

DESCRIÇÃO SOBRE O COMPORTAMENTO DA EFICIÊNCIA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS COM BASE EM MODELO COMPUTACIONAL

LUIZA G. S. LOPES¹, DOMINGOS S. L. SIMONETTI², RENNER S. CAMARGO³, EDMILSON B. ROCHA JUNIOR¹

¹ Instituto Federal do Espírito Santo - Campus Vitória

Avenida Vitória, 1729 - Jucutuquara - Vitória - ES - 29040-780

² Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo

CT II, Avenida Fernando Ferrari, S/N - Goiabeiras - Vitória - ES - 29060-900

³ Instituto Federal do Espírito Santo - Campus Serra

Rodovia ES-010 - Km-6,5 - Manginhos - Serra - ES - 29173-087

E-mails: luizagslop@gmail.com, d.simonetti@ele.ufes.br, rscamargo@ifes.edu.br, ebermudes@ifes.edu.br

Abstract— The mathematical description of photovoltaic modules became a powerful tool of analysis and project in the last few decades, from which it's possible to extract from it the solar panel's response for multiple constructive parameters and different atmospheric conditions. The objective of this paper is to describe the behavior of the efficiency of a module towards variations of solar radiation intensity and temperature. For such purpose, the model with parallel resistance is simulated and manipulated in MATLAB® to generate output curves. In addition to the characteristic curves, graphics of efficiency in terms of solar radiation, temperature and voltage per current are obtained. From the results, the response in efficiency is described to achieve the objective, and the Effective Conversion parameter is proposed for evaluation of the module's yield.

Keywords— Simulation, performance, solar radiation, temperature, polycrystalline silicon.

Resumo— A descrição matemática de módulos fotovoltaicos se tornou uma poderosa ferramenta de análise e de projeto nas últimas décadas, da qual é possível extrair as respostas do painel solar para múltiplos parâmetros construtivos e diversas condições atmosféricas. O objetivo deste artigo é descrever o comportamento da eficiência de um módulo perante variações de intensidade de radiação solar e temperatura. Para tal, o modelo com resistência em paralelo é simulado e manipulado em MATLAB® para a geração de curvas de saída do painel. Além das curvas características, são obtidos gráficos de eficiência em função de radiação solar, temperatura e tensão por corrente. A partir dos resultados, descreve-se a resposta em eficiência, atingindo-se o objetivo, e propõe-se o parâmetro de Conversão Eficaz para avaliação do desempenho do módulo fotovoltaico.

Palavras-chave— Simulação, desempenho, radiação solar, temperatura, silício policristalino.

1 Introdução

O aperfeiçoamento das técnicas de conversão da energia solar em energia elétrica está permitindo a difusão da tecnologia fotovoltaica em residências, espaços públicos e meios de transporte. Ainda assim, há fortes obstáculos ao seu crescimento, como a baixa eficiência das células solares, o elevado custo de implantação e a carência de incentivos governamentais.

Atualmente, as pesquisas buscam aumentar a participação da energia fotovoltaica por meio de aprimoramentos que tornam as tecnologias de conversão cada vez mais eficientes, versáteis e adaptáveis às aplicações do dia a dia. Isso promove maior acessibilidade à energia elétrica, sustentabilidade de pequenas centrais geradoras e popularização de avanços tecnológicos (CRESESB, 2014).

Em meio a este crescimento, a modelagem matemática de módulos e sistemas fotovoltaicos configura, junto com *softwares* numéricos, uma ferramenta importante para simulações e análises, as quais geram resultados que auxiliam o planejamento de sistemas de geração de diversas escalas, escolha de painéis, previsão de resultados de testes e demonstrações didáticas. Por exemplo, com conhecimento sobre o

clima de um local, é possível estimar a produção energética, calcular o tempo de retorno do investimento e avaliar a relação custo-benefício de um sistema fotovoltaico.

Os modelos matemáticos utilizados nas simulações descrevem circuitos elétricos equivalentes de painéis solares e fornecem suas curvas características. Estes circuitos envolvem condições ambientais e parâmetros construtivos, como coeficiente de temperatura da corrente de curto-circuito, fator de qualidade de junção PN e resistências internas. A intensidade de radiação solar e a temperatura das células são os principais fatores externos que afetam a corrente, a tensão e a potência de saída dos módulos. A relação entre a potência de saída e a irradiação é diretamente proporcional; já a relação dessa potência com a temperatura é inversamente proporcional (Costa, 2010).

O sombreamento, forma de redução da incidência de luz solar, pode ser provocado por fatores naturais como nuvens e árvores, e por fatores antrópicos como construções altas. Em geral, é prejudicial aos sistemas fotovoltaicos, pois promove decréscimo da energia gerada e aquecimento das células solares (Lopez, 2012).

Entre fatores internos e externos, precisa-se avaliar a eficiência energética dos módulos fotovoltaicos.

Para isso, existem parâmetros como o Fator de Forma, que indica o quanto a característica I-V se aproxima do ideal e a classificação do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) (CRESESB, 2014). Estes parâmetros existentes são muito limitados visto que representam a eficiência dos painéis em condições muito específicas, quando no cotidiano estão sujeitos às mais diversas condições atmosféricas. Diante da necessidade de conhecer o desempenho dos módulos fotovoltaicos de forma mais abrangente, propõe-se o parâmetro de Conversão Eficaz, que descreve a eficiência para uma grande variação de irradiação solar.

Portanto, este artigo descreve o comportamento das curvas de eficiência de um módulo para variações de radiação solar e temperatura. O estudo se baseia no modelo com resistência em paralelo, apresentado nas Seções 2 e 3, com simulações e manipulações em MATLAB®. Na Seção 4, são apresentadas curvas de eficiência por radiação solar, sendo proposto o parâmetro de Conversão Eficaz. Na Seção 5, são apresentadas curvas de eficiência por temperatura e sua relação com a radiação. Na Seção 6, são apresentadas as superfícies de eficiência por tensão e corrente.

2 Modelagem Matemática

É possível modelar células e painéis fotovoltaicos por meio de circuitos elétricos, inclusive considerando suas não idealidades. O modelo utilizado neste trabalho (Figura 1) consiste em uma fonte de corrente em paralelo com um diodo, ligados a uma resistência em paralelo, a qual representa as perdas devido às correntes parasitas nas células, e uma em série, que representa as perdas nos contatos metálicos que conectam as células.

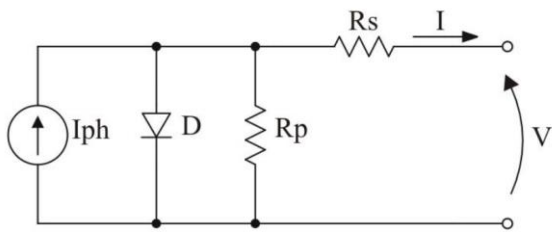


Figura 1. Circuito equivalente da célula fotovoltaica.
Fonte: Casaro, Martins, 2008.

Casaro e Martins (2008) modelaram matematicamente o circuito apresentado, do qual se encontra a equação da corrente de saída em função da tensão de saída (1):

$$I = I_{ph} - I_r \cdot \left[e^{\left(\frac{q(V + I.R_s)}{\eta.k.T} \right)} - 1 \right] - \frac{V + I.R_s}{R_p} \quad (1)$$

Em que:

V e I – Tensão e corrente nos terminais de saída de uma célula solar.

I_{ph} – Fotocorrente.

I_r – Corrente de saturação reversa da célula.

R_s e R_p – Resistências série e paralela da célula.

q – Carga do elétron, $1,6 \times 10^{-19}$ C.

η – Fator de qualidade da junção PN.

k – Constante de Boltzmann, $1,38 \times 10^{-23}$ J/K.

T – Temperatura, em K.

Os parâmetros I_{ph} e I_r são obtidos em (2) e (3):

$$I_{ph} = [I_{sc} + \alpha.(T - T_r)] \frac{P_{sun}}{1000} \quad (2)$$

$$I_r = I_{rr} \left(\frac{T}{T_r} \right)^3 \cdot e^{\left[\left(\frac{q.EG}{\eta.k} \right) \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right]} \quad (3)$$

Em que:

I_{sc} – Corrente de curto-circuito por célula.

α – Coeficiente de temperatura de I_{sc} .

T_r – Temperatura de referência, 298 K.

P_{sun} – Intensidade de radiação solar, W/m².

I_{rr} – Corrente de saturação reversa de referência.

EG – Energia da banda proibida, 1,1 eV.

Substituindo (2) e (3) em (1) e adotando o ponto de operação $I=0$ e $V=V_{oc}$ (tensão de circuito aberto por célula) com $T=T_r$, isola-se o parâmetro I_{rr} em (1) e encontra-se a equação (4).

$$I_{rr} = \frac{I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_p}}{e^{\left(\frac{q.(V_{oc})}{\eta.k.T_r} \right)} - 1} \quad (4)$$

Modifica-se (1) para a equação (5) de forma a encontrar uma função $f(I)$, tal que é possível calcular o zero desta função pelo Método de Newton-Raphson.

$$f(I) = I_{ph} - I - I_r \cdot \left[e^{\left(\frac{q.(V + I.R_s)}{\eta.k.T} \right)} - 1 \right] - \frac{V + I.R_s}{R_p} \quad (5)$$

Derivando (5) em função de I, tem-se (6):

$$f'(I) = -1 - I_r \cdot \left[e^{\left(\frac{q.(V + I.R_s)}{\eta.k.T} \right)} \right] \cdot \frac{q.R_s}{\eta.k.T} - \frac{R_s}{R_p} \quad (6)$$

Aplica-se $f(I)$ e $f'(I)$ no Método de Newton-Raphson e obtém-se a equação (7), em que n indica a n -ésima iteração do processo. Assim, é possível calcular a corrente de saída em função da tensão de saída, da temperatura da célula e da radiação solar.

$$I_{n+1} = I_n - \frac{f(I_n)}{f'(I_n)} \quad (7)$$

3 Simulação de curvas características

Para a simulação das curvas de saída do módulo fotovoltaico, descrevem-se as equações apresentadas na Seção 2 em um programa no programa MATLAB®.

Complementando os parâmetros necessários para os cálculos, reúnem-se alguns dados importantes de catálogo – entre eles número de células, máxima potência ($P_{\max}$) em STC (*Standard Test Condition*), tensão no ponto de máxima potência (V_{mpp}), corrente no ponto de máxima potência (I_{mpp}), tensão de circuito aberto (V_{oc}), corrente de curto-circuito e coeficiente de temperatura de I_{sc} – e calculam-se as resistências R_s e R_p com o seguinte procedimento (Casaro, Martins, 2008):

- 1) Fixa-se R_p em 20 Ω ;
- 2) A partir de 1 m Ω , incrementa-se o valor de R_s até que a inclinação da curva I-V após o ponto de máxima potência em STC se iguale à apresentada no catálogo do fabricante;
- 3) Decrementa-se o valor de R_p até que a potência máxima chegue ao valor desejado;
- 4) Verifica-se o valor da tensão no ponto de máxima potência. Caso coincida com V_{mpp} , conclui-se o processo. Em caso negativo, desloca-se o ponto de máxima potência para a esquerda (aumento de R_s e R_p) ou para a direita (diminuição de R_s e R_p), mantendo a potência no valor desejado.

Existem outros métodos para estimar R_p e R_s , como o apresentado por Villalva, Gazoli e Ruppert Filho (2009), em que estes parâmetros são ajustados iterativamente por meio de equações que relacionam os principais pontos das curvas I-V. Há também formas indiretas de cálculo dos parâmetros por meio de inteligência artificial e técnicas de interpolação, que são eficazes mas apresentam maior grau de complexidade e maior demanda computacional (Villalva, Gazoli, Ruppert Filho, 2009).

Escolhe-se para as análises deste trabalho o módulo policristalino o Yingli Solar YL245P-29b (35 mm Series), o qual apresenta os seguintes dados de catálogo:

- Quantidade de células: 60;
- $P_{\max}$: 245 Wp;
- V_{mpp} : 29,6 V;
- I_{mpp} : 8,28 A;

- V_{oc} : 37,5 V;
- I_{sc} : 8,83 A;
- α : 5×10^{-4} A/°C.

Com o procedimento citado para encontrar as resistências parasitas, adotam-se os valores de $R_s = 0,00525 \Omega$ e $R_p = 10 \Omega$. Assim, têm-se todos os parâmetros necessários para a execução do programa.

Simulando a variação de radiação solar com a temperatura fixa em 25° C, obtêm-se curvas características correspondentes a cada valor de intensidade, como mostram as Figuras 2 e 3. Levantando os valores de corrente de curto-circuito, observa-se que a relação dessa corrente com a radiação solar é praticamente linear entre 100 W/m² e 1000 W/m². Contudo, os pontos de máxima potência tem relação não linear, como será mostrado nas curvas de eficiência adiante.

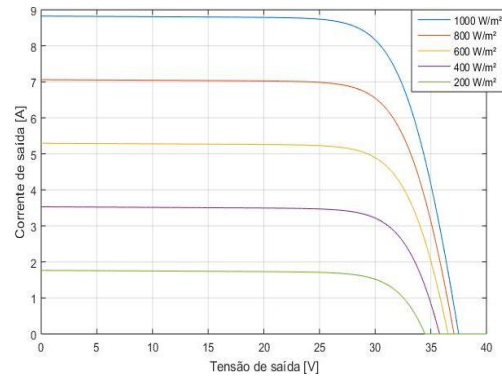


Figura 2: Curva I-V a 25 °C.

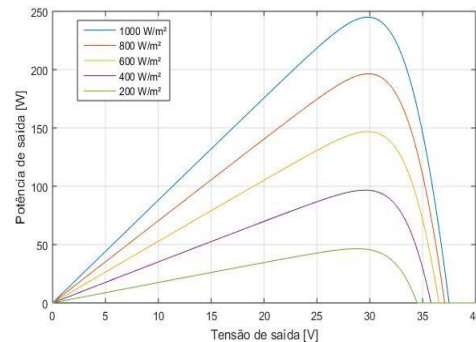


Figura 3: Curva P-V a 25 °C.

De posse da curva I-V, é possível avaliar o desempenho do módulo pelo Fator de Forma (FF), que expressa o quão próxima esta curva está da idealidade e é descrito por (8). Para o YL245P-29b, FF é igual a 0,7402.

$$FF = \frac{V_{oc} I_{sc}}{V_{mpp} I_{mpp}} \quad (8)$$

Percebe-se que os gráficos até então apresentaram relações entre duas variáveis. A fim de sintetizar as curvas características do painel, plota-se o gráfico de potência de saída em função de corrente e tensão de

saída. A Figura 4 mostra as curvas 3D do painel, a uma temperatura de 25 °C, para radiações de 1000 W/m² e 800 W/m².

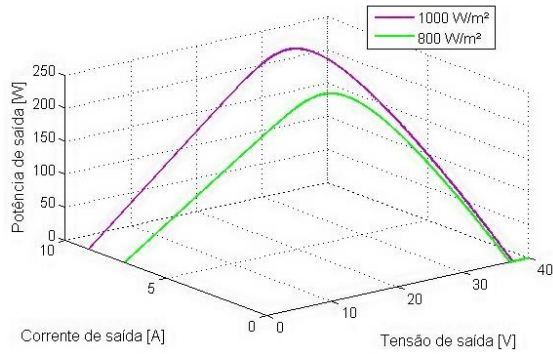


Figura 4. Curvas características de 1000 W/m² e 800 W/m² a 25 °C.

Variando a radiação e mantendo a temperatura, forma-se um conjunto de curvas 3D a partir do qual se determina uma superfície característica. Para plotar essa superfície, o código de simulação, originalmente utilizado para gerar curvas características, é adaptado para que o parâmetro de radiação solar varie de 0 a 1000 W/m², ao passo de 10 W/m². A Figura 5 apresenta a superfície característica do painel YL245P-29b para uma temperatura de 25 °C.

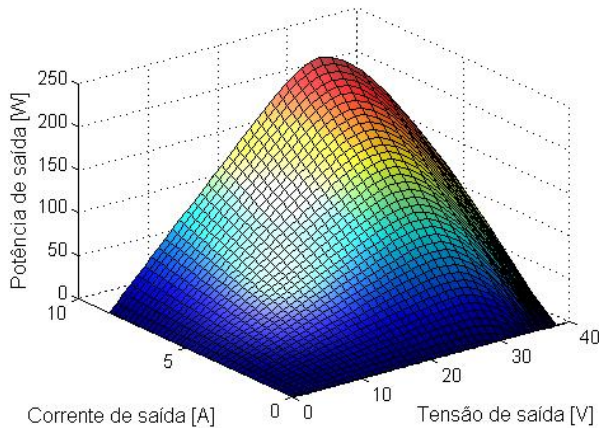


Figura 5. Superfície característica do YL245P-29b a 25 °C.

A superfície característica apresenta todos os pontos de operação possíveis de um módulo fotovoltaico a uma determinada temperatura. Para o intervalo de temperatura de operação, cada painel possui um conjunto específico de superfícies características.

4 Curva de eficiência por radiação solar e Conversão Eficaz

Por meio da equação (9) é possível calcular a eficiência do painel solar (N_{pm}) associada às condições-padrão de ensaio (STC, $P_{sun} = 1000 \text{ W/m}^2$ e $T = 25 \text{ °C}$), em que A é área do módulo e a máxima

potência P_{max} é dada em W_p (CRESESB, 2014). Para o painel YL245P-29b, N_{pm} é 15,1%.

$$N_{pm} = \frac{I_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF}{A \cdot P_{sun}} \cdot 100 = \frac{P_{max}}{A \cdot P_{sun}} \cdot 100 \quad (9)$$

Propõe-se utilizar a equação (9) para calcular a eficiência em outros níveis de radiação. Para isso, de posse da superfície característica (Figura 5), faz-se o levantamento dos pontos de máxima de potência e relacionam-se esses pontos com a intensidade de radiação correspondente. Aplicando estes dados em (9), considerando $A = 1,623 \text{ m}^2$ para o YL245P-29b, obtém-se a curva de eficiência de conversão por intensidade de radiação solar, mostrada na Figura 6.

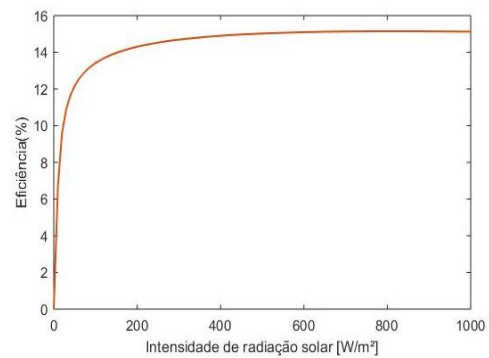


Figura 6. Curva de eficiência por radiação solar a 25 °C.

Observa-se que a curva tem comportamento crescente, com variação de 0% a 13% entre 0 e 80 W/m², que provoca grande inclinação nesse intervalo, e variação de 13% a 15,1% entre 80 e 1000 W/m², implicando em baixa inclinação da curva.

Sugere-se que o comportamento ideal dessa curva é uma reta de inclinação zero, como mostra a Figura 7. Ou seja, nesse caso, o módulo apresentaria eficiência constante, correspondente ao seu máximo valor encontrado em STC.

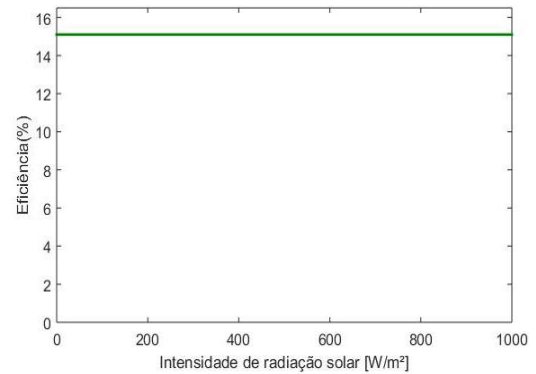


Figura 7. Curva de eficiência por radiação solar ideal a 25 °C.

A fim de avaliar a resposta em eficiência do painel à variação de radiação solar, propõe-se a Conversão Eficaz (CE), que é a relação entre a área abaixo

da curva real de eficiência (A_{er}) e a variação de intensidade de radiação solar (ΔP_{sun}) – em outras palavras, o valor médio da curva real de eficiência (10).

$$CE = \frac{A_{er}}{\Delta P_{sun}} \quad (10)$$

A variação da intensidade de radiação solar corresponde ao intervalo de 0 a 1000 W/m², como apresentado na Figura 6.

O cálculo de A_{er} se torna simples ao se aplicar a Regra dos Trapézios na curva de eficiência, método de integração numérica descrito em (11) (Sperandio, 2014).

$$\int_{x_0}^{x_n} f(x) dx \approx \frac{h}{2} \cdot [f(x_0) + 2 \cdot [f(x_1) + \dots + f(x_{n-1})] + f(x_n)] \quad (11)$$

Em que:

$f(x)$ – Função integrada.

x_0 – Valor inicial do intervalo de integração.

x_n – Valor final do intervalo de integração.

h – Amplitude dos subintervalos, $(x_n - x_0)/2$.

$f(x_i)$ – Imagem da função nos pontos dos subintervalos.

Para calcular A_{er} da curva apresentada na Figura 6, define-se o intervalo de integração de 0 a 1000 W/m² e amplitude dos subintervalos igual a 100 W/m², e levantam-se os valores de eficiência para o cálculo área abaixo da curva. Aplicando estes dados em (11), tem-se que A_{er} é numericamente igual a 14,036.

Calculando a relação (10), encontra-se que a Conversão Eficaz do YL245P-29b é igual a 14,036%. Isso indica que, para uma variação de radiação solar entre 0 e 1000 W/m², a conversão média do módulo está 7,2% abaixo da conversão máxima ideal, como representado na Figura 8.

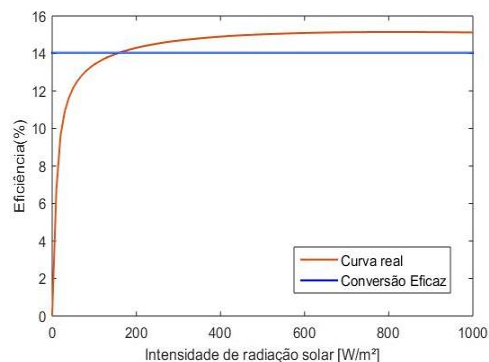


Figura 8. Curva de eficiência por radiação solar real e Conversão Eficaz.

5 Curva de eficiência com variações de temperatura

Para verificar a influência da temperatura na curva eficiência por radiação solar, varia-se este parâmetro de 0 °C a 100 °C ao passo de 10 °C e geram-se as curvas mostradas na Figura 9. Comparando os valores de eficiência máxima, observa-se que um aumento de 10 °C corresponde, em média, a um decréscimo de 0,65% de eficiência.

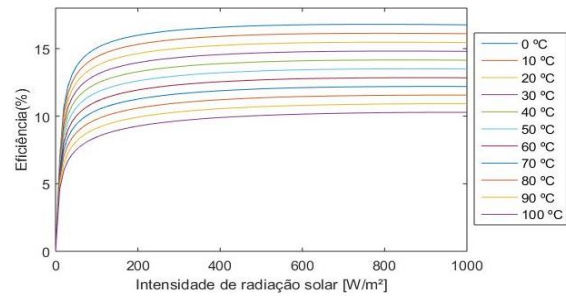


Figura 9: Curva eficiência por radiação solar com variação de temperatura.

Tomando a temperatura como variável independente (eixo das abscissas), varia-se a radiação solar de 0 a 1000 W/m² e obtém-se o conjunto de retas mostrado na Figura 10. As retas correspondentes a 1000, 900, 800 e 700 W/m² estão muito próximas, praticamente indistintas no gráfico.

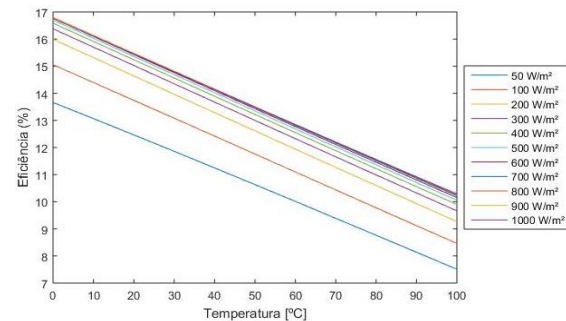


Figura 10: Retas de eficiência por temperatura com variação de radiação solar.

Observa-se que, para altos níveis de radiação (entre 600 a 1000 W/m²), as curvas de eficiência por temperatura sofrem baixíssima alteração, enquanto para baixos níveis de radiação (abaixo de 600 W/m²), as retas sofrem um deslocamento para baixo no eixo vertical. Este comportamento corresponde analogamente ao da curva de eficiência por radiação solar, em que a eficiência varia pouco entre 500 e 1000 W/m² e varia muito entre 0 e 500 W/m². É importante pontuar que, para valores de radiação abaixo de aproximadamente 30 W/m², a curva de eficiência por temperatura deixa de ser uma reta.

6 Curva de eficiência por tensão e corrente

A partir da superfície característica, aplica-se (9) para encontrar a superfície da eficiência em função da tensão e da corrente de saída do módulo. Dessa forma, cada curva característica, como as mostradas na Figura 4, tem os valores de potência divididos pelo produto da área do painel com a sua respectiva intensidade de radiação. Assim, obtém-se a curva da Figura 11.

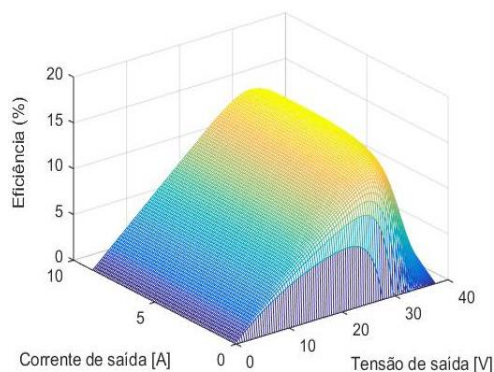


Figura 11. Curva de eficiência por tensão e corrente de saída para variação de intensidade de radiação solar a 25° C.

Analogamente ao comportamento das curvas de potência por tensão e corrente, observa-se que, para correntes a partir de 0,5 A, a eficiência aumenta linearmente até a tensão de máxima potência e decresce rapidamente deste ponto até a tensão de circuito aberto.

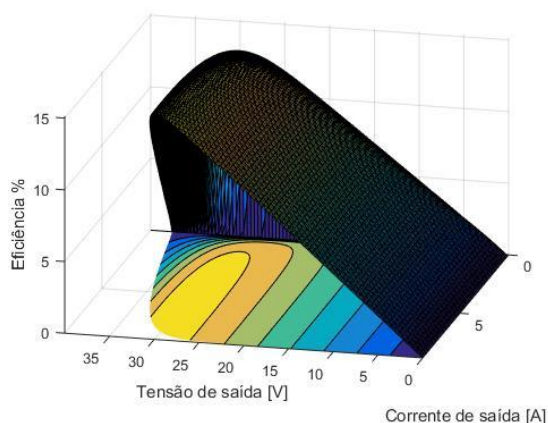


Figura 12: Contorno da curva de eficiência por tensão e corrente de saída a 25° C.

No contorno da superfície na Figura 12 nota-se que, na região de máxima potência (em torno de 29 V), o nível acima de 14% (valor próximo do CE) começa a partir de aproximadamente 1,2 A. Isso ilustra o comportamento apresentado na curva de eficiência por radiação solar em termos da saída do painel – para baixos níveis de radiação, correspondentes a baixas correntes no ponto de máxima potência, o valor de eficiência varia rapidamente, passando por vários contornos, enquanto para níveis de radiação

mais altos, a variação de eficiência é baixa e permanece dentro do mesmo contorno.

7 Conclusão

Da curva de eficiência por radiação solar obtém-se o seu valor médio, o qual é proposto como o parâmetro CE. Enquanto o Fator de Forma indica a desempenho do painel apenas em STC, condição que não é frequente no cotidiano, a Conversão Eficaz apresenta uma perspectiva mais abrangente e intuitiva acerca da resposta do módulo à variação de radiação solar, que acontece a todo o momento – seja pelo passar do dia, por nuvens, pelo sombreamento dos elementos do meio urbano. Assim, ela se torna uma ferramenta de avaliação e comparação entre painéis.

É possível observar a influência da radiação solar também nas retas de eficiência por temperatura. A variação da distância entre elas é análoga ao comportamento da curva de eficiência por radiação – é grande para baixas intensidades de radiação e baixa para altas intensidades.

Assim, o objetivo proposto para este artigo foi atingido: descrever o comportamento da eficiência de um módulo perante variações de intensidade de radiação solar e temperatura, usando como exemplo o painel YL245-29b. As descrições matemáticas utilizadas – curvas e superfícies características, curvas de eficiência – podem ser aplicadas para outros módulos alterando-se os parâmetros do modelo com resistência em paralelo.

Referências Bibliográficas

- Casaro, M. M.; Martins, D. C. (2008). Modelo de Arranjo Fotovoltaico Destinado a Análises em Eletrônica de Potência via Simulação. *Eletrônica de Potência*, Florianópolis, v. 13, n. 3, p. 141-146.
- Costa, W. (2010). Modelagem, estimação de parâmetros e método MPPT para módulos fotovoltaicos. Ph.D. Universidade Federal do Espírito Santo.
- CRESESB. (2014). Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. [ebook] Available at: http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf [Accessed at 20 Mar. 2018].
- Lopez, R. (2012). *Energia Solar para Produção de Eletricidade*. São Paulo: Artliber.
- Sperandio, D.; Mendes, J. and Silva, L. (2014). *Cálculo Numérico*. 2nd ed. São Paulo: Pearson, pp.216-224.
- Villalva, M. G.; Gazoli, J. R.; Ruppert Filho, E. (2009). Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. *IEEE Transactions on power electronics*, v. 24, n. 5, p. 1198-1208.