# DETERMINAÇÃO DAS TAXAS DE SUJIDADE PARA MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE FILME FINO E SILÍCIO CRISTALINO INSTALADOS EM DIFERENTES ZONAS CLIMÁTICAS BRASILEIRAS

Suellen Caroline Silva Costa – suellencscosta@gmail.com
Antônia Sônia Alves Cardoso Diniz – asacd@pucminas.br
Vinícius Camatta – viniciusbh@msn.com
Pontificia 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.** O acúmulo de sujidades sobre módulos fotovoltaicos (FV) induz na redução do desempenho destes dispositivos, podendo ser ainda mais agravante em regiões consideradas atrativas para a aplicação dessa tecnologia, onde a irradiância apresenta elevados índices ao longo do ano, porém sob predominância de clima seco e árido propício para a deposição de sujidades. Os efeitos do acúmulo de sujeira no desempenho dos módulos FV são específicos para cada localidade, uma vez que o comportamento da deposição e a composição físico-química dos contaminantes são influenciados por um conjunto de variáveis específicas do local de instalação dos módulos fotovoltaicos. Neste cenário, este artigo apresenta uma metodologia para quantificar a taxa de sujidade ("Soiling Ratio" – SRatio) e a relação de sujidade diária ("Soiling Rate" SRate) em módulos FV de telureto de cádmio (CdTe) e silício policristalino (p-Si) através de medições realizadas em estações de monitoramento instaladas em diferentes zonas climáticas do Brasil. Os resultados obtidos neste trabalho indicaram: (1) Belo Horizonte/MG (latitude - 19,92°, longitude -43,99°), um SRatio médio para o período de análise de 0,94 para telureto de cádmio (CdTe) e 0,92 para silício policristalino (p-Si); (2) Porto Alegre/RS, (Latitude -30,05°, Longitude -51,17°), um SRatio em torno de 0,97 e 0,98 para as tecnologias CdTe e p-Si, respectivamente; e (3) Brotas de Macaúbas/BA (Latitude -11,99°, Longitude -42,62°), SRatio de 0,99 e 0,95 para as tecnologias CdTe e p-Si, respectivamente. A partir das características do SRatio, os dados do período seco foram utilizados para estimar o SRate através do estimador Theil-Sen, resultando em valores médios de -0,20%/dia para o CdTe e -0,14%/dia para Belo Horizonte/MG. O maior SRate para tecnologia CdTe pode ser justificado devido a diferença nas respostas espectrais das duas tecnologias FV, pois a sujeira tem um impacto maior nas tecnologias fotovoltaicas de menor comprimento de onda.

Palavras-Chave: Taxa de sujidade; Zonas climáticas; Tecnologias fotovoltaicas.

# 1. INTRODUÇÃO

O aprimoramento da tecnologia solar fotovoltaica tem acompanhado o crescimento da potência acumulada instalada no mundo. De acordo com NREL (2019), somente nos últimos 10 anos houve um aumento em torno de 3% na eficiência de células fotovoltaicas de silício cristalino e de mais de 6% para células de telureto de cádmio (filme fino). Os módulos fotovoltaicos, responsáveis por converter a irradiância solar em energia elétrica, podem ser associados à expectativa quanto a sua confiabilidade. Um módulo fotovoltaico confiável é aquele que tem alta probabilidade de realizar sua função pretendida adequadamente durante a sua vida útil sobre as condições de operação encontradas em campo (Osterwald e MacMahon, 2009). Existem fatores que afetam o desempenho dos módulos fotovoltaicos, interferindo na confiabilidade da produção e podendo reduzir a sua vida útil; entre os principais está a deposição de sujeira. A deposição de poeira atmosférica, resíduos de pássaros e outros contaminantes na superfície de um módulo fotovoltaico, além de diminuir a eficiência de conversão deste dispositivo absorvendo menor parcela da irradiância solar incidente, podem contribuir para o aparecimento de pontos quentes ("hot spot"), acelerando o processo de degradação do módulo fotovoltaico. Esse efeito da sujidade foi observado por Braga e outros (2018) que avaliaram o desempenho de módulos fotovoltaicos com diferentes distribuições não uniformes de sujidade, através do levantamento da curva I-V e considerando a influência das variáveis meteorológicas para a cidade de Belo Horizonte/MG. Os resultados indicaram o surgimento de pontos quentes identificados no módulo de silício cristalino. Em algumas regiões brasileiras, a deposição de sujidade pode ser mais agravante devido ao clima seco ou em regiões úmidas podendo induzir o processo de sedimentação da sujidade, dificultando a limpeza. A preocupação quanto ao impacto da sujidade tem impulsionado o avanço de pesquisas de diferentes comunidades científicas no mundo, visando determinar as taxas de sujidade para diferentes localidades. Os resultados obtidos nestas pesquisas têm permitido contabilizar com menor incerteza estas perdas no processo de dimensionamento de um sistema fotovoltaico, contribuindo para a determinação do período ideal para limpeza do fotovoltaico, e no desenvolvimento de superficies anti-reflexivas e antiaderentes. Costa, Diniz e Kazmerski (2016) e (2018) fizeram uma revisão de literaturas publicadas entre os anos de 2012 a 2017 sobre os efeitos da sujidade em concentradores solares (CSP) e solar fotovoltaico (FV), e foi observado um aumento das publicações em mais de 200% ao longo deste período de cinco anos.

Segundo Sarver, Al-Qaraghuli e Kazmerski (2013), as perdas no desempenho dos sistemas fotovoltaicos devido à deposição de sujeira podem variar de 15 a 30% para condições moderadas de poeira. Essa perda pode ser ainda mais significativa quando a poeira reage com a umidade, dificultando a remoção. Al-Ammri, Ghazi e Mustafa (2013) avaliaram as perdas de potência de saída em módulos fotovoltaicos monocristalinos instalados em Bagdá, no Iraque, e observaram perdas de energia em torno de 58,9%. Cordero e outros (2018) estudaram o efeito da deposição de sujeira no desempenho dos módulos c-Si instalados em Arica, Iquique, Calama, Copiapo e La Serena, no deserto de Atacama, e foram identificadas taxas de sujeira em torno de 0,6%/dia para Arica, de 0,16%/dia para La Serena, de 0,31%/dia para Iquique, enquanto Calama e Copiapo apresentaram taxas mais baixas de aproximadamente 0,1%/dia. Fraga e outros (2018) avaliaram o impacto da deposição de sujidade no desempenho de uma usina de energia solar (p-Si) em um estádio de futebol instalado em Minas Gerais, Brasil. Observou-se que a sujidade reduziu a produção de energia em aproximadamente 16,5% durante o período seco, enquanto que no período após a precipitação essas perdas foram da ordem de 8,0%. Conceição e outros (2018) identificaram uma taxa de sujidade de 4,1%/mês em abril durante a primavera, 1,9%/mês em julho no período de verão, e 1,6%/mês em setembro no outono para a cidade de Évora em Portugal. Daher e outros (2018) avaliaram o desempenho de um sistema fotovoltaico instalado na África, e observaram que as perdas de desempenho devido à deposição de sujidades contabilizadas depois da chuva foram de 0,03%, e para o período seco foi de aproximadamente 14,23%. Micheli, Deceglie e Muller (2019) desenvolveram um mapa de taxas de sujidade indicando dados de 83 localidades nos EUA. As perdas de sujeira foram extraídas de dados coletados em estações de monitoramento ou sistemas fotovoltaicos, usando a metodologia para definição da taxa de sujidade (SRatio) e relação de sujidade diária (SRate) indicada em estudos anteriores pelos autores. O mapa mostrou que o maior impacto da sujidade ocorre na região sudoeste, com os municípios do sul da Califórnia apresentando os mais altos índices SRatio e SRate devido à alta concentração de material particulado e longos períodos secos.

Neste artigo é apresentada a metodologia para extrair a taxa de sujidade (SRatio) e a relação de sujidade diária (SRate) considerando parâmetros elétricos e térmicos medidos de estações de monitoramento instaladas em três diferentes zonas climáticas brasileiras: (i) Zona de clima tropical – Belo Horizonte/MG, (ii) clima temperado – Porto Alegre/RS e (iii) clima árido – Brotas de Macaúba/BA, conforme especificações indicadas em normas técnicas como a IEC 61724-1 e IEC 62670-3). O objetivo principal desta pesquisa é fornecer informações relevantes quanto as perdas por sujidade que poderão ser utilizadas na estimativa de desempenho de sistemas fotovoltaicos a serem instalados no Brasil, conforme solicitado no Manual de Instruções para Solicitação e Habilitação Técnica de Empreendimentos Fotovoltaicos pela Empresa de Pesquisa Energética.

#### 2. METODOLOGIA

A estação de monitoramento de sujidade utilizada neste trabalho é composta por um módulo ou célula FV de referência, mantido sempre limpo, denominado limpo  $PV_1$ , e um módulo deixado à deposição natural de sujidades, denominado  $PV_2$ , Fig. 1. Os dispositivos  $PV_1$  e  $PV_2$  são conectados a uma unidade de controle e medição, sendo possível acesso remoto. Para a estação de silício, composta por um módulo  $PV_2$  de 265 Wp e uma célula solar como dispositivo  $PV_1$ , a limpeza da célula de referência é realizada diariamente através de um sistema automático de limpeza fornecido pelo próprio fabricante Atonometrics. Já a estação de telureto de cádmio composta por dois módulos fotovoltaicos de 110 Wp, a limpeza do dispositivo  $PV_1$  é realizada diariamente, manualmente, utilizando materiais não abrasivos. As estações de sujidade fornecem dados elétricos, térmicos e dados de irradiância medidos dos dispositivos  $FV_1$ , em intervalo de um minuto.

Estações de monitoramento de sujidade de silício policristalino e de telureto de cádmio foram instalados no Grupo de Estudos em Energia da PUCMinas em Belo Horizonte/MG (latitude - 19,92°, longitude -43,99°), PUC do Rio Grande do Sul em Porto Alegre/RS (Latitude -30,05°, Longitude -51,17°) e na área de pesquisa pertencente a Universidade Federal de Santa Catarina localizada na cidade de Brotas de Macaúba/BA (Latitude -11,99°, Longitude - 42,62°), todas com as mesmas configurações, variando somente em relação a inclinação dos módulos fotovoltaicos.

As estações de sujidade possuem períodos diferentes de operação, variando entre oito meses a dois anos de dados coletados entre os anos de 2017 a 2019 (Belo Horizonte entre 07/2017 a 10/2019, Porto Alegre entre 06/2018 a 10/2019, e Brotas de Macaúbas entre 02/2019 a 10/2019).

Para determinar a taxa de sujidade foi utilizada a relação entre desempenho real e esperado. A taxa de sujidade (SRatio) é obtida através da relação entre a corrente de curto-circuito ou potência extraída do módulo fotovoltaico com sujidade e a corrente de curto-circuito ou potência proveniente do módulo limpo sob as mesmas condições de operação. A taxa de sujidade varia de zero a um, adimensional, sendo considerados críticos locais em que a taxa de sujidade é próxima de zero. É importante ressaltar que em casos de deposição não uniforme da sujidade, a taxa de sujidade para corrente de curto-circuito em comparação com a SRatio para potência no ponto de máxima potência medidos em um módulo fotovoltaico de silício pode indicar resultados diferentes, devido a atuação do diodo by-pass.

Como as estações se diferenciam, pois, a estação 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 (somente para o módulo), foram utilizadas diferentes equações para calcular a taxa de sujidade. A taxa de sujidade (*SR*) para a estação de tecnologia CdTe é definida como:

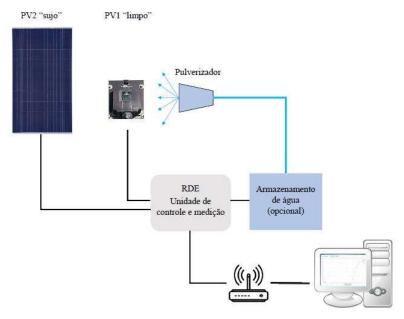


Figura 1 – Estrutura da estação de monitoramento de sujidade de silício.

$$SR_{I_{SC}} = \left(\frac{I_{SCSujo}}{I_{SClimpo}}\right) \tag{1}$$

$$SR_{P_{max}} = \left(\frac{P_{max_{Sujo}}}{P_{max_{limno}}}\right) \tag{2}$$

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.

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

$$SR_{I_{SC}} = \frac{I_{SC_{Sujo}}}{I_{SC_{0}} * \left(1 + \alpha * \left(T_{m_{Sujo}} - T_{0}\right)\right) * \left(\frac{POA}{G_{0}}\right)}$$
(3)

$$SR_{P_{max}} = \frac{P_{max_{sujo}}}{P_{max_0} * \left(1 + \gamma * \left(T_{m_{sujo}} - T_0\right)\right) * \left(\frac{POA}{G_0}\right)}$$
(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,  $I_{sc_0}$  e  $P_{max_0}$  são a corrente de curto-circuito e potência do módulo na condição de referência ( $Standard\ Test\ Condition\ -\ STC$ ),  $\alpha$  e  $\gamma$  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 irradiância solar na condição de referência ( $1000\ W/m^2$  e  $25\ ^{\circ}C$ ), e POA é a irradiância solar incidente sobre o plano do módulo inclinado medido pela célula de referência.

Após a determinação da taxa de sujidade, esta foi comparada com a variação da precipitação diária acumulada para o período avaliado, coletada por estações meteorológicas compactas instaladas próximas as estações de sujidade. Essa comparação permitiu identificar o comportamento das perdas ao longo de períodos secos e calcular a relação de sujidade diária para a localidade. A relação de sujidade diária (SRate) é a fração da razão de sujidade por dia durante o período seco, com ausência de chuva. Os valores da relação de sujidade diária representam as perdas diárias causadas pela sujidade no desempenho de módulos fotovoltaicos. Esses valores são negativos, podendo ser caracterizados como um coeficiente de perda que deve ser subtraída a previsão da produção de energia diária de módulos fotovoltaicos. Quanto mais próximo de zero for a relação de sujidade diária, menor será o impacto da sujidade no desempenho da tecnologia fotovoltaica. Dessa forma a relação de sujidade diária foi determinada utilizando o estimador Theil-Sen (Rettes, 2017), que calcula a inclinação do SRatio ao longo do período seco, fornecendo a perda diária devido a sujidade (SRate).

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Estação de sujidade instalada em Belo Horizonte

As estações de sujidade localizadas em Belo Horizonte foram instaladas em março de 2017, porém durante os primeiros meses de coleta de dados ocorreram problemas relacionadas à medição e armazenamento dos dados meteorológicos, sendo a operação normalizada no mês de julho do mesmo ano. Essa estação é considerada como piloto, pois o que foi e é desenvolvido através de monitoramento realizado nesta estação, é replicado nas outras estações de forma remota, devido à distância entre o laboratório e as áreas de testes. Belo Horizonte está localizada na zona climática Equatorial, Aw, conforme nomenclatura da classificação climática de Köppen-Geiger (1928), em uma zona de transição entre o grupo climático Equatorial e Subtropical.

A análise do impacto da deposição de sujidades sobre os módulos fotovoltaicos de telureto de cádmio (CdTe) e silício policristalino (p-Si) foi realizada no período de julho de 2017 a novembro de 2019, totalizando dois anos e quatro meses de análise de dados.

Nos meses entre dezembro de 2018 a maio de 2019, a estação de CdTe apresentou um problema de coleta de dados indicando um deslocamento de tempo de medição realizado no PV<sub>1</sub> e PV<sub>2</sub>, comprometendo a avaliação. Por este motivo, a estação foi retirada de operação para realização dos devidos reparos, sendo reinstalada em setembro de 2019. Entre os meses de julho e setembro de 2019, uma estação de sujidade com diferente configuração foi utilizada para medição dos dados. Essa estação é composta por duas unidades de controle e medição, sendo cada unidade conectada a um módulo fotovoltaico separadamente, fornecendo dados de parâmetros elétricos e térmicos. Durante este tempo, somente dados do módulo fotovoltaico CdTe deixado à deposição de sujidades (PV<sub>2</sub>) foram coletados, e a taxa de sujidade (SRatio) foi determinada através do uso de um fator de correção obtido através da utilização de um filtro KG-1, permitindo comparar os parâmetros elétricos medidos na célula de referência de silício (PV<sub>1</sub>) com o módulo fotovoltaico de telureto de cádmio (PV<sub>2</sub>). Esse fator de correção é necessário, pois cada tecnologia possui diferente resposta espectral, sendo que neste período (12/2018 a 09/2019), a taxa de sujidade foi determinada utilizando a equação de SRatio para a tecnologia de silício cristalino (Eq. 3 e 4). A Fig. 2 mostra a comparação entre o SRatio medido e o estimado utilizando o fator de correção que permite comparar os dados do módulo CdTe com sujidade e a célula de referência de silício mantida sempre limpa. A incerteza média encontrada quanto ao uso do fator de correção foi em torno de 1% e a máxima incerteza identificada foi de 7%, para SRatio variando de 0 a 1, ou seja, o erro persistiu na terceira casa decimal.

A Fig. 3 apresenta os valores médios diários calculados das taxas de sujidade para corrente de curtocircuito e potência (SR<sub>Isc</sub> e SR<sub>Pmax</sub>) para CdTe (Fig. 3a) e p-Si (Fig.3b) relacionados com dados de precipitação acumulada diária para a cidade de Belo Horizonte/MG. Pode ser observado que o SRatio decresceu ao longo dos períodos secos, indicando acúmulo de sujidades. Após eventos de precipitação acumulada acima de 20 mm, o SRatio aproximou ou retornou para "1" representando a limpeza natural do módulo fotovoltaico. O SRatio médio para o período avaliado foi de aproximadamente 0,94 para CdTe e 0,92 para p-Si. Na Fig. 3(a) estão assinalados três intervalos que indicam medidas tomadas em relação a operação da estação de sujidade de telureto de cádmio durante a análise:

- Intervalo (a): detecção de erros de medição indicando valores arbitrários de irradiância e parâmetros elétricos dos módulos PV<sub>1</sub> e PV<sub>2</sub>, o que resultou em valores baixos de SRatio mesmo durante período chuvoso em que ambos os módulos estavam limpos;
- Intervalo (b): a estação foi substituída por uma estação reserva, porém, por possuir duas unidades de controle e medição, os dados de potência medidos nos módulos PV1 e PV2 apresentaram diferentes intervalos de tempo de medição, ocasionando na redução do SRatio para potência, e consequentemente, no afastamento da curva em relação ao SRatio para corrente de curto-circuito. Além disso, a sujidade depositada anteriormente foi removida devido a troca dos módulos fotovoltaicos para realização de testes na estação, comprometendo a determinação do SRatio para este período seco de 102 dias;
- Intervalo (c): a estação original foi reinstalada após reparos, normalizando a coleta de dados.

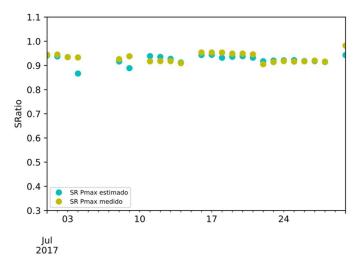


Figura 2 – Taxa de sujidade média diária estimada e medida em julho de 2017 para tecnologia telureto de cádmio instalada na cidade de Belo Horizonte/MG

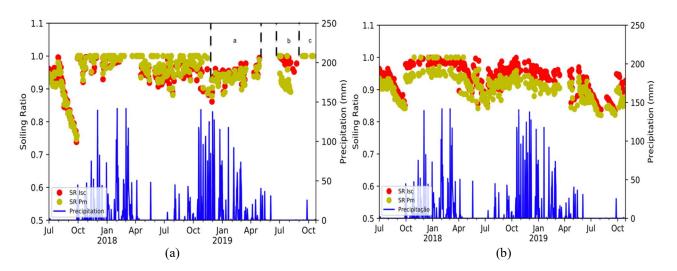


Figura 3 – Taxa de sujidade média diária relacionada com a precipitação acumulada diária para a cidade de Belo Horizonte/MG: (a) CdTe e (b) p-Si.

Durante todo o período de coleta de dados, sete períodos secos foram registrados e os valores do SRatio para o último dia seco de cada período foi determinado e é indicado na Tab. 1. É possível notar que os SRatio para a tecnologia fotovoltaica de telureto de cádmio registrado nos últimos dias dos períodos secos foram menores se comparados com o silício cristalino. Isso ocorre devido a diferença entre as respostas espectrais das tecnologias. A sujidade impacta, mais severamente, comprimentos de onda menores, fazendo com que as perdas de desempenho devido a deposição de sujidades sejam maiores em módulos fotovoltaicos de CdTe ( $\lambda \sim 300$  a 900 nm) do que em módulos de silício cristalino ( $\lambda \sim 400$  a 1100 nm).

No último período seco registrado, período (7), o SRatio referente ao último dia de estiagem foi em torno de 0,86 para p-Si, valor este próximo ao identificado para o período mais seco de 102 dias. Esse resultado pode ser justificado devido o aumento do índice de material particulado no final de setembro e início de outubro. No período de análise foi observado que a média de material particulado para Belo Horizonte/MG foi de aproximadamente 12 μg/m3 com valores máximos em torno de 20 μg/m3. Porém, devido a queimadas registradas em matas ao redor da cidade, pôde ser notado um aumento do índice de material particulado atingindo valores de PM<sub>2.5</sub> em torno de 40 μg/m3 e PM<sub>10</sub> de aproximadamente 45 μg/m3.

Tabela 1 – Relação períodos secos e SR<sub>Pm</sub> médio diário para CdTe e p-Si

Período	Estação	Período seco	Número de dias	SRatio média diária	
				CdTe	p-Si
(1)	Outono/Inverno	05/07/2017 - 27/09/2017	85	0,73	0,84
(2)	Outono	13/04/2018 - 18/05/2018	36	0,92	0,88
(3)	Outono/Inverno	21/05/2018 - 10/07/2018	51	0,88	0,84
(4)	Inverno	12/07/2018 - 01/08/2018	21	0,92	0,91
(5)	Inverno	18/08/2018 - 03/09/2018	17	0,96	0,93
(6)	Outono/Inverno	04/06/2019 - 13/09/2019	102	-	0,82
(7)	Primavera	28/09/2019 - 21/10/2019	24	1,00	0,86

No caso de deposição não-uniforme, esta pode ser identificada mediante comparação entre a curva de SRatio para corrente de curto-circuito e potência, porém essa análise só é possível para tecnologia de silício cristalino devido a presença do diodo by-pass. Na Fig. 3b é possível observar que a taxa de sujidade para potência e corrente de curto- circuito são próximas nos períodos entre julho e outubro dos anos analisados, ocorrendo um pequeno afastamento entre as curvas nos demais meses do ano, meses em que há maiores índices de precipitação acumulada. Isso ocorre, pois, a incidência de precipitação promove a limpeza dos módulos, porém tende a deslocar e acumular a sujidade na parte inferior do módulo devido a existência da moldura que funciona como uma barreira para o escoamento, como pode ser visto na Fig. 4. Além disso, as gotas d'água formadas sobre a superfície do módulo após a ocorrência de chuvas, pode funcionar como sombreamento parcial, fazendo com que a irradiância incidente sobre o ponto onde há a gota seja refletida.



Figura 4 - Acúmulo de sujidades na parte inferior do módulo de p-Si instalado em Belo Horizonte/MG

Por fim, o SRate foi determinado a partir da média da inclinação do SRatio para os sete períodos secos registrados para Belo Horizonte/MG utilizando o estimador de Theil-Sen. O SRate médio foi de aproximadamente -0,14%/dia para p-Si e de -0,20%/dia para CdTe.

# 3.2 Estação de sujidade instalada em Porto Alegre

As estações de monitoramento de sujidade foram instaladas em Porto Alegre no final de maio de 2018, iniciando as operações em junho do mesmo ano. A cidade de Porto Alegre está localizada na zona climática subtropical ou temperado, apresentando índices elevados de umidade e altas temperaturas durante o verão. A Fig. 5 mostra os resultados de SRatio<sub>Isc</sub> e SRatio<sub>Pmax</sub> para as tecnologias de CdTe e p-Si ao longo de 1ano e 3 meses. O SRatio médio para o período analisado foi de 0,97 e 0,98 para CdTe e p-Si, respectivamente. É interessante observar que a precipitação média acumulada diária é menor para a cidade de Porto Alegre/RS se comparado com Belo Horizonte/MG. Porém, a alta frequência de precipitação contribui para a limpeza constante dos módulos, fazendo com que o SRatio permaneça próximo de "1", ou seja, estado em que os módulos estão completamente limpos, o que impossibilitou a determinação do SRate. O maior período seco registrado para a localidade foi de 12 dias sem precipitação, resultando em um SRatio médio para o último dia do período seco de 0,95 para CdTe e 0,97 para p-Si.

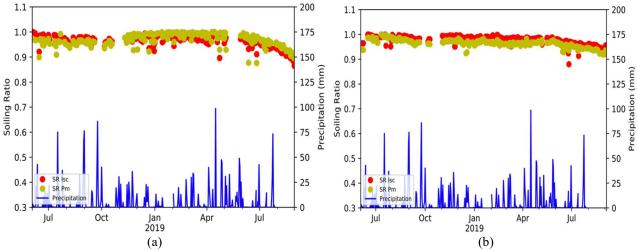


Figura 5 – Taxa de sujidade média diária relacionada com a precipitação acumulada diária para a cidade de Porto Alegre/RS: (a) CdTe e (b) p-Si.

## 3.3 Estação de sujidade instalada em Brotas de Macaúbas

A cidade de Brotas de Macaúbas está localizada na zona climática árida (semi-árido), apresentando baixa umidade relativa do ar e altas temperaturas ao longo de todo ano. Para esta cidade, as estações de monitoramento de sujidade foram instaladas em fevereiro de 2019. Os dados coletados nestas estações mostraram que são influenciados significativamente pela ação do vento, diferente do observado nas outras localidades analisadas, podendo ser justificado devido o alto índice de velocidade do vento nesta região e a proximidade em relação a uma usina eólica que está localizada ao lado da área de teste.

Na Fig. 6 são apresentados os valores de SRatio para corrente de curto-circuito e potência para as tecnologias de CdTe e p-Si instaladas em Brotas de Macaúbas, durante os meses de março e outubro de 2019. Pode ser observado que o SRatio para as duas tecnologias se mantém próximo de "1", mesmo ao longo de períodos secos, devido a influência da velocidade do vento. Neste caso, a sujidade que é depositada sobre os módulos fotovoltaicos, passa pelo processo de resuspensão, fazendo com que as partículas não se acumulem sobre a superfície dos dispositivos. O SRatio médio para o período avaliado foi de 0,99 para CdTe e 0,95 para p-Si.

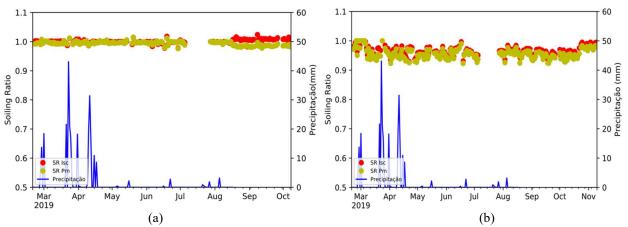


Figura 6 – Taxa de sujidade média diária relacionada com a precipitação acumulada diária para a cidade de Brotas de Macaúbas/BA: (a) CdTe e (b) p-Si.

Uma observação importante que pode ser feita está relacionada com o comportamento do SRatio à altas temperaturas de operação do módulo fotovoltaico. A influência dos altos índices de temperatura ambiente, e consequentemente da alta temperatura de operação do módulo, no desempenho do fotovoltaico foi maior em Brotas de Macaúbas do que nas outras localidades avaliadas. Em Brotas de Macaúbas, a temperatura do módulo média atingiu valores acima de 65 °C, enquanto nas outras cidades foram registradas temperaturas em torno de 55 °C. A Fig. 7 mostra a influência da temperatura do módulo na variação do SRatio para CdTe e p-Si. Os módulos de silício cristalino são mais sensíveis a elevadas temperaturas em comparação com as tecnologias de filme fino, fazendo com que o SRatio para silício cristalino apresente comportamento inverso ao da temperatura. Pode ser observado na Fig. 8 entre os meses de junho e julho, a temperatura do módulo sofre uma pequena redução, ocasionando o aumento do SRatio. Este resultado é consistente com outros relatórios que indicam que a sujidade é mais severa em superfícies com temperaturas elevadas (Abdullah e outros, 2018 e Jaszczur e outros, 2018

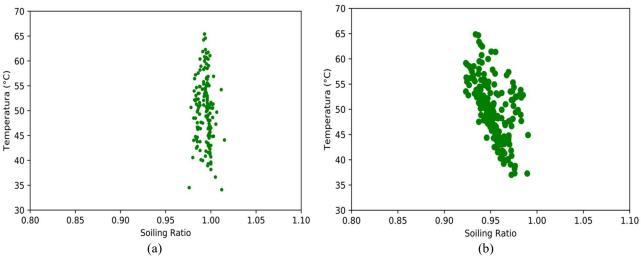


Figura 7 – Relação entre SRatio e temperatura de operação do módulo em Brotas de Macaúbas/BA: (a) CdTe e (b) p-Si.

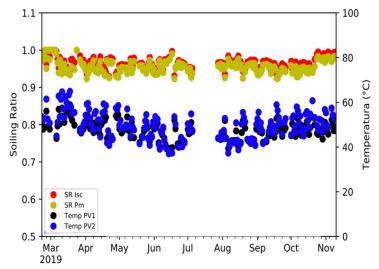


Figura 8 - Relação entre SRatio e temperatura de operação do módulo p-Si em Brotas de Macaúbas/BA.

# 4. CONCLUSÃO

Este artigo apresenta uma metodologia para extração da taxa de sujidade utilizando dados coletados de estações de monitoramento de sujidade. O objetivo deste estudo é fornecer informações quanto as perdas de desempenho ocasionadas devido a deposição de sujidade, considerando a influência de variáveis meteorológicas de diferentes zonas climáticas brasileiras. Para isso, estações de monitoramento de sujidade foram instaladas em: (1) Belo Horizonte/MG inserida na zona climática Equatorial com longa estação seca durante o inverno e elevado índice de precipitação acumulada durante o verão; (2) Porto Alegre/RS inserida na zona climática subtropical ou temperada apresentando altos índices de umidade relativa, altas temperaturas durante o verão e alta frequência de chuva; e (3) Brotas de Macaúbas/BA inserida na zona climática semi-árida com baixo índice de umidade relativa, altas temperaturas ao longo de todo ano e baixo índice de precipitação acumulada.

A taxa de sujidade (SRatio) e a relação de sujidade diária (SRate) foram determinadas a partir da medição de parâmetros elétricos e térmicos dos módulos fotovoltaicos nas estações de sujidade. A cidade de Belo Horizonte/MG apresentou sete períodos de estiagem, sendo o primeiro e o sexto período, os de maiores dias de estiagem contabilizando 85 e 102 dias, respectivamente. No primeiro e no sexto período foram registrados SRatio de aproximadamente 0,84 e 0,82 para tecnologia de p-Si, respectivamente. Já para a tecnologia de telureto de cádmio, o SRatio para o primeiro período foi de aproximadamente 0,73, e para o sexto período, esse valor não pode ser identificado devido a não deposição de sujidade contínua ao longo do período de estiagem como consequência da troca dos módulos fotovoltaicos para realização de testes na estação de monitoramento. Porém, a comparação do SRatio identificado para o primeiro período mostrou que a tecnologia CdTe é mais afetada pela deposição de sujidades se comparado com a tecnologia de silício cristalino. Esse resultado pode ser explicado devido à diferença da largura da banda gap das duas tecnologias, apresentando diferentes sensibilidades para cada comprimento de onda. A sujidade afeta, mais severamente, tecnologias que apresentam comprimentos de onda menores, ou seja, os módulos de silício amorfo e de CdTe sofrem maiores perdas de desempenho,

devido à deposição de sujidades, do que os de tecnologia de silício cristalino e CIGS (Qasem e outros, 2014). A relação de sujidade diária (SRate) foi calculada a partir da média das inclinações do SRatio ao longo dos períodos de estiagem, resultando em valores em torno de -0,20%/dia e -0,14%/dia, para tecnologia CdTe e p-Si, respectivamente.

Os dados obtidos através da medição e tratamento de dados coletados nas estações de monitoramento de sujidade instaladas em Porto Alegre/RS, indicou um SRatio médio para o período analisado de 0,97 para CdTe e 0,98 para p-Si. Durante o período de análise não foi observado longos períodos de estiagem, impossibilitando a determinação da relação de sujidade diária (SRate). O maior período seco registrado para a localidade foi de 12 dias sem precipitação, o que resultou em um SRatio médio para o último dia do período seco de 0,95 para CdTe e 0,97 para p-Si.

Já na cidade de Brotas de Macaúbas foi possível avaliar a relação entre as perdas de desempenho da tecnologia fotovoltaica originadas pela deposição de sujidade e a elevada temperatura de operação. Os dados medidos mostraram que o SRatio permanece próximo de "1" durante quase todo o período, indicando estado de limpeza dos módulos. Esse efeito, mesmo com baixos índices de precipitação acumulada, é resultado da ação da alta velocidade do vento que é acrescida pela influência da usina eólica localizada ao lado das estações de sujidade, promovendo a re-suspensão das partículas de sujidade que são depositadas na superfície dos módulos fotovoltaicos. A taxa de sujidade (SRatio) médio para o período avaliado foi de 0,99 para CdTe e 0,95 para p-Si. Apesar da tecnologia CdTe apresentar maiores perdas de desempenho devido a deposição de sujidades, a temperatura de operação neste caso é determinante para o desempenho do fotovoltaico, indicando a tecnologia CdTe como melhor alternativa para esta localidade.

Espera-se que os resultados deste estudo possam contribuir para a redução das incertezas no processo de previsão da produção de energia de sistemas fotovoltaicos, além de contribuir para a escolha da tecnologia mais adequada para cada localidade em coerência com dados meteorológicos e de sujidade.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e as instituições internacionais NREL (*National Renewable Energy Laboratory*) e RASEI/CU (*Renewable and Sustainable Energy Institute/University of Colorado*) pelo apoio ao desenvolvimento desta pesquisa. Os autores também agradecem o apoio da Atonometrics, e as parcerias com a Universidade Federal de Santa Catarina e PUC do Rio Grande do Sul que foram de grande valia para o desenvolvimento deste trabalho.

### REFERÊNCIAS

- Abdullah, I., Akayleh, A., & Al-Soud, M. (2018). Self-cleaning and self-cooling photovoltaic system with feedback control. International Journal of Energy and Environment 9(1), 49-56.
- Al-Ammri, A. S.; Ghazi, A.; Mustafa, F. Dust effects on the performance of PV street light in Baghdad city. Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), p. 18–22, 2013.
- Braga, D. S.; Diniz, A. S. A. C.; Costa, S. C. S.; Kazmerski, L. L.; Bhaduri, S.; Maia, C. B.; Camatta, V.; Viana, M. M.; Barbosa, E. M. C.; Brito, P. P.; Campos, C. D.; Hanriot, S. M. Uniform and Non-Uniform Soiling of PV Modules: A Comprehensive Study of Performance and Temperature Effects. Proceedings 45th IEEE Photovoltaic Specialists Conference and the WCPEC-7, Hawaii, 2018 (IEEE, NY; 2018).
- Cordero, R.R.; Damiani, A.; Laroze, D.; MacDonell, S.; Jorquera, J.; Sepúlveda, E.; Feron, S.; Llanillo, P.; Labbe, F.; Carrasco, J.; Ferrer, J.; Torres, G. Effects of soiling on photovoltaic (PV) modules in the Atacama Desert. Scientific Reports, v. 8, 2018.
- Costa, S. C. S.; Diniz, A.S.A.C., Kazmerski, L.L. 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, 2016.
- Costa, S. C. S.; Diniz, A.S.A.C., Kazmerski, L.L. Solar energy dust and soiling R&D progress: Literature review update for 2016. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 82, p. 2504 2536, 2018.
- Daher, D.H., Gaillard, L., Amara, & Ménézom C. (2018). Impact of tropical desert maritime climate on the performance of PV grid-connected power plant. Renewable Energy 125, 729-737.
- Fraga, M. M.; Campos, B. L. O.; Almeida, T. B.; Fonseca, J. M. F.; Lins, V. F. C. Analysis of the soiling effct on performance of photovoltaic modules on a soccer stadium in Minas Gerais, Brazil. Solar Energy, v. 163, p. 387 397, 2018.
- International Electrotechnical Commission (IEC). IEC 62670-3: Photovoltaic concentrators (CPV) Performance testing Part 3: Performance measurements and power rating, 2015.
- International Electrotechnical Commission (IEC). IEC 61724-1: Photovoltaic system performance Part 1: Monitoring, 2017.
- Jaszczur, M., Hassan, Q, Teneta, J. (2018). Study of dust deposition and temperature impact on solar photovoltaic module. MATEC Web of Conferences 240, 04005. https://doi.org/10.1051/matecconf/ 201824004005
- Micheli, L.; Deceglie, M; Muller, M. Mapping photovoltaic soiling using spatial interpolation techniques. Journal of Photovoltaics, v. 9, p. 272 277, 2019.
- National Renewable Energy Laboratory (NREL). Best Research-Cell Efficiencies. Disponível em:<a href="https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/pv-efficiencies-07-17-2018.pdf">https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/pv-efficiencies-07-17-2018.pdf</a>. Acessado em: 31 out. 2019.
- Osterwald, C.; McMahon, T. History of accelerated and qualification testing of terrestrial photovoltaic modules: A literature review. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, v. 17, p. 11 33, 2009.

Sarver, T.; Al-Qaraghuli, A.; Kazmerski, L. L. A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 22, p. 698 – 733, 2013.

# DETERMINATION OF SOILING RATIO FOR THIN-FILM AND CRYSTALLINE SILICON PHOTOVOLTAIC MODULES INSTALLED IN DIFFERENT BRAZILIAN CLIMATE ZONES

Abstract. The soiling accumulation on photovoltaic modules (PV) induces the performance reduction of these devices, may be even more aggravating in regions considered attractive for the application of this technology, where irradiance is high throughout the year, but under a predominance of dry and arid climate suitable for deposition of soiling. The effects of soiling accumulation on PV module performance are specific to each site, since the deposition behavior and the physical-chemical composition of the contaminants are influenced by a set of site-specific variables of installation the photovoltaic modules. In this scenario, this paper presents a methodology to quantify soiling ratio (SRatio) and soiling rate (SRate) in cadmium telluride (CdTe) and polycrystalline silicon (p-Si) PV modules by measurements done at monitoring stations installed in different climatic zones of Brazil. The results indicated: (1) Belo Horizonte/MG (latitude -19.92°, longitude -43.99°), an average SRatio for the period of analysis of 0.94 for cadmium telluride (CdTe) and 0.92 for polycrystalline silicon (p-Si); (2) Porto Alegre/RS, (Latitude -30.05°, Longitude -51.17°), a SRatio around 0.97 and 0.98 for CdTe and p-Si technologies, respectively; and (3) Brotas de Macaúbas/BA (Latitude -11.99°, Longitude -42.62°), SRatio of 0.99 and 0.95 for CdTe and p-Si technologies, respectively. From the SRatio characteristics, dry period data were used to estimate SRate using the Theil-Sen estimator, resulting in mean values of -0.20%/day for CdTe and -0.14%/day to Belo Horizonte/MG. The higher SRate for CdTe technology may be justified by the difference in spectral responses of the two PV technologies, as soiling has a greater impact on photovoltaic technologies of shorter wavelength.

Key words: Soiling Ratio, Climate Zones, Photovoltaic Technologies.