

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE MODELAGEM DE PAINEL FOTOLTAICO SOB VARIAÇÃO DE TEMPERATURA E ILUMINAÇÃO E DETERMINAÇÃO DE PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA

Paulo Irineu Koltermann – koltermann@del.ufms.br

Rhasla Ramos Abrão – rhasla182@gmail.com

Valmir Machado Pereira – valmir@del.ufms.br

Jéferson Meneguim Ortega – jmortega@del.ufms.br

Ruben Barros de Godoy – ruben@batlab.ufms.br

Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Departamento de Engenharia Elétrica

3.3 Módulos Fotovoltaicos

Resumo. Este trabalho apresenta a modelagem de uma célula fotovoltaica, baseada na equação do diodo Shockley, considerando a influência da irradiação solar e temperatura na performance de operação da mesma. O modelo consiste de uma fonte de corrente, um diodo com uma resistência em paralelo e uma resistência série. A metodologia usada consiste na determinação das equações do modelo e solução numérica utilizando o Método de Newton-Raphson para obtenção das curvas de corrente e tensão e efetuado a comparação com as curvas de um painel de 150 W, fornecidas pelo fabricante. Adicionalmente foi determinado o ponto de operação de potência máxima utilizando o algoritmo de perturbação e observação (P&O) e efetuado simulação para análise da variação do ponto de máxima potência com a temperatura e irradiação. As simulações apresentaram resultados satisfatórios, quando comparadas com as curvas do fabricante. Os resultados dos estudos contribuem para a melhoria da análise da performance do modelo e como referências aos usuários e projetistas de sistemas de geração fotovoltaicos

Palavras-chave: Energia Fotovoltaica, Modelagem e Simulação, Ponto de máxima potência,

1. INTRODUÇÃO

Com a crescente demanda de uso de energia elétrica e a matriz energética basicamente composta por usinas hidroelétricas existente no país, vários métodos de geração de energia alternativos se fazem necessários.

Com a preocupação dos governos com o meio ambiente, e também com o esgotamento das fontes fósseis de energia, tem-se dado mais atenção ao estudo de fontes renováveis de energia, e decorrente disso, grandes avanços tem sido obtidos. Também nesse sentido, o Protocolo de Kyoto tem contribuído para que os países reduzam as emissões de gases que causam o efeito estufa, sugerindo uma maior utilização de fontes não poluidoras do meio ambiente, tal como a energia solar fotovoltaica.

As células fotovoltaicas têm a função de converter a energia solar em energia elétrica através do efeito fotoelétrico. Os modelos existentes na literatura da curva I(V) apresentam variada complexidade, sendo usados em diversas aplicações de estudo, para descrever o comportamento da célula ou painel fotovoltaico. Para escolher um modelo apropriado, é necessário avaliar o grau de precisão requerido nos resultados, onde vários fatores físicos ou climáticos precisam ser considerados ou desprezados. Conforme Seguel (2009) uma simulação de um modelo, de modo geral, requer que o mesmo seja capaz de prever os valores de corrente e tensão sobre uma faixa ampla de tensão.

Para análise da performance de uma célula fotovoltaica é necessário que se conheça como a corrente elétrica, fornecida pela célula, quando exposta à luz, varia com a tensão entre seus terminais, na presença de condições de irradiância e temperatura. As ferramentas informatizadas presentes na atualidade tem reduzido significativamente a complexidade da aplicação de métodos numéricos, facilitando seu desenvolvimento e aplicação. Assim, diferentes metodologias de modelagem e simulação são descritas e analisadas por Benatallah et al (2005) e Posadillo e Luque (2008). Egido e Lorenzo (1992) concluíram que modelos numéricos são precisos, mas complexos de aplicar, enquanto que modelos analíticos mostram uma reduzida precisão.

2. CIRCUITO EQUIVALENTE E MODELO MATEMÁTICO DE CÉLULA FOTOVOLTAICA

O circuito equivalente elétrico mais simples de uma célula solar é uma fonte de corrente em paralelo com um diodo. A saída da fonte de corrente é diretamente proporcional à irradiação incidente na célula. O diodo determina a característica I-V da célula. Introduzindo outros parâmetros, será agregado ao modelo maior precisão na resposta I(V) e complexidade nos cálculos.

Basicamente existe um único modelo tradicionalmente em uso, que atende a maioria das aplicações. Trata-se de modelo de um diodo baseado na equação de diodo de Shockley modificada, acrescentando um fator de qualidade do diodo, para considerar o efeito de recombinação na região do espaço das cargas. O circuito equivalente simplificado de uma célula

solar consiste de uma fonte de corrente a qual é diretamente proporcional à irradiância solar com uma resistência em série e um diodo e uma resistência em paralelo, conforme apresentado na Fig. 1, conforme Seguel (2009):

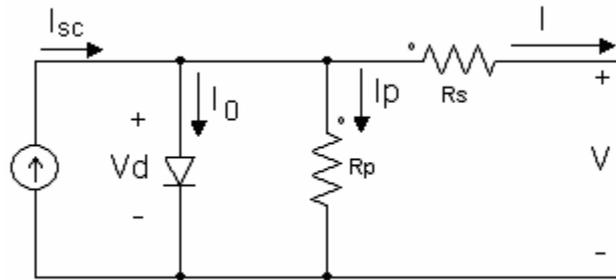


Figura 1.- Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica – modelo de um diodo

Neste modelo, a resistência série R_s representa as perdas joule no material semicondutor e contatos. Seu efeito torna-se muito importante em um painel fotovoltaico, onde inúmeras células são conectadas em série, provocando aumento de perdas e quedas de tensão. A resistência paralela está associada com uma perda decorrente de pequena dispersão de corrente através de um caminho resistivo em paralelo. Seu efeito é de menor significância no painel fotovoltaico, comparado com a resistência série.

O equacionamento do circuito da Fig. 1 conduz à expressão para a corrente de saída da célula, conforme Bühler (2006) :

$$I = I_{sc} - I_0 \cdot \left[e^{\frac{q(V+I \cdot R_s)}{n \cdot k \cdot T}} - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (1)$$

Na qual, " I_0 " é a corrente de saturação reversa da célula, " n " é o fator de idealidade da junção, " q " é a carga do elétron, " k " é a constante de Boltzman, " T " é a temperatura da célula.

A corrente I_{sc} depende da radiação incidente e da temperatura conforme:

$$I_{sc}(T) = I_{sc}(T_r) \left[1 + \alpha_T \cdot (T - T_r) \right] \quad (2)$$

onde

I_{sc} e T_r = são fornecidos pelo catálogo de fabricante (medido sob irradiação de 1000 W/m^2)

T_r = temperatura de referência da célula em Kelvin (K), usualmente 298 K (25 °C)

α = coeficiente de temperatura de I_{sc} em variação percentual por grau de temperatura, também fornecido pelo fabricante.

A corrente de curto circuito (I_{sc}) é proporcional à irradiância, assim, I_{sc} em uma dada irradiância (G) é dada por:

$$I_{sc(G)} = \left(\frac{G}{G_0} \right) I_{sc(G_0)} \quad (3)$$

onde: G_0 é o valor nominal da irradiância, normalmente 1000 W/m^2 .

A corrente reversa de saturação do diodo (I_0) na temperatura de referência (T_r) é dada pela equação:

$$I_0 = \frac{I_{sc} - \frac{V_{0c}}{R_p}}{\left(e^{\frac{qV_{0c}}{n \cdot k \cdot T}} - 1 \right)} \quad (4)$$

A corrente reversa de saturação I_0 é dependente da temperatura e para uma dada temperatura (T) é calculada por:

$$I_{0(T)} = I_{0(T_r)} \cdot \left(\frac{T}{T_r} \right)^{\frac{3}{n}} \cdot e^{-\frac{q \cdot E_g}{n \cdot K} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right)} \quad (5)$$

Na qual “ T_r ” é uma temperatura de referência, “ I_s ” é a corrente de saturação reversa na temperatura “ T_r ”, e “ E_G ” é a energia do *band-gap* do material da célula.

O valor da resistência em paralelo (R_p) é calculado por:

$$R_p = \frac{V_{0c}}{I_{sc} - I_{pm}} \quad (6)$$

sendo os valores dos variáveis fornecidos pelo catálogo do fabricante (características elétricas painel).

O valor da resistência série (R_s), considerando um painel fotovoltaico, tem um grande impacto na inclinação da curva I-V, próximo da tensão de circuito aberto (V_{0c}), sendo daí, calculada pela avaliação da inclinação da curva dV/dI , da curva I-V em V_{0c} . A equação para R_s é derivada pela derivada da equação (1) e então rearranjada em termos de R_s , avaliando a equação resultante em tensão de circuito aberto ($V=V_{0c}$) e também fazendo $I=0$;

$$R_s = -\frac{dV}{dI}(V_{0c}) - \frac{n \cdot K \cdot T / q}{I_0 \cdot e^{\frac{qV_{0c}}{n \cdot K \cdot T}}} \quad (7)$$

onde: $\frac{dV}{dI}(V_{0c})$ é a inclinação da curva em V_{0c} (tomar valor da curva I-V do catálogo do fabricante e dividi-lo pelo número de células em série)
 V_{0c} é a tensão de circuito aberto da célula (encontrado no catálogo, dividindo V_{0c} pelo número de células em série)

Desta forma, é possível resolver a equação da curva I-V. Esta equação é complexa porque a solução da corrente é recursiva pela inclusão da resistência série no modelo. Entretanto, pode-se encontrar a solução por simples iterações, usando o Método de Newton Raphson, pela rápida convergência da resposta.

O método de Newton Raphson é descrito por:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (8)$$

onde: $f'(x)$ é a derivada da função, $f(x) = 0$, x_n é um valor atual, e x_{n+1} é o próximo valor.

Reescrevendo (1), tem-se a seguinte função:

$$f(I) = I_{sc} - I - I_0 \left[e^{\frac{q(V+I \cdot R_s)}{n \cdot k \cdot T}} - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} = 0 \quad (9)$$

A derivada de (9) é dada por:

$$f'(I) = -1 - I_0 \cdot e^{\frac{q(V+I \cdot R_s)}{n \cdot k \cdot T}} \cdot \frac{q \cdot R_s}{n \cdot k \cdot T} - \frac{R_s}{R_p} \quad (10)$$

Introduzindo esta equação em (8), fornece a seguinte equação recursiva, e a corrente de saída (I) é computada iterativamente.

$$I_{n+1} = I_n - \frac{I_{sc} - I_n - I_0 \left[e^{\frac{q(V+I_n \cdot R_s)}{n \cdot k \cdot T}} - 1 \right] - \frac{V + I_n \cdot R_s}{R_p}}{-1 - I_0 \left(\frac{q \cdot R_s}{n \cdot k \cdot T} \right) e^{\frac{q(V+I_n \cdot R_s)}{n \cdot k \cdot T}} - \frac{R_s}{R_p}} \quad (11)$$

V, I = tensão e corrente de saída da célula solar

I_{sc} = fotocorrente gerada

I_0 = corrente de saturação reversa do diodo, que representa os fenômenos de difusão nas zonas neutras e de recombinação nas zonas de carga;

R_p = resistência paralela associada aos processos de fabricação (correntes de fuga na superfície das bordas da célula, micro-defeitos do cristal que ocasionam curto-circuitos, etc). OBS: Na simulação, R_p é suposta infinita.

R_s = resistência série é a resistência efetiva da célula, composta pelo efeito de resistência elétrica do silício, pela resistência de contato entre o silício e a metalização da célula e pela própria resistência da metalização, etc.

n = fator de idealidade do diodo, $1 < n < 2$

V_T = tensão a uma dada temperatura

T = temperatura em graus Kelvin (K)

q = carga do elétron ($1.602 \cdot 10^{-19}$ C)

k = constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K). Q

3. PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA – MÉTODO DA PERTURBAÇÃO E OBSERVAÇÃO – P&O

O método P&O é um método largamente utilizado para determinação do ponto máximo de potência. O algoritmo do método apresentado na Fig. 2, opera fazendo ajustes para a tensão de operação de um sistema fotovoltaico e observa se este supre e incrementa ou decresce a potência de saída do sistema. Se um decréscimo é observado, o algoritmo ajusta a tensão na direção oposta. O efeito de modo geral do algoritmo, o qual é simples para ser implementado, é que a potência de saída do sistema converge para o ponto de potência máxima, com alguma oscilação em torno do máximo verdadeiro.

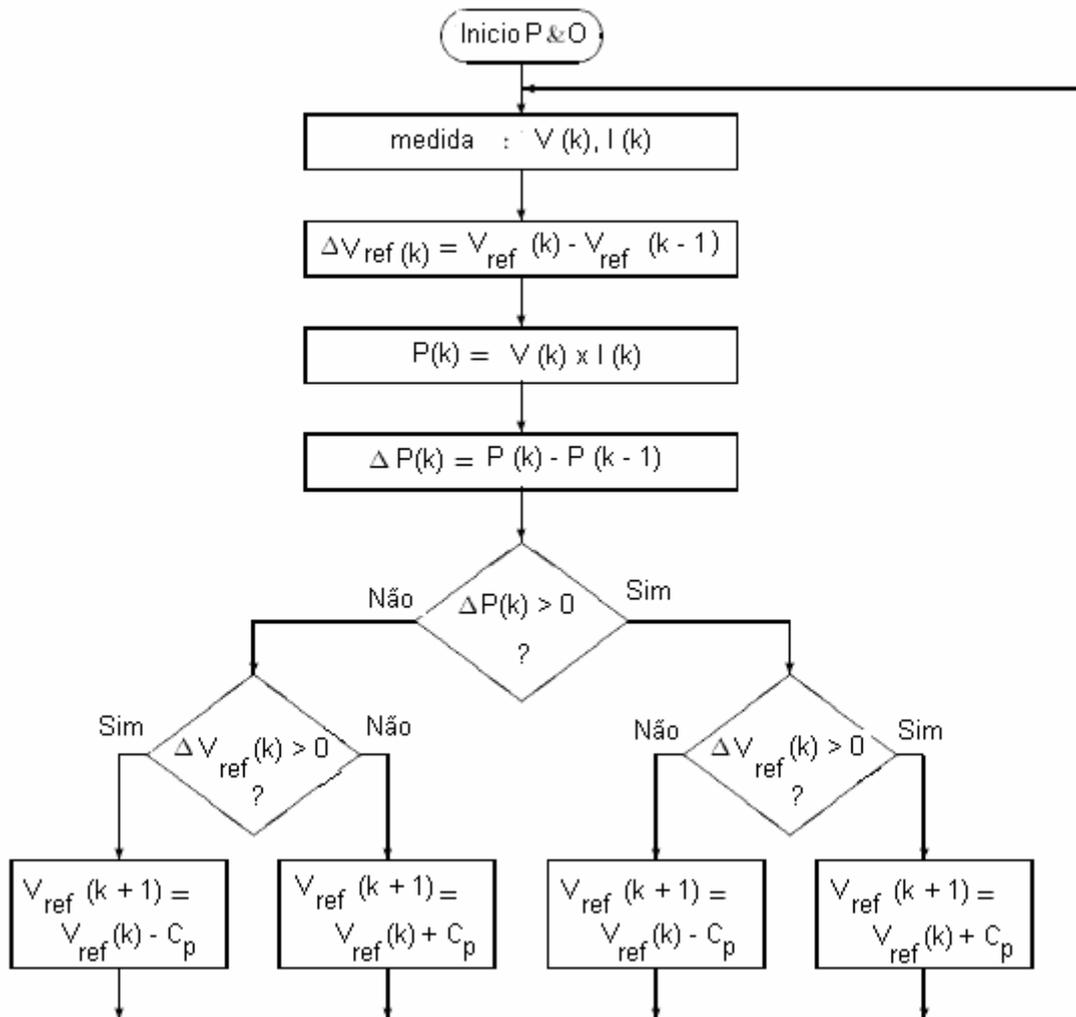


Figura 2 - Diagrama do algoritmo do método P&O – C_p é o tamanho do passo de perturbação

Fonte: Pacheco e Gules (2009)

Como pode ser visto na Fig. 2, V e I são medidos para calcular o vetor de potência de saída $P(k)$. Este valor de $P(k)$ é comparado com o valor obtido da última medida $P(k-1)$. Se a potência de saída tiver um aumento desde a última

medida, a perturbação da tensão de saída continuará na mesma direção do último ciclo. Se a potencia de saída tiver diminuído desde a última medida, a perturbação da tensão de saída será revertida para a direção oposta do último ciclo. Tão logo, que o ponto de máxima potência é alcançado, a tensão V oscilará em torno da tensão de operação ideal.

4. PAINEL FOTOVOLTAICO - SIMULAÇÃO

O painel modelo BP Solar SX 150 S foi escolhido para simulação, sendo o mesmo construído por 72 células de silício multicristalino conectadas em série e provê 150 W de potência de pico. A Tab. 1 fornece as especificações:

Tabela 1 – Características Elétricas do Painel BP Solar SX 150 S para as condições de irradiância de 1.000 W/m², temperatura de célula de 25 °C e espectro AM 1,5.

CARACTERÍSTICA *	VALOR
Potência Máxima (P _{máx})	150 W
Tensão na Pot. Máxima (V _{mp})	34,5 V
Corrente na Potência Máxima (I _{mp})	4,35 A
Potência garantida (P _{máx})	140 W
Corrente de Curto-circuito (I _{sc})	4,75 A
Tensão de Circuito-aberto (V _{oc})	43,5 V
Coefficiente de temperatura de I _{sc}	(0,065±0,015)%/°C
Coefficiente de temperatura da tensão	-(160±20)mV/°C
Coefficiente de temperatura da potência	-(0,5±0,05)%/°C
Temperatura nominal de operação do Painel	47±2 °C

Nota: * Dados fornecidos pelo fabricante (extraídos do painel fotovoltaico)

Para o Painel em estudo a estratégia de modelagem de um painel fotovoltaico não é diferente da modelagem de uma célula. Neste caso, os parâmetros são todos os mesmos, mas somente os parâmetros das tensões, tal como V_{oc} precisam ser divididos pelo número de células em série.

5. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

O MATLAB[®] foi escolhido para implementação do algoritmo de cálculo desenvolvido. O valor ótimo encontrado para o valor do fator de idealidade do diodo “n” que melhor se ajusta com a curva I-V do fabricante foi n=1,62. Com base no modelo elétrico do módulo fotovoltaico, chega-se a curva de corrente em função da tensão no módulo para uma dada temperatura.

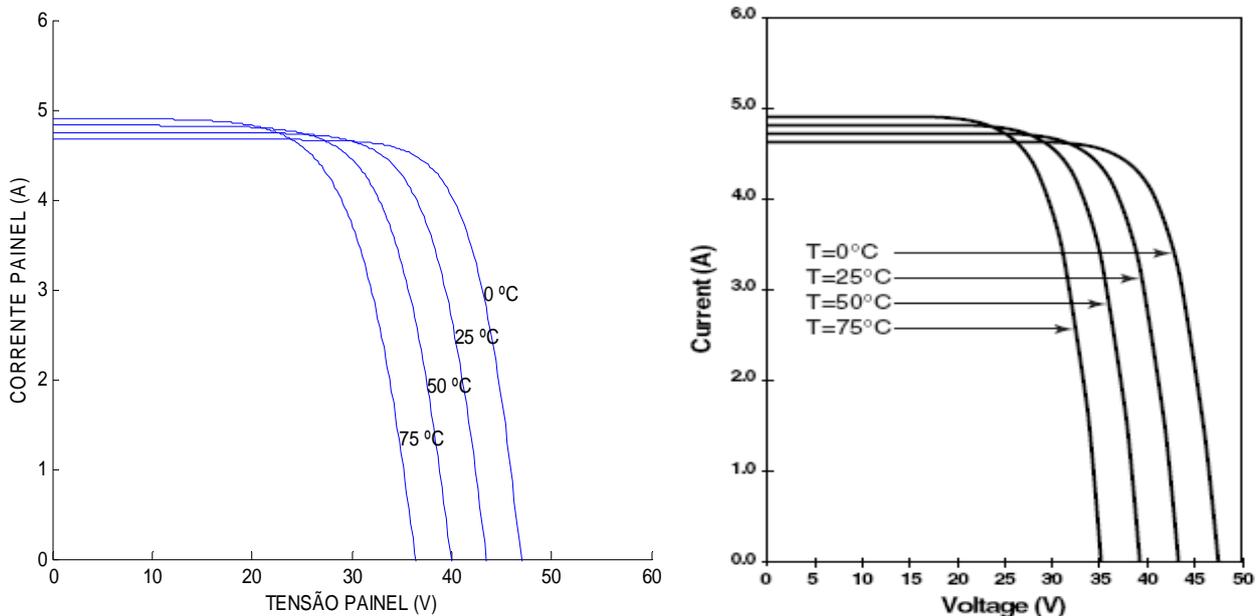


Figura 3 – Curvas I-V para um gerador fotovoltaico em vários níveis de temperatura

Por análise qualitativa, observa-se na Fig. 3 uma boa aproximação entre os pontos da curva do fabricante e os pontos da curva simulada e se percebe também que a corrente de saída I de um painel é pouco influenciada pela variação da temperatura, e a tensão de saída V varia significativamente com a variação de temperatura..

6. CURVA DE MÁXIMA POTÊNCIA DO PAINEL

A característica P-V de uma panela fotovoltaica pode ser obtida das características I-V. Um painel fotovoltaico pode produzir a potência em um ponto, chamado de ponto de operação em algum lugar da curva I-V. As coordenadas do ponto de operação são a corrente e a tensão. Existe um único ponto perto do joelho da curva I-V, chamada de ponto de máxima potência (PMP), no qual o painel opera com a máxima eficiência e produz a máxima potência de saída.

A potência em função da tensão é também ilustrada na Fig. 4.

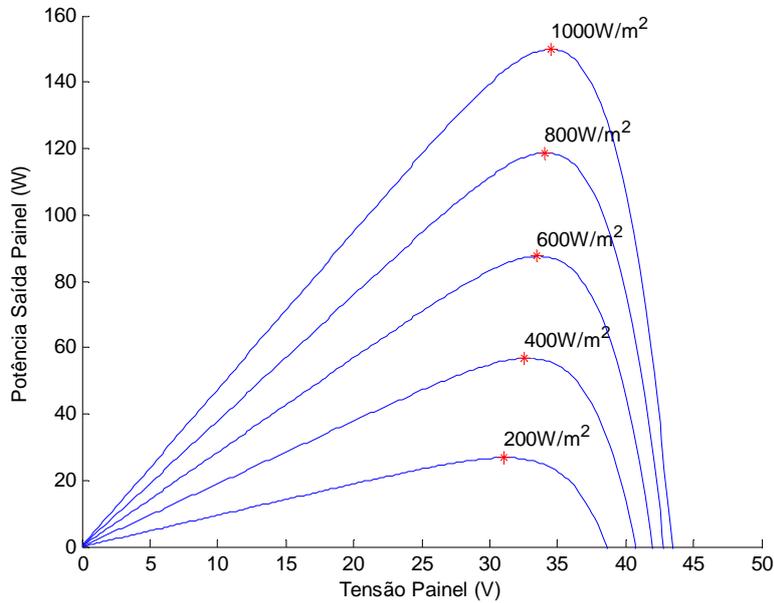


Figura 4 – Curvas P-V simuladas do Painel BP SX 150 S, sob várias irradiâncias (25 °C)

A Fig. 4 confirma o comportamento esperado das células que convertem a energia solar em energia elétrica: a potência de saída do painel é grandemente reduzida para um decréscimo da irradiância. Em função da dependência significativa da temperatura na tensão de circuito aberto V_{0c} , a potência de saída é inversamente proporcional à temperatura do painel. Estas figuras claramente mostram como a dependência da corrente e a tensão de saída I e V na temperatura e irradiância, afetam a potências de saída na proporção dos dois valores.

A curva P-I é sobreposta à curva I-V do painel, como mostrado na Fig. 5. Ela revela que a quantidade de potência produzida pelo painel varia significativamente pela sua condição de operação. É importante operar o sistema no ponto de máxima potência do painel fotovoltaico a fim de exportar a máxima potência do painel.

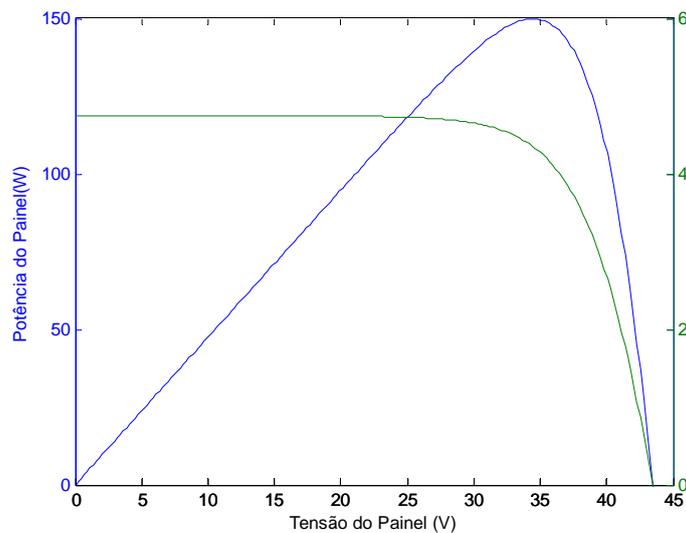


Figura 5 – Curvas de I-V e P-V superpostas

É possível visualizar a localização do ponto de máxima potência, ajustando o maior quadrado dentro da curva I-V, e sua área será igual à potência de saída a qual é dada pelo produto da tensão pela corrente. O fator de forma (FF) ou fator de enchimento, conforme Palz (1995), é uma grandeza que expressa o quanto a característica se aproxima de um retângulo no diagrama I x V. Quanto melhor a qualidade das células do módulo, mais próxima da forma retangular será sua curva. O ponto de máxima potência visualizado na Fig. 6 é o ponto de operação desejado para o painel fotovoltaico obter a máxima eficiência. Os valores de tensão e corrente são chamados de V_{mpp} e I_{mpp} , respectivamente.

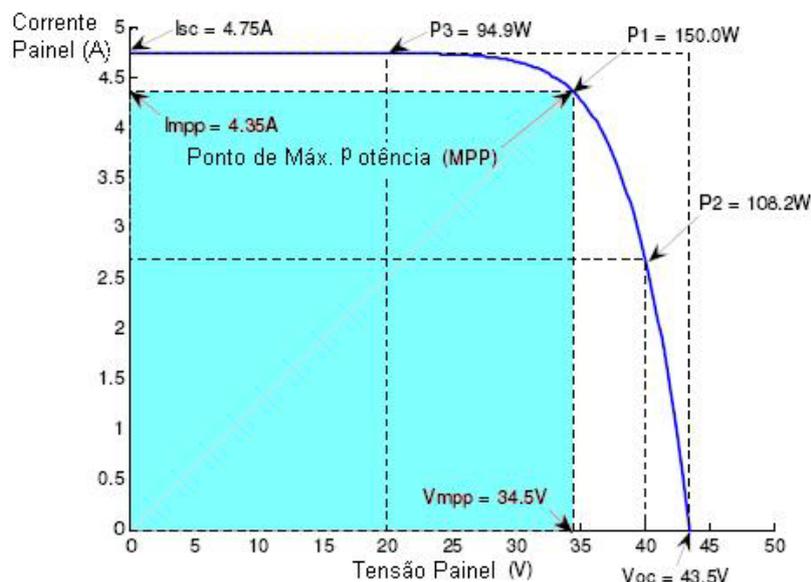


Figura 6 – Quadrado circunscrito na curva I-V – Pontos de máxima potência – Características Elétricas Painel

7. CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho descreveu a modelagem e simulação para geradores fotovoltaicos utilizando-se o programa MATLAB[®] versão 6.5. Pôde-se comparar os resultados simulados com os experimentais obtidos por ensaios realizados pelo fabricante. Com este modelo, pode-se futuramente conectar o gerador fotovoltaico ao modelo de uma bateria e controlador de carga, e desta forma simular um sistema fotovoltaico completo, analisando seu funcionamento, controlando e melhorando sua eficiência, além de poder estudar e simular seu dimensionamento. Verifica-se que a simulação pode ser de grande ajuda para a análise do funcionamento de um sistema fotovoltaico e redução de seus custos, já que situações das mais diversas podem ser supostas e avaliadas, melhorando todo o desempenho do sistema.

REFERÊNCIAS

- Büher, A. J. , Krenzinger (2006), A. Análise de curvas características sem iluminação como ferramenta para determinação de parâmetros fotovoltaicos. *Avances en Energias Renovables y Médio Ambiente*. Vol. 10, 2006, impresso em la Argentina. ISSN 0329-5184.
- Seguel, J. I. L. (2009). Projeto de um Sistema Fotovoltaico Autônomo de suprimento de energia usando técnica MPPT e controle digital. Dissertação de mestrado, UFMG, Belo Horizonte-MG, 2009.
- Benatallah A. Mostefaoui R., Boubekri M. (2005) A comparison of Simplified and Statistical Methods of Sizing Photovoltaic Installation for a Remote Dwelling in the Saharan Region. *Journal of the Human-Environmental System*.
- Egido M. y Lorenzo E. (1992). The Sizing of Stand Alone PV-Systems: a Review and a proponed New Method. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. No 26, pp. 51-69.
- Pacheco, J. P. ; Gules, R. (2009). Otimização da energia gerada por painéis solares fotovoltaicos em sistemas isolados da rede elétrica. I Mostras Anual de Pesquisa e Pós-Graduação do CPGEI, Curitiba - PR
- Posadillo R. e López Luque R. (2008). Approaches for developing a sizing method for stand-alone systems with variable demand. *Renewable Energy*, no 33, pp. 1037-1048.
- Palz, W. *Energia Solar e Fontes Alternativas*. São Paulo: Hemus, 1995

ANALYTICAL PERFORMANCE MODELING OF FOTOVOLTAIC PANEL UNDER VARYING TEMPERATURE AND LIGHT AND DETERMINING THE MAXIMUM POWER POINT

Abstract. *This paper presents the modeling of a photovoltaic cell based on the Shockley diode equation considering the influence of solar radiation and temperature on the performance of its operation. The model consists of an electric energy source, a diode with a resistor in parallel and an inline resistance. The methodology used is to determine the model equations and numerical solution using the Newton-Raphson method to obtain the current and voltage curves and compare them with the curves of a 150 W panel supplied by the manufacturer. Additionally we determined the operating point of maximum power using the algorithm of (perturbation?) and observation (P & O) and performed simulations to study the variation of the point of maximum power with temperature and irradiation. Simulations show satisfactory results, when compared to the curves supplied by the manufacturer. The results of the studies contribute to improving the performance analysis of the model and to be a reference to users and designers of photovoltaic electric generating systems.*

Key words: *Photovoltaic, Modeling and Simulation, Maximum Power Point*