

RELAÇÃO ENTRE DISTRIBUIÇÕES NÃO UNIFORMES DE SUJIDADE E PARÂMETROS DE DESEMPENHO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE TECNOLOGIAS SILÍCIO CRISTALINO E TELURETO DE CÁDMIO

Daniel Sena Braga – danielsenabraga@gmail.com

Antonia Sônia Alves Cardoso Diniz – asacd2012@gmail.com

Vinicius Augusto Camatta Santana – vcamatta@live.com

Isabelle Cristina Silva – isabelle.silva264@gmail.com

Cláudio Dias Campos – campos@pucminas.br

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Grupo de Estudos em Energia (GREEN)

Lawrence L. Kazmerski – solarpvkaz@gmail.com

University of Colorado Boulder, Renewable & Sustainable Energy Institute (RASEI)

Resumo. A sujidade dos módulos fotovoltaicos é uma preocupação crescente devido a diminuição da produção de energia elétrica em uma instalação solar fotovoltaica. Este problema tem sido observado nas áreas que possuem grande disponibilidade de radiação solar, que ironicamente apresentam na maioria dos casos problemas com acumulação de poeira. Este artigo examina as relações entre as diferentes distribuições não uniformes de sujidade e o desempenho dos módulos fotovoltaicos de tecnologias silício policristalino e telureto de cádmio. Essas acumulações não uniformes não só causam a diminuição da energia produzida, mas resultam em sombreamento que pode causar aumento do aquecimento da área, formando pontos quentes (“hot spots”), que aceleram a degradação do módulo. Este artigo avalia os efeitos de diferentes padrões de sujidade não uniformes nas grandezas características da curva I-V, documentando mudanças na forma dessas características. Esses estudos são realizados em módulos de tecnologia Si cristalino e em módulos de filme fino sem moldura de CdTe. As distribuições não uniformes também estão relacionadas às distribuições de temperatura, que foram avaliadas com o auxílio de mapeamento de temperatura através de câmeras IR. Pontos quentes com aumento de temperatura de mais de 30°C em relação ao restante do módulo são apresentados operando sob condições normais de radiação solar.

Palavras-chave: Sujidade, Não-uniforme, Impacto

1. INTRODUÇÃO

Apesar dos avanços da tecnologia solar fotovoltaica nas últimas décadas, verifica-se que a confiabilidade e o desempenho de um módulo fotovoltaico continuam diretamente relacionados a integridade da primeira superfície de interação dos fótons solares que incidem nos módulos.

A sujidade da superfície dos módulos fotovoltaicos é uma preocupação crescente devido à diminuição da produção de energia elétrica de uma instalação solar fotovoltaica. Atualmente observa-se a expansão de mercados solares, em especial nas áreas de deserto e do cinturão solar, áreas que apresentam não apenas a maior disponibilidade de recursos solares, mas também os problemas de sujidade mais críticos. A compreensão e mitigação desse problema é crucial para evitar qualquer equívoco no dimensionamento e implantação de uma instalação solar. O problema de sujidade não é limitado a essas áreas de clima severo. Perdas significativas podem ser encontradas em áreas com ambientes tropicais e temperados.

Este artigo contribui com os esforços mundiais para examinar, compreender e agregar a base de conhecimentos dos efeitos e impactos que a sujidade acarreta aos módulos fotovoltaicos. O foco principal deste estudo é a relação entre as distribuições não uniformes de sujidade e parâmetros de desempenho e distribuições de temperatura de módulos fotovoltaicos de diferentes tecnologias, o que permite uma modelagem de sistemas fotovoltaicos mais próxima do real conhecendo-se o padrão de sujidade da região.

2. METODOLOGIA

As medições das curvas características I-V foram realizadas em nossas estações de monitoramento de sujidade (Atonometrics), registrando-se a corrente de curto-circuito, a tensão de circuito aberto e a potência máxima. A irradiância solar foi monitorada usando célula de referência calibrada e verificada periodicamente com uma célula de referência separada e um piranômetro calibrado para consistência e confiabilidade da medição.

A temperatura do módulo foi registrada com o auxílio de um sensor RTD na superfície traseira do módulo. O mapeamento da temperatura do módulo foi realizado usando uma câmera IR marca NECSan-ei modelo TH71-2MX. As temperaturas também foram verificadas regularmente usando detectores de IR e termopares. Verificou-se que as temperaturas registradas com o auxílio do sensor RTD variaram entre $\pm 1^\circ\text{C}$ em comparação as temperaturas registradas

pela câmera IR. Todos os dados são corrigidos quanto aos níveis de temperatura e irradiância. Foram utilizados um módulo fotovoltaico de silício Canadian Solar – 265W (silício) e um módulo fotovoltaico tecnologia filme fino (CdTe) First Solar 110W. Estes módulos são apresentados na Fig. 1.



Figura 1- Estações de monitoramento de sujidade instaladas no laboratório GREEN PUC Minas, em Belo Horizonte, Minas Gerais. Esquerda: tecnologia silício cristalino (módulo Canadian Solar 265W). Direita: tecnologia de filme fino telureto de cádmio (módulo First Solar 110W).

2.1 Caracterização do filme de papel

Para simular um módulo em operação submetido ao sombreamento não uniforme, gerado pela deposição de sujidade, foram utilizados filmes de papéis que funcionaram com comportamento similar da sujidade depositada sobre a superfície de um módulo. Para caracterização dos filmes de papéis, foi realizado um ensaio de transmitância utilizando-se o espectrofotômetro marca Shimadzu modelo UV-3600. Este equipamento é capaz de medir e comparar a quantidade de radiação eletromagnética transmitida através de uma amostra. O resultado da espectrofotometria é um gráfico de espectro que fornece informações de intensidade por comprimento de onda da fonte de luz, que é apresentado na Fig. 2. Para caracterização dos filmes foi utilizada uma faixa de comprimento de onda que compreende a região de ultravioleta até a região de infravermelho (250 a 1600 nm).

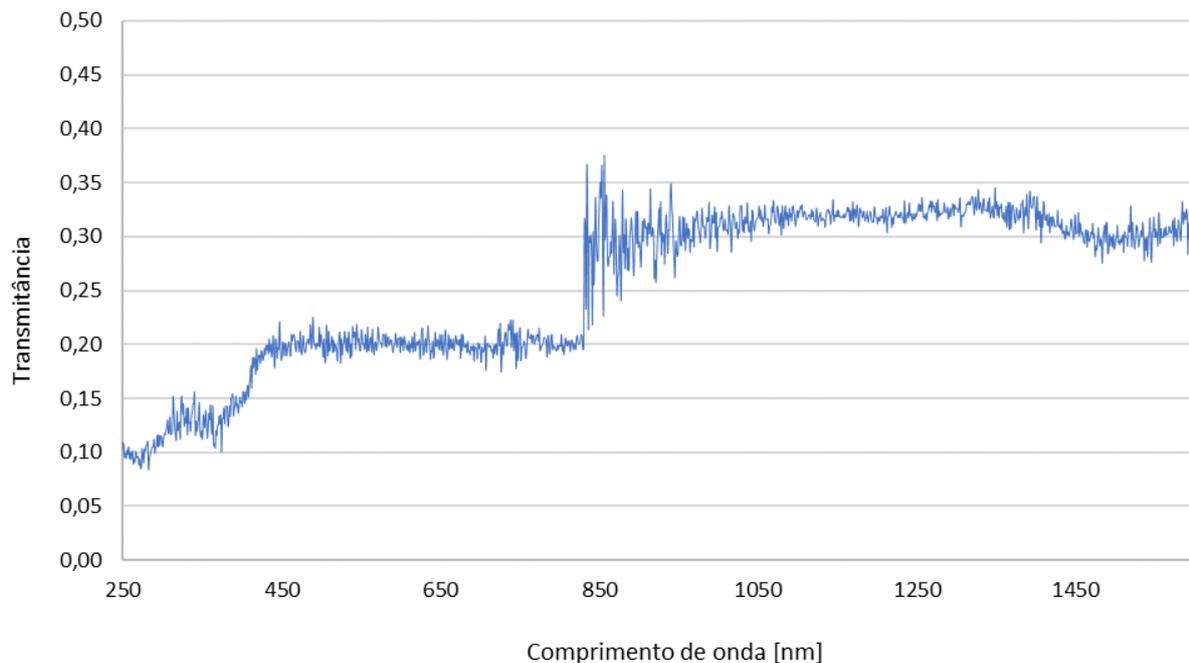


Figura 2- Valor de transmitância da amostra de papel para diferentes comprimentos de onda

2.2 Extração das perdas por “sujidade” nos módulos fotovoltaicos

A fim de quantificar as perdas de geração de energia elétrica em um módulo fotovoltaico submetido a diferentes padrões de deposição de sujidade foram medidas as curvas I-V para cada condição, com os parâmetros elétricos normalizados em relação a radiação solar e temperatura da célula.

A taxa de perda por sujidade foi calculada tomando-se como referência a potência do módulo no ponto de máxima potência ($SR_{P_{max}}$) para o módulo limpo livre de qualquer sujidade ou sombreamento e o módulo submetido aos diferentes padrões de deposição de sujidade ou sombreamento. A taxa de sujidade ($SR_{P_{max}}$) pode ser encontrada através da seguinte equação:

$$SR_{P_{max}} = \left(\frac{P_{max\text{sujo}}}{P_{max\text{limpo}}} \right) \quad (1)$$

O outro parâmetro importante para se analisar é o fator de preenchimento, também conhecido como *fill factor* (FF), que é obtido através da razão entre a potência máxima e o produto da tensão de circuito aberto (V_{OC}) pela corrente de curto-circuito (I_{sc}), indicada pela Eq. (2). Quanto mais próximo de uma unidade, melhor é o desempenho do módulo.

$$FF = \frac{I_{max} V_{max}}{I_{sc} V_{oc}} \quad (2)$$

3. RESULTADOS

Após a análise dos resultados obtidos para as tecnologias silício cristalino, verificou-se que o módulo de silício cristalino devido ao arranjo de células conectadas em série apresentou impactos maiores quando submetido a diferentes padrões de sombreamento não uniforme. Para o módulo de silício ainda foram realizados testes depositando-se amostras de sujidade reais sobre a superfície do módulo. A Fig. 3 apresenta os diferentes padrões não uniformes de sombreamento aos quais o módulo de silício cristalino foi submetido.

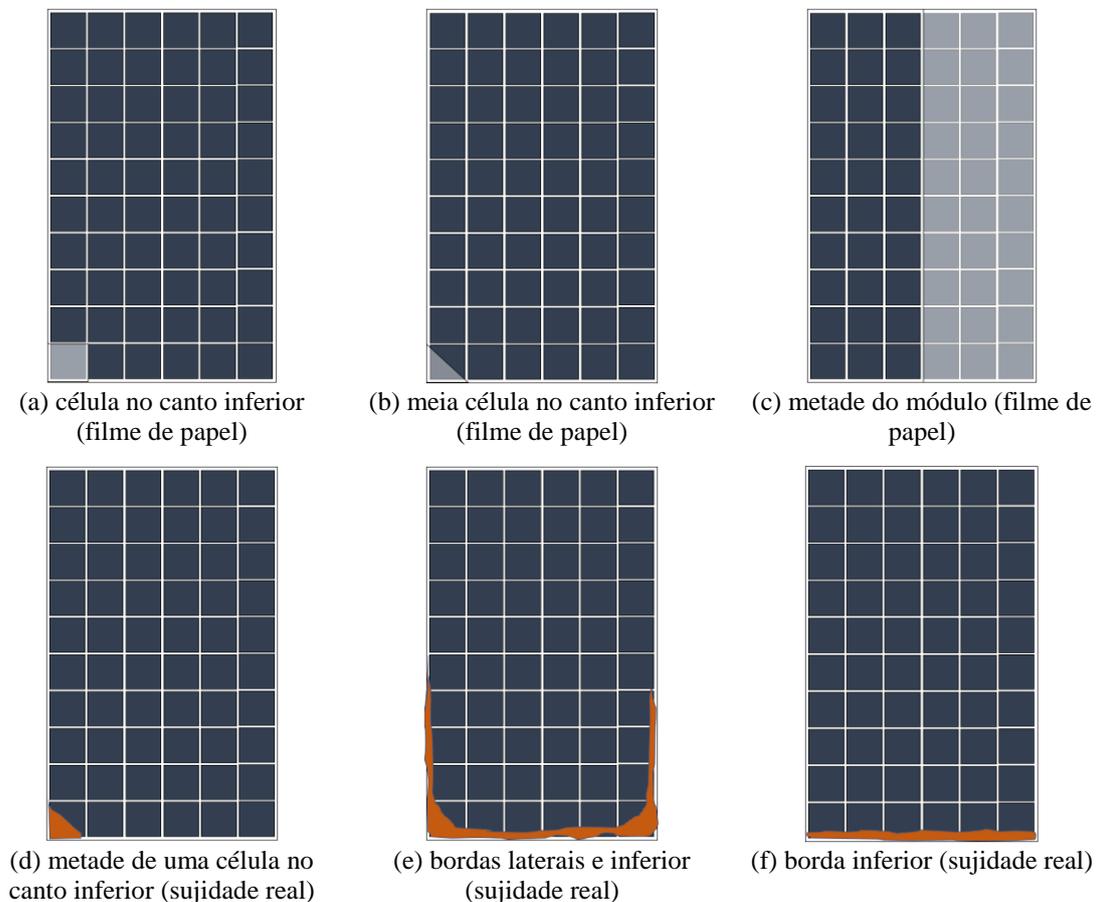


Figura 3- Diferentes padrões não uniformes de sombreamento ao qual o módulo de silício cristalino foi submetido.

A Fig. 4 apresenta as curvas I-V obtidas para cada condição descrita anteriormente para o módulo de silício cristalino. Verifica-se neste caso a atuação do diodo de *by pass*, fato evidenciado pela deformação da curva I-V original.

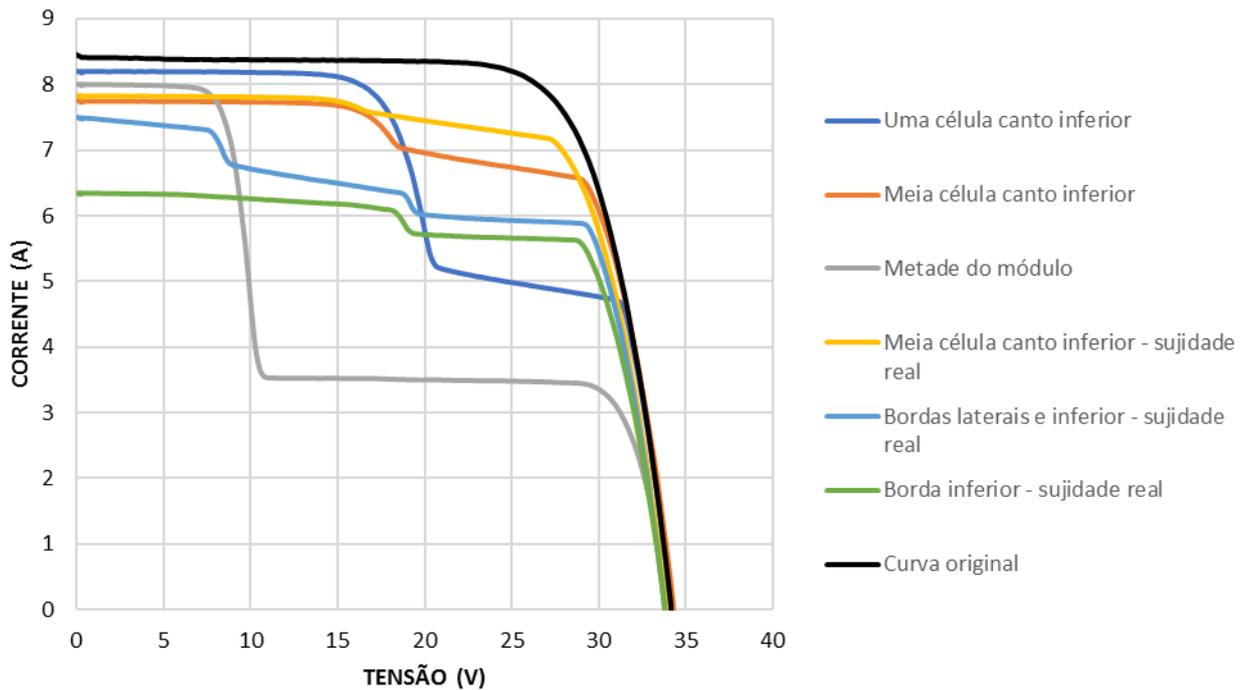


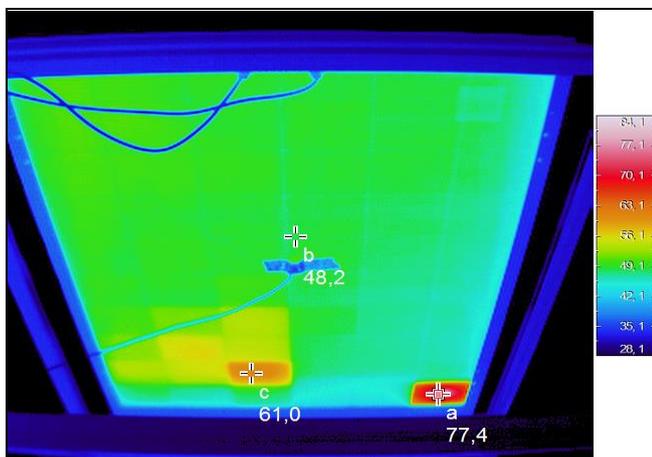
Figura 4- Resposta da curva I-V para diferentes padrões de deposição não uniforme sobre a superfície de um módulo de silício cristalino. A curva original do módulo, sem qualquer sombreamento, é representada pela linha de cor preta.

A deposição da sujidade reduz de forma significativa a absorção óptica do módulo fotovoltaico, fato este que gera uma área de sombreamento na célula solar. A célula ao ser sombreada atua como carga resistiva de alta impedância no sistema, e como consequência, se torna um ponto de temperatura mais elevada, fenômeno conhecido como ponto quente (“hot spot”). A célula, ao atingir temperaturas mais elevadas que as temperaturas de operação, se degrada de forma mais acelerada ao longo do tempo, diminuindo de forma significativa a eficiência e produção de energia do módulo fotovoltaico, podendo em casos mais graves, ser danificado de forma irreversível.

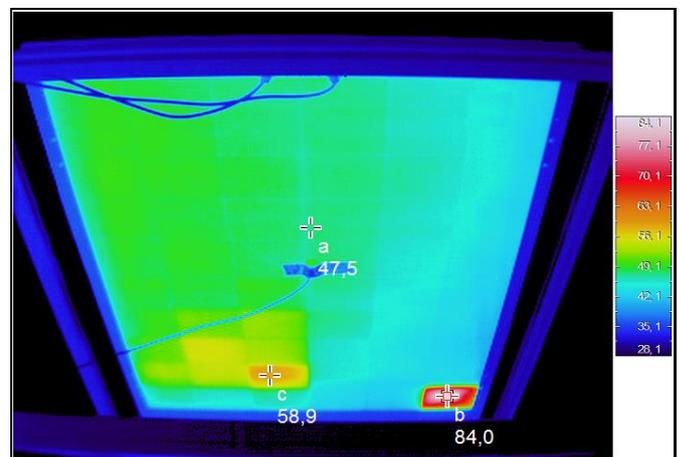
A Fig. 5 apresenta o mapeamento de temperaturas para cada condição não uniforme de sombreamento a qual o módulo de silício cristalino foi submetido. As temperaturas registradas com o auxílio do sensor RTD variaram entre $\pm 1^\circ\text{C}$ em comparação as temperaturas registradas pela câmera IR. Observou-se a presença de pontos quentes no módulo, que apresentaram temperaturas superiores a 30°C em comparação a temperatura média do módulo.

O módulo em questão possui 3 diodos *by pass*, e através da curva I-V e do mapeamento de temperatura da superfície traseira do módulo, conclui-se que o sombreamento que a sujidade depositada de forma não uniforme gera, além da perda de geração de energia elétrica, o aparecimento de células sobreaquecidas.

As temperaturas encontradas, acima de 90°C , superam o valor limite de temperatura de operação do módulo declarado pelo fabricante (85°C).



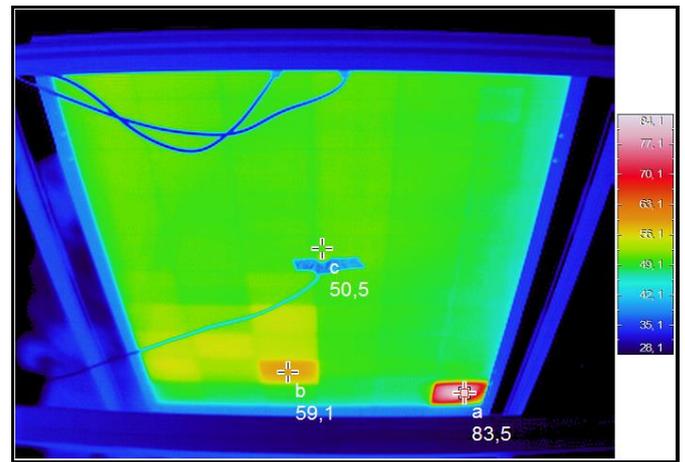
(a) célula no canto inferior (filme de papel)



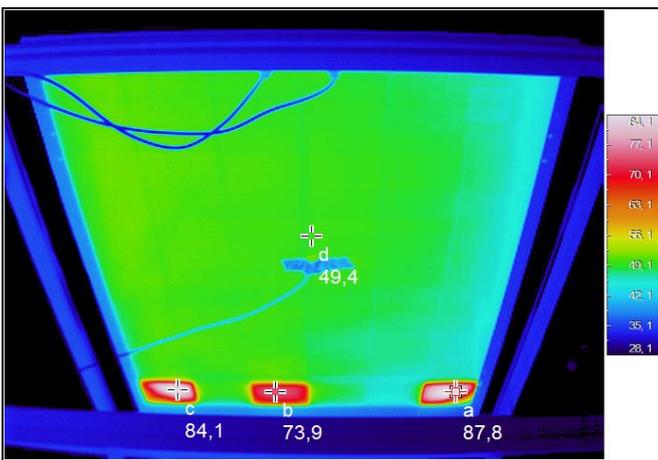
(b) meia célula no canto inferior (filme de papel)



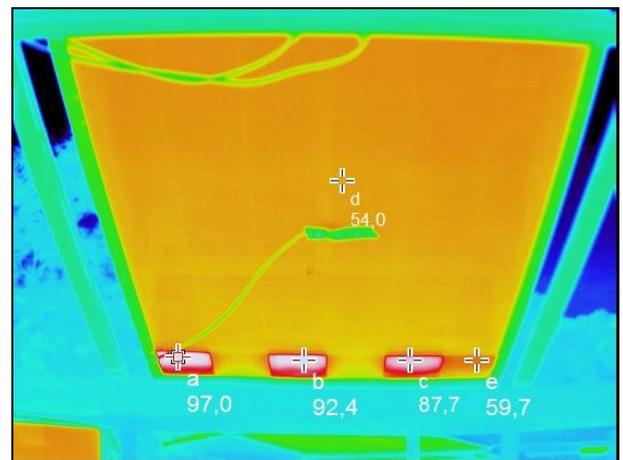
(c) metade do módulo (filme de papel)



(d) metade de uma célula no canto inferior (sujeidade real)



(e) bordas laterais e inferior (sujeidade real)



(f) borda inferior (sujeidade real)

Figura 5- Mapeamento de temperatura do módulo de silício cristalino para diferentes condições.

Para o módulo de telureto de cádmio foi realizado um procedimento similar, a fim de se obter as respostas de desempenho elétrico através da medição de curva I-V para cada condição e mapeamento térmico para análise de pontos quentes. A Fig. 6 apresenta os diferentes padrões não uniformes de sombreamento aos quais o módulo de telureto de cádmio foi submetido.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 6- Diferentes padrões não uniformes de sombreamento ao qual o módulo de telureto de cádmio foi submetido.

A Fig. 7 apresenta as curvas I-V obtidas para cada condição descrita anteriormente para o módulo de telureto de cádmio. Como neste módulo não há diodos de *by pass* não se verifica uma deformação na curva I-V de modo semelhante ao ocorrido com o módulo de silício cristalino.

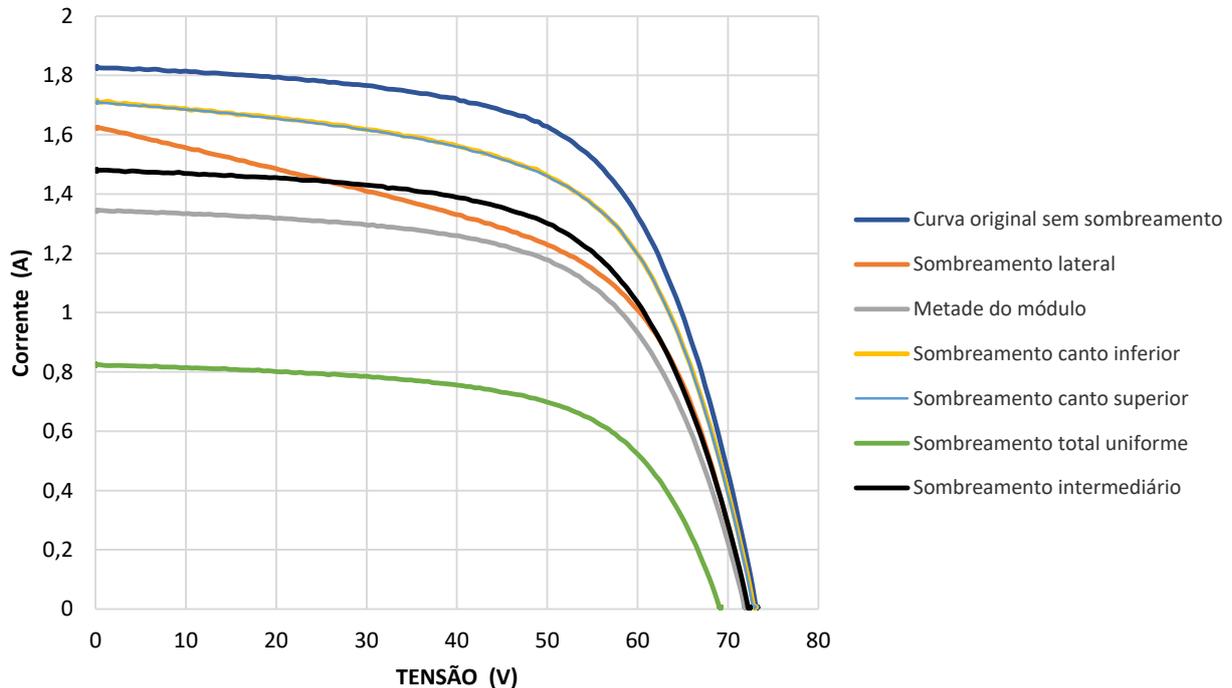
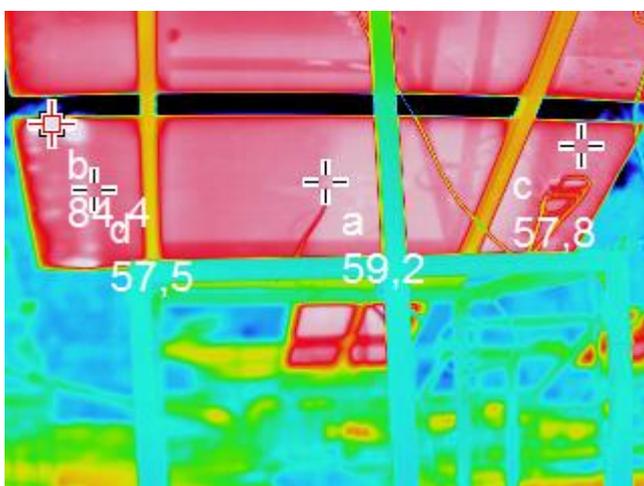


Figura 7- Resposta da curva I-V para diferentes padrões de deposição não uniforme sobre a superfície de um módulo de telureto de cádmio. A curva original do módulo, sem qualquer sombreamento, é representada pela linha de cor azul escuro.

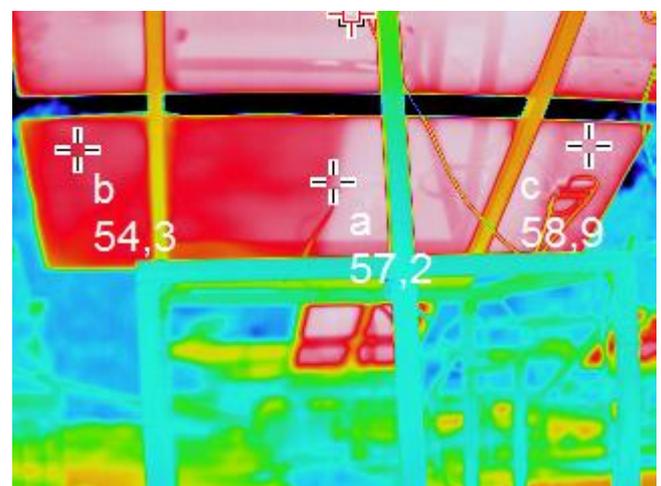
A partir da análise das curvas I-V constatou-se que o sombreamento reduziu de forma significativa a absorção óptica do módulo fotovoltaico. No caso deste módulo não se verificou pontos de temperatura mais elevada (ponto quente), exceto na condição de sombreamento lateral, em que foi observado uma diferença de temperatura superior a 20°C. As respostas da curva I-V para o sombreamento no canto inferior (linha de cor amarela) e no canto superior (linha de cor azul claro) foram iguais.

A Fig. 8 apresenta o mapeamento de temperaturas para cada condição não uniforme de sombreamento a qual o módulo de telureto de cádmio foi submetido.

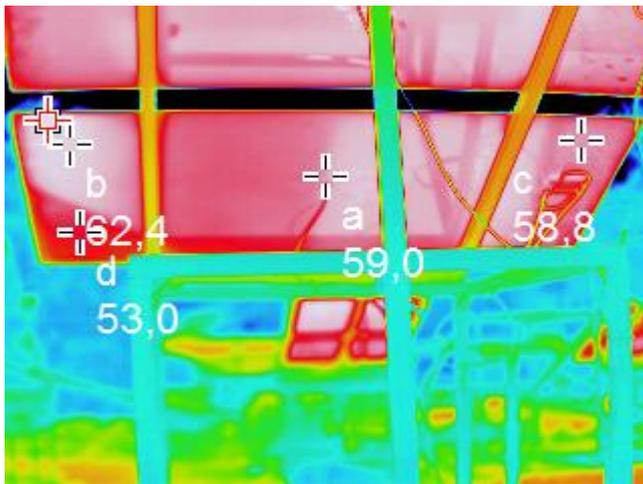
Como dito anteriormente, este módulo não possui diodos *by pass*, e através da curva I-V e do mapeamento de temperatura da superfície traseira do módulo, conclui-se que o sombreamento que a sujidade depositada de forma não uniforme gera, impacta na perda de geração de energia elétrica, porém não apresenta problemas de células sobre aquecidas, como ocorre com o módulo de silício cristalino.



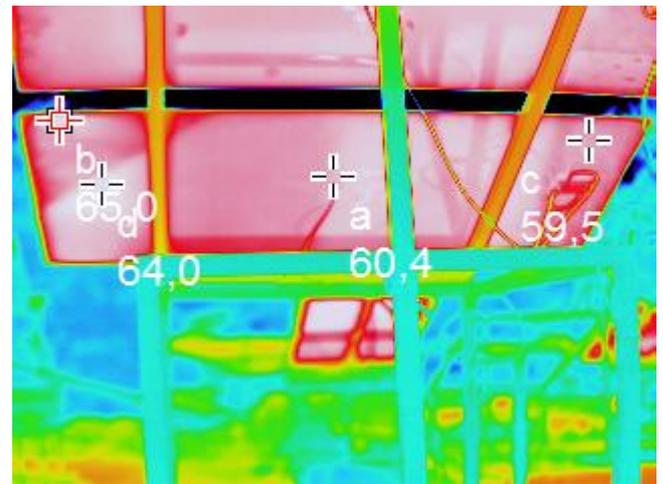
(a) Sombreamento lateral



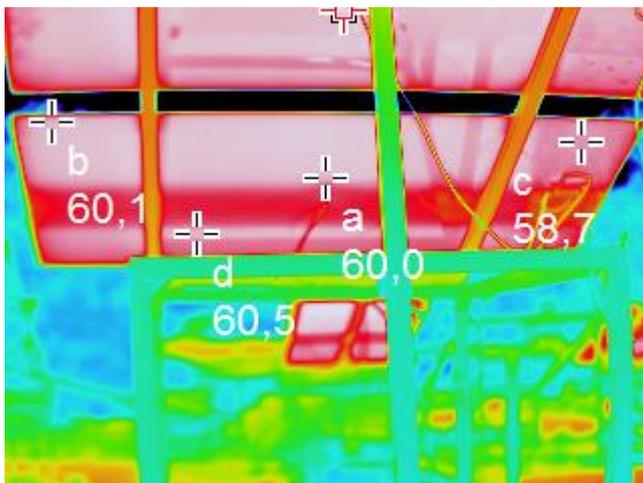
(b) Sombreamento metade do módulo



(c) Sombreamento canto inferior



(d) Sombreamento canto superior



(e) Sombreamento intermediário

Figura 8- Mapeamento de temperatura do módulo de telureto de cádmio para diferentes condições.

Conforme observado na Fig. 4 e Fig. 7, os parâmetros elétricos do módulo de silício cristalino são mais sensíveis ao acúmulo de sujeidade se comparados ao módulo de telureto de cádmio. O fator de preenchimento dos módulos de silício cristalino é extremamente comprometido pela atuação dos diodos de *by pass* que a fim de melhorar o desempenho do módulo, acabam tirando a produção de energia de uma série de células, impactando na diminuição do FF e incrementando a taxa de perda por sujeidade (*soiling ratio*).

Diante deste fato, é imprescindível avaliar não apenas a corrente de curto-circuito do módulo de silício cristalino, mas também o ponto de máxima potência. Na Fig. 4, verifica-se que a corrente de curto-circuito da curva azul escuro (condição de sujeidade depositada em uma célula no canto inferior do módulo) sofre uma leve queda, enquanto que o ponto de máxima potência se desloca bastante com a distorção na forma da curva, devido ao surgimento de um degrau ocasionado pela ação do diodo de *by-pass*. Este fenômeno não é observado no módulo de telureto de cádmio, conforme verificado na Fig. 7, pelo fato da inexistência de diodos *by-pass* neste módulo.

A construção física dos módulos de silício cristalino e de telureto de cádmio são muito diferentes. Enquanto o módulo de silício é composto por um arranjo de células conectadas em série, o módulo de telureto de cádmio apresenta uma estrutura na qual as partes ativas da célula são depositadas sobre um substrato de vidro. Na Fig. 5 são observados pontos de temperatura mais elevada, oriundos da atuação de células sombreadas que atuam como carga resistiva de alta impedância no sistema. Na Fig. 8, não é verificado o sobreaquecimento de regiões no módulo de telureto de cádmio, uma vez que não há um conjunto de células conectadas em série. Este fato esclarece a razão de não se observar pontos que atuam como carga resistiva de alta impedância, não sendo verificado pontos de temperatura mais elevada.

4. CONCLUSÃO

A célula de silício cristalino, ao atingir temperaturas mais elevadas que as temperaturas de operação, se degrada de forma mais acelerada ao longo do tempo, diminuindo de forma significativa a eficiência e produção de energia do módulo fotovoltaico, podendo em casos mais graves, ser danificado de forma irreversível.

Os resultados obtidos demonstraram que apesar da perda de energia gerada, a tecnologia de filme fino telureto de cádmio é menos sensível ao aumento de temperatura decorrido do sombreamento gerado pela deposição não uniforme

da sujidade, fato que comprova uma melhor performance desta tecnologia se comparada ao silício cristalino nas condições de deposição de sujidade não uniforme.

Outro ponto que favorece a performance nas condições de sujidade do módulo de filme fino telureto de cádmio tratado neste estudo, é o fato do mesmo não possuir uma caixa externa que proporciona o acúmulo de sujidade nas bordas, que podem gerar sombreamento e redução da energia gerada.

Conclui-se, portanto, a importância de se estudar o comportamento da curva I-V quando se deseja mensurar o impacto da deposição não uniforme sobre a superfície do módulo, e não apenas analisar a grandeza da corrente de curto-circuito, visto que o ponto de máxima potência é claramente deslocado ao longo da curva I-V na condição de operação sob deposição de sujidade não uniforme.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e ao laboratório GREEN PUC Minas e demais envolvidos pelo apoio ao desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Costa, S. C., Diniz, A. S. A. C., Kazmerski, L. L., 2016. Dust and Soiling Issues and Impacts Relating to Solar Systems: Literature Review Update for 2012-2015, *Renewable & Sustainable Energy Rev.* (2016).
- John, J. J., Warade, S., Tamizhmani, G., Kottantharayil, A., 2016. Study of soiling loss on photovoltaic modules with artificially deposited dust of different gravimetric densities and compositions, 42nd IEEE PVSC- New Orleans.
- Lorenzo, E., Moretón, R., Luque, I., 2013. Dust effects on PV array performance: In-field observations with non-uniform patterns, *Prog. in Photovoltaics* 22, 666-670.
- Zilles, R., Macedo, W. N., Galhardo, M. A. B., Oliveira, S. H. F., 2012. Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, São Paulo.
- Rao, A., Pillai, R., Mani, M., Ramamurthy, P., 2013. Influence of dust deposition on photovoltaic panel performance, 4th ICAER- 4th International Conference on Advances in Energy Research, Bombay.
- Maghami, M. R., Hizam, H., Gomes, C., Radzi, M. A., Rezadad, M. I., Hajjighorbani, S., 2016. Power loss due to soiling on solar panel: A review, *Renewable & Sustainable Energy Rev.*

INTERRELATIONSHIPS AMONG NON-UNIFORM SOILING DISTRIBUTIONS AND PV MODULE PERFORMANCE PARAMETERS FOR DIFFERENT TECHNOLOGIES

Abstract. *Soiling of PV modules is a growing concern because of the derating of energy output from solar installations. This problem has been observed in areas that have a high availability of solar radiation, which ironically present problems with dust accumulation in most cases. This paper examines the relationships between the different non-uniform soil distributions and the performance of photovoltaic modules of polycrystalline silicon and cadmium telluride technologies. These non-uniform accumulations not only cause the energy produced to decrease, but result in shading that can cause an increase in the heating of the area, forming hot spots, which accelerate the degradation of the module. This paper evaluates the effects of different non-uniform soil patterns on the characteristics of the I-V curve, documenting changes in the shape of these characteristics. These studies are carried out in modules of crystalline Si technology and modules of thin film without frame of CdTe. Non-uniform distributions are also related to temperature distributions, which were evaluated with the help of temperature mapping through IR cameras. Hot spots with a temperature rise of more than 30°C relative to the rest of the module are shown operating under normal solar radiation conditions.*

Key words: *Soiling, Non uniform, Impact*