

Modelos Matemáticos para Diferentes Tecnologias de Painéis Fotovoltaicos - Análise Comparativa

Mateus Campos Falcão* Lucas Vinícius Hartmann*
Camila Seibel Gehrke* Fabiano Salvadori*
Msc. Iago de Moura Faria** Dr. Gustavo Malagoli Buiatti**
Paulo Vicktor Felix Dias**
Dra. Juliana de Moraes Marreco de Freitas**

* Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade
Federal da Paraíba, João Pessoa, PB, Brasil (e-mail:
mateus.falcao@cear.ufpb.br; lucas.hartmann@cear.ufpb.br;
camila@cear.ufpb.br; salvadori.fabiano@cear.ufpb.br).
** P&D ANEEL 1704

Abstract: In studies to predict the generation capacity of photovoltaic plants with the occurrence of possible shading, the use of computer simulations of photovoltaic panels, based on mathematical models, to analyze the possible consequences stands out. This work aims to observe the best mathematical model according to the technology used. For this, three different technologies of photovoltaic modules were modeled and simulated through two mathematical methods to analyze which are the most reliable results corroborated by the real behavior of the panel.

Resumo: Em estudos para previsão da capacidade de geração de plantas fotovoltaicas com a ocorrência de possíveis sombreamentos, se destaca a utilização de simulações computacionais de painéis fotovoltaicos, baseadas em modelos matemáticos, para análise das possíveis consequências. Esse trabalho tem como objetivo observar qual o melhor modelo matemáticos de acordo com a tecnologia utilizada. Para isso, três tecnologias distintas de módulos fotovoltaicos foram modeladas e simuladas através de dois métodos matemáticos para analisar qual o resultados mais fidedignos corroborados pelo comportamento real do painel.

Keywords: Photovoltaic panel; mathematical modeling; equivalent circuit; silicon; polycrystalline; monocrystalline; CIGS.

Palavras-chaves: Painel fotovoltaico; modelagem matemática; circuito equivalente; silício; policristalino; monocristalino; CIGS.

1. LISTA DE SÍMBOLOS

I_{PV} é a corrente fotovoltaica (diretamente proporcional à incidência de luz)
 I_D é a corrente do diodo
 I_0 representa a corrente de saturação reversa;
 q é a carga do elétron ($1,6 \times 10^{-9}$);
 V é a tensão da célula fotovoltaica;
 α representa o fator de idealidade do diodo;
 k é a constante de Boltzmann ($1,38064852 \times 10^{-23}$ J/K);
 T é a temperatura da junção pn;
 A é a área da célula;
 n_i representa a concentração de portadores intrínsecos do material;

D_p, D_n são os coeficiente de difusão de lacunas e elétrons, respectivamente, no material;
 L_p, L_n representam o comprimento de difusão de lacunas e de elétrons, respectivamente;
 N_d, N_a são a concentração dos dopantes tipo n e tipo p, respectivamente;
 R_p é a resistência em paralelo;
 R_s é a resistência em série;
 I_P é a corrente relacionada com as perdas elétricas das resistências (R_s e R_p);
 $I_{PV,r}$ é a corrente fotovoltaica nominal;
 ΔT é a diferença entre a temperatura atual e a nominal;
 G é a irradiância;
 G_r é a irradiância de referência;
 V_T é o potencial térmico;
 $I_{SC,r}$ é a corrente de curto circuito nominal;
 $V_{OC,r}$ é a tensão de circuito aberto nominal.

2. INTRODUÇÃO

Em 1954, a primeira célula solar de silício foi desenvolvida na Bell Laboratories (Chapin et al. (1954)) e sua principal

* Os autores agradecem o suporte financeiro da Aliança através do projeto P&D ANEEL 1704 "Binários eólico-solar e hídrico-solar - estudos para imbricar com máxima eficiência diferentes tecnologias fotovoltaicas em usinas existentes compartilhando T e D e aumentando a capacidade de geração"

aplicação por muitos anos foi no fornecimento de energia para veículos espaciais. A tecnologia das células solares foi beneficiada pelo alto padrão da tecnologia de silício desenvolvida originalmente para transistores e, posteriormente, para circuitos integrados e da qualidade e disponibilidade de silício (*Si*) monocristalino de alta perfeição. Nos primeiros anos, apenas monocristais cultivados em Czochralski (*Cz*) eram usados para células solares e apesar deste material ainda desempenhar um papel importante, atualmente, existem outras opções de monocristais (Goetzberger et al. (2003)).

Atualmente, existem três principais tecnologias de painéis fotovoltaicos: painéis de silício, painéis de filme fino e painéis híbridos. O primeiro grupo é dividido em duas categorias: silício monocristalino (mono-Si) e silício policristalino (p-Si). O segundo grupo contém o silício amorfo (a-Si), telureto de cádmio (CdTe), células fotovoltaicas orgânicas (OPV) e cobre, índio e gálio seleneto (CIS/CIGS). E o último grupo, painéis que geram energia e aquecem água simultaneamente.

O módulo de silício é a primeira geração de tecnologias fotovoltaicas. Apesar de ser a primeira tecnologia, ela está constantemente aprimorando sua capacidade e eficiência. Os principais tipos de módulos são os monocristalinos, que constituem cerca de 80% do mercado atual, e os policristalinos (El Chaar et al. (2011)). Os principais benefícios dos módulos de silício são desempenho, ligado a alta eficiência dessa tecnologia, confiabilidade, tem relação com a durabilidade de mais de 25 anos dos módulos e da pouca degradação nesse período, e abundância, visto que o silício é o segundo elemento mais abundante na crosta terrestre (Office (2014)).

O módulo CIGS tem benefícios ligados aos seus altos coeficientes de absorção óptica e características elétricas que permitem o ajuste do dispositivo. Além disso, uma melhor uniformidade é alcançada com o uso de seleneto, diminuindo o número de locais de recombinação no filme, beneficiando a eficiência quântica e, portanto, a eficiência de conversão (El Chaar et al. (2011)). O maior desafio para esses módulos tem sido a capacidade limitada de escalar o processo para alto rendimento e baixo custo. Vários métodos de deposição são usados: pulverização catódica, impressão de “tinta” e galvanoplastia com cada um tendo diferentes rendimentos e eficiências (Michael and Dieter (2007)). Os benefícios da tecnologia CIGS não se limitam ao baixo custo, fácil disponibilidade e expansão térmica do vidro de cal sodado que geralmente é utilizado como substrato. Mas também com o aumento do efeito elétrico que é uma melhoria na condutividade do módulo (Kuang et al. (2013)).

Após a escolha da tecnologia dos módulos fotovoltaicos, um importante passo é prever o comportamento elétrico do sistema fotovoltaico, a partir de informações prévias específicas de cada localização, como a temperatura e a irradiação do local. Essa etapa é importante para obter uma previsão de quanto de energia será entregue após a instalação do gerador fotovoltaico. Uma solução para esse problema é a modelagem matemática do sistema, que, normalmente, são feitas com base no modelo ideal e no modelo de um diodo (Shannan et al. (2014)).

O presente trabalho foi desenvolvido para simular e comparar as tecnologias de painéis fotovoltaicos, com o objetivo de observar qual a melhor tecnologia para cada situação de irradiação que pode afetar o rendimento do sistema fotovoltaico, além de comparar dois modelos matemáticos, modelo ideal e modelo de um diodo, para verificar qual o mais eficiente e em qual situação. Os modelos de simulação implementados são apresentados na seção 2. Em seguida, na seção 3 são apresentados as simulações e os resultados para as tecnologias citadas com base nas informações técnicas dos painéis.

3. MODELOS DE SIMULAÇÃO

Baseado na literatura, foi identificado os dois modelos matemáticos mais utilizados para simulações de painéis fotovoltaicos com o objetivo de verificar qual é o mais fidedigno em comparação com as informações dos *datasheets* fornecidos pelos fabricantes.

Um aspecto da simulação que requer atenção é a estimativa dos valores dos parâmetros, que são os componentes e as variáveis do modelo.

Em geral, os *datasheets* do fabricante fornecem a tensão de circuito aberto (V_{OC}), corrente de curto-circuito (I_{SC}), corrente no ponto de máxima potência (I_{MPP}), tensão no ponto de máxima potência (V_{MPP}) e potência no ponto de máxima potência (P_{MPP}). Em alguns casos, também são especificados os valores dos coeficientes de temperatura para tensão de circuito aberto (K_v) e corrente de curto-circuito (K_i).

Além dessas informações, os modelos necessitam de outros valores que não são catalogados como a corrente fotovoltaica (I_{PV}), corrente de saturação reversa (I_0), fator de idealidade do diodo (α) e as resistências em série (R_s) e paralelo (R_p).

Para utilizar o modelo ideal e o modelo de um diodo, é necessário primeiramente determinar os valores de seus parâmetros. A abordagem mais comum é estimá-los usando as informações disponíveis no *datasheet* e das equações derivadas dos pontos essenciais da curva I-V, como observado na Figura 1.

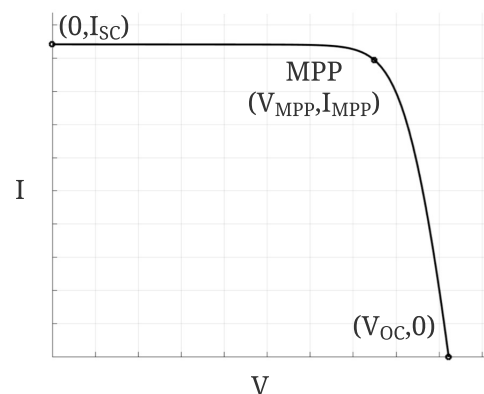


Figura 1. Curva característica do painel fotovoltaico.

Além desses pontos essenciais, as funções derivadas também podem ser utilizadas para obtenção de novas equações. O método mais simples é a modelagem de parâmetros constantes, onde se assume que apenas I_{PV} e I_0 são

afetados pelas variações ambientais, enquanto os outros parâmetros (α , R_s e R_p) são considerados constantes para uma determinada condição. Apesar desses parâmetros considerados constantes serem sensíveis às variações de G e T é possível encontrar valores satisfatórios para as simulações dos modelos dessa forma (Chin et al. (2015)).

3.1 Modelo Ideal

O modelo ideal é o modelo mais simples, porém o menos preciso quanto a característica no ponto de máxima potência do painel fotovoltaico. Esse modelo é representado conforme a Figura 2 e pode ser compreendido a partir de uma simples análise das Leis de *Kirchhoff*, sem ser necessário utilizar nenhuma ferramenta adicional. A partir dessa análise, obtém-se a Equação (1) para a corrente de saída (Sauthier (2019))

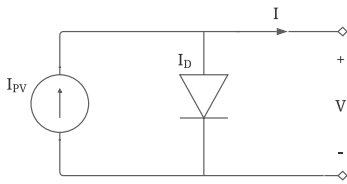


Figura 2. Diagrama elétrico do modelo ideal.

$$I = I_{PV} - I_D \quad (1)$$

I_D é modelado a partir da equação de *Shockley*, a Equação (2), que representa o modelo do diodo

$$I_D = I_0 \left(\exp \left(\frac{qV}{\alpha kT} \right) - 1 \right) \quad (2)$$

E I_0 pode ser definida a partir da Equação (3)

$$I_0 = qAn_i^2 \left(\frac{D_p}{L_p N_d} + \frac{D_n}{L_n N_a} \right) \quad (3)$$

Logo, o modelo ideal pode ser representado como a Equação (4)

$$I = I_{pv} - I_0 \left(\exp \left(\frac{qV}{\alpha kT} \right) - 1 \right) \quad (4)$$

3.2 Modelo de um Diodo

O modelo de um diodo para a maioria dos autores é visto como o modelo mais fiel da célula fotovoltaica e pode ser observado na Figura 3. Nele os fatores de perda de potência são retratados como pequenas resistências, R_s e R_p . A resistência em paralelo (R_p) representa a corrente de fuga, enquanto a resistência em série (R_s) modela as perdas internas devido às conexões elétricas e ao fluxo de corrente, além de contribuir para a eficiência do modelo (Adamo et al. (2011)).

Utilizando a Lei de *Kirchhoff* é possível chegar a Equação (5) para a corrente de saída

$$I = I_{PV} - I_D - I_P \quad (5)$$

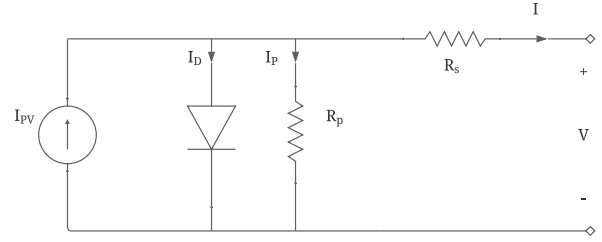


Figura 3. Diagrama elétrico do modelo de um diodo.

I_{PV} , I_D e I_P são definidas a partir das Equações (6), (7) e (8)

$$I_{PV} = (I_{PV,r} + K_i \Delta T) \frac{G}{G_r} \quad (6)$$

$$I_D = I_0 \left(\exp \left(\frac{V + R_s I}{\alpha V_T} \right) - 1 \right) \quad (7)$$

$$I_P = \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (8)$$

E a corrente de saturação reversa do diodo é definida por Equação (9)

$$I_0 = \frac{I_{SC,r} + K_i \Delta T}{\left(\exp \left(\frac{V_{OC,r} + K_v \Delta T}{\alpha V_T} \right) - 1 \right)} \quad (9)$$

4. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Existem várias ferramentas computacionais para simulação de células e módulos fotovoltaicos baseados em informações do *datasheet* dos fornecedores e em variações de irradiância e temperatura. A estimativa das curvas se baseiam em três pontos principais do painel: corrente de curto-circuito, potência máxima e tensão de circuito aberto. A partir desses pontos e dos ajustes do fator de idealidade do diodo e das resistências é possível chegar a modelos bem próximos as informações reais do painel.

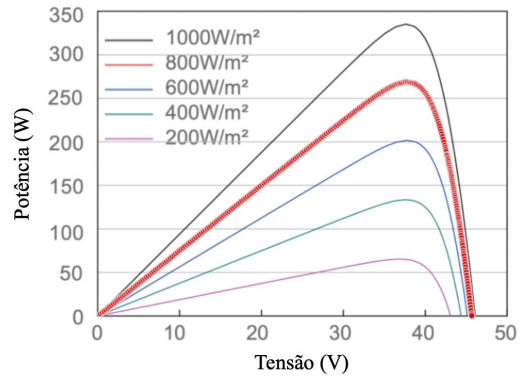


Figura 4. Extração de dados no *WebPlotDigitizer*.

Como o *datasheet* não fornece os valores numéricos da curva de tensão e potência é necessário extrair essas informações dos gráficos que estão presentes nele. Para auxiliar

nessa extração é utilizada a ferramenta *WebPlotDigitizer*, Figura 4. Após a obtenção desses pontos é necessário compará-los com os valores obtidos através das equações e simulações no MATLAB/Simulink™. Com os resultados obtidos é possível realizar uma análise comparativa para as diferentes tecnologias de painéis, analisando as curvas características I-V e P-V.

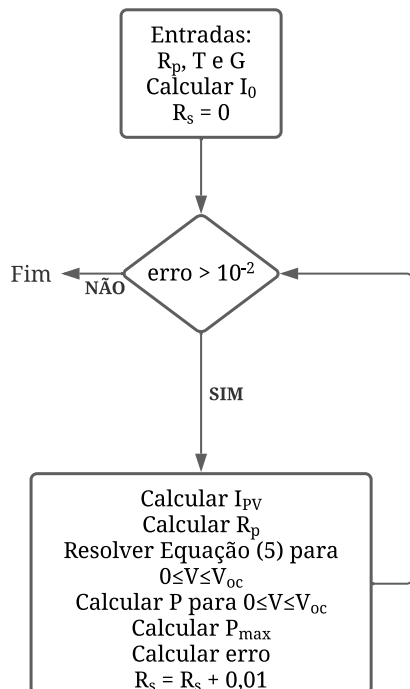


Figura 5. Fluxograma do método iterativo.

Para estimar os parâmetros do módulo foi adotada uma metodologia que compara a potência máxima calculada com a potência máxima obtida no *datasheet*. Resultando em um erro que é utilizado como critério de parada do método iterativo. A cada iteração do método, um novo valor de R_p é determinado através da equação para o modelo de um diodo, e o valor de R_s é incrementado por um valor fixo (0,01), Figura 5. Após a determinação desses valores é possível determinar a potência máxima calculada variando a tensão de forma linear de 0 até V_{OC} , pois $P = VI$, Figura 6.

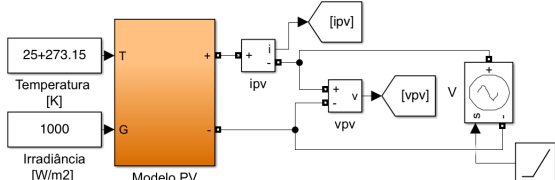


Figura 6. Modelo do circuito fotovoltaico no MATLAB/Simulink™.

Para o modelo ideal, não é necessário calcular as resistências, logo todos os parâmetros podem ser determinados a partir das equações citadas anteriormente. Deste modo, o processo iterativo é necessário apenas para determinação de parâmetros no modelo de um diodo.

4.1 Silício Policristalino

A primeira tecnologia avaliada foi o módulo de silício policristalino JAP72S09-335/SC/1500V da fabricante JA Solar. Suas principais características que são utilizadas na simulação podem ser visualizadas na Tabela 1 (JASolar (2019)).

Tabela 1. Parâmetros elétricos do módulo JAP72S09-335/SC/1500V.

Potência Máxima	335W
Tensão de Circuito Aberto	46,10 V
Tensão de Máxima Potência	37,45 V
Corrente de Curto Circuito	9,42 A
Corrente de Máxima Potência	8,95 A
Coefficiente de Temperatura de Corrente	+0,058%/°C
Coefficiente de Temperatura de Tensão	-0,330%/°C
Número de células em série	72 células

Os gráficos das curvas I-V e P-V com temperatura ($T = 25^\circ\text{C}$) e a irradiância variando entre 200 W/m^2 e 1000 W/m^2 para o modelo ideal, o modelo de um diodo e os dados do *datasheet* podem ser observados nas Figuras 7 e 8, respectivamente.

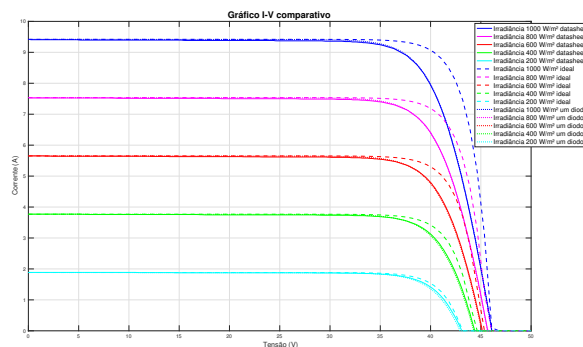


Figura 7. CURVA I-V comparativa do módulo policristalino.

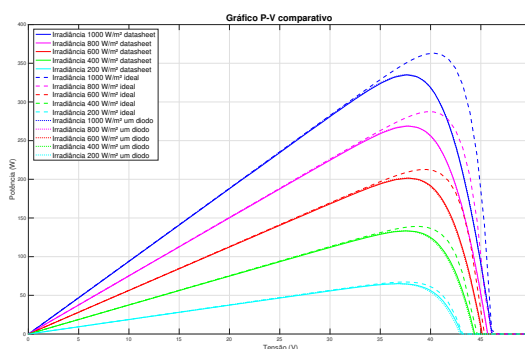


Figura 8. CURVA P-V comparativa do módulo policristalino.

Analisando as Figuras 7 e 8 observa-se que as linhas pontilhadas que representam o modelo de um diodo seguem as linhas contínuas que representam os dados do *datasheet* praticamente de forma fiel, principalmente nos casos de maiores irradiâncias, como é possível observar na Tabela 2 que representa o erro no ponto de máxima potência em

cada uma das irradiâncias simuladas para o modelo ideal (EMI) e para o modelo de um diodo (EMD).

Tabela 2. Erro percentual do módulo policristalino.

Irrad. (W/m^2)	200	400	600	800	1000
EMI (%)	3,23	4,32	5,57	6,92	8,40
EMD (%)	-0,16	-0,03	-0,01	0,05	0,07

Dessa forma, conclui-se que o modelo de um diodo é o que melhor representa o comportamento real do módulo baseado nas informações da folha de dados para todas as irradiâncias testadas.

4.2 Silício Monocristalino

A segunda tecnologia avaliada foi o módulo de silício monocristalino RSM72-6-325M-335M/4BB da fabricante Risen Solar. Suas principais características que são utilizadas na simulação podem ser visualizadas na Tabela 3 (RisenSolar (2016)).

Tabela 3. Parâmetros elétricos do módulo RSM72-6-325M-335M/4BB.

Potência Máxima	330W
Tensão de Circuito Aberto	46,30 V
Tensão de Máxima Potência	37,6 V
Corrente de Curto Circuito	9,29 A
Corrente de Máxima Potência	8,78 A
Coefficiente de Temperatura de Corrente	+0,05%/°C
Coefficiente de Temperatura de Tensão	-0,32%/°C
Número de células em série	72 células

Os gráficos das curvas I-V e P-V com temperatura ($T = 25^\circ C$) e a irradiância variando entre $200 W/m^2$ e $1000 W/m^2$ para o modelo ideal, o modelo de um diodo e os dados do *datasheet* podem ser observados nas Figuras 9 e 10, respectivamente.

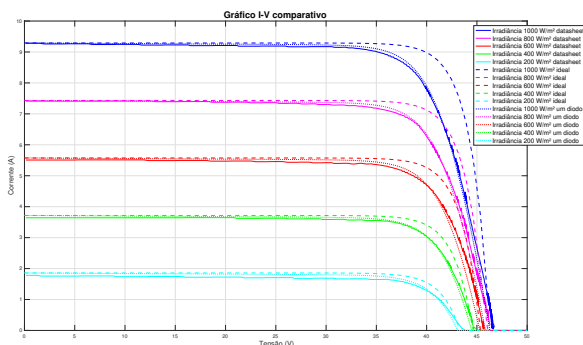


Figura 9. CURVA I-V comparativa do módulo monocristalino.

Analisando as Figuras 9 e 10 observa-se que para o módulo monocristalino, o comportamento é semelhante ao policristalino. Porém, em relação ao erro, é possível observar que na menor irradiância simulada ($200W/m^2$) o erro do modelo de um diodo não é insignificante como nas irradiâncias maiores, conforme observado na Tabela 4.

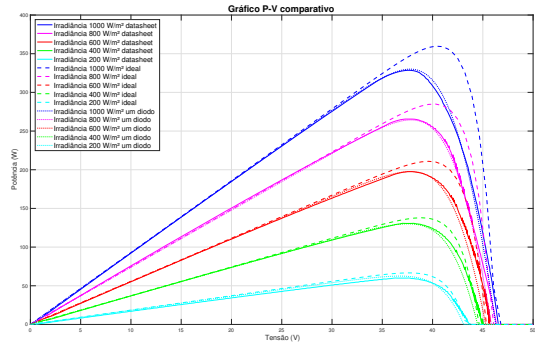


Figura 10. CURVA P-V comparativa do módulo monocristalino.

Tabela 4. Erro percentual do módulo monocristalino.

Irrad. (W/m^2)	200	400	600	800	1000
EMI (%)	11,02	5,52	6,76	7,30	9,51
EMD (%)	4,10	-0,44	0,07	-0,41	0,46

4.3 CIGS

A terceira tecnologia avaliada foi o módulo CIGS-3350A1 da fabricante Eterbright. Suas principais características que são utilizadas na simulação podem ser visualizadas na Tabela 5 (Eterbright (2019)).

Tabela 5. Parâmetros elétricos do módulo CIGS-3350A1.

Potência Máxima	335W
Tensão de Circuito Aberto	73,50 V
Tensão de Máxima Potência	56,50 V
Corrente de Curto Circuito	6,71 A
Corrente de Máxima Potência	5,93 A
Coefficiente de Temperatura de Corrente	+0,01%/°C
Coefficiente de Temperatura de Tensão	-0,27%/°C

Os gráficos das curvas I-V e P-V com temperatura ($T = 25^\circ C$) e a irradiância variando entre $200 W/m^2$ e $1000 W/m^2$ para o modelo ideal, o modelo de um diodo e os dados do *datasheet* podem ser observados nas Figuras 11 e 12, respectivamente.

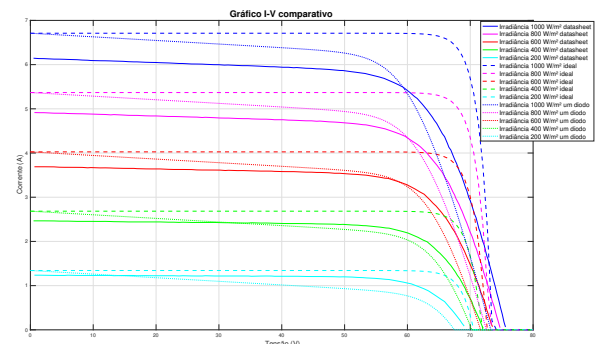


Figura 11. CURVA I-V comparativa do módulo CIGS.

Analisando as Figuras 11 e 12 observa-se para o módulo CIGS, apesar de seguirem a mesma tendência das tecnologias anteriores, nenhum dos dois modelos apresentam um

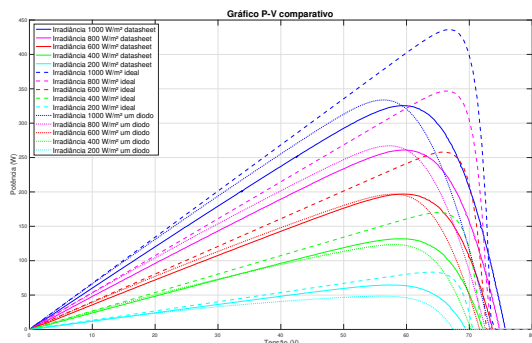


Figura 12. CURVA P-V comparativa do módulo CIGS.

erro aceitável, ambos mostram gráficos bem diferentes dos apresentados pelo fabricante.

Após a extração dos pontos do *datasheet* observa-se que o ponto de máxima potência está localizado em 325W como observado na Figura 13, o que não faz sentido do ponto de vista da utilização dos dados para simulação, visto que compromete toda a comparação e para um painel de 335W, esse ponto deveria ser localizado em 335W. Além disso, a tensão de máxima potência deveria ser de 56,50 V e no gráfico do *datasheet* está em torno de 59,5 V, o que também prejudica a comparação. Em virtude desses fatores, não foi calculado o erro relativo dessa tecnologia.

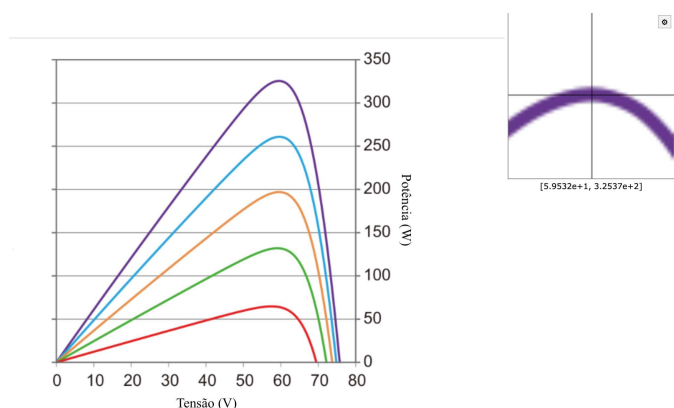


Figura 13. Ponto de máxima potência do módulo CIGS no *WebPlotDigitizer*.

Para solucionar esse problema e facilitar a comparação, os valores de tensão e corrente foram extraídos do gráfico para utilização na simulação. Assim, foram utilizados os valores da Tabela 6.

Tabela 6. Parâmetros elétricos do módulo CIGS-3350A1 baseados nos gráficos do *datasheet*.

Potência Máxima	325W
Tensão de Circuito Aberto	75,60 V
Tensão de Máxima Potência	59,50 V
Corrente de Curto Circuito	6,15 A
Corrente de Máxima Potência	5,47 A
Coefficiente de Temperatura de Corrente	+0,01%/°C
Coefficiente de Temperatura de Tensão	-0,27%/°C

Os gráficos das curvas I-V e P-V com temperatura ($T = 25^{\circ}\text{C}$) e a irradiação variando entre 200 W/m^2 e 1000

W/m^2 para o modelo ideal, o modelo de um diodo e os dados do *datasheet* podem ser observados nas Figuras 14 e 15, respectivamente.

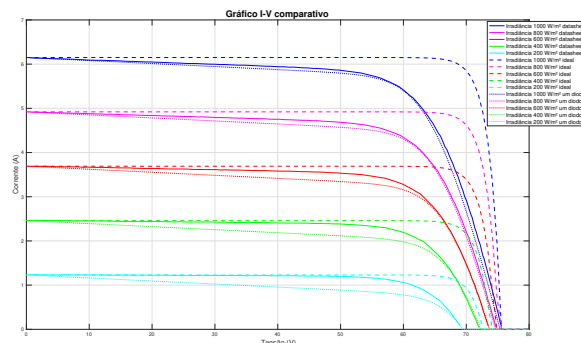


Figura 14. CURVA I-V comparativa do módulo CIGS corrigida.

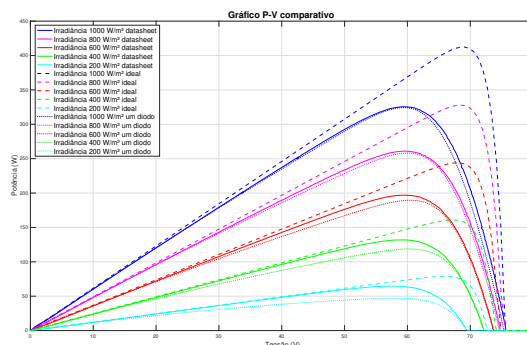


Figura 15. CURVA P-V comparativa do módulo CIGS corrigida.

Analisando as Figuras 14 e 15 analisa-se que para o módulo CIGS o comportamento foi semelhante as duas tecnologias de silício, mostrando uma melhor representação com o modelo de um diodo, como é possível observar pelos valores dos erros na Tabela 7.

Tabela 7. Erro percentual do módulo CIGS.

Irrad. (W/m^2)	200	400	600	800	1000
EMI (%)	21,95	22,06	23,91	25,68	26,66
EMD (%)	-27,23	-9,96	-3,76	-1,05	-0,37

5. CONCLUSÃO

O trabalho analisa a simulação de dois métodos matemáticos de painéis fotovoltaicos. O objetivo do método é representar o mais fidedigno possível o comportamento real do módulo em funcionamento. Os métodos calculam as correntes para geração de gráficos I-V com base em pontos já conhecidos dos dados dos fabricantes, como a tensão de circuito aberto, corrente de curto-circuito, corrente no ponto de máxima potência, tensão no ponto de máxima potência, além dos coeficientes de temperatura para a tensão de circuito aberto e da corrente de curto-circuito.

A análise proporcionou verificar qual modelo de simulação é mais eficiente para cada tecnologia de painel fotovoltaico.

Em relação as duas tecnologias de silício simuladas foi observado que o modelo de um diodo é o mais próximo do comportamento real do módulo, visto que o modelo ideal demonstra uma potência superior a que o módulo consegue alcançar, visto que não considera as perdas causadas pelas resistências (R_s e R_p), que representam as perdas dos contatos metálicos entre as células e as perdas relacionadas às correntes parasitas que circulam no painel fotovoltaico, respectivamente. Para a terceira tecnologia, a CIGS, a primeira simulação não obteve resultado satisfatório em virtude do ponto de máxima potência no gráfico do fornecedor não ser igual ao valor teórico informado, prejudicando a comparação entre os valores simulados pelos dois modelos e os valores dos gráficos do *datasheet*. Na segunda simulação, o resultado foi semelhante as outras tecnologias, mostrando que o modelo de um diodo é mais fidedignos aos valores reais e a precisão vai diminuindo a medida que a irradiância diminui.

2014 *IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON)*, 260–264.

REFERÊNCIAS

- Adamo, F., Attivissimo, F., Di Nisio, A., and Spadavecchia, M. (2011). Characterization and testing of a tool for photovoltaic panel modeling. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 60(5), 1613–1622.
- Chapin, D.M., Fuller, C.S., and Pearson, G.L. (1954). A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power. *Journal of Applied Physics*, 25(5), 676–677.
- Chin, V.J., Salam, Z., and Ishaque, K. (2015). Cell modelling and model parameters estimation techniques for photovoltaic simulator application: A review. *Applied Energy*, 154, 500–519.
- El Chaar, L., Lamont, L., and El Zein, N. (2011). Review of photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2165–2175.
- Eterbright (2019). *CIGS-3000A1 series module datasheet*.
- Goetzberger, A., Hebling, C., and Schock, H.W. (2003). Photovoltaic materials, history, status and outlook. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 40(1), 1–46.
- JASolar (2019). *JAP72S09 325-345/SC/1500V series module datasheet*.
- Kuang, Y., Di Vece, M., Rath, J., van Dijk, L., and Schropp, R. (2013). Elongated nanostructures for radial junction solar cells. *Reports on progress in physics. Physical Society (Great Britain)*, 76, 106502.
- Michael, P. and Dieter, B. (2007). Thin-film solar cells based on the polycrystalline compound semiconductors *cis* and *cdte*. *Advances in OptoElectronics*, 2007.
- Office, S.E.T. (2014). Crystalline silicon photovoltaics research. <https://www.energy.gov/eere/solar/crystalline-silicon-photovoltaics-research>. Acessado em 14/01/2022.
- RisenSolar (2016). *RSM72-6-325M-335M/4BB module datasheet*.
- Sauthier, L.F. (2019). *Modelagem Matemática De Módulos Fotovoltaicos Aplicados a Ambientes De Simulação De Geração Distribuída*. Master's thesis, UNIJUÍ - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul.
- Shannan, N.M., Yahaya, N.Z., and Singh, B. (2014). Two diode model for parameters extraction of pv module. In