

APLICAÇÃO DO MODELO DE UM DIODO NA ESTIMAÇÃO DA POTÊNCIA ELÉTRICA DE UMA RESIDÊNCIA ¹

USING POWER DIODE MODELS FOR ESTIMATION POWER RESIDENCE

Matheus Reis de Almeida², Paulo Sérgio Sausen³, Moises Machado Santos⁴, Maurício de Campos⁵

¹ Artigo científico desenvolvido em disciplina do Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional, na UNIJUÍ.

² Estudante do Curso de Mestrado em Modelagem Matemática e Computacional, UNIJUÍ;

³ Professor do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional, UNIJUÍ;

⁴ Professor do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional, UNIJUÍ;

⁵ Professor do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional, UNIJUÍ;

RESUMO

Este artigo descreve a utilização do modelo de um diodo (modelo de circuito equivalente) para estimação da potência elétrica produzida em um sistema de geração solar fotovoltaico residencial localizado no município de Ijuí. Foram utilizados dados da ficha técnica do equipamento e medições de irradiação solar e temperatura ambiente coletadas de uma estação meteorológica. O modelo foi implementado computacionalmente no software MatLab. A estimativa correspondeu a potência real gerada com um erro absoluto RMSE igual a 3,32.

Palavras-chave: Modelo de um diodo, simulação, modelo computacional.

ABSTRACT

This paper describes how a single-diode model (equivalent circuit model) can be used to estimate the electrical power produced in a residential photovoltaic solar system, located in Ijuí town. Was used equipment's data sheet information and measurements of solar irradiation and ambient temperature from a meteorological station. The model was implemented computationally in MatLab software. The estimate corresponded to real power generated with a root mean square error of 3,32 %.

Keywords: Diodo models, simulation , computational model.

INTRODUÇÃO

A energia solar é uma das tecnologias renováveis que mais tem crescido no mundo por vários motivos, dentre eles destaca-se a redução no custo dos equipamentos nos últimos anos potencializados pelos incentivos governamentais visando o desenvolvimento sustentável.



A Agência Internacional de Energia estima que o crescimento na capacidade de geração solar mundial vai ser acentuado e constante ao longo desta década. Estamos em meio a uma mudança de paradigmas, até alguns anos atrás investir em energia solar era “estar no caminho certo”. Atualmente, investir em energia solar é uma necessidade e são necessários mais esforços. Sendo assim, se espera que tanto às entidades públicas quanto às entidades privadas interessadas adotem um maior número de ações e programas no intuito de fomentar o uso da geração solar (IEA, 2021).

No Brasil, dentro desse contexto, o principal impulsionador foi a Resolução Normativa nº 482, de 2012, da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2016). A referida resolução regulamentou a micro e minigeração distribuída, possibilitando que plantas geradoras de pequeno porte pudessem ser conectadas à rede de distribuição, criando o sistema de compensação da energia elétrica. Com isso, consumidores residenciais e comerciais podem conectar seus sistemas geradores à rede das concessionárias. Uma vez que haja excedentes na geração, acumulam-se créditos na conta de energia. Atualmente, a potência solar instalada no Brasil já ultrapassa às termelétricas movidas a gás natural e biomassa, assumindo a terceira posição em representatividade na matriz elétrica brasileira (Agência Brasil, 2022).

Contudo, frente aos inegáveis benefícios advindos do uso da energia solar, surgiu uma problemática para os operadores e planejadores das redes de distribuição. A única informação que a concessionária possui é a capacidade instalada do sistema gerador e a medição líquida (diferença entre a potência injetada na rede e a potência absorvida da rede), realizada apenas uma vez ao mês para fins de tarifação. Portanto, o operacional do sistema de distribuição não sabe o quanto está sendo produzido pelos sistemas solares, nem o real consumo da unidade consumidora.

Ainda, o distribuidor de energia não possui nenhum controle sobre o despacho desses equipamentos. Havendo irradiação solar suficiente para produzir energia, o sistema entra em operação, caso a energia produzida não seja consumida, é automaticamente injetada na rede de distribuição. Aliado a isso tem-se a instabilidade característica dos sistemas fotovoltaicos, diretamente relacionada às condições climáticas. Desse modo, fica explícito a necessidade de se fazer uso de algum tipo de técnica para estimação da potência produzida nesses geradores.



No presente artigo, faz-se a estimativa da energia produzida por um gerador solar utilizando o modelo baseado em circuito equivalente conhecido por modelo de um diodo. O sistema gerador objeto de estudo está instalado no município de Ijuí e pertence a um consumidor residencial. Foram utilizados parâmetros descritos na ficha técnica do equipamento, medições da irradiação solar e da temperatura ambiente coletadas de uma estação meteorológica localizada no prédio da sede acadêmica da Unijuí, localizado no mesmo município. O modelo de um diodo foi implementado computacionalmente no software MatLab na sua versão Students. A estimativa de potência fornecida pelo modelo foi validada a partir da comparação com os valores de potência reais, medidos diretamente na saída do gerador junto à residência monitorada.

METODOLOGIA

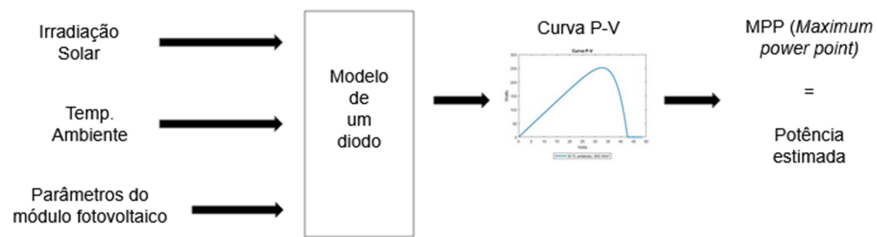
Como já mencionado, o circuito equivalente utilizado neste artigo foi o modelo de um diodo para painéis solares, amplamente referenciado na literatura. Foi utilizado o software MatLab R2019a (versão Students) para implementar o modelo computacionalmente. Com isso é possível obter a curva PV (potência x tensão) para um painel solar qualquer, utilizando como parâmetros de entrada do modelo os dados técnicos disponibilizados na ficha técnica do equipamento e variáveis climáticas: irradiação solar e temperatura ambiente.

Os valores de irradiação e temperatura ambiente foram coletados de uma estação meteorológica localizada no prédio da sede acadêmica da Unijuí. A coleta de dados teve uma periodicidade de uma amostra a cada minuto no intervalo entre os dias 30/04/2021 e 12/05/2021.

Atualmente os inversores, utilizados nos equipamentos de geração solar, possuem um sistema chamado *Maximum Power Point Tracking* (MPPT), isto é, um rastreador do ponto de máxima potência, que possibilita sempre um melhor aproveitamento da energia produzida pelos painéis solares. Portanto, para uma dada condição de irradiação solar e temperatura ambiente, a potência de saída do sistema gerador será o ponto máximo da curva PV.



A estimativa consiste, portanto, em gerar sucessivas curvas PV, para cada valor de irradiação e temperatura ambiente, e identificar o ponto de máxima potência, como apresentado na Figura 1.



Fonte: Autor.

Figura 1 - Técnica de estimação da potência utilizando modelo de um diodo.

Visando validar o modelo implementado e utilizado neste artigo, no caso o modelo de um diodo, às curvas de potência estimadas foram comparadas com às curvas reais medidas diretamente na saída do inversor da residência monitorada, ou seja, a potência real que estava sendo entregue pelo gerador no intervalo de tempo simulado.

PAINÉIS SOLARES

A NBR 10899 define célula fotovoltaica como sendo um dispositivo elementar, cuja funcionalidade é efetuar a conversão da energia solar em energia elétrica. O conjunto dessas células, eletricamente interligadas e encapsuladas formando uma unidade geradora, constitui um painel fotovoltaico comumente chamado de painel solar. O encapsulamento das células protege contra intempéries e fornece um caminho óptico para a luz. Os painéis solares são também dotados de uma moldura que promove rigidez e uma melhor qualidade de fixação (CARNEIRO, 2010).

Às características elétricas, térmicas e mecânicas dos painéis são disponibilizadas pelos fabricantes por meio das fichas técnicas, também chamadas de folha de dados. Deve-se observar, no entanto, que os parâmetros elétricos correspondem aos ensaios de laboratório na condição padrão de teste, STC (*Standard Test Conditions*), isso é, uma irradiação de 1000



W/m², massa de ar AM 1,5 e temperatura das células em 25°C (CARNEIRO, 2010). Por esse motivo, a ficha técnica também informa a temperatura nominal de operação, NOCT (*Nominal Operating Cell Temperature*), e coeficiente de correção dos parâmetros em função do diferencial de temperatura.

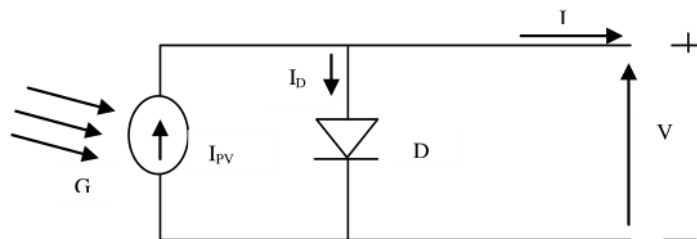
A NOCT é medida com o painel submetido a uma irradiação de 800 W/m e temperatura ambiente de 20° C. Conhecendo seu valor, pode-se estimar a temperatura das células do painel solar para qualquer valor de irradiação e temperatura ambiente utilizando a equação (1) (SUN et al., 2020).

$$T = T_a + \frac{NOCT - 20}{800} \times G \quad (1)$$

onde T é a temperatura estimada da célula em °C, T_a é a temperatura ambiente em °C e G a irradiação solar em W/m².

CIRCUITO EQUIVALENTE

O circuito equivalente de um painel solar é um circuito teórico capaz de representar as características elétricas do mesmo, o que permite prever o comportamento do sistema em variadas condições. Na literatura existem modelos com diferentes níveis de complexidades, correspondente a diferentes objetivos de análise. No entanto, o modelo mais difundido é o de um diodo, mostrado na Figura 2, representado por uma fonte de corrente em paralelo com um diodo, bastante simplista mas muito eficiente nas aplicações práticas (TAMRAKAR, GUPTA, SAWLE, 2015).



Fonte: (BONKOUNGOU, KOALAGA, NJOMO, 2013)

Figura 2 - Modelo de um diodo ideal.



Aplicando ao circuito da Figura 2 a lei de Kirchoff para correntes, se obtém a equação (2).

$$I = I_{pv} - I_d \quad (2)$$

A corrente no diodo, I_d , pode ser calculada utilizando a equação de Shockley, equação (3).

$$I_d = I_o \left[\exp\left(\frac{V}{\alpha V_t}\right) - 1 \right] \quad (3)$$

em que I_o é a corrente de saturação do diodo, α é o fator de idealidade do diodo e V_t é a tensão térmica. De acordo com Bonkougou, Koalaga e Njorno (2013), V_t pode ser calculado conforme equação (4).

$$V_t = \frac{N_s \cdot k \cdot T}{q} \quad (4)$$

onde N_s é o número de células do painel solar, k é a constante de Boltzmann = $1,38 \times 10^{-23}$ J/K, T é a temperatura da célula e q é a carga do elétron = $1,6 \times 10^{-19}$ C.

CURVA PV

Para extração da curva PV é necessário que se faça a análise do circuito representado pelo modelo de um diodo em três diferentes condições: em curto circuito, em circuito aberto e na condição de máxima potência.

Quando curto circuitada a saída do sistema, a tensão V tende a zero, logo, a corrente de saída I é aproximadamente igual a corrente I_{pv} da fonte de corrente. Isso significa que a corrente de curto circuito I_{CC} fornecida pelo fabricante na ficha técnica do equipamento é aproximadamente igual a I_{pv} em STC. Partindo dessa análise, e de acordo com Villalva, Gazoli e Filho (2009), a corrente I_{pv} para uma irradiação G qualquer pode ser calculada através da equação (5).

$$I_{pv} = (I_{CC,STC} + \beta \cdot \Delta T) \cdot \frac{G}{G_{STC}} \quad (5)$$



sendo $I_{CC,STC}$ a corrente de curto circuito em STC, β o coeficiente de variação da I_{CC} em função da temperatura, ΔT diferença entre a temperatura da célula com a temperatura em STC, 25°C , G a irradiação que incide sobre o painel solar e G_{STC} a irradiação em STC, 1000 W/m^2 .

Numa condição de circuito aberto, a corrente de saída I será nula e a tensão de circuito aberto V_{OC} medida será igual à tensão aplicada sobre o diodo. Nessa condição, toda a corrente I_{pv} fluirá através do diodo. Essa segunda análise permite, conforme Villalva, Gazoli e Filho (2009), estimar a corrente de saturação do diodo conforme equação (6).

$$I_{o,STC} = \frac{I_{CC,STC}}{\exp(V_{OC,STC}/\alpha V_{t(STC)}) - 1} \quad (6)$$

em que $I_{o,STC}$ é a corrente de saturação em STC, e $V_{OC,STC}$ é a tensão de circuito aberto em STC. Naturalmente, o valor de I_o precisa ser corrigido em função da temperatura, o que pode ser feito utilizando a equação (7) (VILLALVA, GAZOLI, FILHO, 2009).

$$I_o = I_{o,STC} \cdot \left(\frac{T_{STC}}{T}\right)^3 \cdot \exp\left[\left(\frac{q \cdot E_g}{\alpha \cdot k}\right) \cdot \left(\frac{1}{T_{STC}} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (7)$$

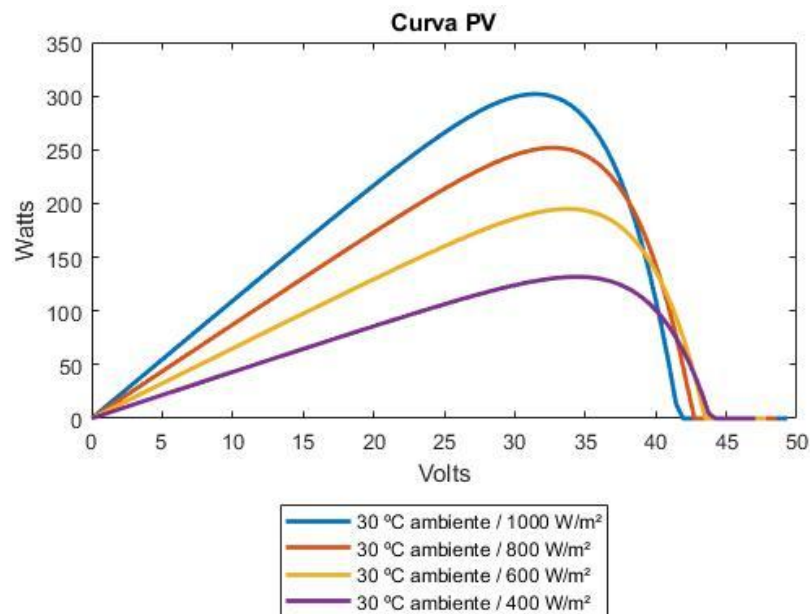
em que E_g é o gap de energia do diodo, para o silício policristalino em 25°C , $E_g = 1,12 \text{ eV}$.

A análise na condição de máxima potência permite uma estimativa das perdas do sistema, que podem ser representadas pela inserção de uma resistência em série na saída do circuito. A ficha técnica fornece a potência máxima em STC, $P_{m,STC}$, e os respectivos valores de tensão, $V_{mp,STC}$, e corrente, $I_{mp,STC}$, nesse ponto, ambos em STC. A partir disso chega-se à relação mostrada na equação (8).

$$P_{m,STC} = I_{mp,STC} \cdot V_{mp,STC} \quad (8)$$



As análises desenvolvidas até aqui formam um sistema de equações e diferentes metodologias podem ser empregadas para solucioná-lo. Porém, na literatura é frequente a utilização de métodos numéricos, em especial, o método de Newton-Raphson. Solucionado o sistema, plotam-se às curvas, conforme apresentado na Figura 3.



Fonte: Autor.

Figura 3 - Curvas PV de um painel solar para temperatura ambiente constante de 30°C e irradiações solares de 1000, 800, 600 e 400 W/m².

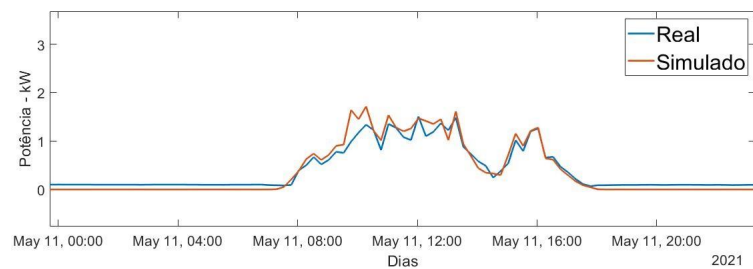
Na Figura 3 é apresentada a variação da curva PV de um painel solar genérico em função da variação da intensidade de irradiação solar. As curvas também se modificam em função da variação da temperatura ambiente. Como já mencionado anteriormente, o mecanismo de MPPT do inversor de frequência manterá o sistema operando no ponto de máxima potência dessas curvas.

RESULTADOS

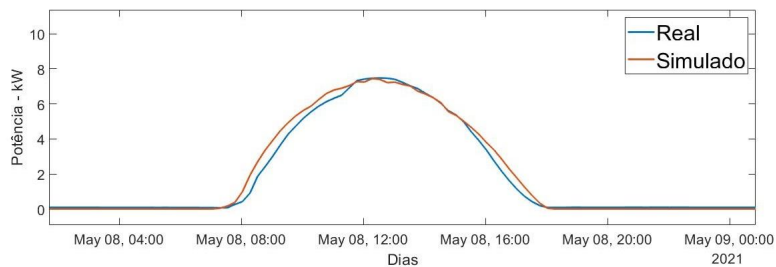
A utilização do modelo de um diodo para estimação da potência elétrica produzida por um sistema de geração solar apresentou um resultado bastante satisfatório. Foram

estimados doze dias, período entre os dias 30/04/2021 a 12/05/2021, com um RMSE (*root mean squared error*), igual a 3,32. O RMSE é a raiz quadrada da média do quadrado das diferenças entre a potência real e a potência estimada.

Na Figura 4 são apresentadas as curvas obtidas para dois dias com condições climáticas adversas. A curva apresentada na Figura 4(a) corresponde a um dia onde a irradiação solar foi baixa e bastante variada, mesmo assim, o modelo responde muito próximo da curva real medida na saída do gerador. Já na Figura 4(b) é apresentado um dia em que a irradiação solar foi intensa e constante, ocasionando uma curva estimada que praticamente sobrepõe-se à curva de potência real, medida na saída do gerador.



(a)

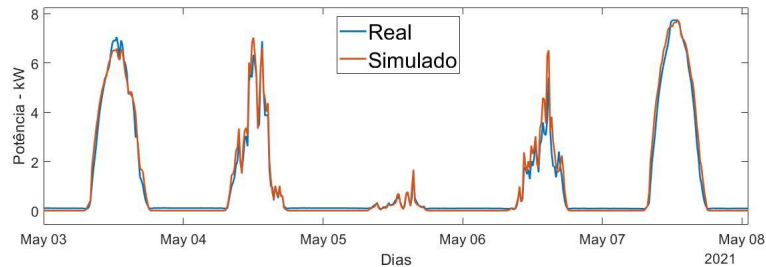


(b)

Fonte: Autor.

Figura 4 - Potência estimada x Potência real produzida por uma geração solar fotovoltaica: a) dia com baixa incidência solar, b) dia alta incidência solar.

Na Figura 5, é apresentada a estimativa para cinco dias, se verifica que a resposta do modelo também se mantém muito próxima da potência real, mesmo nos dias em que há ocorrência de oscilações na incidência de luz solar.



Fonte: Autor.

Figura 5 - Potência estimada x Potência real produzida por uma geração solar fotovoltaica entre os dias 03/05/2021 e 07/05/2021.

Neste artigo optou-se em apresentar a estimativa para um único consumidor. Alguns estudos disponíveis na literatura utilizam modelos baseados em circuito equivalente para estimar a potência produzida para um conjunto de geradores solares, conectados num mesmo alimentador, por exemplo. Nesses casos, cria-se um gerador teórico, cujos parâmetros são representativos do conjunto de geradores e efetua-se a estimativa adotando a mesma metodologia aqui descrita.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A instalação de micro e minigeradores solares conectados diretamente às redes de distribuição elétrica tem aumentado significativamente nos últimos anos, e deve continuar aumentando ainda mais pelo menos até o final desta década. No entanto, estes equipamentos operam sem nenhum tipo de supervisão por parte das concessionárias, ocasionando problemas de operação e planejamento das redes. Uma possível solução é a utilização de modelos matemáticos que possam estimar a potência elétrica gerada nestes sistemas fotovoltaicos de uma forma rápida e confiável. Algumas das técnicas de estimativa baseiam-se no uso de circuitos equivalentes.

Neste artigo, foi demonstrado como o modelo de circuito equivalente conhecido como modelo de um diodo pode ser utilizado para estimar com precisão a potência produzida num sistema gerador solar. O modelo estimou adequadamente, com RMSE igual a 3,32, a potência produzida pelo gerador solar de uma residência na cidade de Ijuí. Para trabalhos



futuros, é sugerida a reprodução deste estudo para geradores variados, e verificar a viabilidade de uso do modelo para estimar a potência produzida por geradores conectados em um mesmo alimentador.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA BRASIL. **Energia solar passa termelétrica e se torna a 3ª maior fonte brasileira.** 2022. Disponível em:

<<https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2022-07/energia-solar-passa-termeletrica-e-se-torna-3a-maior-fonte-brasileira>>

ANEEL [Agência Nacional de Energia Elétrica]. **Cadernos Temáticos: Micro e Minigeração distribuída.** 2016. Disponível em:

<<https://antigo.aneel.gov.br/geracao-distribuida>>

BONKOUNGOU, D.; KOALAGA, Z.; NJOMO, D. **Modelling and simulation of photovoltaic module considering single-diode equivalent circuit model in matlab.**

International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, v. 3, 2013.

CARNEIRO, J. **Módulos Fotovoltaicos Características e Associações.** Dissertação (Mestrado) - Universidade do Minho, 2010. Disponível em:

<<http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/16961>>

IEA [International Energy Agency]. **Solar PV: more efforts needed.** 2021. Disponível em:

<<https://www.iea.org/reports/solar-pv>>

TAMRAKAR, V.; GUPTA, S. C.; SAWLE, Y. **Single-diode and two-diode pv cell modeling using matlab for studying characteristics of solar cell under varying conditions.**

Electrical Computer Engineering: An International Journal, v. 4, p. 1029-1042,2015.