

EFEITOS DO SOMBREAMENTO EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS *HALF-CELL* DE 144 CÉLULAS

Paulo Henrique Furini¹
Marcelo Kenzi Makiyama²
Keila Daiane Ferrari Orso³
Daiane Carla Casonatto⁴

RESUMO

No propósito de observar os efeitos do sombreamento em módulos fotovoltaicos com tecnologia *half-cel* de 144 células, este artigo tem o objetivo de oferecer uma análise do comportamento dos módulos e os impactos quando expostos a diferentes tipos de sombreamento. A avaliação ocorreu na cidade de Nonoai-Rs, entre às 12:00 horas e às 13:00 horas, onde dois módulos monocristalinos foram ligados em série e adaptados no solo, orientados para o norte geográfico com ângulo de inclinação de 8° em relação ao plano terrestre. Primeiramente foram realizadas as medições da corrente de curto circuito e tensão de circuito aberto com os módulos recebendo radiação total do sol, com o intuito de criar um parâmetro e identificar a porcentagem de perdas das grandezas elétricas após os sombreamentos. Quatro configurações de sombras foram avaliadas. Através disso foi possível analisar o comportamento dos módulos. Observando os dados obtidos notou-se que o sombreamento aumenta a temperatura de operação do módulo, diminuindo a tensão de circuito aberto impactando na produção de energia. Já a variação de irradiação incidente afeta diretamente na corrente de curto circuito. Foi possível analisar que células sombreadas limitam a corrente das células ligadas em série com ela. Também se observou que módulos com tecnologia *half-cell*⁵ possuem um desempenho bom perante algumas configurações de sombreamento.

Palavras-chave: Célula Fotovoltaica. Sombreamento. Temperatura.

1 INTRODUÇÃO

O aumento da demanda de energia e a necessidade de mudança da matriz energética do país, devido à escassez de combustíveis fósseis como o petróleo, proporcionaram um grande crescimento de fontes de energias limpas e renováveis.

“O uso de eletricidade e outras fontes de energia no Brasil tem aumentado de maneira constante por décadas [...]. Entre 2001 e 2013, o uso de eletricidade cresceu a uma média de 4,2% ao ano, resultando num aumento acumulado de 63%” (LUCAS, 2016, p.30).

¹ UCEFF Faculdades. Acadêmico do Curso de Engenharia Elétrica. E-mail paulohfurini@outlook.com.

² UCEFF Faculdades. Esp. em Engenharia Elétrica. E-mail marcelokem@uceff.edu.br

³ UCEFF Faculdades Me. Keila D. Ferrari Orso. E-mail keila@hotmail.com

⁴ Docente do curso de Engenharia Mecânica. E-mail: daianecasonatto@uceff.edu.br.

⁵ *Half-cell*: (meia-célula) tecnologia de módulos onde suas células fotovoltaicas são divididas pela metade.

Martins, Guarnieri, e Pereira (2007) observaram que era necessária a diversificação da matriz energética do país optando por fontes renováveis, isso minimizaria a crise no mercado de combustíveis fósseis e também diminuiria o problema das hidroelétricas em épocas de estiagem.

Ainda vale destacar a redução de emissão de gases de efeito estufa, provocada pela diminuição de queima de combustíveis, melhorando a qualidade do ar e ao mesmo tempo aumentando a segurança energética do país.

Através disso viu-se a necessidade de exploração de outros recursos disponíveis em nosso país. Como pontuaram os organizadores do CEPEL-CRESESB Pinho e Galdino (2014), a principal fonte de energia para terra é o sol, ele é uma fonte inesgotável de energia, oferecendo um enorme potencial de utilização como fonte de energia elétrica, captando e convertendo sua grande irradiação através de sistemas solares fotovoltaicos.

Um dos principais problemas enfrentado nestes sistemas é o sombreamento dos módulos fotovoltaicos, podendo ser por motivos naturais, características da construção civil ou até mesmo por sujidades. Este problema fez com que nas últimas décadas muitos estudos fossem realizados com o intuito de tentar diminuir o efeito da sombra nesses sistemas, assim cria-se um questionamento: **como o sombreamento interfere no correto funcionamento de sistemas fotovoltaicos?**

Neste sentido, este estudo tem como objetivo analisar os efeitos da interferência por sombreamento nos módulos fotovoltaicos com tecnologia *half-cell*, bem como o comportamento da tensão e corrente elétrica de sistemas sombreados que impactam diretamente na geração de energia.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

“O efeito fotovoltaico foi observado pela primeira vez em 1839 por Edmund Bequerel e consiste na criação de tensão elétrica ou de uma corrente elétrica correspondente num material, após a sua exposição à luz.” (AYRÃO; VINICIUS, 2018, p. 17).

“A energia solar fotovoltaica é a energia obtida através da conversão direta da luz em eletricidade (Efeito Fotovoltaico), sendo a célula fotovoltaica, um dispositivo fabricado com

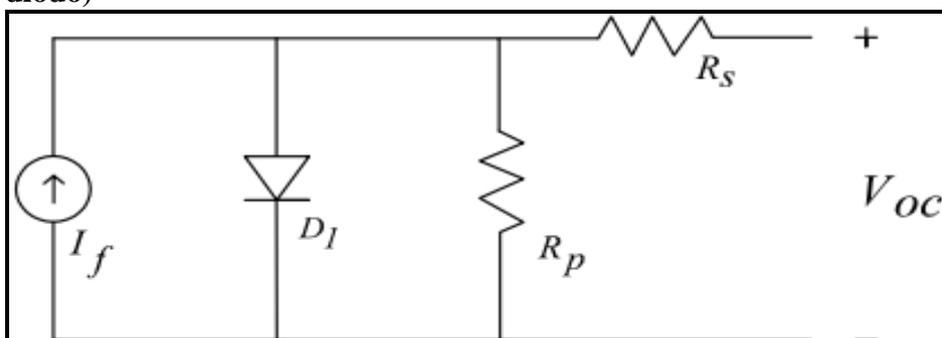
um material semiconductor, a unidade fundamental desse processo de conversão” (PINHO; GALDINO, 2014, p. 50).

2.2 CÉLULA FOTOVOLTAICA

A célula fotovoltaica é constituída de material semiconductor (silício) que possui 4 elétrons na camada de valência, com um alto grau de pureza, dopado quimicamente. Normalmente, a parte frontal da célula é dopada com fósforo e a parte inferior da célula é dopada com boro. A região tipo *N* é formada após a dopagem com fósforo, por exemplo, ficando com mais elétrons do que lacunas na camada de valência. Para a formação da região tipo *P* o material pode ser dopado com boro, ficando com mais lacunas do que elétrons na camada de valência, fazendo com que na exposição de radiação solar ocorra uma migração de elétrons do material tipo *N* para o material tipo *P*, gerando uma corrente elétrica neste sentido (GASPARIN, 2009).

A Figura 1 representa o diagrama do circuito equivalente de uma célula fotovoltaica com um diodo.

Figura 1: Circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica (modelo com um diodo)



Fonte: Adaptado de Lopes Filho; Franco; Vieira (2020).

Observando a figura 1 onde I_f é a corrente contínua fotogerada, D_1 representa a junção *P/N* no escuro, a resistência em paralelo R_p representa as correntes de fuga, a resistência em série R_s representa as perdas ôhmicas e V_{oc} é a tensão de circuito aberto (FRANCO; VIEIRA; CASTRO; DEUS JUNIOR, 2018).

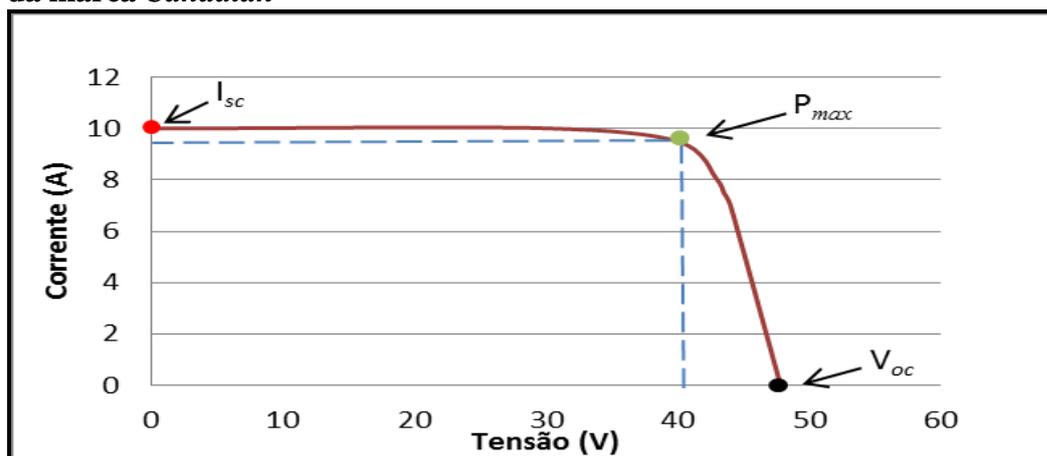
2.3 MÓDULO FOTOVOLTAICO

“As células fotovoltaicas são associadas eletricamente e encapsuladas para formar o módulo fotovoltaico. Um módulo pode ser constituído por um conjunto de 36 a 216 células fotovoltaicas associadas em série e/ou paralelo” (PINHO; GALDINO, 2014, p. 131).

Na construção dos módulos, as células de silício ficam encapsuladas entre uma espécie de EVA, protegidas por um vidro temperado na parte frontal. Na parte posterior revestido de um material chamado *tedlar* e uma caixa de junções onde se situam os diodos de *by pass*. Nas extremidades uma moldura de alumínio protegendo a estrutura e garantindo a fixação (GASPARIN, 2009).

O Gráfico 1 mostra o comportamento de um módulo em Condições Padrão de Teste (STC - *Standard Test Conditions*) com irradiação solar de 1000 W/m^2 e a temperatura de 25°C .

Gráfico 1- Curva Característica I-V de um Módulo Fotovoltaico modelo CS3U-380MS da marca *Canadian*



Fonte: Adaptado de *Canadian Solar* (2018).

Observando a curva em vermelho, nota-se que a máxima corrente (I_{sc} – corrente de curto-circuito) corresponde a uma tensão 0V, e a máxima tensão (V_{oc} – tensão de circuito aberto) corresponde a uma corrente 0A. O ponto verde (P_{max}) representa o ponto de máxima potência que este modelo de módulo pode atingir em condições de laboratório.

Na Tabela 1 pode-se analisar as especificações do módulo fotovoltaico de acordo com o fabricante.

Tabela 1: Tabela de informações técnicas específicas de um módulo fotovoltaico

Modelo	CS3U - 380MS
Marca	<i>Canadian</i>
Potência Nominal (P)	380W

Tensão Nominal (V)	40V
Corrente Nominal (I)	9,5A
Tensão de Circuito Aberto (V_{oc})	47,8V
Corrente de Curto Circuito (I_{sc})	10,01A
Coeficiente de Temperatura (C_{oc})	-0,29%/°C
Coeficiente de Temperatura (C_{sc})	0,05%/°C

Fonte: Adaptado de *Canadian Solar* (2018).

2.4 CONDIÇÕES PADRÃO PARA INSTALAÇÃO DE MÓDULOS

2.4.1 Ângulo azimutal

Também conhecido como azimute solar, é o ângulo formado pela projeção dos raios solares no plano terrestre e o eixo norte-sul, variando de -180° a 180° , sendo positivo para leste e negativo para oeste, onde o 0° encontra-se no norte geográfico (PINHO; GALDINO, 2014).

“... para os sistemas fotovoltaicos fixos, é preciso escolher em qual orientação se alcança a maximização da geração de energia. No hemisfério SUL, esse aproveitamento máximo ocorre com os módulos voltados para o Norte geográfico.” (AYRÃO; VINICIUS, 2018, p. 28).

2.4.2 Declinação solar

“O sol ocupa locais diferentes no céu a cada momento do dia e do ano, óbvio que a energia incidente a cada momento vai variar. A condição ideal seria poder mover os módulos, de forma que sempre estivessem no ângulo mais favorável possível para a geração de energia” (AYRÃO; VINICIUS, 2018, p. 28).

“Considerando-se as convenções para a declinação solar e latitude, positivas para Norte e negativas ao Sul do Equador, a diferença entre a declinação e a latitude determina a trajetória do movimento aparente do sol para um determinado dia em uma dada localidade da Terra” (PINHO; GALDINO, 2014, p.70).

Pode-se calcular-se a declinação solar aproximadamente em qualquer dia do ano através da equação [1], onde n representa o dia Juliano, ou seja, o número do dia do ano independentemente do mês, sendo 1° de janeiro o número 1 e 31 de dezembro sendo o número 365 (PINHO; GALDINO, 2014):

Equação 1: Equação para calcular a declinação solar em qualquer dia do ano

$$\text{sen}(\delta) = -\text{sen}(23,45)\cos\left[\left(\frac{360}{365,25}\right)(n + 10)\right] \quad [1]$$

Fonte: Pinho; Galdino (2014).

2.5 TEMPERATURA

A variação da temperatura ambiente afeta a temperatura de operação da célula, influenciando diretamente no desempenho do módulo fotovoltaico levando a uma redução de eficiência do mesmo. Quando a uma elevação de temperatura de operação do módulo, a tensão do módulo diminui significativamente ao mesmo tempo que a corrente aumenta em uma pequena escala quase desprezível (PINHO; GALDINO, 2014).

Como a temperatura nas condições padrão de testes é raramente atingida, torna-se possível a correção da tensão e corrente elétrica devido ao desvio de temperatura de operação do módulo, para atribuição dos valores de tensão de circuito aberto corrigida (V_{OCC}) para a temperatura de operação de 25°C (STD), aplica-se a equação [2] (SPADUTO; MELO; CARVALHO; FREITAS, 2013):

Equação 2: Equação de correção da tensão de circuito aberto em razão do aumento da temperatura de operação do módulo fotovoltaico

$$V_{OCC} = V_{OC} + (T_o - 25^{\circ}\text{C}) \times \left(\frac{V_{OC} \times C_{OC}}{100}\right) \quad [2]$$

Fonte: Adaptado de Spaduto; Melo; Carvalho; Freitas (2013).

Onde V_{OC} representa a tensão de circuito aberto medida, T_o corresponde a temperatura de operação do módulo e C_{OC} é o coeficiente de temperatura para V_{OC} disponibilizado pelo fabricante do módulo em $\%/^{\circ}\text{C}$.

Da mesma forma ocorre com a corrente. Para a obtenção do valor da corrente de curto circuito corrigida (I_{SCC}) para a temperatura de operação de 25°C (STD), aplica-se a equação [3], sendo I_{SC} é a corrente de curto circuito medida, C_{SC} o coeficiente de temperatura para I_{SC} também dado em $\%/^{\circ}\text{C}$ e T_o a temperatura de operação do módulo:

Equação 3: Equação de correção da corrente de curto circuito em razão do aumento da temperatura de operação do módulo fotovoltaico

$$I_{sc} = I_{sc} - (T_o - 25^{\circ}C) \times \left(\frac{I_{sc} \times C_{sc}}{100} \right) \quad [3]$$

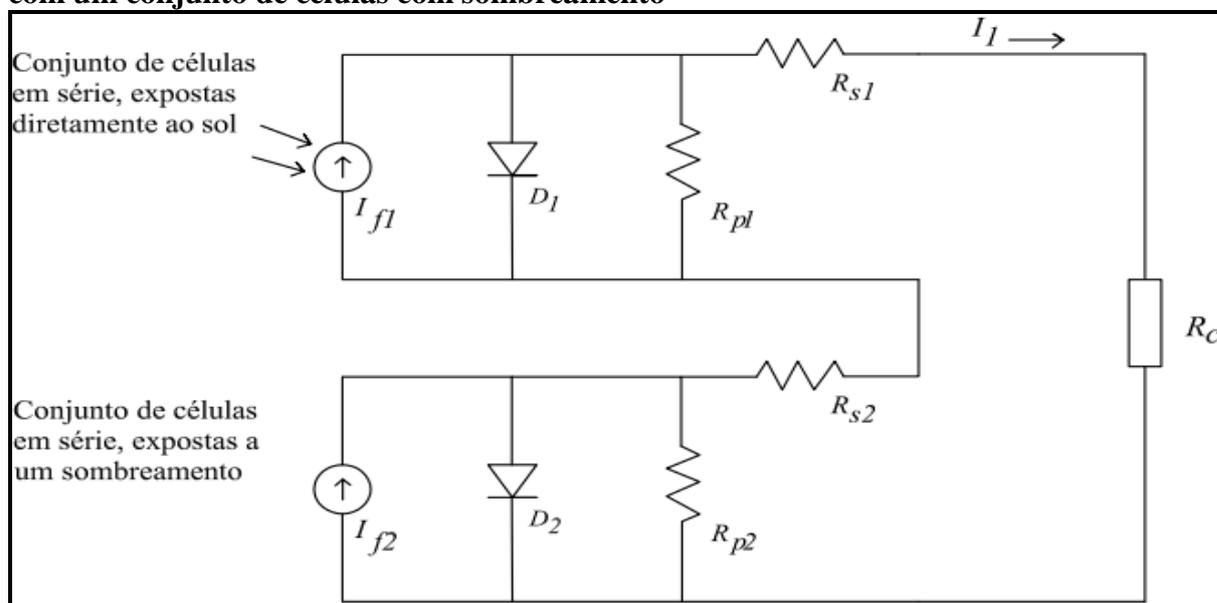
Fonte: Adaptado de Spaduto; Melo; Carvalho; Freitas (2013).

2.6 SOMBREAMENTO

Quando uma célula fotovoltaica está sombreada, ela passa a consumir a energia, isto é, a célula exposta à sombra vira uma carga, dissipando a energia gerada por si e a energia gerada pelas outras células ligadas em série com ela (NGUYEN; LEHMAN, 2006).

Analisando a Figura 2 podemos observar o diagrama do circuito equivalente de uma associação de células fotovoltaicas sem sombreamento em série com um conjunto de células sombreadas:

Figura 2: Circuito equivalente de um conjunto de células sem sombreamento em série com um conjunto de células com sombreamento



Fonte: Adaptado de Lopes (2013).

Interpretando a Figura 2, na parte superior tem-se um conjunto de células expostas diretamente a radiação solar, gerando uma corrente I_{f1} , ligada em série com um conjunto de células expostas a um sombreamento gerando uma corrente I_{f2} . Quando a corrente I_1 for menor que a corrente I_{f2} o diodo D_2 está polarizado diretamente não oferecendo risco de danos à célula. Quando a corrente I_1 for maior que I_{f2} o diodo D_2 fica polarizado inversamente, quando

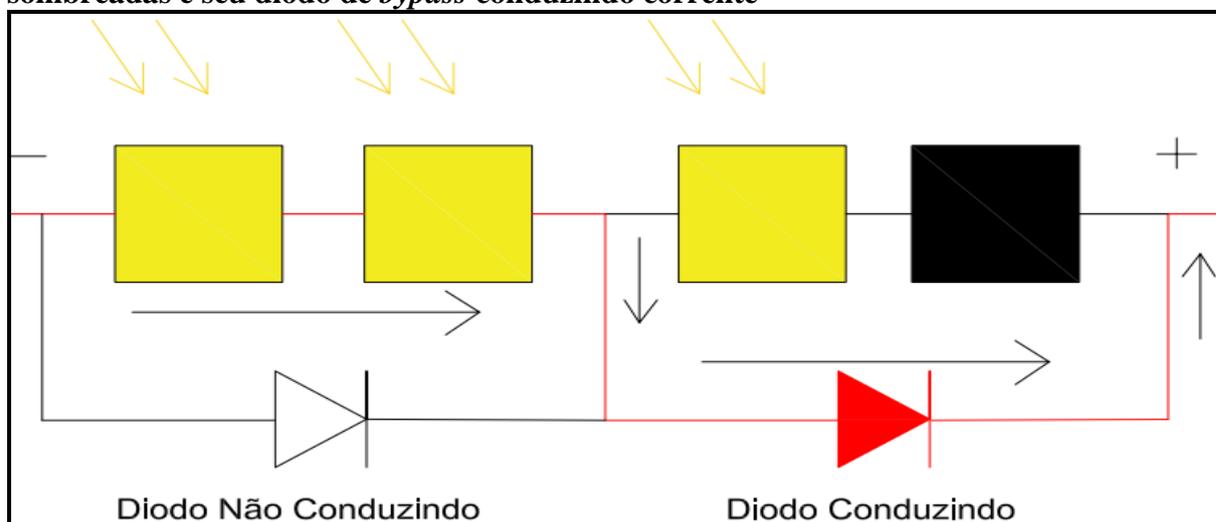
exposto a uma corrente inversa o diodo comporta-se como um resistor, dissipando a potência em forma de calor, aparecendo os chamados pontos quentes (*hotspots*), diminuindo a corrente na carga R_c , limitando a potência do conjunto e podendo trazer danos à célula. (LOPES, 2013).

2.7 DIODOS DE BYPASS

A fim de diminuir a dissipação de potência nas células sombreadas e a limitação de potência do conjunto, diodos de desvio (*bypass*) são instalados nos módulos, possibilitando outro caminho para passagem da corrente elétrica, evitando a ocorrência dos pontos quentes (*hotspots*) reduzindo as perdas de energia e protegendo a integridade das células. Os diodos geralmente situam-se nas caixas de junções dos módulos, conectados individualmente em antiparalelo com um grupo de 15 a 30 células (PINHO; GALDINO, 2014).

A Figura 3 apresenta o caminho que percorre a corrente elétrica quando uma célula fotovoltaica com diodo de *bypass* é submetida a um sombreamento:

Figura 3: Conjunto de células recebendo luz solar, em série com um conjunto de células sombreadas e seu diodo de *bypass* conduzindo corrente



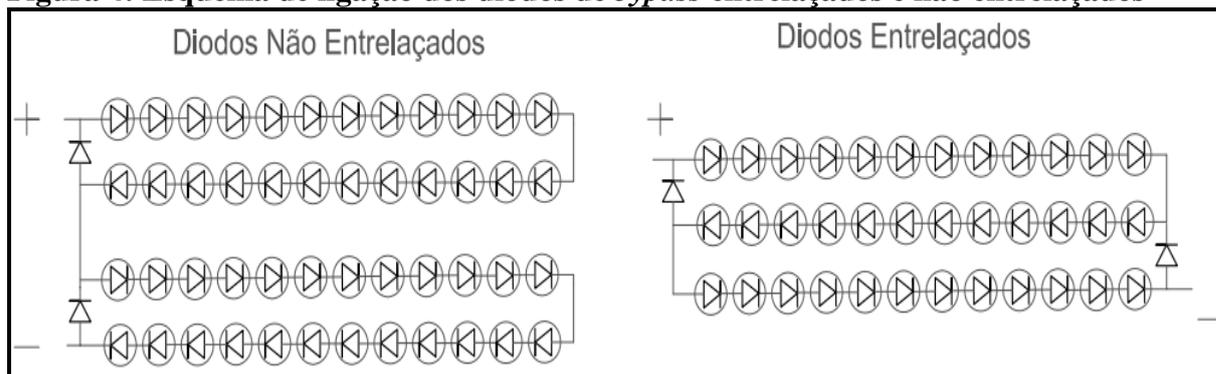
Fonte: Adaptado de Marques; Cardoso; Almeida; Fernandes (2020).

Na Figura 3 nota-se o funcionamento do diodo de *by-pass*, como o diodo está ligado em antiparalelo sua polaridade é contrária a das células. Quando o conjunto de células está recebendo luz solar, a tensão no cátodo é maior que a tensão no ânodo, logo o diodo de *bypass* fica polarizado reversamente praticamente não conduzindo corrente. Quando o conjunto de células está exposto a um sombreamento a tensão no cátodo é menor que a tensão

no ânodo isso faz a corrente mudar o sentido polarizando diretamente o diodo de *bypass* fazendo que ele ofereça um caminho alternativo para a corrente (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).

Observando a Figura 4 pode-se notar dois tipos de disposição dos diodos de *bypass* em módulos fotovoltaicos.

Figura 4: Esquema de ligação dos diodos de *bypass* entrelaçados e não entrelaçados



Fonte: Adaptado de Hecktheuer; Krenzinger; Prieb (2002).

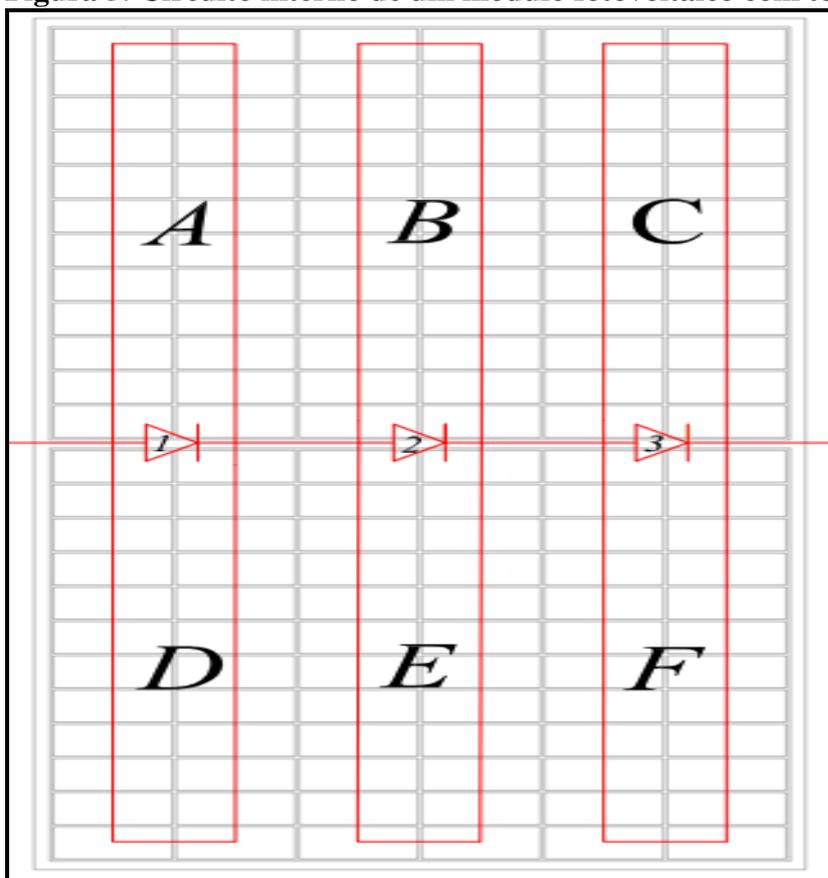
Usualmente, não se colocam diodos de *bypass* individualmente em todas as células e sim, em um conjunto delas. Normalmente adotam-se nos módulos os diodos não entrelaçados conforme a figura 4, onde tem dois valores de tensão disponíveis, já na configuração de diodos entrelaçados somente uma tensão está disponível (HECKTHEUER, 2001).

2.8 SOMBREAMENTO EM MÓDULOS COM TECNOLOGIA HALF-CELL DE 144 CÉLULAS

Tendo em vista, o constante crescimento tecnológico e a necessidade de diminuição de perdas provenientes do sombreamento de módulos fotovoltaicos, novas tecnologias foram aprimoradas visando aumentar a eficiência na conversão de energia. Com base nisso, a tecnologia meia célula (*half-cell*) apareceu impulsionando o mercado fotovoltaico.

Na Figura 5 pode-se observar como é feita a ligação interna do circuito com diodos de *bypass* não entrelaçados de um módulo fotovoltaico de 144 células com a tecnologia *half-cell*.

Figura 5: Circuito interno de um módulo fotovoltaico com tecnologia *half-cell*



Fonte: Adaptado de Chiodetti; Dupuis; Boubilil; Radouane; Dupeyrat, (2019).

Analisando a Figura 5 nota-se que o módulo de 144 células *half-cell* é dividido pela metade, onde as *substrings* A, B e C estão ligadas em paralelo com as *substrings* D, E e F respectivamente. Este tipo de ligação dos diodos 1, 2 e 3 em antiparalelo possibilita um caminho alternativo para a corrente elétrica em caso de sombreamento nas *substrings* D, E ou F, fazendo com que as *substrings* A, B ou C não sejam afetadas pela sombra, aumentando a eficiência do módulo, diminuindo as perdas. As perdas por sombreamento nos módulo *half-cell* neste caso são bem menores quando se trata de sombra em paisagem (linha), em comparação com outras tecnologias (CHIODETTI; DUPUIS; BOUBLIL; RADOUANE; DUPEYRAT, 2019).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

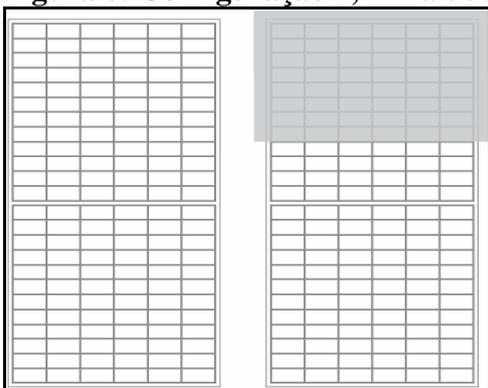
3.1 MÉTODOS

A análise realizou-se na cidade de Nonoai, localizada ao norte do estado do Rio Grande do Sul. Dois módulos foram adaptados diretamente no solo, dispostos lado a lado e ligados em série com orientação norte geográfico. Para o máximo aproveitamento da radiação solar, utilizou-se a equação [1] para saber a posição da terra em relação ao sol na data do teste.

A diferença do ângulo de latitude pelo ângulo adquirido através da equação [1], chegou-se ao ângulo aproximado de 8° entre o módulo e o plano terrestre, sendo possível fazer o ajuste da inclinação dos módulos deixando-os mais perpendiculares possíveis em relação ao sol. Primeiramente, realizou-se a medição de corrente de curto circuito (I_{sc}) e tensão de circuito aberto (V_{oc}) com os módulos expostos diretamente ao sol.

A fim de observar o efeito do sombreamento, várias configurações de sombras foram testadas cobrindo variados arranjos de células e em diferentes áreas dos módulos. Para apresentação de dados quatro configurações foram escolhidas as quais representaram variações mais significativas. Afim de comparação, na configuração 1 e 2 de sombreamento tiveram o mesmo números de células sombreadas, nesse mesmo sentido as configurações 3 e 4 também. Na configuração 1 a projetou-se em uma linha de 48 células em um dos módulos conforme figura 6 e realizada a medição da corrente de curto circuito e tensão de circuito aberto:

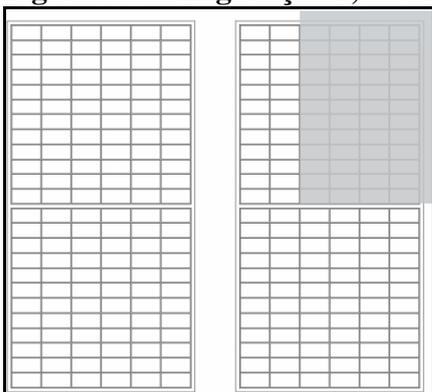
Figura 6: Configuração 1, linha de sombra ocupando 48 células de um dos módulos



Fonte: Próprio Autor (2020).

Logo após realizou-se a medição das mesmas grandezas elétricas com a sombra artificial projetada em uma coluna de 48 células de um dos módulos segundo configuração 2 representada na Figura 7.

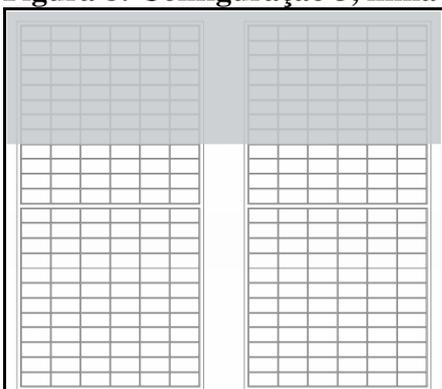
Figura 7: Configuração 2, coluna de sombra ocupando 48 células de um dos módulos



Fonte: Próprio Autor (2020).

Para obtenção de mais dados a área de sombreamento foi ampliada para testar o comportamento dos módulos quando submetidos a uma linha de sombra cobrindo 96 células do conjunto de módulos como mostra a configuração 3 na Figura 8:

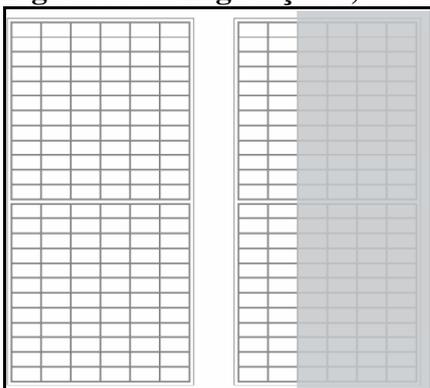
Figura 8: Configuração 3, linha de sombra ocupando 96 células do conjunto de módulos



Fonte: Próprio Autor (2020).

Na última configuração, posicionou-se a sombra ocupando uma coluna de 96 células de um dos módulos e verificou-se a variação de corrente de curto circuito e tensão de circuito aberto nos terminais dos módulos de acordo com a configuração 4 apresentada na Figura 9.

Figura 9: Configuração 4, coluna de sombra ocupando 96 células de um dos módulos



Fonte: Autor Próprio (2020).

Com o intuito de testar o comportamento dos módulos fotovoltaicos submetidos a um sombreamento e evitar interferência climática nos resultados, escolheu-se um dia livre de nuvens. Nesse mesmo sentido, optou-se para os testes o horário entre às 12:00 horas e às 13:00 horas onde há pouca variação de radiação solar.

Para o acompanhamento de possíveis surgimentos de pontos quentes (*hotspots*), utilizou-se uma câmera térmica em todas as etapas do procedimento, proporcionando o conhecimento da temperatura de operação dos módulos, possibilitando a correção de todas as tensões de circuito aberto e correntes de curto circuito para a condição padrão de teste (25°C) através das equações [2] e [3], a fim de mostra a influência da temperatura de operação do módulo nas grandezas elétricas.

3.2 MATERIAIS

Para analisar o comportamento de algumas variáveis devido ao sombreamento, além dos próprios módulos, foi necessária a utilização de alguns equipamentos de verificação de temperatura e grandezas elétricas:

- Módulo Fotovoltaico: para realização dos testes foram utilizou-se dois módulos fotovoltaicos novos idênticos da marca *CanadianSolar* modelo CS3U-380MS *KuMax* monocristalino com tecnologia *Half-cell* 144 células de 380 W de potência cada módulo.
- Alicates Amperímetro: na medição das grandezas elétricas utilizou-se um alicate amperímetro digital da marca *Minipa* modelo ET-3367C com capacidade de medição de tensão DC até 1000 V e corrente DC até 1000 A.

- Câmera Térmica: para acompanhar o comportamento da temperatura no procedimento, utilizou-se um termômetro infravermelho da marca *Fluke* modelo VT04 que possui um visor térmico possibilitando melhor análise térmica.
- Sombra Artificial: projetou-se uma sombra com cerca de 30% de intensidade diretamente nos módulos, isso é, a queda na corrente de curto circuito com os módulos totalmente sombreados foi de aproximadamente 30% referente a corrente de curto circuito com os módulos totalmente expostos a radiação solar. O material da sombra escolhido foi uma espécie papelão de 4mm de espessura, bloqueando parte da radiação solar incidente nas células.

4 RESULTADO E ANÁLISE DOS DADOS

Com o auxílio da câmera térmica foi possível a identificação da temperatura de operação dos módulos, assim, após a medição das tensões e correntes em todas as configurações de sombreamento chegou-se á tabela 2:

Tabela 2: Tabela com valores adquiridos através das medições

	Temperatura de Operação (°C)	Tensão Medida (Voc) (V)	Corrente Medida (Isc) (A)
Sem Sombra	48,30	81,87	12,04
Configuração 1	51,00	80,47	11,83
Configuração 2	50,00	81,16	11,89
Configuração 3	51,00	80,53	11,74
Configuração 4	50,00	81,34	10,75

Fonte: Autor Próprio (2020).

Através das equações [2] e [3] foi possível corrigir todas as correntes e tensões para a temperatura de operação dos módulos em 25°C, ou seja, a temperatura nas condições padrão de teste (*STD*). Com isso chegou-se aos valores:

$$V_{occ} = V_{oc} + (T_o - 25^{\circ}C) \times \left(\frac{V_{oc} \times C_{oc}}{100} \right) = 81,87 + (48,30 - 25) \times \left(\frac{81,87 \times 0,29}{100} \right) = 87,40V \quad 4$$

$$I_{sc} = I_{sc} - (T_o - 25^{\circ}C) \times \left(\frac{I_{sc} \times C_{sc}}{100} \right) = 12,04 - (48,30 - 25) \times \left(\frac{12,04 \times 0,05}{100} \right) = 11,90A$$

$$V_{occ} = V_{oc} + (T_o - 25^{\circ}C) \times \left(\frac{V_{oc} \times C_{oc}}{100} \right) = 80,47 + (51 - 25) \times \left(\frac{80,47 \times 0,29}{100} \right) = 86,54V \quad 5$$

$$I_{sc} = I_{sc} - (T_o - 25^{\circ}C) \times \left(\frac{I_{sc} \times C_{sc}}{100} \right) = 11,83 - (51 - 25) \times \left(\frac{11,83 \times 0,05}{100} \right) = 11,68A$$

$$V_{occ} = V_{oc} + (T_o - 25^{\circ}C) \times \left(\frac{V_{oc} \times C_{oc}}{100} \right) = 81,16 + (50 - 25) \times \left(\frac{81,16 \times 0,29}{100} \right) = 87,04V \quad 6$$

$$I_{sc} = I_{sc} - (T_o - 25^{\circ}C) \times \left(\frac{I_{sc} \times C_{sc}}{100} \right) = 11,89 - (50 - 25) \times \left(\frac{11,89 \times 0,05}{100} \right) = 11,74A$$

$$V_{occ} = V_{oc} + (T_o - 25^{\circ}C) \times \left(\frac{V_{oc} \times C_{oc}}{100} \right) = 80,53 + (51 - 25) \times \left(\frac{80,53 \times 0,29}{100} \right) = 86,60V \quad 7$$

$$I_{sc} = I_{sc} - (T_o - 25^{\circ}C) \times \left(\frac{I_{sc} \times C_{sc}}{100} \right) = 11,74 - (51 - 25) \times \left(\frac{11,74 \times 0,05}{100} \right) = 11,59A$$

$$V_{occ} = V_{oc} + (T_o - 25^{\circ}C) \times \left(\frac{V_{oc} \times C_{oc}}{100} \right) = 81,34 + (50 - 25) \times \left(\frac{81,34 \times 0,29}{100} \right) = 87,24V \quad 8$$

$$I_{sc} = I_{sc} - (T_o - 25^{\circ}C) \times \left(\frac{I_{sc} \times C_{sc}}{100} \right) = 10,75 - (50 - 25) \times \left(\frac{10,75 \times 0,05}{100} \right) = 10,62A$$

Após todas as correções das grandezas elétricas foi possível constituir a Tabela 3.

Tabela 3: Tabela de resultados de medição e correção das grandezas de acordo com a temperatura de operação

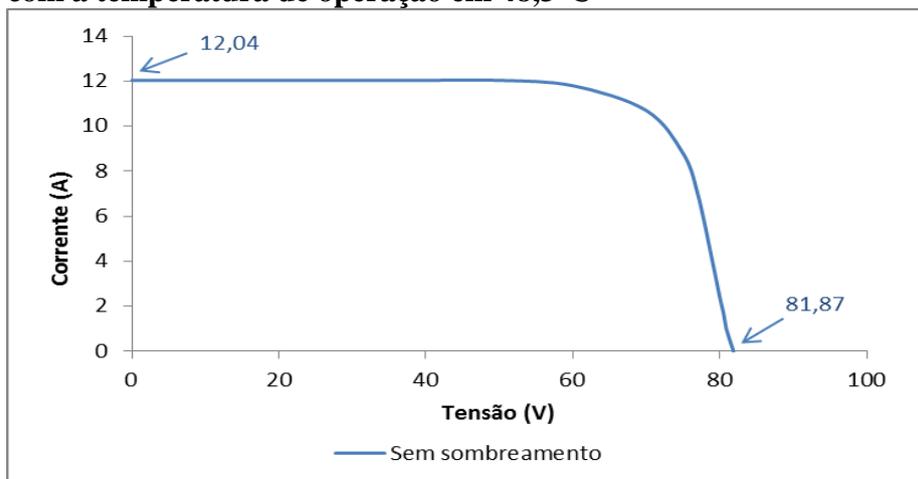
	Tensão Corrigida para a Temperatura de Op. em 25°C (V _{occ}) (V)	Corrente Corrigida para a Temperatura de Op. em 25°C (I _{sc}) (A)	Temperatura de Operação (°C)	Tensão Medida (V _{oc}) (V)	Corrente Medida (I _{sc}) (A)	
Sem Sombra	87,40	11,90	48,30	81,87	12,04	4
Configuração 1	86,54	11,68	51,00	80,47	11,83	5
Configuração 2	87,04	11,74	50,00	81,16	11,89	6
Configuração 3	86,60	11,59	51,00	80,53	11,74	7
Configuração 4	87,24	10,62	50,00	81,34	10,75	8

Fonte: Autor Próprio (2020).

De acordo com a Tabela 3 nota-se que quando a temperatura é superior a condição padrão de teste (*STC*), isso é, acima de 25°C, há uma diminuição considerável na tensão de circuito aberto (*V_{oc}*), enquanto a corrente de curto circuito (*I_{sc}*) aumenta numa proporção bem menor. Também é possível notar uma elevação na temperatura de operação do módulo após o início da aplicação dos sombreamentos.

Primeiramente analisou-se o comportamento do conjunto de módulos ligados em série expostos diretamente a radiação solar, medindo a corrente de curto circuito (*I_{sc}*) e a tensão de circuito aberto (*V_{oc}*). Na curva do gráfico 2 pode-se observar esse comportamento:

Gráfico 2: Curva Característica de dois módulos ligados em série sem sombreamento com a temperatura de operação em 48,3°C

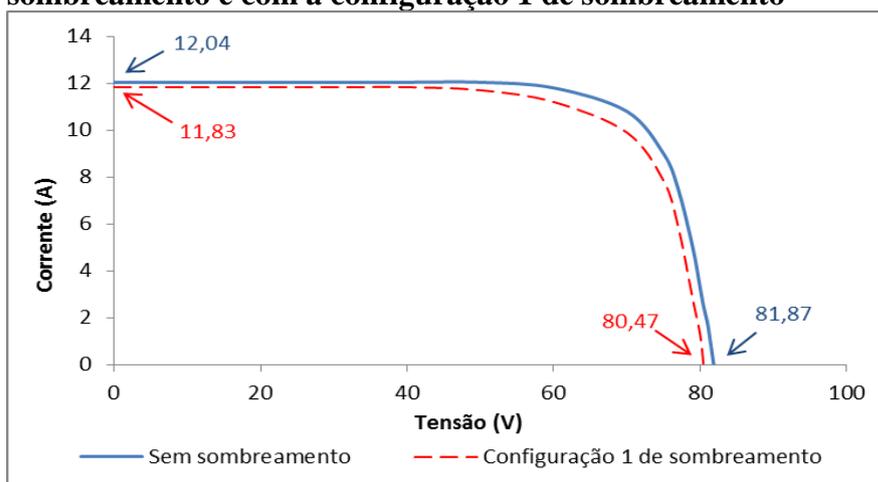


Fonte: Autor Próprio (2020).

Gráfico 2 representa a curva I-V de dois módulos, devido a ligação em série dos módulos note que a tensão de circuito aberto chegou a $V_{OC} = 81,87V$ enquanto a corrente de curto circuito atingiu $I_{SC} = 12,04A$ com os módulos na temperatura de operação em 48,3°C.

Posteriormente projetou-se a configuração 1 de sombreamento com intensidade de cerca de 30% ocupando uma linha de 48 células da parte superior de um dos módulos. O Gráfico 3 mostra a curva traçada após o sombreamento:

Gráfico 3: Gráfico da comparação de curvas características I-V dos módulos sem sombreamento e com a configuração 1 de sombreamento



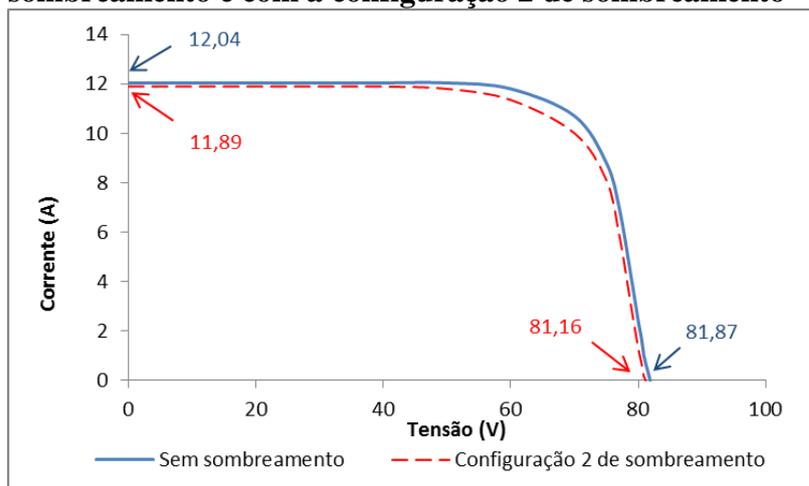
Fonte: Autor Próprio (2020).

Observando o Gráfico 3 tem-se a curva traçada em vermelho que corresponde a uma tensão de circuito aberto de $V_{OC} = 80,47V$ e uma corrente de curto circuito de $I_{SC} = 11,83A$.

Isso significa que houve uma queda de corrente de 1,74% enquanto que a tensão teve uma queda de 1,71% em comparação com os valores verificados sem sombreamento.

Na configuração 2 de sombreamento foi projetada uma sombra de mesma intensidade em uma coluna de 48 células, o Gráfico 4 demonstra os resultados obtidos.

Gráfico 4: Gráfico da comparação de curvas características I-V dos módulos sem sombreamento e com a configuração 2 de sombreamento



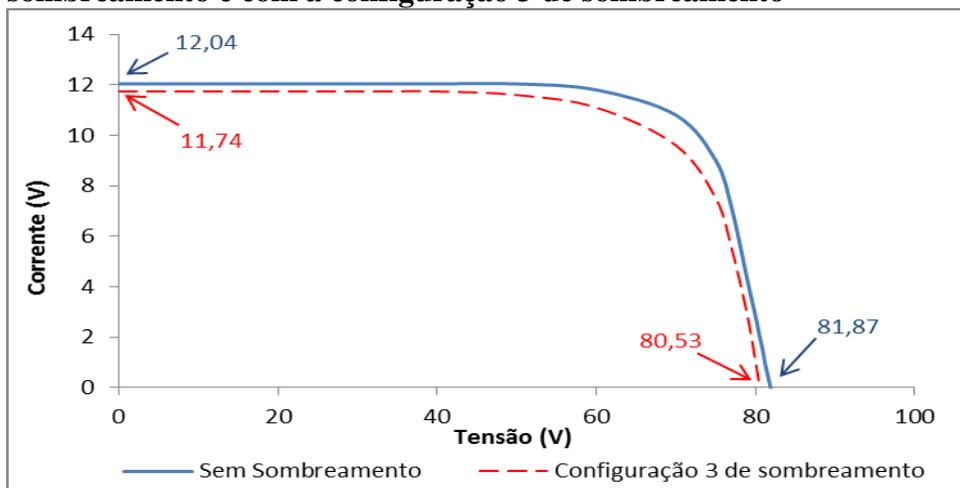
Fonte: Autor Próprio (2020).

Na análise do Gráfico 4 nota-se a curva traçada em vermelho que corresponde ao valor de corrente de curto circuito $I_{SC} = 11,89A$, isso é, a configuração 2 de sombreamento reduziu a corrente elétrica cerca de 1,24% em relação a corrente sem sombreamento. A tensão também se comportou da mesma forma, reduziu em relação à tensão sem sombreamento adquirindo o valor de $V_{OC} = 81,16V$ que corresponde a uma redução de 0,87%.

Avaliando os resultados até o momento nota-se que as variações são pequenas, mas existentes, na configuração 1 de sombreamento houve uma redução maior na tensão e corrente em relação a configuração 2. Isso se dá devido a ligação interna do circuito do módulo, fazendo com que a configuração 1 de sombra afete as três *sub-strings* superiores limitando os parâmetros de todas as células em série. Enquanto a configuração 2 afeta somente duas *sub-strings*, deixando a *sub-string* restante operando normalmente sem sombreamento.

A configuração 3 de sombreamento testou-se ocupando uma linha de 96 células do conjunto de módulos, o Gráfico 5 apresenta a curva I-V desta disposição após o teste:

Gráfico 5: Gráfico de comparação de curvas características I-V dos módulos sem sombreamento e com a configuração 3 de sombreamento

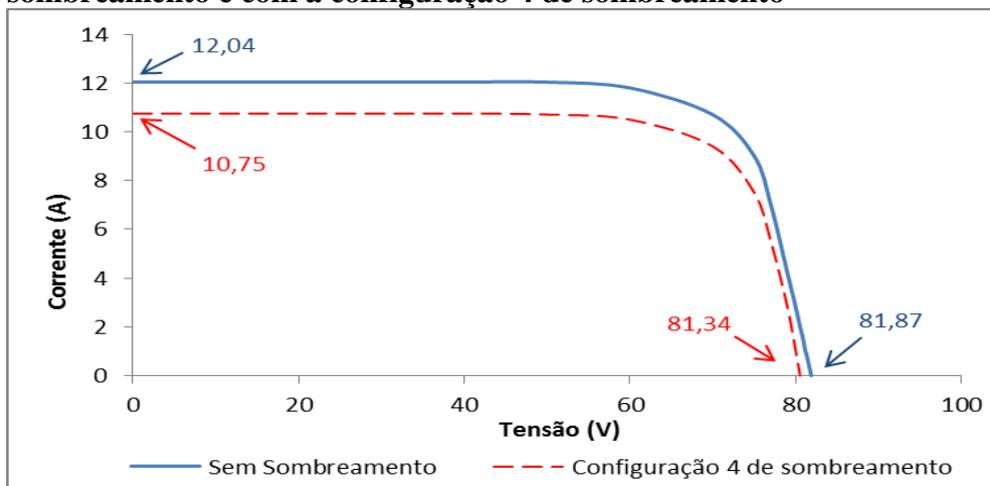


Fonte: Autor Próprio (2020).

De acordo com o Gráfico 5 as perdas na corrente e na tensão após o sombreamento com a configuração 3, tornam-se um pouco mais perceptíveis fisicamente devido o aumento de área sombreada. A curva traçada em vermelho corresponde a uma corrente $I_{SC} = 11,74A$ resultando numa queda de 2,50% em relação a curva contínua sem sombra, enquanto a tensão de circuito aberto adquiriu o valor $V_{OC} = 80,53V$ apresentando uma redução de 1,63% comparando com os parâmetros da configuração sem sombra.

Por último a sombra com a configuração 4 foi aplicada em uma coluna, cobrindo 96 células em um dos módulos, no Gráfico 6 podemos observar a curva representada:

Gráfico 6: Gráfico de comparação de curvas características I-V dos módulos sem sombreamento e com a configuração 4 de sombreamento



Fonte: Autor Próprio (2020).

Segundo o Gráfico 6 observa-se na curva em vermelho uma redução considerável de corrente de curto circuito chegando a $I_{SC} = 10,75A$, em relação a curva sem sombreamento ocorreu uma diminuição de 10,71% na corrente. A tensão obteve o valor de $V_{OC} = 81,34V$, isso é, reduziu 0,64% relativamente à tensão verificada sem sombra.

Avaliando os resultados coletados nas configurações de sombreamento 3 e 4, nota-se que a diminuição na corrente de curto circuito na configuração 4 é bem maior, isso acontece pois a sombra está afetando diretamente as duas metades do módulo, ou seja, bloqueando a radiação em 4 *sub-strings*, assim o módulo *half-cell* começa a comportar-se como um módulo convencional (*ful-cell*). Na configuração 3 acontece o contrário, a sombra atinge apenas uma das metades dos dois módulos, devido a ligação interna do circuito esse módulo é capaz de limitar o efeito da sombra só na metade afetada, deixando a outra metade operando normalmente sem interferência de sombra.

Observa-se que na configuração 1 de sombreamento existe uma diminuição de corrente maior em comparação com a configuração 2, isso ocorre pois todas as células ligadas em série limitam-se aos parâmetros da célula sombreada, reforçando a ideia de que a corrente elétrica está ligada com a variação de irradiação.

Nesse mesmo sentido pode-se atrelar o comportamento da tensão diretamente com a temperatura, pois o sombreamento aumenta a temperatura de operação do módulo diminuindo consideravelmente a tensão de circuito aberto afetando a produção de energia.

Nota-se que as diferentes configurações de sombreamento não influenciam significativamente na tensão de circuito aberto, mas afetam diretamente na corrente de curto circuito trazendo uma considerável queda, conseqüentemente assim diminuindo a potência elétrica.

A pequena, mas existente variação de corrente de curto circuito das configurações 1, 2 e 3 em relação a corrente sem sombreamento dá-se devido a pouca intensidade da sombra aplicada que foi de cerca de 30%, também depende da área de atuação da sombra e do número de células ligadas ao sistema.

Analisando as diferentes configurações de sombra também foi possível identificar que os módulos *half-cell* tem um bom desempenho quando submetidos a sombreamentos como os das configurações 1, 2 e 3, pois sua ligação paralela de *sub-strings*, limita o efeito da sombra.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A ideia do estudo sobre os efeitos do sombreamento em módulos fotovoltaicos *half-cell* de 144 células principiou da necessidade de identificar os impactos ocasionados por ele, e a influência da sombra nos conjuntos fotovoltaicos.

Através da análise de temperatura, corrente e tensão elétrica foi possível identificar que o sombreamento eleva a temperatura de operação dos módulos fazendo a tensão de circuito aberto diminuir, prejudicando a eficiência do sistema. Observou-se que uma célula sombreada reflete sua corrente nas outras células, limitando o conjunto ligado em série.

Os módulos com tecnologia *half-cell* comportam-se melhor quando exposto as configurações de sombreamento 1, 2 ou 3, mas quando trata-se da configuração 4, seu desempenho diminui, já nos módulos *ful-cell* o desempenho atua diferente.

Por isso é de extrema importância realizar um estudo detalhado sobre as condições do local de instalação dos módulos, evitando sombras ou prevendo-as, adotando o tipo e a orientação dos módulos que melhor atendam as necessidades.

REFERÊNCIAS

AYRÃO, Vinicius; **Energia Solar Fotovoltaica no Brasil** - conceitos, aplicações e estudos de caso. Rio de Janeiro: *International Copper Association Brazil*, 2018. 102 p.

BOYLESTAD, Robert L.; NASHELSKY, Louis. **Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos**. 11. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil Ltda, 2013. 766 p.

CANADIAN SOLAR INC.; **Módulo Fotovoltaico KuMax CS3U-365|370|375|380MS High Efficiency Mono Perc Module (1000 V / 1500 V)**. 2018. Disponível <https://www.bluepacificsolar.com/picture_library/tech-specs/canadian-CS3U-365MS-CS3U-380MS-data.pdf>. Acesso em: 20 out. 2020.

CHIODETTI, Matthieu; DUPUIS, Julien; BOUBLIL, David; RADOUANE, Khalid; DUPEYRAT, Patrick. Half-Cell Module Behaviour and its Impact on the Yield of a Pv Plant. In: EUROPEAN PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY CONFERENCE AND EXHIBITION, 4., 2019, Marseille. **Anais eletrônicos**. Marseille: Conference Paper, 2019. p.

1-5. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/338368140_HALF-CELL_MODULE_BEHAVIOUR_AND_ITS_IMPACT_ON_THE_YIELD_OF_A_PV_PLANT. Acesso em: 5 out. 2020.

FRANCO, R. A. P.; VIEIRA, F. H. T.; CASTRO, M. S. de; DEUS JUNIOR, G. A.. **Estimação de Parâmetros de Modelo de Sistemas Fotovoltaicos utilizando Algoritmo de Levenberg-Marquardt Modificado**. Tema, São Carlos, v. 19, n. 1, abr. 2018. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S2179-84512018000100079&script=sci_arttext#aff1. Acesso em: 10 set. 2020.

GASPARIN, Fabiano Perin. **Desenvolvimento de um traçador de curvas características de módulos fotovoltaicos**. 2009. 59 f. Dissertação (Mestrado) Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

HECKTHEUER, Lúcio Almeida. **Análise de Associações de Módulos Fotovoltaicos**. 2001. 117 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

HECKTHEUER, L. A.; KRENZINGER, A.; PRIEB, C. W. M.. **Methodology for Photovoltaic Modules Characterization and Shading Effects Analysis**. Journal Of The Brazilian Society Of Mechanical Sciences. Rio de Janeiro, p. 1-1. mar. 2002. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-73862002000100004. Acesso em: 5 out. 2020.

LOPES FILHO, G.; FRANCO, R.A.P.; VIEIRA, F.H.T.. **Algoritmo de Seguimento do Ponto de Máxima Potência para Sistemas Fotovoltaicos considerando Minimização de Erro e Derivada da Potência**. Tema, São Carlos, v. 21, n. 1, abr. 2020. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2179-84512020000100157. Acesso em: 10 set. 2020.

LOPES, Ricardo Jorge Cabral. **Efeito do Sombreamento Nos Painéis Fotovoltaicos**. 2013. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Electrotécnica, Área Departamental de Engenharia de Sistemas de Potência e Automação, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2013.

LUCAS, Kevin. **Energizando o futuro do Brasil com Eficiência Energética**. Recursos Energéticos Distribuídos: FGV Energias. Rio de Janeiro, maio 2016. p. 30-32.

MARKVART, Tom; CASTAÑER, Luis. **Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications**. Oxford: Elsevier, 2003. 957 p.

MARQUES, Vanessa da Costa; CARDOSO, Ronnan de Brito; ALMEIDA, Rogério Gaspar de; FERNANDES, Darlan Alexandria. **Análise De Desempenho De Sistemas Fotovoltaicos Conectados À Rede Elétrica Sob Condição De Sombreamento Parcial**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 2., 2020, João Pessoa. **Anais eletrônicos**. Campinas: Sba, 2020. p. 1-6. Disponível em: https://www.sba.org.br/open_journal_systems/index.php/sba/article/view/240/203. Acesso em: 31 out. 2020.

MARTINS, F. R.; GUARNIERI, R. A.; PEREIRA, E. B.. **O Aproveitamento da Energia Eólica**. Revista Brasileira de Ensino de Física, São Paulo, v. 30, p. 1-13, 17 out. 2007.

NGUYEN, Dzung D; LEHMAN, Brad. **Modeling and Simulation of Solar PV Arrays under Changing Illumination Conditions**. In: 2006 IEEE COMPEL, 2006, New York. **Anais eletrônicos**. New York: 2006. p. 295-299. Disponível em: https://ece.northeastern.edu/groups/power/lehman/Publications/Pub2006/2006_7_Nguyen.pdf. Acesso em: 10 out. 2020.

PINHO, João T.; GALDINO, Marco A. (org.). **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. 15. ed. Rio de Janeiro, CEPAL-CRESESB, 2014. 530 p.

SPADUTO, Robson Ruiz; MELO, Fernando C.; CARVALHO, Rafael A. S. de; FREITAS, Luiz C. G.. Projeto De Um Sistema Fotovoltaico De 2,16 Kwp Conectado À Rede Elétrica. In: CONFERÊNCIA DE ESTUDOS EM ENGENHARIA ELÉTRICA, 11, 2013, Uberlândia. **Anais eletrônicos**. Uberlândia: 2013. p. 1-6. Disponível em:<
<https://pt.scribd.com/doc/277360527/PROJETO-DE-UM-SISTEMA-FOTOVOLTAICO-DE-2-16-kWp-CONECTADO-A-REDE-ELETRICA-pdf>> Acesso em: 10 nov. 2020.