

EFEITOS DA SUJIDADE NO DESEMPENHOO ELÉTRICO DE UMA PLANTA FOTOVOLTAICA: UM ESTUDO DE CASO NO LEA - UFC

JOSÉ JANIERE SILVA DE SOUZA¹, PAULO CESAR MARQUES DE CARVALHO²,
RENATA IMACULADA SOARES PEREIRA³

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE

²Universidade Federal Do Ceará - UFC

³Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Alagoas - IFAL

<janiere.silva@ifce.edu.br>, <carvalho@dee.ufc.br>, <renata.pereira@ifal.edu.br>

10.21439/conexoes.v17i0.2724

Resumo. O desempenho elétrico de sistemas fotovoltaicos (FV) é influenciado pelas condições ambientais, climáticas e antropológicas do local de instalação. Assim, o presente artigo tem como objetivo analisar os efeitos da sujidade no desempenho de uma planta FV instalada em ambiente urbano com clima semiárido, no Laboratório de Energias Alternativas da Universidade Federal do Ceará (LEA - UFC) em Fortaleza – Ceará de modo a proporcionar informações para subsidiar a definição de intervenções de limpeza da planta FV no local de estudo; são usadas as métricas Relação de Sujidade (*Soiling Ratio - SRatio*) e Relação de Desempenho Corrigido Pelo Clima (*Weather-Corrected Performance Ratio - PR_{corr}*). No período chuvoso de 2018 há um aumento de 20,51% de PR_{corr} em relação ao período pré-chuvoso; SRatio aumenta 2,36%. No período seco de 2018, PR_{corr} reduz 3,19% em relação ao período pós-chuvoso, enquanto SRatio passa de 0,87 para 0,89; o aumento de 2,30% em SRatio justifica-se pela realização de duas limpezas manuais. No período chuvoso de 2019, PR_{corr} apresenta valor médio de 0,91 enquanto o valor médio de SRatio é de 0,85. No período seco de 2019, há decaimento de PR_{corr} culminando em uma redução de 26% da métrica entre 01/08/2019 e 31/10/2019; nesse mesmo período há um aumento de 8,8% de SRatio em relação ao período pós-chuvoso; observa-se um decaimento de 21,5% de SRatio entre agosto e novembro de 2019.

Palavras-chaves: Desempenho Fotovoltaico. Métricas de Avaliação. Sujidade.

SOILING EFFECTS ON THE ELECTRICAL PERFORMANCE OF A PHOTOVOLTAIC PLANT: A CASE STUDY AT THE LEA - UFC

Abstract. The electrical performance of photovoltaic (PV) systems is influenced by the environmental, climatic, and anthropological conditions of the installation site. Thus, the present article aims to analyze the effects of soiling on the performance of a PV plant installed in an urban environment with a semi-arid climate, at the Alternative Energy Laboratory of the Federal University of Ceará (LEA - UFC) in Fortaleza - Ceará, in order to provide information to support the definition of interventions for cleaning the PV plant in the study site; Soiling Ratio (SRatio) and Weather-Corrected Performance Ratio (PR_{corr}) metrics are used. In the rainy season of 2018, there is an improvement of 20.51% of PR_{corr} in relation to the pre-rainy period; SRatio increases by 2.36%. In the dry period of 2018, PR_{corr} suffers a reduction of 3.19% in relation to the post-rainy period, while SRatio goes from 0.87 to 0.89; the 2.30% improvement in SRatio is justified by the performance of two manual cleanings. In the rainy season of 2019, PR_{corr} has an average value of 0.91 while the average value of SRatio is 0.85. In the dry period of 2019, there is a downward in PR_{corr} culminating in a 26% reduction in the metric between 8/1/2019 and 10/31/2019; in the same period there is an improvement of 8.8% in SRatio in relation to the post-rainy period; there is a 21.5% decay of SRatio between August and November 2019.

Keywords: Evaluation Metrics. Photovoltaic Performance. Soiling.

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas fotovoltaicos (FV) caracterizam-se como uma tecnologia com rápido desenvolvimento, sendo especificados em função de sua potência máxima de saída CC (W_p) obtida sob Condições Padrões de Teste (*Standard Test Conditions - STC*). Contudo, sob condições operacionais, os sistemas FV têm o seu desempenho elétrico fortemente influenciado pelas condições ambientais do local de instalação. Dentre esses fatores está a sujidade, que é causada pelo acúmulo de contaminantes na superfície dos módulos (JAMIL et al., 2017). A sujidade absorve ou dispersa a irradiação que chega à superfície dos módulos FV, sendo a sua deposição influenciada por fatores como chuva, temperatura, umidade, velocidade do vento e inclinação dos módulos (NUR-JANAH; DEWI et al., 2021).

Métricas de avaliação são comumente usadas para estimar o impacto da sujidade. Uma métrica amplamente utilizada é a Relação de Sujidade (*Soiling Ratio - SRatio*) que representa a relação entre a corrente de curto-círcuito (I_{sc}), ou potência máxima (P_{max}), de dois módulos idênticos (um limpo e um sujo) nas mesmas condições de operação; é uma métrica adimensional variando entre 0 e 1: valores próximos a 1 indicam menor impacto de sujeira, valores próximos a 0 indicam um forte efeito de sujeira. Por outro lado, a Taxa de Sujidade (*Soiling Rate - SRate*) representa a redução percentual diária do SRatio devido à ausência de limpeza dos módulos FV; inicialmente identificam-se os períodos secos aos quais o módulo FV está exposto (MICHELI et al., 2017). A Relação de Desempenho (*Performance Ratio - PR*) é especificada na IEC 61724-1 (2017) e estabelece uma relação de eficiência de conversão de um módulo FV em relação ao valor teórico do fabricante; valores próximos a 1 indicam uma operação próxima ao projetado pelo fabricante (DIERAUF et al., 2013).

Após a instalação, uma forma de maximizar a eficiência de plantas FV é a mitigação de sujidade da superfície dos módulos. Por esse motivo, conforme é apresentado em Souza, Carvalho e Barroso (2023), na literatura especializada são encontrados diversos estudos sobre os impactos da sujidade no desempenho de geração de sistemas FV. O efeito da sujeira em módulos p-Si (policristalinos) e CdTe (telureto de cádmio) em diferentes regiões do Brasil é investigado em Costa, Kazmerski e Diniz (2021). Em Belo Horizonte, um período seco de 85 dias reduz a SRatio dos módulos CdTe e p-Si para 0,73 e 0,83, respectivamente; SRate é determinado em 0,20%/dia e 0,14%/dia para os módulos CdTe e p-Si, respectivamente. Em Porto Alegre, o SRatio permanece próximo de 1, devido às chuvas. Em Brotas de

Macaúbas, o SRatio permanece próximo de 1, devido às chuvas e ação do vento; SRate é estimado em 0,04%/dia para p-Si e 0,08%/dia para CdTe.

Analizando dados de geração de 13 meses de uma planta FV com módulos p-Si em Fortaleza, é observada uma redução de PR até 0,75 após 22 dias sem chuva; para o 1º período seco, a PR média é 0,84 e 0,87 no 2º período (ARAUJO et al., 2020). Na estação chuvosa, o valor médio de PR é 0,92. Em Araújo, Carvalho e Dupont (2019), para as mesmas condições climáticas, investigando dias com céu claro, antes e depois de chuvas, o melhor valor de produtividade observado é de 5,64 kWh/kW_p (um dia após a chuva); o pior valor é de 4,61 kWh/kW_p (23 dias sem chuva). O melhor PR é 84,10% e o pior é 70,21%; a maior eficiência registrada é de 15,60% (um dia após chuva) e a menor 13,02% (após 17 dias sem chuva); o pior SRatio é 0,79 após 23 dias sem chuva.

Em Ayala et al. (2018), observam-se os efeitos do acúmulo natural de sujidade durante 8 meses em módulos m-Si (monocristalino), p-Si, TF (*thin film* – filme fino) e bifaciais no Deserto do Atacama (Chile). A tecnologia bifacial apresenta PR acima de 95%, porém com redução gradativa devido à limpeza apenas na face frontal. O módulo TF apresenta uma PR de 90%, p-Si atinge média de 88% e m-Si em torno de 80%. Nos meses de setembro e outubro SRate é de 2,5%/mês, enquanto em novembro SRatio é em torno de 1.

Examinando o efeito da sujeira em módulos p-Si utilizados em postes de iluminação pública instalados em diferentes áreas (litoral, industrial, urbana e rural) de Kupang (Indonésia), a potência dos módulos é reduzida entre 9,14 e 13,94%, sendo a Isc o parâmetro mais afetado (redução de até 19%). A zona litorânea é o ambiente mais afetado pela sujeira, com perdas entre 11,27 e 13,94%, seguida pela urbana (perdas de 12,02 a 13,53%), industrial (perdas de 9,82 a 10,37%) e rural (perdas de 9,13 a 9,75%) (TANESAB et al., 2020).

Em Larico, Cutipa e Callata (2020), é realizado um estudo com módulos m-Si durante um mês em Juliaca (Peru), com queda máxima de 3% da corrente do módulo sujo em relação ao limpo e de 3,6% da potência. Uma usina FV com módulos m-Si (monocristalino) de 60 kW_p, na Cidade do México (México) apresenta uma PR média de 76,98%, com 76,27% e 77,70% no 1º e 2º ano de observação, respectivamente (MATSUMOTO et al., 2020). Comparando PR para um período antes e depois de uma chuva, os valores variam de 68,2% a 75,24%. Em Radonjić et al. (2021) é analisado o impacto das cinzas volantes, resultantes da queima de combustível para aquecimento ambiente na Universidade de Niš (Sérvia), durante um período de 168 dias

em módulos m-Si instalados horizontalmente e a 32°. Após 45 dias, há redução de 87,2% da potência dos módulos sujos para instalação horizontal e 30,6% para inclinação de 32° (ângulo ideal); a maior redução de potência é observada entre o 31° e o 32° dia de medição, superior a 10%/dia para o módulo horizontal e 9,1%/dia para a inclinação de 32°.

Em Abdallah et al. (2021) é realizado um estudo com módulos p-Si em Thuwal (Arábia Saudita) durante 15 meses em diferentes ângulos de inclinação (15°, 25°, 45°, 60° e 90°) e intervalos de limpeza (diário, semanal e sem limpeza). As perdas de sujidade são superiores a 5%/semana sem condições de limpeza; para limpeza semanal este nível de perda só ocorre em situações como tempestades de areia. Uma perda média de 2,2% é relatada para módulos limpos semanalmente instalados no ângulo ideal (23°). Utilizando módulos m-Si e p-Si em Dhaka (Bangladesh), após 2 meses de exposição, a eficiência apresenta uma redução de 27,17% (m-Si) e 20% (p-Si) (HOSSAIN et al., 2020). Expondo dois módulos m-Si no telhado de um edifício de 7 andares em Dhaka (Bangladesh) durante um período de 4 meses, regista-se uma redução da I_{sc} entre 5,52 e 22,31%, enquanto a produção reduz até 35% (AKTER et al., 2020).

Diante do exposto, o presente artigo tem como objetivo analisar os efeitos de longo prazo da sujidade no desempenho de geração de planta FV instalada no Laboratório de Energias Alternativas da Universidade Federal do Ceará (LEA-UFC), em Fortaleza – Ceará. Desse modo, o presente estudo apresenta informações para subsidiar a definição de intervenções de limpeza na planta FV do local de estudo a partir da análise sazonal de seu desempenho elétrico. Para tal, são utilizadas métricas de avaliação difundidas na literatura e, por conseguinte, dados elétricos, operacionais e ambientais coletados por sistemas de monitoramento do LEA – UFC. O artigo está organizado do seguinte modo: o referencial teórico sobre a temática da sujidade é apresentado na seção Fundamentação Teórica. Os aspectos metodológicos adotados nessa pesquisa são descritos na seção Metodologia. A análise dos efeitos da sujidade no desempenho da planta FV analisada é apresentada na seção Resultados e Discussão, enquanto na seção Considerações Finais são apresentadas as principais conclusões.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Processo de deposição da sujidade

Para compreender e, eventualmente, atuar no controle da sujidade é necessário conhecer as etapas que compõem o processo de deposição de contaminantes na

superfície dos módulos FV (JOHN, 2015). Na Figura 1 são apresentadas as etapas do ciclo da sujidade.

Durante o transporte as partículas são removidas da atmosfera de forma contínua por processos de deposição seca e/ou úmida, havendo uma dependência temporal e espacial desses mecanismos. A deposição seca é resultado da sedimentação gravitacional e mistura de partículas para fora da atmosfera, enquanto a deposição úmida caracteriza-se pela eliminação de partículas da atmosfera devido às chuvas ou neve (LAWRENCE; NEFF, 2009). De modo geral, chuvas com baixa intensidade e frequência, alta umidade e formação de orvalho são responsáveis pelo surgimento dos mecanismos de aumento da adesão da sujidade: cimentação, aglomeração de partículas e envelhecimento capilar (SARVER; AL-QARAGHULI; KAZMERSKI, 2013; ILSE et al., 2018).

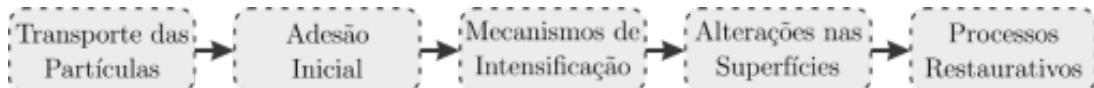
A sujidade contém sais solúveis e insolúveis que na presença de água, ou em condições com alta umidade, a parte solúvel tende a formar gotículas microscópicas de soluções salinas que envolve a parte não solúvel (SARVER; AL-QARAGHULI; KAZMERSKI, 2013). Subsequentemente, durante o processo de secagem, o material salino precipitado provoca a formação de pontes sólidas entre o material inorgânico e a superfície dos módulos, atuando como um cimento; o processo de limpeza torna-se mais complicado e pode alterar de forma definitiva as propriedades do vidro dos módulos FV (ILSE et al., 2018).

O mecanismo da aglomeração de partículas é provocado pelo rearranjo, aglomeração e compactação de partículas. A formação de gotas de água na superfície dos módulos provoca a suspensão de partículas pequenas e à medida que a gota seca há uma aglutinação das partículas. Assim, há uma alocação das partículas pequenas entre os espaços formados pelas partículas maiores unindo-as após a evaporação da água (ILSE et al., 2018).

O processo de envelhecimento capilar é provocado pelo achatamento das partículas de sujidade contra a superfície dos módulos FV quando as pontes líquidas entre partículas-superfície estão secando. Em consequência, há aumento da área de contato e intensificação das forças de adesão, tais como as forças de van der Waals (ILSE et al., 2018).

O primeiro estágio para o enfrentamento da sujidade é a realização de um monitoramento adequado a fim de determinar o melhor método de mitigação, uma vez que não há uma estratégia universalmente validada em virtude da influência de características locais (BESSA et al., 2021). De modo geral, as estratégias de mitigação podem ser divididas em duas categorias: limpeza

Figura 1: Etapas do ciclo da sujidade.



Fonte: Adaptado de (JOHN, 2015).

e ações preventivas.

A escolha do método de limpeza, periodicidade, eficiência e custos associados dependem de um estudo de caso prévio; devem ser levados em considerações aspectos como tamanho da planta FV, disponibilidade de água, parâmetros climáticos e características da sujidade (KAZEM et al., 2020). Contudo, mesmo diante da adoção de limpezas otimizadas a sujidade reduz a produção global de eletricidade entre 3 e 4%, o que representa perdas de receitas de 3 a 5 bilhões de euros por ano (ILSE et al., 2019).

2.2 Estimativa dos efeitos da sujidade em plantas FV

Caso a utilização de uma estação de sujidade não seja possível, a SRatio pode ser estimada através das Equações 1 e 2 (GOSTEIN; DÜSTER; THUMAN, 2015).

Outra métrica utilizada com recorrência é PR, contudo seu valor incorpora efeitos de sombreamentos, perdas elétricas da instalação, degradação dos módulos e perdas de refletância; para a determinação de PR em estudos de sujidade é conveniente a remoção da variação da irradiância, temperatura e vento (URREJOLA et al., 2016). Assim, a utilização do PR Corrigido Pelo Clima (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 (URREJOLA et al., 2016). A determinação de PR_{Corr} é feita por meio da Equação 3.

3 METODOLOGIA

3.1 Caracterização do local

O LEA – UFC encontra-se no Campus do Pici da UFC em Fortaleza – CE cujas coordenadas *Universal Transversa de Mercator* (UTM) são: latitude 3° 44' 15" S, longitude 38° 34' 22" W e elevação de 21 m. Como característica específica do local, destaca-se a proximidade da Av. Mister Hull. O LEA – UFC possui duas plantas FV conectadas à rede elétrica de baixa tensão. A primeira, denominada LEA1, foi instalada em julho de 2016, com potência de 1,5 kWp e com inclinação de

10° orientada ao norte geográfico, com seis módulos de 250 Wp do tipo p-Si modelo YL250P-29b, conectados em série.

A fim de possibilitar a conexão com a rede elétrica, a LEA1 é conectada ao inversor modelo PHB1500-SS. O registro dos parâmetros elétricos é utilizado por um *datalogger*, do mesmo fabricante do inversor, que possui tempo de amostragem de aproximadamente 10 minutos; os dados são enviados, armazenados e disponibilizados no servidor *web* da empresa PHB Solar e podem ser exportados no formato .xls em intervalos de 7 dias. Na Figura 2 é apresentada uma visão aérea das plantas FV do LEA - UFC, bem como são destacadas suas principais características. Nessa pesquisa são analisados os efeitos da sujidade da planta FV LEA1.

Figura 2: Vista aérea das plantas FV do LEA – UFC.



Fonte: Adaptado de (FILHO et al., 2020).

3.2 Monitoramento e aquisição de dados ambientais

Para aquisição dos dados de variáveis ambientais (irradiância, temperatura ambiente, umidade relativa e velocidade do vento) e operacional (T_m) utiliza-se o sistema de monitoramento IoT (*Internet Of Things*) desenvolvido por (PEREIRA, 2018; PEREIRA et al., 2018; PEREIRA et al., 2019).

Na LEA1 a medição de T_m é realizada simultanea-

$$SRatio_{I_{sc}} = \frac{I_{scSujo}}{I_{scSTC} \cdot [1 + \gamma(T_{msujo} - T_{STC})] \cdot \frac{G_{POA}}{G_{STC}}} \quad (1)$$

$$SRatio_{P_{sc}} = \frac{P_{MxSujo}}{P_{MxSTC} \cdot [1 + \gamma(T_{msujo} - T_{STC})] \cdot \frac{G_{POA}}{G_{STC}}} \quad (2)$$

Onde I_{scSujo} e I_{scSTC} são as correntes de curto-círcuito do módulo sujo e em STC, respectivamente; P_{MxSujo} e P_{MxSTC} são potências máximas do módulo sujo e em STC, respectivamente; γ e T_{msujo} são os coeficientes de temperatura para a corrente de curto-círcuito e potência e a temperatura do módulo sujo, respectivamente; T_{STC} e G_{STC} são a temperatura e irradiação nas condições de referência (25 °C e 1.000 W/m²) e G_{POA} é a irradiação incidente no plano dos módulos.

$$PR_{Corr} = \frac{\sum_i E_{CA_i}}{\sum_i \left\{ P_{MAX_{STC}} \cdot [1 + \gamma(T_{M_{avg}} - T_{M_i})] \cdot \frac{G_{POA}}{G_{STC}} \right\}} \quad (3)$$

Onde E_{CA_i} é a energia elétrica produzida, $T_{M_{avg}}$ é a temperatura média anual do módulo e é definida como o somatório hora a hora, durante 365 dias, do produto entre a irradiação e T_m (temperatura do módulo), conforme expresso na Equação 4; T_{mi} é a temperatura medida dos módulos no instante i .

$$T_{M_{avg}} = \frac{\sum_i G_{POA_i} \cdot T_{m_i}}{\sum_i G_{POA_i}} \quad (4)$$

mente nos 6 módulos que compõem a planta; são utilizados sensores PT100 fixados na parte central do lado posterior dos módulos, com tempo de amostragem de 1 minuto; na presente pesquisa é admitida como T_m a média dos valores medidos nos 6 módulos.

Para a aquisição de dados de irradiação utiliza-se um piranômetro modelo LP02, instalado com a mesma inclinação e orientação da planta LEA1; a amostragem da irradiação é feita a cada 1 minuto. A velocidade do vento é mensurada por um anemômetro modelo NRG #40C instalado na mesma inclinação da planta LEA1. Medidas de temperatura ambiente e humidade relativa são realizadas pelo sensor DHT11; a aquisição dos dados é feita com amostragem de 1 minuto.

Vale destacar que o tempo de amostragem dos parâmetros ambientais e da T_m diverge do tempo de amostragem dos parâmetros elétricos. Assim, para que haja compatibilidade na amostragem dos dados, são adotadas as médias a cada 10 minutos para todas as variáveis elétricas/ambientais/operacionais. Na Figura 3 é apresentada uma visão geral do posicionamento dos sensores de monitoramento ambiental/operacional na planta LEA1.

São verificadas descontinuidades de medições do sistema de monitoramento IoT utilizado. Desse modo, nos dias que são constatadas ausências de medições, entre 2018 e 2019, são utilizados dados obtidos pelo sistema de monitoramento auxiliar instalado na planta LEA1; informações adicionais podem ser consultadas em Araújo (2019). O piranômetro utilizado no sistema auxiliar encontra-se instalado no plano horizontal; as-

sim, para estimar os valores de irradiação no plano dos módulos é utilizada a metodologia apresentada em Costa et al. (2022).

Figura 3: Visão geral da planta LEA1 e sensores ambientais/operacional.



Fonte: (SANTOS, 2021).

3.3 Extração das métricas de avaliação

Devido às condições ambientais, as métricas de avaliação (SRatio e PR_{Corr}) apresentam variação no decorrer do tempo; assim, para melhor visualização dos dados, são utilizados filtros:

- Consideram-se apenas as medições no período das 10 às 14 horas;
- Dentro do período considerado a irradiação deve ser superior a 500 W/m² e apresentar variação menor que ±10% durante o intervalo de 10 minutos;

- São considerados apenas dados para condição de céu limpo;
- Dados espúrios, provocados por inconsistências e/ou ausência de dados de irradiação ou potência no período utilizado para os cálculos das métricas são excluídos.

Para estabelecer a condição do céu é utilizado o Índice de Claridade Modificado (*Modified Clearness Index* - k'_t), uma vez que apresenta como vantagem, em relação ao Índice de Claridade (*Clearness Index* - k_t), menor dependência do ângulo de elevação solar (AMILLO; HULD; MÜLLER, 2014). O valor de k'_t é determinado pela Equação 5.

$$k'_t = \frac{k_t}{1,031 \cdot \exp^{\frac{-1,4}{0,9 + \frac{9,4}{AM}}} + 0,1} \quad (5)$$

Onde AM é a massa de ar definida pela Equação 6 (DJAFER; IRBAH, 2013) e k_t determinada pela Equação 7

$$k_t = \frac{G_H}{G_{SC} \cdot \cos(\theta_z)} \quad (7)$$

Onde h é a elevação solar em graus, z é a elevação do local em relação ao mar em metros, G_{sc} é a constante solar (1.367 W/m^2), G_H é a irradiação no plano horizontal e θ_z é o ângulo de zênite.

Segundo Amillo, Huld e Müller (2014), as condições do céu podem ser definidas a partir de três intervalos distintos de k'_t : nublado ($0 < k'_t \leq 0,3$), parcialmente nublado ($0,3 < k'_t \leq 0,65$) e limpo ($0,65 < k'_t \leq 1$). Vale salientar que o valor de k'_t de um dia é considerado como sendo a média dos valores de k'_t entre as 10 e 14 horas em intervalos de 10 minutos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A planta LEA1 foi instalada em julho de 2016; contudo, na plataforma *web* do fabricante do inversor, são disponibilizados dados de geração apenas a partir de janeiro de 2018. Ademais, devido às intervenções na planta FV para estudos de sombreamento realizados por Chaves (2018) e Dupont (2021), os dados referentes ao mês de setembro de 2018 são desconsiderados na análise do comportamento das métricas de sujidade de longo prazo. Outro fator limitante são as lacunas nas medições de parâmetros ambientais e operacionais motivadas pela desconexão dos sistemas de monitoramento.

Para facilitar a observação do comportamento do comportamento de PR_{Corr} em relação ao regime de

chuvas do local e, adicionalmente, verificar o comportamento da sujidade na planta, são analisados os anos de 2018 e 2019 de forma separada; dados de 2020 não são usados devido à ausência de valores em virtude da aplicação dos filtros utilizados e/ou descontinuidade das medições pela ausência de manutenção do sistema de monitoramento devido às restrições impostas pela pandemia da COVID-19. Na Figura 4 é apresentado o comportamento de PR_{Corr} da LEA1 para 2018; as áreas sombreadas representam (A) período chuvoso e (B) período não chuvoso.

Para o período chuvoso (A) é observado um comportamento ascendente de PR_{Corr} , indicando tendência de aumento do desempenho da planta devido à limpeza dos módulos pelas chuvas. Neste período, a PR-Corr média de LEA1 é de 0,94 enquanto no período anterior (pré-chuvoso) é de 0,78; há um aumento de 20,51% da PR_{Corr} no período chuvoso em relação ao período pré-chuvoso de 2018. O volume médio diário de chuva no período chuvoso de 2018 (fevereiro a maio) é de 10,07 mm/dia, enquanto para o período pré-chuvoso (janeiro) é de 6,69 mm/dia, ou seja, um aumento de 50,52%.

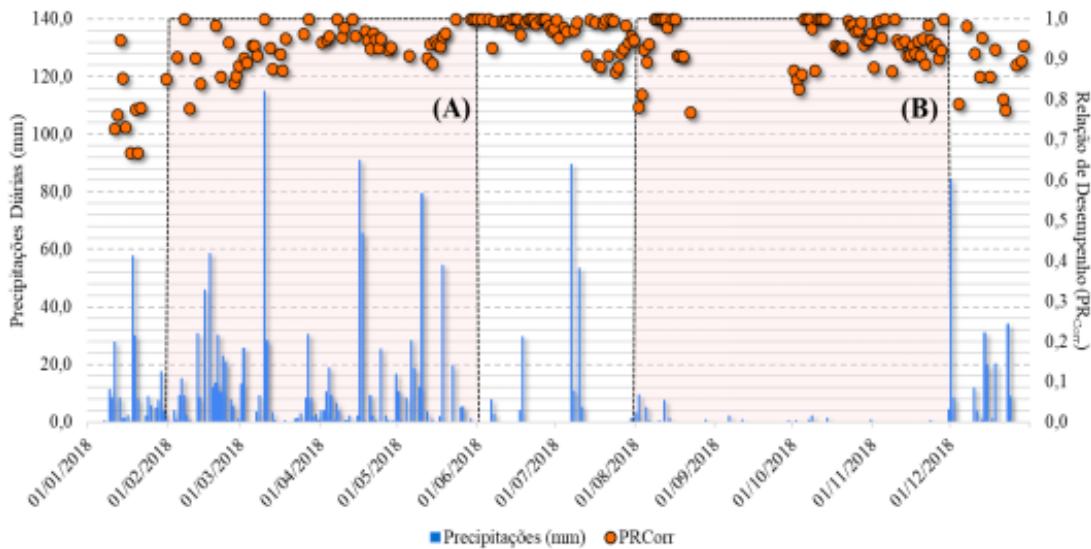
No período pós-chuvoso de 2018 (junho e julho), o valor médio de PR_{Corr} é de 0,97, um aumento de 3,19% em relação ao período chuvoso (A) apesar da redução do volume de chuvas, passando de 10,07 mm/dia para 3,35 mm/dia; esse aumento adicional é justificado pela limpeza experimentada pelos módulos no período chuvoso, sendo as chuvas do período pós-chuvoso suficientes para manter os módulos limpos. Além disso, deve-se considerar que entre o período chuvoso e pós-chuvoso verifica-se um aumento de 5,27% da irradiação diária média, passando de 5,69 kWh/m²/dia para 5,99 kWh/m²/dia.

No período seco de 2018 (agosto-novembro) a PR_{Corr} mostra-se mais dispersa que no período pós-chuvoso; o valor médio de PR_{Corr} para o período é de 0,94, ou seja, uma redução de 3,19% em relação ao período pós-chuvoso, embora a irradiação tenha aumentado em torno de 0,66%. No período seco a média diária de precipitação é de 0,34 mm/dia, ou seja, uma redução de 89,85% em relação ao período pós-chuvoso, o que justifica em parte a redução de PR_{Corr} ; devido ao baixo volume de precipitações é esperado que o valor de PR_{Corr} no período seco apresente valores mais baixos em relação aos demais períodos; contudo, no caso particular do período seco de 2018, a planta LEA1 passou por duas limpezas manuais no mês de setembro.

Na Figura 5 é apresentado o comportamento de PR_{Corr} da LEA1 para 2019; as áreas sombreadas representam (A) período chuvoso e (B) período não chu-

$$AM = [sen(h) + 0,15 \cdot (3,885 + h)^{-1,235}]^{-1} \cdot \left[\frac{101325 \cdot \exp(-0,0001184 \cdot z)}{101325} \right] \quad (6)$$

Figura 4: Comportamento de PR_{Corr} de LEA1 em 2018.



voso. Para o período pré-chuvoso de 2019 considera-se o intervalo de 01/12/2018 a 31/01/2019.

Para o período pré-chuvoso é observado um comportamento disperso de PR_{Corr} resultando no valor médio de 0,89, enquanto o volume médio diário de chuvas é de 7,05 mm/dia; em relação ao período seco de 2018 há uma redução de 5,32% em PR_{Corr} . Uma das causas dessa redução no valor médio de PR_{Corr} é a redução da irradiação, visto que no período seco de 2018 a irradiação média diária é de 6,03 kWh/m²/dia e no período pré-chuvoso de 2019 é de 5,00 kWh/m²/dia.

No período chuvoso de 2019 (A) (fevereiro a maio) observa-se que PR_{Corr} permanece menos disperso; o valor médio de PR_{Corr} para esse período é de 0,91, o que representa um aumento de cerca de 2,25% em relação ao período pré-chuvoso; o volume médio de chuvas diárias é de 17,47 mm/dia. Para o período pós-chuvoso de 2019 (junho e julho) é observado PR_{Corr} médio de 0,92 e volume médio de chuvas de 5,44 mm/dia; apesar de ter aumentado o valor médio de PR_{Corr} em relação ao período chuvoso, deve-se ressaltar que a ausência de dados entre fevereiro e março de 2019 devido ao filtro da condição de céu utilizado pode ter prejudicado o valor médio de PR_{Corr} no período chuvoso. Para esse período há dois comportamentos a serem analisados: inicialmente, entre 01/06/2019 e 23/06/2019 há um decaimento no valor de PR_{Corr} , passando de 0,90 para 0,85 mesmo com a ocorrência de chuvas com volume médio diário de 11,49 mm/dia; entre 24/06/2019

e 30/07/2019 há uma recuperação no valor de PR_{Corr} , com comportamento em torno de 0,95, apesar do volume de chuvas ser de 1,78 mm/dia.

No período seco de 2019 (agosto-novembro) a PR_{Corr} mostra decrescimento, passando de 1 em 01/08/2019 para 0,74 em 31/10/2019, ou seja, uma redução de 26%; para o período seco o valor médio de PR_{Corr} é de 0,86 (redução de 6,52% em relação ao período pós-chuvoso). O volume médio diário de chuva é de 0,40 mm/dia. O comportamento do PR_{Corr} no período seco de 2019 reforça que há uma tendência que essa métrica apresente melhor desempenho durante os períodos com maior incidência de chuvas; na literatura diversos autores relatam comportamento similar para diferentes partes do mundo. Além disso, torna-se mais claro que o comportamento mais estável da PR_{Corr} na estação seca de 2018 é consequência das intervenções de limpeza manual na LEA1.

Na Figura 6 é apresentado o comportamento de SRatio de LEA1 em 2018; as áreas sombreadas representam (A) período chuvoso e (B) período não chuvoso; o mês de dezembro de 2018 é analisado em conjunto com o mês de janeiro de 2019 por se caracterizarem como período pré-chuvoso de 2019.

No período pré-chuvoso de 2018 (janeiro) a SRatio média é de 0,84, enquanto o volume médio diário de chuvas é de 6,69 mm/dia. Para esse período, o menor valor de SRatio é de 0,76 em 11/01/2018; entre 01/01/2018 e 11/01/2018 o volume médio de chuvas é

Figura 5: Comportamento de PR_{Corr} de LEA1 em 2019.

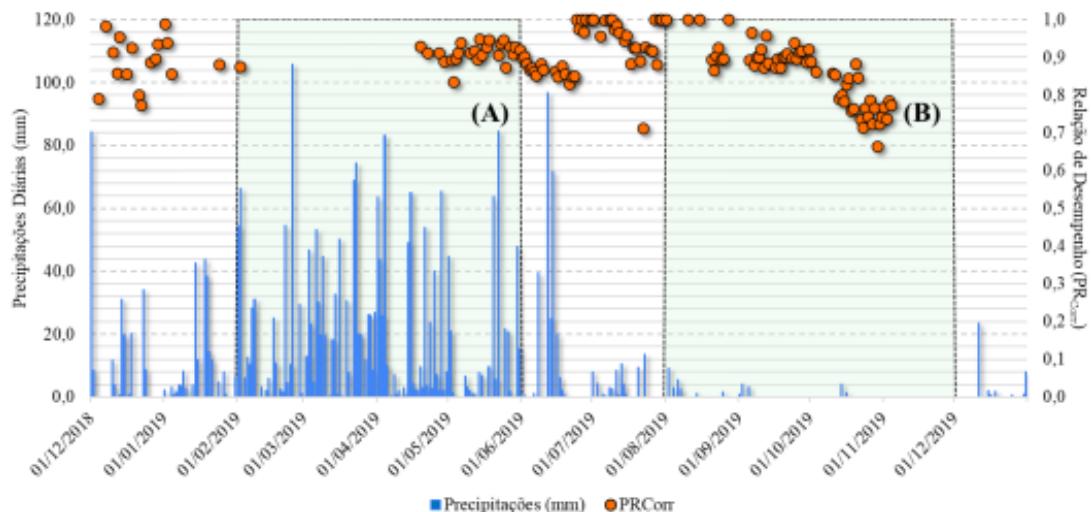
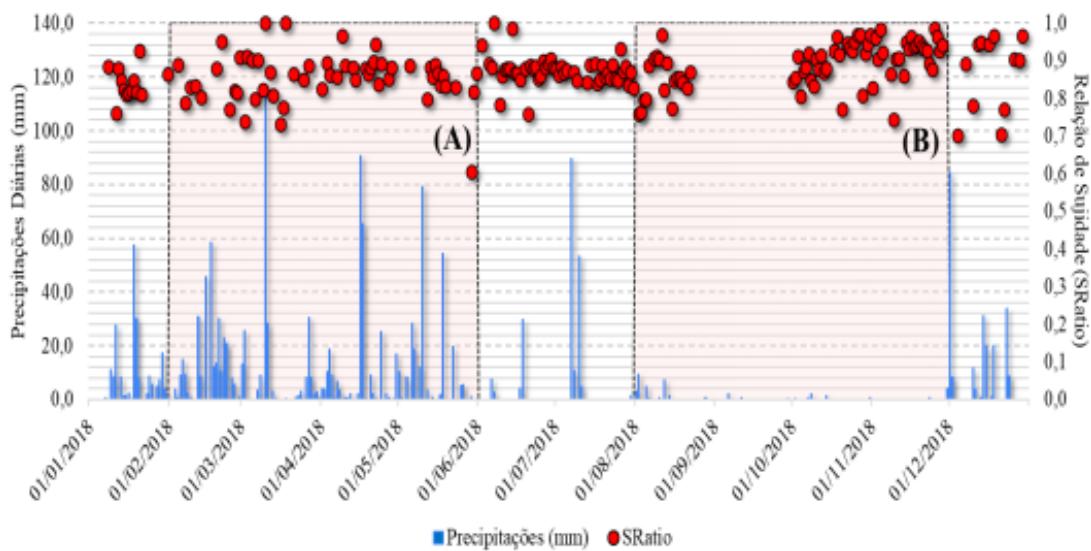


Figura 6: Comportamento de SRatio de LEA1 em 2018.



de 4,36 mm/dia. O valor máximo de SRatio é de 0,93 em 20/01/2018 e está associado a um volume de chuvas de 13,66 mm/dia entre 11/01 e 20/01.

Para o período chuvoso de 2018 (A) o volume médio de chuvas é de 10,07 mm/dia, enquanto o valor médio de SRatio é de 0,86; o aumento no valor médio de SRatio foi de 2,36% em relação ao período pré-chuvoso. Apesar do período chuvoso concentrar o maior volume e frequência de chuvas, o SRatio não permanece em 1; é preciso considerar que entre 2016 e 2017 o volume de chuvas em Fortaleza foi inferior ao observado em 2018, ou seja, os módulos já continham uma camada de sujeira de difícil remoção.

Durante o período pós-chuvoso de 2018 (junho-julho) o valor médio de SRatio é de 0,87, enquanto o volume médio de chuvas é de 3,35 mm/dia; em relação ao período chuvoso o SRatio da estação pós-chuvosa apresentou um aumento de 1,16% apesar da redução no volume de chuvas. O comportamento da SRatio nesse período é justificado pelo aumento da irradiação, passando de cerca de 4,71 kWh/m²/dia para 5,62 kWh/m²/dia e limpeza promovida pelas chuvas durante a estação chuvosa.

No período seco de 2018 (agosto-novembro) o valor médio de SRatio é de 0,89, enquanto o volume médio de chuvas é de 0,34 mm/dia. Devido às intervenções

de limpeza manual no mês de setembro, a análise do comportamento de SRatio é realizada em dois períodos distintos: antes (agosto) e após a limpeza manual (outubro e novembro); os dados de setembro são excluídos dessa análise. Antes da limpeza, o SRatio médio é de 0,85, ou seja, 2,3% menor que na estação pós-chuvosa; o volume médio de chuvas é de 0,90 mm/dia e a irradiação média de 6,18 kWh/m²/dia; apesar do aumento da irradiação a métrica SRatio apresenta deterioração, indicando acúmulo adicional de sujidade nos módulos.

Após a limpeza manual, o volume de chuvas é de 0,17 mm/dia, a irradiação média é de 5,56 kWh/m²/dia e a SRatio médio é de 0,91; aumento de aproximadamente 7,0% em relação ao período antes da limpeza e de 4,6% em relação ao período pós-chuvoso. Para o período após a limpeza manual, cerca de 66% dos valores de SRatio observados são acima de 0,90; neste mesmo período 84,6% dos valores de PR_{corr} são superiores a 0,90. As métricas de avaliação indicam menor impactos da sujidade em LEA1 durante o período seco; assim, as limpezas manuais mostraram-se efetivas.

Na Figura 7 é apresentado o comportamento de SRatio de LEA1 em 2019; as áreas sombreadas representam (A) período chuvoso e (B) período não chuvoso; o período pré-chuvoso corresponde ao período 01/12/2018 a 31/01/2019.

No período pré-chuvoso de 2019 (dezembro/2018 e janeiro/2019) a SRatio média é de 0,88, enquanto o volume médio diário de chuvas é de 7,05 mm/dia; em relação ao período seco de 2018 há uma redução de 3,30% em SRatio; como apontado no caso da degradação de PR_{corr} no mesmo período, a redução da irradiação entre o período seco de 2018 e pré-chuvoso de 2019 pode ter contribuído com a redução de SRatio.

No período chuvoso de 2019 (A) (fevereiro a maio) o volume médio de chuvas é de 17,47 mm/dia enquanto o valor médio de SRatio é de 0,85. A ausência de dados de SRatio no início da estação chuvosa prejudica a observação do comportamento da métrica diante da transição entre os regimes pluviométricos; contudo, os dados disponibilizados mostram que há uma maior estabilidade da métrica entre 0,80 e 0,90. No período pós-chuvoso (junho e julho) há uma tendência de decaimento de SRatio devido à redução das chuvas; o volume médio de chuvas é de 5,44 mm/dia, enquanto o SRatio médio é de 0,79 (7% menor em relação ao período chuvoso).

No período seco de 2019 (B) (agosto-novembro), SRatio apresenta tendência de decrescimento, sobre tudo em novembro; o SRatio médio do período seco de 2019 é de 0,86, enquanto o volume médio de chuvas é de 0,3 mm/dia. Apesar do SRatio do mês seco ser

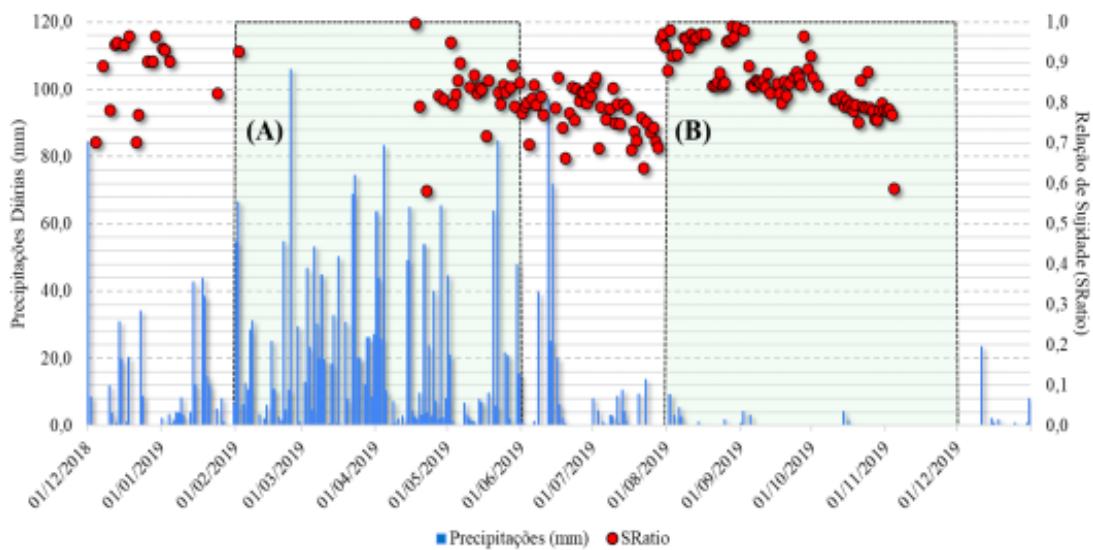
8,8% maior em relação ao período pós-chuvoso deve-se levar em consideração o aumento da métrica na transição entre as estações pluviométricas, quando é observado que SRatio apresenta valor em torno de 0,90 em virtude da ocorrência de chuvas de baixo volume. Para facilitar a observação do deterioramento de SRatio no período seco, optou-se por determinar o SRatio médio em cada mês, sendo observado que: (1) em agosto o SRatio médio é de 0,93 e o volume médio de chuvas de 0,74 mm/dia; (2) em setembro o SRatio médio é de 0,86 e o volume de chuvas de 0,27 mm/dia; (3) em outubro os valores médios de SRatio e volume de chuvas são, respectivamente, 0,80 e 0,18 mm/dia; (4) em novembro não são registradas chuvas e o valor médio de SRatio é de 0,73. Observa-se que há degradação de SRatio à medida que o volume médio de chuvas cai, ou seja, ocorre aumento dos efeitos da sujidade na planta. O valor de SRatio médio é reduzido 21,5% entre agosto e novembro de 2019.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O período chuvoso de 2018 proporciona um aumento de 20,51% de PR_{corr} em relação ao período pré-chuvoso, enquanto SRatio aumenta 2,36%; o volume de chuvas médio diário é de 10,07 mm/dia. Ao considerar o período seco de 2018 o valor de PR_{corr} sofre uma redução de 3,19% em relação ao período pós-chuvoso, passando de 0,97 para 0,94, enquanto SRatio passa de 0,87 para 0,89, representando um aumento de 2,30%; o comportamento de SRatio durante o período seco de 2018 justifica-se pela realização de duas intervenções de limpeza realizadas em 08/09/2018 e 18/09/2018. Os efeitos das limpezas manuais são verificados ao observar SRatio médio antes (0,85 em agosto) e após as limpezas (0,91 em outubro e novembro); verifica-se aumento de 7,0% no valor médio de SRatio após as limpezas manuais realizadas na planta LEA1.

No período chuvoso de 2019 PR_{corr} apresenta valor médio de 0,91 (2,25% em relação ao período pré-chuvoso), enquanto o valor médio de SRatio é de 0,85. No período seco de 2019 é verificada uma tendência de decaimento de PR_{corr} culminando em uma redução de 26% entre 01/08/2019 e 31/10/2019; o PR_{corr} médio no período seco de 2019 é de 0,86. No tocante à SRatio no período seco de 2019, há uma elevação de 8,8% do seu valor em relação ao período pós-chuvoso, contudo há influência devido à ocorrência de chuvas na transição entre os períodos pós-chuvoso e seco; verifica-se um decaimento de 21,5% entre agosto e novembro, passando de 0,93 para 0,73.

Figura 7: Comportamento de SRatio de LEA1 em 2019.



AGRADECIMENTOS

O segundo autor agradece ao CNPq pela bolsa de pesquisador concedida.

REFERÊNCIAS

- ABDALLAH, M.; KHAIYAT, A.; BASAHEEH, A.; KOTSOVOS, K.; BALLARD, I.; ALSAGGAF, A.; GEREIGE, I.; THÉRON, R. Soiling loss rate measurements of photovoltaic modules in a hot and humid desert environment. *Journal of Solar Energy Engineering*, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, v. 143, n. 3, p. 1–9, 2021.
- AKTER, S.; SHAWN, M. M. H.; ISLAM, M. K.; AHMED, S.; RAHMAN, M. M. Degradation of pv module performance due to dust accumulation on the high-rise buildings. In: **2020 IEEE International Women in Engineering (WIE) Conference on Electrical and Computer Engineering (WIECON-ECE)**. Bhubaneswar, India: IEEE, 2020. p. 239–242.
- AMILLO, A. G.; HULD, T.; MÜLLER, R. A new database of global and direct solar radiation using the eastern meteosat satellite, models and validation. *Remote sensing*, MDPI, v. 6, n. 9, p. 8165–8189, 2014.
- ARAÚJO, D. N. *Investigação experimental dos efeitos da sujidade no desempenho de plantas fotovoltaicas instaladas no campus do Pici da UFC*.
- Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.
- ARAÚJO, D. N.; CARVALHO, P. C. M. de; DUPONT, I. M. Efeitos da acumulação de sujeira sobre o desempenho de módulos fotovoltaicos. *Revista Tecnologia*, v. 40, n. 2, p. 1–23, 2019.
- ARAUJO, D. N.; COSTA, S. C. S.; DUPONT, I. M.; CARVALHO, P. C. Impacts da sujidade e efeitos da limpeza no desempenho de módulos fotovoltaicos. In: **Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS**. Fortaleza: ABENS, 2020. p. 1–8.
- AYALA, P.; MUÑOZ, C.; OSORIO, N.; HERNÁNDEZ, C.; ZURITA, F.; GUTIERREZ, V.; RAMIREZ, G.; MANCILLA, F.; VALDIVIA, P.; CUEVAS, F. et al. Bifacial technology performance compared with three commercial monofacial pv technologies under outdoor high irradiance conditions at the atacama desert. In: **2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC)(A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC)**. Waikoloa Village: IEEE, 2018. p. 0672–0675.
- BESSA, J. G.; MICELI, L.; ALMONACID, F.; FERNÁNDEZ, E. F. Monitoring photovoltaic soiling: assessment, challenges, and perspectives of current and potential strategies. *Iscience*, Elsevier, v. 24, n. 3, p. 102165, 2021.
- CHAVES, M. d. P. *Estudo sobre sombreamento em planta fotovoltaica localizada em zona urbana de*

- Fortaleza-CE.** Dissertação (Graduação em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.
- COSTA, S. C. S.; CASSINI, D. A.; DINIZ, A. S. A. C.; KAZMERSKI, L. L. Modelo para estimativa da irradiação solar incidente sobre o módulo fotovoltaico inclinado utilizando dados de irradiação global horizontal. In: **Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS**. Florianópolis: ABENS, 2022. p. 1–9.
- COSTA, S. C. S.; KAZMERSKI, L. L.; DINIZ, A. S. A. Impact of soiling on si and cdte pv modules: Case study in different brazil climate zones. **Energy Conversion and Management**: X, Elsevier, v. 10, n. 1, p. 100084, 2021.
- DIERAUF, T.; GROWITZ, A.; KURTZ, S.; CRUZ, J. L. B.; RILEY, E.; HANSEN, C. **Weather-corrected performance ratio**. 2013.
- DJAFER, D.; IRBAH, A. Estimation of atmospheric turbidity over ghardaïa city. **Atmospheric Research**, Elsevier, v. 128, n. 1, p. 76–84, 2013.
- DUPONT, I. M. **Metodologia para identificação de condições não ideais de operação de plantas fotovoltaicas**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.
- FILHO, M. F. F.; ARAUJO, D. N.; CARVALHO, P. C. M. de; SASAKI, J. M. Análise da composição físico-química da sujidade de plantas fotovoltaicas: estudo de caso para fortaleza. **Revista Tecnologia**, v. 41, n. 2, p. 1–17, 2020.
- GOSTEIN, M.; DÜSTER, T.; THUMAN, C. Accurately measuring pv soiling losses with soiling station employing module power measurements. In: **2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)**. New Orleans: IEEE, 2015. p. 1–4.
- HOSSAIN, M.; RABBI, F.; ZAMAN, S.; RAHMAN, F.; ISLAM, M. S. Study of dust effect on pv panel's efficiency during winter for dhaka, bangladesh. In: **2020 2nd International Conference on Sustainable Technologies for Industry 4.0 (STI)**. Dhaka, Bangladesh: IEEE, 2020. p. 1–4.
- ILSE, K.; MICHELI, L.; FIGGIS, B. W.; LANGE, K.; DASSLER, D.; HANIFI, H.; WOLFERTSTETTER, F.; NAUMANN, V.; HAGENDORF, C.; GOTTSCHALG, R. et al. Techno-economic assessment of soiling losses and mitigation strategies for solar power generation. **Joule**, Elsevier, v. 3, n. 10, p. 2303–2321, 2019.
- ILSE, K. K.; FIGGIS, B. W.; NAUMANN, V.; HAGENDORF, C.; BAGDAHN, J. Fundamentals of soiling processes on photovoltaic modules. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 98, n. 1, p. 239–254, 2018.
- JAMIL, W. J.; RAHMAN, H. A.; SHAARI, S.; SALAM, Z. Performance degradation of photovoltaic power system: Review on mitigation methods. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 67, n. 1, p. 876–891, 2017.
- JOHN, J. J. **Characterization of soiling loss on photovoltaic modules, and development of a novel cleaning system**. Tese (Doutorado) — Indian Institute of Technology Bombay, Mumbai, India, 2015.
- KAZEM, H. A.; CHAICHAN, M. T.; AL-WAELI, A. H.; SOPIAN, K. A review of dust accumulation and cleaning methods for solar photovoltaic systems. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 276, n. 1, p. 123187, 2020.
- LARICO, E. R. A.; CUTIPA, J. M. R.; CALLATA, L. V. Effect of dust and rain on the performance of a photovoltaic system at more than 3800 m altitude. In: **2020 IEEE Engineering International Research Conference (EIRCON)**. Lima, Peru: IEEE, 2020. p. 1–4.
- LAWRENCE, C. R.; NEFF, J. C. The contemporary physical and chemical flux of aeolian dust: A synthesis of direct measurements of dust deposition. **Chemical Geology**, Elsevier, v. 267, n. 1-2, p. 46–63, 2009.
- MATSUMOTO, Y.; RAMOS, M. A.; URBANO, J. A.; LUNA, M. A.; PITALÚA-DÍAZ, N.; ASOMOZA, R.; PEÑA, R.; SANDOVAL, E. R. Pv-module soiling as a main photovoltaic system performance suppressor. In: **2020 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)**. Calgary, OR: IEEE, 2020. p. 1243–1247.
- MICHELI, L.; MULLER, M. T.; DECEGLIE, M. G.; RUTH, D. **Time series analysis of photovoltaic soiling station data: Version 1.0, august 2017**. 2017.
- NURJANAH, S.; DEWI, T. et al. 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)**. Malang, Indonesia: IEEE, 2021. p. 251–256.
- PEREIRA, R. I.; DUPONT, I. M.; CARVALHO, P. C.; JUCA, S. C. Iot embedded linux system based on raspberry pi applied to real-time cloud monitoring

of a decentralized photovoltaic plant. **Measurement**, Elsevier, v. 114, n. 1, p. 286–297, 2018.

PEREIRA, R. I.; JUCÁ, S. C.; CARVALHO, P. C.; SOUZA, C. P. IoT network and sensor signal conditioning for meteorological data and photovoltaic module temperature monitoring. **IEEE Latin America Transactions**, IEEE, v. 17, n. 06, p. 937–944, 2019.

PEREIRA, R. I. S. **Rede de monitoramento IoT aplicada em plantas de microgeração fotovoltaica**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

RADONJIĆ, I.; PAVLOVIĆ, T.; MIRJANIĆ, D.; PANTIĆ, L. Investigation of fly ash soiling effects on solar modules performances. **Solar Energy**, Elsevier, v. 220, p. 144–151, 2021.

SANTOS, L. d. O. **Uso de aprendizado de máquina no desenvolvimento de modelos de previsão da temperatura de operação de células fotovoltaicas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

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**, Elsevier, v. 22, n. 1, p. 698–733, 2013.

SOUZA, J. J. S.; CARVALHO, P. C. M. d.; 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**, American Society of Mechanical Engineers, v. 145, n. 4, p. 040801, 2023.

TANESAB, J.; SINAGA, R.; MAUTA, J.; AMHEKA, A.; HATTU, E.; LIEM, F. N. Temporary performance degradation of photovoltaic street light in kupang city, nusa tenggara timur province, indonesia. In: **E3S Web of Conferences**. indonesia: EDP Sciences, 2020. v. 190, p. 00018.

URREJOLA, E.; ANTONANZAS, J.; AYALA, P.; SALGADO, M.; RAMÍREZ-SAGNER, G.; CORTÉS, C.; PINO, A.; ESCOBAR, R. Effect of soiling and sunlight exposure on the performance ratio of photovoltaic technologies in santiago, chile. **Energy Conversion and Management**, Elsevier, v. 114, n. 1, p. 338–347, 2016.