, seja em qualquer local ou época do ano.

O presente trabalho tem como objetivo a simulação computacional utilizando o *software* MATLAB, através da aplicação do algoritmo de Newton-Raphson para a modelagem de um circuito equivalente de célula fotovoltaica, a fim de simular e analisar o comportamento de um módulo fotovoltaico sob influência de variações na sua temperatura de operação e na irradiação solar, observando os valores da saída para variadas condições de operação. Para isso, foi escolhido um modelo comercial de módulo e através de seus dados fornecidos pelo fabricante tornou-se possível a modelagem.

II. REFERENCIAL TEÓRICO

A. Energia Solar

Para [2] o aproveitamento da energia gerada pelo Sol, inesgotável na escala terrestre de tempo tanto como fonte calor quanto de luz, é hoje uma das alternativas energéticas mais promissoras para prover a energia necessária ao desenvolvimento humano.

Segundo [4] dentre as possíveis formas de energia que o homem conhece, a energia solar possui o maior potencial de gerar o suprimento necessário para humanidade. Atualmente, a mesma pode ser utilizada por meio de diferentes tecnologias que estão em constante ascensão, como o aquecimento solar (aquecimento de líquidos), energia solar fotovoltaica (geração de eletricidade), energia heliotérmica (energia térmica seguido de energia elétrica), arquitetura solar e até mesmo fotossíntese artificial.

As atividades e tecnologias empregadas na utilização solar são definidas como ativas ou passivas dependendo de sua aplicação. Entre as técnicas solares ativas estão o uso de painéis fotovoltaicos, concentradores solares térmicos de usinas heliotérmicas e aquecedores solares. Já entre as técnicas solares passivas estão o posicionamento de um edifício em relação ao Sol de acordo com a necessidade, a projeção de espaços que façam a luz adentrar naturalmente e a seleção de materiais com massa térmica favorável ou propriedades translúcidas [4].

B. Energia Solar Fotovoltaica

Em 1839, Edmond Becquerel descobriu o chamado efeito fotovoltaico quando observou que alguns materiais, geralmente metais, poderiam emitir elétrons produzindo quantidades pequenas de corrente quando expostos a radiação eletromagnética, ou seja, a luz [2]. O efeito fotovoltaico é a base da utilização das células solares, que são equipamentos formados de silício cristalino e são responsáveis por transformar a energia luminosa proveniente do sol em energia elétrica.

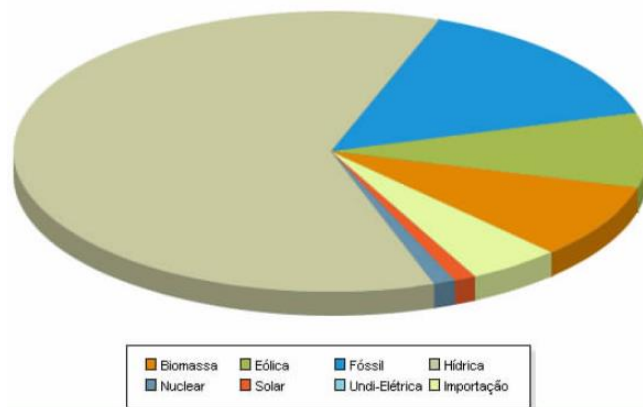
Em 1883 foram produzidos os primeiros dispositivos fotovoltaicos por C. E. Frits, que utilizou selênio para a fabricação de uma célula fotovoltaica. Atualmente, o material mais empregado para a fabricação da mesma é o silício devido a sua abundância na crosta terrestre [2]. De acordo com [5] cerca de 96% das células solares do mundo usam como material semicondutor o silício, com rendimento entre 13% a 17%.

Antigamente, por volta da década de 50, os painéis solares convertiam apenas 4,5% da energia solar em eletricidade, o que correspondia a 13 Wp/m². Atualmente, a eficiência média mundial triplicou para 15% (143 Wp/m²), a um custo centenas de vezes mais barato. Até 2022 espera-se que a faixa de preços recue ainda mais, quando já haverá painéis solares com eficiência de conversão de 23,5% (348 Wp/m²) [6].

A energia solar fotovoltaica é caracterizada por ser uma fonte limpa, renovável e com poucos impactos ambientais. No Brasil, a mesma encontra-se cada vez mais

difundida. [7] analisou que, em 2018, existiam por volta de 2.468 usinas solares, com capacidade instalada de 2.070,752 MW de potência. De acordo com [8] o Brasil terá um crescimento em cerca de 44% na sua capacidade instalada, principalmente devido a maior adesão de projetos de mini e micro geração distribuída. A Figura 1 mostra o potencial elétrico no Brasil e a participação, ainda que pequena, da energia solar fotovoltaica.

Figura 1 – Potencial elétrico brasileiro.



Fonte: [7].

C. Células Solares Fotovoltaicas

Existem na natureza materiais classificados como semicondutores, que são caracterizados por apresentarem uma banda de valência e outra de condução. A separação entre essas duas bandas de energia denomina-se banda proibida ou *bandgap*, podendo atingir um nível de energia de até 3 elétrons volts [5].

Para [5] uma característica importante desses materiais é o aumento da condutividade com a temperatura, proporcionado pela excitação térmica dos elétrons da banda de valência para a banda de condução, formando lacunas na primeira e excesso de elétrons na segunda.

Além da geração térmica, quando a energia solar (fótons) incide sobre esses materiais, com uma energia superior a energia da *bandgap*, excitam a célula, gerando pares de elétron-lacuna. Se os fótons tiverem energia suficiente, os elétrons são capazes de superar o campo elétrico existente, fazendo com que os elétrons circulem de um átomo para outro átomo, formando uma corrente que pode ser armazenada e que é proporcional à irradiação solar [5].

De maneira geral, as células fotovoltaicas consistem em uma junção PN em uma fina camada de semicondutor. De acordo com [3], para células de silício, existem basicamente três tipos conforme o método de fabricação:

- **Silício Monocristalino:** são obtidas a partir de barras cilíndricas de silício monocristalino produzidas em fornos especiais. Através de cortes nas barras, em forma de pastilhas finas (0,4 a 0,5 mm de espessura), são produzidas as células, que apresentam eficiência na conversão da luz solar em eletricidade superior a 12%.
- **Silício Policristalino:** blocos de silício obtidos por fusão de silício puro em moldes especiais forma as células. Uma vez nos moldes, o silício arrefece lentamente e solidifica-se. Neste processo, os átomos não se organizam num único

cristal, assim forma-se uma estrutura policristalina com superfícies de separação entre os cristais. A eficiência na conversão é ligeiramente menor do que a anterior.

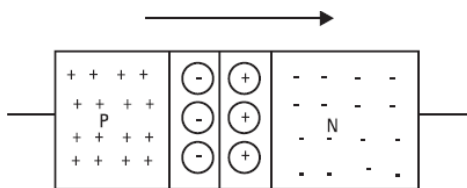
- Filme Fino ou Silício Amorfo: estas células são obtidas através da deposição de camadas muito finas de silício ou outros materiais semicondutores sobre superfícies de vidro ou metal. Sua eficiência na conversão varia entre 5% e 7%.

Os dispositivos fotovoltaicos podem ser associados em série ou em paralelo de modo a formar qualquer combinação necessária de tensão e corrente na saída do sistema. Tais dispositivos podem ser células, módulos ou arranjos. Em virtude da célula ser a unidade básica do sistema, a análise de desempenho elétrico dos geradores fotovoltaicos é feita a partir do estudo do modelo de circuito equivalente da célula fotovoltaica. Para as células de silício, por exemplo, o circuito equivalente pode ser obtido a partir do modelo de Shockley para o diodo ideal [5].

I. Modelo de Células Fotovoltaicas

Como visto anteriormente, cada célula solar é composta por uma junção PN, sendo uma fina camada de material tipo N e uma mais espessa de material tipo P. Nesta junção, ao serem excitados, os elétrons livres migram do lado P (Positivo) para o lado N (Negativo) [8], como mostra a Figura 2.

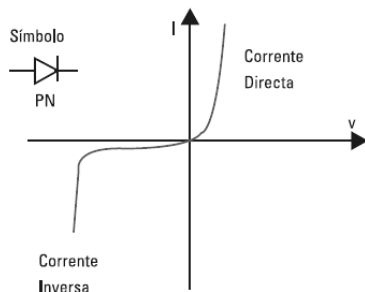
Figura 2 – Junção PN do diodo.



Fonte: [5].

No caso das células de silício, o seu circuito equivalente pode ser obtido a partir do modelo de Shockley (Modelo que possui dois terminais e apresenta dois estados: um de bloqueio ou alta impedância e um de condução ou baixa impedância) do diodo ideal [2]. A Figura 3 ilustra a curva característica da junção PN do diodo.

Figura 3 – Curva da junção PN do diodo.



Fonte: [5].

II. Circuitos Equivalentes

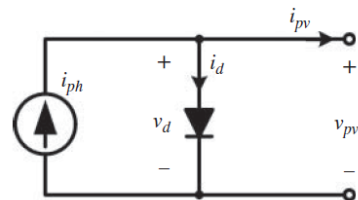
Para [12], existem pelo menos duas abordagens quanto aos circuitos elétricos que representam as células solares baseadas na conhecida equação do diodo de Shockley: o modelo de um diodo e o de dois diodos. As

versões mais comuns desse modelo serão apresentadas a seguir.

1) Modelo de diodo ideal

Segundo [10], este modelo ideal consiste em uma fonte de corrente constante em paralelo com um diodo. Este modelo é descrito por três parâmetros: a corrente fotogerada, corrente de saturação e o fator de idealidade do diodo. A Figura 4 ilustra o circuito equivalente para este modelo.

Figura 4 – Modelo de circuito ideal.



Fonte: [11].

A corrente de saída I_{pv} , descrita através das Leis de Kirchhoff, é dada pela Equação 1.

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{qV_d}{K.Tc.An}} - 1 \right) \quad (1)$$

Onde:

- I_{ph} : é a corrente fotogerada (A);
- I_s : é a corrente de saturação de polarização reversa do diodo (A);
- V_d : tensão no diodo que é igual a tensão nos terminais de saída $V_d = V_{pv}$ (V);
- q : é a carga elementar do elétron (C);
- K : Constante de Boltzmann (J/K);
- Tc : Temperatura da célula (°K);
- An : fator de idealidade do diodo.

O fator de idealidade do diodo assume valores entre 1 e 2. A constante de Boltzmann equivale $k = 1,38 \times 10^{-23}$ J/K e q equivale a $1,6 \times 10^{-19}$ C [5]. O termo da exponencial da Equação 1 é geralmente simplificado para:

$$V_t = \frac{K.Tc}{q} \quad (2)$$

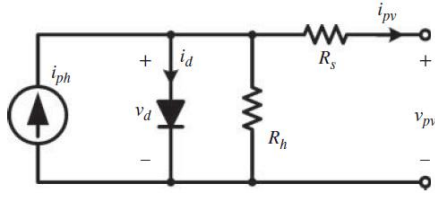
Onde V_t é denominado potencial térmico dos terminais da célula fotovoltaica.

2) Modelo de diodo simples

Este modelo consiste em uma fonte de corrente constante em paralelo com um diodo acrescido de duas resistências, uma série e outra em paralelo. A resistência em série é introduzida para representar as perdas pelo efeito Joule devido as resistências internas, os contatos e interconexões entre os módulos. Enquanto que, a resistência em paralelo, é inserida para representar as perdas que advém do próprio processo de fabricação da célula, caracterizado pelo surgimento de correntes parasitas que circulam no material devido a pequenas imperfeições na estrutura do material [5].

A Figura 5 ilustra o circuito equivalente para este modelo, onde R_s é a resistência série e R_h é a resistência em paralelo, ambas em Ohms (Ω).

Figura 5 – Modelo de circuito de diodo simples.



Fonte: [11].

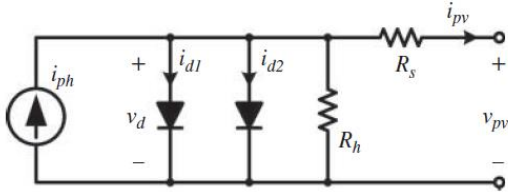
Conforme ilustrado na Figura 5, esse modelo de célula possui cinco parâmetros: a corrente fotogerada, a corrente de saturação reversa, o fator de idealidade do diodo, a resistência série e a resistência paralela ou shunt [9]. A Equação 3, obtida a partir das Leis de Kirchhoff, descreve a equação da corrente de saída I_{pv} da célula.

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{V_t A n}} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{R_h} \quad (3)$$

3) Modelo de dois diodos

Este modelo consiste em uma fonte de corrente constante em paralelo com dois diodos. Com a inserção do segundo diodo, esse modelo passa a possuir sete parâmetros: a corrente fotogerada, a corrente de saturação reversa do diodo, fator de idealidade do diodo – ambos com valores diferentes para os diodos 1 e 2 – e as resistências série e paralelo [9]. A Figura 6 ilustra o circuito equivalente para este modelo.

Figura 6 – Modelo de circuito de dois diodos.



Fonte: [11].

A Equação 4, obtida a partir das Leis de Kirchhoff, apresenta a equação da corrente de saída I_{pv} da célula, usando o modelo de dois diodos.

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{s1} \left(e^{\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{V_t A n_1}} - 1 \right) - I_{s2} \left(e^{\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{V_t A n_2}} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{R_h} \quad (4)$$

D. Método de Newton-Raphson

O método iterativo mais conhecido e amplamente estudado para resolução de sistemas de equações não-lineares é o método de Newton-Raphson. Este método consiste, basicamente, em construir um modelo local linear, partindo das derivadas parciais da função $F(x)$ [13].

O modelo matemático de Newton é o método que será adotado neste trabalho para calcular os parâmetros das células. Este método é utilizado para encontrar os valores ou, uma aproximação tão boa quanto a desejada, das raízes de funções ou até mesmo de sistemas não-lineares através de sucessivas iterações [14].

De acordo com [15], nem sempre a interpretação geométrica é verdadeira, ou seja, o Método de Newton-

Raphson pode resultar em uma divergência entre a sequência de aproximações e a raiz, dependendo das condições do ponto inicial x_0 e da função $F(x)$. Porém, se o valor inicial for escolhido adequadamente, ou seja, suficientemente próximo ao valor da raiz desejada, a solução quase sempre é certa.

A Equação 5 apresenta a equação de atualização das variáveis do método.

$$[x]_{i+1} = [x]_i - J[x]^{-1} * [F(x)] \quad (5)$$

Onde:

- x_{i+1} : é o valor posterior de x ;
- x_i : é o valor atual de x ;
- $F(x)$: a função ou sistema de equações;
- J : é a matriz Jacobiana que contém as derivadas parciais de $F(x)$.

III. METODOLOGIA

A Seção III consiste na metodologia utilizada para modelagem e avaliação do desempenho de um módulo comercial utilizado em sistemas fotovoltaicos conectados à rede.

A. Módulo fotovoltaico simulado

O módulo adotado no estudo foi do fabricante CanadianSolar, da linha MaxPower 1500V, modelo CS6U-330P. A Tabela 1 apresenta as características elétricas do módulo em condições de teste padrão ou STC (1000 W/m²; 298 K ou 25 °C), isto é: potência no ponto de máxima potência P_{mp} (W), corrente de curto-circuito I_{sc} (A), tensão de circuito aberto V_{oc} (V), corrente no ponto de máxima potência I_{mp} (A) e tensão no ponto de máxima potência V_{mp} (V). Os coeficientes de correção de temperatura corrente α_T (%/°C), tensão β_T (%/°C) e potência γ_T (%/°C) também estão presentes, além das dimensões do módulo e tipo de material.

Tabela 1 – Dados do painel solar CanadianSolar CS6U-320P.

Informações Básicas				
Fabricante	Modelo	Material	Dimensões	
Canadian Solar	CS6U-330P	Policristalino	1960x992x40mm	
Características Elétricas para STC				
P_{mp}	I_{sc}	V_{oc}	I_{mp}	V_{mp}
330 W	9,45 A	45,6 V	8,88A	37,2 V
Eficiência 16,97 %				
Coeficientes de Temperatura				
Corrente		Tensão	Potência	
α_T (%/°C)		β_T (%/°C)	γ_T (%/°C)	
0,05		-0,31	-0,4	

Fonte: Adaptado de [16].

B. Modelagem para o Modelo com diodo simples ideal

Para o presente estudo, utilizou-se o modelo de diodo simples ideal, a fim de simular o desempenho do módulo fotovoltaico escolhido. Como visto anteriormente, o modelo ideal (Figura 4) apresenta três parâmetros a serem

calculados: corrente fotogerada, corrente de saturação reversa do diodo e fator de idealidade do diodo. Para obtenção desses parâmetros é necessário a formulação de três equações tomando como base as condições de STC para curto-circuito, circuito aberto e operação no ponto de máxima potência. A seguir é apresentado a dedução dessas equações.

1) Condição de Curto-Circuito

A condição de curto-circuito é obtida quando os terminais do módulo fotovoltaico são submetidos a uma diferença de potencial igual a zero. Nesta condição, a corrente de saída do módulo é máxima e igual a corrente de curto-circuito. Além disso, com o diodo em curto-circuito, a corrente fotogerada passa a circular diretamente para a saída, visto que a corrente sempre procura o trecho com menor impedância. Desse modo, a corrente de saída será igual a corrente fotogerada $I_{pv} = I_{ph}$ e ambas iguais a corrente de curto-circuito, fornecida pela folha de dados do módulo. Portanto, para a condição de curto-circuito, a Equação (1) torna-se:

$$I_{pv} = I_{ph} = I_{sc} \quad (6)$$

2) Condição de Circuito Aberto

A condição de circuito aberto é obtida quando os terminais do módulo fotovoltaico não possui corrente elétrica circulando sendo a máxima tensão que a célula pode fornecer. Para este caso, a corrente de saída é zero e a corrente fotogerada será a mesma que passará pelo diodo $I_{ph} = I_d$ e, de acordo com a condição anterior, a corrente fotogerada possui o mesmo valor da corrente de curto-circuito, fornecida pela folha de dados.

A tensão de saída dos terminais da célula será a tensão de circuito aberto, também fornecida na folha de dados do módulo. Da equação do diodo de Shockley, tem-se:

$$I_{ph} = I_d = I_{sc} = I_s \left(e^{\frac{V_{oc}}{V_t \cdot A_n}} - 1 \right) \quad (7)$$

3) Condição de Máxima Potência

A condição de máxima potência ocorre quando se tem a máxima potência de saída transferida pela célula. Neste ponto, a tensão de saída será substituída pela tensão de máxima potência e a corrente de saída será substituída pela corrente de máxima potência. Assim, da Equação (1), tem-se:

$$I_{mp} = I_{ph} - I_d = I_{sc} - I_s \left(e^{\frac{V_{mp}}{V_t \cdot A_n}} - 1 \right) \quad (8)$$

Posteriormente à análise das três condições, obteve-se um sistema de equações não lineares com três variáveis (I_{ph} , I_s e A_n). O próximo passo então é aplicar o algoritmo de Newton a fim de se obter a solução (ou um valor aproximado do desejado) a partir de sucessivas iterações e com base em valores iniciais atribuídos para as variáveis em um procedimento de atualização. Quando as condições são satisfeitas, as iterações são interrompidas e os valores dos parâmetros são encontrados.

De acordo com a primeira condição, a corrente fotogerada é igual a corrente de curto-circuito, que já é um valor conhecido nos dados do painel, desta maneira foi considerado para as condições posteriores, simplificando e

formando um sistema de duas equações $F_1(x)$ e $F_2(x)$. Tem-se:

$$F(x) = \begin{cases} I_{sc} - I_s \left(e^{\frac{V_{oc}}{V_t \cdot A_n}} - 1 \right) = 0 \\ I_{mp} - I_{sc} + I_s \left(e^{\frac{V_{mp}}{V_t \cdot A_n}} - 1 \right) = 0 \end{cases}$$

De acordo com a Equação 5, para o modelo matemático de Newton, há necessidade de se calcular a matriz Jacobianda, que trata-se de uma matriz de derivadas parciais de $F(x)$ em relação aos parâmetros I_s e A_n . A matriz Jacobiana é dada por:

$$J[F(x)] = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1(x)}{\partial I_s} & \frac{\partial F_1(x)}{\partial A_n} \\ \frac{\partial F_2(x)}{\partial I_s} & \frac{\partial F_2(x)}{\partial A_n} \end{bmatrix}$$

Onde:

$$\begin{aligned} \bullet \frac{\partial F_1(x)}{\partial I_s} &= -I_s \left(e^{\frac{V_{oc}}{V_t \cdot A_n}} - 1 \right) \\ \bullet \frac{\partial F_1(x)}{\partial A_n} &= I_s \frac{V_{oc}}{V_t \cdot A_n^2} \left(e^{\frac{V_{oc}}{V_t \cdot A_n}} \right) \\ \bullet \frac{\partial F_2(x)}{\partial I_s} &= I_s \left(e^{\frac{V_{mp}}{V_t \cdot A_n}} - 1 \right) \\ \bullet \frac{\partial F_2(x)}{\partial A_n} &= -I_s \frac{V_{mp}}{V_t \cdot A_n^2} \left(e^{\frac{V_{mp}}{V_t \cdot A_n}} \right) \end{aligned}$$

Assim, todos os termos da Equação (5) foram descritos e, como dito anteriormente, a resolução do sistema parte da atribuição de valores iniciais para a matriz de variáveis: $x^0 = \begin{bmatrix} I_s \\ A_n \end{bmatrix}^0$

O presente trabalho utilizou o software MATLAB para a implementação do algoritmo de Newton-Raphson. Com base nos valores da Tabela 1 fornecidos pelo fabricante do modelo do painel adotado e aplicando valores iniciais para I_s e A_n de 1×10^{-6} A e 1,5, respectivamente. Logo, a solução para a Equação 5 pode ser descrita a seguir.

$$\begin{bmatrix} I_s \\ A_n \end{bmatrix}^{i+1} = \begin{bmatrix} I_s \\ A_n \end{bmatrix}^i - \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1(x)}{\partial I_s} & \frac{\partial F_1(x)}{\partial A_n} \\ \frac{\partial F_2(x)}{\partial I_s} & \frac{\partial F_2(x)}{\partial A_n} \end{bmatrix}^{-1} * F(x)$$

I. Influência da Temperatura e Irradiação

As condições apresentadas até o momento referem-se às condições de teste padrão (STC) da irradiação solar, massa de ar e temperatura da célula. Na realidade, as condições podem ser significativamente diferentes do STC, podendo variar de região para região e de estação para estação. Dessa forma, deve-se prever que os valores de tensão e corrente de saída das células devem responder às variações tanto na temperatura como na irradiação.

O fabricante de células fotovoltaicas geralmente fornece coeficientes de correção para temperatura e irradiação, que são derivados de avaliações experimentais. Os coeficientes de temperatura para a corrente de saída, tensão de saída e potência são denotados por α_T , β_T e γ_T , respectivamente, conforme Tabela 1.

Os fatores de correção de irradiação para a corrente foram obtidos pela razão entre a irradiação instantânea Ea , variando de 200 – 1000 W/m², e a irradiação no STC (1000 W/m²). Já a correção de irradiação para a tensão foi obtida pela razão entre as tensões V_{oc} , obtidas na curva fornecida pelo fabricante para cada valor de irradiação, e a tensão V_{oc} para a irradiação no STC (1000 W/m²). A Tabela 2 fornece os fatores de correções de irradiação obtidos para a corrente e tensão.

Tabela 2 – Valores de correção para irradiação.

Fatores de Correção para Irradiação		
Irradiação (W/m ²)	Corrente	Tensão
Ea	$\frac{Ea}{E_{stc}}$	$\frac{V_{oc}}{V_{oc_{stc}}}$
1000	1	0,981
800	0,8	0,957
600	0,6	0,937
400	0,4	0,918

Fonte: Autoria Própria.

Quando as condições são diferentes do STC, então a expressão que corrige a corrente fotogerada da célula, I_{ph} , pelos efeitos da radiação e temperatura é dada por:

$$I_{ph}(Ea, \Delta T) = \frac{Ea}{E_{stc}} I_{sc_{STC}} (1 + \alpha_T \cdot \Delta T) \quad (9)$$

Onde Ea representa o valor instantâneo da irradiação, ΔT a diferença de temperatura da célula e a temperatura no STC (25 °C). E_{stc} e $I_{sc_{STC}}$ são a irradiância e corrente de curto para o STC, respectivamente, que são valores fornecidos pelo fabricante. Para a tensão V_{oc} , a expressão que corrige esses efeitos é dada por:

$$V_{oc}(Ea, \Delta T) = V_{oc_{STC}} (1 + \beta_T \cdot \Delta T) v_T \quad (10)$$

Onde o valor de $V_{oc_{STC}}$ é a tensão de circuito aberto para o STC e v_T é o coeficiente de correção de V_{oc} para variações na irradiação. O parâmetro v_T trata-se de um valor não-linear e é obtido a partir da equação da curva que relaciona $\frac{V_{oc}}{V_{oc_{stc}}}$, conforme Tabela 2, com a irradiação instantânea Ea . Essa equação é uma função polinomial que é usada para corrigir a tensão em níveis de irradiação.

A partir das Equações (9) e (10), obtém-se a equação que corrige a corrente de saturação reversa do diodo I_s e por fim, de forma geral, a equação que corrige a corrente de saída da célula fotovoltaica I_{pv} . Ambas são dadas, respectivamente, a seguir.

$$I_s(Ea, \Delta T) = \frac{I_{ph}(Ea, \Delta T)}{e^{\left[\frac{q V_{oc}(Ea, \Delta T)}{K T c A n} \right] - 1}} \quad (11)$$

e

$$I_{pv}(Ea, \Delta T) = I_{ph}(Ea, \Delta T) - I_s(Ea, \Delta T) \left[e^{\left[\frac{q V_{oc}(Ea, \Delta T)}{K T c A n} \right]} - 1 \right] \quad (12)$$

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como visto, os inúmeros módulos fotovoltaicos existentes no mercado podem ser definidas por diferentes modelos de circuitos elétricos. Esses modelos de circuitos baseiam-se nas características e dados do módulo fornecidos pelo fabricante que são obtidos experimentalmente através de testes em laboratórios, considerando condições padrões como temperatura a 25°C e irradiância de 1000 W/m².

O intuito do presente trabalho foi modelar um desses circuitos e calcular seus parâmetros, que não são conhecidos, para um módulo fotovoltaico comercial através da combinação de condições obtidas pelas análises das equações que definem o circuito e da aplicação do modelo matemático de Newton-Rahpson. Desta maneira, nessa seção serão apresentados os resultados obtidos nas simulações, as correções das equações considerando os efeitos da temperatura e irradiação e as análises das curvas geradas na saída do módulo.

Primeiramente, foi escolhido um modelo comercial de painel fotovoltaico e um modelo de circuito equivalente para se trabalhar. O circuito adotado foi o modelo ideal, de três parâmetros (I_{ph} , I_s e A_n) e que não considera as resistências. A partir disto, foi feita a análise do mesmo levando em consideração três condições: condição de curto-circuito, condição de circuito aberto e condição de máxima transmissão de potência.

O algoritmo utilizado para obtenção dos parâmetros do modelo foi implementado no software MATLAB. Para este caso, as variáveis eram a corrente de saturação reversa do diodo I_s e o fator de idealidade, A_n . A corrente fotogerada, I_{ph} , foi determinada como sendo igual a corrente de curto-circuito com base na condição 1 da metodologia.

No algoritmo utilizado, foi atribuído um número máximo de 100 iterações, um erro limite de 1×10^{-6} e os valores iniciais para I_s e A_n de $1,6 \times 10^{-6}$ A e 1,5 respectivamente. A Tabela 3 mostra os valores da corrente de saturação e fator de idealidade calculados para cada iteração. Verifica-se que foram necessárias apenas 6 iterações para o resultado convergir, segundo a precisão utilizada.

Tabela 3 – Valores de I_s e A_n para cada iteração.

Nº Iterações	I_s	A_n
1º	1,6048x10-6 A	1,5084
2º	1,6738x10-6 A	1,5615
3º	2,0708x10-6 A	1,6066
4º	2,2656x10-6 A	1,6182
5º	2,2763x10-6 A	1,6183
6º	2,2763x10-6 A	1,6183

Fonte: Autoria Própria.

No item II da Seção III, foi visto que nem sempre é possível que as células operem em condições padrões. Desta maneira, o segundo ponto foi corrigir os valores em relação a temperatura e irradiação. Para isso, utilizou-se o valor do

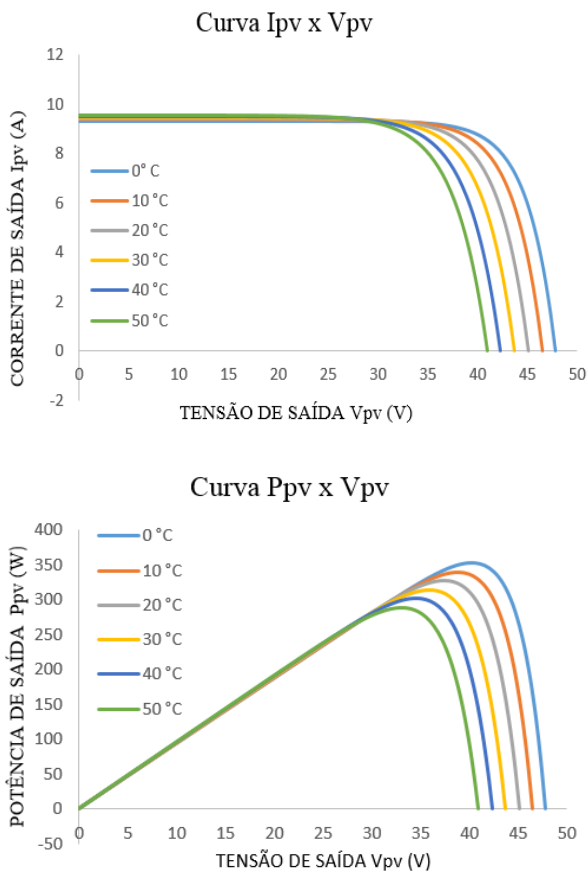
fator de idealidade An simulado na primeira parte do trabalho sob as condições de STC, visto que o mesmo é constante, independentemente das variações ambientais [10].

A correção foi aplicada na corrente fotogerada, I_{ph} , na tensão de circuito aberto, V_{oc} , e na corrente de saturação do diodo, I_s , e por fim, na corrente de saída do módulo, I_{pv} , para diferentes condições de temperatura e irradiação. Com a aplicação das equações de correção descritas na Seção III, pôde ser gerado as curvas ($I_{pv} \times V_{pv}$) e ($P_{pv} \times V_{pv}$) de saída da célula e então compara-las com as curvas fornecidas pelo *datasheet* do fabricante. As análises desses resultados são descritas a seguir.

A. Influência da Temperatura

Para analisar a influência da temperatura na saída das células fotovoltaicas foi tomado como constante a irradiação em 1000 W/m^2 e variou-se a temperatura de 0° à 50°C . A Figura 7 ilustra os efeitos dessa variação na corrente de saída em relação a tensão de saída e na potência de saída em relação a tensão de saída.

Figura 7 – Influência da variação de temperatura.



Fonte: Autoria Própria.

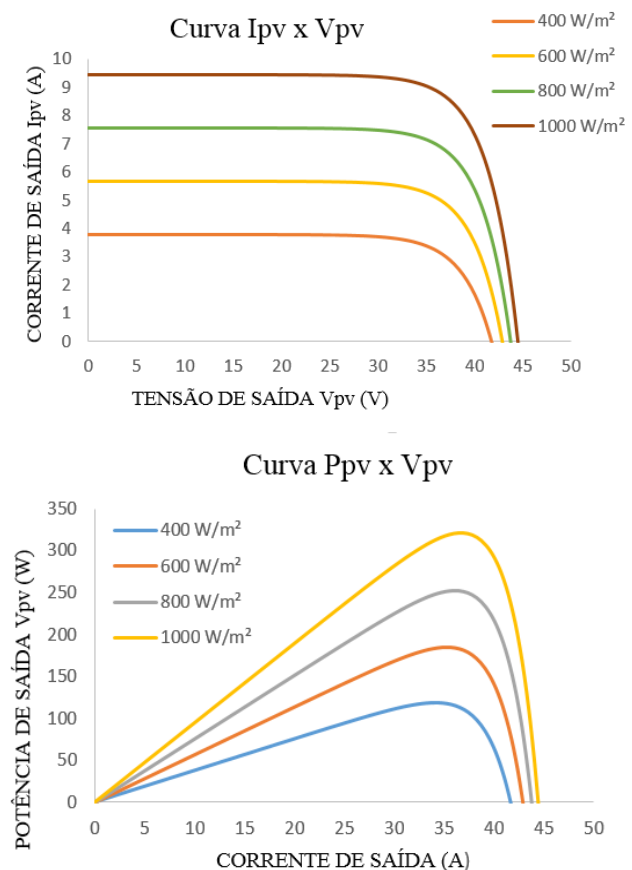
Notou-se que o aumento na temperatura age de forma inversa à tensão de saída da célula, fato que se comprova pelo sinal negativo do coeficiente de correção de temperatura para a tensão, dado na Tabela 1. Assim, quanto maior a temperatura de operação dos módulos em sistemas fotovoltaicos, menor a tensão que se pode obter em sua saída, o que não é benéfico para o sistema. No caso da corrente de saída, percebe-se que a mesma varia linearmente a favor da mudança de temperatura, porém com influência desprezível.

Para a potência de saída, percebe-se que a célula com temperatura inferior gera maior potência. Portanto, em caso de instalações de sistemas em ambientes quentes, a ventilação seria um ponto a ser considerado, a fim de um melhor desempenho elétrico, garantindo maior potência de geração.

B. Influência da Irradiação

Para analisar a influência da irradiação na saída das células fotovoltaicas, foi tomado como constante a temperatura em 25°C e variou-se a irradiação entre 400 W/m^2 à 1000 W/m^2 . A Figura 8 ilustra os efeitos dessa variação na corrente de saída em relação a tensão de saída e na potência de saída em relação a tensão de saída.

Figura 8 – Influência da variação da irradiação.



Fonte: Autoria Própria.

Para este caso, foi perceptível como a corrente de saída sofre influência da variação de irradiação. Neste caso, a influência foi positiva e considerável, ou seja, quanto maior a intensidade da irradiação maior será a corrente nos terminais da célula, por conseguinte maior é a corrente fotogerada. Para o caso da tensão de saída, a influência também foi positiva, assim a irradiação também influencia na tensão, porém de forma não tão considerável como para a corrente.

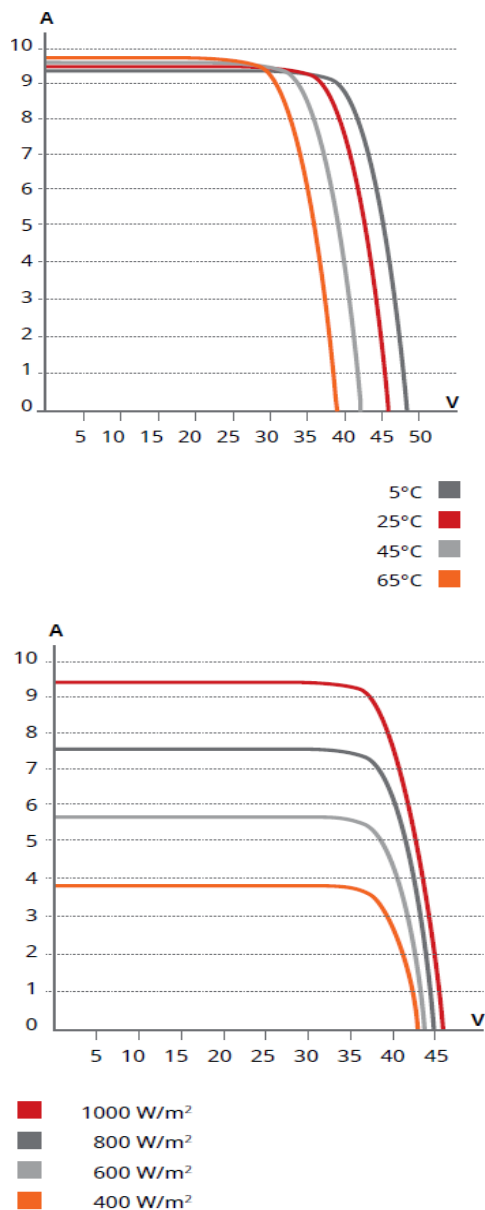
Em termos de potência, de modo geral, as curvas mostraram que a maior potência de geração fotovoltaica é obtida em alta irradiação solar e baixas temperaturas. Deste modo, a potência é proporcional a irradiação quando a temperatura é constante e inversamente proporcional a temperatura. Portanto, da análise dos gráficos, tem-se que sistemas fotovoltaicos operam melhor, com maior geração de

potência em situações de climas frescos e irradiações elevadas. Deste modo, percebe-se que o modelo escolhido de circuito, ainda que o modelo ideal, conseguiu representar bem os pontos críticos das curvas geradas (curto-circuito, circuito aberto e máxima potência), sendo satisfatório no presente estudo.

C. Curvas Fornecidas pelo Datasheet

A Figura 10 foi obtida do Datasheet fornecido pelo fabricante do módulo escolhido. A mesma mostra as curvas de ($I_{pv} \times V_{pv}$) de saída da célula sob a influência da temperatura e irradiação respectivamente. Para ambos os casos, notou-se uma total correspondência para os pontos críticos das curvas, tais como: tensão de circuito aberto, corrente de curto-circuito, corrente e tensão no ponto de máxima potência e potência máxima de saída.

Figura 10 – Influência da temperatura e Irradiação



Fonte: [16].

V. CONCLUSÃO

Sabe-se que problema recorrente em aplicações fotovoltaicas é a previsão do comportamento elétrico de um gerador fotovoltaico para determinada localização geográfica e clima local. Em particular, isso representa a base para prever a entrega de energia do gerador, que é uma etapa crítica de qualquer projeto de sistema solar fotovoltaico. Desta forma, a análise da influência das condições de temperatura e intensidade de radiação sob o comportamento de células fotovoltaicas é de suma importância para o projeto desses sistemas.

O presente estudo teve como objetivo simular esses efeitos para um modelo comercial de módulo utilizado em sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Através da modelagem aplicada ao circuito ideal de um diodo e utilizando o modelo matemático de Newton-Raphson, foi possível estimar os parâmetros como: corrente fotogerada, corrente de saturação reversa do diodo e fator de idealidade. Posteriormente, foi aplicada a correção nas equações para que os efeitos da temperatura e irradiação fossem considerados na modelagem e, por fim, apresentou-se as devidas análises para os valores de tensão, corrente e potência na saída da célula em estudo.

Por meio da comparação dos resultados obtidos no estudo com as curvas de desempenho apresentadas no *datasheet* fornecido pelo fabricante, pôde-se validar o modelo utilizado para o módulo comercial, o qual pode ser utilizado para realização de projetos mais eficientes e acurados tendo em vista a possibilidade de conhecer o desempenho do módulo fotovoltaico para suas condições reais de operação.

REFERÊNCIAS

- [1] CABRAL, Cláudia; NETO, Lauro; FILHO, Delly; DINIZ, Antônia. Modelagem e Simulação de Gerador Fotovoltaico. Revista Engenharia na Agricultura. Belo Horizonte, MG. 2009. 8 p.
- [2] CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Rio de Janeiro: CRESESB, 2014. 530p.
- [3] VIDAL, Leonardo; BARRA, Eduardo; PINHÃO, Jeferson. Modelagem e Simulação de um gerador fotovoltaico em MATLAB™ para estudo do uso de Cargas intermitentes. 2013. 16 p.
- [4] LENZ, Anderson Miguel. Uso da Energia Solar para o Aquecimento de Água e Microgeração de Eletricidade Visando a Sustentabilidade Energética de uma Residência Unifamiliar Rural. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia de Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná. 2016. 81 p.
- [5] PEREIRA, Filipi; OLIVEIRA, Manuel. Curso Técnico de Instalador de Energia Solar Fotovoltaica. 2ª Edição. Editora: Publindústria. Janeiro de 2015.
- [6] MME. Energia Solar Brasil e Mundo. 2017. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/358049/8/17+-+Energia+Solar+-+Brasil+e+Mundo+->

- +ano+ref.+2015+%28PDF%29/4b03ff2d-1452-4476-907d-d9301226d26c;jsessionid=41E8065CA95D1FABA7C8B26BB66878C9.srv154>. Acesso em: 10 jan. 2019.
- [7] ANEEL. Matriz Energética Elétrica. 2018. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acesso em: 10 de mar. 2019.
- [8] AMBIENTESOLAR. Meio Ambiente, Sustentabilidade e Inovação. 2019. Disponível em: <<https://www.ambienteenergia.com.br/index.php/2019/01/energia-solar-pode-crescer-44-brasil-em-2019/35578>>. Acesso: 10 de mar. 2019.
- [9] MUGHAL, Muhammad Ali; MA, Qishuang; XIÃO, Chunyan. Photovoltaic Cell Parameter Estimation Using Hybrid Particle Swarm Optimization and Simulated Annealing. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China. 2017. 14 p.
- [10] HARRAG, Abdelghani; MESSALTI, Sabir. Three, Five and Seven PV Model Parameters Extraction using PSO. International Conference on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, TMREES17, 21-24. Beirut Lebanon. 2017. 8 p.
- [11] XIÃO, Weidong. Photovoltaic Power System: Modeling, Design and Control. University of Sydney, Australia. 2017. 371 p.
- [12] HAMID, Nurul; RAHIM, Nasruddin; SELVARAJ, Jeyraj. Solar Cell Parameters Extraction Using Particle Swarm Optimization Algorithm. IEEE Conference on Clean Energy and Technology (CEAT). Perlis, Malásia. 2013. 5 p.
- [13] BORUCH, Isaias; SCALDELAI, Dirceu. Método de Newton para Resolução de Sistemas Não Lineares: uma abordagem gráfica no software GeoGebra. Colóquio Luso-Brasileiro de Educação (II COLBEDUCA). Joinville, SC. 2016. 485-497 p.
- [14] CASTILHO, José Eduardo. Cálculo Numérico. Faculdade de Matemática, Universidade Federal de Uberlândia. 2001. 93 p.
- [15] SILVA, Renato de Souza. Raiz de Função Polinomial pelo Método de Newton Raphson. Dissertação (Mestrado) – Curso de Matemática, Universidade Federal de Goiás. 2018. 71 p.
- [16] CANADIANSOLAR. Datasheet Max Power – CS6U 1500V. Disponível em: <<https://recursos.minhacasasolar.com.br/MediaCenter/Datasheet-Painel-Solar-Canadian-Solar-330W-CS6U-330P.pdf>>. Acesso em: 01 de mar. 2019.