

ESTIMATIVA DA TAXA DE SUJIDADE DA PLANTA FOTOVOLTAICA DO IFCE – CAMPUS CEDRO: UM ESTUDO DE CASO

José Janiere Silva de Souza – janieresouza@dee.ufc.br
Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica
Instituto Federal do Ceará, Campus Cedro
Paulo Cesar Marques de Carvalho
Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica

Resumo. Em virtude do crescente interesse pelos sistemas fotovoltaicos (FV) um esforço adicional deve ser empregado na melhoria da eficiência de conversão de células FV e na mitigação de fatores que afetam o desempenho de geração de plantas FV durante sua operação. Nesse sentido, um dos principais métodos de melhoria da eficiência de plantas FV após a instalação é a mitigação de sujidade da superfície dos módulos. Assim, o presente artigo tem como finalidade apresentar os resultados preliminares de um estudo sobre a determinação da Taxa de Sujidade (Soiling Rate – SRate) em um planta FV de 92,43 kWp com módulos monocristalinos (m-Si) instalada na cidade de Cedro no interior do Ceará pertencente ao Instituto Federal do Ceará (IFCE – Campus Cedro). Para o período analisado, 26/03/2022 a 15/10/2023, o valor médio da Relação de Desempenho Corrigida pelo Clima (Weather-Corrected Performance Ratio – PR_{Corr}) é de 0,56 enquanto o volume médio de diário de precipitações é de 2,49 mm/dia. A partir da identificação de períodos secos com duração superior a 14 dias é possível determinar que a SRate da planta varia entre -0,558%/dia e -0,021%/dia para períodos secos com duração de 15 e 51 dias, respectivamente. De modo geral, SRate da planta FV do IFCE - Campus Cedro é de -0,160%/dia estando esse valor alinhado a valores de SRate determinados em outros estudos.

Palavras-chave: IFCE – Campus Cedro, Taxa de Sujidade, Fotovoltaico

1. INTRODUÇÃO

De acordo com a *International Energy Agency* (IEA, 2022) a geração fotovoltaica (FV) em escala comercial se apresenta como a forma mais competitiva de geração em diversas partes do mundo; todavia, a implementação de novas usinas FV em grande escala tornar-se-á cada vez mais desafiadora, devido à ausência de localidades com recurso solar favorável. Nesse sentido, um esforço adicional deve ser empregado na melhoria da eficiência de conversão de células FV e na mitigação de fatores que afetam o desempenho de geração de plantas FV durante sua operação, dentre os quais se destaca a sujidade.

Após a instalação, um dos principais métodos de melhoria da eficiência de plantas FV é a mitigação de sujidade da superfície dos módulos; a sujidade absorve ou dispersa a irradiância que deveria atingir as células FV, sendo a deposição influenciada por fatores como chuva, temperatura, umidade, velocidade do vento e inclinação (Nurjanah; Dewi; Rusdianasari, 2021). Diferentes fatores devem ser considerados ao projetar mecanismos de limpeza, como a inclinação, tipo de módulo e a metodologia de limpeza (úmida ou seca) (Laksahani *et al.*, 2021). Segundo estimativas de Ilse *et al.* (2019) em 2023, mesmo com adoção de cronogramas de limpeza otimizados, as perdas por sujidade serão entre de 4 a 5%, que equivalem a perdas de 4 a 7 bilhões de euros; um dos motivos que justificam as perdas por sujidade é o incremento de novas instalações FV em regiões com altos níveis de irradiação e altamente expostas à sujidade, como China e Índia.

Contudo, o relatório *Soiling Losses – Impact on the Performance of Photovoltaic Power Plants* da IEA (Schill *et al.*, 2022) pondera que os níveis de perdas global por sujidade devem ser maiores, visto que, o cenário traçado em Ilse *et al.* (2019) considera que todos os sistemas FV são submetidos a cronogramas otimizados de limpeza. Além disso, o incremento de novos sistemas FV instalados em telhados tende a contribuir com o agravamento dos impactos globais devido a sujidade. Ademais, os impactos das mudanças climáticas não devem ser negligenciados, visto que o aumento da temperatura global provoca maior aridez nos solos e aumenta os riscos de incêndios florestais e, como consequência, provoca o aumento de material particulado suspenso no ar (Ilse *et al.*, 2019). Diante desse cenário, há um crescente interesse da comunidade científica em investigar os efeitos e características da sujidade em plantas com diferentes tecnologias FV (Souza; Carvalho; Barroso, 2022).

Na literatura diferentes métricas de avaliação são usadas para estimar o impacto da sujidade em sistemas FV (Souza; Carvalho; Barroso, 2022). A Relação de Sujidade (SRatio), por exemplo, é a relação entre a corrente de curto-circuito (I_{sc}), ou potência máxima ($P_{Máx}$), de um módulo limpo e um sujo sob as mesmas condições de operação; essa métrica é adimensional e varia entre 0 e 1: valores próximos de 1 indicam menor impacto de sujidade. Por outro lado, a Taxa de Sujidade (SRate) representa a redução percentual diária da SRatio devido à ausência de limpeza; inicialmente devem ser identificados os períodos de seca aos quais o módulo fotovoltaico estão exposto (MICHELI *et al.*, 2017).

Em Zitouni *et al.* (2019) a diferença na produção entre módulos monocristalinos (m-Si) limpos e sujos instalados em Benguerir (Marrocos) é de 4,56 kWh (dia sem chuva) e 0,03 kWh (dia chuvoso). Após um período seco de 43 dias, a perda média é de 2,7 kWh/dia e a Relação de Desempenho (*Performance Ratio – PR*) varia entre 0,3%/dia e 15,3%/dia. No período chuvoso, a perda média é de 0,007 kWh/dia, e a variação média do PR é de 0,025%/dia (variação máxima de 1,8%/dia). A Taxa de Sujidade (*Soiling Rate – SRate*) é de -0,32%/dia no período seco e -0,02%/dia no período chuvoso.

Ao analisar os períodos secos (P1 e P3) e úmido (P2) Zitouni *et al.* (2021) apontam que a Relação de Sujidade (*Soiling Ratio – SRatio*) de uma planta FV com módulos m-Si instalados em Benguerir (Marrocos) muda de 1 para 0,83 (17% de redução) durante o P1, retornando para 0,85 (15% de acréscimo) após uma precipitação; durante P3, SRatio é 0,72 (redução de 28%). Assim, em P1 e P3, SRate é -0,17%/dia e -0,35%/dia, respectivamente, e aproximadamente nula para P2. Após 1 ano de exposição, são computadas perdas de 28% por sujidade, equivalente a 82,5 kWh.

Em Azouzoute *et al.* (2021a) é relatado que para uma planta FV com módulos m-Si em Benguerir (Marrocos) a SRatio durante o período P1 (chuvas de alta intensidade) fica em torno de 1 (redução máxima de 5%); SRate é de -0,0079%/dia. Para P2 (chuvas de baixa intensidade), SRatio chega a 0,73 (perda máxima); devido a uma precipitação de 0,1 mm/dia, SRatio varia de 0,74 a 0,84; SRate é estimado em -0,14%/dia.

Em Abraim *et al.* (2023) são analisados 5 períodos distintos, denominados P1 até P5, que uma planta em Ben Guerir (Marrocos) está submetida. Nota-se que P1 possui o maior valor de SRate (-0,25%/dia); nos períodos P2 a P5 apresentam valores de SRate menos significativos (-0,11%/dia - P2; -0,16%/dia - P3; -0,15%/dia - P4; -0,10%/dia - P5) e chuvas pontuais.

Luque, Antonanzas-Torres e Escobar (2018) investigam os efeitos da sujidade em módulos m-Si bifaciais instalados em Santiago (Chile). De modo geral, é apontado que SRate média é de -0,301%/dia para o minimódulo monofacial e -0,236%/dia para a face frontal de um módulo bifacial; SRate da parte traseira é de -0,0394%/dia.

Diante do exposto, o presente artigo tem como finalidade apresentar os resultados preliminares de um estudo sobre a determinação de SRate em uma planta FV de 92,43 kW_p com módulos monocristalinos (m-Si) instalada na cidade de Cedro; o local em que a planta está instalada se caracteriza como um ambiente urbano com clima semiárido do interior do Ceará.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Sujidade

Um módulo com sujidade depositada em sua superfície pode estar sujeito a condições de sombreamento parcial a depender da distribuição (uniforme ou não uniforme) e da espessura da camada de sujidade. Tipicamente a deposição não uniforme é observado em módulos FV com molduras, onde há maior propensão de acúmulo de sujidade nas extremidades inferiores em virtude do deslocamento das partículas provocadas pela chuva, sobretudo, em módulos instalados com pequenos ângulos de inclinação; dependendo da localidade pode haver padrões de deposição distintos mesmo em módulos próximos. A deposição não uniforme compromete o desempenho elétrico dos módulos FV e pode acarretar o surgimento de pontos quentes que, eventualmente, podem danificar de forma permanente as células FV (Braga, 2018). Adicionalmente é válido ressaltar que a deposição não uniforme de sujidade pode também ser relacionada à presença de excrementos de animais, assim como pela proliferação de fungos, musgo e algas.

As partículas presentes na atmosfera têm origem em processos naturais ou decorrem de atividades antropológicas. Geralmente, queima de combustíveis, processos mecânicos, moagem, beneficiamento mineral e resuspensão de poeira, por exemplo, resultam na emissão de um conjunto de elementos químicos associados a cada processo; outro ponto a ser observado é a forma química que o elemento apresenta, pois há diferença nas propriedades químicas e físicas e, como consequência, haverá variação no processo de transporte ambiental de formas químicas distintas (Schwela; Morawska; Kotzias, 2002).

Assim, os métodos de mitigação, se bem empregados, atuam como meio de prevenção de danos à integridade de módulos FV. Segundo Nurjanah, Dewi e Rusdianasari (2021), manchas de poeira em algumas partes dos módulos (sujidade cimentada) podem induzir superaquecimento nas células FV e causar curto-circuito

2.2 Estratégias de mitigação

De acordo com Bessa *et al.* (2021) a adoção de uma estratégia otimizada de mitigação apresenta como vantagens: (1) o aumento das receitas de plantas FV devido ao aumento do fator de capacidade, fazendo com que a porcentagem de geração FV seja incrementada sem a necessidade de implantação de novas plantas e (2) melhoria nas margens financeiras, incentivando novos investimentos e, consequentemente, favorecendo o aumento da capacidade instalada, contribuindo com o mercado local, nacional e global; embora as perdas diárias de desempenho de plantas FV variem de uma localidade para outra, diversos estudos experimentais mostram que tais perdas se acumulam com o tempo.

Em certas condições, a limpeza natural provocada pela incidência de chuvas fortes ou derretimento de neve pode ser suficiente para restaurar o desempenho da geração FV impactado pela presença de sujidade (Styszko *et al.*, 2018). As chuvas exercem papel de mitigação de sujidade, em especial, nos sistemas FV que não adotam nenhum cronograma de limpeza, devido à indisponibilidade de água ou mão de obra qualificada (L. *et al.*, 2021). Todavia, chuvas de baixa

intensidade podem contribuir com maior deposição de contaminantes, bem como acelerar o processo de cimentação da sujidade (Jaszczur *et al.*, 2019).

A taxa de deposição de sujidade e frequência das limpezas naturais pode mudar durante as estações do ano ou de um ano para outro devido à variabilidade das condições climáticas e ambientais. Além disso, é necessário levar em conta atividade humanas periódicas (colheitas, por exemplo) e eventos extraordinários como construções e tempestades de areia/poeira. Assim, compreender essa variação sazonal e, eventualmente a sua distribuição em um determinado período, é fundamental para determinar a estratégia de mitigação ideal para cada localidade (Bessa *et al.*, 2021).

A limpeza mecânica manual é similar à limpeza de sujeira de janelas em edifícios com escovas de cerdas macias. Devido à ação localizada, essa metodologia pode se apresentar mais eficiente que a limpeza natural ou limpeza mecânica não manual com água canalizada. Contudo, a interação direta com a superfície pode causar danos físicos nos módulos, como abrasões e rachaduras, pela falta de uniformidade dos movimentos/pressão ou manuseio incorreto de equipamentos. Além disso, requer o emprego de mão de obra especializada, ou seja, há aumento nos custos em relação a outros métodos passivos (Kazem *et al.*, 2020). O risco de acidentes de pessoal e as dificuldades de movimentação, má manutenção e desperdício de água são outras desvantagens do método de limpeza manual (Laksahani *et al.*, 2021).

Em outra vertente, na limpeza mecânica não manual são utilizados dispositivos semiautomáticos, que precisam da intervenção/supervisão de trabalhadores, ou totalmente automáticos que, com auxílio de sensores, se movem pela superfície dos módulos utilizando escovas, com uso de água ou não, para realizar a remoção da sujeira (Kazem *et al.*, 2020).

3. METODOLOGIA

Nessa seção são apresentadas as características da planta FV utilizada no presente estudo. Adicionalmente são apresentadas as métricas de desempenho utilizadas para estimar as perdas por sujidade assim como os procedimentos metodológicos adotados.

3.3 Caracterização da planta FV

O Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – *Campus Cedro* (IFCE – *Campus Cedro*) possui uma planta FV de 92,43 kWp conectada à rede composta por 237 módulos m-Si modelo JAM72S09-390/PR agrupados em 15 *strings* e cujas especificações são apresentadas na Tab. 1.

Tabela 1 - Especificações elétricas do módulo JAM72S09-390/PR em STC.

CARACTERÍSTICA	ESPECIFICAÇÃO
Potência (P_{Max})	390 W
Eficiência (η)	19,50 %
Tensão Máxima (V_{Max})	40,21 V
Corrente Máxima (I_{Max})	9,70 A
Tensão de Circuito Aberto (V_{oc})	49,35 V
Corrente de Curto-Circuito (I_{sc})	10,22 V
Coefficiente de P_{Max} (γ)	-0,37%/°C
Coefficiente de V_{oc} (β_{Voc})	-0,30%/°C
Coefficiente de I_{sc} (α)	+0,060%/°C

A interconexão da planta à rede é realizada através da utilização de um inversor de 50 kW modelo GW50KN-MT e um inversor de 25 kW modelo GW25KN-MT; adicionalmente a planta é dotada de fusíveis e dispositivos de proteção contra surtos. Para o registros dos parâmetros elétricos, os *datalogger* encontram-se integrados aos inversores e possuem conexão *wi-fi*; as medições são realizadas com amostragem de cerca de 1 minuto e são enviadas, armazenadas, disponibilizadas no servidor *web* do fabricante dos inversores. Na Fig. 1 é apresentada uma visão aérea do IFCE – *Campus Cedro*.

A cidade de Cedro se localiza na Região Centro-Sul do Ceará em uma região com clima Tropical Quente Semiárido com vegetação típica da Caatinga apresentando temperatura média anual entre 26 e 28°C. A pluviosidade média anual é de 927,10 mm, com período chuvoso entre fevereiro e abril; a irradiação global horizontal anual média é 5,9 kWh/m²/dia e a produtividade FV anual a 10° estimada em 4,5 kWh/kWp (Camargo Schubert Engenheiros Associados *et al.*, 2019; IPECE, 2023).

3.4 Sistema de Aquisição de Dados Ambientais/Operacionais

Além da coleta das variáveis elétricas a planta FV possui um sistema de monitoramento de variáveis ambientais e operacionais; a aquisição desses dados é realizada com amostragem de cerca de 2 minutos. Destaca-se que para

padronização dos períodos de amostragem são utilizados a média a cada 2 minutos de todas as variáveis utilizadas nesse estudo.



Figura 1 – Visão geral da planta FV do IFCE - *Campus Cedro*.

Para coleta dos dados de irradiância, é empregado um piranômetro com resolução de 1 W/m^2 e acurácia de $\pm 5\%$ para medições na faixa de 0 a 1.500 W/m^2 ; o tempo de resposta é de cerca de 45 segundos. Para coleta dos de temperatura ambiente (T_a) é utilizado um sensor com resolução de $0,1^\circ\text{C}$, acurácia de $0,5^\circ\text{C}$ e com faixa de medição entre -50 e 100°C . A velocidade do vento (W_s) é mensurada com um anemômetro com resolução de $0,1 \text{ m/s}$ e faixa de medição entre 0 e 45 m/s . Já para a temperatura do módulo é empregado um sensor com faixa de medição entre -50 e 100°C , resolução de $0,1^\circ\text{C}$ e acurácia de $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Vale destacar que os sensores são conectados a um dispositivo *Ezlogger-Pro* e os dados são armazenado e disponibilizados juntamente com dados elétricos na plataforma *web* da fabricante dos inversores. Na Fig. 2 são apresentados os sensores que compõem o sistema de monitoramento da planta FV analisada.



Figura 2 – Sensores utilizados no sistema de monitoramento: (a) piranômetro; (b) sensor de temperatura ambiental; (c) anemômetro; (d) sensor de temperatura dos módulos.

Para determinação do volume de chuvas no local de estudo é utilizada a média das precipitações registradas pelos postos pluviométricos denominados CEDRO e EMATERCE pertencentes à Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME); ambos os postos pluviométricos estão situados a uma distância de cerca de 1 km da planta FV do IFCE – *Campus Cedro*. Adicionalmente é importante destacar que no âmbito dessa pesquisa os valores de irradiância no plano dos módulos (G_{POA}) são estimados através da metodologia desenvolvida por Costa (2018), uma vez que, as medições disponíveis referem-se aos plano horizontal.

3.5 Métricas de Avaliação

Na literatura são encontradas diferentes métricas de avaliação de sujidade. Contudo, Costa (2018) estabelece que inicialmente há a necessidade de realizar as correções dos parâmetros para Condições Padrões de Teste (*Standart Test Conditions - STC*) para que possam ser realizadas comparações de desempenho de plantas FV independentemente de sua localização geográfica, posicionamento, inclinação e potência nominal. No âmbito desse artigo a potência máxima ($P_{M\acute{a}x}$) é corrigida conforme Eq. (1).

$$P_{M\acute{a}x_{Norm}} = P_{M\acute{a}x_{STC}} \cdot [1 + \gamma(T_c - T_{STC})] \cdot \frac{G_{POA}}{G_{STC}} \quad (1)$$

Em que $P_{M\acute{a}xNorm}$ é a $P_{M\acute{a}x}$ normalizada para condições de STC (25 °C e 1.000 W/m²), γ e T_c são, respectivamente, os coeficientes de temperatura para potência e a temperatura da célula. T_{STC} e G_{STC} são a temperatura e irradiância nas condições de referência (25 °C e 1.000 W/m²).

Uma métrica utilizada com recorrência na literatura para estimar os impactos da sujidade de plantas FV é a Relação de Desempenho (*Performance Ratio – PR*) que é definida na IEC 61724 e estabelece uma relação de rendimento real de conversão de um sistema FV em relação ao valor de rendimento esperado (DIERAUF *et al.*, 2013). Trata-se de uma métrica adimensional que varia entre 0 e 1; valores mais próximos de 1 indicam funcionamento próximo ao projetado pelo fabricante (Araújo, 2019).

De acordo com Urrejola *et al.* (2016) o *PR* compara o rendimento de saída da planta FV (Y_R) com o rendimento teórico (Y_F). Desse modo, apresenta dependência da irradiância e pode ser estabelecido como a relação entre a energia de saída do módulo FV (E_{CA}) e o seu valor de potência de pico em STC; nessa pesquisa o valor de E_{CA} é calculado pela integração do valor de $P_{M\acute{a}xNorm}$ no período entre 7:00 e 17:00 horas. O valor de *PR* depende da temperatura dos módulos (T_m), dissipação de energia, sistema de medição e sujidade. Ademais, o valor de *PR* não reflete necessariamente perdas inerentes apenas à sujidade, pois incorporam efeitos de sombreamentos, perdas elétricas da instalação, degradação dos módulos e perdas de refletância solar (URREJOLA *et al.*, 2016).

Diante do exposto, a utilização do *PR* corrigido pelo clima (*Weather-Corrected Performance Ratio – PR_{Corr}*) proposto pelo *National Renewable Energy Laboratory (NREL)* (DIERAUF *et al.*, 2013) apresenta maior apelo para estudos de sujidade, pois reflete comportamento sazonal condizente para a determinação do *PR* para qualquer tecnologia FV em uma determinada localidade, enquanto o valor do *PR* padrão pode variar até -0,9% para elevações de 3°C na T_m e de 3 m/s na velocidade do vento (URREJOLA *et al.*, 2016). O valor de PR_{Corr} é definido pela Eq. (2).

$$PR_{Corr} = \frac{\sum_i E_{CA_i}}{\sum_i P_{M\acute{a}xSTC} \cdot \left[1 + \gamma (T_{cAvg} - T_{c_i})\right]} \cdot \frac{H_{POA_i}}{G_{STC}} \quad (2)$$

Em que H_{POA_i} é a irradiação no plano dos módulos no instante i e T_{cAvg} é a temperatura média anual da célula FV e definida como sendo o somatório hora a hora, durante 365 dias, do produto entre a irradiância e a temperatura da célula, conforme expresso na Eq. (3); T_{c_i} é a temperatura medida da célula estimada conforme Eq. (4).

$$T_{cAvg} = \frac{\sum_i G_{POA_i} \cdot T_{c_i}}{\sum_i G_{POA_i}} \quad (3)$$

$$T_{c_i} = T_a + G_{POA} \cdot e^{(a+b*Ws)} + \frac{G_{POA}}{G_{STC}} \cdot \Delta T \quad (4)$$

O parâmetro ΔT é a diferença entre a temperatura da célula e o *backsheet* do módulo, sendo dependente da construção dos módulos. Tipicamente, o valor de ΔT varia entre 2 e 3°C para módulos planos com montagem em vão aberto; os coeficientes empíricos a e b dependem da construção e instalação dos módulos (Kratochvil; Boyson; King, 2004). Na presente pesquisa são utilizados os seguintes valores: $\Delta T=3^\circ C$, $a=-3,56$ e $b=-0,075$. Para a determinação de T_{cAvg} são utilizados os dados mensurados entre 26/03/2022 e 15/10/2023. Inicialmente são estimados os valores de T_{c_i} através da Eq. (4). Posteriormente, são calculadas as média horárias de T_{c_i} ; são utilizadas 8.760 amostras horárias de T_{c_i} , sendo 365 medidas de cada horário, o que corresponde a medição de T_{c_i} durante 24 horas no período de 365 dias. Por fim, obtêm-se que T_{cAvg} para o local de estudo é de 57,75°C.

Para a determinação de *SRate* inicialmente são identificados os períodos secos com intervalos maiores ou iguais a 14 dias e estimado o desempenho do sistema FV analisado durante esses intervalos por meio da métrica PR_{Corr} . Com base nisso, o estimador de Theil-Sen é utilizado para determinar a inclinação dos dados de desempenho (em cada período seco) e fornecer a mediana de todas as inclinações conforme realizado em (Costa, 2018). O estimador de Theil-Sen foi proposto inicialmente por Theil (1950) e Sen (1968) e apresenta menor influência quanto à presença de anomalias; a regressão de Theil-Sen é determinada de acordo com a Eq. (5).

$$SRate = \beta_1 = Mediana \left\{ b_{i,j} = \frac{PR_{Corr_i} - PR_{Corr_j}}{d_i - d_j} : d_i \neq d_j, 1 \leq i < j \leq n \right\} \quad (5)$$

Em que (d_i, PR_{Corr_i}) e (d_j, PR_{Corr_j}) são as coordenadas bidirecionais dos pares de pontos que estão sendo analisado, n representa o número de pontos que compõem a amostra.

3.6 Extração das Métricas de Sujidade

Devido às condições ambientais, é comum haver variação no comportamento das métricas de avaliação dos efeitos da sujidade ao longo do dia; assim, para melhor visualização dos dados e reduzir a influência de ruídos são utilizados filtros, a saber:

- Consideram-se apenas medições no período das 10 às 14 horas;
- Dentro do período considerado a irradiância deve ser $\geq 700 \text{ W/m}^2$ e apresentar variação menor que $\pm 10\%$ durante o intervalo de 2 minutos, além disso, são considerados apenas os dias em que a irradiação no plano dos módulos é $\geq 3 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$;
- Dados espúrios, provocados por inconsistências e/ou ausência de dados de irradiância ou potência no período utilizado para os cálculos das métricas são excluídos;
- São considerados apenas intervalos em que a potência da planta é $\geq 10\%$ de $P_{M\acute{a}x_{STC}}$;
- Para fins de contabilização dos períodos de seca são desconsiderados os dias em que há interrupção de medições, ou que não atendam aos critérios anteriores durante 3 dias consecutivos.

Além disso, é importante considerar que durante a operação de uma planta FV há degradação natural das células FV que compõem os módulos, assim, a $P_{M\acute{a}x_{STC}}$ é estimada considerando a curva de degradação disponibilizada pelo fabricante dos módulos; procedimento similar é utilizado por Costa (2018) a fim de não penalizar a estimativa das métricas de desempenho analisadas, tal procedimento tende a não impactar SRate uma vez que o estimador de Theil-Sen foca em determinar a inclinação do conjunto de dados.

4. RESULTADOS

Na Fig. 3 é comparado o comportamento de PR_{Corr} médio diário da planta FV do IFCE – Campus Cedro e do volume médio diário de chuvas para o período entre 26/03/2022 e 15/10/2023. De modo geral, observa-se que nos períodos com precipitações mais frequentes PR_{Corr} apresenta valores médios mais dispersos.

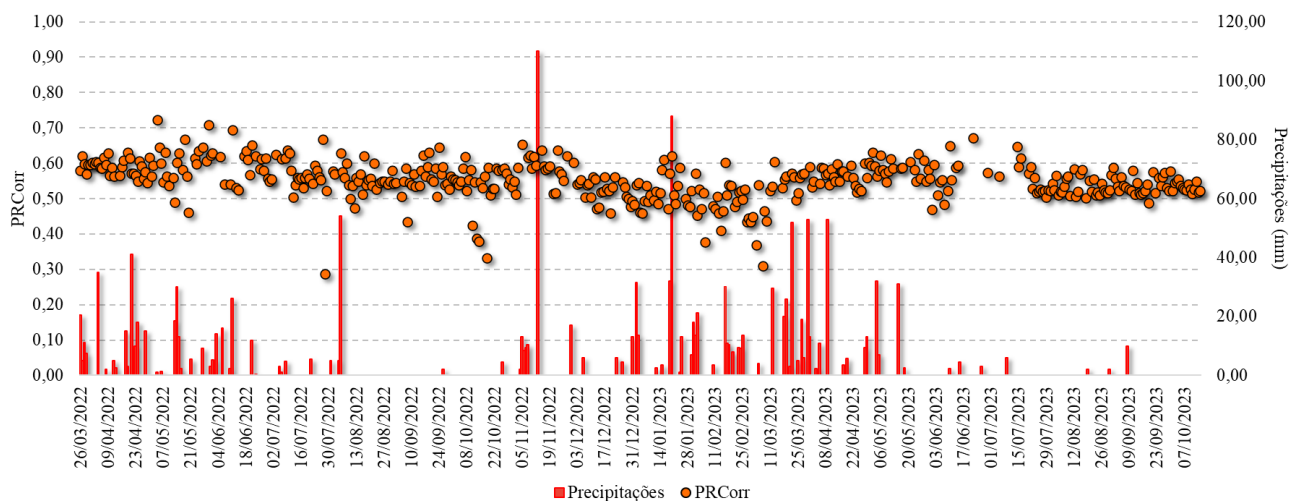


Figura 3 – Valores médios diários de PR_{Corr} e precipitações.

O valor médio de PR_{Corr} para o período investigado é de 0,56 enquanto o volume médio de diário de precipitações é de 2,49 mm/dia. Comparando com os achados de Pritam *et al.* (2018), que determinaram que uma planta FV com módulos m-Si de 40 kWp instalados em Uttar Pradesh (Índia) (localidade semiárida) tem o valor de PR de 0,63, observa-se que o valor médio de PR_{Corr} da planta analisada é baixo. Todavia, é válido destacar que a planta analisada não se encontra instalada de forma otimizada em relação à orientação e inclinação e que há obstáculos que podem provocar sombreamento sobre os módulos, além disso, dependendo da direção predominante do vento, a planta pode não está sendo beneficiada pela ventilação natural, uma vez que há obstáculos na arquitetura do telhado; a T_c média estimada é de 69,49°C. Diante disso, recomenda-se a realização de estudos adicionais a fim de otimizar o desempenho da planta FV do IFCE – Campus Cedro.

Conforme destacado anteriormente, o período chuvoso em Cedro concentra-se, sobretudo, durante o primeiro semestre do ano, sendo os períodos de seca predominantemente ocorrendo entre agosto e outubro. Tal fato é corroborado pela análise do volume de chuvas registrados pelo posto pluviométrico CEDRO entre 1992 e 2022, conforme apresentado na Fig. 4.

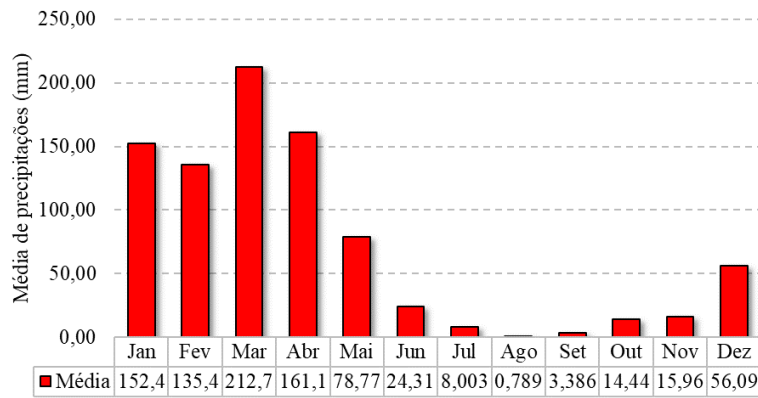


Figura 4 – Volume médio mensal de precipitações em Cedro no período 1992-2022.

Ao analisar os períodos sem precipitações com duração igual ou superior a 14 dias são identificados 7 períodos de seca distintos, cujos intervalos e valor médios de PR_{Corr} são especificados na Tab. 2. Destaca-se que os períodos P – I, P – II, P – III e P – VII ocorrem durante a estação seca, os períodos P – IV ocorre durante a pré-estação chuvosa, P – V ocorre entre a estação chuvosa e a pós-estação chuvosa enquanto P – VI ocorre entre a pós-estação chuvosa e estação seca.

Tabela 2 - Períodos secos e PR_{Corr} médio diário para planta FV do IFCE – Campus Cedro.

PERÍODO	INTERVALO	DURAÇÃO EM DIAS	PR_{Corr} MÉDIO
P – I	06/08/2022 – 25/09/2022	51	0,55
P - II	27/09/2022 – 25/10/2022	29	0,53
P - III	15/11/2022 – 29/11/2022	15	0,58
P - IV	07/12/2022 – 22/12/2022	16	0,52
P - V	19/05/2023 – 09/06/2023	22	0,54
P - VI	14/07/2023 – 18/08/2023	36	0,54
P - VII	24/09/2023 – 15/10/2023	22	0,52

Após a identificação dos períodos secos e levando em consideração as premissas estabelecidas na seção 2.4, o estimador de Theil-Sen é utilizado para determinar a inclinação dos dados de desempenho de cada um dos períodos secos para, posteriormente, determinar o valor de $SRate$ da planta FV analisada. Na Tab. 3 são apresentados os valores de $SRate$ para cada uma dos período secos identificados.

Tabela 3 – Valor de $SRate$ para os períodos secos identificados.

PERÍODO	$SRate$
P – I	-0,021%/dia
P - II	-0,203%/dia
P - III	-0,558%/dia
P - IV	-0,322%/dia
P - V	0,017%/dia
P - VI	-0,017%/dia
P - VII	-0,116%/dia

P – III é o período que apresenta maior $SRate$ (-0,558%/dia), sendo este o período com menor duração (15 dias); o segundo maior valor de $SRate$ é -0,322%/dia e ocorre durante P – IV cuja duração é de 16 dias. Já P – I é o período seco com menor $SRate$ (-0,021%/dia) e maior duração (51 dias); o segundo menor valor de $SRate$ é -0,017%/dia e ocorre durante P – VI que tem duração de 36 dias. Assim, observa-se que para a planta FV analisada há uma tendência de redução das perdas diárias devido à sujidade conforme o período seco aumenta, em outras palavras, as perdas por sujidade diárias são maiores durante intervalos os intervalos de seca menores. Tal fato já foi mencionado na literatura para outras localidades, podendo ser explicado pela ação dos ventos, por exemplo, uma vez que a ação desse agente pode provocar a redução da massa depositado na superfície dos módulos, bem como, há tendência de redução do tamanho das partículas de sujidade.

Todavia, é importante ressaltar que diferentemente dos demais períodos o P – V, cuja duração é de 22 dias, apresenta $SRate$ de 0,017%/dia, ou seja, indicando que há tendência de melhoria de PR_{Corr} no intervalo entre 19/05/2023 e 09/06/2023. Esse comportamento pode ser atribuído a uma possível sazonalidade no local de estudo, uma vez que, P – V

é o único período seco observado entre a transição do período chuvoso e pós-chuvoso. Ressalta-se ainda que maio e junho são caracterizados como os meses com menor temperatura diurna média, com respectivamente 26,96°C e 26,63°C o que pode ter beneficiado no comportamento apresentado por PR_{Corr} no período P – V; mais estudos precisam ser realizados sobre os efeitos da sujidade na transição entre os período chuvoso e pós-chuvoso, por esse motivo, a fim de evitar comprometer o estabelecimento de $SRate$ do local de estudo o período P – V é desconsiderado.

De modo geral, ao determinar a mediana de $SRate$ dos períodos de secos identificados é obtido que o valor de $SRate$ da planta FV do IFCE – *Campus Cedro* para o período entre 26/03/2022 e 15/10/2023 é de -0,160%/dia. Na Fig. 5 é apresentado um comparativo da mediana de $SRate$ em diferentes estudos para módulos m-Si com o valor de $SRate$ da planta FV do IFCE – *Campus Cedro*.

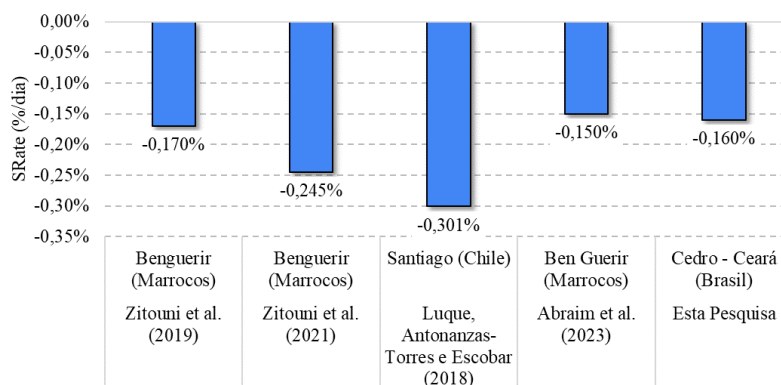


Figura 5 – Comparativo de $SRate$ de módulos m-Si em diferentes estudos.

5. CONCLUSÃO

No presente artigo é apresentado um estudo preliminar sobre os impactos da sujidade em uma planta FV com módulos m-Si instalados na cidade de Cedro-Ceará. A partir da identificação de períodos secos com duração superior a 14 dias é possível determinar através do comportamento da métrica PR_{Corr} que a $SRate$ da planta varia entre -0,558%/dia e -0,021%/dia para períodos secos com duração de 15 e 51 dias, respectivamente; é observada uma tendência de redução das perdas diárias devido à sujidade conforme o período seco aumenta. Por outro lado, durante o P – V, cuja duração é de 22 dias, apresenta $SRate$ de 0,017%/dia, ou seja, indicando que há tendência de melhoria de PR_{Corr} , podendo esse comportamento estar relacionado a um efeito sazonal, uma vez que, P – V é o único período seco observado entre a transição do período chuvoso e pós-chuvoso. Para o período analisado, a $SRate$ da planta FV do IFCE - *Campus Cedro* é de -0,160%/dia estando esse valor alinhado a valores de $SRate$ determinados em outros estudos.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao IFCE – *Campus Cedro* pela disponibilização dos dados. O segundo autor agradece ao CNPq pela bolsa de pesquisador.

REFERÊNCIAS

- Abraim, Mounir *et al.* PVSMS: A system for quantifying soiling effects and optimizing cleaning schedule in PV solar plants. *Energy Conversion and Management*, v. 284, p. 116978, maio 2023. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116978>.
- Araújo, Danielly Norberto. Investigação experimental dos efeitos da sujidade no desempenho de plantas fotovoltaicas instaladas no campus do Pici da UFC. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2019.
- Azouzoute, Alae *et al.* Modeling and experimental investigation of dust effect on glass cover PV module with fixed and tracking system under semi-arid climate. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 230, p. 111219, set. 2021a. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111219>.
- Bessa, João Gabriel *et al.* Monitoring photovoltaic soiling: assessment, challenges, and perspectives of current and potential strategies. *iScience*, v. 24, n. 3, p. 102165, mar. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.102165>.
- Braga, Daniel Sena. Interrelação entre os parâmetros de desempenho e distribuição de sujidade em módulos fotovoltaicos. 2018. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.
- Camargo Schubert Engenheiros Associados *et al.* (Brasil). Atlas eólico e solar: Ceará. Fortaleza: ADECE: FIEC: SEBRAE, 2019. 188 p.

- Costa, Suellen Caroline Silva. Estudo abrangente do efeito da sujidade no desempenho de módulos e sistemas fotovoltaicos. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) — Pontifícia Universidade Católica de Minas, Belo Horizonte, 2018.
- Dierauf, T. *et al.* Weather-Corrected performance ratio. [S. l.]: Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 2013. <https://doi.org/10.2172/1078057>.
- IEA. Solar PV. IEA: Paris. 2022b. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/solar-pv>>.
- Ilse, Klemens *et al.* Techno-Economic assessment of soiling losses and mitigation strategies for solar power generation. *Joule*, v. 3, n. 10, p. 2303-2321, out. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.08.019>.
- Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará – IPECE. IPECEDATA: Perfil Municipal. 2023. Disponível em: <http://ipecedata.ipece.ce.gov.br/ipece-data-web/module/perfil-municipal.xhtml>.
- Jaszczur, Marek *et al.* Impact of dust and temperature on energy conversion process in photovoltaic module. *Thermal Science*, v. 23, n. Suppl. 4, p. 1199-1210, 2019. <https://doi.org/10.2298/tsci19s4199j>.
- Kazem, Hussein A. *et al.* A review of dust accumulation and cleaning methods for solar photovoltaic systems. *Journal of Cleaner Production*, v. 276, p. 123187, dez. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123187>.
- Kratochvil, Jay A.; Boyson, William Earl; King, David L. Photovoltaic array performance model. [S. l.]: Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 2004. <https://doi.org/10.2172/919131>.
- L., Sahana *et al.* Impact of soiling on energy yield of solar PV power plant and developing soiling correction factor for solar PV power forecasting. *European Journal of Energy Research*, v. 1, n. 2, p. 21-29, 14 jul. 2021. <https://doi.org/10.24018/ejenergy.2021.1.2.7>.
- Laksahani, U. C. *et al.* Design mechanism for solar panel cleaning process. In: 2021 10TH International Conference On Information And Automation For Sustainability (ICIAFS), 2021, Negambo, Sri Lanka. 2021 10th international conference on information and automation for sustainability (iciafs). [S. l.]: IEEE, 2021. <https://doi.org/10.1109/iciafs52090.2021.9606104>.
- Luque, Enric Grau; Antonanzas-Torres, Fernando; Escobar, Rodrigo. Effect of soiling in bifacial PV modules and cleaning schedule optimization. *Energy Conversion and Management*, v. 174, p. 615-625, out. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.065>.
- MICHELI, Leonardo *et al.* Time series analysis of photovoltaic soiling station data: Version 1.0, august 2017. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2017.
- Nurjanah, Siti; Dewi, Tresna; Rusdianasari. Dusting and soiling effect on PV panel performance: case study open-pit mining in south sumatra, indonesia. In: 2021 International Conference On Electrical And Information Technology (IEIT), 2021, Malang, Indonesia. 2021 international conference on electrical and information technology (ieit). [S. l.]: IEEE, 2021. <https://doi.org/10.1109/ieit53149.2021.9587351>.
- Pritam, Satsangi K. *et al.* Performance analysis of grid interactive solar photovoltaic plant in India. *Energy for Sustainable Development*, v. 47, p. 9-16, dez. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2018.08.003>.
- Schill, Christian *et al.* Soiling Losses – Impact on the Performance of Photovoltaic Power Plants. Report IEA-PVPS T13-22: ISBN 978- 3-907281-09-3, 2022.
- Schwela, D. H.; Morawska, L.; Kotzias, D. Guidelines for concentration and exposure-response measurement of fine and ultra fine particulate matter for use in epidemiological studies. In: Guidelines for concentration and exposure-response measurement of fine and ultra fine particulate matter for use in epidemiological studies. [S.l.: s.n.], 2002.
- Sen, P. K. Estimates of the regression coefficient based on kendalls tau. *Journal of the American Statistical Association*, Taylor and Francis Group, v. 63, n. 324, p. 1379–1389, 1968.
- Souza, J. J. S.; Carvalho, P. C. M.; Barroso, G. C. Analysis of the characteristics and effects of soiling natural accumulation on photovoltaic systems: a systematic review of the literature. *Journal of Solar Energy Engineering*, p. 1-99, 12 dez. 2022. <https://doi.org/10.1115/1.4056453>.
- Styszko, Katarzyna *et al.* An analysis of the dust deposition on solar photovoltaic modules. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 26, n. 9, p. 8393-8401, 29 mar. 2018. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1847-z>.
- Theil, H. A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis, part 3. In: Proceedings of Koninallijke Nederlandse Akademie van Weinschatpen A., v. 53, p. 1397–1412, 1950.
- Urrejola, Elias *et al.* Effect of soiling and sunlight exposure on the performance ratio of photovoltaic technologies in Santiago, Chile. *Energy Conversion and Management*, v. 114, p. 338-347, abr. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.016>.
- Zitouni, Houssain *et al.* Experimental investigation of the soiling effect on the performance of monocrystalline photovoltaic systems. *Energy Procedia*, v. 157, p. 1011-1021, jan. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.268>.
- Zitouni, Houssain *et al.* Experimental investigation and modeling of photovoltaic soiling loss as a function of environmental variables: a case study of semi-arid climate. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 221, p. 110874, mar. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110874>.

ESTIMATION OF THE SOILING RATE OF THE IFCE – CEDRO CAMPUS PHOTOVOLTAIC PLANT: A CASE STUDY

Abstract. Due to the growing interest in photovoltaic systems (PV), additional effort must be spent on improving the conversion efficiency of PV cells and mitigating factors that affect the generation performance of PV plants during their operation. In this sense, one of the main methods of improving the efficiency of PV plants after installation is the mitigation of soiling on the surface of the modules. Thus, the purpose of this article is to present the preliminary results of a study on the determination of the Soiling Rate (SRate) in a 92.43 kW_p PV plant with monocrystalline modules (m-Si) installed in the city of Cedro in the countryside of Ceara belonging to the Federal Institute of Ceara (IFCE – Campus Cedro). For the period analyzed, 03/26/2022 to 10/15/2023, the average value of the Weather-Corrected Performance Ratio – PR_{corr} is 0.56 while the average daily volume of precipitation is 2.49 mm/day. From the identification of dry periods lasting more than 14 days, it is possible to determine that the plant's SRate varies between -0,558%/day and -0.021% for dry periods lasting 15 and 51 days, respectively. In general, it is obtained that the SRate of the PV plant at IFCE - Campus Cedro is -0.160%/day, this value being in line with the SRate values determined in other studies in the scientific literature.

Keywords: IFCE – Campus Cedro, Soiling Rate, Photovoltaic