

ESTIMATIVA DA TAXA DE SUJIDADE EM MÓDULOS FOTVOLTAICOS UTILIZANDO DADOS DE DENSIDADE GRAVIMÉTRICA

Túlio Pinheiro Duarte (PUC MG) - tulio-p.duarte@outlook.com

Suellen Caroline Silva Costa (PUC Minas) - suellencscosta@gmail.com

Antonia Sonia Alves Cardoso Diniz (GREEN - PUCMINAS) - asacd2012@gmail.com

Lawrence Lee Kazmerski (NREL/Univ. Colorado) - solarpvkaz@gmail.com

Resumo:

A deposição de sujidades tem impacto significativo no desempenho de módulos fotovoltaicos (FV). Visando aprimorar técnicas que possam contribuir para o maior rendimento da tecnologia FV, esforços têm sido realizados para identificação e quantificação das perdas por sujidades em diferentes regiões sobre influência de diferentes zonas climáticas. Normalmente, esta análise baseia-se na utilização de parâmetros elétricos e térmicos medidos em estações de monitoramento de sujidade, comparados com variáveis meteorológicas medidas na mesma localidade. Porém, novas técnicas têm sido estudadas como alternativa para quantificar as perdas de desempenho de módulos FV devido a deposição de sujidade, tornando, em algumas vezes, o processo menos dispendioso e mais prático. Neste cenário, este trabalho tem como objetivo apresentar uma metodologia para quantificar as taxas de sujidade para módulos fotovoltaicos de filme fino e silício cristalino, considerando dados de densidade gravimétrica. Para isso, cupons foram colocados em uma área externa próxima as estações de sujidade instaladas no laboratório GREEN PUC Minas em Belo Horizonte/MG. A densidade gravimétrica da sujidade (g/m^2) foi medida em intervalos de sete dias, e a taxa de sujidade (SRatio) foi estimada usando o modelo proposto por Coello e Boyle (2018) e Hegazy (2001). Essa taxa de sujidade (SRatio) estimada foi comparada com a taxa de sujidade identificada a partir de dados coletados das estações de monitoramento de sujidade disponibilizada por Costa (2018). Além disso, imagens foram tiradas dos cupons utilizando microscópio de sujidade, seguindo metodologia Figgis (2017).

Palavras-chave: *Módulos Fotovoltaicos, Taxa de Sujidade, Densidade Gravimétrica*

Área temática: *Conversão Fotovoltaica*

Subárea temática: *Controle e monitoramento de sistemas fotovoltaicos*

ESTIMATIVA DA TAXA DE SUJIDADE EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS UTILIZANDO DADOS DE DENSIDADE GRAVIMÉTRICA

Tulio Duarte – tulio-p.duarte@outlook.com

Suellen Caroline Silva Costa – suellencscosta@gmail.com

Antônia Sônia Alves Cardoso Diniz – asacd@pucminas.br

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Pós-Graduação Engenharia Mecânica/GREEN PUC Minas, Brasil

Lawrence Lee Kazmerski – solarpvkaz@gmail.com

Universidade do Colorado, National Renewable Energy Laboratory (NREL), EUA

Resumo. A deposição de sujidades tem impacto significativo no desempenho de módulos fotovoltaicos (FV). Visando aprimorar técnicas que possam contribuir para o maior rendimento da tecnologia FV, esforços têm sido realizados para identificação e quantificação das perdas por sujidades em diferentes regiões sobre influência de diferentes zonas climáticas. Normalmente, esta análise baseia-se na utilização de parâmetros elétricos e térmicos medidos em estações de monitoramento de sujidade, comparados com variáveis meteorológicas medidas na mesma localidade. Porém, novas técnicas têm sido estudadas como alternativa para quantificar as perdas de desempenho de módulos FV devido a deposição de sujidade, tornando, em algumas vezes, o processo menos dispendioso e mais prático. Neste cenário, este trabalho tem como objetivo apresentar uma metodologia para quantificar as taxas de sujidade para módulos fotovoltaicos de filme fino e silício cristalino, considerando dados de densidade gravimétrica. Para isso, cupons foram colocados em uma área externa próxima as estações de sujidade instaladas no laboratório GREEN PUC Minas em Belo Horizonte/MG. A densidade gravimétrica da sujidade (g/m^2) foi medida em intervalos de sete dias, e a taxa de sujidade (SRatio) foi estimada usando o modelo proposto por Coello e Boyle (2018) e Hegazy (2001). Essa taxa de sujidade (SRatio) estimada foi comparada com a taxa de sujidade identificada a partir de dados coletados das estações de monitoramento de sujidade disponibilizada por Costa (2018). Além disso, imagens foram tiradas dos cupons utilizando microscopia de sujidade, seguindo metodologia Figgis (2017).

Palavras-chave: Módulos Fotovoltaicos, Taxa de Sujidade, Densidade Gravimétrica.

1. INTRODUÇÃO

A irradiância solar que incide sobre o módulo fotovoltaico é maior do que a irradiância solar absorvida pelo mesmo. As principais causas de perdas referentes à diferença entre a irradiância incidente e absorvida pelo módulo se devem ao acúmulo de sujidades na superfície, perdas por reflexão e por absorção devido ao material de revestimento da superfície dos módulos (Cano e outros, 2014). Costa (2011) identificou perdas em torno de 30% do rendimento de um sistema fotovoltaico instalado em Belo Horizonte, através da comparação da energia produzida antes e após a ocorrência de precipitação que promoveu a limpeza natural dos módulos FV, eliminando a sujidade acumulada. A redução da parcela da irradiância solar absorvida pode ser ainda mais agravante em regiões com longos períodos secos e com elevado índice de material particulado, ou seja, com elevada poluição do ar, como registrado nas grandes áreas urbanas onde os sistemas fotovoltaicos têm se tornado cada vez mais comuns em instalações residenciais como geração distribuída.

Al-Sabounchi, Yalyali e Al-Thani (2013) avaliaram o desempenho de um sistema fotovoltaico interligado à rede elétrica com uma capacidade instalada de 36 kWp, com módulos de silício policristalino, instalado em Abu Dhabi, nos Emirados Árabes. Os autores observaram que a maior redução na produção de energia foi registrada ao longo de julho, estação de verão, atingindo em torno de 27%, devido à sua elevada média diária total de partículas de poeira em suspensão no ar (TSP), atingindo $860 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Já os meses de março e maio, compreendido no período da primavera, apresentaram $507 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $650 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de TSP, respectivamente.

Boyle, Flinchpaugh e Hannigan (2013) fizeram um estudo para avaliar a influência da massa das partículas acumuladas e perdas de transmissão em placas de vidro, semelhante aos vidros utilizados em módulos fotovoltaicos, instalados na região do Colorado, nos Estados Unidos. A análise dos dados mostrou que, para cada $1 \text{ g}/\text{m}^2$ de poeira que se acumulou sobre a superfície dos módulos fotovoltaicos, resultou em uma redução de 5,8% na transmissão de radiação.

Klugmann-Radziemska (2015) avaliou a redução da produção de energia elétrica em módulos fotovoltaicos cristalinos instalados na Polônia, devido ao acúmulo de sujidades em sua superfície, sendo observado uma perda de eficiência com relação linear, com a densidade da deposição de sujidade (g/m^2).

Como registrado em diferentes revisões bibliográficas, a densidade gravimétrica está relacionada diretamente ao acúmulo de deposição de sujidades. Tendo em vista este fato, Coelho e Boyle (2018) desenvolveram um modelo matemático para prever as perdas por sujidade em arranjos fotovoltaicos. Para isso, os autores utilizaram dados de material particulado, inclinação do módulo fotovoltaico, incluindo se há rastreamento ou se é eixo fixo, e dados de precipitação.

A taxa de sujidade (*SRatio*) foi definida através da relação com o total de massa acumulada, obtido por consideração dos dados de concentração de material particulado em suspensão no ar e de deposição e velocidade da sedimentação em função do tempo e o ângulo de inclinação do gerador fotovoltaico. Os resultados obtidos no modelo, comparados com dados experimentais, indicaram bom desempenho para previsão das perdas por sujidade e demonstraram forte dependência quanto à frequência e magnitude da precipitação.

Seguindo este cenário, este trabalho tem como objetivo apresentar uma metodologia para quantificar a densidade gravimétrica medida através da pesagem de cupons instalados na cidade de Belo Horizonte/MG, sendo esta densidade utilizada como dados de entrada para o modelo de Coello e Boyle (2018) e Hegazy (2001), obtendo a taxa de sujidade estimada para a localidade. Essa taxa de sujidade estimada é comparada com a taxa medida em estações de monitoramento de sujidade indicada por Costa (2018). Além disso, imagens dos cupons serão apresentadas indicando a evolução da deposição da sujidade obtidas através da utilização de um microscópio. Este trabalho visa apresentar uma metodologia alternativa para determinação da taxa de sujidade para módulos fotovoltaicos sem necessariamente depender da medição de parâmetros elétricos e térmicos.

2. METODOLOGIA

Este artigo apresenta uma metodologia para estimar a taxa de sujidade (*SRatio*) utilizando dados medidos de densidade gravimétrica, obtidos a partir da pesagem de cupons posicionados próximos as estações de monitoramento de sujidade instaladas no Grupo de Estudos em Energia (GREEN – PUC Minas) em Belo Horizonte/MG (19,92° S, 43,99° W). Para isso, amostras de vidro de módulo com área de superfície igual a 0,0121 m², foram expostas as condições ambientais contínuas (durante períodos secos), mantidas em uma superfície plana maior, com uma inclinação fixa para a região, de 20 ° ($\beta = \phi$). Cada amostra foi inicialmente pesada, marcando o dia zero do experimento, dessa forma, o peso das amostras se tornou conhecido, permitindo identificar a densidade gravimétrica através do processo de pesagem. Em seguida, as amostras foram posicionadas na superfície para deposição natural de sujidades.

A cada intervalo de 7 dias, as amostras foram pesadas, utilizando uma balança de precisão Shimadzu, modelo AUY220. As condições de pesagem foram mantidas constantes, sendo a mesma balança utilizada em todas as medições, e a temperatura e a umidade do local foram mantidas controladas nos mesmos níveis. Foram realizadas três medições de pesagem para cada amostra. O peso das amostras foi definido como resultado da média dessas três medições. Os valores obtidos das pesagens foram usados para definir a densidade gravimétrica (ω), obtida pela divisão dessa média de peso pela área da superfície.

Os valores de densidade gravimétrica foram utilizados como dados de entrada para definir a taxa de sujidade (*SRatio*) a partir da metodologia proposta por Coello e Boyle (2018) e Hegazy (2001). Neste caso, a perda de transmitância é correlacionada com a densidade gravimétrica através da equação (1):

$$\left(1 - \frac{\tau}{\tau_{limpo}}\right)\% = 34,37 \operatorname{erf}(0,17 \omega^{0,8473}) \quad (1)$$

Onde τ/τ_{limpo} refere-se a perda de transmitância, ω é a densidade gravimétrica dada em (g/m²) e erf é a função de erro de Gauss. A perda de transmitância varia de 0 a 100%, sendo que, para condições ideais de operação de um módulo fotovoltaico, a perda de transmitância deve ser igual a 0%, enquanto a taxa de sujidade será igual a 1 ou 100% (condição de ausência de deposição de sujidade). Assim, a taxa de sujidade pode ser obtida subtraindo uma condição ideal (*SRatio* = 100%) pela perda de transmitância (Hegazy, 2001):

$$(SRatio)\% = 100\% - 34,37 \operatorname{erf}(0,17 \omega^{0,8473}) \quad (2)$$

Os valores de taxa de sujidade (*SRatio*) estimados usando a Eq. (2) foram comparados com os dados de *SRatio* obtidos na análise dos parâmetros elétricos e térmicos provenientes das estações monitoramento de sujidade instalada na mesma localidade das amostras. Os dados de *SRatio* extraídos das estações foram determinados por Costa (2018), através da relação entre parâmetros elétricos (I_{sc} e P_{max}) reais e teóricos, ou seja, relação entre parâmetros elétricos medidos no módulo de referência mantido sempre limpo e medido no módulo deixado à deposição natural de sujidades, conforme indicado nas Eq. (3) e (4).

$$SR_{I_{sc}} = \left(\frac{I_{sc_{sujo}}}{I_{sc_{limpo}}}\right) \quad (3)$$

$$SR_{P_{max}} = \left(\frac{P_{max_{sujo}}}{P_{max_{limpo}}}\right) \quad (4)$$

Os valores de absorvância óptica da amostra foram comparados no instante inicial, com a deposição encontrada após intervalo de 49 dias consecutivos com medição feita a partir de equipamento de espectrofotômetro de UV-Visível da marca Shimadzu.

Além disso, durante os processos de medição da massa das amostras, imagens da superfície do vidro foram registradas para avaliar a evolução das partículas de sujeira, para isso, o microscópio Celestron, modelo Pro 44308, foi utilizado, possuindo uma ampliação de 200x. Esse microscópio fornece medição direta dos níveis de sujeira acumulados e as representações morfológicas correspondentes.

3. RESULTADOS

A densidade gravimétrica foi medida determinando o peso das amostras de vidro deixadas para deposição natural de partículas de sujeiras. Os dados de densidade (ω) foram utilizados como dados de entrada na Eq. (1) e (2), possibilitando estimar os valores de *SRatio* e de perdas de transmitância devido a deposição de sujeiras sobre as amostras de vidro. A Tab. 1 apresenta os valores obtidos nos períodos analisados para o local de experimento na cidade de Belo Horizonte/MG referentes as amostras de vidro.

Tabela 1 – Dados referentes, coletados em um período de 75 dias consecutivos

Exposição [Dia]	Δ [%]	Δ [%/dia]	ω [g/m ²]	<i>SRatio</i> [%]	τ [%]
0	0,0000	0,0000	0,0000	100,0000	0,0000
7	0,1100	0,0157	0,2583	97,9080	2,0920
12	0,1740	0,0145	0,4174	96,8622	3,1378
19	0,2930	0,0154	0,7011	95,1457	4,8543
21	0,0800	0,0038	0,2872	97,7118	2,2882
28	0,0130	0,0005	0,4215	96,8362	3,1638
35	0,0500	0,0014	0,3788	97,1089	2,8911
49	1,1030	0,0225	2,6281	85,7585	14,2415
61	0,8950	0,0147	2,1322	87,8992	12,1008
68	1,0090	0,0148	2,4050	86,7014	13,2986
75	1,0800	0,0144	2,5744	85,9825	14,0175

Na Fig.1 é apresentada a comparação entre os resultados quanto a relação entre *SRatio* e densidade gravimétrica obtidos neste trabalho e os encontrados por Costa (2018). Costa (2018) utilizou a mesma metodologia proposta por Coello e Boyle (2018) e Hegazy (2001) para determinar a densidade gravimétrica utilizando como dado de entrada, os valores medidos de *SRatio* nas estações de sujeira. A Fig. 2, permite comparar:

- Abordagem I: Densidade gravimétrica estimada utilizando dados de *SRatio* medidos de estações de monitoramento de sujeira instaladas GREEN PUC Minas, disponibilizados por Costa (2018);
- Abordagem II: *SRatio* estimado utilizando dados de densidade gravimétrica medida através da pesagem de amostras de vidro posicionadas no GREEN PUC Minas.

Os resultados obtidos da comparação entre as duas abordagens mostraram concordância relevante para esse experimento em Belo Horizonte/MG. Pode ser observado que a densidade gravimétrica depositada no módulo fotovoltaico aumenta, enquanto a taxa de sujeira diminui, indicando perdas no desempenho do módulo. Esses resultados mostram níveis de deposição de sujeira em torno de 3,0 g/m² ao final do período seco de 85 dias. A relação entre densidade gravimétrica medida e *SRatio* estimado, indicados pelos pontos em azul, mostrando coerência com os valores de *SRatio* medidos, indicados pela curva em vermelho. Vale ressaltar, que o experimento foi conduzido em uma região que está longe de rotas de tráfego, ou seja, longe de regiões onde pode haver um alto nível de fuligem ou outras emissões de combustível resultantes da combustão do veículo. A média medida PM_{2,5} e PM₁₀ para o período analisado foi de 11,45 µg/m³ e 12,42 µg/m³, respectivamente, obtidos através da medição de material particulado utilizando sensor de qualidade do ar instalado no mesmo local. É possível ver que o uso de *SRatio* medido ou densidade gravimétrica medida utilizando a eq.(2), a partir da perspectiva da influência da sujeira nos valores de potência de saída dos módulos, permite a convergência dos resultados, validando as duas metodologias.

É importante mencionar que os valores de *SRatio*, utilizados nessa validação, provenientes das estações de sujeira, referem-se a dados obtidos para a tecnologia de silício cristalino. A taxa de sujeira referente a tecnologia de telureto de cádmio é, normalmente, maior se comparado com a tecnologia de silício cristalino, devido a diferença quanto a resposta espectral.

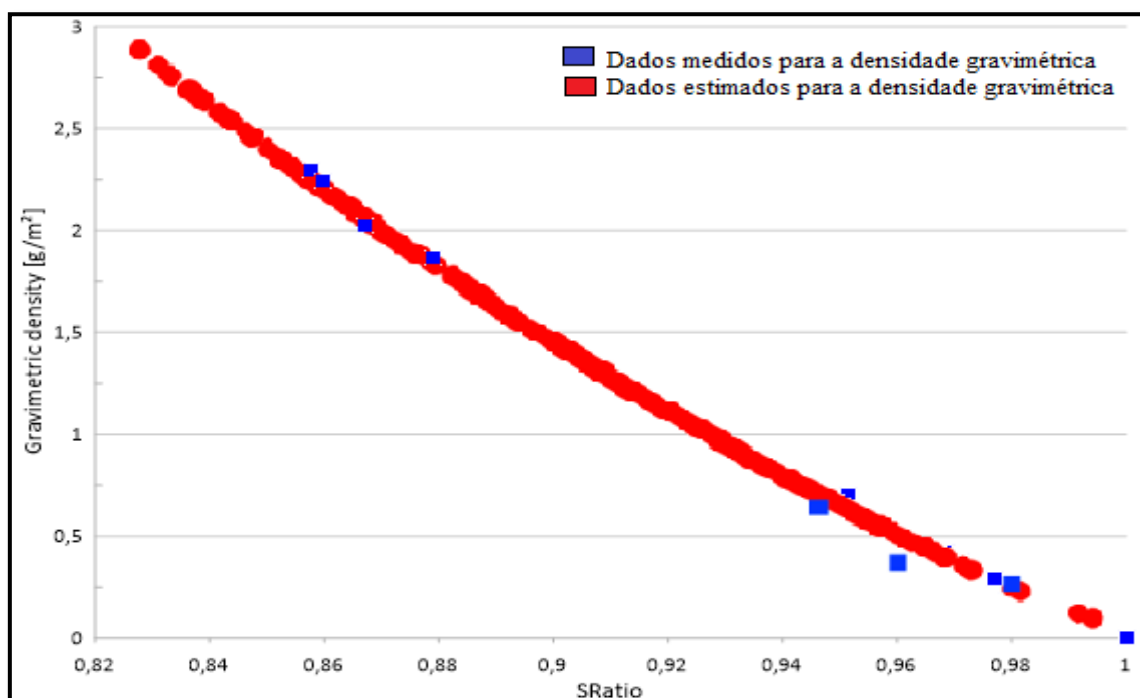


Figura 1 – Comparação entre relação SRatio e densidade gravimétrica medida e estimada para a cidade de Belo Horizonte/MG. Em vermelho é representada a densidade gravimétrica estimada usando SRatio medido em estações de sujidade, e em azul é indicado SRatio estimado considerando dados de densidade gravimétrica medidos.

A sujidade impacta mais severamente menores comprimentos de onda, dessa forma, as tecnologias fotovoltaicas, como silício amorfo e de CdTe sofrem maiores perdas de desempenho devido a deposição de sujidades do que os de tecnologia de silício cristalino e CIGS, pois os primeiros possuem uma faixa de resposta espectral entre 300 e 800 nm, enquanto o c-Si e CIGS esta faixa varia entre 400 e 1100 nm (Qasem et al., 2014). A análise do comportamento da absorvância realizada nas amostras de vidro, utilizadas no experimento, comprova o impacto da sujidade em comprimento de onda menores. É possível observar na Fig. 2 que a absorvância medida na amostra de vidro exposta por 49 dias em ambiente externo para deposição sujidade natural, indicou oscilações resultantes do efeito da sujidade entre os comprimentos de onda de 350 a 600nm.

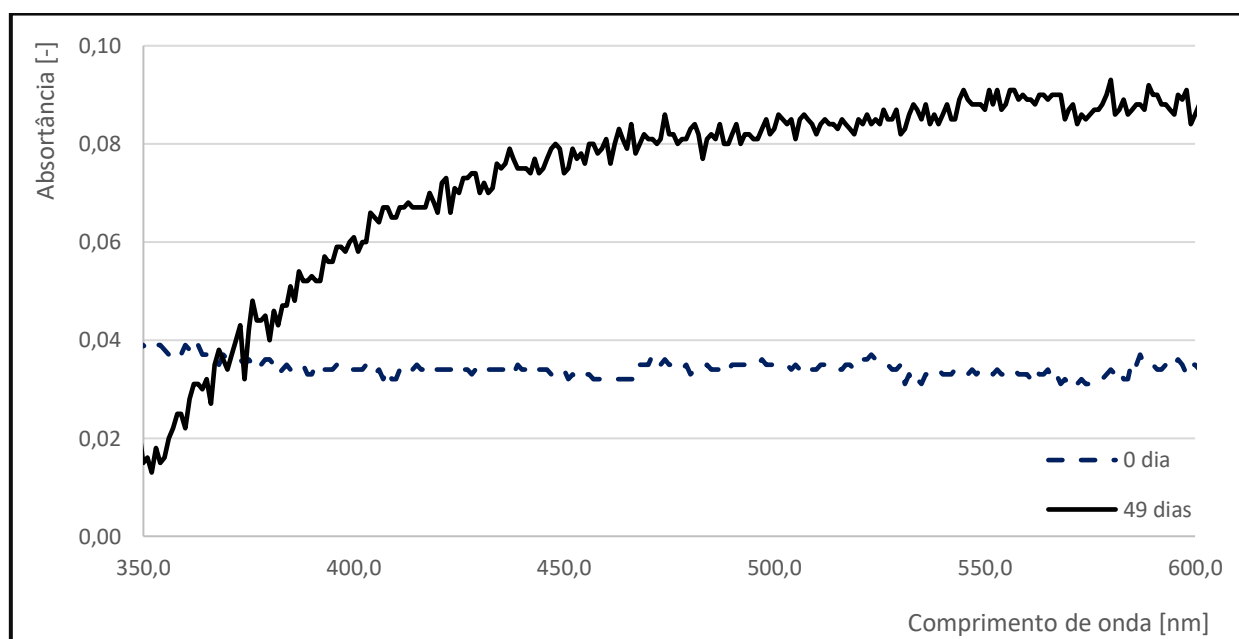


Figura 2 – Comportamento da absorvância medida em amostras de vidro em relação a deposição de sujidade após 49 dias de exposição “outdoor” em Belo Horizonte/MG

Em paralelo ao processo de pesagem das amostras, imagens das superfícies dos vidros expostos foram registradas

utilizando um microscópio, sendo a evolução da deposição de sujidade para diferentes dias de exposição apresentada na Fig. 3.

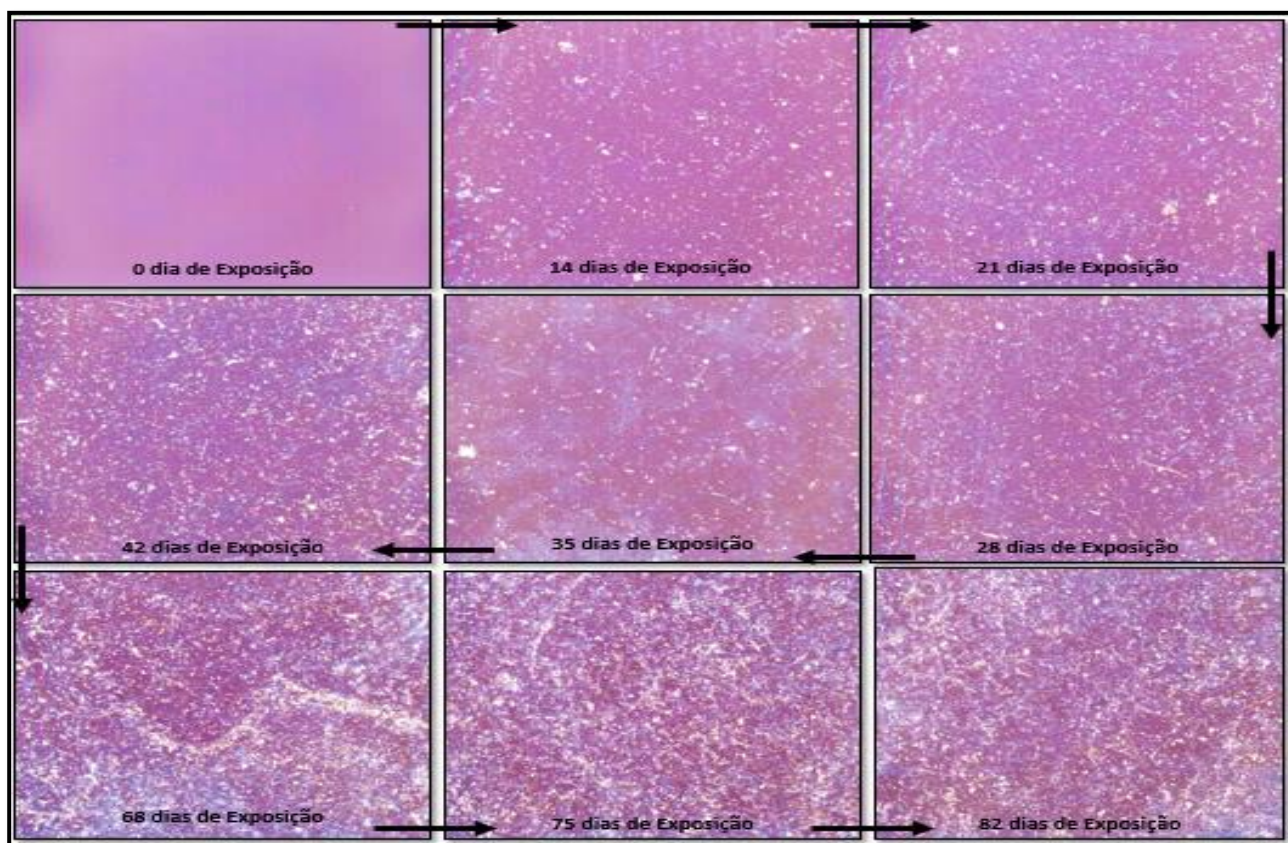


Figura 3 – Evolução da deposição de sujidades em amostras de vidro expostas em Belo Horizonte/MG

A sequência de imagens indicada na Fig. 3 mostra o aumento do material particulado (PM) na superfície da amostra, com predominância de pequenas partículas, até 10 μm , e distribuição uniforme. A acumulação resulta em menos transmissão da luz solar incidente. O efeito da sujidade combinada à alta umidade do meio facilita para que maiores camadas de adesão sejam formadas, sendo mais difícil a remoção do material sem uma atmosfera facilitadora, como visto com a própria água, e favorece o aglomerado de pequenas partículas, aumentando o impacto na transmitância da amostra, prevista por Figgis et al. [4]

4. CONCLUSÃO

Este estudo apresenta os resultados obtidos da estimativa da taxa de sujidade ($SRatio$) utilizando dados medidos de densidade gravimétrica da sujidade. Para isso, amostras de vidro foram expostas durante períodos secos no GREEN PUC Minas, em Belo Horizonte/MG, na mesma localidade onde estão instaladas estações de monitoramento de sujidade. Os dados coletados de densidade gravimétrica foram utilizados para estimar a taxa de sujidade, seguindo metodologia proposta por Coello e Boyle (2018) e Hegazy (2001). Essa mesma metodologia foi utilizada por Costa (2018) para estimar dados de densidade gravimétrica considerando valores de $SRatio$ medido nas estações de monitoramento de sujidade instaladas no GREEN PUC Minas. A comparação entre as duas abordagens indicou relevante concordância para tecnologias de silício cristalino. Estes resultados mostram uma alternativa para estimar as perdas de desempenho de módulos fotovoltaicos de silício cristalino utilizando dados medidos de densidade gravimétrica, o que tornaria o processo menos dispendioso. Além disso, foi comprovado através da análise da absorvância da amostra de vidro, exposta durante 49 dias às condições externas, que a sujidade tem maior impacto em menores comprimentos de onda, mais precisamente entre os comprimentos de radiação solar entre 350 e 600nm.

Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e a RASEI/CU (*Renewable and Sustainable Energy Institute/University of Colorado*) pelo apoio ao desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Al-Sabounchi, A. M.; Yalyali, S. A.; Al-Thani, H. A. Design and performance evaluation of a photovoltaic gri-connected system in hot weather conditions. *Renewable Energy*, v. 53, p. 71 – 78, 2013.
- Boyle, L.; Flinchpaugh, H.; Hannigan, M. Impact of natural soiling on the transmission of PV cover plates. 2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), p. 3276 – 3278, 2013.
- Cano, J.; John, J. J.; Tatapudi, S.; Tamizhmani, G. Effect of tilt angle on soiling of photovoltaic modules. 2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), p. 3174 – 3176, 2014.
- Coello, M. and Boyle, L. Simple model for predicting time series soiling of photovoltaic panels. World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Hawaii, 2018. Also, IEEE JPV (2019) in-press.
- Costa, S. C. S. Avaliação do potencial dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica com geradores de diversas tecnologias. 2011. 82 f. Projeto (Graduação). Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – Curso Engenharia de Energia, Belo Horizonte, Minas Gerais.
- Costa, S. C. S. Estudo abrangente do efeito da sujidade no desempenho de módulos e sistemas fotovoltaicos. 2018. 156 f. Tese (Doutorado). Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, Minas Gerais.
- Figgis, B.; Ennaoui, A.; Guo, B.; Javed, W., and Chen, E. “Outdoor soiling microscope for measuring particle deposition and resuspension, *Solar Energy*, v.137, 158-164 (2017).
- Hegazy, A. A. Effect of Dust Accumulation on Solar Transmittance through Glass Covers of Plate-Type Collectors. *Renewable Energy*, v. 22, p. 525-540, 2001.
- Klugmann-Radziemska, E. Degradation of electrical performance of a crystalline photovoltaic module due to dust deposition in northern Poland. *Renewable Energy*, v. 78, p. 418 – 426, 2015.
- Qasem, H., Thomas R. Betts, Harald Müllejans, Hassan AlBusairi, and Ralph Gottschalg (2014). Dust-induced shading on photovoltaic modules. *Prog. in Photovoltaics* 22, 218-226 (2014).

EVALUATION OF SOILING RATIO IN PHOTOVOLTAIC MODULES USING GRAVIMETRIC DENSITY DATA

Abstract. *Dirt deposition has a significant impact on PV module performance. In order to improve techniques that can contribute to the higher yield of PV technology, efforts have been made to identify and quantify the soiling loss in different regions that are under different climate zones. Normally, these analyzes are based on the use of electrical and thermal parameters, measured on the soiling monitoring stations and compared with meteorological variables measured at the same location. However, new techniques have been studied as an alternative to quantify PV module performance losses due to particulate material, deposited on the surfaces. This may, for some cases, make the process less expensive and more practical. In this scenario, this paper aims to present a methodology to quantify the soiling ratio for thin-film and crystalline silicon photovoltaic modules, considering gravimetric density data. To such end, coupons were placed in an outdoor area, near at the soiling stations installed in the laboratory of GREEN – PUC Minas, in Belo Horizonte/MG. The gravimetric density (g/m^2) were measured at seven-days intervals, while the soiling ratio (SRatio) were estimated using the model, proposed by Hegazy (2001) and Coello and Boyle (2018). These estimated soiling ratio (SRatio) were compared to the soiling ratio (SRatio) identified from the data collected from the soiling stations, provided by Costa (2018). In addition to that, imagens were taken of the coupons using a microscope, following the methodology proposed by Figgis (2017).*

Key words: *Photovoltaic Module, Soiling Rate, Gravimetric Density.*