

EFEITOS DA MITIGAÇÃO MANUAL DE SUJIDADE NO DESEMPENHO DE UMA PLANTA FOTOVOLTAICA EM AMBIENTE URBANO

José Janiere Silva de Souza¹
Paulo Cesar Marques de Carvalho²
Ivonne Montero Dupont²

¹*Instituto Federal do Ceará*

²*Universidade Federal do Ceará*

DOI: 10.47168/rbe.v30i1.845

RESUMO

A energia solar tem sido utilizada em diversas aplicações, como a geração de eletricidade por meio de sistemas fotovoltaicos (FV). Porém, o desempenho elétrico desses sistemas é influenciado pelas condições ambientais, climáticas e antropológicas do local de instalação, como sujeira. Considerando esse contexto, este artigo tem como objetivo analisar os efeitos de intervenções de limpeza manual em uma usina FV instalada em Fortaleza-Ceará (Brasil). Verifica-se um aumento de produção de energia elétrica de 1,92% em 21/09/2018 (três dias após a 2ª limpeza) face a 19/08/2018 (30 dias antes da 2ª limpeza); *SRatio* (Relação de Sujidade) e η (eficiência) apresentaram uma melhoria de 3,45% e 3,62%, respectivamente. Após 21 dias da 2ª limpeza, a geração da unidade LEA1 foi 1,96% menor mesmo com a irradiação sendo 2,31% maior; *SRatio*, η e Y_{FV} (Produtividade) apresentam redução de 4,82%, 4,82% e 2,02%, respectivamente. Ao analisar o valor médio mensal das métricas PR_{Corr} , *SRatio* e η em 2018, foi observado que as intervenções de limpeza na planta FV mostraram-se efetivas, com uma melhoria de 7,36% no valor médio mensal de η em outubro (posterior às limpezas) em relação a agosto (anterior à limpeza).

Palavras-chave: Planta FV; Limpeza manual; Sujidade; *SRatio*.

ABSTRACT

Solar energy has been used in various applications, such as the generation of electricity through photovoltaic (PV) systems. However, the performance of these electrical systems is influenced by environmental, climatic, and anthropological conditions of the installation site, such as soiling. Considering this context, our article aims to analyze the effects of intensifying manual cleaning of a PV plant in Fortaleza-Ceara (Brazil). An electricity production increase of 1,92% was verified on

09/21/2018 (three days after the 2nd cleaning) compared to 08/19/2018 (30 days before the 2nd cleaning); $SRatio$ (Soiling Ratio) and η (Efficiency) experienced an improvement of 3.45% and 3.62%, respectively. After 21 days of the 2nd cleaning, the generation by the unit LEA1 was 1.96% lower even with the irradiation being 2.31% higher; $SRatio$, η and Y_{FV} (Yield) showed a reduction of 4.82%, 4.82% and 2.02%, respectively. When analyzing the average monthly value of the PR_{Corr} , $SRatio$ and η in 2018, it was observed that the cleaning interventions in the PV plant proved to be effective, with an improvement of 7.36% in the average monthly value of η in October (after the cleaning) compared to August (before the cleaning).

Keywords: PV Plant; Manual cleaning; Soiling; $SRatio$.

1. INTRODUÇÃO

Segundo o Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais das Nações Unidas (UNITED NATIONS, 2019), a população mundial deve atingir o montante de 8,5 bilhões em 2030, 9,7 bilhões em 2050 e 10,9 bilhões em 2100; com isso, cresce a busca por fontes sustentáveis para geração de eletricidade para suprir o consumo. A energia do Sol tem sido usada pelo ser humano em diversas aplicações: aquecimento de ambientes, secagem de alimentos e dessalinização de água. A utilização da energia solar para a geração de eletricidade, em escala comercial, tem se tornado uma tendência em diversos países como forma de substituição/redução do uso de combustíveis fósseis (KAZEM et al., 2020).

Ao analisar os dados de geração fotovoltaica (FV) a nível global, é observado um aumento de 270 TWh, incremento de 26% em 2022; estima-se que a geração FV ultrapassará a geração a partir de carvão até 2027. Em especial, esse crescimento deve-se à utilização dos sistemas FV nos países pertencentes à Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) e China (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2021). Assim, justifica-se o crescente interesse da comunidade científica na realização de estudos referentes à utilização de sistemas FV em diferentes vertentes: (HERNANDEZ e SANTOS, 2021), (BUSSON et al., 2021), (NIETO et al., 2021), (MONTANO et al., 2022), (SILVA et al., 2022) e (LIMA et al., 2023).

Os módulos FV são classificados sob Condições Padrão de Teste (*Standard Test Conditions* - STC) que não correspondem, necessariamente, às condições ambientais de uma determinada localidade; em áreas urbanas, por exemplo, os módulos FV estão suscetíveis a altas temperaturas, poluição do ar, sombreamento e sujidade (SAILOR; ANAND; KING, 2021). É comum encontrar na literatura autores que classificam irradiância/sombreamento, tempera-

tura e sujidade, nessa ordem, como os fatores que mais impactam o desempenho de módulos FV. No tocante aos sistemas FV, estudos têm sido realizados para evidenciar os efeitos da sujidade em várias tecnologias FV, sobretudo em regiões áridas e semiáridas; à medida que há aumento na implementação de usinas FV, o interesse pela temática da sujidade evolui (COSTA; DINIZ; KAZMERSKI, 2018) e (SOUZA; CARVALHO; BARROSO, 2022).

Os efeitos da sujidade são observados em módulos de silício amorfo (a-Si) em Adrar (Argélia) (BENABDELKRIM et al., 2021). Ao observar um módulo sujeito a um ano de deposição de sujidade, sem limpeza manual, é observada uma redução de 87% da potência em relação ao estado limpo; a Corrente de Curto-Circuito (I_{sc}) é reduzida em 79,89%, a Tensão de Circuito Aberto (V_{oc}) em 3,06%, enquanto a eficiência e Fator de Forma (FF) em 72,5% e 40,54%, respectivamente. As perdas por sujidade são quantificadas em módulos FV em Abuja (Nigéria) (BADAMASI et al., 2021); são utilizados diferentes ângulos de inclinação (8°, 20°, 35°, 45°, 60°). É relatado que as perdas de energia do módulo sujo passam de 13% para o ângulo de 8°, para 7,74% para a inclinação de 20°, para o ângulo de 35° as perdas são de 12,8%, passando para 7,49% para 45° e 11,4% para a inclinação de 60°.

Um estudo, com duração de um mês, verifica o impacto da sujidade em módulos bifaciais em Jaipur (Índia) (RAINA et al., 2021). As perdas por sujidade ao final do experimento são de 6,86%, enquanto a Taxa de Sujidade (*Soiling Rate* – *SRate*) é de aproximadamente 0,23%/dia; a métrica *SRate* representa a variação percentual diária da relação de sujidade devido à ausência de limpeza dos módulos FV (MICHELLI et al., 2017). Os efeitos da sujidade são avaliados em um sistema FV de 2.000,3 kWp instalado em um telhado em Sonargaon (Bangladesh), com módulos FV sob diferentes intervalos de limpeza (ALAM et al., 2021). Os valores da Relação de Desempenho (*Performance Ratio* - *PR*) variam entre 74,40% e 78,83% antes de uma limpeza; após a limpeza a *PR* passa a variar na faixa de 85,15% a 87,57%. De modo geral, há uma melhoria entre 10 e 12% da *PR* considerando a adoção de três limpezas por mês.

O impacto da sujidade na geração de energia elétrica de módulos FV é quantificado em Jaipur (Índia) (RAINA; SHARMA; SINHA, 2022). As perdas por sujidade, após 30 dias, são de 6,86%, enquanto o *SRate* fica na faixa de 0,23% a 0,27%/dia; o *SRate* médio no final do período de teste é de 0,23%/dia. As características da sujidade e os efeitos no desempenho de uma planta FV de 9,5 MWp com módulos de silício policristalino (p-Si), nas proximidades de uma plantação de arroz na Tailândia, são avaliados em (SAKARAPUNTHIP et al., 2021). A maior densidade de deposição de sujidade é de 1,64 g/m² (após 70 dias de exposição), que está associada a uma redução de 41,96% da transmitância das amostras de vidro (expostas junto aos módulos);

após a incidência de chuvas, e consequente limpeza natural dos módulos, as perdas de corrente reduzem para a faixa entre 1 e 3%.

Diante do exposto, o presente artigo tem como objetivo apresentar os efeitos de intervenções manuais de limpeza da sujidade em uma planta FV com módulos p-Si instalados no Laboratório de Energias Alternativas da Universidade Federal do Ceará (LEA – UFC), localizado no ambiente urbano de Fortaleza, estado do Ceará, Brasil.

2. ASPECTOS TEÓRICOS

Um módulo com sujidade 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. A deposição não uniforme pode causar o surgimento de pontos quentes que, eventualmente, podem danificar permanentemente as células FV; tipicamente, a deposição não uniforme é observada em módulos FV com molduras (BRAGA, 2018). Adicionalmente, a deposição não uniforme também pode estar relacionada à presença de excrementos de animais e proliferação de fungos, musgo e algas.

2.1 Composição da sujidade

A distribuição do tamanho das partículas de sujidade é diferente para cada localidade, pois depende da fonte, geração e dispersão; as características químicas são específicas de cada local, pois estão relacionadas aos mecanismos de produção (RAO; MANI; RAMAMURTHY, 2018). Assim, a caracterização da composição da sujidade, bem como a forma de sua distribuição pela superfície dos módulos FV, são fatores cruciais para o entendimento das interações partículas-módulos, determinação dos seus efeitos no desempenho elétrico e escolha de métodos de mitigação.

O carregamento de partículas na atmosfera está principalmente relacionado à ação de erosão causada pelo vento no solo. Após o início da movimentação das partículas, os mecanismos de transporte dependem sobretudo do seu tamanho (PICOTTI et al., 2018). Partículas maiores são afetadas principalmente por efeitos inerciais e gravitacionais, enquanto as partículas menores são influenciadas pelas interações inter-partículas. Assim, partículas finas (<1 μm) tendem a se acumular com maior rapidez do que as partículas grossas (>5 μm) (SALAMAH et al., 2022).

A sujidade apresenta natureza orgânica e inorgânica; na presença de água ou em condições com alta umidade, a parte solúvel tende a formar gotículas microscópicas de soluções salinas que envolvem 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 não solúvel e a superfície dos módulos, atuando como um cimento; conseqüentemente, as partículas não poderão ser removidas por rolamento/deslizamento. Caso esse processo se repita de forma periódica, sem que haja nenhuma intervenção de limpeza, provocará o acúmulo de camadas de partículas cimentadas. Desse modo, o processo de limpeza (manual ou natural) torna-se mais complicado e, em casos mais extremos, pode alterar de forma definitiva as propriedades do vidro dos módulos FV (ILSE et al., 2018).

2.2 Métodos de mitigação

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). 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. Dessa forma, a escolha do método de limpeza, periodicidade, eficiência e custos associados dependem de um estudo de caso prévio (KAZEM et al., 2020).

Após a instalação, um dos principais métodos de melhoria da eficiência de plantas FV é a limpeza dos módulos; fatores como a inclinação, tipo de módulo e a metodologia de limpeza (úmida ou seca) devem ser considerados ao projetar mecanismos de limpeza (LAKSAHANI et al., 2021). Geralmente os sistemas de limpeza são de alto custo e economicamente viáveis apenas para sistemas de médio e grande porte; em sistemas de pequeno porte, as soluções disponíveis são do tipo manual, a fim de não impactar significativamente no custo total da planta FV (KHAN et al., 2021).

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 em plantas FV que não adotam cronograma de limpeza (ALAM 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 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 (KAZEM et al., 2020); o risco de acidentes de pessoal e as dificuldades de movimentação, má manutenção e desperdício de água são outras desvantagens (LAKSAHANI et al., 2021).

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. Os sistemas baseados em limpeza mecânica não manual a seco podem ser uma solução viável para áreas com dificuldade de acesso à água; contudo, o contato direto das escovas com a superfície dos módulos pode causar danos físicos (KAZEM et al., 2020). Os sistemas mecânicos não manuais úmidos agem de forma similar à chuva, sendo a água canalizada até os módulos FV a fim de remover a sujidade. Contudo, esse método requer disponibilidade de água e utilização de bombas para aumentar a pressão da água; em alguns casos, podem ser adicionados agentes de limpeza para auxiliar no processo de remoção das partículas (KAZEM et al., 2020).

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, via com alto fluxo de veículos. Fortaleza localiza-se em uma região semiárida com clima tropical quente subúmido (ou tropical chuvoso), apresentando temperatura anual média de 26,6°C. A pluviosidade média anual é de 1.338 mm, insolação média de 2.840 horas/ano, baixo grau de nebulosidade, evaporação média de 1.500 mm/ano e alta umidade relativa do ar (valor médio anual de 78,8%) (MAIA, 2015) e (PREFEITURA DE FORTALEZA, 2019). Além disso, possui período chuvoso no primeiro semestre (entre fevereiro e maio) e período seco no segundo semestre (entre agosto e novembro) (MOURA et al., 2015).

O LEA – UFC possui duas plantas FV conectadas à rede elétrica de baixa tensão. A primeira, denominada LEA1, representada na Figura 1 e utilizada nesse estudo, foi instalada em julho de 2016, com potência de 1,5 kWp, inclinação de 10° orientada ao norte geográfico e constituída por seis módulos de 250 Wp do tipo p-Si conectados em série.

LEA1 é conectada à rede elétrica através de um inversor modelo PHB1500-SS. O registro dos parâmetros elétricos é realizado por um *datalogger*, do mesmo fabricante do inversor, com amostragem de aproximadamente 10 minutos; os dados são enviados, armazenados e disponibilizados em um servidor *web* do fabricante do inversor.

A planta LEA1 passou por intervenções de limpeza manual com a utilização de água, sabão neutro, pano de algodão e rodo nos dias 08 e 18 de setembro de 2018 (CHAVES et al., 2019) (DUPONT et al., 2019); essas intervenções possibilitam a observação dos efeitos de limpezas manuais no desempenho da LEA1, foco deste estudo.



Figura 1 – Planta FV LEA1, instalada no Campus do Pici da UFC

3.2 Métricas de avaliação de desempenho da planta FV

Uma métrica difundida na comunidade científica para determinação dos efeitos da sujidade é a Relação de Sujidade (*Soiling Ratio* - SRatio), que pode ser determinada através dos dados de I_{sc} (Corrente de Curto-Circuito) ou P_{Max} (Potência Máxima) de módulos sujos e limpos. A SRatio é uma métrica adimensional que varia entre 0 e 1; à medida que os valores se aproximam de 1 considera-se que há menor impacto da sujidade, enquanto valores próximos de 0 indicam forte efeito da sujidade no desempenho dos módulos FV. A SRatio pode ser estimada através de (1) (GOSTEIN; DUSTER; THUMAN, 2015).

$$SRatio_{P_{Máx}} = \frac{P_{Máx_{Sujado}}}{P_{Máx_{STC}} \cdot \left[1 + \gamma (T_{m_{Sujado}} - T_{STC}) \right] \cdot \frac{G_{POA}}{G_{STC}}} \quad (1)$$

Em que $P_{Máx_{Suj}}$ é a potência máxima medida no módulo, $P_{Máx_{STC}}$ é a potência sob STC, γ e $T_{m_{Suj}}$ são, respectivamente, os coeficientes de temperatura para potência e a temperatura do módulo sujo; T_{STC} e G_{STC} são a temperatura e irradiância nas condições de referência (25°C e 1.000 W/m²) e G_{POA} é a irradiância incidente no plano dos módulos.

SRatio varia no decorrer do dia, com maiores valores geralmente próximos ao meio-dia. Esse comportamento deve-se ao fato da irradiação direta e difusa variarem com o ângulo de incidência no decorrer do dia (ZORRILLA-CASANOVA et al., 2012). Em vista disso, a IEC 61724-1 recomenda que a determinação da SRatio em sistemas de ângulo fixo, ou sistemas de rastreamento com ângulo de incidência menor que 35°, seja estimada a partir de medições no intervalo de ± 2 horas em relação ao meio-dia. Neste estudo são utilizados filtros visando minimizar o impacto de variações ambientais na determinação das métricas de avaliação, a saber:

- São consideradas apenas medições de 10 às 14 horas;
- Neste período, a irradiância deve ser superior a 700 W/m² e apresentar variação menor que $\pm 10\%$ no intervalo de 10 minutos;
- São considerados apenas dados para condição de céu limpo;
- Dados espúrios, provocados por inconsistências e/ou ausência de dados de irradiância ou potência no período utilizado para os cálculos das métricas, são excluídos.

Para estabelecer a condição do céu é utilizado o Índice de Clareza Modificado (*Modified Clearness Index* - k'_t , que apresenta menor dependência do ângulo de elevação solar em relação ao Índice de Clareza (*Clearness Index* - k_t) (AMILLO; HULD; MÜLLER, 2014); (2), é utilizado para determinar k'_t .

$$k'_t = \frac{k_t}{1,031 \cdot \exp\left(\frac{-1,4}{0,9 + \frac{9,4}{AM}}\right) + 0,1} \quad (2)$$

Onde AM é a massa de ar (DJAFER; IRBAH, 2013) e k_t é determinado por (3).

$$k_t = \frac{G_H}{G_{sc} \cdot \cos(\theta_z)} \quad (3)$$

Em que G_{sc} é a constante solar (1.367 W/m²), G_H é a irradiância no plano horizontal e θ_z é o ângulo de zênite.

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 ($0,65 < k'_t \leq 1$). Assim, os dados de SRatio são filtrados considerando $k'_t > 0,65$ (AMILLO; HULD; MÜLLER, 2014); o valor diário de k'_t é determinado pela média dos valores de k'_t entre as 10 e 14 horas.

Outra métrica utilizada com recorrência é a Relação de Desempenho (*Performance Ratio* – PR), que estabelece uma relação de eficácia de conversão em energia elétrica de um módulo/planta FV em relação ao valor teórico. Trata-se de uma métrica adimensional, que varia entre 0 e 1; valores mais próximos de 1 indicam funcionamento próximo ao teórico (ARAÚJO, 2020). A determinação de PR normalizado em relação à irradiância mostra-se menos afetada por variações da irradiância. Todavia, apresenta vulnerabilidade devido à variação da temperatura e vento; para a determinação de PR em estudos de sujidade é conveniente a remoção da influência da variação da irradiância, temperatura e vento (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), 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 (DIERAUF et al., 2013) e (URREJOLA et al., 2016). O valor de PR_{Corr} é definido por (4).

$$PR_{Corr} = \frac{\sum_i E_{CA_i}}{\sum_i \left\{ P_{Máx_{STC}} \cdot \left[1 + \gamma (T_{c_{avg}} - T_{c_i}) \right] \cdot \frac{G_{POA_i}}{G_{STC}} \right\}} \quad (4)$$

Em que E_{CA_i} é a energia elétrica produzida pela planta FV no instante i ; $T_{c_{avg}}$ é a temperatura média anual da célula FV, conforme expresso em (5), definida como sendo o somatório hora a hora, durante 365 dias, do produto entre a irradiância e a temperatura da célula; T_{c_i} é a temperatura da célula, estimada conforme (6).

$$T_{c_{avg}} = \frac{\sum_i G_{POA_i} \cdot T_{c_i}}{\sum_i G_{POA_i}} \quad (5)$$

$$T_{c_i} = T_{m_i} + \frac{G_{POA_i}}{G_{STC}} \cdot \Delta T \quad (6)$$

O parâmetro ΔT é a diferença entre a temperatura da célula FV e a parte traseira do módulo, sendo dependente da construção dos módulos. Tipicamente, o valor de ΔT varia entre 2 e 3°C para módulos planos com montagem e vão aberto (KRATOCHVIL; BOYSON; KING, 2004). Na presente pesquisa considera-se $\Delta T = 3^\circ\text{C}$. Para determinação de $T_{c_{avg}}$ são utilizados os dados de temperatura dos módulos da planta LEA1, mensurados entre 08/01/2018 e 27/04/2019, sendo utilizadas 8.760 amostras horárias, o que corresponde à medição horária durante 24 horas no período de 365 dias; obtêm-se que $T_{c_{avg}}$ para a planta LEA1 é de 52,47°C.

Para a determinação da eficiência de conversão (η) é utilizada a equação (7) (JASZCZUR et al., 2018); em que A é a área dos módulos. Outra métrica utilizada é o Fator de Capacidade (FC), que representa a relação entre a geração de energia elétrica medida e a geração caso houvesse operação com potência nominal durante o período; o FC é determinado através de (8); Δt é o período analisado em horas. A Produtividade da planta (Y_{FV}) representa a relação entre a geração de energia elétrica e a potência instalada da planta, conforme (9).

$$\eta = \frac{P_{M\acute{a}x}}{A \cdot G_{POA} [1 + \gamma (T_c - T_{STC})]} \quad (7)$$

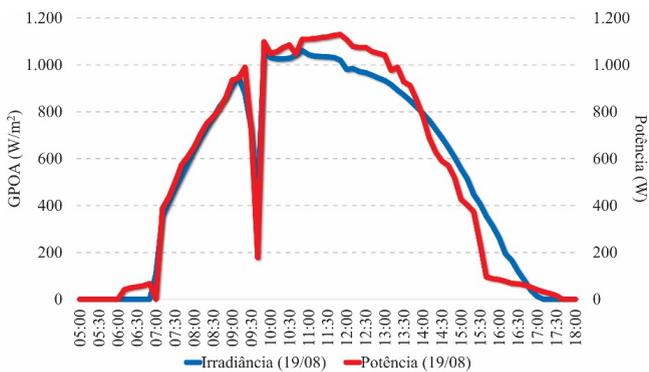
$$FC = \frac{E_{CA}}{P_{M\acute{a}x_{STC}} \cdot \Delta t} \cdot 100 \quad (8)$$

$$Y_{FV} = \frac{E_{CA}}{P_{M\acute{a}x_{STC}}} \quad (9)$$

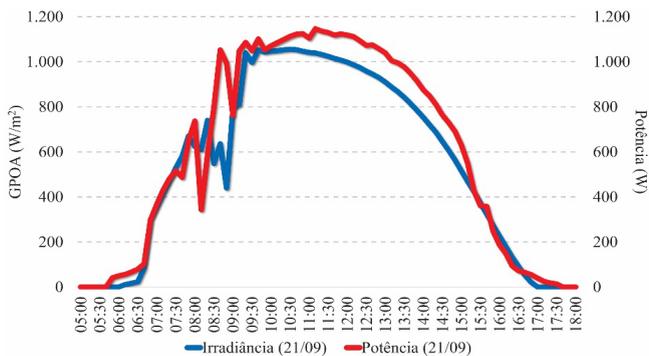
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As limpezas manuais em LEA1 foram realizadas nos dias 08/09/2018 e 18/09/2018. Os dados do dia 08/09/2018 não foram usados nesta análise em virtude das possíveis interferências nos cálculos das métricas devido à ação direta na planta FV. As medições do dia 18/09/2018 (2ª limpeza) foram descartados devido à realização de um

experimento de sombreamento estático entre 12:30 e 14:30h. Desse modo, o dia 21/09/2018 (três dias após a 2ª limpeza) foi definido como um dia claro de referência e tomado como dia de operação normal da planta LEA com módulos limpos. Para seleção dos dias para comparação dos efeitos da sujidade, foram escolhidos dias com $k'_t > 0,65$ e com irradiação $\pm 5\%$ em relação ao dia de referência. Para a 1ª comparação, foram utilizadas as medições obtidas nos dias 19/08/2018 (30 dias antes da 2ª limpeza) e 21/09/2018 (três dias após a 2ª limpeza). Na Figura 2 (a) e (b) são comparadas a irradiação e potência desses dias, respectivamente.



(a)



(b)

Figura 2 - Comparação de irradiação e potência: (a) 19/08/2018 e (b) 21/09/2018

Na Tabela 1 são apresentados os resultados da comparação das métricas de avaliação entre os dias 19/08/2018 e 21/09/2018. As setas $\uparrow \downarrow$ simbolizam aumento ou redução, respectivamente, das mé

tricas em relação ao dia de referência. Vale salientar que o cálculo de todas as métricas corresponde às medições realizadas entre as 10 e 14 horas de cada dia.

Tabela 1 - Comparação das métricas de desempenho em 08/09/2018 e 21/09/2018

Métrica	19/08/2018	21/09/2018	Diferença (%)
Irradiação (kWh/m ²)	3,84	3,81	↓0,79
Geração (kWh)	5,10	5,20	↑1,92
<i>S</i> Ratio	0,84	0,87	↑3,45
<i>PR</i> _{Corr}	0,86	0,83	↓3,61
η (%)	12,78	13,26	↑3,62
<i>FC</i> (%)	14,17	14,44	↑1,87
<i>Y</i> _{FV} (kWh/kW _p)	3,47	3,54	↑1,98

A planta LEA1 apresentou aumento nos valores das métricas de avaliação de seu desempenho no dia 21/09/2018, mesmo considerando que a irradiação foi 0,79% menor quando comparada à do dia 19/08/2018; apenas a métrica *PR*_{Corr} apresentou redução de 3,61%, enquanto η aumentou em 3,62%. Considerando a operação da planta durante todo o dia (07:00 às 17:00), a η do dia 21/09/2018 é 5,31% superior em relação ao dia 19/08/2018.

Considerando os critérios adotados, compara-se as medições dos dias 21/09/2018 (três dias após a 2ª limpeza) e 02/10/2018 (14 dias após a 2ª limpeza). O dia 02/10/2018 foi escolhido por ser o dia válido mais próximo do dia 21/09/2018. Na Figura 3 é apresentada a irradiação e potência do dia 02/10/2018.

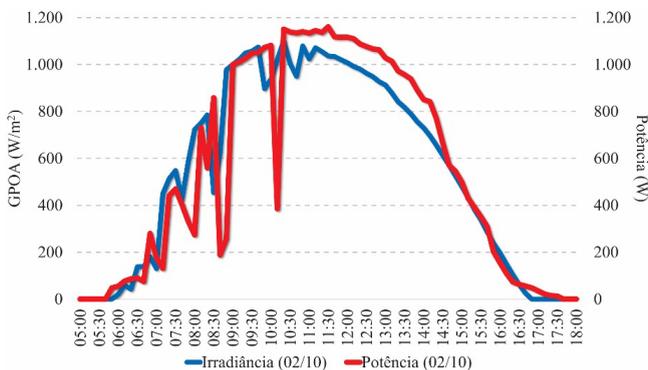


Figura 3 - Comparação da irradiação e potência do dia 02/10/2018

Na Tabela 2 são apresentados os resultados da comparação das métricas de avaliação entre os dias 21/09/2018 e 02/10/2018; os valores de diferença relativa são calculados tendo como referência o dia 21/09/2018.

Tabela 2 - Comparação das métricas de desempenho em 21/09/2018 e 02/10/2018

Métrica	21/09/2018	02/10/2018	Diferença (%)
Irradiação (kWh/m ²)	3,81	3,79	↓0,53
Geração (kWh)	5,20	5,10	↓1,96
<i>SRatio</i>	0,87	0,86	↓1,16
<i>PR_{Corr}</i>	0,83	0,81	↓2,47
η (%)	13,26	13,03	↓1,77
<i>FC</i> (%)	14,44	14,17	↓1,91
<i>Y_{FV}</i> (kWh/kW _p)	3,54	3,47	↓2,02

A irradiação de 02/10/2018 foi 0,53% inferior à do dia 21/09/2018; houve uma redução de 1,96% na geração. No intervalo analisado foram registradas duas precipitações, ambas de 0,40 mm, ocorridas em 29/09/2018 e 02/10/2018, que não se mostraram suficientes para evitar a redução das métricas de avaliação; todas as métricas de avaliação do dia 02/10/2018 foram inferiores às do dia 21/09/2018, sendo destacada a redução de 2,47% de *PR_{Corr}* e 2,02% de *Y_{FV}*.

Na Figura 4 é apresentada a irradiância e potência do dia 09/10/2018. Na Tabela 3 são apresentados os resultados da comparação das métricas de avaliação entre os dias 21/09/2018 e 09/10/2018. Apesar da irradiação do dia 09/10/2018 ter sido 2,31% maior em relação à irradiação do dia 21/09/2018, verificou-se uma geração 1,96% menor. Observa-se que houve redução de todas as métricas analisadas, sobretudo em *SRatio*, o que indica que o período de 21 dias após a limpeza já mostra acúmulo de sujidade no local em estudo; entre 21/09/2018 e 09/10/2018 foram registradas quatro precipitações de pequena intensidade, sendo a de maior volume com 2,20 mm no dia 08/10/2018.

Diante do exposto, observou-se que o dia 21/09/2018 (três dias após a 2ª limpeza) apresentou o melhor desempenho da planta LEA1, embora a irradiação nessa data não tenha sido o maior valor registrado entre os dias analisados. Ademais, destaca-se que o intervalo de 21 dias após a realização de uma limpeza foi suficiente para reduzir a η em 4,82%.

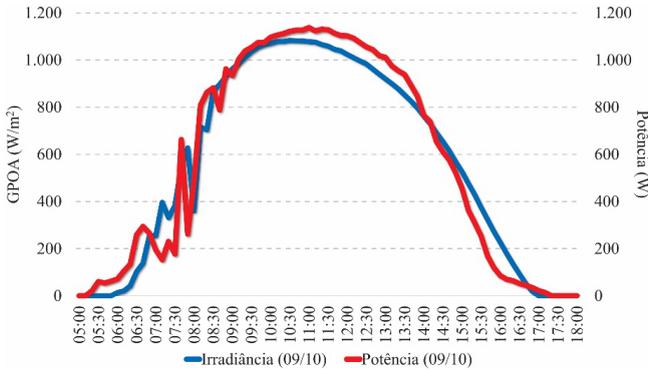


Figura 4 - Comparação da irradiância e potência do dia 09/10/2018

Tabela 3 - Comparação das métricas de desempenho em 21/09/2018 e 09/10/2018

Métrica	21/09/2018	09/10/2018	Diferença (%)
Irradiação (kWh/m ²)	3,81	3,90	↑2,31
Geração (kWh)	5,20	5,10	↓1,96
<i>SRatio</i>	0,87	0,83	↓4,82
<i>PR_{corr}</i>	0,83	0,82	↓1,22
η (%)	13,26	12,65	↓4,82
<i>FC</i> (%)	14,44	14,17	↓1,91
<i>Y_{FV}</i> (kWh/kW _p)	3,54	3,47	↓2,02

Para verificar o comportamento de longo prazo da planta LEA1 foram calculados os valores médios mensais das métricas *PR_{corr}*, *SRatio* e η , conforme mostrado na Figura 5; foram considerados dias com $k_t > 0,65$ e sem lacunas nas medições de parâmetros ambientais e operacionais motivadas pela desconexão dos sistemas de monitoramento. Devido às intervenções recorrentes na planta, para estudos de sombreamento realizados por Chaves (2019) e Dupont (2019), os dados referentes ao mês de setembro de 2018 foram excluídos dessa análise.

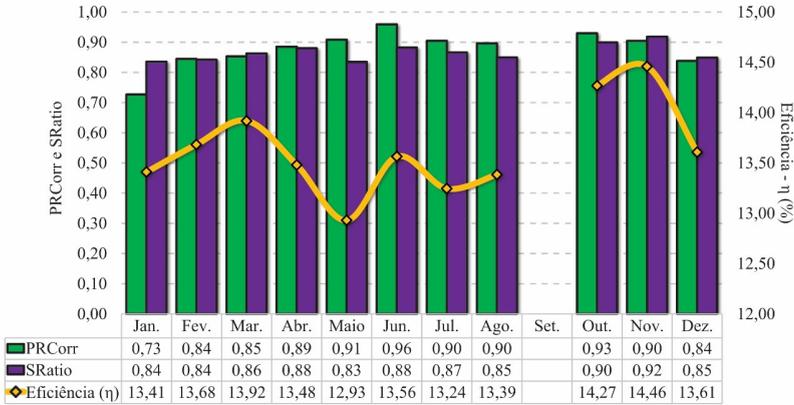


Figura 5 – Comportamento médio mensal das métricas PR_{Corr} , $SRatio$ e η em 2018

Nos meses subsequentes às limpezas manuais na planta LEA1, a η apresentou valor médio superior aos meses anteriores às limpezas; antes das limpezas (janeiro - julho) o valor médio mensal da η foi de 13,42% para 14,21% após as limpezas (outubro - dezembro), o que equivale a uma melhoria de 5,56%. O valor médio mensal de PR_{Corr} passou de 0,87 para 0,89 (melhoria de 2,45%), enquanto na métrica $SRatio$ registrou-se melhoria de 4,49% no valor médio mensal. Comparando o período imediatamente anterior (agosto) e posterior (outubro), registrou-se uma melhoria de cerca de 7,36% na η .

5. CONCLUSÕES

No presente artigo foram apresentados os resultados de um estudo sobre os efeitos de intervenções de limpeza manual em uma planta FV instalada em um ambiente urbano de uma região semiárida (Fortaleza). Foi observada uma melhoria de 3,62% na η da planta no dia 21/09/2018 (três dias após a 2ª limpeza) em relação ao dia 19/08/2018 (30 dias antes a 2ª limpeza); a melhoria de η chegou a 5,31% quando considerada a operação da planta das 07:00 às 17:00 horas. Após 21 dias (09/10/2018) da 2ª limpeza a geração da planta foi 1,96% menor, mesmo com uma elevação de 2,31% da irradiação; $SRatio$, PR_{Corr} e η apresentaram redução de 4,82%, 1,22% e 4,82%, respectivamente. Ao analisar o valor médio mensal das métricas PR_{Corr} , $SRatio$ e η em 2018 foi observado que as intervenções de limpeza na planta FV mostraram-se efetivas, uma vez que propiciaram o incremento em todas as métricas de avaliação analisadas; quando comparado o valor médio mensal de agosto (anterior à limpeza) e outubro (posterior à limpeza), a melhoria da η foi de 7,36%.

6. AGRADECIMENTOS

Ao IFCE – Campus Cedro, pelo afastamento concedido a José Janiere Silva de Souza para cursar o doutorado. Ao CNPq, pela bolsa de pesquisador dada a Paulo C M Carvalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALAM, M. N. et al. Impact of solar PV panel cleaning frequency on the performance of a rooftop solar PV plant. In: 2021 6TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEVELOPMENT IN RENEWABLE ENERGY TECHNOLOGY (ICDRET), 2021, Dhaka, Bangladesh. 2021 6th international conference on development in renewable energy technology (ICDRET). [S. l.]: IEEE, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/icdret54330.2021.9752681>. Acesso em: 10 nov. 2023.

AMILLO, A.; HULD, T.; MÜLLER, R. A new database of global and direct solar radiation using the eastern meteosat satellite, models and validation. *Remote Sensing*, v. 6, n. 9, p. 8165-8189, 28 ago. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs6098165>. Acesso em: 14 nov. 2023.

ARAÚJO, D. N. Investigação experimental dos efeitos da sujidade no desempenho de plantas fotovoltaicas instaladas no campus do Pici da UFC. 2020. 104 p. Dissertação de Mestrado — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020.

BADAMASI, Y. A. et al. Effect of tilt angle and soiling on photovoltaic modules losses. In: 2021 1ST INTERNATIONAL CONFERENCE ON MULTIDISCIPLINARY ENGINEERING AND APPLIED SCIENCE (ICMEAS), 2021, Abuja, Nigeria. 2021 1st international conference on multidisciplinary engineering and applied science (ICMEAS). [S. l.]: IEEE, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/icmeas52683.2021.9692375>. Acesso em: 10 nov. 2023.

BENABDELKRIM, B. et al. Evaluation of the impact of climatic conditions on amorphous Silicon PV module performance in the desert environment. In: 2020 6TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NEW AND RENEWABLE ENERGY (SIENR), 2021, Ghadaia, Algeria. 2020 6th international symposium on new and renewable energy (SIENR). [S. l.]: IEEE, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/sienr50924.2021.9631890>. Acesso em: 10 nov. 2023.

BESSA, J. G. et al. Monitoring photovoltaic soiling: assessment, challenges, and perspectives of current and potential strategies. *iScience*, v. 24, n. 3, p. 102165, mar. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.102165>. Acesso em: 14 nov. 2023.

BRAGA, D. S. Interrelação entre os parâmetros de desempenho e distribuição de sujidade em módulos fotovoltaicos. 2018. 127 p. Dissertação de Mestrado — Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

BUSSON, B. O. et al. Experimental assessment and modeling of a floating photovoltaic module with heat bridges. *IEEE Latin America Transactions*, v. 19, n. 12, p. 2079-2086, dez. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/tla.2021.9480150>. Acesso em: 10 nov. 2023.

CHAVES, M. P. et al. Estudo sobre sombreamento em planta fotovoltaica localizada em zona urbana de Fortaleza-CE. *Revista Tecnologia*, v. 40, n. 1, 19 jun. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5020/23180730.2019.8898>. Acesso em: 14 nov. 2023.

CONCEIÇÃO, R. et al. Soiling effect in solar energy conversion systems: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 162, p. 112434, jul. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112434>. Acesso em: 10 nov. 2023.

DIERAUF, T. et al. Weather-Corrected performance ratio. [S. l.]: Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.2172/1078057>. Acesso em: 14 nov. 2023.

DJAFER, D.; IRBAH, A. Estimation of atmospheric turbidity over Ghardaïa city. *Atmospheric Research*, v. 128, p. 76-84, jul. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.03.009>. Acesso em: 14 nov. 2023.

DUPONT, I. M. et al. Novel methodology for detecting non-ideal operating conditions for grid-connected photovoltaic plants using Internet of Things architecture. *Energy Conversion and Management*, v. 200, p. 112078, nov. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112078>. Acesso em: 14 nov. 2023.

GOSTEIN, M.; DUSTER, T.; THUMAN, C. Accurately measuring PV soiling losses with soiling station employing module power measurements. In: 2015 IEEE 42ND PHOTOVOLTAIC SPECIALISTS CONFERENCE (PVSC), 2015, New Orleans, LA. 2015 IEEE 42nd photovoltaic specialists conference (PVSC). [S. l.]: IEEE, 2015. ISBN 9781479979448. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/pvsc.2015.7355993>. Acesso em: 14 nov. 2023.

HERNANDEZ, A. G.; SANTOS, S. P. Modelling and experimental validation of aging factors of photovoltaic solar cells. *IEEE Latin America Transactions*, v. 19, n. 8, p. 1270-1277, ago. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/tla.2021.9475857>. Acesso em: 10 nov. 2023.

ILSE, K. et al. Fundamentals of soiling processes on photovoltaic modules. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 98, p. 239-254, dez. 2018a. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.015>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Key world energy statistics 2021. Paris: OECD, 2021. E-book (81 p.). ISBN 9789264706774. Disponível em: <https://doi.org/10.1787/2ef8cebc-en>. Acesso em: 10 nov. 2023.

JASZCZUR, M. et al. Impact of dust and temperature on energy conversion process in photovoltaic module. *Thermal Science*, v. 23, Suppl. 4, p. 1199-1210, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.2298/ts-ci19s4199j>. Acesso em: 14 nov. 2023.

JASZCZUR, M. et al. Study of dust deposition and temperature impact on solar photovoltaic module. *MATEC Web of Conferences*, v. 240, p. 04005, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/matec-conf/201824004005>. Acesso em: 14 nov. 2023.

KAZEM, H. 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. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123187>. Acesso em: 10 nov. 2023.

KHAN, M. U. et al. Modeling and design of low-cost automatic self cleaning mechanism for standalone micro PV systems. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 43, p. 100922, fev. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100922>.

KRATOCHVIL, J. A.; BOYSON, W. E.; KING, D. L. Photovoltaic array performance model. [S. l.]: Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.2172/919131>. Acesso em: 14 nov. 2023.

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>.

LIMA, R. A. et al. Impacto da geração de plantas fotovoltaicas flutuantes sobre a matriz energética de estados do semiárido brasileiro. *Revista Brasileira de Energia*, v. 29, n. 1, 6 abr. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.47168/rbe.v29i1.778>. Acesso em: 14 nov. 2023.

MAIA, M. H. A. Projeto: plano de desenvolvimento econômico e social - fortaleza 2040. Fortaleza: IPLANFOR, 2015. 95 p.

MICHELI, L. et al. Time series analysis of photovoltaic soiling station data: version 1.0, august 2017. [S. l.]: Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.2172/1390775>. Acesso em: 10 nov. 2023.

MONTANO, J. J. et al. Estimation of the parameters of the mathematical model of an equivalent diode of a photovoltaic panel using a continuous genetic algorithm. *IEEE Latin America Transactions*, v. 20, n. 4, p. 616-623, abr. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/tla.2022.9675467>. Acesso em: 10 nov. 2023.

MOURA, Í. J. M. et al. Caracterização dos períodos seco e chuvoso da cidade de Fortaleza (CE). *Ciência e Natura*, v. 37, 7 mar. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/2179460x16206>. Acesso em: 14 nov. 2023.

NIETO, A. E. et al. Classification of electric faults in photovoltaic systems based on voltage-power curves. *IEEE Latin America Transactions*, v. 19, n. 12, p. 2071-2078, dez. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/tla.2021.9480149>. Acesso em: 10 nov. 2023.

PICOTTI, G. et al. Soiling of solar collectors – Modelling approaches for airborne dust and its interactions with surfaces. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 81, p. 2343-2357, jan. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.043>. Acesso em: 10 nov. 2023.

PREFEITURA DE FORTALEZA. Plano Fortaleza 2040: qualidade do meio ambiente e dos recursos naturais. Fortaleza: IPLANFOR, 2019. 24 p.

RAINA, G. et al. Decoding the effects of soiling on bifacial gain from latitude mounted bifacial modules. In: 2021 IEEE 2nd International Conference on Smart Technologies for Power, Energy and Control (STPEC), 2021, Bilaspur, Chhattisgarh, India. 2021 IEEE 2nd international conference on smart technologies for power, energy and control (STPEC). [S. l.]: IEEE, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/stpec52385.2021.9718682>. Acesso em: 10 nov. 2023.

RAINA, G.; SHARMA, S.; SINHA, S. Analyzing the impact of dust accumulation on power generation and bifacial gain. *IEEE Transactions on Industry Applications*, p. 1-8, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/tia.2022.3189613>. Acesso em: 10 nov. 2023.

RAO, R. R.; MANI, M.; RAMAMURTHY, P. C. An updated review on factors and their inter-linked influences on photovoltaic system performance. *Heliyon*, v. 4, n. 9, p. e00815, set. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00815>. Acesso em: 10 nov. 2023.

SAHANA, L. 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. Disponível em: <https://doi.org/10.24018/ejenergy.2021.1.2.7>. Acesso em: 14 nov. 2023.

SAILOR, D. J.; ANAND, J.; KING, R. R. Photovoltaics in the Built Environment: a critical review. *Energy and Buildings*, p. 111479, set. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111479>. Acesso em: 10 nov. 2023.

SALAMAH, T. et al. Effect of dust and methods of cleaning on the performance of solar PV module for different climate regions: comprehensive review. *Science of The Total Environment*, v. 827, p. 154050, jun. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154050>. Acesso em: 10 nov. 2023.

SAKARAPUNTHIP, N. et al. Dust accumulation and its effect on PV performance in tropical climate and rice farm environment. In: 2021 IEEE 48TH PHOTOVOLTAIC SPECIALISTS CONFERENCE (PVSC), 2021, Fort Lauderdale, FL, USA. 2021 IEEE 48th photovoltaic specialists conference (PVSC). [S. l.]: IEEE, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/pvsc43889.2021.9519048>. Acesso em: 10 nov. 2023.

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, jun. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.065>.

SILVA, A. W. B. et al. Methodology based on artificial neural networks for hourly forecasting of PV plants generation. *IEEE Latin America Transactions*, v. 20, n. 4, p. 659-668, abr. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/tla.2022.9675472>. Acesso em: 10 nov. 2023.

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. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/1.4056453>. Acesso em: 10 nov. 2023.

STYSZKO, K. 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. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1847-z>. Acesso em: 14 nov. 2023.

UNITED NATIONS. World population prospects 2019: highlights. [S. l.]: UN, 2019. E-book (43 p.). ISBN 9789210042352. Disponível em: <https://doi.org/10.18356/13bf5476-en>. Acesso em: 10 nov. 2023.

URREJOLA, E. 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. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.016>. Acesso em: 14 nov. 2023.

ZORRILLA-CASANOVA, J. et al. Losses produced by soiling in the incoming radiation to photovoltaic modules. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 21, n. 4, p. 790-796, 1 fev. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/pip.1258>. Acesso em: 14 nov. 2023.