

AVALIAÇÃO DA SUJIDADE EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS EM MINAS GERAIS, BRASIL

Suellen Caroline Silva Costa – suellencosta@gmail.com

Antonia Sônia A. Cardoso Diniz – asacd@pucminas.br

Vinicius Augusto Camatta Santana – viniciusbh@msn.com

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Grupo de Estudos em Energia, MG, Brasil

Matthew Muller – Matthew.Muller@nrel.gov

National Renewable Energy Laboratory (NREL), CO, Estados Unidos

Leonardo Micheli – leonardomicheli@mines.edu

Department of Chemistry, Colorado School of Mines, CO, Estados Unidos

Lawrence L. Kazmerski – solarpvkaz@gmail.com

Universidade do Colorado Boulder/National Renewable Energy Laboratory (NREL), CO, Estados Unidos

4 Conversão Fotovoltaica – 4.4 Controle e monitoramento de sistemas fotovoltaicos

Resumo. O desempenho de módulos fotovoltaicos vem sendo cada vez mais discutido, visando identificar medidas com o potencial de promover melhorias para a tecnologia. Diferentes variáveis influenciam no desempenho do fotovoltaico, como por exemplo as condições meteorológicas, mas outro fator vem sendo discutido em diferentes literaturas por possuir elevado impacto na eficiência dessa tecnologia: a sujidade. Nesse trabalho é apresentada a metodologia para quantificar a perda por sujidade em módulos fotovoltaicos de filme fino de telureto de cádmio (CdTe) e silício policristalino (p-Si) através de medições realizadas em estações de sujidade de monitoramento instaladas em Belo Horizonte, Minas Gerais. Os parâmetros elétricos medidos dos módulos fotovoltaicos são comparados com dados de precipitação coletados no mesmo local, com o objetivo de avaliar o comportamento da taxa de sujidade ao longo de períodos secos. Além disso, a taxa de sujidade para dados de corrente de curto-circuito (SR_{isc}) e de potência máxima (SR_{pmax}) dos módulos foram avaliados e comparados, caracterizando o efeito potencial de deposição de sujidade uniforme ou não-uniforme. Os resultados mostraram proximidade entre as curvas de taxa de sujidade para corrente e potência, indicando uniformidade da deposição de sujidade sobre os módulos fotovoltaicos. A aplicação dessa metodologia permitiu identificar taxas médias de sujidade para tecnologia de telureto de cádmio de aproximadamente 0,88 e 0,87 para corrente de curto-circuito e potência máxima, respectivamente, enquanto para o silício policristalino essa taxa foi de 0,91 e 0,89. Estes dados mostram que sujidade possui maior impacto sobre o fotovoltaico de telureto de cádmio, como consequência da diferença da largura da banda gap em relação ao silício cristalino.

Palavras-chave: Módulo Fotovoltaico, Sujidade, Condições Meteorológicas.

1. INTRODUÇÃO

O acúmulo de poeira, pólen e outros contaminantes sobre o módulo fotovoltaico possui um impacto potencialmente elevado na energia de saída de sistemas fotovoltaicos. A preocupação é implementar medidas para garantir o desempenho adequado de módulos fotovoltaicos ao longo de sua vida útil. Isso contribui para o progresso da pesquisa relacionada aos efeitos da sujidade sobre essa tecnologia. Costa, Diniz e Kazmerski (2016, 2017) realizaram uma revisão de pesquisa e literatura feita por para os anos de 2012 a 2017 referentes ao efeito da sujidade em energia fotovoltaico, em concentrador solar (térmico) de potência (CSP) e em concentrador fotovoltaico (CPV). O interesse quanto a pesquisa sobre os efeitos da sujidade é parcialmente indicado pelo aumento das publicações em mais de 200% ao longo deste período de 5 anos.

Para avaliar as perdas por sujidade em fotovoltaico, estações de monitoramento de sujidade estão sendo usadas em diferentes localidades e países com o objetivo de quantificar as taxas de sujidade. Gostein, Duster e Thuman (2015) realizaram a análise da taxa de sujidade usando dados medidos em uma estação de sujidade instalada na região sudoeste dos Estados Unidos. Os dados de corrente de curto-circuito e potência no ponto de máxima potência foram coletados de um módulo de silício policristalino de 300 Wp limpo periodicamente, e de um módulo idêntico com deposição natural de sujidade instalados sobre as mesmas condições de inclinação e orientação. Os parâmetros elétricos foram medidos durante diferentes períodos dos anos de 2014 e 2015, juntamente com os dados meteorológicos do local. Os resultados mostraram que a taxa de sujidade para potência e corrente de curto-circuito se afastaram em um determinado período da análise, como consequência de uma deposição não-uniforme. De acordo com os autores, a taxa de sujidade para a potência pode apresentar maior precisão em módulos de silício, devido a influência do diodo bypass.

Klugmann-Radziemska (2015) avaliou a redução da produção de energia elétrica em módulos fotovoltaicos cristalinos instalados na Polônia, devido o acúmulo de poeira em sua superfície. Três módulos em exposição ao ar livre foram usados, sendo um limpo regularmente e os demais expostos ao acúmulo de sujidade. O autor concluiu que os

módulos tiveram uma perda de eficiência de relação linear com a densidade dessa deposição e todos os módulos avaliados tiveram uma diminuição média de 3% ao ano na sua potência máxima. A perda máxima de eficiência diária calculada para o módulo de silício cristalino inclinado com ângulo ideal foi igual a 0,8%.

Bhattacharya, Chakraborty e Pal (2015) avaliaram as perdas de eficiência de dois módulos fotovoltaicos idênticos, de tecnologia monocristalina com potência nominal de 37 Wp cada, instalados em Tripura na Índia. Um dos módulos foi limpo regularmente, eliminando qualquer sujeira depositada sobre o mesmo, enquanto o outro módulo foi testado mediante a acumulação diária depositada sobre este ao longo de seis meses, período de duração do experimento. Para este estudo, foram realizadas medições dos parâmetros elétricos e térmicos dos módulos, e das variáveis climáticas como temperatura ambiente e radiação solar. Os resultados obtidos indicaram que o acúmulo de sujidades sobre os módulos influencia significativamente a redução da corrente de curto-circuito, o que não ocorreu com a tensão de circuito aberto que apresentou uma pequena redução em comparação com o módulo limpo. A corrente de curto-circuito apresentou uma redução percentual de 8,97% a 16,66%, enquanto para a tensão de circuito aberto esta variação foi de 0,26% a 0,59%. Como consequência, a eficiência reduziu em torno de 9,07% a 15,59%, devido à dispersão e reflexão da radiação solar causada pela sujeira depositada.

Micheli, Muller e Kurtz (2016) analisaram os parâmetros de saída de células fotovoltaicas de referência instaladas em diferentes locais, visando identificar os fatores mais relevantes que influenciam o acúmulo de sujidades. Para isso, os autores coletaram dados de seis estações de sujidades, cada uma composta por duas células de tecnologia de silício monocristalino e dois piranômetros, instaladas em diferentes zonas climáticas dos Estados Unidos, definidas de acordo com o mapa da NASA e com a classificação de Köppen. Em cada estação foram medidas as variáveis ambientais, como velocidade e direção do vento, pressão absoluta, temperatura ambiente, umidade relativa e precipitação, no intuito de avaliar a variação destes com o acúmulo de sujidades. Também foi considerado na análise, os dados de partículas aerotransportadas média anual para cada localidade, como partículas com diâmetro inferior a 100 μm (TSP), partículas com diâmetro igual ou menor a 10 μm (PM_{10}), e partículas com diâmetro igual ou menor a 2,5 μm ($\text{PM}_{2,5}$). Para a avaliação do solo onde as estações foram instaladas, foram utilizados dados disponibilizados pela *U.S. Department of Agriculture* (USDA). A taxa de sujeira média diária foi estimada considerando a relação entre os valores médios diários da corrente de curto-circuito para a célula com deposição de sujeira e para a célula limpa. Os resultados mostraram que os índices de material particulado tem boa correlação com os índices de sujeira média diária, sendo o PM_{10} o que apresenta maior correlação com um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,95, enquanto para o $\text{PM}_{2,5}$, o coeficiente de determinação foi de aproximadamente 0,70. Também foi observado que a frequência da chuva pode contribuir significativamente com a redução do acúmulo de sujidades do que a quantidade de chuva por evento.

Micheli e Muller (2017) avaliaram a relação de cento e dois parâmetros ambientais e meteorológicos com o desempenho de vinte estações de sujidades instaladas nos Estados Unidos, com o objetivo de determinar a capacidade de prever as perdas por sujidades em sistemas fotovoltaicos. As estações de sujidade compostas por duas células de referência, ou módulos fotovoltaicos, e um piranômetro foram instaladas em oito Estados diferentes e em diferentes zonas climáticas. Para realizar essa análise, a corrente de curto-circuito da célula ou módulo limpo e com deposição natural de sujeira foram medidas em cada estação, variando os períodos de medição entre 7 meses a até 40 meses e entre os anos de 2013 e 2016, dependendo do tempo de operação da estação. Apesar de haver medição de dados de precipitação na maioria das estações, os dados utilizados foram derivados do banco de dados PRISM para eliminar a influência de ruídos ou problemas de medições identificados em alguns casos. Os dados de velocidade do vento, temperatura ambiente e umidade relativa do ar foram medidos em quase todos os sites, sendo que para sites sem medição de alguma destas variáveis foram utilizados dados disponíveis no *National Solar Radiation Database* (NSRDB). Também foram coletados dados de PM_{10} e $\text{PM}_{2,5}$ provenientes de estações localizadas a distâncias de 10, 30, 50 e 100 quilômetros das estações de sujidade, e definidas as características do solo para cada site usando dados do *United States Department of Agriculture* (USDA). Dados como potencial de risco de fogo, a distância entre estradas pavimentadas e não-pavimentadas, e distância do litoral em relação aos sites foram consideradas, por poderem apresentar algum grau de influência quanto a deposição de sujidades sobre o fotovoltaico. Os resultados da comparação das taxas de sujeira calculadas para as diferentes estações de monitoramento com os cento e dois parâmetros, mostraram que as métricas de material particulado (PM) e alguns parâmetros que descrevem o padrão de precipitação apresentaram correlações significativas com as métricas de sujidade. Além disso, os autores observaram que o número médio de dias entre chuvas consecutivas possuem melhor correlação com a taxa de sujidade.

Micheli, Ruth e Muller (2017), analisaram a variabilidade sazonal de perdas devido a sujidade em fotovoltaico, utilizando dados de dezenove estações de sujidade instaladas em diferentes cidades nos Estados Unidos, durante um período de um ano. Cada estação composta por duas células idênticas, um piranômetro, e por uma estação meteorológica. Para o desenvolvimento desta análise, uma das duas células era limpa regularmente, enquanto a outra foi mantida para deposição natural de sujidades. Para avaliar a sazonalidade, os autores criaram o índice de variabilidade sazonal (*SVI*) adaptado do índice de sazonalidade (*SI*) definido como a soma dos desvios absolutos do total mensal de chuva acumulada em relação à média mensal, dividido pelo total de chuva acumulada em um ano. Os resultados indicaram que *SVI* é um índice válido para caracterizar a sazonalidade da sujidade, mas não pode distinguir sites com perdas de sujidade elevadas ou baixas por basear numa análise de perda cumulativa. Outro resultado obtido consiste na relação entre concentração de PM_{10} e a métrica de sujidade mensal, sendo identificado um fator de correlação de 0,39 quando a análise é realizada para um mês, aumentado para 0,47 quando são considerados dados de três meses seguidos.

A sujidade e partículas que são depositadas sobre módulos fotovoltaicos podem apresentar diferente grau de impacto, variando em relação a zona climática, proximidade com fontes poluentes, propriedades físico e química do

solo, entre outros, que são parâmetros específicos de cada localidade. Nesse trabalho será apresentado uma metodologia para avaliar e quantificar as perdas por sujidade em módulos fotovoltaicos de tecnologia de telureto de cádmio (CdTe) (sem moldura) e silício policristalino (p-Si) (com moldura) instalado no Grupo de Estudos em Energia (GREEN-PUCMinas) em Belo Horizonte, Minas Gerais.

Os resultados são dados iniciais obtidos no desenvolvimento de projeto de pesquisa da CAPES – Ciência sem Fronteiras, em parceria com instituições nacionais e internacionais, que tem como objetivo avaliar as perdas por sujidade em diferentes zonas climáticas no Brasil e estudar as necessidades de mitigação devido as perdas por sujidade em tecnologias instaladas no país.

2. METODOLOGIA

Esse trabalho está inserido num projeto de pesquisa que tem como objetivo identificar as perdas de desempenho em módulos fotovoltaicos instalados em diferentes localidades no Brasil, devido a deposição de sujidades. Esse estudo que será apresentado consiste em resultados iniciais desse projeto, inicialmente aplicado a apenas uma cidade, Belo Horizonte em Minas Gerais. Este trabalho pode ser dividido em cinco etapas: a) determinação das diferentes zonas climáticas no Brasil, b) coleta e tratamento dos parâmetros elétricos medidos nas estações de sujidade, c) coleta e tratamento dos dados climáticos medidos na estação meteorológica instalada no mesmo site das estações de sujidade, d) avaliação e determinação da taxa de sujidade, e) comparação com parâmetros que podem apresentar influência sobre a deposição da sujidade em módulos fotovoltaicos.

Nessa seção será apresentada a metodologia utilizada para caracterização das zonas climáticas no Brasil, descrição da estação de sujidade instalada em Belo Horizonte, o processo para tratamento dos dados e o cálculo da taxa de sujidade.

2.1 Caracterização das zonas climáticas

Para determinar as diferentes zonas climáticas existentes no Brasil, foi realizado um estudo detalhado referente a classificação climática de Köppen e Geiger (1928), Fig. 1. Este estudo baseou na metodologia desenvolvida por Sá Junior (2009), e dados referentes a normal climatológica disponibilizada pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), que representa um conjunto de dados médios calculados para um período longo e uniforme, compreendendo no mínimo três décadas consecutivas.

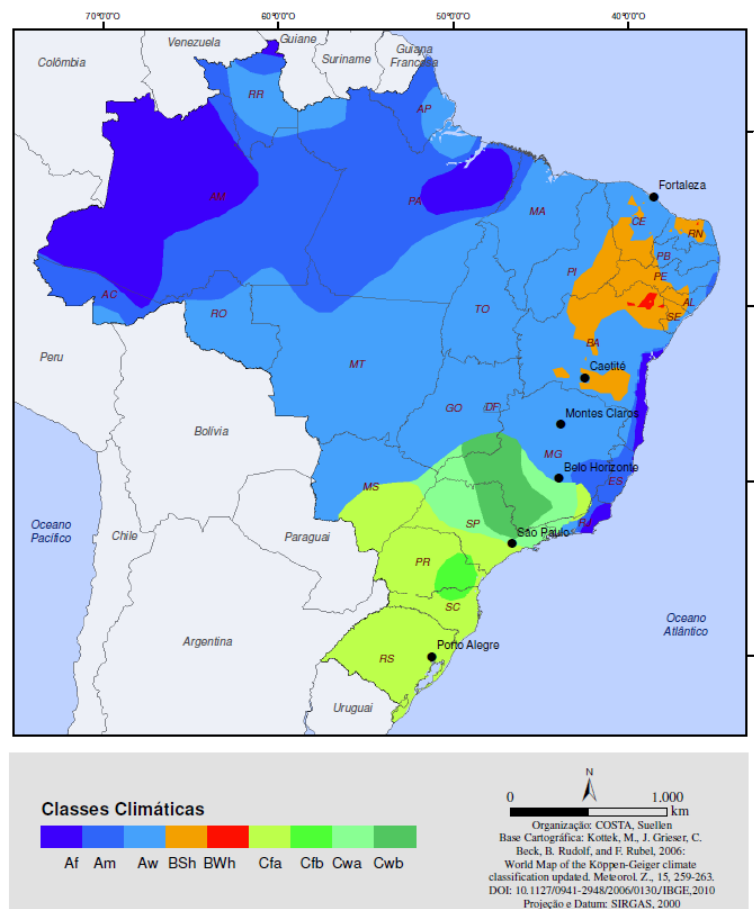


Figura 1 – Classificação climática de de Köppen-Geiger (1928) para os locais escolhidos para monitoramento da sujidade

Os resultados obtidos nessa avaliação foram utilizados para o desenvolvimento do gráfico indicado na Fig. 1, mostrando as diferentes zonas climáticas do Brasil (para clima tropical – azul, clima subtropical-verde, e vermelhor/laranja- clima árido).

A definição das zonas climáticas possibilitou a seleção das localidades geográficas onde serão instaladas as estações de sujidade pelo Projeto CAPES, que fornecerão os dados para o desenvolvimento da análise das perdas por sujidade em fotovoltaico. Inicialmente, as cidades de Porto Alegre/RS, São Paulo/SP, Belo Horizonte/MG, Montes Claros/MG, Caetité/BA e Fortaleza/CE foram as selecionadas. À medida que o projeto está progredindo, também poderão ser instaladas estações em Macapá/AM e Vitória da Conquista/BA. Deve ser ressaltado, que como o projeto está em desenvolvimento, essas cidades poderão ser alteradas, mas considerando a importância de selecionar cidades com diferentes características climáticas.

A cidade de Belo Horizonte está localizada na região sudoeste do Brasil, inserida na zona climática Aw, de acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger (1928), apresentando clima tropical com estação seca no período de inverno com precipitação média inferior a 60 mm em pelo menos um dos meses. As localidades inseridas no grupo A apresentam temperatura média superior a 16-18 °C no mês mais frio do ano (Sá Júnior, 2009).

2.2 Metodologia para extração das perdas por sujidade em fotovoltaico utilizando estações de monitoramento

Para quantificar as perdas por sujidade em módulos fotovoltaicos, foi instalada duas estações de sujidade, uma de telureto de cádmio (CdTe) e uma de silício policristalino (p-Si), na cidade de Belo Horizonte em Minas Gerais. A estação de telureto de cádmio (CdTe) possui dois módulos idênticos de 110 Wp, ambos com a mesma inclinação (20°) que é determinada pela latitude do local, sendo um limpo diariamente e o outro exposto a deposição natural de sujidades. Os módulos são ligados a um sistema de controle e medição de dados, coletando para cada módulo em intervalos de um minuto, dados de radiação solar incidente sobre o plano do fotovoltaico (POA), temperatura do módulo medida por um termopar, corrente de curto-circuito, tensão de circuito aberto, e parâmetros elétricos no ponto de máxima potência (corrente, tensão e potência).

A estação de sujidade para a tecnologia de silício policristalino (p-Si) é composta por um módulo de 265 Wp e uma célula de referência de 0.0584 Wp, ambos com a mesma inclinação, possuindo um sistema de lavagem automatizado que permite a limpeza diária da célula de referência, enquanto a sujidade é depositada naturalmente sobre o módulo. Assim como a estação para a tecnologia CdTe, as medições são realizadas automaticamente a cada um minuto por um sistema de controle, fornecendo dados de radiação solar (POA), temperatura de operação, e corrente de curto-circuito do módulo e da célula de referência, além da medição da potência gerada pelo módulo fotovoltaico de silício. Para melhor compreensão, o módulo ou célula limpo periodicamente serão denominados módulo limpo, e os módulos com deposição de sujidade terão a nomenclatura de módulo sujo. As estações possuem diferentes períodos de operação, variando em 6 a 8 meses de coleta de dados durante o ano de 2017, e estão localizadas distantes de estradas de intenso tráfego de veículos.

Para calcular a taxa de sujidade (SR), os dados coletados foram tratados e filtrados, com o objetivo de reduzir a influência de ruídos ou interferências durante o processo de medição. Os dados utilizados se restringiram ao período de maior incidência de radiação solar, entre 11 as 13 horas, e em condições de céu claro quando a radiação é maior que 500 W/m².

Em seguida, os parâmetros elétricos medidos foram normatizados em relação a radiação solar de 1000 W/m² e a temperatura de 25 °C, o que permite a comparação de desempenho de módulos fotovoltaicos independente da localização geográfica, posicionamento, inclinação e potência nominal.

As taxas de sujidade, ou seja, as perdas por sujidade nos módulos fotovoltaicos, foram quantificadas utilizando dados de curto-circuito ($SR_{I_{sc}}$) e de potência no ponto de máxima potência ($SR_{P_{max}}$) medidos nos módulos limpo e nos módulos expostos ao acúmulo natural de sujidades. O uso destes dois parâmetros elétricos nesta avaliação tem como objetivo identificar o tipo de deposição, uniforme ou não-uniforme, podendo a taxa de sujidade para potência apresentar maior correlação com os reais dados de operação em comparação com a corrente de curto-circuito, devido a atuação do diodo bypass, em específico para o módulo de silício.

Como as estações se diferenciam, a de telureto de cádmio possui dois módulos idênticos e disponibiliza dados de corrente de curto-circuito e de potência, enquanto a de Silício é composta por um módulo e uma célula de referência não fornecendo dados de potência para os dois dispositivos, foram utilizadas diferentes equações para calcular a taxa de sujidade. A taxa de sujidade (SR) para a estação de tecnologia CdTe é definida como:

$$SR_{I_{sc}} = \left(\frac{I_{sc_{sujo}}}{I_{sc_{limpo}}} \right) \quad (1)$$

$$SR_{P_{max}} = \left(\frac{P_{max_{sujo}}}{P_{max_{limpo}}} \right) \quad (2)$$

onde $I_{sc_{sujo}}$ e $P_{max_{sujo}}$ são a corrente de curto-circuito e a potência normalizadas medidas do módulos CdTe exposto a deposição de sujidade, enquanto $I_{sc_{limpo}}$ e $P_{max_{limpo}}$ são a corrente e a potência normalizadas medidas do módulo CdTe limpo, respectivamente.

Para calcular a taxa de sujidade para o módulo de silício foi utilizada a seguinte equação:

$$SR_{I_{sc}} = \frac{I_{sc_{sujo}}}{I_{sc0} * (1 + \alpha * (T_{m_{sujo}} - T_0)) * (\frac{POA}{G_0})} \quad (3)$$

$$SR_{P_{max}} = \frac{P_{max_{sujo}}}{P_{max0} * (1 + \gamma * (T_{m_{sujo}} - T_0)) * (\frac{POA}{G_0})} \quad (4)$$

onde $I_{sc_{sujo}}$ e $P_{max_{sujo}}$ são a corrente de curto-circuito e potência no ponto de máxima potência medidas no módulo de Si com deposição natural de sujidade, I_{sc0} e P_{max0} são a corrente de curto-circuito e potência do módulo na condição de referência (*Standard Test Condition – STC*), α e γ são os coeficientes de temperatura para corrente de curto-circuito e potência, respectivamente, $T_{m_{sujo}}$ é a temperatura do módulo sujo, T_0 e G_0 são a temperatura e a irradiância solar na condição de referência (1000 W/m² e 25 °C), e POA é a radiação solar incidente sobre o plano do módulo inclinado medido pela célula de referência.

Em seguida, a taxa média diária foi calculada e comparada com dados acumulados de precipitação diária medidos na estação meteorológica instalada pelo projeto próxima da estação de sujidade. Para melhor avaliação, os dados de precipitação utilizados foram filtrados, considerando apenas ocorrências de chuva acumulada diária maior que 0,3 mm, pois abaixo deste valor é considerado que a chuva não possui efeito de limpeza sobre os módulos fotovoltaicos (Micheli e Muller, 2017).

3. RESULTADOS

A estação de CdTe começou a operar no dia 13 de março e a estação de p-Si no dia 27 de maio, ambas no ano de 2017. Porém, durante os primeiros meses de coleta de dados ocorreram problemas relacionadas a medição e armazenamento dos dados meteorológicos, sendo a operação normalizada no mês de julho do mesmo ano.

A Fig. 2 mostra os valores médios diários calculados das métricas $SR_{I_{sc}}$ e $SR_{P_{max}}$ para o módulo de telureto de cádmio (CdTe) ao longo de um período de 4 meses, juntamente com a precipitação diária acumulada medida na estação meteorológica do GREEN/PUCMinas em Belo Horizonte/MG.

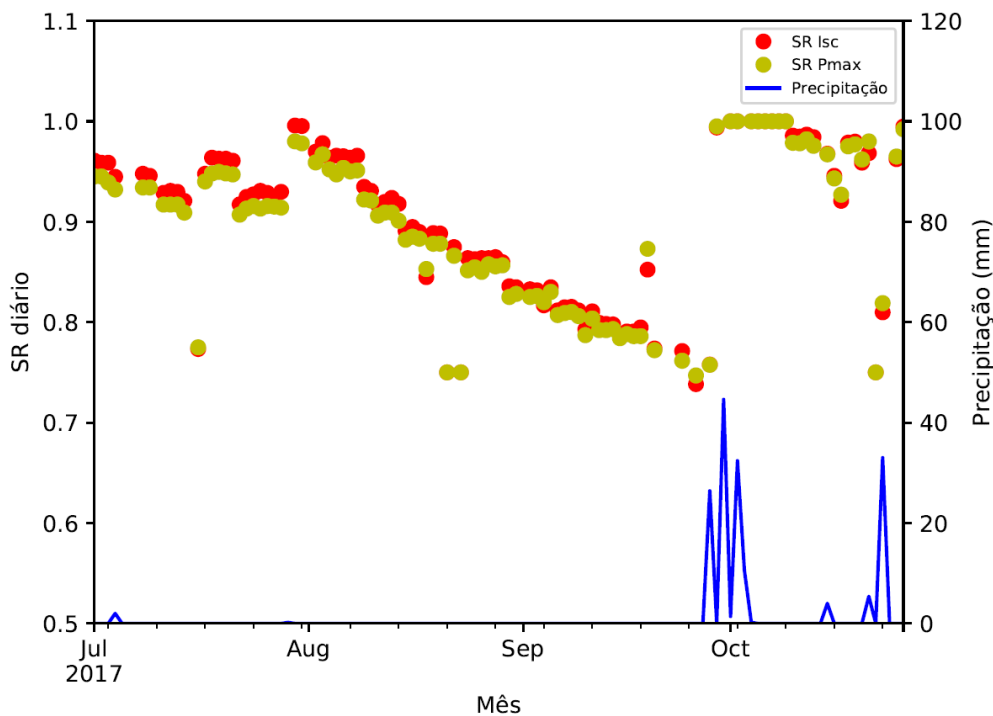


Figura 2 – Taxa de sujidade média diária para tecnologia telureto de cádmio em relação a precipitação acumulada diária para a cidade de Belo Horizonte/MG

Apesar dos dois módulos utilizados na estação de monitoramento de sujidade possuírem a mesma série de fabricação, pode haver diferença em relação ao desempenho de um módulo para o outro. Essa diferença apesar de normalmente ser pequena, pode afetar a análise de perdas de desempenho por sujidade. Dessa forma, para efeito de normalização foi feita uma análise comparativa entre o desempenho dos dois módulos na primeira semana de operação (13 de março a 20 de março para a estação de CdTe e 27 de maio a 3 de junho para a estação silício), em que ambos estavam limpos, igualando a taxa de sujidade.

Quando a taxa de sujidade (SR) é igual a “1” representa o estado limpo do módulo fotovoltaico, sem perdas por deposição de material particulado, ou qualquer outro contaminante. Em outras palavras, quanto menor a taxa de sujidade (isto é, menor que 1), maior será as perdas. Na Fig. 2, a taxa de sujidade reduziu ao longo do período seco entre o início de mês de agosto ao final do mês de setembro, atingindo valores em torno de 0,8, o que indica o acúmulo de sujidades sobre o módulo no decorrer do período de estiagem de chuva. No dia 28 de setembro a 4 de outubro foram registradas precipitações acumuladas maiores que 20 mm o que resultou na limpeza do módulo e aumento da taxa de sujidade para próximo “1”. Na Fig. 3 é apresentada a estação de sujidade do módulo de telureto de cádmio antes e após o período seco, mostrando um acúmulo significativo de contaminantes (neste caso, incluindo excremento de pássaros).

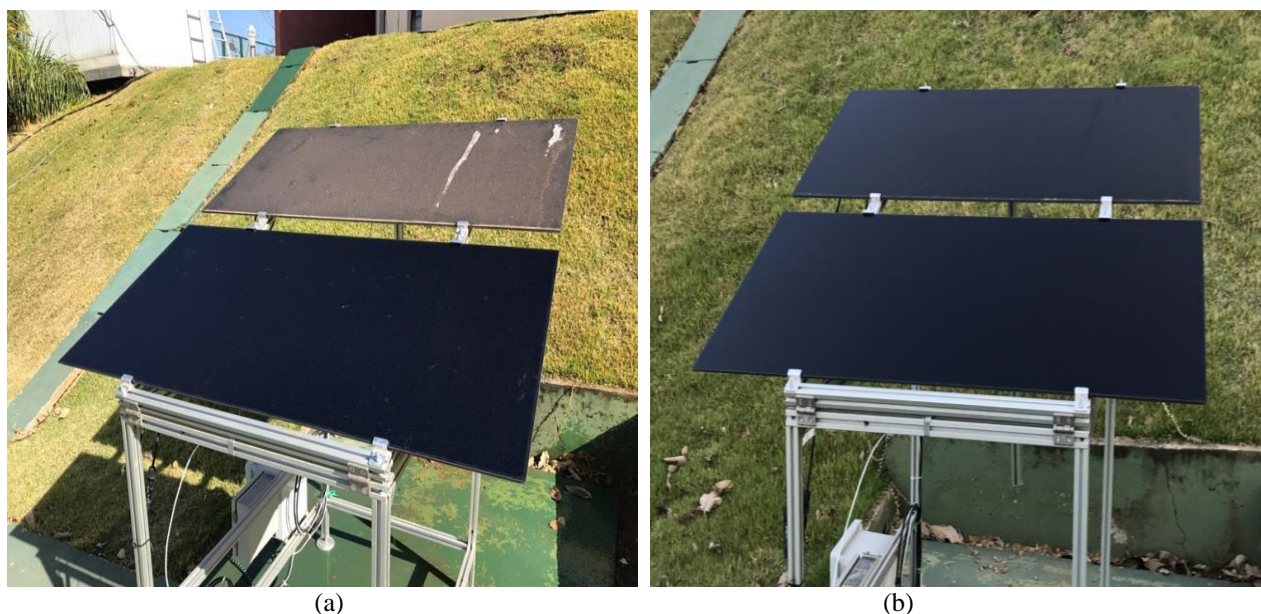


Figura 3 – Estação de sujidade para a tecnologia de telureto de cádmio: (a) durante o período seco (24/09/2017), (b) após a precipitação maior que 20 mm (02/10/2017)

Alguns pontos indicados na Fig. 2 mostram divergência em relação ao conjunto de dados, que pode ser atribuído a interferências geradas pela técnica de limpeza do módulo limpo (de referência). O módulo de referência é limpo manualmente todos os dias no período de funcionamento do laboratório GREEN, de segunda a sexta. Porém, a limpeza não é realizada nos finais de semana. Então, sujidades são depositadas sobre o módulo de referência podendo promover a redução da taxa de sujidade, aumento das perdas, e o surgimento desses pontos divergentes. Além disso, a curva indica alguns períodos com ausência de dados, devido a inserção dos filtros referentes a intervalo de radiação solar ($>500 \text{ W/m}^2$) e do horário de medição (11 as 13 horas) considerados na análise.

Na Fig. 4 são apresentados os valores médios diários calculados das métricas $SR_{I_{sc}}$ e $SR_{P_{max}}$ para o módulo de silício policristalino (p-Si) ao longo de um período de 4 meses, em relação a precipitação diária acumulada. É possível observar que a taxa de sujidade para potência e corrente de curto-circuito são próximas, caracterizando uma despoição de sujidade uniforme. Esse grau de uniformidade é mais evidente em módulos cristalinos, devido a presença do diodo bypass e sua estrutura física (por exemplo, moldura). A deposição de sujidade não tem significativa influência na corrente de curto-circuito em caso de deposição não-uniforme, pois os diodos internos atuam de modo a excluir o string de célula com maior deposição de sujidade, normalmente acumulada na área inferior do módulo devido a inclinação.

Assim como observado para a tecnologia de telureto de cádmio, a taxa de sujidade para o silício decresceu ao longo do período seco, atingindo valores em torno de 0,86, aumentando para 1 após as precipitações registradas entre o final do mês de setembro e início do mês de outubro. É notável a redução dos ruídos nos dados da estação de silício em comparação com a de telureto de cádmio, pois a estação de silício possui um sistema de limpeza automática o que favorece a redução de interferências na medição da sujidade.

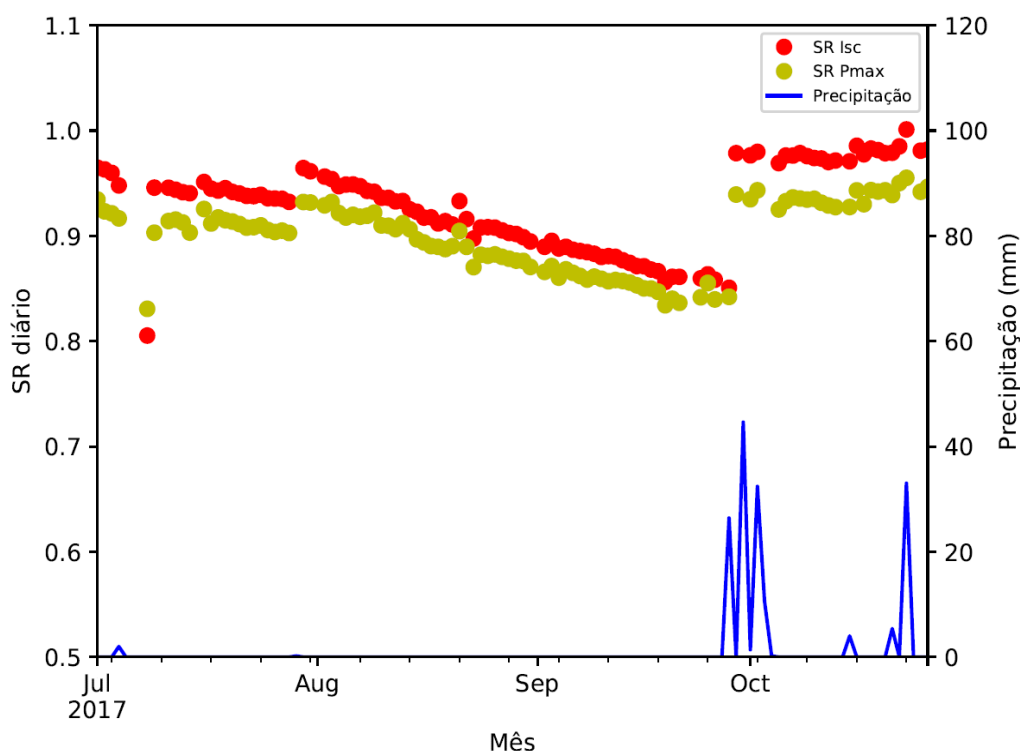


Figura 4 – Taxa de sujidade média diária para tecnologia Silício Policristalino em relação a precipitação acumulada diária para a cidade de Belo Horizonte/MG

A Fig. 5 mostra a estação de sujidade para a tecnologia de silício durante o período seco e após a chuva, sendo possível identificar maior acúmulo de sujidades na área inferior do módulo, devido a moldura de metal que funciona como uma barreira para a sujidade, o que não ocorre com o módulo de telureto de cádmio por não haver moldura.

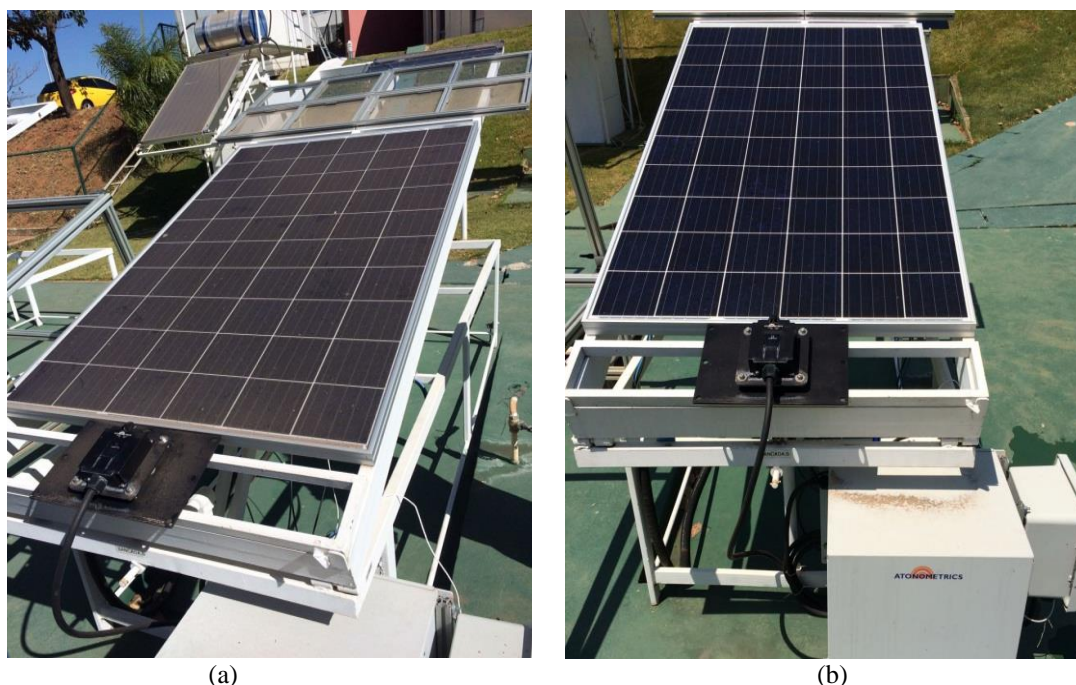


Figura 5 – Estação de sujidade para a tecnologia de silício policristalino: (a) durante o período seco (24/09/2017), (b) após a precipitação maior que 20 mm (02/10/2017)

Comparando os resultados obtidos para o telureto de cádmio e para o silício é possível identificar que a perda por sujidade durante o período seco é maior para a tecnologia CdTe. Esse resultado pode ser explicado, devido a diferença de largura da banda gap das duas tecnologias, apresentando diferentes sensibilidades para cada comprimento de onda. O efeito da deposição de sujidade sobre a transmissividade em diferentes tecnologias de módulos fotovoltaicos foi estudada por Qasem et al. (2014). Os autores identificaram que a sujidade afeta comprimentos de onda menores mais

severamente, e que módulos de 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. Estes resultados são consistentes com seus relatórios. Além disso, foi observado que a moldura metálica pode contribuir para maior acúmulo de sujidade na parte inferior do módulo, aumentando a não-uniformidade da deposição.

4. CONCLUSÃO

As definições das zonas climáticas para o Brasil foram apresentadas. O gráfico desenvolvido é utilizado como base para estabelecer locais de monitoramento para o estudo de sujidade para este projeto. Os resultados iniciais da estação de monitoramento foram apresentados para a cidade de Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

Os resultados preliminares mostraram que a perda por sujidade média durante o período de análise para o módulo fotovoltaico de telureto de cádmio foi de 0,88 para a corrente de curto-circuito e 0,87 para a potência, e que essa taxa foi menor para o silício, 0,91 e 0,89 para corrente e potência, respectivamente, devido a diferença em relação a resposta espectral. Essa análise indica o elevado grau de impacto da deposição de sujidade quanto ao desempenho de um módulo fotovoltaico. Assim, é importante considerar esse fator nas previsões de produção de energia de sistemas fotovoltaicos. Além disso, durante o período de coleta de dados foi possível identificar o acúmulo de sujidades na parte inferior dos módulos, em especial do silício por possuir moldura metálica que pode funcionar como uma barreira para o acúmulo de sujidade não-uniforme.

A próxima etapa desse estudo será avaliar a relação da deposição de sujidades sobre os módulos fotovoltaicos e dados de material particulado: partículas com diâmetro igual ou menor a 10 μm (PM10), e partículas com diâmetro igual ou menor a 2,5 μm (PM2,5). Além disso, serão instaladas novas estações de sujidade em outras quatro cidades para avaliação da perda de desempenho de módulos fotovoltaicos, devido a sujidade sobre influência de diferentes zonas climáticas no Brasil. A expectativa é que esse análise seja concluída no segundo semestre de 2018, e que os resultados possam contribuir para a previsão mais real de operação de sistemas fotovoltaicos instalados em diferentes regiões no país.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e as instituições internacionais NREL (*Nacional Renewable Energy Laboratory*) e RASEI/CU (*Renewable and Sustainable Energy Institute/University of Colorado*) pelo apoio ao desenvolvimento desta pesquisa. Os autores também agradecem a ajuda da Atonometrics com este trabalho.

REFERÊNCIAS

- Alvares, C. C., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. L. M., Sparovek, G., 2013. Köppen's climate classification map for Brazil, *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, p. 711-728.
- Bhattacharya, T., Chakraborty, A. K., Pal, K., 2015. Influence of environmental dust on the operating characteristics of the solar PV module in Tripura, India. *International Journal of Engineering Research*, v. 4, p. 141 – 144.
- Costa, S.C.S., Diniz, A.S.A.C., Kazmerski, L.L., 2016. Dust and soiling issues and impacts relating to solar energy systems: Literature review update for 2012-2015, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 63, p. 33-61.
- Costa, S.C.S., Diniz, A.S.A.C., Kazmerski, L.L., 2017. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (in press).
- Gostein, M., Duster, T., Thuman, C., 2015. Accurately measuring PV soiling losses with soiling station employing module power measurements, *IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*.
- Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa (BDMEP). Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/>>. Acessado em: 21 jan. 2016.
- Köppen, W., Geiger, R., 1928. *Klimate der Erde*. Gotha: Verlag Justus Perthes, Wall-map 150cmx200cm.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., Rubel, F., 2006. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated, *Meteorologische Zeitschrift*, v. 15, n. 3, p. 259-263.
- Klugmann-Radziemska, E., 2015. Degradation of electrical performance of a crystalline photovoltaic module due to dust deposition in northern Poland, *Renewable Energy*, v. 78, p. 418 – 426.
- Micheli, L., Muller, M., 2017. An investigation of the key parameters for predicting PV soiling losses, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 25, p. 291-307.
- Micheli, L., Muller, M., Kurtz, S., 2016. Determining the effects of environment and atmospheric parameters on PV field performance, *IEEE 43rd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, p. 1724-1729.
- Micheli, L., Ruth, D., Muller, M., 2017. Seasonal trends of soiling on photovoltaic systems, *IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*.
- Qasem, H., Betts, T. R., Müllejans, H., Albusairi, H., Gottschalg, R., 2014. Dust-induced shading on photovoltaic modules, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 22, p. 218 – 226.
- Sá Junior, A., 2009. Aplicação da classificação de Köppen para o zoneamento climatic do Estado de Minas Gerais, Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Lavras – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Lavras, Minas Gerais.

EVALUATION OF SOILING LOSSES FOR PHOTOVOLTAIC MODULES IN MINAS GERAIS, BRAZIL

Abstract. Photovoltaic module research has been increasingly focused on identifying methods to improve the field operation and reliability of the technology. Different parameters influence the performance of photovoltaic plants, such as meteorological conditions, module technology, operation and maintenance, etc. But recent literature has highlighted the high impact of soiling on the efficiency and power production of this technology. This work presents a methodology for quantifying soiling loss in photovoltaic modules of thin-film cadmium telluride (CdTe) and polycrystalline silicon (p-Si) through measurements from monitoring soiling stations installed in Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil. The electrical parameters measured from photovoltaic modules are compared with precipitation data collected in the same place, with the objective of evaluating the behavior of the soiling ratio during the dry periods and the required cleaning periods. In addition, the soiling ratio for short-circuit current ($SR_{I_{sc}}$) and maximum power ($SR_{P_{max}}$) data from the modules were evaluated and compared, characterizing the potential effects of uniform and non-uniform soiling. The results showed closeness between the current and power soiling ratio curves, indicating uniformity of soiling deposition on the photovoltaic modules. The application of this methodology allowed identifying average soiling losses for cadmium telluride technology of approximately 0.88 and 0.87 for short-circuit current and maximum power, respectively, whereas for polycrystalline silicon the soiling ratio was 0.91 and 0.89. These data indicate that soiling has a greater impact on the photovoltaic of cadmium telluride that we associate with the difference of band gap in relation polycrystalline silicon.

Key words: Photovoltaic Module, Soiling, Meteorological Conditions.