# ESTUDO DO COMPORTAMENTO ESPECTRAL EM BANDA LARGA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Adriano Moraes Silva (UFS) - amoraes.eng@gmail.com Ézio Soares de Moura (UFS) - eziomoura@academico.ufs.br Henrique Silveira Alves Marques (UFS) - henriquemarques.eng@gmail.com José Raymundo De Alcântara Neto (UFS) - alcantara.neto7@gmail.com Douglas Bressan Riffel (UFS) - dbr.ufs@gmail.com

## **Resumo:**

O sombreamento sobre módulos fotovoltaicos influencia negativamente o desempenho e rendimento de sistemas de geração solar. Vários fatores são responsáveis por sombreamento e carecem de estudos para que sejam encontradas soluções eficientes que contribuam com a confiabilidade de instalações fotovoltaicas. Posto isso, sombras são simuladas e estudos sobre a variação do espectro solar são realizados a fim de encontrar avanços tecnológicos capazes de atenuar o impacto negativo do sombreamento. Nesse sentido, parâmetros do modelo elétricos de um diodo são testados e analisado quando submetidos a diferentes condições de sombreamento em função da mudança do espectro solar. Para tanto, foi utilizado um traçador de curva de carga PV-KLA 4.4 e do software PVK 5.11, rastreador solar e um módulo de 5 Wp. Verificou-se que quanto maior a absorbância do material utilizado para simulação de sombra, menor é a corrente fotogerada. Finalmente, este trabalho verifica a influência de diferentes espectros em banda larga (e.g. sem azul) dos parâmetros elétricos de módulos, bem como amplia as discussões sobre o impacto do sombreamento em sistemas fotovoltaicos.

Palavras-chave: Sombreamento, Comportamento Espectral em Banda Larga, Parâmetros Elétricos

Área temática: Conversão Fotovoltaica

Subárea temática: Tecnologias e ensaios de módulos fotovoltaicos

## ESTUDO DO COMPORTAMENTO ESPECTRAL EM BANDA LARGA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Adriano Moraes da Silva – amoraes.eng@gmail.com Ézio Soares de Moura – eziomoura@academico.ufs.br Henrique Silveira Alves Marques – henriquemarques.eng@gmail.com José Raymundo de Alcântara Neto – alcantara.neto7@gmail.com Universidade Federal de Sergipe, Departamento de Engenharia Elétrica Douglas Bressan Riffel – dbr.ufs@gmail.com Universidade Federal de Sergipe, Departamento de Engenharia Mecânica

**Resumo.** O sombreamento sobre módulos fotovoltaicos influencia negativamente o desempenho e rendimento de sistemas de geração solar. Vários fatores são responsáveis por sombreamento e carecem de estudos para que sejam encontradas soluções eficientes que contribuam com a confiabilidade de instalações fotovoltaicas. Posto isso, sombras são simuladas e estudos sobre a variação do espectro solar são realizados a fim de encontrar avanços tecnológicos capazes de atenuar o impacto negativo do sombreamento. Nesse sentido, parâmetros do modelo elétricos de um diodo são testados e analisado quando submetidos a diferentes condições de sombreamento em função da mudança do espectro solar. Para tanto, foi utilizado um traçador de curva de carga PV-KLA 4.4 e do software PVK 5.11, rastreador solar e um módulo de 5 Wp. Verificou-se que quanto maior a absorbância do material utilizado para simulação de sombra, menor é a corrente fotogerada. Finalmente, este trabalho verifica a influência de diferentes espectros em banda larga (e.g. sem azul) dos parâmetros elétricos de módulos, bem como amplia as discussões sobre o impacto do sombreamento en sistemas fotovoltaicos.

Palavras-chave: Sombreamento, Comportamento Espectral em Banda Larga, Parâmetros Elétricos

### 1. INTRODUÇÃO

Módulos fotovoltaicos são sensíveis as diversas condições de sombreamento, sendo este um dos principais responsáveis pela perda de potência em sistemas solares de geração (Kreft; Filipowicz; Żołądek, 2020). Além disso, sombreamento associado a problema locais do sistema potencializam a formação de pontos quentes que impactam negativamente a confiabilidade e rendimento da energia gerada por painéis fotovoltaicos (Hanifi *et al.*, 2019; Teo *et al.*, 2018). Do mesmo modo, o sombreamento provoca a condução reversas de células solares tornando-se cargas, ao invés de geradores (Alonsogarcia; Ruiz; Chenlo, 2006).

Nesse sentido, observa-se que a sombra projetada em módulos fotovoltaicos, traz a longo prazo, problemas com a continuidade de geração de energia e a curto prazo uma redução na energia gerada. Todavia, instalações fotovoltaicas estão suscetíveis diariamente a diversas formações de sombra proveniente da movimentação de nuvens, arborização, partículas de poeira, entre outros (Dhimish; Badran, 2020). Muitos desses fatores não são controláveis e seu entendimento é importante para o avanço em soluções tecnológicas que contribuam com a confiabilidade da geração de energia solar.

Estudos realizados por Ghosh; Yadav e Mukherjee (2019) través de experimentos e simulação propuseram um circuito de desvio que atenua o efeito do sombreamento em módulos fotovoltaicos. Alonsogarcia; Ruiz e Chenlo (2006) estudaram a influência e efeitos da condução reversa das células sombreadas. Lu *et al.* (2013) a partir de uma sombra com transmitância zero, verifica que conexões hibridas série-paralelo entre as células do módulo contribuem na melhoria da entrega de potência de módulos fotovoltaicos quando estão submetidos a sombreamento parcial.

À luz disso, pesquisas realizadas por Neves (2016) revelaram que a variação espectro solar influencia a geração de energia em instalações fotovoltaicas. Os resultados demonstraram que a influência das variações espectrais pode ser significativa dependendo da resposta espectral da célula solar utilizada. Nesse contexto, pesquisas sobre transmitância e sombreamento são importantes para verificar a relação existente entre o espectro solar e a curva característica tensão-corrente de módulos fotovoltaicos.

Posto isso, este trabalho tem como propósito investigar a influência do sombreamento parcial, em determinada faixa do espectro, nas curvas I-V dos módulos fotovoltaicos; evidenciando a maior faixa do espectro solar recebida pelo módulo. Ademais, busca-se verificar o comportamento espectral em banda larga e sua influência nos parâmetros elétricos do módulo.

## 2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICAS E TÉCNICAS DO RECURSO SOLAR E DA CÉLULA FOTOVOLTAICA

A faixa com maior intensidade de energia do espectro emitido pelo sol é a faixa visível, sendo esta a maior densidade de energia para o aproveitamento fotovoltaico em células de silício (Villalva; Gazoli, 2012). Entretanto,

destaca-se que da radiação extraterreste emitida à Terra, aproximadamente 45% consegue ultrapassar a atmosfera para continuar seu trajeto até a superfície terrestre. Dessa energia, cerca 25% é absorvida pela atmosfera e 30% refletidos de volta ao espaço extraterrestre por partículas atmosféricas e outros elementos refletores (Pereira, 2006).

#### 2.1 Absorção, Absorbância e Transmitância

A cor é uma interpretação do cérebro resultante de estímulos percebidos pelos os olhos. Nesse sentido, pode-se afirmar que as cores estão relacionadas com os fótons que são a menor energia que uma onda luminosa com determinada frequência possui. Como a luz é absolvida ou emitida pelos corpos, os fótons podem possuir energias altas ou baixas em função do espectro eletromagnético (Halliday, 2003). A Tab. 1 apresenta o comprimento de onda, a largura de banda e energia absolvida para cor do espectro de luz visível.

Cor	Comprimento de onda (nm)	Largura de Banda (nm)	Energia (eV)
Vermelho	647.0 - 700.0	53.0	1.77 - 1.92
Laranja	585.0 - 647.0	62.0	1.92 - 2.12
Amarelo	575.0 - 585.0	10.0	2.12 - 2.16
Verde	491.2 - 575.0	83.3	2.16 - 2.52
Azul	420.0 491.2	71.2	2.52 - 2.95
Violeta	400.0 - 420.0	20.0	2.95 - 3.10

Tabela 1. Correlação entre as cores e fótons.

Fonte: adaptado pelo autor, (Mendes; Benfato, [S.D.])

A partir da Tab. 1 é conhecida a absorbância para os comprimentos de ondas para cada faixa do espectro de luz visível. Halliday (2003) define absorbância como a fração de energia absolvida pela superfície de um corpo, ou seja, é a capacidade própria dos matéria de absorção de luz. Em espectroscopia, a absorbância ( $A\lambda$ ) é definida analiticamente conforme a Eq. (1).

$$A\lambda = -Log_{10}\frac{l_0}{l} \tag{1}$$

A equação 1 corresponde a quantidade de luz absorvida, ou seja, onde I é a intensidade da luz de saída, que passa por uma amostra em estudo (intensidade da luz transmitida) e  $I_0$  é a intensidade da luz de entrada antes que entre na amostra (intensidade da luz incidente). Esse efeito é facilmente relacionado com a transmitância, que se define pela quantidade de luz incidente capaz de atravessar uma amostra e pode ser quantificada conforme Eq. (2) (HALLIDAY, 2003).

$$T = \frac{I_0}{I} \tag{2}$$

Como a absorbância é uma medida logarítmica de uma razão de intensidades luminosa, não possui dimensionalidade e possibilita a conversão para transmitância.

### 2.2 Curva Característica (I-V) da célula fotovoltaica

O funcionamento de um módulo fotovoltaico pode ser estudado observando a curva que relaciona a tensão com a corrente à saída do mesmo. Esta curva é conhecida como a característica I-V e apresenta a mesma forma geral para qualquer painel fotovoltaico. A determinação desta curva, segundo a International Electrotechnical Commission - 891 (IEC) (1987) e de acordo a Norma Brasileira Regulamentadora - 12136 (NBR) (ABNT, 1991a), deve ser realizada dentro de condições específicas e constantes de temperatura e irradiância, denominada condição padrão de ensaio (G = 1000 W/m<sup>2</sup>, AM = 1,5 e T = 25°C).

Para cada ponto na curva I-V, o produto corrente-tensão representa a potência gerada para aquela condição de operação. A Fig. 1, além da curva I-V, apresenta a curva de potência (P-V) em função da tensão, com o ponto com o máximo valor de potência. O ponto na curva de potência (P<sub>M</sub>) corresponde a valores de tensão e corrente específicos na curva de corrente, denominadas, de tensão e corrente de máxima potência (V<sub>MP</sub>, I<sub>MP</sub>), respectivamente.



Figura 1 – Curva característica I-V e curva de potência P-V de um módulo fotovoltaico com destaque aos principais pontos. Fonte: (GASPARIN, 2009)

#### 2.4 Modelo Elétrico do gerador fotovoltaico

A representação do comportamento de uma célula fotovoltaica através de circuitos elétricos equivalentes tem se tornado um hábito bastante comum no estudo e determinação dos parâmetros desta tecnologia. O modelo de 1 díodo e 5 parâmetros tem sido amplamente utilizado, devido a sua simplicidade e precisão (Yu et al., 2017a), de onde é possível obter a característica I-V (corrente-tensão) do painel em determinadas circunstâncias, o modelo elétrico para 1 diodo é apresentado na Fig. 2.



Figura 2 – Circuito equivalente modelo 1 diodo, padrão para a descrição eléctrica de células e módulos fotovoltaicos. Fonte: (YU et al., 2017a)

De um modo ideal, a célula poderia ser apenas representada pela fonte de corrente  $I_{ph}$ , *Light Current*, em paralelo com o díodo ideal de junção p-n, onde  $I_{PH}$  representa a corrente elétrica que é gerada na célula sob a presença de luz quando a mesma é ligada a um condutor externo. Na ausência de luz, a célula comporta-se como um díodo, não produzindo qualquer tensão ou corrente. Mas, dado ao comportamento não ideal da célula, acresce-se ao modelo a resistência em série ( $R_s$ ), representando as perdas nos contatos, e a resistência paralelo ( $R_{sh}$ ), *shunt resistance*, que representa a existência de correntes de fuga. Os 5 parâmetros a determinar para o modelo apresentado são as duas resistências,  $R_s$  e  $R_{sh}$ , o fator de idealidade do díodo n, a corrente  $I_{PH}$  e a corrente inversa de saturação do díodo  $I_d$ . A corrente de saída I<sub>L</sub> pode ser calculada da seguinte forma Eq. (3):

$$I_L = I_{ph} - I_d - I_{sh} \tag{3}$$

$$I_d = I_{sh} * \left[ \exp\left(\frac{q * (V_L + R_s * I_L)}{n * K * T}\right) - 1 \right]$$

$$\tag{4}$$

$$I_{sh} = \frac{V_L + R_s * I_L}{R_{sh}} \tag{5}$$

onde  $I_{ph}$  é a corrente total fotogerada pela célula solar,  $I_d$  representa a corrente do díodo calculada por Shockley, (MERTENS, 2014) através da Eq. (4), e  $I_{sh}$  é a corrente em paralelo calculado pela Eq. (5).  $R_s$  e  $R_{sh}$  são respectivamente a resistência em série e a resistência em paralelo,  $V_L$  é a tensão de saída da célula,  $I_d$  é a corrente de saturação reversa do diodo e *n* é o fator idealidade do diodo. Além dos termos: "k" é a constante de Boltzmann (1,38064852 × 10-<sup>23</sup> J/K); "q" é a carga do elétron (1,60217662 × 10-<sup>19</sup> C); e "T" é a temperatura absoluta em Kelvin.

A identificação de parâmetros dos modelos fotovoltaicos é geralmente convertida em um problema de otimização, no qual o objetivo é minimizar diferença entre os dados experimentais e os dados simulados através dos parâmetros estimados (YU et al., 2017a). Desta forma, a função objetivo a ser minimizada para o modelo de 1 diodo é apresentada em Eq. (6).

$$f_{K}(V_{L}, I_{L}, X) = I_{ph} - I_{d} * \left[ \exp\left(\frac{q * (V_{L} + R_{s} * I_{L})}{n * K * T}\right) - 1 \right] - \frac{V_{L} + R_{s} * I_{L}}{R_{sh}} - I_{L}$$
(6)

$$X = \{I_ph, I_d, R_s, R_{sh}, n\}$$

Neste estudo, a raiz do erro quadrático médio ou, *Root Mean Square Error* (RMSE) definido pela Eq. (7) é usada como função objetivo para quantificar a diferença geral entre os dados atuais experimentais e simulados. Esse tipo de análise e aplicação como critério de parada dos algoritmos e avaliação de sua convergência tem sido amplamente utilizada na literatura (Yu *et al.*, 2017a). Desta forma, deve-se minimizar a função objetivo RMSE (X) pesquisando o vetor de solução x dentro do intervalo especificado.

$$RMSE(X) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{K=1}^{N} f_K(V_L, I_L, X)^2}$$
(7)

#### 3. METODOLOGIA

A investigação da influência de sombreamento em curvas I-V foi realizada em um módulo fabricado por Komares® Solar, modelo KM(P)5, com 36 células ligadas em séries e parâmetros técnicos conforme descrito na Tab. 2.

Modelo		KM(P)5
Máxima Potência	Pmax(W)	5W
Tolerância	%	$\pm 5\%$
Tensão de Máxima Potência	Vm(V)	17.74V
Corrente de Máxima Potência	Im(A)	2.84A
Tensão de Circuito Aberto	Voc(V)	21.56V
Corrente de Curto Circuito	Isc(A)	3.04A
Eficiência da Célula	%	14.25
Eficiência do Módulo	%	11.81
Número de Células	Pcs	36
Tipo de Célula		Silício Policristalino
Coeficiente de Temperatura Isc ( $\alpha_{rel}$ )	%/°C	+0.05
Coeficiente de Temperatura Voc ( $\beta_{rel}$ )	%/°C	-0.35
Coeficiente de Temperatura da Potência (γ)	%/°C	-0.47

Tabela 2 - Parâmetros elétricos e especificações do módulo fotovoltaico.

Fonte: (Komares<sup>®</sup>, 2019)

A fim de otimizar a captação da radiação direta incidente, através de ajustes dos ângulos de inclinação durante as mudanças sazonais e movimentação do sol, foi utilizado um rastreador solar desenvolvido por Santos (2019). Rastreadores são mecanismos eletromecânicos com capacidade de se manter orientado para o sol ao longo do dia independente da época do ano, este fato contribui de forma significativa para a melhora do desempenho na conversão de energia, tal como com a melhoria da eficiência energética (Kottas; Boutalis; Karlis, 2006; Masih *et al.*, 2019).

Na sequência, foram obtidas experimentalmente as curvas característica I-V do módulo fotovoltaico com o auxílio do traçador de curva de carga PV-KLA 4.4® do fabricante *Mencke & Tegtmeyer GmbH*. As curvas I-V foram registradas sobre dois aspectos simultaneamente, a área sombreada na metade do módulo em cada cor do papel para

análise de transmitância. Considera-se ainda que além da cor azul foram analisadas cor verde e magenta, em 5 medições com irradiâncias próximas a 1000W/m<sup>2</sup> para que houvessem menor influência no momento das correções das curvas.

O sombreamento é experimental e utiliza a variação da transmitância, tendo em vista que, a faixa com maior intensidade de energia do espectro emitido pelo sol é a faixa visível discriminada em diferentes faixas de onda e portando, a melhor para o aproveitamento fotovoltaico (Villalva; Gazoli, 2015). Todas as medições com suas respectivas condições foram registradas e arquivadas no software PVK 5.11, do mesmo fabricante do traçador de curva.

As medições em condição de sol real ficam sujeitas a diversas variações que não são controláveis, mesmo com uso do sistema de rastreamento, tais como irradiância e temperatura. Desta forma, a *International Electrotechnical Commission* (IEC) determina que os ensaios realizados em módulos fotovoltaicos devem estar sujeitos a radiação de 1000 W/m<sup>2</sup> e temperatura de 25 °C e massa de ar de 1,5 (IEC-61625, 2005), entretanto, o experimento não obedece a esses valores, precisando de correções em suas medidas. Posto isso, utilizou-se o procedimento 2 estabelecido na norma IEC 60891 de 2009 (IEC-60891, 2009) que estabelece os procedimentos para correção de temperatura e irradiância da curva característica I-V.

O procedimento é baseado no modelo simplificado de um diodo, com equações de correção da curva I-V em diferentes condições de temperatura e irradiância, considerando os coeficientes de temperatura para corrente de curtocircuito ( $\alpha$ ) e tensão de circuito aberto ( $\beta$ ), além do fator de correção da curva ( $\kappa'$ ), o fator de correção de irradiância para a tensão de circuito aberto (a), que tem relação com a tensão térmica da junção p-n no diodo e com o número de células ( $N_s$ ) conectadas em série no módulo, e a resistência em série interna ( $R'_s$ ) do módulo utilizado em teste.

Os coeficientes  $\alpha \in \beta$  foram obtidos através dos dados do fabricante, conforme apresentado na Tab.1, já os coeficientes (k',  $a \in R'_s$ ), foram calculados conforme estabelece o capítulo 4 procedimento 2 da norma IEC-60891, no qual é estabelecido que para a determinação de  $R's \in a$ , deve-se obter ao menos 03 curvas com temperaturas constantes ( $\pm 2^{\circ}$ C) e com diferentes irradiâncias cobrindo a faixa de interesse. Após identificar e separar curvas sobre essas condições, foram fixados os valores de R's = 0 e a = 0, e transladadas as curvas para a de maior irradiância, fazendo uso das Eq. (8) e Eq. (9). Em seguida o valor de a é incrementado até o momento que todas as tensões de circuito aberto coincidam entre si em um limite de  $\pm 0,5\%$  ou melhor. Atendido este critério, foi fixado o valor de a encontrado, e incrementado R's até o ponto de máxima potência coincidir entre si em  $\pm 0,5\%$  ou melhor. Para a determinação do coeficiente k', foram selecionadas ao menos 3 curvas com temperaturas diferentes, cobrindo a faixa de interesse, e com uma irradiância constante ( $\pm 1\%$ ) da faixa de interesse ( $1000W/m^2$ ). Em seguida, foram transladadas as curvas para a curva de menor temperatura com (k' = 0) fazendo uso da Eq. (9), e posteriormente foi incrementado o valor de k' até que o ponto de máxima potência coincidise em  $\pm 0,5\%$  ou melhor.

$$I_2 = I_1 * \left( 1 + \alpha_{Rel} * (T_2 - T_1) \right) * \frac{G_2}{G_1}$$
(8)

$$V_{2} = V_{1} + V_{OC1} * \left(\beta_{Rel} * (T_{2} - T_{1}) + \alpha * \ln\left(\frac{G_{2}}{G_{1}}\right)\right) - R'_{S} * (I_{2} - I_{1}) - k' * I_{2} * (T_{2} - T_{1})$$
(9)

Onde I<sub>2</sub>, V<sub>2</sub>, T<sub>2</sub> e G<sub>2</sub>, representam corrente, tensão, temperatura e irradiância para qual se deseja corrigir e obter os novos valores. Enquanto que os valores I<sub>1</sub>, V<sub>1</sub>, T<sub>1</sub> e G<sub>1</sub> representam os valores das respectivas grandezas obtidos experimentalmente no momento da medição. V<sub>oc1</sub> representa a tensão de circuito aberto na condição de teste,  $\alpha_{rel} \in \beta_{rel}$  são os coeficientes relativos de temperatura de corrente e tensão do corpo de prova medido a 1000 W/m<sup>2</sup>. Eles estão relacionados à corrente de curto-circuito e tensão de circuito aberto no STC.

Obtidos todos os coeficientes presentes nas Eq. (8) e Eq. (9), pôde-se transladar todos os pontos das curvas selecionadas para análise de sombreamento, obter as curvas I-V corrigidas em condições padrões de teste (STC) e observar a influência do sombreamento.

O comportamento de operação do módulo fotovoltaico foi analisado através de um algoritmo de otimização a fim de realizar comparações entre as curva I-V medidas e estimadas. Intitulado como JAYA, este algoritmo proposto por Venkata Rao (2016) é um poderoso recurso que busca ajustar a tendência de maior aproximação para melhor solução, evitando respostas indesejadas em diferentes estágios de análise, posto isso, o JAYA consolida-se como uma alternativa promissora às técnicas determinísticas de parâmetros de módulo fotovoltaicos. (Yu *et al.*, 2019; Huang *et al.*, 2018; Luo *et al.*, 2018; Kumar *et al.*, 2017; Yu *et al.*, 2017; Mishra; Ray, 2016).

O modelo estimou os valores da resistência série, resistência paralelo, corrente fotogerada, corrente de saturação e índice de idealidade do diodo, para painéis do tipo de um diodo a fim da minimização do RMSE entre os valores medidos e estimados através do modelo.

Dentre os 5 parâmetros estimados, o índice de idealidade (n) do diodo, foi calculado usando-se uma técnica determinística, tendo em vista a sua invariabilidade para diferentes condições de teste. A relação entre a tensão de circuito aberto e irradiância é dada pela Eq. (10), desta forma, o fator de idealidade pode ser obtido através de uma regressão linear da tensão de circuito aberto com o logaritmo da irradiância considerando-se curvas com diferentes irradiâncias (Hansen, 2015).

$$V_{OC} = V_{OC0} + nV_{th} \cdot \ln\left(\frac{E}{E_0}\right) + \beta(T_c - T_0)$$
<sup>(10)</sup>

Conhecendo o fator de idealidade do modelo, o algoritmo *JAYA* é utilizado para estimar os 4 parâmetros (I<sub>PH</sub>, R<sub>S</sub>, R<sub>SH</sub>, I<sub>d</sub>). O fluxograma da Fig. 3 descreve as etapas a serem executadas pelo algoritmo.



Figura 3 – Fluxograma algoritmo JAYA para estimação dos parâmetros elétricos.

O algoritmo JAYA, é método de otimização baseado em população. Desta forma, os parâmetros de controle da execução do algoritmo são o tamanho da população (popSize), o máximo de gerações (GenMax), número de repetições da execução do algoritmo (Runs) e os limitantes inferiores e superiores de cada parâmetro. Sendo o conjunto de parâmetros escolhido aquele que apresentou o menor RMSE. Para cada curva foi utilizado popSize 20, GenMax 2500, Runs 30 e os limites inferiores (lim\_inf) e limites superiores (lim\_sup) conforme Tab. 3.

Tabela 3 - Limitantes dos parâmetros elétricos do modelo de 1 diodo para implementação no algoritmo JAYA.

Parâmetros	(lim_inf)	(lim_sup)
Iph(A)	0	1
Id(µA)	0	50
$Rs(\Omega)$	0	10
$\operatorname{Rsh}(\Omega)$	0	10000
n	1,2119	1,2119

#### 4. **RESULTADOS**

Através de um espectrofotômetro foi tomada a medida de transmitância em três cores utilizados para simular o sombreamento. Na Fig.4 é apresentado o percentual de transmitância e absorbância do material na faixa de comprimento de onda que o instrumento opera, entre 200 nm e 900 nm.



Figura 4. (a) Transmitância das cores magenta, verde e azul; (b) Absorbância das cores magenta, verde e azul

Os valores de absorbância foram obtidos através da Eq. (2) e o gráfico resultante é mostrado na Fig. 4b. Os gráficos da Fig. 4 correlacionam a absorbância e transmitância dos materiais, bem como a afinidade do comprimento de onda. Posto isso, foram realizados procedimentos experimentais para obtenção dos parâmetros para ajuste do modelo do algoritmo genérico utilizado e do modelo elétrico de um diodo.

Para o cálculo do fator de idealidade foi utilizado uma metodologia proposta por De Soto; Klein e Beckman (2006), no qual propõem-se que o fator de idealidade (n) não se altera para as diversas condições de testes, desta forma pôde-se fixar este parâmetro no algoritmo *JAYA*. Utilizando-se da regressão linear proposta obteve o fator de idealidade 1,2119, na sequencia o *JAYA* foi executado para obtenção dos demais parâmetros elétricos do modelo de um diodo.

Com base nos dados estimados pelo algoritmo utilizado, foi observado os impactos do sombreamento nos parâmetros de operação (Voc, Isc, Pmp). A Tab. 4 evidencia a influência do sombreamento na corrente fotogerada, que varia de acordo com a transmitância de cada cor, o que provoca diminuição da potência máxima e evidencia a influência do espectro solar na geração fotovoltaica.

Tabela 4 - Influência de diferentes tipos de sombreamento sobre os pontos de operação do módulo fotovoltaico.

Curva Tempera que		Temperatura do ponto quente (°C)	Voc(V)	Isc(A)	Pmp(W)		
	1	Sem sombreamento (STC)	21,490	0,322	5,074		
	2	Magenta	22,186	0,2793	4,71		
	3	Azul	21,801	0,2199	3,64		
	4	Verde	21,654	0,1858	3,03		

Quando um módulo fotovoltaico é sombreado, pode ser dividido em dois tipos: o tipo totalmente sombreado e do tipo parcialmente sombreados. Vale a pena notar que a corrente fotogerada diminui com a queda da irradiância. Além disso, as células no interior do módulo estão conectadas em série e normalmente não há diodos de derivação. Isso faz com que a corrente das células não sombreadas seja igual a das células sombreadas. Portanto, na maioria dos artigos e aplicações de engenharia, módulos parcialmente sombreados são tratados como totalmente sombreadas para simplificação (Dhimish; Badran, 2020). Segundo Nguyen (2006), quando um grupo de células se encontra sombreado, assiste-se a uma perda da energia produzida de duas maneiras: pela redução da energia gerada pela célula e pelo aumento das perdas nas células sombreadas. Este problema torna-se mais grave quando o sombreamento das células causa a polarização reversa, pois os módulos fotovoltaicos deixam de ser geradores de energia e passam a atuar como cargas.

Nota-se que a curva de referencia a céu aberto é a que apresenta maior valor da corrente fotogerada, ou seja, não sofre efeito de sombreamento e os valores apresentado aproxima-se dos valores disponibilizados pelo fabricante em condições padrões de teste. Enquanto que as curvas apresentadas para os sombreamentos, sofreram impactos, principalmente na corrente fotogerada (Iph), como pode ser visualizada na Fig 5.



Curvas I-V submetidas a sombreamento com diferentes transmitâncias

Figura 5. Curva característica I-V medido para três situações de sombreamento com material transparente de cores azul, verde e magenta

Uma outra analise foi realizada sobre o ensaio de sombreamento, no qual foram estimados os parâmetros elétricos para o modelo de 1 diodo para cada uma das situações. Desta forma, foram obtidos através do algoritmo JAYA os seguintes parâmetros:  $(I_{ph})$ ,  $(I_d)$ ,  $(R_{sh})$ ,  $(R_s)$ , (n) e RMSE. A Tab. 5 mostra os parâmetros estimados para cada uma das situações testada, no qual o RMSE se apresentou entre 0,00143 a 0,00197.

Tabela 5 - Influência de diferentes tipos de sombreamento sobre os parâmetros elétricos do modelo de um diodo do módulo fotovoltaico.

Curva	Tipo do Sombreamento	Iph (A)	Id (A)	Rsh (Ω)	Rs (Ω)	n	RMSE
1	Sem sombreamento (STC)	0,3242	2,93E-09	2154,3	3,6370	1,2119	0,00174
2	Magenta	0,2814	6,85E-10	1914,7	1,6665	1,2119	0,00143
3	Azul	0,2221	7,53E-10	2091,5	2,0022	1,2119	0,00160
4	Verde	0,1877	7,35E-10	2565,0	2,9234	1,2119	0,00197

Analisando os valores na Tab. 5 e Fig. 5, observa-se na corrente fotogerada ( $I_{ph}$ ), a influência do sombreamento no modelo de 1 diodo. Ademais, verifica-se a influência do sombreamento sobre as resistências (serie e paralelo), e percebe-se seu comportamento conforme descrito por Mertens (2014). Sobre a influência da resistência série na curva I-V, no qual percebe-se que com a elevação do valor da resistência série ( $R_s$ ), ocorre o afastamento com relação a curva ideal, afetando assim o valor de  $I_{ph}$ .

A redução da resistência paralelo ( $R_{sh}$ ) faz com que a tensão de circuito aberto seja afetada, pois a corrente na resistência paralelo irá aumentar fazendo com que a tensão do diodo tenha seu valor reduzido. Desta forma, observa-se com o auxílio da Tab. 4 e Fig. 5 que a condição de sombreamento na cor magenta apresenta a menor absorbância e com isso menor influência sobre  $I_{ph}$ .

Ao analisar a cor verde, percebe-se que obteve a menor  $I_{ph}$ , observando assim, que ela apresenta o maior valor de  $R_s$  dos parâmetros elétricos, além de possuir uma maior absorção conforme pode ser observado na Fig. 5. Um comportamento similar e proporcional com relação a  $R_s$  e absorção como descrito para o sombreamento verde pode ser notado para a situação de sombreamento em azul.

E o valor da resistência paralelo acabou influenciando no valor da tensão de circuito aberto, mas com influência bem sucinta. Como podemos notar os seus valores variaram de 1914,7 a 2565,0; esses valores não apresentam uma tendência conforme é apresentado em Mertens (2014).

#### 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho obteve curvas I-V para a condição de sombreamento espectral para as cores magenta, azul e verde, considerando situação de céu limpo sobre o módulo fotovoltaico. Os experimentos foram corrigidos para condições padrão de teste segundo IEC 891, tais como os pontos de máxima potência, tensão de circuito aberto e I<sub>ph</sub>.

No que se refere às curvas I-V foi possível verificar a relação existente entre a transmitância e a  $I_{ph}$  os experimentos mostraram que quando maior a transmitância da cor, maior é a corrente gerada. Nesse sentido, a cor magenta é que obteve o melhor desempenho, ao contrário da cor azul. De fato, a Tab.1 evidencia que dentro das cores analisadas a cor vermelha, a mais próxima da magenta, apresenta comprimentos de ondas maior.

A respeito das resistências  $R_s \in R_{sh}$  foi observada sua variação frente às condições de sombreamento e pode-se perceber o seu comportamento em conformidade com literatura para a resistência série, o que não confirmado para a resistência em paralelo. Infere-se que através dos valores apresentados na Tab.3 e a Fig. 4, a maior influência espectral ocorre na  $I_{ph}$  para um modelo de 1 diodo.

Para as situações testadas, pode-se perceber que a resistência em série teve maior impacto sobre os pontos de operação do módulo fotovoltaico, além de concluir a influência da transmitância na corrente fotogerada para cada situação estudada.

#### Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem a CAPES, FAPITEC, CNPq e a Universidade Federal de Sergipe pelo apoio financeiro e estrutural recebido na realização deste estudo

#### REFERÊNCIAS

Alonsogarcia, M.; Ruiz, J.; Chenlo, F. Experimental Study Of Mismatch And Shading Effects In The – Characteristic Of a Photovoltaic Module. Solar Energy Materials and Solar Cells, V. 90, N. 3, P. 329–340, 15 Fev. 2006.

- Dhimish, M.; Badran, G. Current Limiter Circuit to Avoid Photovoltaic Mismatch Conditions Including Hot-Spots and Shading. Renewable Energy, V. 145, P. 2201–2216, Jan. 2020.
- Gasparin, F. P. Desenvolvimento de um Traçador de Curvas Características de Módulos Fotovoltaicos. Dissertação— Porto Alegre - RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.
- Ghosh, S.; Yadav, V. K.; Mukherjee, V. Improvement Of Partial Shading Resilience Of Pv Array Though Modified Bypass Arrangement. Renewable Energy, V. 143, P. 1079–1093, Dez. 2019.

Hanifi, H. Et Al. A Novel Electrical Approach to Protect PV Modules Under Various Partial Shading Situations. Solar Energy, V. 193, P. 814–819, Nov. 2019.

Hansen, C. Parameter Estimation For Single Diode Models Of Photovoltaic Modules. [S.L: S.N.]. Disponível Em: <a href="http://www.Osti.Gov/Servlets/Purl/1177157/">http://www.Osti.Gov/Servlets/Purl/1177157/</a>. Acesso Em: 5 Dez. 2019.

Huang, C. Et Al. A Prediction Model-Guided Jaya Algorithm for the PV System Maximum Power Point Tracking. IEEE Transactions on Sustainable Energy, V. 9, N. 1, P. 45–55, Jan. 2018.

IEC-60891. IEC 60891, Photovoltaic Devices – Procedures for Temperature and Irradiance Corrections to Measured I-V Characteristics., 2009.

IEC-61625. IEC 61215-2005 Crystalline Silicon Terrestrial Photovoltaic (PV) Modules – Design Qualification And Type Approvalinternational Standard, , 2005.

Komares®. [Datasheet] Km(P) 5.Pdf Komares® Solar, , 2019.

- Kottas, T. L.; Boutalis, Y. S.; Karlis, A. D. New Maximum Power Point Tracker For Pv Arrays Using Fuzzy Controller In Close Cooperation With Fuzzy Cognitive Networks. IEEE Transactions On Energy Conversion, V. 21, N. 3, P. 793–803, Set. 2006.
- Kreft, W.; Filipowicz, M.; Żołądek, M. Reduction of Electrical Power Loss in a Photovoltaic Chain in Conditions of Partial Shading. Optik, V. 202, P. 163559, Fev. 2020.
- Kumar, N. Et Al. Rapid Mppt For Uniformly And Partial Shaded PV System By Using Jayade Algorithm In Highly Fluctuating Atmospheric Conditions. IEEE Transactions On Industrial Informatics, V. 13, N. 5, P. 2406–2416, Out. 2017.
- Lu, F. Et Al. Improved Pv Module Performance Under Partial Shading Conditions. Energy Procedia, V. 33, P. 248–255, 2013.
- Luo, X. Et Al. Parameter Identification Of The Photovoltaic Cell Model With A Hybrid Jaya-Nm Algorithm. Optik, V. 171, P. 200–203, Out. 2018.
- Masih, A. Et Al. Application Of Dual Axis Solar Tracking System In Qurghonteppa, Tajikistan. 2019 Ieee 7th International Conference On Smart Energy Grid Engineering (Sege). Anais... In: 2019 Ieee 7th International Conference On Smart Energy Grid Engineering (Sege). Oshawa, On, Canada: Ieee, Ago. 2019disponível Em: <https://Ieeexplore.Ieee.Org/Document/8859937/>. Acesso Em: 6 Dez. 2019
- Mendes, M. F. De A.; Benfato, M. S. Natureza Da Cor. Universidaade. Disponível Em: <<u>Http://Www.Ufrgs.Br/Leo/Site\_Espec/Bibliografia.Html></u>. Acesso Em: 18 Nov. 2019.
- Mertens, K. Photovoltaics: Fundamentals, Technology And Practice. Chichester: Wiley, 2014.
- Mishra, S.; Ray, P. K. Power Quality Improvement Using Photovoltaic Fed Dstatcom Based On Jaya Optimization. Ieee Transactions On Sustainable Energy, V. 7, N. 4, P. 1672–1680, Out. 2016.
- Neves, G. M. Influência Do Espectro Da Radiação Solar Em Módulos Fotovoltaicos. P. 240, [S.D.].
- Teo, J. Et Al. Impact Of Partial Shading On The P-V Characteristics And The Maximum Power Of A Photovoltaic String. Energies, V. 11, N. 7, P. 1860, 17 Jul. 2018.
- Yu, K. Et Al. Parameters Identification Of Photovoltaic Models Using An Improved Jaya Optimization Algorithm. Energy Conversion And Management, V. 150, P. 742–753, Out. 2017a.
- Yu, K. Et Al. Parameters Identification Of Photovoltaic Models Using An Improved Jaya Optimization Algorithm. Energy Conversion And Management, V. 150, P. 742–753, Out. 2017b.
- Yu, K. Et Al. A Performance-Guided Jaya Algorithm For Parameters Identification Of Photovoltaic Cell And Module. Applied Energy, V. 237, P. 241–257, Mar. 2019.

#### PHOTOVOLTAIC MODULE SHADING STUDY SUBJECT TO DIFFERENT TRANSMITTANCES

Abstract. Shading on photovoltaic modules negatively influences the performance and efficiency of solar generation systems. Several factors are responsible for shading and need studies to find efficient solutions that contribute to the reliability of photovoltaic installations. That said, shadows are simulated and studies on the variation of the solar spectrum are carried out in order to find technological advances capable of mitigating the negative impact of shading. In this sense, parameters of the electrical model of a diode are tested and analyzed when subjected to different shading conditions due to the change in the solar spectrum. For this purpose, a load curve plotter PV-KLA 4.4 and PVK 5.11 software, a solar tracker and a 5 Wp module were used. It was found that the greater the absorbance of the material used for shadow simulation, the lower the photogenerated current. Finally, this work verifies the influence of different broadband spectra (e.g. without blue) of the electrical parameters of modules, as well as expanding the discussions about the impact of shading in photovoltaic systems.

Key words: Shading, Broadband Spectral Behavior, Electrical Parameters