VARIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS COM A IRRADIÂNCIA

Cristiano Saboia Ruschel – cristianosaboia@gmail.com
Arno Krenzinger – arno.krenzinger@ufrgs.br
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Laboratório de Energia Solar

Resumo. *Estimativas preliminares da produção de energia elétrica com a tecnologia solar fotovoltaica usualmente consideram a eficiência de conversão dos módulos como uma constante em relação à irradiância. Há evidências na literatura de que tal hipótese não se verifica na prática, e que uma avaliação mais precisa deveria incluir uma variação da eficiência com a irradiância. Neste trabalho, é estudado o comportamento da eficiência de módulos fotovoltaicos em relação à irradiância, primeiro a partir de uma análise teórica baseada no modelo de um diodo, habitualmente utilizado para representação de sistemas fotovoltaicos, e posteriormente por meio de experimentação. A análise experimental foi realizada medindo diversos módulos fotovoltaicos de diferentes fabricantes em um simulador solar que permite a variação do nível de irradiância. Obteve-se o valor da eficiência de cada um dos módulos a 20 níveis de irradiância, permitindo um estudo de seu comportamento e a obtenção de coeficientes referentes a uma equação proposta para descrição de tal efeito. Comparações entre os resultados experimentais e a análise teórica demonstraram concordância na região de irradiâncias mais elevadas, e indicaram que o modelo falha em prever o comportamento nas irradiâncias mais baixas. Tal dificuldade é conhecida na literatura, e modelos alternativos propostos para contorná-la são discutidos.*

Palavras chave: Energia Solar Fotovoltaica, Módulos Fotovoltaicos, Eficiência.

1. INTRODUÇÃO

A elaboração de atlas solarimétricos confiáveis é de fundamental importância para o projeto de sistemas de geração solar de energia elétrica, pois estes fornecem os dados que indicam a viabilidade econômica de tais sistemas. Uma estimativa precisa do potencial de produção de energia elétrica por sistemas fotovoltaicos requer o conhecimento da eficiência típica de um sistema instalado com a tecnologia disponível. Em Peraza (2013) é proposta a Eq. (1) para o cálculo da potência injetada no sistema elétrico por uma usina fotovoltaica em função das irradiância direta e difusa no plano inclinado.

$$P_{IN} = P_{STD}\left[\frac{I_{bT}F_{\theta} + I_{dT}}{1000}\right]F_G F_T F_{ASS} F_{Fio}\eta_{CC/_{CA}}\eta_{SPMP}\eta_{TRAFO} \quad (1)$$

sendo P_{STD} a potência nominal da usina, I_{bT} a radiação solar direta recebida, I_{dT} a radiação solar difusa e F_{θ} o fator de conversão geométrico devido ao ângulo de incidência da radiação direta no plano dos módulos. Os fatores $\eta_{CC/_{CA}}, \eta_{SPMP}, \eta_{TRAFO}$ são, respectivamente a eficiência de conversão CC/CA, a eficiência do seguimento de máxima potência do inversor e a eficiência dos transformadores. Os demais termos, F_{Fio} considera as perdas nos fios, F_{ASS} as perdas devido às diferenças entre os módulos da associação, F_T as perdas devido à diferença entre a temperatura da condição STC (25º C) e a verificada e F_G a diferença na eficiência de conversão dos módulos devido ao fato de se incidir uma irradiância diferente da padrão de teste (1000 W/m²) nos mesmos.

A maior parte destes coeficientes é amplamente discutida na literatura. O coeficiente geométrico F_{θ} pode ser encontrado a partir das equações de reflexão no vidro, apresentadas, por exemplo, em Duffie e Beckmann (1980), os fatores referentes ao inversor são apresentados em Rampinell (2010) e para o fator de perdas devido à temperatura é utilizado o coeficiente de potência fornecido pelo fabricante. Os coeficientes F_{FIO} e F_{ASS} podem ser obtidos a partir de sugestões encontradas em PVSYST (2013). Já quanto ao fator F_G, há certa dificuldade em se obter informações na literatura. Na estimativa de Peraza (2013), devido à falta de análises experimentais mais consistentes, tal fator foi obtido simulando-se o comportamento de um módulo utilizando o software CREARRAY, desenvolvido no Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. A Eq. (2), também utilizada em Almeida e Zilles (2012), foi proposta para ajuste do fator F_G:

$$F_G = \frac{\frac{G}{G_{STD}}}{\frac{G}{G_{STD}} + \left(a + b\frac{G}{G_{STD}} + c\left(\frac{G}{G_{STD}}\right)^2\right)} \quad (2)$$

O objetivo principal deste trabalho é a obtenção de um conjunto de coeficientes *a*, *b* e *c* que represente o comportamento de módulos de silício cristalino. Para tanto, foram medidas as curvas I-V de 27 módulos fotovoltaicos em um simulador solar em 20 níveis de irradiância, obtendo-se a eficiência dos mesmos a cada uma dessas medidas. Antes da apresentação do experimento e de seus resultados, são revisados os fundamentos teóricos da modelagem de sistemas fotovoltaicos e discutidos os comportamentos esperados.

2. ANÁLISE TEÓRICA

O modelo de um diodo é o mais utilizado para representação do comportamento de células e módulos fotovoltaicos. Tal modelo possui uma boa combinação entre simplicidade e precisão, especialmente para junções de silício cristalino. O circuito equivalente é o apresentado na Fig. 1, sendo composto por uma fonte de corrente em paralelo com um diodo, além de duas resistências que agem no sentido de diminuir a potência útil do sistema: a resistência série (R_s) e a resistência paralela (R_p). A resistência série é incluída nesse circuito para representar a resistência dos materiais que compõem a célula, as trilhas e contatos elétricos. Já a resistência paralela representa as fugas de corrente por caminhos alternativos ou defeitos na junção.

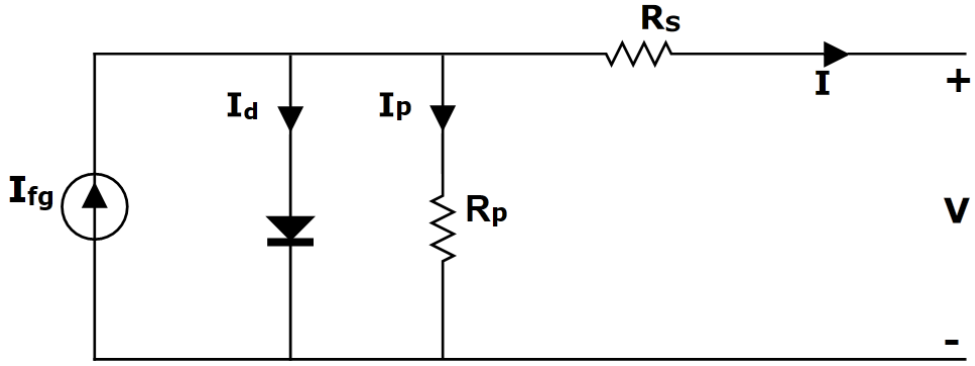


Figura 1 – Circuito equivalente do modelo de um diodo

A corrente útil em uma célula é dada, então, por.

$$I = I_{fg} - I_d - I_p \tag{3}$$

sendo I a corrente útil, I_{fg} a corrente fotogerada, I_d a corrente desviada pelo diodo e I_p a corrente desviada pelo shunt.

Utilizando a equação do diodo de Schockley (1950) e resolvendo o circuito para I, encontra-se a Eq. (4), que fornece a corrente para um módulo fotovoltaico:

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

onde I_0 a corrente de saturação reversa do diodo no escuro, V a tensão aplicada nos terminais do diodo, q a carga do elétron, m o fator de idealidade do diodo, k a constante de Boltzmann, T a temperatura absoluta da junção, e N_s o número de células fotovoltaicas conectadas em série. Este modelo é conhecido como modelo de 5 parâmetros, pois é necessária a obtenção dos cinco parâmetros independentes I_0, m, R_s, R_p e I_{fg} para sua determinação.

Sendo a potência produzida dada pelo produto de tensão e corrente, a curva I-V correspondente à Eq. (4) possui um ponto no qual a potência é máxima. A relação entre essa máxima potência e a potência solar recebida pelo módulo fornece a eficiência do módulo, conforme a Eq. (5).

$$\eta = \frac{P_{pmp}}{AG} \tag{5}$$

onde P_{pmp} é a potência no ponto de máxima potência, A a área do módulo e G a irradiância recebida.

Os principais parâmetros responsáveis pela deformação da curva I-V causando perda de eficiência dos módulos são as resistências parasíticas: enquanto o aumento da resistência série degrada a inclinação da curva na região do circuito aberto, a redução na resistência paralela prejudica a inclinação da curva na região de curto-circuito.

2.1 Efeito das resistências parasíticas na eficiência do módulo

Como a Eq. (4) é uma equação transcendental, não é possível um estudo analítico do efeito desses parâmetros em diferentes níveis de irradiância a partir de simples manipulação algébrica. Portanto, esta equação foi programada em uma rotina em VBA (Visual Basic for Applications), possibilitando a variação de quaisquer de seus parâmetros e a subsequente análise do comportamento da curva I-V. Para tal estudo, foram escolhidos valores de I_0 e m iguais ao obtido em um dos módulos medidos, a corrente I_{fg} foi considerada diretamente proporcional à irradiância, e os valores de R_s e R_p foram variados. Para a resistência série, foram assumidos valores entre 0 e 0,5 Ω, com intervalos de 0,1 ohm; já para a resistência paralela os valores selecionados foram 10^9 Ω (R_p tendendo a infinito), 1000 Ω, 750 Ω, 500 Ω e 250 Ω. Para cada combinação de R_s e R_p, foram construídas as curvas I-V correspondentes à Eq. (4) para 20 níveis de irradiância: 75 W/m², 100 W/m², e a partir deste, incrementos iguais de 50 W/m² foram utilizados até o valor de referência de 1000 W/m². Tais níveis foram selecionados pois foram os posteriormente utilizados no estudo experimental.

Na análise dos resultados, foi possível notar que as perdas de eficiência causadas por cada uma das resistências parasíticas são relativamente independentes. Portanto, a fim de facilitar a análise, tais efeitos são apresentados separadamente.

2.2 Efeito de R_s na eficiência

Da Eq. (4), nota-se que a perda de eficiência causada pela resistência série é proporcional à corrente I. Como a corrente fotogerada, e portanto a corrente do módulo são proporcionais ao nível de irradiância, é esperado que o efeito da resistência série também o seja. A Fig. 2 apresenta a eficiência obtida da Eq. (5) em função da irradiância, ao variar-se a resistência série. São mostrados os resultados para duas diferentes resistências paralelas (R_p tendendo a infinito e 250 Ω).

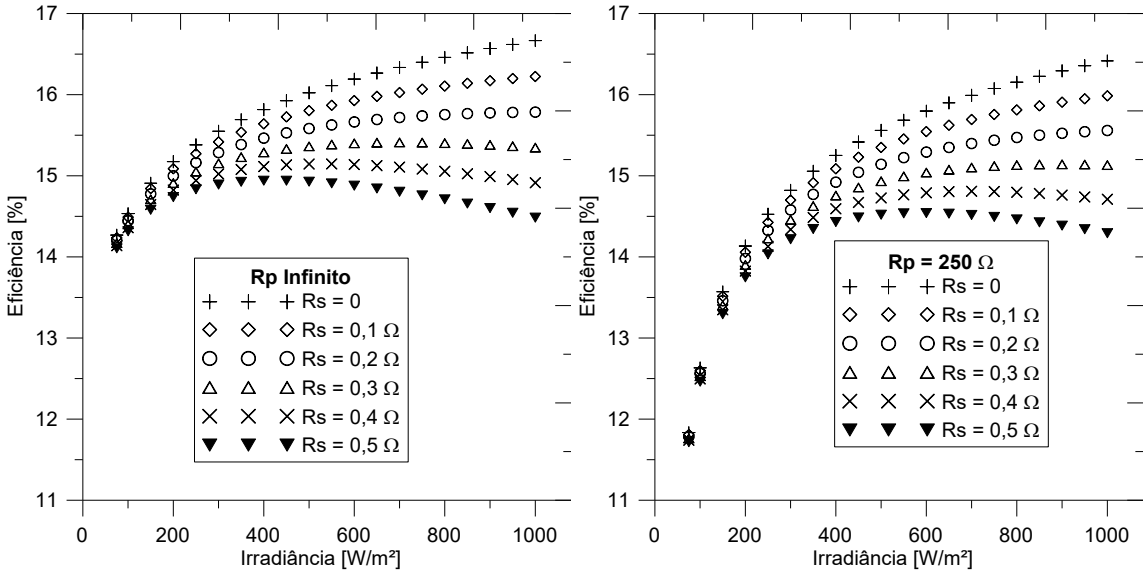


Figura 2 – Variação da eficiência com a irradiância em função da resistência série

É visível que os efeitos da resistência série são mais significativos em irradiâncias mais altas, conforme esperado. A comparação entre os dois gráficos indica que a perda de eficiência causada pelo aumento da resistência série é relativamente independente da resistência paralela. Ainda, é possível notar que incrementos iguais em R_s causam perdas semelhantes na eficiência para cada nível de irradiância. Outro fato a ser observado é que a partir de um certo valor de resistência série a eficiência deixa de ser crescente com a irradiância, sendo que valores mais altos de R_s deslocam a eficiência máxima para irradiâncias mais baixas.

2.3. Efeito de R_p na eficiência

Apesar de reduzir a eficiência dos módulos em todas as condições, a redução na resistência paralela induz perdas maiores de eficiência quando a irradiância é mais baixa. Este efeito é visível na Eq. (4), pois a corrente fotogerada cai linearmente com a irradiância, enquanto a tensão decai de forma logarítmica, permanecendo em níveis similares mesmo em situações de baixa irradiância. Nestes casos, portanto, o último termo, que representa a fuga de corrente, cresce em importância. A Fig. 3 ilustra essas perdas para diferentes resistências série (R_s = 0 e 0,3 Ω).

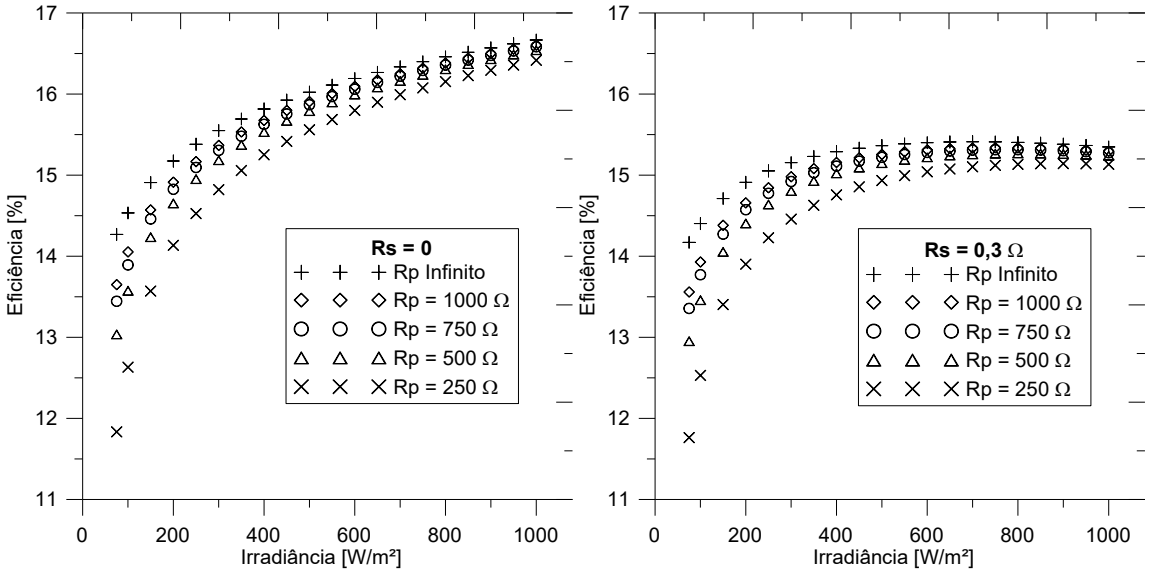


Figura 3 - Variação da eficiência com a irradiância em função da resistência paralela

É possível observar, portanto, que enquanto as variações de R_s ditam o comportamento da eficiência em irradiâncias mais altas, a resistência paralela altera fundamentalmente a eficiência nas irradiâncias mais baixas.

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para a caracterização experimental dos módulos, foi utilizado um simulador solar do tipo LAPSS (*Large Area Pulsed Solar Simulator*) Modelo PASAN SunSim 3C, instalado no Laboratório de Energia Solar (LABSOL) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Este simulador possui um *Flash* de 10 ms com uma área de iluminação de 2 m x 2 m. A precisão elétrica deste equipamento é de 0,2% e o ângulo máximo de colimação da luz é de 15º. O simulador PASAN SunSim 3C possui caracterísicas que superam a qualificação AAA de acordo com os requerimentos da norma IEC 60904-9 (2007).

Foram medidos 27 módulos de silício cristalino (19 de silício multicristalino e 8 de silício monocristalino), sempre à temperatura padrão de teste, de 25ºC, com uma tolerância de +-1ºC. Utilizando-se um conjunto de filtros de atenuação, foi possível obter as curvas I-V de cada módulo a 20 níveis de irradiância distintos. O valor máximo de teste foi o da condição padrão de teste, 1000 W/m², reduzindo-se então a irradiância em 50 W/m² a cada medição, com exceção da menor, que por limitações técnicas foi de 75 W/m² ao invés de 50 W/m². As curvas I-V são obtidas a partir de uma varredura única de Isc a Voc com duração de 10 ms, obtendo 418 pares I-V. A curva I-V "crua" é corrigida de acordo com o procedimento descrito na IEC 60891 (2009) realizado pelo software do simulador solar.

A utilização do simulador solar com filtros atenuadores, que não alteram o espectro, garante uma análise experimental com dependência exclusiva do nível de irradiância solar, ficando isenta de interferências que ocorrem em medições a céu aberto, onde os efeitos de diferentes ângulos de incidência, temperatura e distribuição espectral da radiação são muito difíceis de ser eliminados.

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A Fig. 4 compila os resultados de eficiência para todos os módulos medidos a 20 níveis de irradiância.

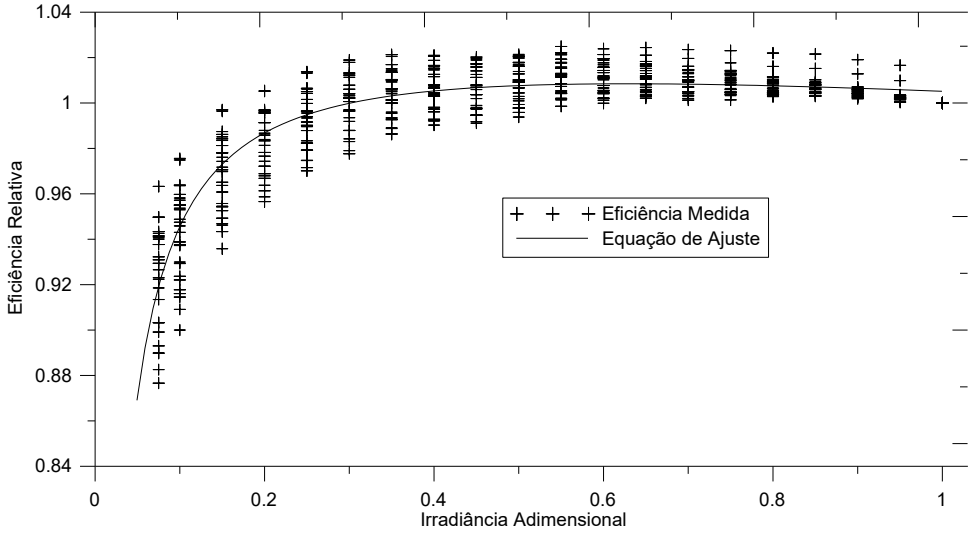
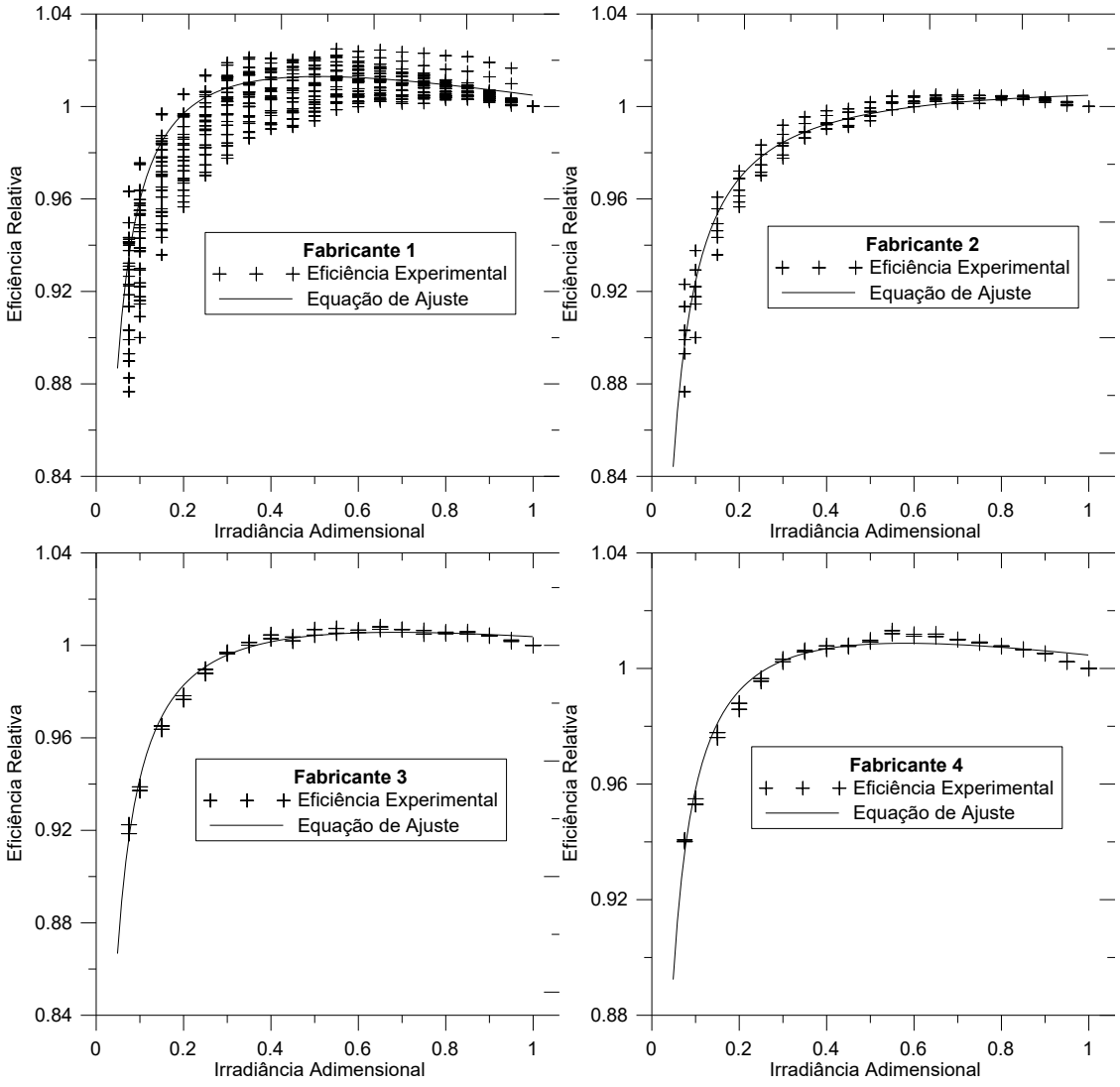


Figura 4 – Eficiência relativa dos módulos medidos em função da irradiância

Os coeficientes obtidos para a utilização da Eq. (2) foram a = 9,53E-3, b = -3,8E-2 e c = 2,37E-2. É possível notar na Fig. 4 uma dispersão relativamente alta dos valores de eficiência adimensional obtidos. A fim de melhor analisar tal variabilidade, os dados obtidos foram separados por fabricante, e os resultados para seis destes são apresentados na Fig. 5.



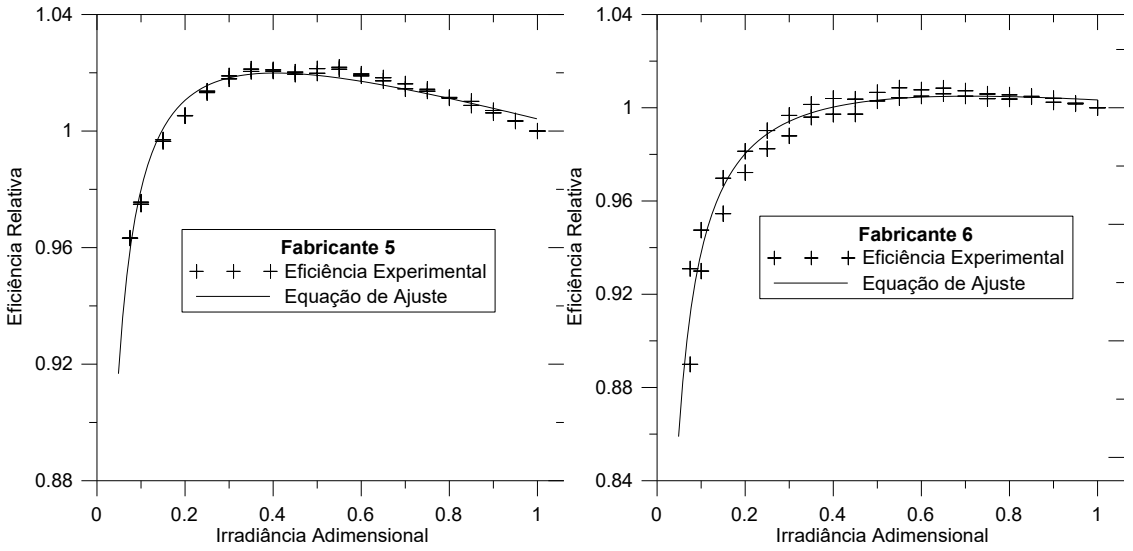


Figura 5 – Eficiência dos módulos em função da irradiância separando por fabricante

Verifica-se que há diferenças significativas entre os comportamentos dos módulos de diferentes fabricantes. Por exemplo, os módulos do fabricante 5 foram os que apresentaram o pico de eficiência a uma irradiância mais baixa, indicando pela análise teórica um alto valor de R_s. Já os módulos do fabricante 2 apresentaram um pico de eficiência por volta dos 800 W/m², indicando um valor menor de resistência série. De fato, enquanto a resistência série dos módulos do fabricante 5 foi calculada em torno de 0,36 Ω, os módulos do fabricante 2 apresentaram valores entre 0,22 Ω e 0,26 Ω.

Para cada um dos fabricantes, foram ajustados coeficientes relativos à Eq. (2), sendo esses resultados compilados na Tab. 1.

Tabela 1 – Coeficientes obtidos para os módulos de cada fabricante testado

Fabricante	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
a	8.64E-03	1.02E-02	9.27E-03	1.04E-02	9.79E-03	7.74E-03	7.18E-03	1.45E-02
b	-4.64E-02	-1.92E-02	-3.22E-02	-2.61E-02	-3.22E-02	-3.51E-02	-5.47E-02	-5.67E-02
c	3.31E-02	4.41E-03	1.94E-02	1.15E-02	1.93E-02	2.29E-02	4.35E-02	3.11E-02

5. COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E TEÓRICOS

Os resultados experimentais demonstraram uma curva de eficiência em função da irradiância com um máximo abaixo do valor de irradiância de referência (1000 W/m²), assim como alguns dos casos observados na análise teórica. Comparando-se o formato das curvas da Fig. 5 com o da Fig. 2, a resistência série da maioria dos módulos medidos parece estar na faixa entre 0,3 Ω e 0,5 Ω. A fim de melhor estudar tal comportamento, a Fig. 6 apresenta os resultados teóricos calculados para esta faixa de R_s, considerando os parâmetros I_0 e m originais de um dos módulos, e um R_p de 227 Ω, que foi o valor calculado para este módulo a partir da inclinação da curva na região de curto circuito.

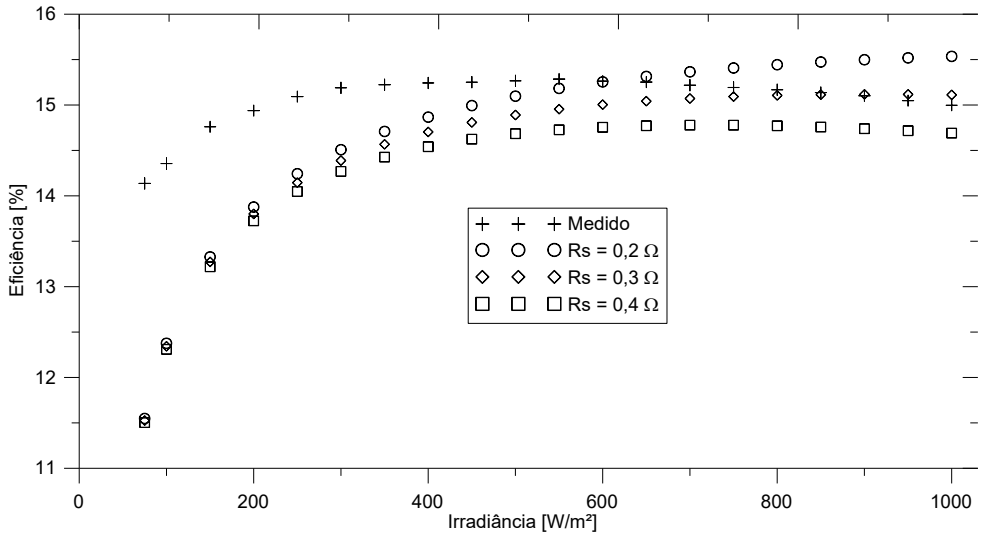


Figura 6 – Comparação entre a eficiência medida e a calculada com diferentes valores de Rs

Para valores de maior irradiância, os resultados medidos se aproximam dos calculados com R_s = 0,3 Ω, enquanto o valor calculado para este parâmetro a partir de curva foi de 0,32 Ω. Para irradiâncias mais baixas, porém, o valor de eficiência medido é maior do que o estimado na análise teórica. Como nesta faixa o parâmetro que causa maior perda de eficiência é o R_p, o resultado indica que este efeito é superestimado na análise teórica.

Há sugestões de que o parâmetro de resistência paralela não deveria ser considerado constante com a irradiância no modelo de um diodo. Alguns trabalhos publicados na literatura, como De Soto (2006) e Lo Brano (2010) propõem modelos alternativos que consideram esse parâmetro como inversamente proporcional ao nível de irradiância.

Utilizando-se o valor calculado de R_s, e a consideração de R_p inverso com a irradiância, o resultado teórico se aproxima do obtido experimentalmente, conforme mostrado na Fig. 7.

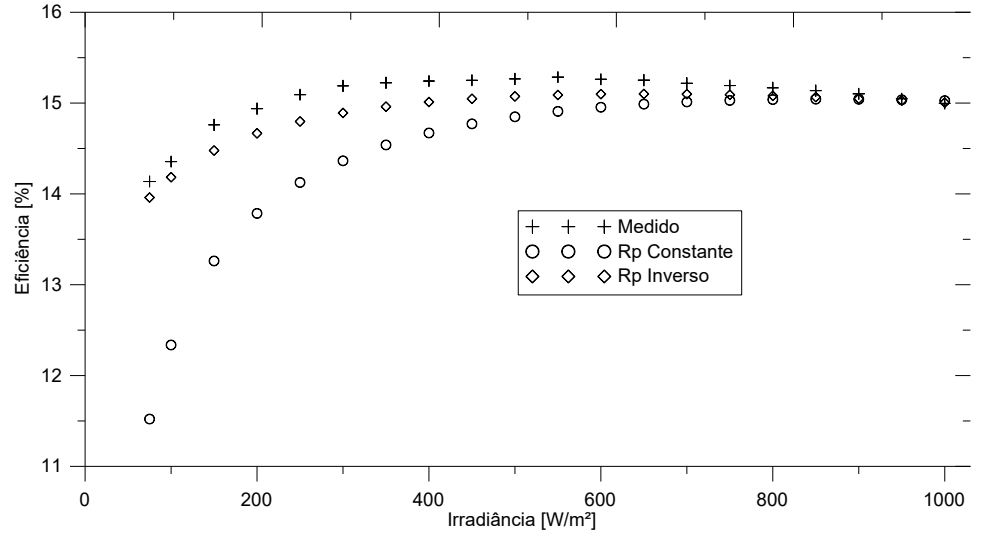


Figura 7 – Comparação da eficiência medida com a simulada considerando R_s = 0,32 Ω

6. CONCLUSÕES

O conjunto de coeficientes encontrados para os módulos medidos experimentalmente possibilitam a obtenção de um fator de correção da variação de potência em função da irradiância, F_G representativo para um conjunto de módulos monocristalinos e multicristalinos de diferentes fabricantes. Foi demonstrado que existe uma razoável dispersão no comportamento da eficiência de conversão em função da irradiância, especialmente entre módulos de modelos distintos. Portanto, para uma estimativa ainda mais precisa, se poderia repetir o procedimento descrito neste trabalho com o módulo fotovoltaico específico que se deseja instalar em um determinado sistema.

A comparação dos resultados experimentais com os obtidos com a curva teórica confirma a importância do parâmetro da resistência série no formato desta curva de eficiência em relação à irradiância, e também com a posição do

pico de eficiência nesta curva. Foi demonstrado também que o efeito da resistência paralela é menor do que se poderia supor na análise teórica, e que é possível aproximar-se de tal comportamento com razoável precisão ao considerar o parâmetro R_p como variável com a irradiância, tal como proposto em trabalhos anteriores na literatura.

REFERÊNCIAS

Almeida, M. P., Zilles, R. Cálculo de Parâmetros de Desempenho para Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede, Revista Brasileira de Energia Solar, V.3, n1, 2012, p.70-77

De Soto, W., Klein, S.A., Beckman, W.A., 2006. Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance. Solar Energy 80, pp. 78-88.

Duffie, J. A.; Beckman, W. A., 1980. Solar Engineering of Thermal Processes. Nova Iorque: John Wiley.

Lo Brano, V., Orioli, A., Ciulla, G., Di Gangi, A., 2010. An improved five-parameter model for photovoltaic modules. Solar Energy Materials and Solar Cells 94, pp. 1358-1370.

IEC 60891, 2009 (International Electrotechnical Commission). Photovoltaic devices – Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics.

IEC 60904-9, 2007 (International Electrotechnical Commission). Photovoltaic devices – Part 9: Solar simulator performance requirements.

Peraza D. G., 2013. Estudo da Viabilidade da Instalação de Usinas Solares Fotovoltaicas no Estado do Rio Grande do Sul.

PVSYST, 2013. Manual de Utilização do Software PVSYST 6.

Rampinelli, G. A., 2010. Estudo de Características Elétricas e Térmicas de Inversores para Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede. Tese de Doutorado, PROMEC/UFRGS, Porto Alegre, Brasil.

Schockley, W., 1950. Electrons and holes in semiconductors. Van Nostrand, New York.

DEPENDENCE OF PHOTOVOLTAIC MODULES EFFICIENCY ON THE IRRADIANCE

Abstract. *Preliminary estimations for production of electrical power with photovoltaic systems usually consider the efficiency of solar modules as constant regarding the solar irradiance. It is seen on the literature that this assumption is not verified on real systems, and that a more accurate evaluation should include a variation of the efficiency with irradiance. In this work, the dependence of the efficiency of photovoltaic modules on the irradiance is studied, at first with a theoretical analysis based on the single diode model, commonly used for the representation of photovoltaic systems, and later based on experimentation. For this practical analysis, several modules from different technologies were tested on a solar simulator which allows the variation of the irradiation level. The efficiency of each of the modules was evaluated on 20 levels of irradiance, allowing a study of its behavior and a set of coefficients for a proposed equation was determined. Comparisons between experimental results and the theoretical analysis demonstrated agreement on the high irradiance regions, and that the model fails to predict the behavior on lower irradiances. This adversity is known on the literature, and alternative models to overcome it are discussed.*

Keywords: Photovoltaic Power, Photovoltaic Modules, Efficiency.