

IMPACTOS DA SUJIDADE E EFEITOS DA LIMPEZA NO DESEMPENHO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Danielly Norberto Araujo (UFC) - danielly.araujo@ee.ufcg.edu.br

Suellen Caroline Silva Costa (PUC Minas) - suellencscosta@gmail.com

Ivonne Montero Dupont (UFC) - ivonne.mdupont@gmail.com

PAULO C. M. CARVALHO (UFC) - carvalho@dee.ufc.br

Resumo:

A deposição de sujidades sobre a superfície do módulo fotovoltaico (FV), seja poeira, dejetos de pássaros, poluição ou outro contaminante, causa impacto significativo no desempenho deste componente em plantas FV. As condições ambientais do local em que os módulos estão instalados afetam diretamente a quantidade, o tipo e o tamanho das partículas de sujidade que são encontradas sobre a superfície FV e, conseqüentemente, o grau de influência da sujidade no desempenho dos módulos FV. O presente artigo tem como objetivo avaliar os efeitos da sujidade no desempenho de uma planta FV de 3,90 kWp instalada em Fortaleza-CE, a partir da métrica PR (Performance Ratio), durante um intervalo de 13 meses. O PR é calculado a partir da relação entre o desempenho real e o teórico da planta FV, considerando parâmetros ambientais (irradiação solar e temperatura ambiente) e dados de produção FV (potência e eletricidade gerada) em seu cálculo. A avaliação do desempenho FV é realizada comparando os valores de PR com dados de precipitação, afim de avaliar o impacto das sazonalidades do acúmulo de sujeira devido à ausência de chuva nos valores de PR. É visto que, no período chuvoso, mesmo a irradiação solar atingindo níveis mais baixos do que no período de estiagem, o desempenho da planta FV é melhor, pois PR atinge valores diários próximos de 1, indicando que a planta opera de forma eficiente. No período de estiagem, após 22 dias sem chuva, PR atingiu valores próximos de 0,75. O valor médio de PR no período chuvoso é de 0,92, enquanto que nos períodos de estiagem é de 0,84 e 0,87.

Palavras-chave: *Sujidade, Desempenho, Módulos Fotovoltaicos*

Área temática: *Conversão Fotovoltaica*

Subárea temática: *Aspectos técnicos de sistemas fotovoltaicos instalados*

IMPACTOS DA SUJIDADE E EFEITOS DA LIMPEZA NO DESEMPENHO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Danielly Norberto Araújo – danielly.araujo@ee.ufcg.edu.br

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica, Laboratório de Energias Alternativas (LEA)

Suellen Caroline Silva Costa – suellencosta@gmail.com

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Grupo de Estudos em Energia (GREEN IPUC)

Ivonne Montero Dupont - ivonne.mdupont@dee.ufc.br

Paulo Cesar Marques de Carvalho – carvalho@dee.ufc.br

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica, Laboratório de Energias Alternativas (LEA)

Resumo. A deposição de sujidades sobre a superfície do módulo fotovoltaico (FV), seja poeira, dejetos de pássaros, poluição ou outro contaminante, causa impacto significativo no desempenho deste componente em plantas FV. As condições ambientais do local em que os módulos estão instalados afetam diretamente a quantidade, o tipo e o tamanho das partículas de sujidade que são encontradas sobre a superfície FV e, conseqüentemente, o grau de influência da sujidade no desempenho dos módulos FV. O presente artigo tem como objetivo avaliar os efeitos da sujidade no desempenho de uma planta FV de 3,90 kWp instalada em Fortaleza-CE, a partir da métrica PR (Performance Ratio), durante um intervalo de 13 meses. O PR é calculado a partir da relação entre o desempenho real e o teórico da planta FV, considerando parâmetros ambientais (irradiação solar e temperatura ambiente) e dados de produção FV (potência e eletricidade gerada) em seu cálculo. A avaliação do desempenho FV é realizada comparando os valores de PR com dados de precipitação, afim de avaliar o impacto das sazonalidades do acúmulo de sujeira devido à ausência de chuva nos valores de PR. É visto que, no período chuvoso, mesmo a irradiação solar atingindo níveis mais baixos do que no período de estiagem, o desempenho da planta FV é melhor, pois PR atinge valores diários próximos de 1, indicando que a planta opera de forma eficiente. No período de estiagem, após 22 dias sem chuva, PR atingiu valores próximos de 0,75. O valor médio de PR no período chuvoso é de 0,92, enquanto que nos períodos de estiagem é de 0,84 e 0,87.

Palavras-chave: Sujidade, Desempenho, Módulos Fotovoltaicos.

1. INTRODUÇÃO

A busca de fontes alternativas de energia para geração de eletricidade é causada pelo aumento acelerado da demanda de energia elétrica em todo o mundo, a necessidade de diminuir a dependência de combustíveis fósseis e pela preferência por fontes de energia que não poluem (Villalva, 2015). Nos últimos anos, a energia solar tem sido amplamente utilizada como uma dessas fontes alternativas, sendo os módulos FV responsáveis pela conversão direta de radiação solar em energia elétrica. No Brasil, por exemplo, a capacidade instalada FV cresceu 7391,7% entre 2016 e 2018, enquanto a produção de eletricidade a partir dessa tecnologia cresceu 3971,8% no mesmo período (EPE, 2019).

O crescimento do uso de energia solar para geração de eletricidade tem conduzido várias pesquisas relacionadas aos fatores que afetam o desempenho dos módulos FV, cuja eficiência de conversão varia usualmente entre 14% e 20% (Villalva, 2015). Atualmente, módulos FV com eficiência de 23,22% já são encontrados no mercado (PortalSolar, 2019). Em geral, os parâmetros ambientais, tais como intensidade de irradiação solar, temperatura do ambiente, sujidade, umidade relativa e vento (velocidade e direção), possuem elevado impacto no desempenho dos módulos.

A sujidade é causada pela deposição e acúmulo de poeira, poluentes, dejetos de pássaros ou de outros tipos de contaminantes nas superfícies dos módulos FV, evitando que a irradiação solar incida diretamente sobre a superfície FV, ocasionando, desse modo, perdas de produção e aumento dos custos de operação e manutenção (Micheli et al., 2018). O grau de influência da sujidade no desempenho dos módulos FV varia de acordo com a localidade, pois as condições ambientais do local em que os módulos estão instalados, assim como as variações ambientais sazonais, impactam diretamente a quantidade, o tipo e o tamanho das partículas de sujidade que são encontradas sobre a superfície FV (Araújo et al., 2019).

Estudos realizados sobre os efeitos da sujidade nos módulos FV têm ganhado bastante atenção nos últimos anos, confirmado pelo aumento de publicações sobre este assunto no período entre 2012 e 2017 (mais de 200%) (Costa et al., 2018). Devido ao número de fatores que influencia a sujidade, grande parte das informações disponíveis na literatura se aplica apenas ao local em que o trabalho experimental foi realizado (Jaszczur et al., 2019). Os fatores que afetam a sujidade são: orientação e ângulo de inclinação dos módulos, temperatura ambiente, umidade, poluição do ar, características da superfície FV, velocidade e orientação do vento, entre outros.

Em Bagdá, Iraque, por exemplo, foi constatado uma redução de 63,70% da eficiência do módulo FV quando esse foi exposto ao ambiente externo por 90 dias (Chaichan et al., 2015), enquanto que em Latipur, Nepal, foi observado uma redução de 29,76% da eficiência do módulo após 150 dias de exposição (Paudyal e Shakya, 2016), sendo concluído que, mesmo o módulo FV ter ficado exposto ao ambiente externo por mais tempo em Latipur, uma redução maior na eficiência foi detectada em Bagdá.

Em relação à minimização ou mitigação dos efeitos negativos da sujeira no desempenho FV, métodos de limpeza são empregados com uma determinada frequência que depende das características do local de instalação dos módulos. A limpeza pode ser feita de forma natural, quando o local possui chuvas regulares, ou de forma manual ou automatizada, quando não há chuvas frequentes, por exemplo. Em Minas Gerais, Brasil, foi constatado um aumento de 10,26% da produção de eletricidade quando a limpeza manual foi aplicada de forma semanal (Barbosa et al., 2018), já em Zahrani, Líbano, um aumento de 32,27% da produção de eletricidade foi constatado quando a limpeza dos módulos foi realizada a cada 14 dias de forma automatizada (Hammoud et al., 2019).

Afim de avaliar o impacto da limpeza de módulos FV no desempenho de uma planta FV instalada em Fortaleza, Ceará, o presente trabalho analisa a métrica Desempenho Global (PR, *Performance Ratio*) diária da planta durante um intervalo de 13 meses, comparando os valores obtidos de PR com os eventos de limpeza natural (chuva) registrados. O objetivo é evidenciar a sazonalidade dos valores de PR devido à sujeira nos períodos de estiagem.

A métrica avaliada relaciona a produção real e teórica da planta FV, utilizando dados de produção FV (potência e eletricidade gerada) e de parâmetros ambientais (irradiação solar e temperatura). Além disso, uma análise dos parâmetros ambientais também é apresentada, mostrando que o desempenho FV é maior no período chuvoso do que no período de estiagem, mesmo a irradiação solar atingindo níveis mais altos nos períodos sem chuva.

2. METODOLOGIA

Essa seção descreve a metodologia utilizada no presente artigo, apresentando o local em que a planta FV está instalada, as características elétricas da planta, o sistema de aquisição de dados, assim como as etapas realizadas para extração da métrica PR.

2.1 Local do estudo e características da planta FV

O estudo é realizado no Laboratório de Energias Alternativas da Universidade Federal do Ceará (LEA-UFC), que tem parceria com o Núcleo de Ensino e Pesquisa em Agricultura Urbana (NEPAU) do Centro de Ciências Agrárias (CCA) da UFC. O LEA está localizado no *campus* do Pici, em Fortaleza-CE, próximo à uma avenida de grande movimentação (Av. Mister Hull), como mostrado na Figura 1. As coordenadas geodésicas do laboratório são: latitude - 3° 44' 15" S e longitude 38° 34' 22" W.



Figura 1 – (a) Localização e (b) planta FV do LEA-UFC.

O clima característico da cidade de Fortaleza é tropical com estação seca, cujas características são: temperatura média anual de 26,30 °C e pluviosidade média anual de 1448 mm (Köppen e Geiger, 1928). Os meses mais secos em Fortaleza são entre agosto e novembro, sendo esperado que o acúmulo de sujeira na superfície FV seja maior nesses meses do que nos outros, ocasionando, desse modo, um desempenho FV relativamente menor.

A planta analisada foi instalada em setembro de 2018 no LEA, é interligada à rede elétrica da UFC e possui uma potência instalada de 3,90 kWp. Essa planta é composta por 12 módulos FV policristalinos de 330 Wp, cada, divididos

em duas *strings* de seis módulos, cada *string*, orientados para o norte geográfico e com inclinação de 10°. As características dos módulos FV que compõem a planta do LEA são apresentadas na Tab. 1.

Tabela 1 - Especificações elétricas do módulo JKM330PP para as condições de irradiância 1.000 W/m², temperatura de célula 25 °C e espectro AM 1,5.

Máxima Potência	330 W _p
Tensão de Máxima Potência	37,80 V
Corrente de Máxima Potência	8,74 A
Tensão de Circuito Aberto	46,90 V
Corrente de Curto-Circuito	9,14 A
Eficiência	17,01 %
Coefficiente de Temperatura para Potência (γ)	-0,40%/°C

2.2 Sistema de aquisição de dados

Para aquisição dos dados, dois sistemas independentes são utilizados, o primeiro coleta os parâmetros elétricos da planta FV: tensão, corrente e potência; e o segundo sistema coleta os dados ambientais do local: irradiância solar no plano horizontal e temperatura ambiente.

O sistema para aquisição e monitoramento dos parâmetros elétricos de plantas FV tem como equipamento principal o *datalogger*, que é integrado ao inversor da planta FV em estudo, que possui conexão Wi-Fi, sendo então os dados de produção da planta enviados e armazenados, automaticamente, no servidor web do fabricante. O tempo de amostragem desse *datalogger* é de 1 minuto.

Para coleta dos dados de irradiância, um piranômetro FV (instrumento que mede irradiância solar global incidente sobre um plano) modelo LP02 da empresa Hukseflux com sensibilidade de $18,56 \times 10^{-6} \text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$, foi utilizado. Já para coleta dos de temperatura ambiente, um sensor Pt-100 é utilizado, sendo esse blindado para proteção de intempéries. Na Fig. 2 são mostrados os sensores de temperatura ambiente e de irradiância, assim como o inversor conectado à planta.

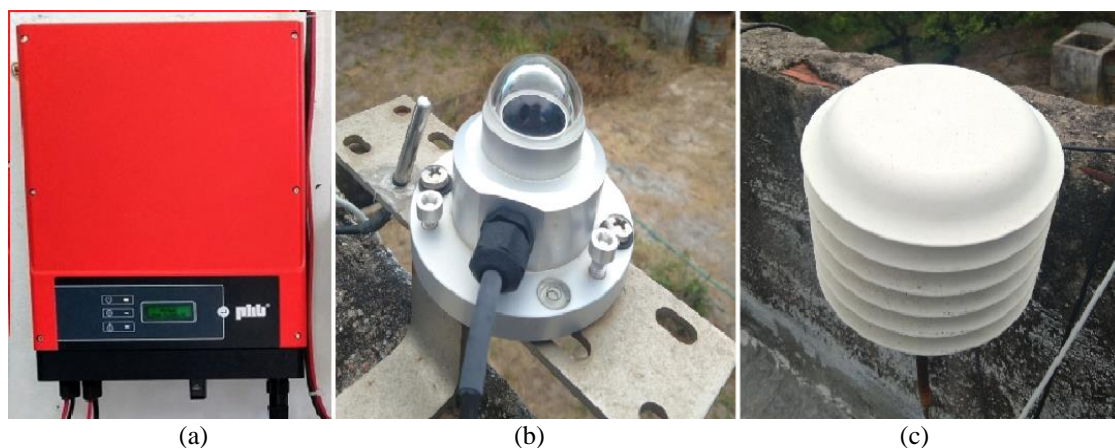


Figura 2 – (a) Inversor, (b) piranômetro e (c) Pt-100 utilizados, respectivamente.

O piranômetro e o Pt-100 são diretamente conectados a um CLP, sendo o CLP conectado a um computador que possui o sistema SCADA. O SCADA adquire dados a cada minuto, que são exportados em formato .xls. No LEA, o piranômetro está instalado na mesma direção e orientação das plantas FV, porém não possui a mesma inclinação (0°). Os dados de chuva são fornecidos pela Estação Agroclimatológica de Fortaleza, localizada no CCA da UFC, campus do Pici, que fica aproximadamente a 1000 metros do LEA e cujas coordenadas geodésicas são: latitude de 3° 44' 15" S e longitude de 38° 34' 18" W. Esses dados são validados com os dados de chuva em Fortaleza fornecidos pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME).

2.3 Parâmetro de desempenho

Para análise do impacto da sujidade no desempenho dos módulos FV instalados no LEA-UFC, a métrica de avaliação do desempenho FV conhecida como PR (*Performance Ratio*) é utilizada. No presente artigo, o cálculo de PR é feito de forma diária para um período de 13 meses, afim de evidenciar as sazonalidades provocadas pela sujidade no desempenho FV, comparando os valores obtidos de PR com os eventos de limpeza registrados (dados de precipitação).

PR é uma medida de qualidade que independe da localização da planta FV e descreve a relação entre a produção de eletricidade real e a teórica da planta. Essa métrica quantifica o efeito geral das perdas devido à: ineficiência do

inversor, fiação, incompatibilidade de células, temperatura elevada do módulo FV, reflexão da superfície frontal do módulo, sujidade, tempo de inatividade do sistema, sombreamento e falhas de componentes (Marion *et al.*, 2005).

A partir dessa métrica, plantas de diferentes condições de irradiância, orientação, ângulo de inclinação e de parâmetros STC podem ser comparadas. Os valores de PR são adimensionais e variam entre 0 e 1, sendo que quanto mais próximos de 1 se aproximarem mais eficientemente a planta FV opera. Em situações reais, devido às perdas operacionais, as instalações FV de alto desempenho podem atingir uma PR que varia entre 0,6 e 0,8. PR é definido pela relação entre o rendimento final da planta FV, Y_f , e o seu rendimento de referência, Y_r , ou seja (Marion *et al.*, 2005):

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r} \quad (1)$$

O rendimento final, Y_f , também é conhecido como horas de carga total da planta, dependendo, desse modo, da irradiação solar. Y_f é definido como a razão entre a energia elétrica produzida, E (kWh), e a potência da planta FV no STC, $P_{nominal}$ (kW). Matematicamente:

$$Y_f = \frac{E}{P_{nominal}} \quad (2)$$

O rendimento de referência, Y_r , é a relação entre a irradiação total no plano inclinado do módulo, H_T (kWh/m²), e a irradiância de referência no STC, G_0 (kW/m²). Esse parâmetro representa o número de horas na irradiância de referência. É uma função da localização, orientação do módulo FV e da variabilidade climática:

$$Y_r = \frac{H_T}{G_0} \quad (3)$$

O cálculo do PR padrão explicado acima é normalizado pela irradiação solar e o seu valor é menos influenciado por condições climáticas, mas ainda apresenta variabilidade climática, como sensibilidade nas mudanças de temperatura ou vento (Dierauf *et al.*, 2013). Para o estudo da influência da sujidade em módulos FV é essencial a remoção dos efeitos das variáveis climáticas (temperatura, irradiação solar e vento) no cálculo do PR.

Assim, no intuito de remover os efeitos dessas variáveis, um conceito de PR corrigido é introduzido pelo NREL (*National Renewable Energy Laboratory*), que reflete um valor sazonal consistente para o PR em um local específico para qualquer tecnologia FV. Matematicamente, o PR corrigido é apresentado na Eq. (4):

$$PR_{corr} = \frac{E}{P_{nominal} \left[1 - \gamma (T_{mod,avg} - T_{mod}) \right] \left(\frac{H_T}{G_0} \right)} \quad (4)$$

Sendo $T_{mod,avg}$ (°C) a temperatura média anual calculada do módulo e T_{mod} (°C) a temperatura calculada/medida do módulo. γ (%/°C) é o coeficiente de temperatura para a potência e indica a porcentagem de potência que é reduzida com o aumento da temperatura.

Deve-se atentar que o cálculo de PR depende fortemente da irradiação solar, que depende ainda mais da orientação e do ângulo de inclinação dos módulos. O pirânometro mede a irradiância solar total incidente em um plano horizontal e para medir a irradiância que incide em um plano inclinado, esse instrumento deve ser posicionado na mesma direção, inclinação e orientação do módulo FV.

No LEA-UFC, as plantas FV possuem inclinação de 10° e estão orientadas para o norte geográfico, porém o pirânometro, apesar de estar com a mesma orientação das plantas, não possui o mesmo ângulo de inclinação (0°). Logo, para conhecimento da irradiância solar incidente efetiva nos módulos FV, mediante dados de irradiância solar no plano horizontal coletados no LEA, a metodologia desenvolvida por Costa (2018) é aplicada, que utiliza, entre outros modelos, os modelos matemáticos desenvolvidos por Maxwell (1987) e Sandia (2019).

A metodologia de Costa (2018) foi aplicada para estimação da irradiância inclinada em Belo Horizonte, Minas Gerais, que possui clima semelhante ao de Fortaleza (tropical com estação seca). Para validação da metodologia, Costa realizou uma comparação entre os valores estimados e medidos por uma célula FV de referência, sendo visto uma diferença média de 3%, aproximadamente, mostrando que a utilização da metodologia é um bom método para estimação da irradiância no plano inclinado.

Até a presente conclusão deste estudo, não há coleta dos dados de temperatura dos módulos da planta sendo então calculados a partir do modelo desenvolvido por Lorenzo *et al.* (1994), mediante a entrada de dados de temperatura ambiente instantânea coletados no LEA.

2.4 Tratamento dos dados

A partir de todos os dados necessários e disponíveis para o cálculo de PR, na finalidade de reduzir a influência de ruídos ou interferências, alguns critérios de filtragem são introduzidos para remoção de dados não confiáveis, possivelmente causados devido a dias nublados, leituras incorretas dos instrumentos ou mau funcionamento inesperado do sistema. São considerados apenas dados provenientes de dias de céu claro, em que a irradiância solar apresenta variações menores do que 10% em intervalos de 10 minutos e valores maiores ou iguais a 500 W/m². Além disso, os cálculos se restringem ao intervalo entre 11h e 13h, em que os níveis de irradiação solar são maiores, no intuito de remover interferências causadas pela baixa incidência de irradiância (Micheli et al., 2016).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, os efeitos da sujidade no desempenho da planta FV instalada no LEA-UFC são apresentados. Além disso, uma análise dos parâmetros ambientais também é realizada, apresentando as sazonalidades encontradas nos dados de precipitação, irradiação solar, temperatura ambiente e do módulo FV, afim de avaliar o impacto dessas sazonalidades nos valores de PR. Os valores de PR são calculados a partir da Eq. (4), afim de remover os efeitos das variáveis climáticas.

Todos os resultados são obtidos a partir do cálculo de médias diárias dos parâmetros ambientais durante um período 13 meses, com início em 30/09/2018 e término em 31/10/2019. Vale mencionar que a planta FV em estudo no presente artigo foi instalada no LEA-UFC no dia 27/09/2018.

3.1 Parâmetros ambientais

Na Fig. 3 são mostrados os acúmulos mensais de precipitação para o intervalo avaliado. É perceptível que o período chuvoso em Fortaleza inicia em dezembro de 2018 e termina em julho de 2019, e que os menores registros de precipitação são entre os meses de setembro e novembro em 2018 e entre os meses de agosto e outubro de 2019. Desse modo, espera-se que a sujidade acumulada seja maior nesses meses, provocando assim um menor desempenho FV da planta FV nesses períodos.

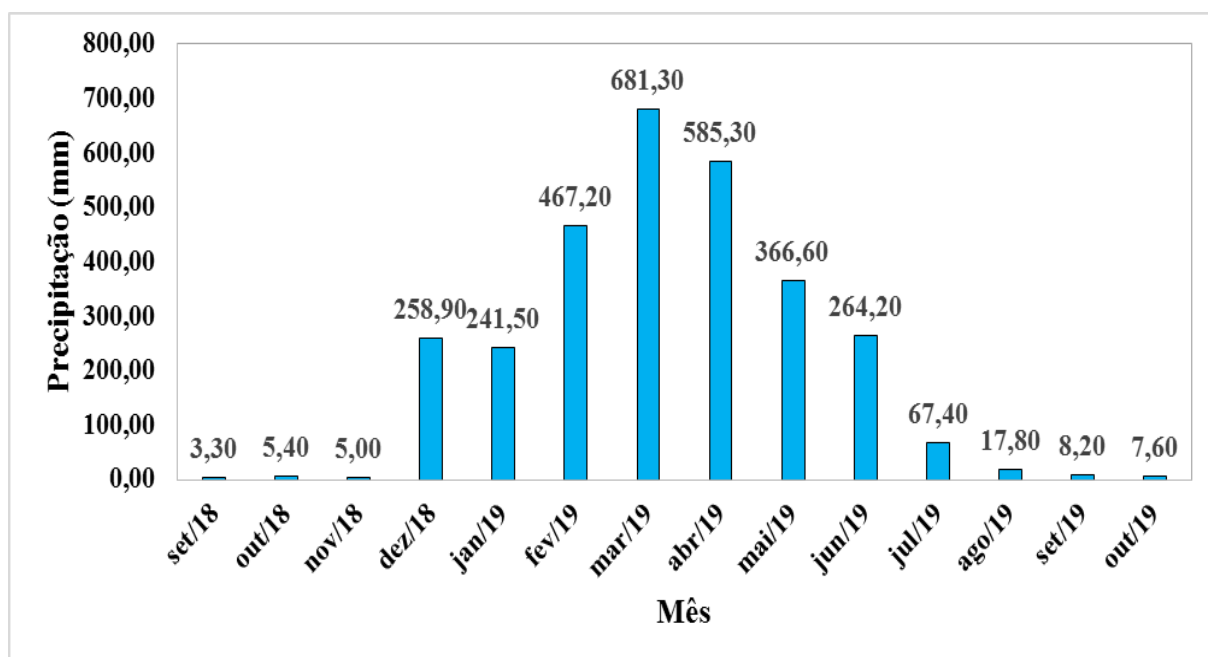


Figura 3 – Acúmulo mensal de precipitação do período analisado.

Os valores médios diários da temperatura ambiente e dos módulos FV que compõem a planta FV são apresentados na Fig. 4. O cálculo da temperatura dos módulos é feito a partir do modelo de Lorenzo et al., (1994) e as médias diárias das temperaturas são realizadas para o intervalo entre 5h e 18h. As lacunas existentes nas figuras apresentadas a seguir são causadas pela ausência de dados dos parâmetros ambientais e devido às considerações feitas para o cálculo de PR.

Os valores médios diários de temperatura ambiente e dos módulos FV que compõem a planta do LEA são mais altos e menos dispersivos nos meses de baixo índice de precipitação, variando numa faixa entre 40 °C e 45°C para a temperatura dos módulos e entre 30 °C e 35 °C para a temperatura ambiente, aproximadamente. Já no período chuvoso, os valores médios se apresentam mais dispersos, são menores e variam entre 30 °C e 45 °C para a temperatura dos módulos e entre 25 °C e 35 °C para a temperatura ambiente, aproximadamente. O valor médio anual calculado da temperatura dos módulos FV foi de 43,44 °C.

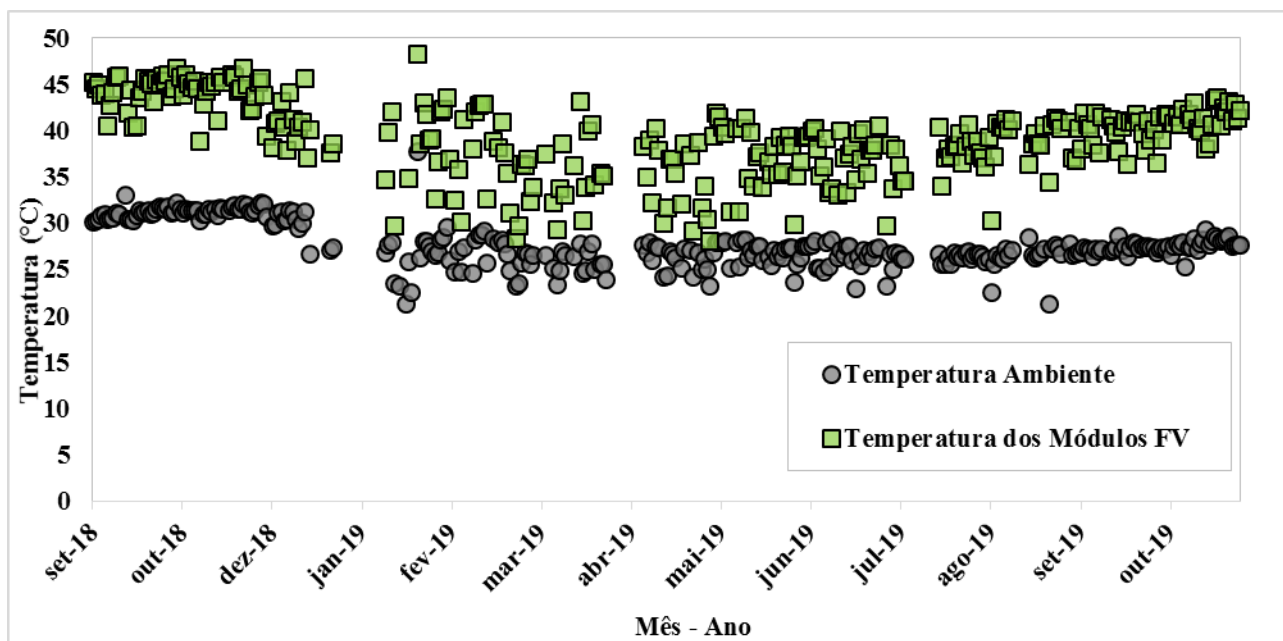


Figura 4 – Temperatura média diária ambiente e dos módulos FV.

Na Fig. 5 são mostrados os valores diários da irradiação solar no plano horizontal e inclinado para o período estudado. A irradiação no plano inclinado foi calculada a partir da metodologia desenvolvida por Costa et al., (2018) e as médias diárias são realizadas para o intervalo entre 5h e 18h.

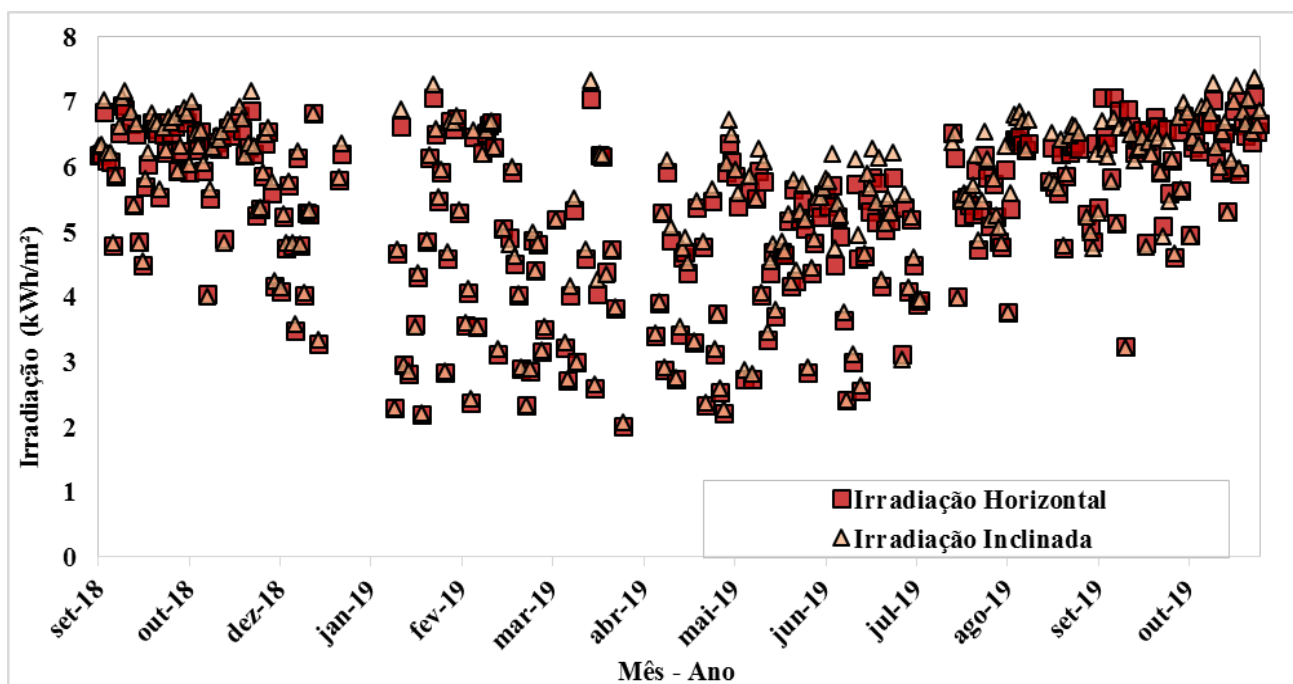


Figura 5 – Irradiação solar diária no plano horizontal e inclinado.

Os menores níveis diários de irradiação e as maiores dispersões são atingidos nos meses com os maiores índices de precipitação, enquanto que os maiores valores médios e as menores dispersões da irradiação solar diária são atingidos nos meses de pouca precipitação acumulada. Além disso, pode ser observado que a diferença entre a irradiação horizontal no plano inclinado e no plano horizontal é pequena, tendo sido calculada uma diferença não maior do que 5% no valor médio mensal. As dispersões dos dados de irradiação, assim como das temperaturas são maiores nos meses entre dezembro de 2018 e maio de 2019.

A pequena diferença observada entre a irradiação incidente no plano horizontal e no plano inclinado é causada pela baixa latitude de Fortaleza (-3.74°), e conseqüentemente, pelo ângulo de inclinação mínimo de 10° indicado para módulos FV instalados em locais com latitudes entre -10° e $+10^\circ$ (Pinho e Galdino, 2014). Conclui-se que, para locais

próximos da linha do Equador, a diferença entre a irradiação inclinada (pequenos ângulos) e horizontal não é significativa, já que quanto mais perto da linha do Equador, menor é a inclinação indicada para os módulos FV.

3.2 Efeitos da Sujidade

Na Fig. 6 é mostrada a condição de sujidade encontrada nos módulos FV no dia 30/09/2019. A sujidade se apresentou de forma concentrada nas bordas inferiores dos módulos FV e dejetos de pássaros foram encontrados em alguns módulos.

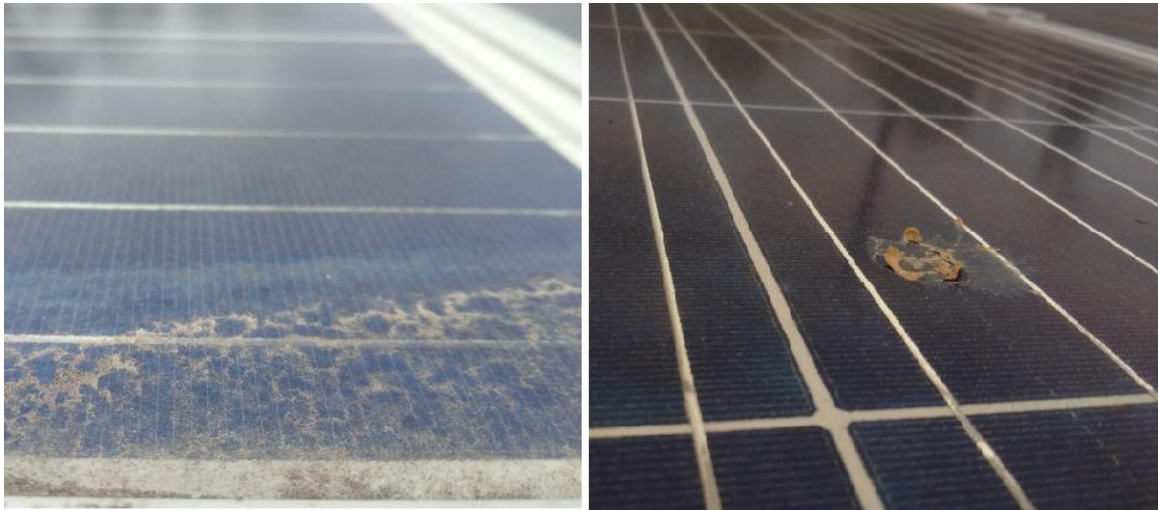


Figura 6 – Sujidades encontradas nos módulos FV.

Para avaliação do impacto da sujidade no desempenho da planta FV instalada no LEA, o cálculo de PR introduzido pelo NREL é utilizado. Os valores de PR para o período analisado são mostrados na Fig. 7, assim como os valores de precipitação diários acumulados em Fortaleza.

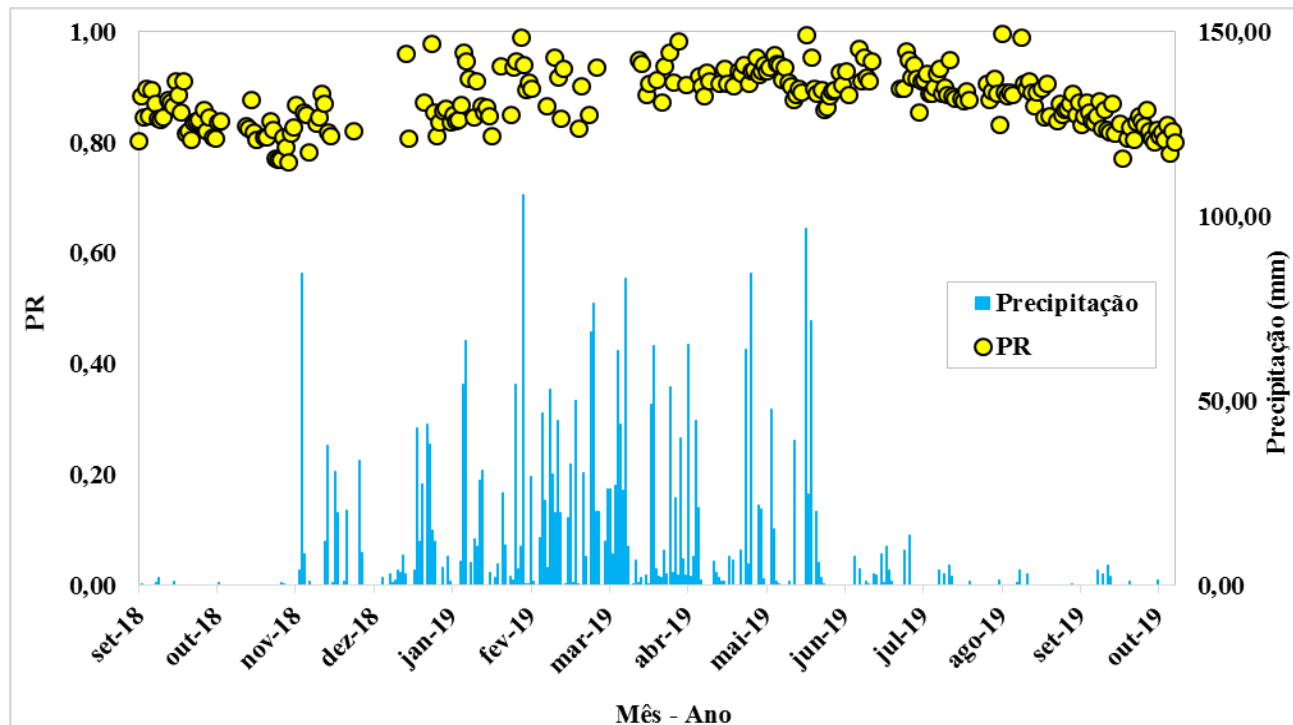


Figura 7 – Valores de PR e de precipitação diários para o período analisado.

Dois períodos de estiagem podem ser observados, o primeiro que se inicia em setembro de 2018 e termina em novembro de 2018, e o segundo período que começa em agosto de 2019 e finaliza em outubro de 2019. Nos períodos de estiagem, mesmo com a irradiação incidente nos módulos FV possuindo valores diários maiores, percebe-se que o

desempenho FV foi menor, quando comparado com o período chuvoso. O período chuvoso inicia em dezembro de 2018 e se estende até julho de 2019,

Nos períodos de estiagem, à medida que os dias passam e não há chuva, os valores de PR decaem, atingindo valores próximos de 0,75 após 22 dias sem chuva. No primeiro período de estiagem o valor médio de PR é de 0,84 enquanto no segundo o valor médio é de 0,87. Já no período chuvoso, pode ser visto que os valores de PR possuem tendência de crescimento, atingindo valores próximos de 1, indicado que a planta está convertendo energia solar em eletricidade de forma eficiente. No período chuvoso, o valor médio é de 0,92. Os altos valores de PR nos períodos chuvosos podem ser justificados pelo fato de a planta FV ter pouco tempo de operação e pelo uso do conceito introduzido pelo NREL em seu cálculo, que remove a variabilidade sazonal das variáveis climáticas (temperatura, vento e irradiação).

Na Figura 8 é mostrado um maior detalhamento do segundo período de estiagem, que compreende os meses entre agosto e outubro de 2019, porém com a análise sendo iniciada em julho do mesmo ano para visualização da mudança de comportamento de PR, que decai com o passar dos dias com pouco ou sem precipitação. O valor final do PR no dia 31/10/2019 é de 0,80, representando um decaimento de 17,12%, aproximadamente, em relação ao dia 01/07/2019, cujo valor de PR é 0,96.

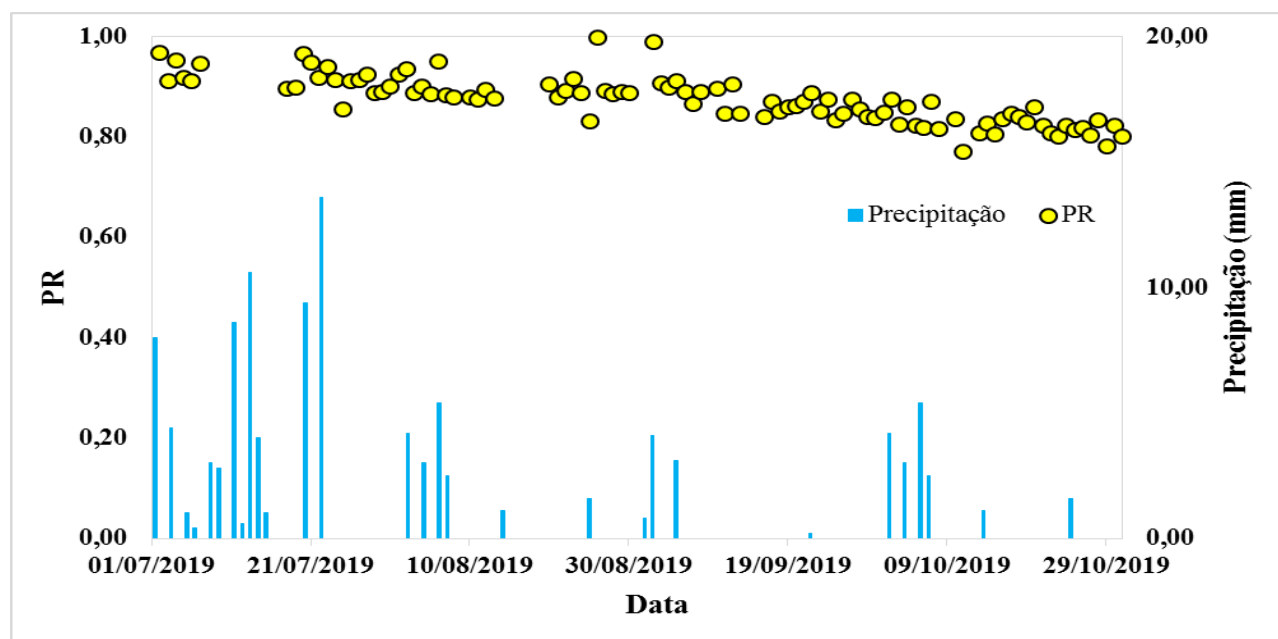


Figura 8 – Valores de PR e de precipitação diários entre 01/07/2019 e 31/10/2019.

E ainda, entre dezembro de 2018 e maio de 2019 os valores de PR se apresentaram mais dispersos do que nos outros meses, assim como os dados diários de irradiação e da temperatura ambiente e dos módulos FV. Além disso, observando a diferença relativa dos valores de PR, foi visto, em um período de 15 dias sem chuva, um decaimento de PR de 12%. Já em um período de 10 dias sem chuva, um decaimento de 3% foi constatado. Logo, para o desempenho FV não diminuir pelo menos 12% em períodos sem chuva, limpezas periódicas dos módulos FV entre 10 e 15 dias são aconselhadas para as condições do presente estudo. No período chuvoso, é concluído que a limpeza dos módulos pode ser feita pela chuva.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O impacto da sujidade em módulos FV foi avaliado a partir da métrica PR durante um intervalo de 13 meses. Foi utilizada a planta FV do LEA-UFC para o estudo, que está localizada na cidade de Fortaleza-CE, próximo a uma avenida de grande movimentação. Uma análise da sazonalidade dos parâmetros ambientais (irradiação solar, temperatura e precipitação) e o impacto dessa sazonalidade nos valores de PR também foi realizada. Dois períodos de estiagem foram constatados, o primeiro teve início em setembro de 2018 e terminou em novembro de 2018 e o segundo período começou em agosto de 2019 e finalizou em outubro de 2019. O período chuvoso teve início em dezembro de 2018 e terminou em julho de 2019. Os valores de PR durante o período de estiagem decaíram, atingindo valores próximos de 0,75, enquanto no período chuvoso aumentaram, atingindo valores próximos de 1. Para um período de 15 dias sem chuva, foi constatado um decaimento de 12% de PR, sendo então recomendado limpezas periódicas entre 10 e 15 dias para módulos FV instalados em condições ambientais e de instalação do presente estudo.

Agradecimentos

Danielly Norberto Araújo e Ivonne Montero Dupont agradecem à CAPES pela bolsa de mestrado e doutorado, respectivamente, e Paulo C. M. Carvalho agradece ao CNPq pela bolsa de pesquisador concedida e pelo suporte financeiro ao projeto (420133/2016-0 Universal 01/2016). Os autores agradecem à Estação Agroclimatológica do Centro de Ciências Agrárias da UFC pela disponibilidade dos dados de precipitação e à UFC pela disponibilidade de laboratórios e equipamentos.

REFERÊNCIAS

- Araújo, D. N., Carvalho, P. C. M., e Dupont, I. M., 2019. Efeitos da acumulação de sujeira sobre o desempenho de módulos fotovoltaicos. *Revista Tecnologia*, vol. 40, n. 2, pp. 1-23. DOI: 10.5020/23180730.2019.9414.
- Barbosa, E. R, Faria, M. S. F, Gontijo, F. B., 2018. Influência da sujeira na geração fotovoltaica, VII CBENS - VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado.
- Barbosa, E. R, Faria, M. S. F, Gontijo, F. B., 2018. Influência da sujeira na geração fotovoltaica, VII CBENS - VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado.
- Costa, S. C. S. 2018. Estudo abrangente do efeito da sujidade no desempenho de módulos e sistemas fotovoltaicos. Tese de Doutorado — Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.
- Costa, S. C. S., Diniz, A. S. A. C., Santana, V. A. C., Muller, M., Micheli, L., e Kazmerski, L. L., 2018. Avaliação da sujidade em módulos fotovoltaicos em Minas Gerais, Brasil. VII CBENS – VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado.
- Chaichan, M. T., Mohammed, B. A., e Kazem, H. A., 2015. Effect of pollution and cleaning on photovoltaic performance based on experimental study. *International Journal of Scientific and Engineering Research*, vol. 6, n. 4, pp. 594-601.
- Chaves, M. P.; Dupont, I. M.; Carvalho, P. C. M.; Araujo, D. N., 2019. Estudo sobre sombreamento em planta fotovoltaica localizada em zona urbana de Fortaleza-CE. *Revista Tecnologia*, v. 40, n. 2, pp. 1-21. DOI: 10.5020/23180730.2019.8898.
- Dierauf, T., Growitz, A., Kurtz, S., Cruz, J. L. B., Riley, E., e Hansen, C., 2013. Weather-corrected performance ratio. National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO.
- EPE, 2019. Empresa de Pesquisa Energética - Publicações. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes>>. Acessado em: 15/10/2019.
- Hammoud, M., Shokr, B., Assi, A., Hallal, J., e Khoury, P., 2019. Effect of dust cleaning on the enhancement of the power generation of a coastal PV-power plant at Zahrani Lebanon. *Solar Energy*, vol. 184, pp. 195-201.
- Jaszczur, M., Teneta, J., Styszko, K., Hassan, Q., Burzyńska, P., Marcinek, E., & Łopian, N. (2019). The field experiments and model of the natural dust deposition effects on photovoltaic module efficiency. *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 26, n. 9, pp. 8402-8417.
- JinkoSolar. JKM330PP-72 315-330 Watt. 2016.
- Köppen, W., Geiger, R., 1928. *Klimate der Erde*. Gotha: Verlag Justus Perthes, Wall-map 150cmx200cm.
- Lorenzo, E., Araujo, G. L., e Cuevas, A., 1994. *Electricidad solar: ingeniería de los sistemas fotovoltaicos*. Seville: Progenisa.
- Marion, B., Adelstein, J., Boyle, K. E., Hayden, H., Hammond, B., Fletcher, T. e Rich, G., 2005. Performance parameters for grid-connected PV systems, Conference Record of the Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp. 1601-1606. IEEE.
- Maxwell, A.L., 1987. A quasi-physical model for converting hourly global horizontal to direct normal insolation. Report SERI/TR-215-3087, Solar Energy research Institute, Golden, CO.
- Micheli, L., Deceglie, M. G., e Muller, M., 2018. Mapping Photovoltaic Soiling Using Spatial Interpolation Techniques. *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 9, n. 1, pp. 272-277.
- Micheli, L., Muller, M., Kurtz, S., 2016. Determining the effects of environment and atmospheric parameters on PV field performance, IEEE 43rd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), p. 1724-1729.
- Paudyal, B. R., Shakya, S. R., 2016. Dust accumulation effects on efficiency of solar PV modules for off grid purpose: A case study of Kathmandu. *Solar Energy*, vol. 135, pp. 103-110.
- Pinho, T. J.; Galdino, A. M. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Rio de Janeiro: CEPTEL-CRESESB, 2014. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf>. Acesso em: 20/10/2019.
- PortalSolar. Trina bate novo recorde de eficiência em célula solar de grande área. 2019. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-solar/trina-bate-novo-recorde-de-eficiencia-em-celula-solar-de-grande-area.html>>. Acesso em: 20/02/2020.
- Sandia, N. L., 2019 PV Performance Modeling Collaborative. Disponível em: <<https://pvpmc.sandia.gov/>>. Acessado em: 02/10/2019.
- Villalva, M. G. 2015. *Energia Solar Fotovoltaica*. Saraiva Educação SA.

SOILING IMPACTS AND CLEANING EFFECTS ON THE PERFORMANCE OF PHOTOVOLTAIC MODULES

Abstract. *The soiling deposition on PV modules surfaces, whether dust, bird droppings, pollution or other contaminants, has a significant impact on the performance of this component in PV plants. The local environmental conditions where the modules are installed directly affect the amount, type and size of the dirt particles that are found on the PV surface and, consequently, the degree of influence of dirt on the performance of the PV modules. This paper aims to evaluate the effects of soiling on the performance of a 3.90 kWp PV plant installed in Fortaleza-CE, from the PR (Performance Ratio) metric over a 13-month interval. The PR is calculated from the relationship between the actual and theoretical performance of the PV plant, considering environmental data (solar irradiation and ambient temperature) and PV production (power and electricity generated). FV performance evaluation is performed by comparing PR values with precipitation data in order to evaluate the impact of seasonality of dirt accumulation due to the absence of rain on PR values. It is seen that in the rainy season, even solar radiation reaching lower levels than in the dry season, the performance of the PV plant is better, since PR reaches daily values close to 1, indicating that the plant operates efficiently. In the dry season, after 22 days without rain, PR reaches values close to 0.75. The average value of PR in the rainy season is 0.92, while in the dry periods it is 0.84 and 0.87.*

Key words: *Soiling, Performance, Photovoltaics Modules.*