

ENSAIOS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS PARA ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA EM SÉRIE E EM PARALELO COM A TEMPERATURA

Felipe Detzel Kipper¹, Fabiano Perin Gasparin¹, Cristiano Saboia Ruschel², Arno Krenzinger²

¹ Universidade Estadual do Rio Grande do Sul – Rua Sete de Setembro, 1156. Porto Alegre – RS, Brasil. Tel. +55 51 3288 9000

e-mail felipe_kipper@hotmail.com, gasparin.fabiano@gmail.com

² Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Laboratório de Energia Solar. Av. Bento Gonçalves, 9500. Porto Alegre – RS, Brasil. Tel. + 55 51 3308 6841

e-mail: cristianosaboia@gmail.com, arno.krenzinger@ufrgs.br

Recibido 09/08/18, aceptado 20/09/18

RESUMO: O modelo de um diodo é bastante difundido para simular o desempenho de dispositivos fotovoltaicos. Neste trabalho, quatro módulos fotovoltaicos de silício cristalino foram caracterizados em simulador solar em diversas condições de irradiância e temperatura. A resistência em série (R_S) e a resistência em paralelo (R_P) foram extraídas das curvas I-V por um método analítico com objetivo de se obter expressões que modelem sua dependência com a irradiância e temperatura. Os módulos fotovoltaicos foram ensaiados em irradiâncias de 75 a 1000 W/m² e temperaturas de 25 a 65 °C. Não foi obtido uma relação clara da variação de R_P com a temperatura, enquanto que R_S apresentou um aumento linear com a temperatura. A modelagem proposta da dependência de R_S com a temperatura e irradiância pode ser inserida no modelo de um diodo a fim de aumentar a precisão do cálculo das curvas I-V em ampla faixa de operação.

Palavras-chave: Energia solar fotovoltaica, resistência em série, resistência em paralelo.

INTRODUÇÃO

O consumo de energia elétrica é crescente em todo o planeta e sua utilização torna-se cada vez mais importante a medida em que novas tecnologias surgem, evoluem e se incorporam na vida da população, permitindo a expansão da economia, criação de empregos, avanço tecnológico e produção de alimentos em grande escala. O aumento do consumo de energia elétrica traz à tona a preocupação mundial com a emissão de gases do efeito estufa, tanto é que a redução das emissões de gases tornou-se tema constante em debates na sociedade contemporânea, visto que há dependência da matriz elétrica global dos combustíveis fósseis. Outro fator preocupante é a volatilidade do preço dos produtos derivados do petróleo, já que estes são *commodities* cujos preços apresentam grandes flutuações influenciadas pelo balanço de oferta e demanda, suas expectativas, e eventos geopolíticos.

No Brasil, a matriz elétrica é composta majoritariamente por usinas hidrelétricas, que são dependentes da abundância dos períodos de chuvas. Desse modo, é necessário que exista um suporte de usinas termelétricas que são acionadas em períodos de hidrologia desfavorável. Esse acionamento é responsável por aumentar as emissões de gases de efeito estufa e contribui para o aumento da tarifa de energia. Sendo assim, a diversificação da matriz elétrica com fontes renováveis pode auxiliar na complementação da produção de eletricidade sem aumento de emissões.

A energia solar fotovoltaica, que é a conversão direta da radiação solar em energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico, surge como uma alternativa viável já que é uma fonte renovável, limpa, confiável e que vêm se expandindo globalmente devido à queda nos custos de instalação dos sistemas fotovoltaicos. Por possuir uma característica modular é possível fazer desde a instalação de pequenos sistemas que ocupam áreas de telhado até grandes usinas fotovoltaicas.

A energia solar fotovoltaica é uma fonte de energia intermitente, que é dependente de diversos fatores, entre eles a disponibilidade de radiação solar, inclinação do módulo fotovoltaico, temperatura de operação, acúmulo de partículas sobre os módulos, eficiência de operação dos módulos e inversores, degradação do sistema ao longo do período de uso, entre outros. Em vista dessas particularidades é necessário que se faça uso de ferramentas que possam estimar e simular o desempenho dos diferentes componentes do sistema ao longo do tempo.

Normalmente, empregam-se programas de simulação computacional com modelos matemáticos para estimar o desempenho do sistema. Espera-se que o programa de simulação seja confiável, preciso e ainda apresente uma interface intuitiva ao usuário, proporcionando o uso do programa sem muitas dificuldades. Caso o modelo não seja preciso, há um aumento na incerteza associada à estimativa de produção, dificultando a decisão de investimento no sistema fotovoltaico. O uso da simulação da operação também pode ser uma ferramenta de supervisão das condições de operação dos diferentes componentes do sistema fotovoltaico, prevenindo possíveis falhas a partir de diferenças entre os dados reais e os dados simulados concomitantemente (Ruschel *et al.*, 2016).

A célula fotovoltaica é o elemento fundamental de conversão da energia solar em energia elétrica. A célula pode ser descrita e estudada de maneira eficiente por um modelo baseado em elementos de um circuito elétrico equivalente com o intuito de facilitar a compreensão e o seu uso. Shockley (1950) propôs uma equação para determinar a corrente do diodo, que pode ser utilizada para expressar as características da curva I-V de uma célula fotovoltaica ideal através da Equação (1):

$$I = I_{fg} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{mkT}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

Na Equação (1), I_{fg} é a fotocorrente gerada pela célula, I_0 é a corrente de saturação reversa do diodo, q é a carga do elétron, V é a tensão aplicada nos terminais da célula, m é o fator de idealidade do diodo, k é a constante de Boltzmann e T é a temperatura absoluta da célula. Essa equação é utilizada para representar apenas uma célula, entretanto, quando se pretende representar um módulo fotovoltaico é necessário adicionar um termo que represente o número de células associadas em série (N_s), dessa forma obtêm-se a Equação (2).

$$I = I_{fg} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{N_s mkT}\right) - 1 \right] \quad (2)$$

A Equação (2) representa o comportamento de um módulo fotovoltaico ideal. Entretanto, adicionando um elemento resistivo em série ao diodo, R_s , é possível obter uma melhor descrição das características da curva I-V dos módulos fotovoltaicos. Com o acréscimo da variável R_s ao modelo do diodo ideal o número de parâmetros aumenta para quatro. Esse modelo é conhecido por modelo de quatro parâmetros, descrito pela Equação (3).

$$I = I_{fg} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{N_s mkT}\right) - 1 \right] \quad (3)$$

Com o acréscimo de mais um elemento resistivo, uma resistência em paralelo (R_p), obtêm-se o modelo de um diodo de cinco parâmetros para módulos fotovoltaicos, descrito pela Equação (4).

$$I = I_{fg} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{N_s mkT}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (4)$$

Assim, no modelo de um diodo de cinco parâmetros, a corrente gerada pelo efeito fotovoltaico é representada por uma fonte de corrente, a junção PN é análoga a um diodo que incorpora os efeitos da corrente de saturação reversa e fator de idealidade do diodo. A resistência em série (R_S) e a resistência em paralelo (R_P) reúnem em um componente resistivo diversos fatores que originam perdas de potência. O modelo de um diodo de cinco parâmetros, representado na Figura 1 e descrito pela Equação (4), é amplamente utilizado para modelar o comportamento elétrico das células e módulos fotovoltaicos. Atualmente, é um dos modelos mais empregados para a simulação do desempenho dos módulos fotovoltaicos, visto que possui boa resposta considerando sua simplicidade e precisão.

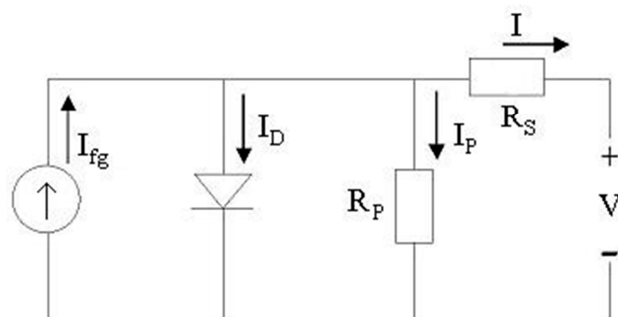


Figura 1: Circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica.

A resistência em série de uma célula fotovoltaica é um parâmetro global que compreende principalmente perdas no contato superior da célula, resistência do material da célula, resistência do contato da grade condutora na face anterior da célula e resistência ao longo do barramento e dos dedos de contato da parte anterior da célula. Já a resistência em paralelo tem origem, principalmente, em fugas de correntes pelas bordas das células, em pequenos curto circuitos ou qualquer outro caminho alternativo para a corrente fotogerada.

Em uma célula real é interessante que o valor de R_S seja o menor possível, próximo a zero, enquanto que o valor da resistência em paralelo deve ser o mais elevado possível (van Dyk e Meyer, 2004). Silva *et al.* (2016) reforçam o fato de que as células fotovoltaicas apresentam redução de eficiência durante a operação devido à dissipação de energia através de resistências internas e que é importante manter R_S com um valor reduzido, pois seu incremento causa redução da potência entregue pelo sistema.

De Soto *et al.* (2006) propõem considerar a variação de R_P de maneira inversamente proporcional com a irradiância e R_S constante. Os autores não mencionam a variação das resistências com a temperatura. Cerna *et al.* (2012) verificaram que a resistência em série dos módulos fotovoltaicos aumenta ligeiramente com a temperatura, e ao mesmo tempo apresenta redução mais significativa com o aumento da irradiância. Afirmam ainda que a dependência da resistência em série com a irradiância causa uma pequena variação na dependência da eficiência do módulo fotovoltaico com a irradiância.

Ghani *et al.* (2015) verificaram o aumento de R_S linearmente com a temperatura. A dependência de R_S com a temperatura ficou evidente no trabalho, já que apresentou aumento de cerca de 65% com a temperatura variando de 25 para 70 °C. A resistência em paralelo apresentou redução de cerca de 30% para a mesma variação de temperatura.

Van Dyk e Meyer (2004) comprovam que um aumento do R_S em cinco vezes, de 0,36 Ω para 1,8 Ω , implica na redução dos parâmetros de potência máxima (P_m) e fator de preenchimento (FF) em 25%. Já um aumento de dez vezes no valor de R_S , de 0,36 Ω para 3,6 Ω , reduz os

mesmos parâmetros em até 50%. Valores muito baixos de R_p tem um impacto severo na performance do módulo fotovoltaico. Em casos de níveis de irradiância mais baixos, mesmo com valores de R_p um pouco mais elevados, o impacto de R_p ainda é muito prejudicial ao funcionamento do sistema fotovoltaico. Ficou evidenciado no trabalho que valores muito pequenos de R_p são prejudiciais ao desempenho dos módulos fotovoltaicos, favorecem o aparecimento de pontos quentes (*hot spots*) nas células sombreadas e ainda reduzindo a eficiência com a redução dos níveis de irradiação incidente. Os resultados da investigação dos efeitos das resistências parasitas mostram que o aumento de R_s em conjunto com o efeito Staebler-Wronski, efeito que ocorre nas primeiras horas de exposição dos módulos ao Sol fazendo o rendimento cair a um terço do rendimento máximo, resulta na perda de 50% da potência em módulos de silício amorfo (a-Si). O módulo CIS apresentou redução de 29% no valor de R_p após o mesmo período de exposição e mesmas condições do módulo de a-Si, o que implica na perda de 6% de potência com irradiância de 1000 W/m². Com irradiância de 614 W/m² a perda de potência chega a 43%, enquanto que com irradiância de 169 W/m² a perda de potência é de 87%.

Basit *et al.* (2013) demonstraram que a redução de R_p e aumento de R_s causam redução do FF e da potência máxima. A redução excessiva de R_p causa queda na tensão de circuito aberto (V_{OC}) enquanto que o aumento de R_s causa queda na corrente de curto-circuito (I_{SC}). O efeito do aumento de R_s na curva I-V é ilustrado na Figura 2, onde são apresentadas curvas calculadas pelo modelo de um diodo para um módulo fotovoltaico típico de 60 células de 156 mm, a 1000 W/m² e 25 °C. Consequentemente a potência e FF acabam sendo afetados negativamente pelo efeito da resistência em série.

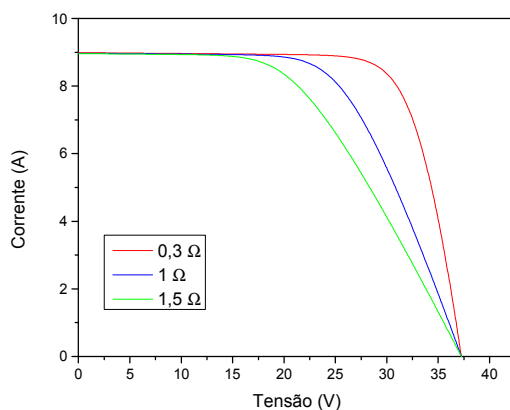


Figura 2: Variação da curva I-V com diferentes valores de R_s para um módulo fotovoltaico típico de 60 células nas condições de teste padrão.

Ruschel *et al.* (2016) analisaram seis grupos de módulos fotovoltaicos de diferentes tecnologias, um grupo de módulos de silício multicristalino, um segundo de silício monocristalino, um terceiro com tecnologia CIGS, um quarto com tecnologia de silício amorfo, um quinto grupo com células tandem com silício amorfo/multicristalino e por fim, um grupo com tecnologia Telureto de Cádmio. Os autores relataram uma tendência de aumento da resistência em paralelo em todos os grupos em condições de baixa irradiância. Foram observadas divergências entre as diferentes tecnologias fotovoltaicas. Módulos CIGS apresentaram menor variação da resistência em paralelo com a irradiância, com o valor máximo sendo, aproximadamente, sete vezes maior que o referenciado na STC (*standart test conditions*), que tem irradiância de 1000 W/m², temperatura da célula de 25 °C e espectro AM 1,5. Já os módulos de tecnologia tandem apresentaram variação de 40 vezes entre o valor de referência e a menor irradiância medida. O módulo de telureto de cádmio apresentou aumento de nove vezes na resistência em paralelo com

o decréscimo da irradiância de 1000 W/m² para 100 W/m², e a 75 W/m² o valor obtido para este parâmetro foi 76 vezes maior que o valor de referência.

Na maioria dos casos, os parâmetros R_S e R_P não são fornecidos pelos fabricantes nos *datasheets*. Em alguns casos é possível por meios matemáticos encontrar esses dados nas condições de *STC*, ou extraí-los diretamente de curvas I-V medidas em *STC*. Entretanto, a operação do sistema fotovoltaico dificilmente ocorre nestas condições, sendo necessário calcular tais parâmetros em todas as condições de operação. Para considerar os valores de R_S e R_P em toda a faixa de operação dos módulos fotovoltaicos é necessária uma relação matemática para descrever a dependência das resistências tanto com a irradiância como com a temperatura.

O comportamento de R_P e R_S com a irradiância já está suficientemente estabelecido na literatura, porém ainda há uma importante lacuna na descrição do comportamento de R_S com a irradiância e a temperatura simultaneamente. A investigação da dependência de R_P com a variação de temperatura também é alvo de investigação por não estar suficientemente estabelecida. Desta maneira, o objetivo principal deste trabalho é identificar relações que modelem o comportamento de R_P e R_S com a temperatura e irradiância a partir de medidas e análise de curvas I-V em diversas condições de operação.

METODOLOGIA

Os parâmetros R_S e R_P são facilmente calculados uma vez que se tenha as curvas I-V medidas. Outra maneira é pela utilização de meios matemáticos a partir dos dados do fabricante. As curvas I-V podem ser medidas utilizando um simulador solar (*indoor*) ou com iluminação natural (*outdoor*).

O método *indoor*, que foi o método utilizado para a obtenção dos parâmetros deste trabalho, consiste em utilizar uma fonte artificial de luz, ou seja, um simulador solar para possibilitar a determinação da curva I-V em condições controladas. Para determinação das curvas I-V em várias temperaturas, o módulo fotovoltaico é acomodado em uma câmara termostática a fim de se regular a temperatura até o valor requerido. Quando a temperatura está estabilizada, a câmara é momentaneamente aberta para expor o módulo à radiação para que se faça a medida da curva I-V, repetindo-se o procedimento para diversos valores de temperatura. Neste método de obtenção dos parâmetros, a temperatura do módulo deve ser uniforme em toda sua extensão, de modo que as incertezas das medidas sejam reduzidas. A variação da temperatura do módulo fotovoltaico no método *indoor* é normalmente mais lenta, já que o tempo para a temperatura do módulo estabelecer-se depende da potência utilizada no aquecimento. É importante salientar que o método *indoor* é independente de condições climáticas, facilitando a realização de ensaios.

No método *outdoor*, os módulos fotovoltaicos devem ser acomodados em um suporte para exposição solar com uma cobertura para bloquear a incidência da radiação antes do início das medidas. Para determinar curvas I-V em várias temperaturas, o módulo fotovoltaico deve iniciar o ensaio com temperatura próxima a 25 °C. Pode-se fazer o resfriamento utilizando algum fluido enquanto o módulo é mantido protegido da radiação solar (Gasparin e Krenzinger, 2015). O tempo de ensaio *outdoor* para realizar medidas em diversas temperaturas depende da taxa de aquecimento do módulo, que é função da irradiância incidente, da temperatura ambiente e da massa do módulo, sendo em geral de 15 a 20 minutos. No método *outdoor* todas as curvas I-V devem ser corrigidas para a mesma irradiância solar para obtenção dos coeficientes térmicos.

Os módulos fotovoltaicos dispostos na Tabela 1 foram submetidos a testes com variação da temperatura entre 25 e 65 °C, com incrementos de 10 °C a cada nova medida, e irradiância entre 75 e 1000 W/m². Para a caracterização dos módulos fotovoltaicos utilizou-se um simulador solar do tipo LAPSS (*Large Area Pulsed Solar Simulator*), modelo PASAN SunSim 3C, que

está instalado nas dependências do Laboratório de Energia Solar (LABSOL) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Módulo	Tecnologia	Potência (W)	Células em série
A	Silício monocristalino	260	60
B	Silício monocristalino	265	60
C	Silício multicristalino	315	72
D	Silício multicristalino	245	60

Tabela 1: Características nominais dos módulos testados.

O simulador solar possui flash de 10 ms e uma área de iluminação de 2 m x 2 m para o dispositivo que está sendo testado. A precisão elétrica é de, ao menos, 0,2% nas medidas de tensão e corrente, e a colimação da luz é menor que 15°. As características deste equipamento são consideravelmente superiores aos de um simulador solar classe A, que o torna adequado para a coleta dos dados necessários para a realização deste trabalho. A não uniformidade espacial medida no local após a instalação do simulador foi de 0,27% (Ruschel *et al.* 2016). As principais características do simulador solar utilizado estão expostas na Tabela 2.

Características	Simulador Solar Classe A	LAPSS PASAN SunSim 3C
Não uniformidade	2%	<1%
Instabilidade Temporal	2%	<1%
Relação de Correspondência do Espectro	0,75 – 1,25	0,875 – 1,125

Tabela 2: Características do LAPSS e requerimentos da IEC 60904-9 (2007) para simulador solar classe A.

Para a realização do estudo foram medidas as curvas I-V dos quatro módulos dispostos na Tabela 1 e assim obtida uma matriz de curvas com temperaturas de 25 a 65 °C e irradiância de 75 a 1000 W/m², de modo a se obter a variação dos parâmetros com as duas variáveis. A temperatura do módulo é variada com o auxílio de uma câmara de aquecimento com temperatura controlada. A câmara, ilustrada na Figura 3, possui dimensões aproximadas de 2,2 m x 1,35 m, comportando a maioria dos módulos fotovoltaicos convencionais. O aquecimento é realizado por resistências de fio que foram inseridas em uma placa de policarbonato vertical instalada no fundo da câmara, que totalizam aproximadamente 2500 W. O controle da temperatura é feito por um controlador Novus N1100, tendo como sensor um Pt 100 que é fixado na parte traseira do módulo. A câmara é equipada com ventiladores na parte inferior e superior ao suporte do módulo fotovoltaico para auxílio do processo de convecção forçada e uniformização da temperatura, que funcionam quando a porta está fechada. A uniformidade de temperatura foi medida por meio de 9 sensores Pt 100 fixados na parte traseira do módulo e lidos por uma unidade de aquisição Agilent 34970. A não uniformidade aumenta para temperaturas maiores, chegando a variações de ± 3 °C.

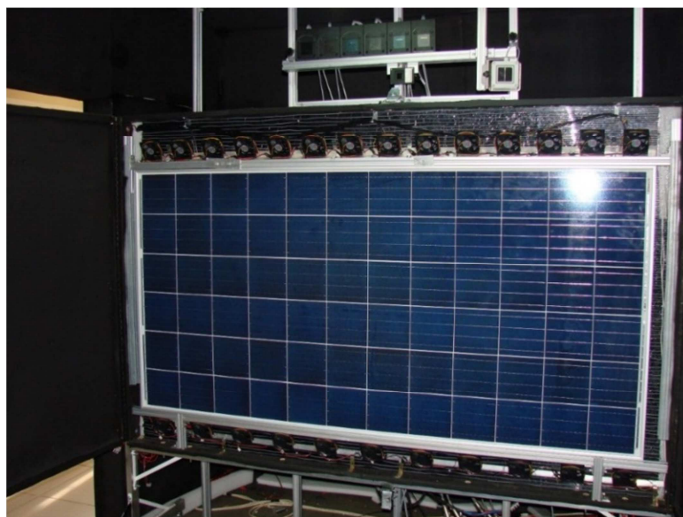


Figura 3: Câmara de aquecimento aberta com um módulo fotovoltaico inserido.

Os parâmetros das curvas I-V foram extraídos pelo método analítico proposto por Phang *et al.* (1984) e foram organizados em uma matriz de dados para cada um dos quatro módulos dispostos na Tabela 1, contendo dados de R_S e R_P , em função da temperatura e irradiância. As curvas I-V foram medidas com o módulo em temperatura estabilizada e uniforme ao longo de sua superfície, mantida pela câmara termostática.

RESULTADOS

Os dados de R_P foram normalizados em função do próprio parâmetro na temperatura de 25 °C, a fim de manter um padrão e facilitar seu tratamento. Entretanto, os valores de R_P não apresentaram um comportamento que permita obter uma conclusão da dependência de R_P com a temperatura, visto que houve elevada dispersão. A expressão de regressão obtida não permitiu obter um modelo do comportamento do parâmetro, como apresentado no gráfico da Figura 4, onde praticamente inexistente correlação.

Figura 4: Resistência em paralelo normalizada em função da temperatura de todos os módulos testados em todas as irradiâncias.

Para R_S , de maneira semelhante que em R_P , embora possa ser identificada a tendência de aumento de R_S com a temperatura, os dados apresentaram uma grande dispersão. A expressão de

regressão obtida tem correlação muito baixa para representar diretamente o comportamento do parâmetro com a precisão adequada. A Figura 5 apresenta o comportamento de R_S normalizado em função da temperatura, onde são reunidos os dados dos quatro módulos testados em todas as irradiâncias.

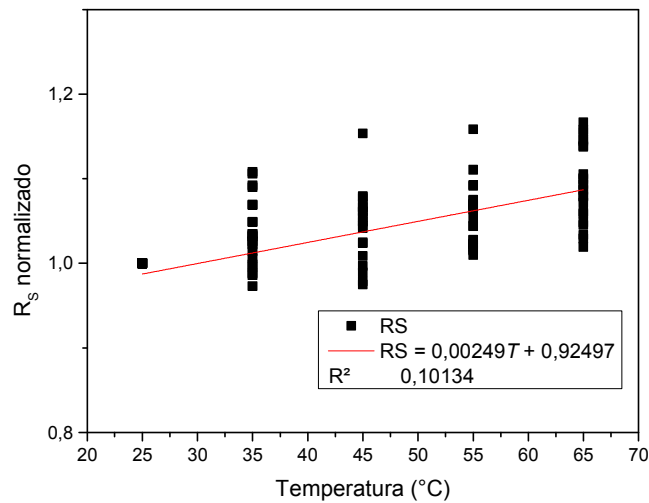


Figura 5: Resistência em série normalizada em função da temperatura de todos os módulos testados em todas as irradiâncias.

Entretanto, os dados de R_{S0} , definido como o inverso da declividade da curva I-V na região de circuito aberto, apresentaram uma correlação melhor do que a Figura 5 apresenta, permitindo que a expressão de regressão linear modelasse o comportamento do parâmetro com a temperatura de maneira adequada. O gráfico da Figura 6 apresenta o comportamento da variação de R_{S0} normalizado, mostrando claramente um incremento desse parâmetro com a temperatura.

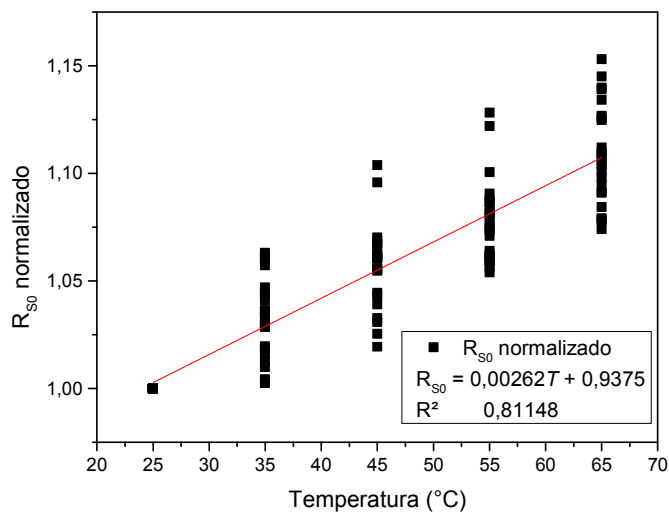


Figura 6: R_{S0} normalizado em função da temperatura de todos os módulos testados em todas as irradiâncias.

Os valores de R_{S0} mostram que o parâmetro tende a aumentar com a temperatura, como ilustrado pelo gráfico da Figura 6. Com o objetivo de ilustrar que é possível utilizar para

computar a variação de R_S com a temperatura a mesma taxa de variação de R_{S0} com a temperatura, expressou-se graficamente a correlação de R_S e R_{S0} apresentada na Figura 7, na qual o coeficiente angular da reta obtida é próximo da unidade. Embora o coeficiente de correlação R^2 seja da ordem de 0,7, a reta obtida representa adequadamente o comportamento geral da variação de R_S com a temperatura. Este resultado permite a que a taxa de variação de R_{S0} com a temperatura seja diretamente aplicada como taxa de variação de R_S com a temperatura.

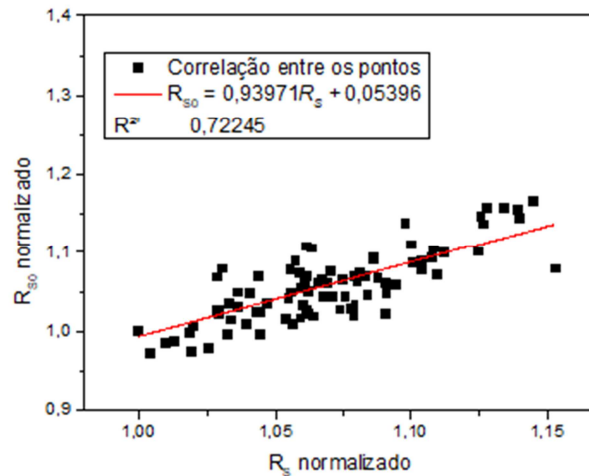


Figura 7: Correlação de R_S com R_{S0} normalizados.

Para que se modele o comportamento de R_S com a temperatura e a irradiância, elaborou-se uma equação na qual R_S é dependente dos fatores temperatura e irradiância, partindo-se da hipótese de que as variáveis são independentes, cuja pertinência será avaliada nos resultados.

Para relacionar R_S com a irradiância utilizou-se a equação proposta por Reichert (2016) com arredondamento dos valores, pois não altera a essência do modelo e torna a equação mais simples. A Equação (5) representa o comportamento de R_S apenas em relação à irradiância solar.

$$R_S(G) = R_{S_STC} \cdot 10 \cdot G^{-1/3} \quad (5)$$

Na Equação (5), G é a irradiância e R_{S_STC} é o valor da resistência em série obtida na irradiância de 1000 W/m^2 e temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Para encontrar a relação de R_S com a temperatura, tomou-se a variação de R_{S0} com a temperatura, de modo que fosse possível relacionar R_S com a temperatura mantendo a precisão da expressão de regressão em determinar o comportamento do parâmetro. A Equação (6) apresenta a expressão obtida para essa relação, onde T é a temperatura.

$$R_S(T) = (0,0026T + 0,9373) \quad (6)$$

Combinando as Equações (5) e (6) obtêm-se a Equação (7), que determina o valor de R_S com a dependência da temperatura e irradiância.

$$R_S(G, T) = (0,0026T + 0,9373) \cdot (R_{S_STC} \cdot 10 \cdot G^{-1/3}) \quad (7)$$

De posse desta equação, a próxima etapa consiste em realizar uma comparação entre os valores de R_S obtidos experimentalmente e os calculados com a Equação (7). Os erros na determinação de R_S pelo método analítico não foram avaliados neste trabalho, e serão tema de investigação

futura. O gráfico da Figura 8 apresenta a variação de R_S com a temperatura e irradiância do módulo A descrito na Tabela 1. Pelo gráfico percebe-se que o comportamento de R_S é modelado adequadamente pela Equação (7), mostrando uma certa dispersão, porém representando o comportamento geral da variação de R_S em várias irradiâncias e temperaturas.

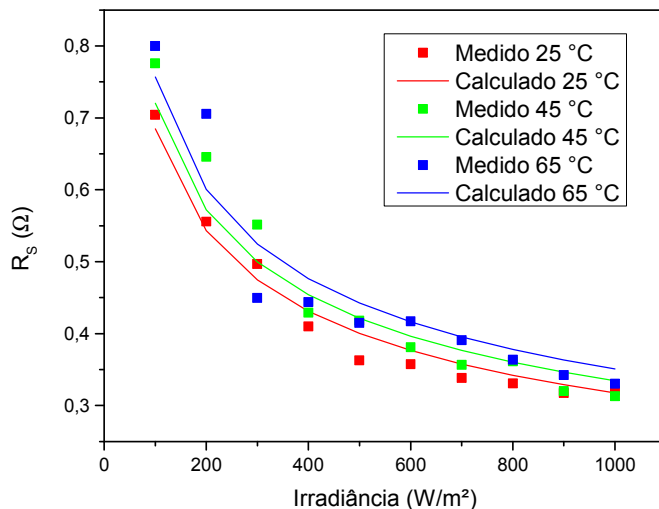


Figura 8: Comportamento do modelo proposto para simulação da variação de R_S com a temperatura e irradiância solar do módulo fotovoltaico A.

O gráfico da Figura 9 apresenta os resultados obtidos para o módulo B. Verifica-se que para este módulo fotovoltaico o modelo representa o comportamento geral da variação de R_S com a irradiância e temperatura, embora as curvas do modelo estejam um pouco defasadas em relação aos pontos medidos.

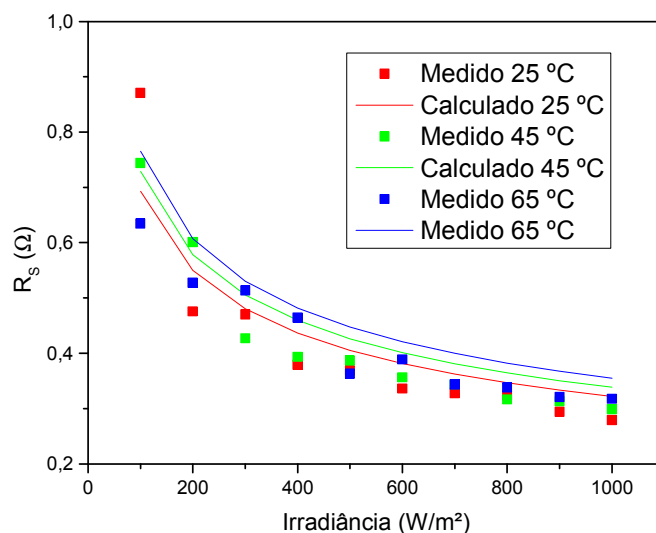


Figura 9: Comportamento do modelo proposto para simulação da variação de R_S com a temperatura e irradiância solar do módulo fotovoltaico B.

O gráfico da Figura 10 apresenta a variação de R_S com a temperatura e a irradiância do módulo C e, como é possível constatar, o comportamento de R_S é análogo aos casos anteriores. Como é

visto na Figura 8 e na Figura 9, R_S tem uma dependência com a temperatura de operação da célula e com a irradiância solar.

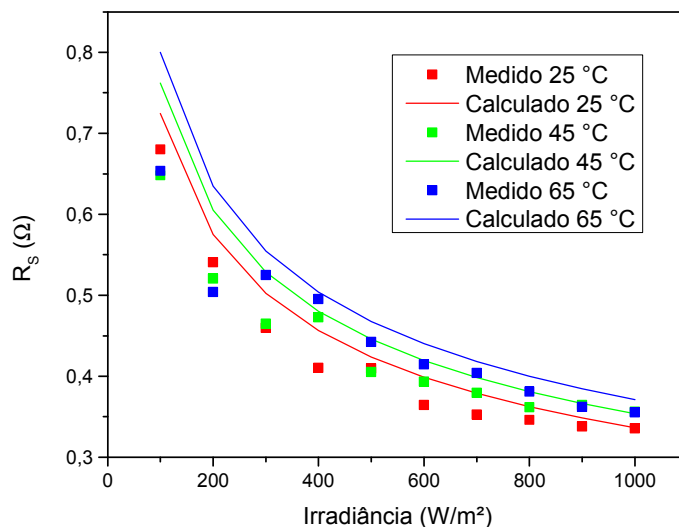


Figura 10: Comportamento do modelo proposto para simulação da variação de R_S com a temperatura e irradiância solar do módulo fotovoltaico C.

O gráfico da Figura 11 apresenta a variação de R_S com a temperatura e a irradiância do módulo D e, como é possível constatar, o comportamento de R_S é análogo aos casos anteriores, inclusive apresentando os melhores resultados. Neste módulo houve duas medidas de R_S a 45 °C que apresentaram valores discrepantes da tendência geral. Nestas medidas houve algum erro aleatório experimental não identificado. Estes pontos foram mantidos no gráfico para fins ilustrativos.

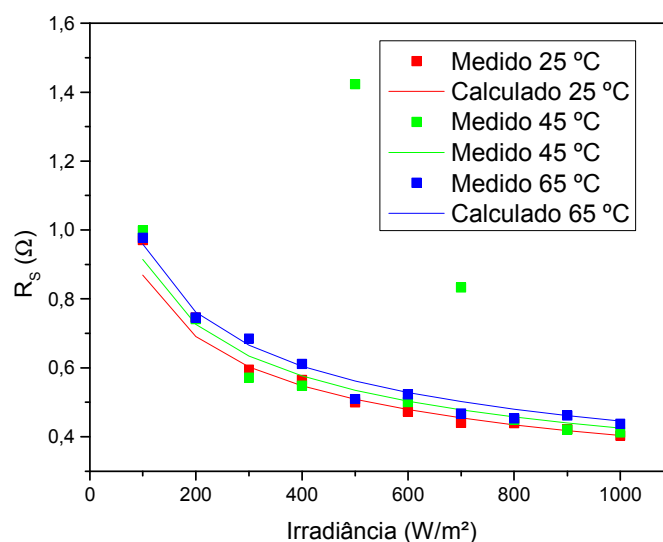


Figura 11: Comportamento do modelo proposto para simulação da variação de R_S com a temperatura e irradiância solar do módulo fotovoltaico D.

Nas Figuras 8–11 há uma certa dispersão entre os dados medidos e o modelo, porém a Equação (7) se mostrou adequada para considerar o comportamento do parâmetro R_S com dependência

da temperatura e irradiância, e a hipótese da independência das duas variáveis mostrou-se adequada.

CONCLUSÕES

Foram analisadas um conjunto de curvas I-V obtidas com simulador solar de quatro módulos fotovoltaicos de tecnologia de silício cristalino, em diversas condições de temperatura e irradiância. Os resultados obtidos não permitiram a obtenção de uma expressão que modelasse o comportamento da resistência em paralelo em função da temperatura.

Com relação à resistência em série, este trabalho propõe uma expressão que modela o comportamento deste parâmetro considerando a influência da temperatura e irradiância. A dependência da resistência em série com a temperatura mostrou-se linear, com aumento do parâmetro da ordem de 0,26 % do seu valor para cada incremento de 1°C na temperatura. A equação para modelar o comportamento de R_S dependente da temperatura e irradiância solar mostrou-se adequada para os módulos ensaiados de silício cristalino.

A variação de R_S é predominantemente decorrente da irradiância solar, sendo que o valor aumenta para menores irradiância, com uma pequena dependência linear relativa à temperatura. O acréscimo da equação proposta neste trabalho ao cálculo da curva I-V em diferentes condições, principalmente em altas temperaturas e baixas irradiâncias, tem potencial de melhorar a precisão do modelo de um diodo em programas de simulação do desempenho de módulos fotovoltaicos em ampla faixa de operação.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro na realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- El-Basit, W., A., El-Maksood, A., M., A., Soliman, F., A., E.-M., S. (2013). Mathematical Model for Photovoltaic Cells. Leonardo Journal of Sciences, vol. 23, pp. 13–28.
- Cerna, L., Benda, V., Machacek, Z. (2012). A note on irradiance dependence of photovoltaic cell and module parameters. IEEE, 28th International Conference on Microelectronics Proceedings.
- De Soto, W. *et al.* (2006). Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance. Solar Energy. Volume 80, Issue 1, January 2006, Pages 78-88
- Gasparin, F., P., Krenzinger, A. (2015). Comparação entre coeficientes térmicos de módulos fotovoltaicos determinados com simulador solar e com iluminação natural. Revista Brasileira de Energia Solar, vol 6, n. 2, p. 102 -111.
- Ghani, F., Rosengarten, G., Duke, M., Carson, J., K. (2015). On the influence of temperature on crystalline silicon solar cell characterisation parameters. Solar Energy, vol. 112, pp. 437-445.
- IEC 60904-9 (2007) (International Electrotechnical Commission) Photovoltaic devices – Part 9: Solar simulator performance requirements.
- Phang, J.C.H., Chan, D.S.H., Phillips, J.R., 1984. Accurate analytical method for the extraction of solar cell model parameters. Electron. Lett. 20 (10), 406–408.
- Reichert, H., H. (2016). Análise do modelo de um diodo para módulos fotovoltaicos com a resistência em série e em paralelo dependente da irradiância solar. Trabalho de Conclusão do Curso (Graduação). Universidade Estadual do Rio Grande do Sul. Curso de Engenharia em Energia. Novo Hamburgo.
- Ruschel, C., S., Gasparin, F.P., Costa, E.R., Krenzinger, A. (2016). Assessment of PV modules shunt resistance dependence on solar irradiance. Solar Energy, vol 133, pp. 35-43.
- Silva, E., A., Bradaschia, F., Cavalcanti, M., C., Nascimento Junior, A., J., Michels., L., Pietta Junior, L., P. (2016). Parameter Estimation Method to Improve the Accuracy of

Photovoltaic Electrical Model IEEE Journal of Photovoltaics. Volume: 6, Issue: 1, Jan. 2016.

Shockley, W. (1950). Electrons and holes in semiconductors. Van Nostrand, Nova Iorque, Estados Unidos da América.

Van Dyk, E. E., Meyer, E., L., (2004). Analysis of the effect of parasitic resistances on the performance of photovoltaic modules. Renew Energy, vol. 29, issue 3, pp. 333–344.

TESTING OF PHOTOVOLTAIC MODULES FOR ANALYSIS OF SERIES AND SHUNT RESISTANCE VARIATION WITH TEMPERATURE

ABSTRACT. The single diode model is quite widespread to simulate the performance of photovoltaic devices. In this work, four crystalline silicon photovoltaic modules were characterized in solar simulator under various conditions of irradiance and temperature. The series resistance (R_s) and the shunt resistance (R_p) were extracted from the I-V curves by analytical methods in order to obtain expressions that model their behavior with the irradiance and temperature. The photovoltaic modules were tested at irradiances of 75 to 1000 W / m² and at temperatures of 25 to 65 ° C. A clear behavior of the variation of R_p with temperature was not identified, while R_s presented a linear behavior with temperature. The proposed model considering the dependence of R_s with temperature and irradiance can be inserted into the single diode model in order to increase the precision of the calculation of the I-V curves over a wide operation range.

Keywords: Photovoltaic solar energy, series resistance, shunt resistance.