



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DANIELLY NORBERTO ARAÚJO

INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DOS EFEITOS DA SUJIDADE NO
DESEMPENHO DE PLANTAS FOTOVOLTAICAS INSTALADAS NO *CAMPUS* DO
PICI DA UFC

FORTALEZA

2020

DANIELLY NORBERTO ARAÚJO

INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DOS EFEITOS DA SUJIDADE NO DESEMPENHO DE
PLANTAS FOTOVOLTAICAS INSTALADAS NO *CAMPUS* DO PICI DA UFC

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Elétrica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica. Área de Concentração: Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho

FORTALEZA

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A688i Araújo, Danielly Norberto.

Investigação experimental dos efeitos da sujidade no desempenho de plantas fotovoltaicas instaladas no campus do Pici da UFC / Danielly Norberto Araújo. – 2020.
104 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2020.

Orientação: Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho.

1. Sujidade. 2. Efeitos. 3. Desempenho. 4. Módulos Fotovoltaicos. I. Título.

CDD 621.3

DANIELLY NORBERTO ARAÚJO

INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DOS EFEITOS DA SUJIDADE NO DESEMPENHO DE
PLANTAS FOTOVOLTAICAS INSTALADAS NO *CAMPUS* DO PICI DA UFC

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Elétrica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica. Área de Concentração: Engenharia Elétrica

Aprovada em: 30 de janeiro de 2020

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de
Carvalho (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Giovanni Cordeiro Barroso
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. José Marcos Sasaki
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Paulo Peixoto Praça
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À vida

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus, por ter sido meu amparo e ter me dado força nos dias difíceis.

Aos meus pais, Roze e Cledimar, por tudo que são e por tudo que fizeram e continuam fazendo por mim e meu irmão, Leo. Agradeço pelo amor, apoio, dedicação, conselhos e também por serem minha inspiração de força e coragem.

Ao meu irmão, Leo, um dos melhores seres (quando quer ser) que habita nesse mundo e que a cada dia que passa só cresce como pessoa. Obrigada por tudo, Leo.

Ao Lucas, meu parceiro de vida, por estar compartilhando comigo todas as alegrias e as dores dessa vida. Gratidão!

Ao meu orientador, Prof. Dr. Paulo Carvalho, por ter sido tantas vezes muito mais do que um orientador. Agradeço por todas as conversas, oportunidades e ensinamentos, que não foram só profissionais, mas pessoais também.

À Dr^a Suellen Costa da PUC-Minas, que não mediu esforços para me ajudar na realização dessa pesquisa e que compartilhou comigo tanta experiência e sabedoria. Muita gratidão e admiração pela profissional e pessoa que a Suellen é.

Aos professores da banca, Prof. Dr. Giovanni Barroso, Prof. Dr. Paulo Praça e Prof. Dr. Marcos Sasaki, por suas valiosas considerações e contribuições. Agradeço em especial o Prof. Giovanni por ter sido sempre tão disponível, ter me ajudado e me tratado sempre com atenção.

Ao grupo de pesquisa do LEA-UFC, em especial aos amigos Shakil e Natasha, pelas risadas e por todo apoio durante esses dois anos, e a doutoranda Ivonne, por toda a ajuda com a aquisição e coleta dos dados.

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.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“Veja que, ao final das contas, é tudo entre você e Deus. Nunca foi entre você e os outros.”

(Madre Teresa de Calcutá)

RESUMO

O objetivo da presente dissertação é apresentar um estudo sobre os efeitos da sujidade em duas plantas FV instaladas no Laboratório de Energias Alternativas da Universidade Federal do Ceará. Métricas de sujidade (relação de sujidade e relação de desempenho) são utilizadas para avaliação do desempenho FV durante um período de 9 meses para a planta FV 1 e de 13 meses para a planta FV 2, em que a diminuição da relação de sujidade representa um aumento da sujidade na superfície dos módulos FV e, conseqüentemente, implica na diminuição da relação de desempenho. Uma análise da sazonalidade dos dados ambientais também é realizada, evidenciando que nos períodos de estiagem, os maiores níveis diários de irradiação, temperatura ambiente e dos módulos FV são atingidos. Nos períodos chuvosos, a relação de sujidade não é uma boa métrica para avaliação da sujidade, sendo necessária a aplicação de filtros para uma melhor visualização do seu comportamento. No período de estiagem, à medida que os dias passam e não há chuva, os valores da métrica diminuem. A avaliação do impacto da sujidade por meio da relação de desempenho é mais efetiva, em que não há necessidade de aplicação de filtros. Comparando os valores das métricas durante os períodos chuvosos e de estiagem, a maior redução constatada da relação de sujidade é 17,90% na planta FV 2, que indica aumento da sujidade nos módulos FV e reduz 26,90% a relação de desempenho FV. Em relação à composição química da sujidade, são encontrados compostos químicos como dióxido de silício e óxido de ferro, enquanto os principais elementos são: silício (36,67% na planta FV 1 e 40,23% na planta FV 2), ferro (19,55% na planta 1 e 17,28% na planta 2), cálcio (18,27% e 17,18% nas plantas FV 1 e 2, respectivamente) e alumínio (8,87% e 10,30% na planta FV 1 e 2, respectivamente).

Palavras-chave: Sujidade. Efeitos. Desempenho. Módulos Fotovoltaicos.

ABSTRACT

The objective of this dissertation is to present a study on the soiling effects on two photovoltaic plants installed at the Alternative Energy Laboratory of the Federal University of Ceará. Soiling metrics (soiling ratio and performance ratio) are used to assess photovoltaic performance over a period of 9 months for the FV 1 plant and 13 months for the FV 2 plant. The decrease in the soiling ratio represents a soil increase on the PV modules surface and, consequently, implies the performance ratio decrease. The seasonality analysis of the environmental data is also performed, showing that during dry periods, the highest daily irradiation levels, ambient temperature, and PV modules temperature are reached. In rainy periods, the soiling ratio was not a good metric to evaluate the soiling. In the dry season, as the days go by and there is no rain, the metrics values decrease. Comparing the metrics values during the rainy and drought periods, the greatest reduction observed in the soiling ratio is 17.90% at FV 2 plant, which indicates a soiling increase in the FV modules reducing the PV performance by 26.90%. Regarding the soiling chemical composition, chemical compounds such as silicon dioxide and iron oxide are found, while the main elements are: silicon (36.67% at FV 1 plant and e 40.23% at FV 2 plant), iron (19.55% at FV 1 plant and e 17.28% at FV 2 plant), calcium (18.27% at FV 1 plant and e 17.18% at FV 2 plant), and aluminum (8.87% at FV 1 plant and e 10.30% at FV 2 plant).

Keywords: Soiling. Effects. Performance. Photovoltaic modules.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Matriz elétrica brasileira em 2016 e 2018, respectivamente. | 18 |
| Figura 2 – Deposição, ressalto e ressuspensão de partículas de sujidade. | 24 |
| Figura 3 – Módulos FV da sonda Insight em Marte, antes (esquerda) e depois (direita) de sinais sísmicos detectados. | 25 |
| Figura 4 – Diferentes modos de transporte de partículas de sujidade. | 26 |
| Figura 5 – Esquema de mecanismos que aumentam a adesão de partículas e alteram as características da superfície FV. | 29 |
| Figura 6 – Limpeza manual realizada em módulos FV. | 30 |
| Figura 7 – Efeito da chuva nas partículas de sujidade na superfície do módulo FV. | 31 |
| Figura 8 – Processo de limpeza de uma planta FV realizado por robô. | 32 |
| Figura 9 – Processos de limpeza realizados por superfícies com propriedades de auto-limpeza. | 33 |
| Figura 10 – Fatores que influenciam a sujidade com variações de tamanho e escalas de tempo. | 35 |
| Figura 11 – Módulo FV com sujidade não uniforme. | 37 |
| Figura 12 – Dados de PR e de precipitação. | 38 |
| Figura 13 – Comparação entre o estimador Theil-Sen e a regressão linear de mínimos quadrados. | 39 |
| Figura 14 – Comparação entre o PR corrigido e o PR padrão. | 41 |
| Figura 15 – Sujidade em módulos FV (da esquerda para a direita, CIGS, a-Si, p-Si e m-Si). | 42 |
| Figura 16 – SRatio diária para as tecnologia de p-Si (à esquerda) e de CdTe (à direita). | 43 |
| Figura 17 – Comparação da temperatura entre os módulos limpos e sujos. | 44 |
| Figura 18 – SRatio medidos na simulação de sujidade no experimento de Gostein <i>et al.</i> (2013). | 46 |
| Figura 19 – Redução da eficiência e as precipitações registradas durante o experimento. | 47 |
| Figura 20 – SRate para os 8 locais em %/dia (preto) e suas faixas de intervalo de confiança (verde). | 49 |
| Figura 21 – Coleta da sujidade do módulo FV. | 51 |
| Figura 22 – Curvas I-V (esquerda) e P-V (direita) dos módulos limpos e sujos com diferentes acúmulos de sujeira. | 52 |

| | |
|---|----|
| Figura 23 – Redução da eficiência dos módulos nas cidades estudadas. | 53 |
| Figura 24 – Localização do LEA-UFC. | 56 |
| Figura 25 – Temperatura média mensal e acúmulo mensal de precipitação em Fortaleza-CE. | 57 |
| Figura 26 – Planta FV 1 analisada. | 58 |
| Figura 27 – Planta FV 2 analisada. | 59 |
| Figura 28 – Vista aérea das plantas FV 1 e 2 do LEA-UFC. | 60 |
| Figura 29 – <i>Datalogger</i> da Planta FV 1. | 61 |
| Figura 30 – Inversor da planta FV 2. | 61 |
| Figura 31 – Diagrama de blocos do sistema de aquisição e monitoramento dos dados elétricos das plantas FV. | 62 |
| Figura 32 – Sensores utilizados para coleta de dados irradiância (esquerda) e temperatura ambiente (direita). | 63 |
| Figura 33 – Diagrama de blocos do sistema de aquisição e monitoramento dos parâmetros ambientais. | 63 |
| Figura 34 – Ângulos solares. | 66 |
| Figura 35 – Coleta da sujidade. | 69 |
| Figura 36 – Acúmulo mensal de precipitação de 2018. | 72 |
| Figura 37 – Acúmulo mensal de precipitação de 2019. | 72 |
| Figura 38 – Médias diárias da temperatura ambiente e dos módulos FV que compõem a planta FV 1 no período estudado. | 73 |
| Figura 39 – Médias diárias da temperatura ambiente e dos módulos FV que compõem a planta FV 2 no período de setembro de 2018 a outubro de 2019. | 74 |
| Figura 40 – Comparação entre a irradiação horizontal e a irradiação no plano inclinado para o ano de 2018. | 75 |
| Figura 41 – Comparação entre a irradiação horizontal e a irradiação no plano inclinado para o período de janeiro até outubro de 2019. | 75 |
| Figura 42 – Comportamento da irradiação diária inclinada e horizontal ao longo do ano de 2018. | 77 |
| Figura 43 – Comportamento da irradiação inclinada e horizontal para o período estudado em 2019. | 78 |
| Figura 44 – Sujidade encontrada nos módulos da planta FV 1 no dia 30/09/2019. | 79 |
| Figura 45 – Sujidade encontrada nos módulos da planta FV 2 no dia 30/09/2019. | 79 |

| | |
|---|----|
| Figura 46 – Estudo de sombreamento realizado na planta FV 1. | 80 |
| Figura 47 – Valores de SRatio para a planta FV 1. | 82 |
| Figura 48 – Valores de SRatio para a planta FV 1 após a consideração de K_t ser realizada. | 82 |
| Figura 49 – Detalhamento dos valores de SRatio da planta FV 1 entre os meses de junho e setembro de 2018. | 83 |
| Figura 50 – Valores de SRatio para a planta FV 2. | 84 |
| Figura 51 – Valores de SRatio para a planta FV 2 após a consideração de K_t ser realizada. | 85 |
| Figura 52 – Detalhamento dos valores de SRatio entre os dias 30/09/2018 e 30/11/2018. | 85 |
| Figura 53 – Detalhamento dos valores de SRatio entre 01/07/2019 até 31/10/2019. | 86 |
| Figura 54 – Valores de PR juntamente com os valores de precipitação diária do período analisado da planta FV 1. | 87 |
| Figura 55 – Valores de PR da planta FV 1 entre os meses de junho e setembro de 2018. | 88 |
| Figura 56 – Valores de PR juntamente com os valores de precipitação diária do período analisado da planta FV 2. | 89 |
| Figura 57 – Valores de PR da planta FV 2 entre 30/09/2018 e 30/11/2018. | 90 |
| Figura 58 – Valores de PR da planta FV 2 entre 01/07/2019 e 31/10/2019. | 90 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Fontes de partículas de sujidade externas mais comuns e seus elementos característicos. | 23 |
| Tabela 2 – Classificação de sedimentos com base na distribuição do tamanho de partículas. | 24 |
| Tabela 3 – Características dos locais estudados. | 48 |
| Tabela 4 – Minerais presentes nas amostras de sujidade coletadas do superfície do módulo (M) e do solo (S) nas localizações L1 – L4. | 50 |
| Tabela 5 – Principais resultados dos trabalhos analisados. | 54 |
| Tabela 6 – Principais características do módulo FV da planta 1. | 58 |
| Tabela 7 – Principais características do módulo FV da planta 2. | 59 |
| Tabela 8 – Porcentagem de dados ambientais disponíveis do LEA-UFC durante o período estudado. | 71 |
| Tabela 9 – Diferença entre as médias mensais da irradiação no plano inclinado obtidas a partir de modelos matemáticos e do Radasol 2 para o ano de 2018. | 76 |
| Tabela 10 – Diferença entre as médias mensais da irradiância no plano inclinado obtidas a partir de modelos matemáticos e do Radasol 2 paa o período estudado em 2019. | 76 |
| Tabela 11 – Porcentagem dos elementos químicos encontrados nas sujidades das plantas FV. | 91 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|---------|---|
| FV | Fotovoltaico |
| LEA-UFC | Laboratório de Energias Alternativas da Universidade Federal do Ceará |
| PM | <i>Particulate Matter</i> |
| STC | <i>Standart Test Conditions</i> |
| MPP | <i>Maximum Power Point</i> |
| NREL | <i>National Renewable Energy Laboratory</i> |
| m-Si | Monocristalina |
| p-Si | Policristalina |
| a-Si | Silício Amorfo |
| CIGS | Cobre-Índio-Gálio-Selênio |
| CdTe | Telureto de Cádmio |
| NEPAU | Núcleo de Ensino e Pesquisa em Agricultura Urbana |
| CCA | Centro de Ciências Agrárias |
| UTM | <i>Universal Transversa de Mercator</i> |
| CLP | Controlador Lógico Programável |
| FUNCEME | Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos |
| DRX | Difração de Raio-X |
| FRX | Fluorescência de Raios-X |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|------------|--|
| α | Coefficiente de temperatura para corrente de curto-circuito (A/°C) |
| β | Ângulo de inclinação da planta FV (°) |
| γ | Coefficiente de temperatura para potência (W/°C) |
| δ | Declinação solar (°) |
| η | Eficiência dos módulos FV (%) |
| θ | Ângulo de incidência (°) |
| θ_z | Ângulo de zênite (°) |
| μ | Viscosidade dinâmica do ar (kg/ms) |
| ρ | Densidade de partículas (kg/s ³) |
| ϕ | Latitude geográfica (°) |
| ω | Ângulo horário (°) |
| ω_s | Ângulo horário do pôr-do-sol (°) |
| AM | Massa de ar (adimensional) |
| d | Diâmetro das partículas (m) |
| DNI | Irradiância normal direta (W/m ²) |
| DHI | Irradiância difusa horizontal (W/m ²) |
| E | Energia produzida (kWh) |
| g | Aceleração gravitacional (m/s ²) |
| G_0 | Irradiância solar no STC (W/m ²) |
| G | Irradiância solar total no plano horizontal (W/m ²) |
| G_b | Irradiância solar direta no plano horizontal (W/m ²) |
| $G_{b(T)}$ | Irradiância solar direta no plano inclinado (W/m ²) |
| G_d | Irradiância solar difusa no plano horizontal (W/m ²) |
| $G_{d(T)}$ | Irradiância solar difusa no plano inclinado (W/m ²) |
| $G_{g(T)}$ | Irradiância solar refletida no plano inclinado (W/m ²) |
| G_{sc} | Constante solar (W/m ²) |

| | |
|------------------|---|
| G_T | Irradiância solar no plano inclinado (W/m^2) |
| H_0 | Irradiância extraterrestre (W/m^2) |
| H_T | Irradiação total no plano inclinado do módulo (kWh/m^2) |
| I_{sc0} | Corrente de curto-circuito do módulo no STC (A) |
| I_{sc} | Corrente de curto-circuito do módulo (A) |
| $I_{sc_{sujo}}$ | Corrente de curto-circuito do módulo em condições de sujidade (A) |
| K_n | Transmitância direta normal |
| K_{nc} | Transmitância direta em céu claro |
| K_t | Índice de claridade atmosférica (adimensional) |
| n_{dia} | Dia do ano (adimensional) |
| $NOCT$ | Temperatura Nominal de Operação da Célula ($^{\circ}C$) |
| P_{max_0} | Potência no MPP do módulo no STC (W) |
| P_{max} | Potência no MPP (W) |
| $P_{max_{sujo}}$ | Potência no MPP do módulo em condições de sujidade (W) |
| $P_{nominal}$ | Potência nominal da planta FV (kWp) |
| P_{out} | Potência de saída da planta FV (kWp) |
| PR | Relação de desempenho (adimensional) |
| $SRate$ | Taxa de sujidade ($\%/dia$) |
| $SRatio$ | Relação de sujidade (adimensional) |
| T_0 | Temperatura no STC ($^{\circ}C$) |
| T_a | Temperatura do ambiente ($^{\circ}C$) |
| T_c | Temperatura do módulo FV ($^{\circ}C$) |
| $T_{c_{sujo}}$ | Temperatura do módulo em condições de sujidade ($^{\circ}C$) |
| v_{Stokes} | Velocidade de estabilização de Stokes (m/s) |
| Y_f | Redimento final do módulo FV (horas) |
| Y_r | Redimento de referência do módulo FV (horas) |

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 18 |
| 1.1 | Objetivos | 20 |
| 1.2 | Organização da Dissertação | 20 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 22 |
| 2.1 | Características da Sujidade | 22 |
| 2.1.1 | <i>Composição das partículas de sujidade</i> | 22 |
| 2.1.2 | <i>Tamanho e distribuição das partículas de sujidade</i> | 23 |
| 2.1.3 | <i>Taxa de deposição das partículas</i> | 24 |
| 2.2 | Processo de Sujidade em Módulos FV | 24 |
| 2.2.1 | <i>Transporte de partículas de sujidade</i> | 25 |
| 2.2.2 | <i>Adesão Inicial</i> | 27 |
| 2.2.3 | <i>Mecanismos de sujidade que aumentam a adesão de partículas de sujidade e alterações nas características da superfície FV</i> | 28 |
| 2.2.4 | <i>Métodos restaurativos</i> | 29 |
| 2.3 | Fatores Influenciadores da Sujidade em Módulos FV | 33 |
| 2.3.1 | <i>Características de instalação e propriedades dos módulos FV</i> | 33 |
| 2.3.2 | <i>Condições ambientais</i> | 34 |
| 2.4 | Principais Métricas Utilizadas para Mensurar os Efeitos da Sujidade no Desempenho FV | 35 |
| 3 | ESTADO DA ARTE | 42 |
| 3.1 | Estudos Nacionais | 42 |
| 3.2 | Estudos Internacionais | 45 |
| 3.3 | Visão Geral do Estado da Arte | 54 |
| 4 | METODOLOGIA | 56 |
| 4.1 | Local do Estudo | 56 |
| 4.2 | Plantas FV | 57 |
| 4.3 | Sistema de Aquisição e de Monitoramento dos Dados | 60 |
| 4.3.1 | <i>Aquisição e monitoramento dos parâmetros elétricos</i> | 60 |
| 4.3.2 | <i>Aquisição e Monitoramento dos Parâmetros Ambientais</i> | 62 |
| 4.4 | Etapas para Extração das Métricas de Avaliação do Desempenho FV | 64 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 4.4.1 | <i>Irradiância solar incidente no plano inclinado</i> | 65 |
| 4.4.2 | <i>Temperatura dos módulos</i> | 68 |
| 4.5 | Análise da composição química da sujidade | 68 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 71 |
| 5.1 | Parâmetros ambientais | 72 |
| 5.1.1 | <i>Precipitação</i> | 72 |
| 5.1.2 | <i>Temperatura ambiente e do módulo</i> | 73 |
| 5.1.3 | <i>Irradiância no plano inclinado</i> | 74 |
| 5.2 | Efeitos da Sujidade no Desempenho FV | 78 |
| 5.2.1 | <i>Inspeção Visual</i> | 78 |
| 5.2.2 | <i>Métricas de Sujidade</i> | 80 |
| 5.2.2.1 | <i>Relação de Sujidade - SRatio</i> | 81 |
| 5.2.2.2 | <i>Relação de Desempenho - PR</i> | 87 |
| 5.3 | Composição química da sujidade | 90 |
| 5.3.1 | <i>FRX (Fluorescência de Raios-X)</i> | 91 |
| 5.3.2 | <i>DRX (Difração de Raios-X)</i> | 92 |
| 6 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 93 |
| | REFERÊNCIAS | 95 |
| | APÊNDICES | 103 |
| | APÊNDICE A–TRABALHOS FUTUROS | 103 |
| | APÊNDICE B–ARTIGOS PUBLICADOS E ENVIADOS | 104 |

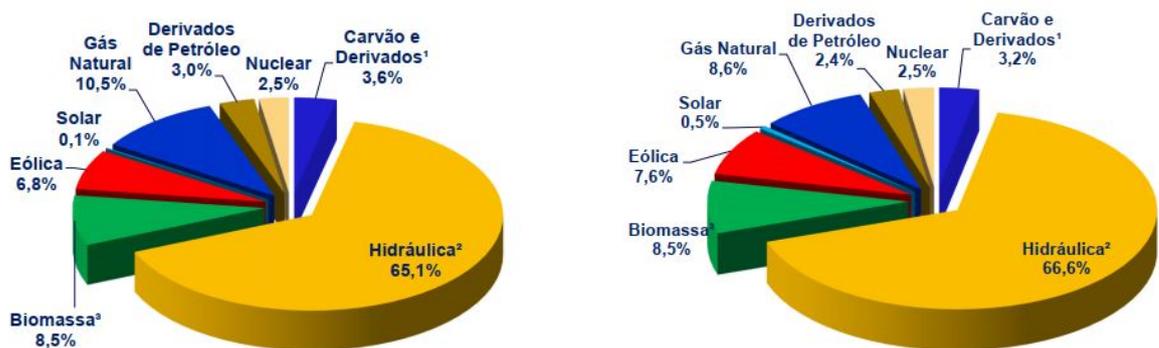
1 INTRODUÇÃO

O mundo tem adotado as tecnologias de energias renováveis para fornecer energia elétrica de forma segura, acessível e sustentável, salvaguardar a volatilidade do preço da energia e estimular a economia mundial (GHOSH *et al.*, 2019). Entre essas tecnologias, a tecnologia Fotovoltaico (FV) tem sido uma das mais procuradas e usadas, e o seu crescente aumento na participação da produção de eletricidade é evidenciado pelo incremento percentual da sua capacidade instalada na matriz elétrica mundial nos últimos anos.

Em 2016, a capacidade instalada FV mundial atingiu pelo menos 303 GW, enquanto que em 2018 ultrapassou a marca de 500 GW, representando um aumento percentual de cerca de 66,66% em 2 anos (IEA, 2019). No Brasil, a capacidade instalada FV cresceu 7391,7% entre 2016 e 2018, enquanto a produção de eletricidade a partir dessa tecnologia cresceu 3971,8% (EPE, 2019).

O aumento da participação da tecnologia FV na matriz elétrica brasileira entre 2016 e 2018 é mostrado na Figura 1. Até setembro de 2019, a participação FV já é de 1,3%, representando um aumento de 160% quando comparado com 2018, e até 2050, a participação da tecnologia FV na matriz elétrica brasileira deverá ser de 14,9% (GREENPEACE, 2016; ABSOLAR, 2019).

Figura 1 – Matriz elétrica brasileira em 2016 e 2018, respectivamente.



Fonte: EPE (2019).

A preferência pela utilização da energia solar para conversão em energia elétrica tem promovido vários estudos em relação aos fatores que afetam o desempenho dos módulos FV. Os parâmetros ambientais, tais como intensidade de irradiação solar, temperatura do ar, sujidade, umidade relativa e vento, possuem grande impacto no desempenho dos módulos. O desempenho

é afetado pelos efeitos de sobreposição desses parâmetros entre si (KAZEM; CHAICHAN, 2016).

Sujidade é o terceiro parâmetro ambiental que mais afeta o desempenho de plantas FV, atrás apenas da irradiação solar e da temperatura (NEPAL *et al.*, 2018), e é devido ao acúmulo de partículas de poeira ou outros contaminantes na superfície FV (MICHELI *et al.*, 2019b). O grau da influência da sujidade no desempenho dos módulos FV pode variar de local para local podendo causar, nos piores cenários, uma redução na potência de saída FV de até 78% (COSTA *et al.*, 2018).

As características, o processo e os efeitos da sujidade em módulos FV dependem de vários fatores e suas avaliações detalhadas são questões extremamente complexas, desafiadoras e específicas do local de estudo. Propriedades da sujidade (por exemplo, propriedades químicas), parâmetros ambientais (como temperatura ambiente), propriedades do módulo FV (por exemplo, rugosidade e química da superfície) e características do local (como ângulo de inclinação, orientação) são alguns dos fatores que influenciam (ILSE *et al.*, 2018).

Estudos sobre a sujidade em módulos FV têm se tornado crucial para entender as causas e efeitos no seu desempenho. Vários experimentos têm sido realizados, no entanto alguns deles são conduzidos pela deposição de sujidade artificial, limitando a compreensão da natureza espectral da sujidade em condições externas reais, em que tipos de sujidade e taxas de deposição são diferentes e podem variar com o tempo (MICHELI *et al.*, 2019a).

Já pesquisas realizadas a partir da deposição de sujidade natural permitem prever perdas de sujidade e ainda identificar os níveis de sujidade em diferentes regiões (MICHELI *et al.*, 2019a). Além disso, também são essenciais para o desenvolvimento de tecnologias de mitigação de sujidade, pois a composição química e a distribuição do tamanho das partículas determinam como a sujidade interage com a superfície FV e, portanto, afeta a aplicabilidade e a eficácia das técnicas de mitigação (JAVED *et al.*, 2017).

Para mitigação da sujidade, os métodos de limpeza, assim como a frequência em que esses métodos são empregados, dependem de vários fatores, entre eles, do local da instalação. Em regiões com chuvas regulares, por exemplo, a limpeza não requer intervenção humana, enquanto que em locais com água escassa, a limpeza manual, como a lavagem a seco, é frequentemente aplicada (TOTH *et al.*, 2018). Além disso, em locais com chuvas de areia, a limpeza dos módulos FV deve ser feita logo após a tempestade, enquanto que em outras regiões, a limpeza pode ser feita semanalmente ou diariamente, a depender da intensidade da sujidade (MANI; PILLAI,

2010).

Como pôde ser visto, o estudo da sujidade em módulos FV pode ser abordado sob várias perspectivas: efeitos da sujidade no desempenho dos módulos; composição química da sujidade e sua relação com o ambiente; técnicas de mitigação; efeitos espectrais; entre outros. Estudos realizados sobre os efeitos da sujidade nos módulos FV têm ganhado bastante atenção, confirmado pelo aumento de publicações sobre este assunto nos últimos 6 anos (mais de 200%) (COSTA *et al.*, 2016).

Ainda assim, há grandes áreas do mundo em que o estudo dos efeitos da sujidade no desempenho FV ainda não foi realizado. Além disso, devido ao número de parâmetros que influenciam a sujidade nos módulos FV, grande parte das informações disponíveis na literatura se aplica apenas ao local específico em que o trabalho experimental foi realizado (JASZCZUR *et al.*, 2019).

Segundo Jaszczur *et al.* (2019), somente por meio de estudos sistemáticos em diferentes locais da Terra é que o efeito da sujidade na degradação do desempenho FV pode ser melhor compreendido. Nesse sentido, afim de colaborar com a literatura, a presente dissertação tem como objetivo apresentar um estudo sobre os efeitos da sujidade em módulos FV instalados em Fortaleza-Ceará, mais precisamente no Laboratório de Energias Alternativas da Universidade Federal do Ceará (LEA-UFC), *campus* Pici.

1.1 Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo avaliar os efeitos da sujidade no desempenho de plantas FV instaladas no LEA-UFC, que está localizado na cidade de Fortaleza, Ceará, sendo os objetivos específicos os seguintes:

- Realizar uma revisão bibliográfica afim de evidenciar a importância do presente estudo;
- Analisar a sazonalidade dos parâmetros ambientais;
- Avaliar o desempenho FV a partir das métricas de sujidade: SRatio e PR;
- Analisar a composição química da sujidade encontradas nos módulos FV;

1.2 Organização da Dissertação

A dissertação está organizada em seis capítulos, incluindo esse, do seguinte modo:

- Capítulo 2: Fundamentação Teórica, neste capítulo é explanado os temas necessários para

- um melhor entendimento dos efeitos da sujidade no desempenho FV;
- Capítulo 3: Estado da Arte, trabalhos nacionais e internacionais sobre o tema em estudo são apresentados;
 - Capítulo 4: Metodologia, os procedimentos seguidos para extração das métricas de avaliação do desempenho FV são descritos, assim como o local em que as plantas FV analisadas estão instaladas, as características elétricas das plantas e o sistema de aquisição de dados são apresentados;
 - Capítulo 5: Resultados e Discussões, neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir dos procedimentos seguidos na metodologia e discussões sobre esses resultados são realizadas;
 - Capítulo 6: Conclusões Parciais e Próximas Etapas, as conclusões iniciais são apresentadas neste capítulo e os próximos procedimentos a serem realizados são descritos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para o desenvolvimento da presente dissertação, o aprofundamento de alguns temas é necessário, desse modo, neste capítulo é apresentada a fundamentação teórica. Os temas abordados são: características da sujidade, o processo de sujidade em superfícies FV, os seus fatores influenciadores e as principais métricas utilizadas para mensurar os efeitos da sujidade no desempenho FV.

2.1 Características da Sujidade

O acúmulo de partículas de poeira ou de outros contaminantes na superfície de módulos FV é uma questão complexa, conhecida como sujidade, que afeta sistemas FV em todo mundo (MICHELI *et al.*, 2019b). Poeira é definida como qualquer partícula de tamanho menor que 500 μm de diâmetro que entra na atmosfera por diferentes fontes como, por exemplo, levantada pelo vento, por escapamento de veículos, erupções vulcânicas e poluição do ar (DARWISH *et al.*, 2015).

A sujidade pode incluir pequenas quantidades de pólen, células humanas e de animais, carpetes, fibras têxteis (às vezes denominadas microfibras) e, mais comumente, minerais orgânicos de precipitação geomorfológica, como areia e argila (SARVER *et al.*, 2013). Sua composição, assim como outros fatores, varia de local para local, a depender das condições climáticas, geográficas e de urbanização. As principais características da sujidade são: composição, distribuição, tamanho e taxa de deposição das partículas (ILSE *et al.*, 2018).

2.1.1 Composição das partículas de sujidade

A redução no desempenho das células FV devido à sujidade depende não apenas da quantidade de sujidade acumulada, mas também da sua composição física e química (SAIDAN *et al.*, 2016). A composição da sujidade depositada sobre os módulos FV varia de local para local em todo o mundo, sendo esperado que a sua composição esteja fortemente ligada à composição da sujidade da região/solo/terreno local (LAWRENCE; NEFF, 2009).

Exemplo disso é que em áreas urbanas espera-se que a sujidade coletada de superfícies FV seja dominada por poluentes provindos de emissões de veículos, por exemplo, enquanto que em locais de atividades agrárias, espera-se a presença de fertilizantes, areia ou matéria vegetal (SARVER *et al.*, 2013). Em regiões desérticas, como o Oriente Médio, África do Norte e

Índia, é esperado que a sujidade seja dominada por óxidos de sílcio: quartzo, ilita, caulinita, esmectita, carbonatos, gipsita, feldspato e óxido de ferro (KAZMERSKI *et al.*, 2016).

Na Tabela 1 é apresentada a composição química das partículas de sujidade e suas fontes mais comuns.

Tabela 1 – Fontes de partículas de sujidade externas mais comuns e seus elementos característicos.

| Fonte de sujidade | Elemento característico emitido |
|------------------------------|---|
| Emissão de motor de veículos | Bromo, Chumbo, Bário, Manganês, Cloro, Zinco, Vanádio, Nitrogênio, Selênio, Antimônio, Arsênio, Ferro, Alumínio |
| Conversores catalíticos | Metais de terras-raras, Platina |
| Desgaste de pneus | Óxido de zinco, Carbono preto |
| Sujeira da estrada | Alumínio, Silício, Potássio, Cálcio, Titânio, Ferro, Zinco |
| Combustão de carvão | Selênio, Arsênio, Cromo, Cobalto, Cobre, Alumínio, Enxofre, Fósforo, Gálio, Vanádio |
| Refinarias de petróleo | Vanádio |
| Incineração de resíduos | Zinco, Chumbo, Cobre, Cádmio, Mercúrio, Potássio |
| Pulverizador de mar | Sódio, Cloro, Enxofre, Potássio |
| Solo ressuspenso | Silício, Alumínio, Cálcio, Manganês, Ferro, Titânio, Estrôncio, Manganês, Escândio |

Fonte: Adaptado de Schwela *et al.* (2002).

2.1.2 Tamanho e distribuição das partículas de sujidade

As perdas de transmissão de luz causadas pela sujidade nas superfícies dos módulos são fortemente influenciadas pelo tamanho e distribuição das partículas nos módulos FV, apresentando perdas significativamente maiores por acúmulo de sujeira para partículas de tamanhos menores (SARVER *et al.*, 2013). Isso pode ser explicado pelo fato de que partículas menores são distribuídas mais uniformemente do que partículas maiores, o que leva a uma maior dispersão de luz.

Em climas áridos e semiáridos, a principal proporção de sujidade é atribuída às partículas na faixa de tamanho entre 2 e 63 μm de diâmetro, já que partículas maiores (diâmetro maior do que 63 μm) são mais pesadas para serem levantadas e acomodadas nos módulos FV, exceto para condições de ventos fortes e tempestades de areia (ILSE *et al.*, 2018).

Na Tabela 2 é apresentada a classificação das partículas de sujidade em tipos de sedimento com base nas distribuições de tamanhos das partículas. Partículas com diâmetro menor que 4 μm são conhecidas como argila, entre 4 e 63 μm são conhecidas como silte e entre 63 μm e 1000 μm como granuladas ou areia. Cada um dos sedimentos é ainda classificado como

muito fino, fino, médio e grosso.

Tabela 2 – Classificação de sedimentos com base na distribuição do tamanho de partículas.

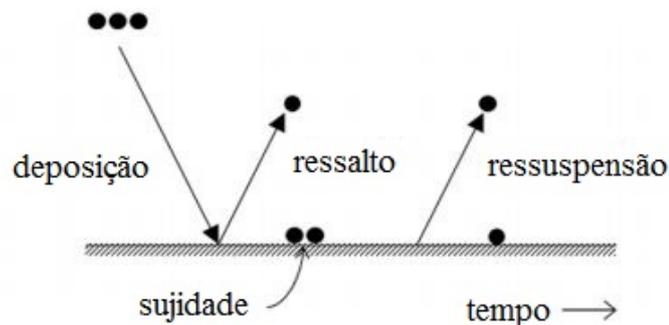
| Diâmetro (μm) | Tipo de sedimento |
|----------------------------|-------------------|
| 0 - 4 | Argila |
| 4 - 8 | Silte muito fino |
| 8 - 16 | Silte fino |
| 16 - 31 | Silte médio |
| 31 - 63 | Silte grosso |
| 63 - 125 | Areia muito fina |
| 125 - 250 | Areia fina |
| 250 - 500 | Areia média |
| 500 - 1000 | Areia grossa |

Fonte: Adaptado de Blott e Pye (2012).

2.1.3 Taxa de deposição das partículas

A taxa em que as partículas de sujeidade se acumulam na superfície dos módulos FV pode ser considerada como o resultado líquido de três processos: deposição (impacto das partículas na superfície), ressalto (não adesão imediata das partículas na superfície) e ressuspensão (partículas levadas pelo vento depois de um certo tempo de adesão na superfície) (FIGGIS *et al.*, 2017), conforme mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Deposição, ressalto e ressuspensão de partículas de sujeidade.



Fonte: Adaptado de Figgis *et al.* (2017).

2.2 Processo de Sujidade em Módulos FV

O processo de deposição de sujeidade em módulos FV pode ser dividido em cinco passos: transporte de partículas, adesão inicial, mecanismos que aumentam a adesão inicial,

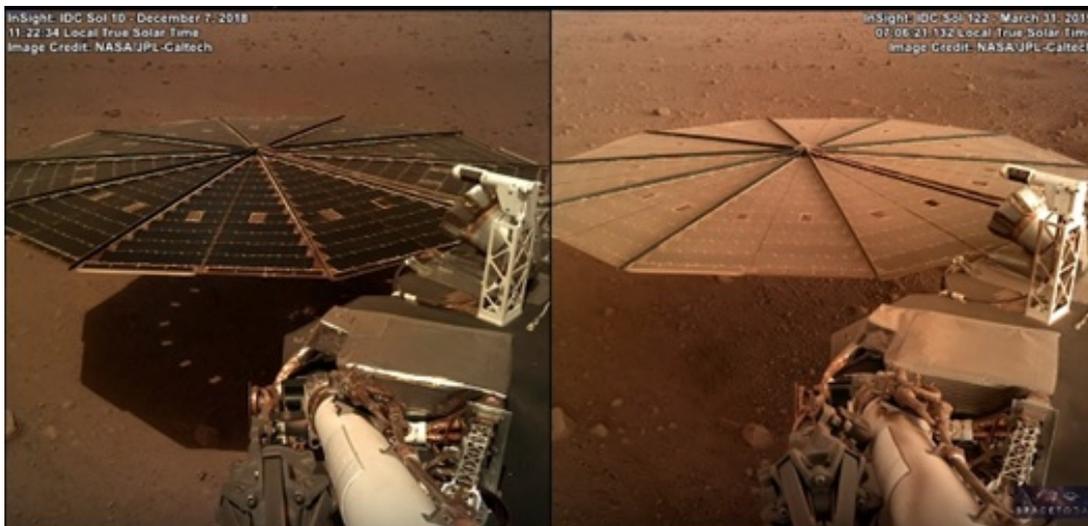
alterações na superfície do módulo e métodos restaurativos (JOHN, 2015).

2.2.1 Transporte de partículas de sujidade

O vento é o principal agente emissor, transportador e depositador de sujidade em módulos FV, em um processo denominado eólico. Processos eólicos ocorrem quando há partículas de sujidade e ventos de velocidades suficientes para movê-las. Na Terra, esses processos ocorrem principalmente em desertos, praias e em áreas de vegetação escassa, podendo as partículas serem transportadas a milhares de quilômetros de sua região de origem (KOK *et al.*, 2012).

Processos eólicos não estão confinados somente ao planeta Terra, mas também ocorrem em Marte, Vênus e em Titã, maior lua de Saturno (GREELEY; IVERSEN, 1987). Em Marte, por exemplo, as tempestades de areia ocasionalmente obscurecem o Sol por vários dias, em regiões inteiras do planeta (KOK *et al.*, 2012). Na Figura 3 é mostrada a situação dos módulos FV que geram eletricidade para a sonda Insight em Marte, antes e depois de sinais sísmicos detectados no dia 14 de março de 2019 (CNES, 2019; SPACETODAY, 2019).

Figura 3 – Módulos FV da sonda Insight em Marte, antes (esquerda) e depois (direita) de sinais sísmicos detectados.



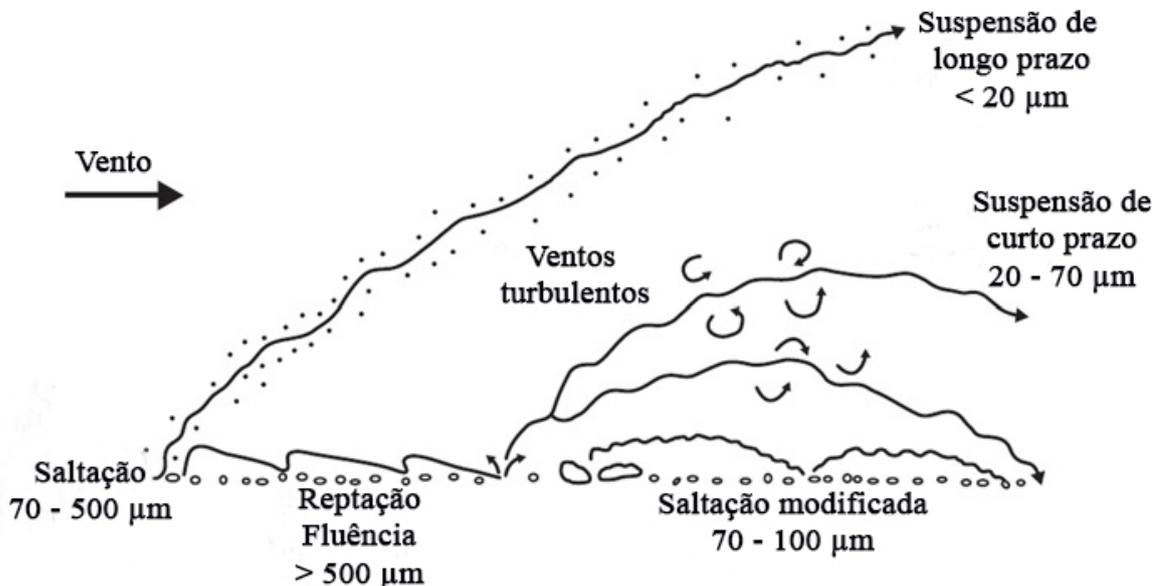
Fonte: SPACETODAY (2019).

Há diversas formas de transporte de partículas pelo vento, como apresentado na Figura 4. À medida que a velocidade do vento aumenta, as partículas de sujidade de aproximadamente 70 a 500 μm são movidas, levantadas e saltadas por um processo chamado saltação (KOK *et al.*, 2012). O impacto das partículas pelo processo de saltação pode expulsar outras partículas, de diferentes tamanhos, da superfície.

Após a expulsão, as partículas de sujidade são suscetíveis a flutuações turbulentas e normalmente entram no processo de suspensão, que pode ser dividido em dois tipos: de curto prazo, com partículas com tamanho entre $20 \mu\text{m}$ e $70 \mu\text{m}$ de diâmetro, e de longo prazo, com partículas de tamanhos menores do que $20 \mu\text{m}$ de diâmetro. As partículas de suspensão de longo prazo podem permanecer na atmosfera por várias semanas e podem ser transportadas a milhares de quilômetros de seu ponto de origem (KOK *et al.*, 2012).

O processo de saltação pode influenciar na mobilização de partículas maiores. No entanto, a aceleração das partículas com tamanhos maiores do que $500 \mu\text{m}$ de diâmetro é fortemente limitada devido a sua inércia e, geralmente, essas partículas não saltam, podendo voltar à superfície após realizar um salto curto de menos de um centímetro, em um processo conhecido como reptação (SHAO, 2008). Alternativamente, podem rolar ou deslizar ao longo da superfície, impulsionadas pelo processo de saltação e pelo vento em um modo de transporte chamado fluência (BAGNOLD, 1937).

Figura 4 – Diferentes modos de transporte de partículas de sujidade.



Fonte: Adaptado de Kok *et al.* (2012).

Apesar de o transporte de partículas de sujidade pelo vento poder ser separado em vários regimes físicos: suspensão de longo prazo (< $20 \mu\text{m}$); suspensão de curto prazo ($20 - 70 \mu\text{m}$); saltação ($70 - 500 \mu\text{m}$); reptação e fluência ($> 500 \mu\text{m}$) (KOK *et al.*, 2012), esses quatro modos não são eventos discretos, pois cada modo se transforma continuamente no próximo de acordo com a velocidade do vento e do tamanho das partículas (JOHN, 2015).

2.2.2 Adesão Inicial

A adesão inicial das partículas da sujidade em superfícies sólidas é governada por várias forças de adesão que dependem das condições ambientais, das características da sujidade e da área da superfície de contato (JONES *et al.*, 2002). As forças de adesão mais comuns são:

- Forças capilares: a adesão por essas forças é dominante quando a umidade está presente no ambiente circundante, fazendo com que as partículas adiram à superfície por ação capilar (ISAIFAN *et al.*, 2019). A força capilar é proporcional ao diâmetro da partícula e é significativa, principalmente, para partículas com tamanhos acima de 10 μm de diâmetro (FIGGIS *et al.*, 2017).
- Forças de Van der Waals: coleção de forças pela qual um átomo, ou molécula, é atraído por outro átomo, ou molécula. Em geral, sob condições ambientais secas e eletricamente neutras, a força de Van der Waals pode ser considerada a força de adesão mais dominante entre as partículas e as superfícies sólidas (ISAIFAN *et al.*, 2019).
- Forças eletrostáticas: podem ser atrativas ou repulsivas e dependem de muitos fatores, tais como, estado da carga elétrica da partícula e da superfície, e distância entre as partículas e a superfície (ILSE *et al.*, 2018). Podem surgir quando as partículas adquirem carga elétrica por meio de colisão ou outros meios. Mesmo que a superfície do módulo não esteja carregada previamente, as partículas carregadas vão induzir partículas de cargas opostas na superfície do módulo (ISAIFAN *et al.*, 2019). Normalmente, as forças eletrostáticas não são dominantes para distâncias menores que 20 nm entre a superfície e as partículas (ILSE *et al.*, 2018).
- Forças gravitacionais: dependem do diâmetro, da forma e da densidade da partícula de sujidade (SARVER *et al.*, 2013). A força gravitacional é insignificante comparada com as outras três forças para partículas com tamanho menor do que 500 μm de diâmetro (QUAN *et al.*, 2016).

Para condições ambientais úmidas, a força capilar é responsável por 98% das forças que atuam no mecanismo de atração das partículas pela superfície, enquanto Van der Waals é responsável pelos 2% restantes. Já em condições ambientais secas, a força de adesão eletrostática pode ser significativa (ISAIFAN *et al.*, 2019).

2.2.3 *Mecanismos de sujidade que aumentam a adesão de partículas de sujidade e alterações nas características da superfície FV*

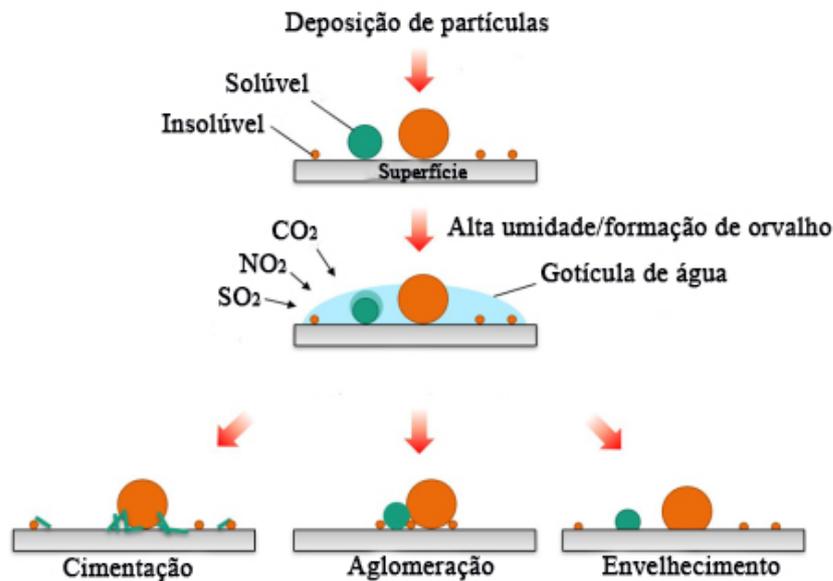
Os mecanismos de adesão de partículas de sujidade em módulos FV tendem a mudar com o tempo devido à influência do meio ambiente (JOHN, 2015). Os mecanismos mais conhecidos são (ILSE *et al.*, 2018):

- Orvalho: é definido por um conjunto de gotas de umidade, que, por condensação, se depositam durante a noite em qualquer superfície plana (DICIONÁRIO, 2019). A principal razão pela formação do orvalho é a temperatura dos módulos estar abaixo da temperatura ambiente durante o período da noite. Isso acontece pela combinação da alta umidade relativa do ar (frequentemente observada durante a noite e no início da manhã devido à diminuição típica da temperatura do ar) com o resfriamento radiativo à noite, que faz com que os módulos FV sejam resfriados abaixo da temperatura do ponto de orvalho, onde a condensação ocorre por definição. O orvalho, além de aumentar temporariamente as forças capilares, promove diferentes processos que aumentam permanentemente a adesão das partículas, como cementação, aglomeração de partículas e envelhecimento capilar.
- Aglomeração de partículas: aumenta a adesão entre as partículas durante os eventos de orvalho pelo rearranjo, aglomeração e compactação das partículas presentes na superfície. As partículas de pequena escala são suspensas nas gotículas de água que se formam na superfície, reduzindo significativamente as forças de Van der Waals. À medida que a gotícula seca, as partículas suspensas se concentram em um volume menor, até que se depositam novamente na superfície. Devido à maior mobilidade das pequenas partículas, revestem as superfícies e preenchem facilmente os orifícios e espaços entre as partículas maiores e a superfície. Consequentemente, a área de contato entre as partículas maiores e a superfície do vidro aumenta drasticamente, assim como as forças de adesão.
- Envelhecimento capilar: ocorre quando o orvalho está secando e as forças capilares pressionam as partículas de sujidade contra a superfície, de modo que os vazios na zona de contato possam diminuir ou as partículas ser deformadas, resultando em um aumento de área de contato efetiva. Consequentemente, após a secagem, as forças de aderência de curto alcance, como as forças de Van der Waals, podem aumentar significativamente.
- Cementação: partículas de sujidade contêm partículas inorgânicas e orgânicas que contêm sais insolúveis e solúveis em água. Em alta umidade ou durante o orvalho, partículas na superfície formam gotículas de soluções salinas que podem reter partículas insolúveis

em água. Quando a solução evapora, o sal precipitado atua como um cimento para fixar partículas insolúveis na superfície. Ciclos repetitivos de formação de orvalho, evaporação e alta umidade relativa resultam em um acúmulo gradual de camadas cementadas. O nome desse mecanismo é cimentação.

Na Figura 5 é mostrado o esquema dos mecanismos que aumentam a adesão de partículas.

Figura 5 – Esquema de mecanismos que aumentam a adesão de partículas e alteram as características da superfície FV.



Fonte: Adaptado de Ilse *et al.* (2018).

2.2.4 Métodos restaurativos

O reconhecimento do impacto da sujidade no desempenho de módulos FV resultou no desenvolvimento de vários métodos de mitigação de sujidade, que são baseados na morfologia da sujidade e nas suas características químicas, físicas, biológicas e eletrostáticas. A periodicidade com que esses métodos são aplicados nos módulos FV depende das condições ambientais do local em que os módulos estão instalados. Os métodos de mitigação de sujidade são divididos em dois: limpeza manual e autolimpeza (JAMIL *et al.*, 2017).

- Método de limpeza manual (JAMIL *et al.*, 2017; DEB; BRAHMBHATT, 2018): é a forma mais tradicional de limpeza, em que a sujidade é limpa com escovas especiais equipadas com cerdas para evitar arranhões na superfície do módulo FV. Esse método

permite a remoção de sujidades duras, como dejetos de pássaros ou sujeira cimentada no módulo FV, por exemplo. Por outro lado, possui desvantagens como: custo de mão de obra, que pode ser alto para usinas FV de grande escala; inviabilização da limpeza devido às alturas elevadas em que os módulos FV estão instalados; custo com água, ferramentas e detergentes. É recomendado usar água desmineralizada ou destilada, e materiais não abrasivos, para não expor a superfície do módulo a danos abrasivos ou rachaduras. Na Figura 6 é mostrado um exemplo de limpeza manual.

Figura 6 – Limpeza manual realizada em módulos FV.

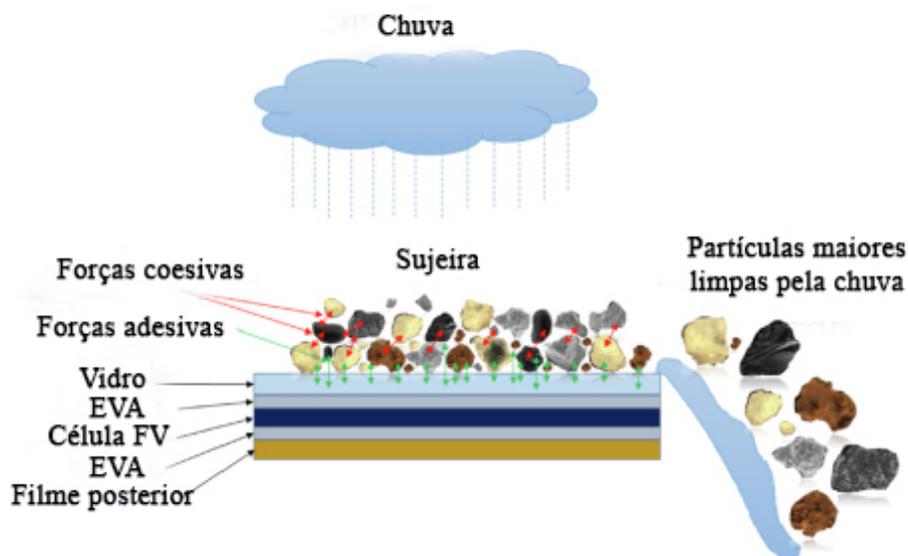


Fonte: Chaves *et al.* (2019).

- Métodos de autolimpeza: têm como objetivo solucionar as desvantagens da limpeza manual. Alguns desses métodos são:
 - Limpeza natural (JAMIL *et al.*, 2017; JOHN, 2015; SAID *et al.*, 2018): geralmente é feito pela chuva, mas também pode ser feito pelo vento e pela gravidade. A limpeza feita pela chuva é indicada para locais com precipitações suficientes para limpar os módulos FV, pois chuvas de duração breve e intensidade leve podem agravar o problema de sujidade nos módulos, em que gotículas de chuva podem coletar partículas de sujidade suspensas na atmosfera e depositar altas concentrações de resíduos na superfície do módulo. A quantidade de chuva que possui efeito de limpeza nos módulos FV difere de local para local: Hammond *et al.* (1997), por exemplo, consideram que chuvas de 5 mm são suficientes para limpar os módulos

FV instalados no Arizona, Estados Unidos, enquanto que no trabalho de Kimber *et al.* (2006), chuvas menores do que 10 mm não são consideradas suficientes para limpeza dos módulos localizados na Califórnia, Estados Unidos. A limpeza dos módulos FV não pode depender só de chuvas ocasionais ou da ação do vento, devido ao processo de cementação, pois algumas partículas de sujeira, principalmente as partículas menores do que $10 \mu\text{m}$, tendem a grudar na superfície do módulo e não podem ser removidas somente pela limpeza natural (HACHICHA *et al.*, 2019), como é ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Efeito da chuva nas partículas de sujeira na superfície do módulo FV.



Fonte: Adaptado de Hachicha *et al.* (2019).

- Limpeza por sistemas mecânicos (JAMIL *et al.*, 2017; DEB; BRAHMBHATT, 2018): é feita por sistemas que, geralmente, possuem limpador, escova e se movem horizontalmente ou verticalmente, de acordo com a detecção de sujeira. Esse método ganhou popularidade devido aos desenvolvimentos de automação e robôs (até mesmo drones) para limitar os custos de mão-de-obra. O sistema pode ser ativado manualmente, automaticamente usando o dispositivo de controle elétrico, eletrônico ou ambos. As vantagens são: operação automatizada por sensores e controlador, pode assustar aves, e pode ser muito útil em condições em que a limpeza à base de água não é viável e quando a operação não tripulada é essencial; entre as desvantagens, pode-se citar: contato direto das escovas e aparelhos mecanizados com a superfície do módulo FV pode ter efeito abrasivo, possui alto consumo de

energia, a manutenção das partes mecânicas pode ser necessária e a eficiência desse método é incerta para alta acumulação de sujeira. Na Figura 8 é mostrado um robô desenvolvido para limpeza de módulos FV.

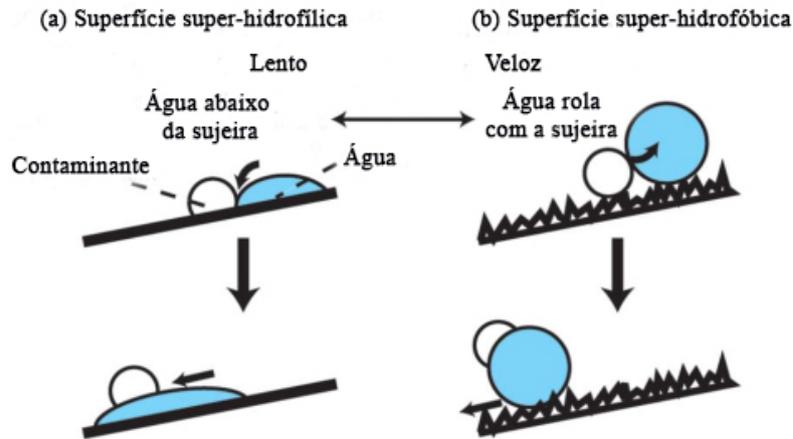
Figura 8 – Processo de limpeza de uma planta FV realizado por robô.



Fonte: Adaptado de SERBOT (2019).

- Superfície super-hidrofóbica e super-hidrofílica (JAMIL *et al.*, 2017; SAID *et al.*, 2018): são superfícies que exibem propriedades eficientes de autolimpeza. A superfície super-hidrofóbica possui baixa molhabilidade (habilidade de um líquido manter contato com uma superfície sólida), alta mobilidade de gotas de água e a remoção da sujeira é feita pelo rolamento da gota de água com a sujeira. Esse tipo de superfície pode não somente reduzir a sujeira, mas também diminuir a temperatura do módulo FV, especialmente em regiões de clima quente. Na superfície super-hidrofílica, as gotículas de água se espalham muito rapidamente e a água escorre da superfície com considerável velocidade. A remoção da sujeira nessa superfície é feita pela gotícula de água que pode se espalhar, passar por baixo da partícula de sujeira e levá-la embora. Na Figura 9 são ilustrados os processos de autolimpeza realizados por essas superfícies.

Figura 9 – Processos de limpeza realizados por superfícies com propriedades de autolimpeza.



Fonte: Adaptado de Nishimoto e Bhushan (2013).

2.3 Fatores Influenciadores da Sujidade em Módulos FV

A sujidade depende de vários fatores, tais como: características de instalação e propriedades dos módulos FV, condições ambientais, entre outros (NEPAL *et al.*, 2018).

2.3.1 Características de instalação e propriedades dos módulos FV

- Ângulo de inclinação e orientação dos módulos FV (MANI; PILLAI, 2010): a influência da força gravitacional na deposição de sujidade aumenta conforme o incremento do ângulo de inclinação. Assim, quando há inclinação dos módulos, devido à força gravitacional, as partículas maiores de sujidade rolam da parte superior do módulos para a inferior, causando deposição não uniforme de sujidade. Além disso, em relação à orientação, o módulo que enfrenta diretamente o vento obterá a maior parte da influência do vento no acúmulo de sujeira em comparação com o módulo que é menos exposto.
- Propriedades da superfície dos módulos (JOHN, 2015; JAMIL *et al.*, 2017): a superfície do material de vidro no módulo FV determina a distribuição da poeira depositada. Superfícies texturizadas tendem a prender partículas de sujeira em espaços vazios, ocasionando deposição não uniforme de sujeira. Superfícies revestidas, como a super-hidrofóbica e super-hidrofílica, acumulam menos sujidade em comparação com a superfície não revestida.

2.3.2 Condições ambientais

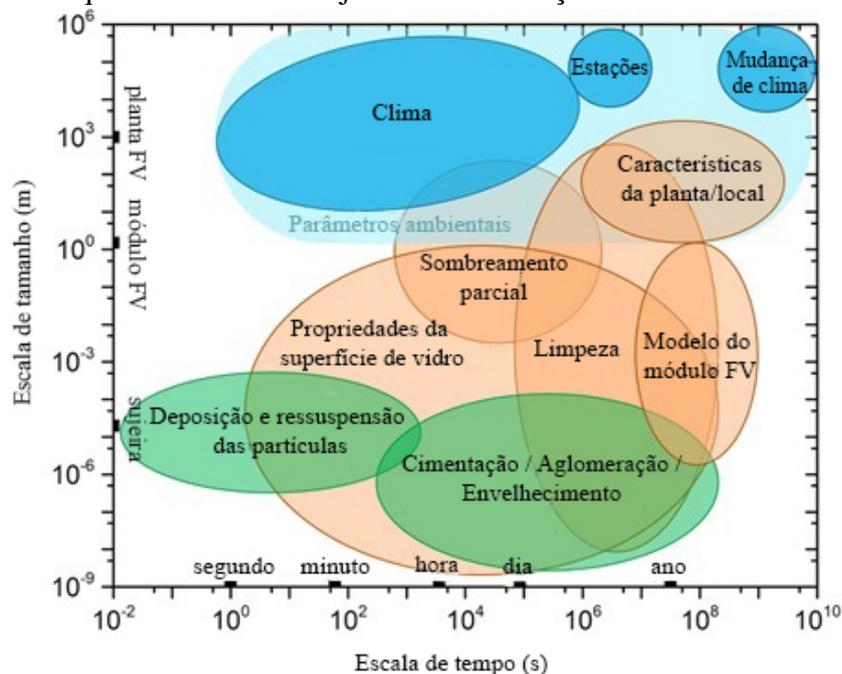
- Vento (JAMIL *et al.*, 2017): o acúmulo de sujeira em módulos FV depende da concentração de partículas transportadas pelo vento e da sua velocidade. Módulos FV sob influência de ventos que transportam altas concentrações de sujeira possuem acúmulo de sujeira maior do que quando estão sob influência de ventos de baixa concentração.
- Umidade e temperatura ambiente (JAMIL *et al.*, 2017): em condições de temperatura ambiente alta e umidade relativa baixa, a sujeira pode facilmente ser transportada pelo vento. Além disso, na ocorrência de orvalho nos módulos, ocorrem processos que aumentam a adesão da sujeira, como, por exemplo, a cementação.
- Poluentes atmosféricos: um dos tipos mais comuns de poluição atmosférica é composta por altas concentrações de *Particulate Matter* (PM). A presença de PM na atmosfera pode reduzir a irradiância solar incidente na célula FV devido ao aumento do efeito de reflexão, e ainda provocar sujeira na superfície dos módulos FV (KALDELLIS; KOKALA, 2010). PM é uma mistura complexa de partículas sólidas e líquidas, que contém uma ampla gama de componentes inorgânicos e orgânicos; pode ser emitido tanto de fontes naturais como de fontes humanas, incluindo incêndios florestais, tempestades de poeira, tráfego e indústria, e é encontrado tanto ao ar livre quanto em ambientes fechados (ZEREINI; WISEMAN, 2011). Normalmente, PM é definido de acordo com o tamanho ou o diâmetro das partículas que o compõe, pois é isso que determina quanto tempo permanecem no ar, até onde podem ser transportadas e, em termos de saúde, como são depositadas no sistema respiratório. PM₁₀ e PM_{2,5} representam, respectivamente, as concentrações, em 1 m³ de ar, de PM menor que 10 μm e menor que 2,5 μm de diâmetro; PM_{2,5} é um subconjunto de PM₁₀ e, geralmente, podem permanecer no ar por períodos mais longos e viajar por distâncias maiores que as partículas incluídas no PM₁₀, devido ao seu peso menor (MICHELI; MULLER, 2017). As partículas PM_{2,5} e PM₁₀ podem servir como uma estimativa da quantidade de sujeira que pode se depositar na superfície do módulo FV (JOHN, 2015). Em um experimento realizado em diferentes locais nos Estados Unidos, por exemplo, é observado que PM₁₀ parece explicar melhor a tendência das perdas de sujeira em módulos FV do que outros índices de qualidade do ar (KIMBER *et al.*, 2016).

Além dos parâmetros influenciadores citados acima, fatores dinâmicos, como mudanças nesses parâmetros em diferentes escalas de tempo (por exemplo, mudanças sazonais de fatores ambientais) desempenham um papel importante na sujeira de módulos FV. Além disso,

deve-se considerar uma combinação de processos e fatores de influência na macroescala do sistema (por exemplo, sombreamento parcial por sujidade não uniforme) e processos que ocorrem nas micro e nanoescalas (como por exemplo, tamanho da partícula de sujidade e mecanismos de adesão à superfície) (ILSE *et al.*, 2018).

Na Figura 10 são apresentados alguns desses fatores de influência em termos de tamanho relevante e escalas de tempo. Os parâmetros ambientais de escala macroscópica são coloridos em azul, enquanto os processos de sujidade de escala microscópica são mostrados em verde. Fatores de influência controláveis, como o módulo ou o projeto da planta, bem como as estratégias de operação e manutenção são marcados em laranja.

Figura 10 – Fatores que influenciam a sujidade com variações de tamanho e escalas de tempo.



Fonte: Adaptado de Ilse *et al.* (2018).

2.4 Principais Métricas Utilizadas para Mensurar os Efeitos da Sujidade no Desempenho FV

A avaliação detalhada sobre os efeitos da sujidade no desempenho dos módulos FV é uma tarefa complexa e específica do local em estudo. Uma das maneiras de avaliar o comportamento do módulo FV é a partir da sua curva I-V, que possibilita detectar anomalias em seu desempenho. Outra maneira de avaliação é a partir de métricas, sendo as mais utilizadas para análise da sujidade no desempenho dos módulos FV as seguintes (MICHELI *et al.*, 2017;

COSTA *et al.*, 2018):

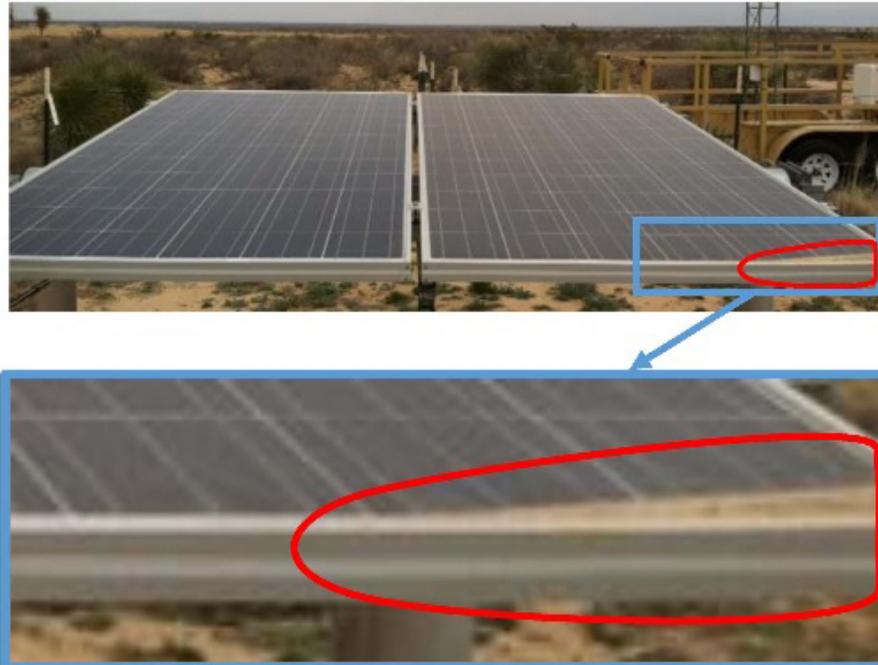
- Relação de Sujidade (*Soiling Ratio*, SRatio): relação entre a corrente de curto-circuito ou potência do módulo FV sujo e a corrente de curto-circuito ou potência do módulo FV limpo nas mesmas condições de operação. Os valores dessa métrica variam entre 0 e 1, é adimensional, e quando próximos de 0 significa que a sujidade tem grande impacto no desempenho dos módulos, já quando próximos ou iguais a 1, significa que a sujidade tem pouco ou nenhum impacto no desempenho FV.
- Taxa de Sujidade (*Soiling Rate*, SRate): redução diária de SRatio, quando não ocorre limpeza do módulo FV. Esses valores são negativos e podem ser caracterizados como um coeficiente de perda, representando as perdas diárias causadas pela sujidade no desempenho dos módulos FV. Quanto mais próximo de 0 o valor de SRate for, menor será o impacto da sujidade nos módulos.
- Relação de Desempenho (*Performance Ratio*, PR): é uma medida de qualidade que é independente da localização do módulo FV e descreve a relação entre a produção de eletricidade real e a teórica do módulo (SMA, 2019). PR mede com que eficácia o módulo converte energia solar em eletricidade relacionando ao que é esperado pelo *datasheet* do módulo FV. 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 (DIERAUF *et al.*, 2013). Devido às perdas de temperatura do módulo, os valores de PR são maiores no inverno que no verão e se a sujidade no módulo for sazonal, também poderá afetar as diferenças no PR do verão para o inverno (MARION *et al.*, 2005). Os valores de PR variam entre 0 e 1, sendo que quando próximos ou iguais a 1, o sistema opera conforme o esperado.

Quando o módulo FV está sujo de forma uniforme, é indicado que o cálculo de SRatio seja feito por meio da relação entre as correntes de curto-circuito do módulo sujo e limpo. Porém, quando a sujidade não é uniforme na superfície do módulo, indica-se que o cálculo de SRatio seja feito pela relação entre a potência do módulo sujo e a potência do módulo limpo (GOSTEIN *et al.*, 2015).

Isso se deve ao fato de que quando a sujidade está distribuída de forma não uniforme na superfície FV, as partículas de sujidade em uma área do módulo podem reduzir drasticamente a potência de saída FV por um fator muito maior que a área fracionária coberta por essas partículas,

pois as células FV sujas irão operar como carga para as demais células do módulo (GOSTEIN *et al.*, 2015; COSTA *et al.*, 2018). Na Figura 11 é mostrado um módulo FV com sujidade não uniforme.

Figura 11 – Módulo FV com sujidade não uniforme.



Fonte: Adaptado de Gostein *et al.* (2015).

Em módulos FV do tipo silício cristalino, quando parte do módulo é submetido a condições operacionais não ideais, como sombreamento, sujidade e superaquecimento, um caminho alternativo é oferecido para a corrente da célula FV sob condições não ideais. Esse caminho alternativo é feito pelo diodo de *bypass*, cuja função é não limitar a corrente de saída do módulo devido a uma célula FV suja, por exemplo (COSTA *et al.*, 2018).

Logo, quando o cálculo de SRatio em módulos FV de silício cristalino é feito por meio da corrente de curto circuito, o resultado pode não retratar de forma condizente o quanto o desempenho FV está sendo prejudicado pela sujidade e assim prefere-se a realização do cálculo por meio da potência de saída.

O cálculo de SRatio utilizando valores de corrente é feito da seguinte forma (GOSTEIN *et al.*, 2015):

$$SRatio_{I_{sc}} = \frac{I_{sc_{sujo}}}{I_{sc0} * [1 + \alpha * (T_{c_{sujo}} - T_0)] * \left(\frac{G_T}{G_0}\right)} \quad (2.1)$$

Em que $I_{sc_{sujo}}$ é a corrente de curto-circuito do módulo em condições de sujidade, I_{sc0}

é a corrente de curto-circuito do módulo nas *Standart Test Conditions* (STC), α é o coeficiente de temperatura para corrente de curto-circuito, $T_{c_{sujo}}$ é a temperatura do módulo sujo, G_T é a irradiância solar incidente no plano inclinado do módulo FV, e por fim, T_0 e G_0 são a temperatura ambiente e a irradiância solar no STC, respectivamente.

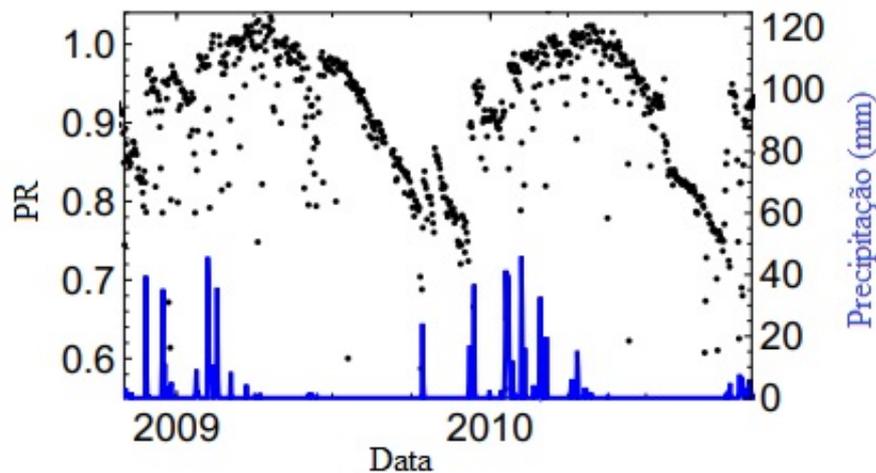
O cálculo de SRatio utilizando valores de potência é feito da seguinte forma (GOSTEIN *et al.*, 2015):

$$SRatio_{P_{max}} = \frac{P_{max_{sujo}}}{P_{max_0} * [1 + \gamma * (T_{c_{sujo}} - T_0)] * \left(\frac{G_T}{G_0}\right)} \quad (2.2)$$

Em que $P_{max_{sujo}}$ é potência no *Maximum Power Point* (MPP) do módulo em condições de sujidade, P_{max_0} é a potência no MPP no STC e γ é o coeficiente de temperatura para potência.

Para o cálculo de SRate, o método proposto por Deceglie *et al.* (2016) pode ser utilizado, em que dados diários de PR são considerados juntamente com dados de precipitação, já que períodos de seca estão associados a um declínio no desempenho do módulo FV devido à sujidade (DECEGLIE *et al.*, 2016). Na Figura 12 é mostrado o declínio de PR em períodos secos.

Figura 12 – Dados de PR e de precipitação.



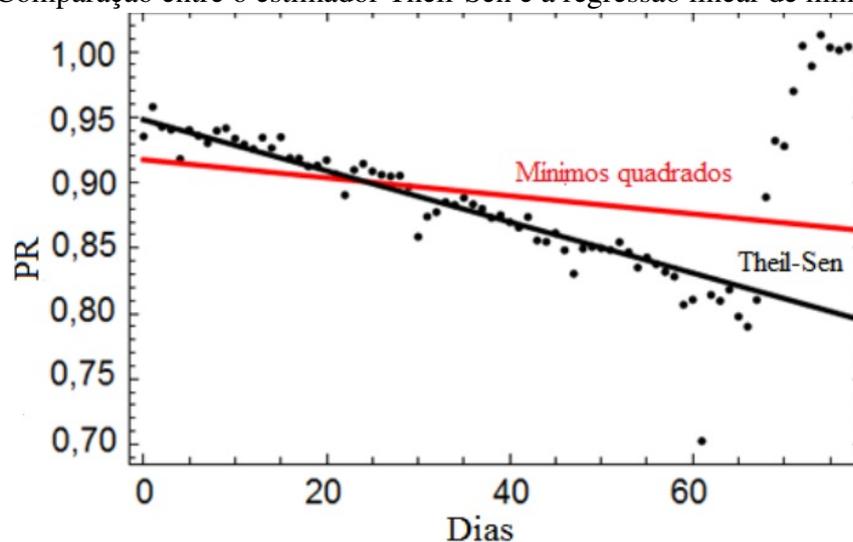
Fonte: Adaptado de Deceglie *et al.* (2016).

Para extrair a taxa de sujidade diária, deve ser conhecido o número de dias decorridos, d , entre cada dia no conjunto de dados de PR e o evento de precipitação anterior mais recente. Em seguida, o conjunto de dados em intervalos livres de precipitação é particionado e apenas os intervalos maiores que 14 dias são selecionados, pois segundo Deceglie *et al.* (2016), intervalos menores do que 14 dias não impactam a sujidade nos módulos FV.

O estimador Theil-Sen é o método usado para extração da inclinação de PR *versus* d para cada intervalo maior do que 14 dias. Esse método foi desenvolvido por Theil (1950) e Sen (1968) e calcula as inclinações entre todos os pares de pontos em um conjunto de dados e, em seguida, calcula o valor mediano dessas inclinações.

O estimador Theil-Sen é mais robusto para valores extremos do que o método de regressão linear de mínimos quadrados, como mostrado na Figura 13. No caso, o estimador Theil-Sen é mais preciso, eliminando eventos aparentes de limpeza não associados à precipitação. Essa precisão é uma vantagem na expansão no método de extração de SRate (DECEGLIE *et al.*, 2016).

Figura 13 – Comparação entre o estimador Theil-Sen e a regressão linear de mínimos quadrados.



Fonte: Adaptado de Deceglie *et al.* (2016).

A diferença entre os dois métodos, o de mínimos quadrados e o Theil-Sen, é que quando não há evento de limpeza, mas mesmo assim PR atinge valores próximos de 1, a regressão linear dos mínimos quadrados é influenciada por esse aumento de PR, que teoricamente, significa em uma melhora no desempenho FV, porém como não houve ocorrência de chuva, esse aumento representa uma anomalia. O mesmo não ocorre com o estimador Theil-Sen (COSTA *et al.*, 2018).

Em relação ao cálculo do PR, esse é feito para representar o desempenho real da planta FV, em que plantas de diferentes condições de irradiância, orientação, ângulo de inclinação e de parâmetros STC podem ser comparadas (URREJOLA *et al.*, 2016). Os valores de PR dependem, principalmente, da temperatura do módulo, da dissipação de energia, do sistema de medição e da contaminação por poeira ou partículas de poluição (SARVER *et al.*, 2013).

Quanto mais próximo o valor de PR se aproximar de 100%, ou 1, mais eficientemente a planta FV opera. Em situações reais, devido às perdas operacionais, as instalações FV de alto desempenho podem atingir uma PR de até 80% (0,8) (SMA, 2019). 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):

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r} \quad (2.3)$$

O rendimento final, Y_f , também é conhecido como horas de carga total da planta, dependendo, desse modo, da irradiação solar (URREJOLA *et al.*, 2016). Y_f é definido como a razão entre a energia elétrica produzida, E , e a potência da planta FV no STC, $P_{nominal}$. Matematicamente:

$$Y_f = \frac{E}{P_{nominal}} \quad (2.4)$$

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

$$Y_r = \frac{H_T}{G_0} \quad (2.5)$$

O cálculo do PR padrão explicado acima é normalizado por a irradiação solar e o seu valor é menos influenciado pelas condições climáticas, mas ainda apresenta variabilidade climática, como sensibilidade nas mudanças de temperatura ou vento (PAVAN *et al.*, 2011). Para o estudo da influência da sujidade em módulos FV localizados em um determinado local, torna-se essencial remover os efeitos das variáveis climáticas (temperatura e vento) no PR.

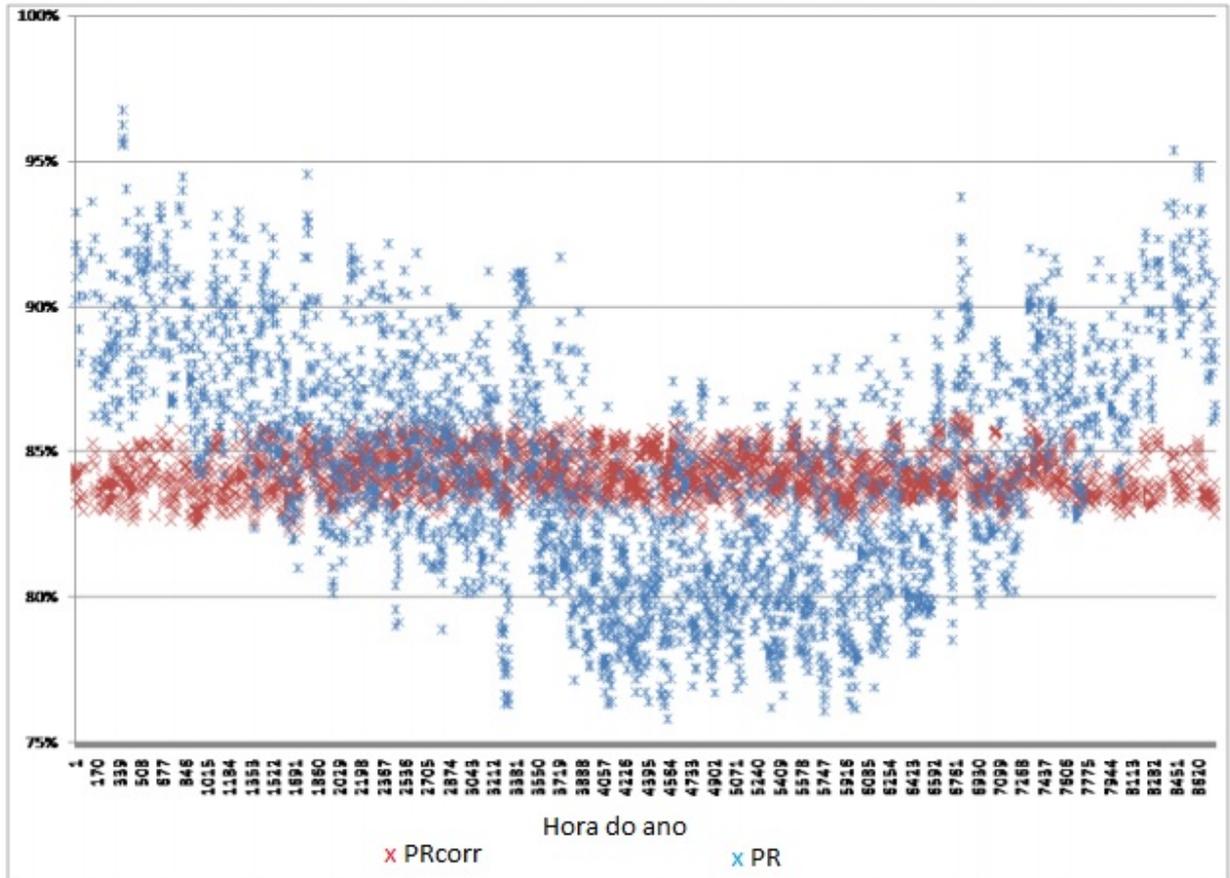
Assim, no intuito de remover os efeitos dessas variáveis, um PR corrigido é introduzido pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL), que reflete um valor sazonal consistente para o PR em um local específico para qualquer tecnologia FV (DIERAUF *et al.*, 2013). Matematicamente, o PR corrigido é apresentado na equação 2.6:

$$PR_{corr} = \frac{E}{P_{nominal} [1 - \gamma * (T_{mod_{avg}} - T_{mod})] * \left(\frac{H_T}{G_0}\right)} \quad (2.6)$$

Onde $T_{mod_{avg}}$ é a temperatura média anual calculada do módulo e T_{mod} é a temperatura real do módulo.

Na Figura 14 é demonstrado a variabilidade dos valores de PR, a partir de uma comparação entre o PR corrigido e o PR padrão, evidenciando que os valores corrigidos de PR são mais atenuados do que os valores de PR padrão.

Figura 14 – Comparação entre o PR corrigido e o PR padrão.



Fonte: Adaptado de Dierauf *et al.* (2013).

3 ESTADO DA ARTE

Neste capítulo, uma revisão bibliográfica é apresentada com o propósito de evidenciar os principais trabalhos realizados sobre os efeitos da sujeira no desempenho de módulos FV em todo o mundo. A revisão é baseada em trabalhos nacionais e internacionais publicados em anais ou em periódicos, além de dissertações e teses.

3.1 Estudos Nacionais

Hickel et al., (2016) retrataram a influência do acúmulo de sujeira nas seguintes tecnologias de módulos FV: Monocristalina (m-Si), Policristalina (p-Si), Silício Amorfo (a-Si) e Cobre-Índio-Gálio-Selênio (CIGS). Os módulos fazem parte de cinco sub-plantas de potência de 2 kWp, cada, instaladas no interior da Bahia, em Brotas de Macaúbas (Figura 15). Na análise, foram comparadas a Potência de Saída (P_{out}) e os valores de PR dos módulos, antes e depois da limpeza. Em relação à potência, os resultados mostraram que, dentre os módulos de silício cristalino, o de p-Si teve perdas 2,50 vezes maiores que o de m-Si, e dentre os módulos de filmes finos, o de maior e menor perdas foi o de a-Si e o de CIGS, respectivamente. Devido à sujeira, a potência do módulos p-Si diminuiu 11,30%, enquanto a potência do módulo m-Si diminuiu 4,50%, por exemplo. Comparando os valores de PR antes e depois da limpeza, foi visto que o módulo teve o maior aumento do desempenho depois da limpeza foi o de p-Si (10,10%), na tecnologia de silício cristalino, e o de a-Si (4,30%), na tecnologia de filmes finos.

Figura 15 – Sujidade em módulos FV (da esquerda para a direita, CIGS, a-Si, a-Si, p-Si e m-Si).



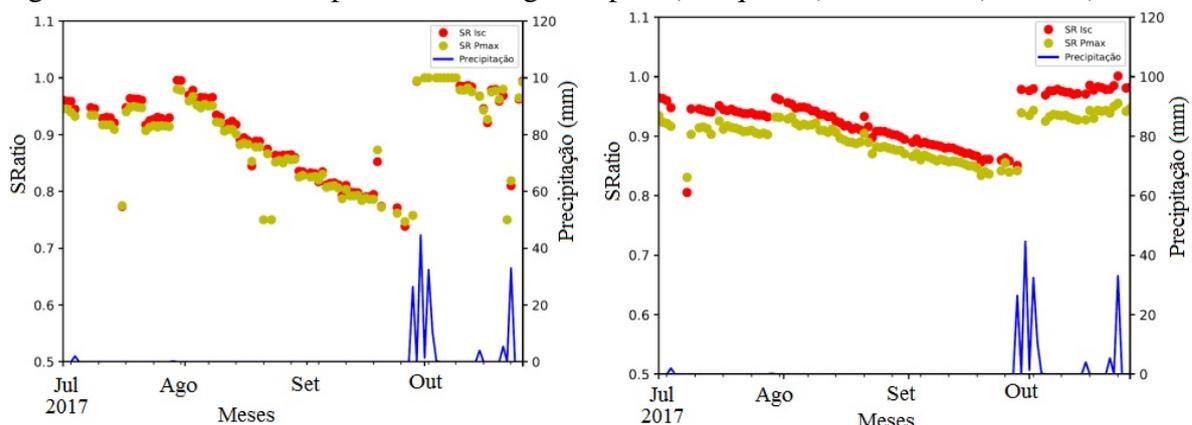
Fonte: Adaptado de Hickel *et al.* (2016).

Barbosa *et al.* (2018) mostraram as diferenças entre a produção de eletricidade em módulos FV limpos e sujos conectados à rede elétrica do Centro Universitário de Patos de Minas, em Patos de Minas, Minas Gerais. A planta FV é composta por 240 módulos p-Si, divididos

em três *strings* de 80 módulos, cada uma conectada a um inversor, com potência instalada de 12 kWp. No experimento, a *string* 3 foi limpa regularmente a cada 7 dias, e as *strings* 1 e 2 foram mantidas sujas. No mês anterior à limpeza, a geração total da planta foi de 1.639,22 kWh, sendo, 548,14 kWh no inversor 1, 546,66 kWh no inversor 2 e 547,42 kWh no inversor 3, ou seja, praticamente, se obteve a mesma geração nas três *strings*. No mês em que houve a limpeza dos módulos na *string* 3, a geração total foi de 1.834,62 kWh, sendo, 594,8 kWh no inversor 1, 592,13 kWh no inversor 2 e 647,69 kWh no inversor 3. Assim, depois da limpeza, a *string* 3 teve um aumento de produção de eletricidade de 10,26%.

Costa *et al.* (2019) quantificaram e avaliaram as perdas por sujidade em módulos de Telureto de Cádmio (CdTe) e p-Si instalados na PUC Minas, em Belo Horizonte, Minas Gerais. O estudo durou 122 dias e foram utilizados dois módulos idênticos de CdTe de 110 Wp, um módulo de p-Si de 25 Wp e uma célula de referência de 0,06 Wp. Para comparação, um dos módulos de CdTe e a célula de referência foram diariamente limpos, enquanto os outros dois foram expostos à deposição de sujidade natural. Para avaliação do impacto da sujidade no desempenho dos módulos FV, os valores de SRatio foram calculados para um período seco e para um chuvoso. SRatio decresceu ao longo do período seco, e atingiu valores em torno de 0,86 para o módulo de p-Si e de 0,75 para o de CdTe, aumentando para 1 após precipitações, como mostrado na Figura 16. Logo, a perda por sujidade durante o período seco foi maior para a tecnologia CdTe, que pode ser explicado pela diferença de largura da banda das duas tecnologias.

Figura 16 – SRatio diária para as tecnologia de p-Si (à esquerda) e de CdTe (à direita).



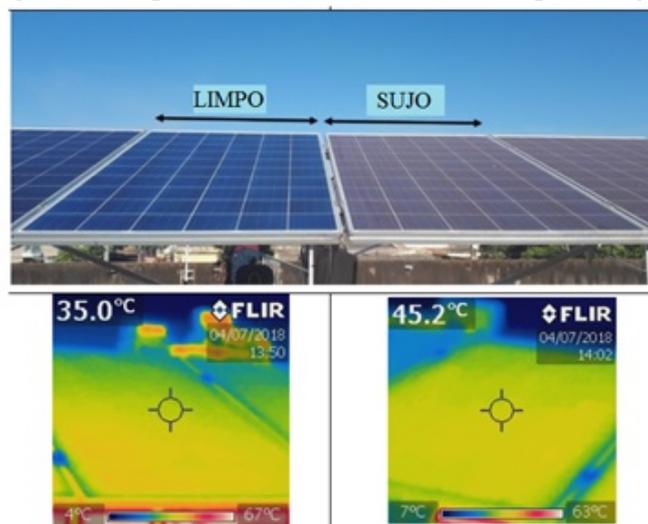
Fonte: Adaptado de Costa *et al.* (2019).

Fraga *et al.* (2018) avaliaram o impacto da sujidade na planta FV instalada no estádio de futebol Governador Magalhães Pinto (Mineirão) em Belo Horizonte, Minas Gerais. A planta

é composta por 5910 módulos FV m-Si totalizando uma potência instalada de 1,42 MWp. Os módulos são divididos em 88 setores, dos quais 42 setores tem 75 módulos e os outros 46 tem 60. Cada setor é dividido em três conjuntos: A, B e C. A análise do impacto da sujidade durou 43 dias e dois conjuntos foram escolhidos, A e B, em regiões opostas no estádio e dois setores desses conjuntos foram limpos manualmente a cada cinco dias, para servirem como módulos de referência. Os eventos de limpeza ocorreram no 23º dia de estudo, por uma chuva de 7 mm, e no 30º, a partir de uma limpeza manual em alguns módulos. Separadamente, os grupos A e B foram analisados e foi visto que a sujidade reduziu a potência de pico em aproximadamente 13,70% no período seco e 6,50% no período chuvoso, e também reduziu a produção diária de eletricidade em aproximadamente 16,5% no período seco e 8% no período chuvoso. O tamanho médio das partículas de sujidade dos Grupos A e B foi de 35,30 e 28,70 μm , respectivamente.

Silva *et al.* (2019) avaliaram o impacto da sujidade em módulos FV instalados na Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais. O estudo durou seis dias e foram utilizados 16 módulos com potência total de 4,08 kWp. Antes do início dos testes, 8 dos módulos foram limpos, enquanto os outros foram deixados sujos. Para análise, foram utilizados dados de eletricidade gerada e imagens térmicas dos módulos. Comparando a geração de eletricidade dos módulos, é visto que os módulos limpos geraram 26,60 kWp a mais do que os sujos. Além disso, em termos de temperatura na superfície FV, a imagem térmica indicou um aumento na temperatura de cerca de 10°C no módulo sujo. Na Figura 17 é mostrado a diferença de temperatura entre os módulos limpos e sujos.

Figura 17 – Comparação da temperatura entre os módulos limpos e sujos.



Fonte: Adaptado de Silva *et al.* (2019).

3.2 Estudos Internacionais

Goossens e Kerschaefer (1999) realizaram experimentos em um túnel de vento e poeira para investigar o efeito desses dois parâmetros no desempenho de uma célula FV p-Si, em Lovaina, Bélgica. A poeira utilizada consistiu de 95% de silte e de 5% de argila, e o tamanho das partículas variou entre $2 \mu\text{m}$ e $63 \mu\text{m}$. Quatro condições de vento, variando entre 0,63 m/s e 2,59 m/s, foram selecionadas. A célula FV utilizada possui uma corrente de curto-circuito de 1138 mA para uma irradiância de 773 W/m^2 . A célula foi colocada na posição horizontal dentro do túnel e os experimentos duraram cerca de 20 minutos, sendo regularmente interrompidos para medição da quantidade de poeira acumulada e determinação da curva IxV da célula. Os resultados mostraram que quanto maior a velocidade do vento, maior é a deposição de sujeira e menor o desempenho da célula FV. É visto que o fator de forma¹ da curva varia entre 0,53 e 0,62, para uma densidade de deposição de sujeira de 23 mg/cm^2 e 0 mg/cm^2 , respectivamente.

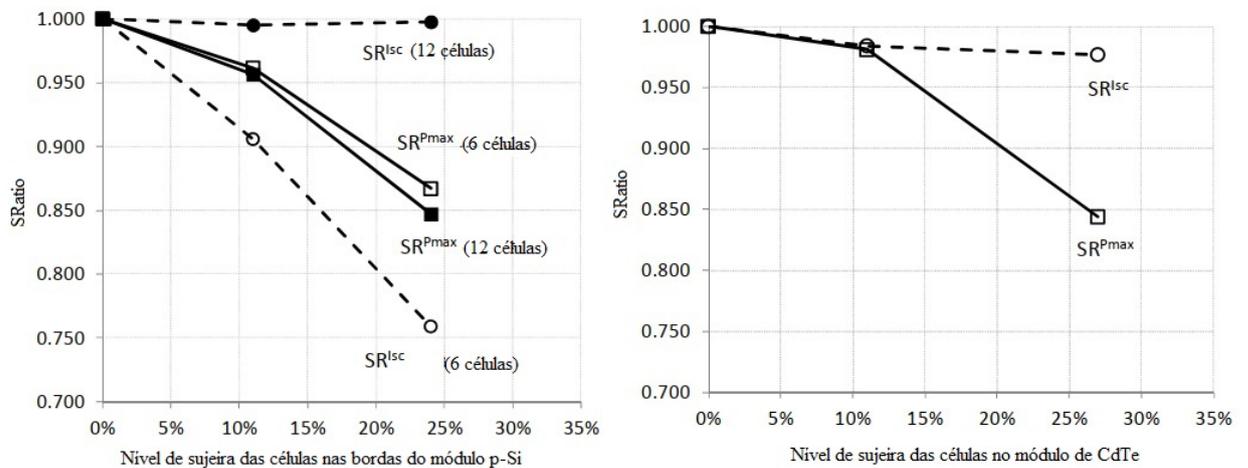
Jiang *et al.* (2011) realizaram um experimento, sob condições controladas, para investigar a perda de eficiência causada pela sujeira em 3 módulos de diferentes tecnologias (m-Si, p-Si e a-Si) em Hong Kong, China. Foram utilizados: uma câmara de teste, simulador solar, gerador de sujeira e um sistema de medição. O tamanho das partículas de sujeira gerada variou entre $1 \mu\text{m}$ e $100 \mu\text{m}$ e os principais elementos químicos foram: silício, alumínio e oxigênio. Apesar da tendência de redução de eficiência dos três módulos serem semelhantes, o módulo de p-Si foi o que mais acumulou sujeira. E ainda, para uma densidade de deposição de poeira de 22 g/m^2 , uma redução de eficiência (η) dos módulos de 26% e de I_{sc} de 22% foi detectada.

Gostein *et al.* (2013) examinaram a diferença entre os valores de SRatio sob condições de sujeira não uniforme, calculadas por valores de corrente de curto-circuito e de potência máxima. Foram utilizados: um módulo p-Si, com 72 células FV, e um módulo de CdTe, com 154 células FV. Para simulação de diferentes níveis de sujeira, filtros foram aplicados sobre a superfície dos módulos FV: uma folha de plástico transparente foi usada para simular um nível moderado de sujeira por volta de 11%; e uma folha de espuma porosa para simular um nível de sujeira pesado de 24-27%. Curvas I-V dos módulos foram medidas antes e depois da aplicação dos filtros, em dias claros, com irradiância em torno de 1000 W/m^2 e temperatura dos módulos entre 35°C e 55°C . No módulo p-Si, o efeito da sujeira ao longo da borda curta (6 células

¹ Fator de Forma: grandeza que expressa o quanto a curva característica IV se aproxima de um retângulo. Quanto melhor a qualidade das células no módulo, mais próxima da forma retangular será a curva IxV.

cobertas) e da longa (12 células cobertas) foi examinado, em que dependendo de quais células foram sujas, o valor de $SRatio_{I_{sc}}$ superestima ou subestima a perda real de potência devido à sujidade. No módulo de CdTe, quando 20 células foram sombreadas, a métrica $SRatio_{I_{sc}}$ é subestimada, como acontece no módulo p-Si, porém a discrepância é significativa apenas quando a sujidade excede o limiar de 11%, como pode ser visto na Figura 18. Além disso, quando 12 células p-Si e 20 células de CdTe são cobertas pelo filtro correspondente a um nível de sujidade de 24% e 27%, respectivamente, houve uma perda de potência correspondente a 15% para os dois casos.

Figura 18 – $SRatio$ medidos na simulação de sujidade no experimento de Gostein *et al.* (2013).



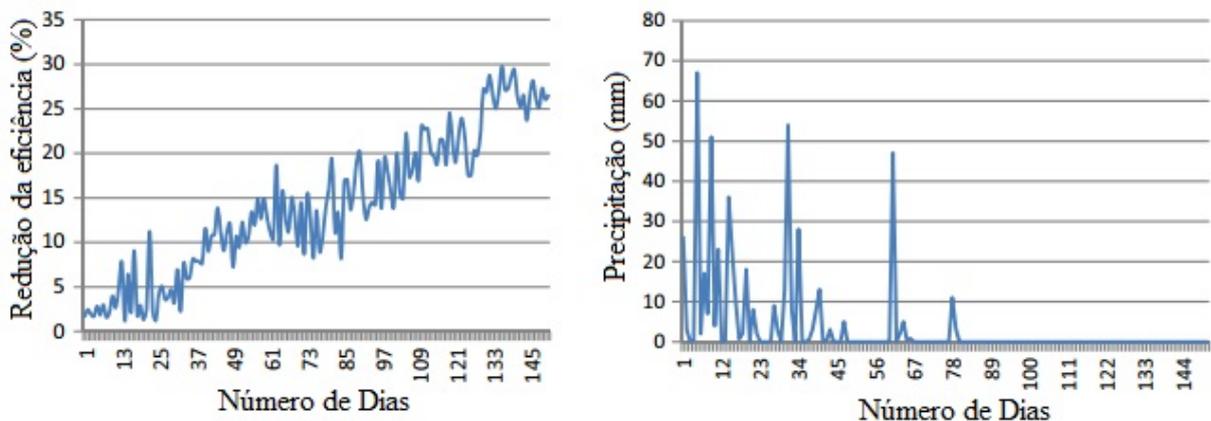
Fonte: Adaptado de Gostein *et al.* (2013).

Chaichan *et al.* (2015) determinaram a influência da poluição do ar em três módulos de 110 W, cada, alocados no telhado da Universidade de Tecnologia de Bagdá, Iraque, que fica próximo a uma rodovia de alta densidade de tráfego. Durante o experimento, que durou 90 dias, um módulo foi limpo somente por chuva e vento, o outro por álcool a cada sete dias e o terceiro foi deixado para acumular sujeira. Os resultados indicaram que a tensão de circuito aberto e a corrente de curto-circuito do módulo sujo diminuiu muito em comparação com o módulo limpo a cada sete dias, resultando em uma perda de eficiência de 63,70%. Analisando o módulo naturalmente limpo, foi visto que seu desempenho melhorou depois de uma chuva, tendo uma perda de eficiência de 32,98% quando comparado com o módulo normalmente limpo. As inspeções de poluentes coletadas mostraram altas taxas de partículas de hidrocarbonetos, resultantes dos escapamentos dos carros.

Paudyal e Shakya (2016) investigaram a sujidade em módulos posicionados no

Instituto de Engenharia da Universidade de Tribhuvan, em Lalitpur, Nepal, durante 150 dias. Foram utilizados dois módulos FV p-Si de 40 W cada, sendo um módulo limpo diariamente, enquanto o outro não. Como resultado, inicialmente houve a mesma quantidade de energia elétrica gerada, mas à medida que os dias passaram e não houve chuva, uma considerável diferença da potência de saída entre o módulo limpo e sujo foi observada, como pode ser visto na Figura 19. No final do experimento a redução da eficiência entre o módulo limpo e o sujo foi de cerca de 29,76%. Além disso, a densidade do depósito de poeira no módulo FV representou uma variação entre $0,11 \text{ g/m}^2$ e $9,67 \text{ g/m}^2$.

Figura 19 – Redução da eficiência e as precipitações registradas durante o experimento.



Fonte: Adaptado de Paudyal e Shakya (2016).

Menoufi *et al.* (2017) apresentaram um estudo em módulos posicionados no telhado do Laboratório de Energias Renováveis da Faculdade de Pós-Graduação em Ciências Avançadas da Universidade Beni-Suef, em Beni-Suef, Egito. No experimento, dois módulos FV p-Si de 10 Wp, cada, foram expostos ao ambiente externo por 90 dias. Os módulos FV foram colocados em um ângulo de inclinação de 0° sendo um limpo diariamente e o outro deixado para acumulação natural de poeira. A densidade de sujidade encontrada no módulo foi de aproximadamente $0,26 \text{ g/cm}^2$, com o tamanho da partícula variando entre $3,50$ a $30 \mu\text{m}$. Avaliando a curva I-V dos módulos, foi verificada a redução média de V_{oc} em 39%, de I_{sc} em 45% e de P_{out} em 65% no módulo sujo.

Conceição *et al.* (2018) avaliaram o impacto do transporte de poeira do Saara em dois locais da zona rural de Portugal, em Évora e Alter do Chão. Para isso foram instalados vidros de alta transmitância em cada local e a sujidade encontrada, logo após os eventos de transporte de poeira do Saara para Portugal, foi analisada. A sujidade em Alter do Chão se apresentou de forma

aglomerada, sendo composta, principalmente, por alumínio, silício e oxigênio, característicos em áreas desérticas, e a densidade de sujeira na superfície FV foi de 402 mg/m². Já em Évora, as partículas de sujeira se apresentaram espalhadas, os principais componentes encontrados foram silício e cálcio, da areia do deserto e do mineral calcita, e a densidade de sujeira foi de 1067 mg/m². Analisando o impacto da sujeira no desempenho módulos, a maior queda de P_{out} e de I_{sc} foi em Évora, 8% e 3%, respectivamente.

Gostein *et al.* (2018) examinaram dados de irradiância e precipitação entre julho de 2013 e dezembro de 2016 de plantas FV em oito locais de duas regiões da Califórnia, nos Estados Unidos da América, afim de elucidar as tendências nas variações locais e regionais da sujeira. Na Tabela 3 são listados os oito locais usados como fontes de dados, sendo que as regiões 1 e 2 estão localizadas, respectivamente, no sul e no centro da Califórnia, e são separadas por aproximadamente 600 km. As distâncias listadas são medidas no primeiro local listado para cada região e arredondadas para os 10 km mais próximos. Além disso, o “tipo de terreno” indica a natureza do terreno ao redor do local em estudo.

Tabela 3 – Características dos locais estudados.

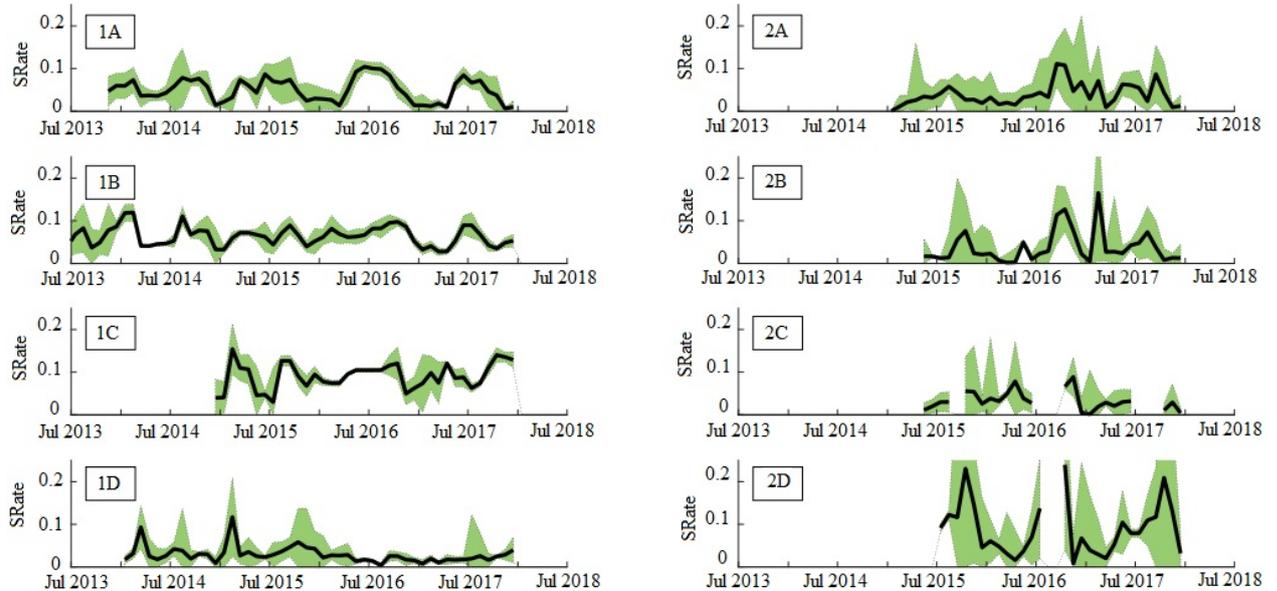
| Região | Local | Tipo de Terreno | Distância (km) |
|--------|-------|-----------------|----------------|
| 1 | 1A | Agrícola | 0 |
| | 1B | Agrícola | 10 |
| | 1C | Agrícola | 50 |
| | 1D | Deserto | 120 |
| 2 | 2A | Árido | 0 |
| | 2B | Agrícola | 30 |
| | 2C | Agrícola | 30 |
| | 2D | Agrícola | 150 |

Fonte: Adaptado de Gostein *et al.* (2018).

O método proposto em Deceglie *et al.* (2016) foi aplicado para o cálculo de SRate e na Figura 20 são mostradas os valores de SRate e os respectivos intervalos de confiança, obtidas a partir de simulações de Monte Carlo, para cada um dos locais estudado. Na região 1, os locais 1A e 1B, separados por 10 km, apresentaram uma forte tendência sazonal nos valores de SRate, com um pico de cerca de 0,10%/dia nos meses de verão e em torno de 0 no inverno, que pode estar relacionado à atividade agrícola na região. Nos locais 1C e 1D, que estão a 50 km e 120 km do local 1A, respectivamente, padrões diferentes nos valores de SRate foram encontrados. Na região 2, os locais 2A e 2B, separados por 10 km, valores de SRate em torno de 0,15%/dia no final do verão foram encontrados. O padrão das taxas na região 2 muda à medida que o local se distancia

do local 2A. Logo, os valores de SRate estiveram correlacionados em locais distantes em até 50 km um do outro, porém locais com distâncias maiores uma correlação significativamente foi encontrada.

Figura 20 – SRate para os 8 locais em %/dia (preto) e suas faixas de intervalo de confiança (verde).



Fonte: Adaptado de Gostein *et al.* (2018).

Gholami *et al.* (2018) realizaram um experimento em uma planta FV da Universidade Shahid Beheshti, em Teerã, Irã, que contém 57 módulos do tipo m-Si, divididos em três *strings*, com potência instalada de 14,50 kWp. No fim de cada semana do experimento, que durou 70 dias, os autores mediram a densidade média da sujidade nas superfícies dos módulos e observaram que após 70 dias sem chover, embora o nível de sujidade na superfície FV, a taxa de deposição não foi constante, sendo de forma mais rápida nas primeiras semanas do experimento. A densidade da sujeira acumulada variou de 0 g/m² a 6,10 g/m², resultando em uma redução na potência de saída de 21,47%.

Ferrada *et al.* (2019) caracterizaram as propriedades químicas e físicas de sujidades depositadas em módulos FV de quatro locais no Deserto de Atacama, no Chile. Os locais são separados 100 km um do outro e são denominados como L1 (localização mais ao norte), L2 (zona industrial), L3 (costa) e L4 (localização mais ao sul), sendo que L1, L2 e L4 possuem clima árido e L3 clima hiperárido. A caracterização da sujidade foi realizada a partir de amostras do solo e da superfície FV. Em L1 e L2, as partículas de tamanho entre 1 μm e 10 μm foram

mais comumente encontradas no solo do que nos módulos, sendo em L2, por exemplo, 75% e 56% a concentração dessas partículas no solo e no módulo, respectivamente; em L3 e L4, o comportamento foi diferente, a concentração de partículas de tamanho entre 1 e 10 μm foi maior no módulo, sendo em L4, por exemplo, 76% e 60% a concentração dessas partículas no solo e no módulo, por exemplo. Na composição química: os principais elementos comuns a todas as localizações foram oxigênio e silício, mas também havia cálcio, sódio e cloro; os minerais comuns foram albita, anortita, quartzo e ortoclásio, mas também havia outros específicos do local, como mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 – Minerais presentes nas amostras de sujidade coletadas da superfície do módulo (M) e do solo (S) nas localizações L1 – L4.

| Mineral | L1-M | L1-S | L2-M | L2-S | L3-M | L3-S | L4-M | L4-S |
|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Albita | X | X | X | X | X | X | X | X |
| Anortita | X | X | X | X | X | X | X | X |
| Calcita | | | | | X | X | | |
| Cristobalita | X | X | | | X | X | | |
| Gipsita | | | X | X | | | | |
| Halita | | | X | X | X | X | | |
| Quartzo | X | X | X | X | X | X | X | X |
| Muscovita | X | X | X | X | | | | |
| Ortoclásio | X | X | X | X | X | X | X | X |

Fonte: Adaptado de Ferrada *et al.* (2019).

Hammoud *et al.* (2019) apresentaram um estudo sobre os benefícios de limpezas periódicas em uma planta FV de 307,52 kWp, composta de 992 módulos m-Si, em Zahrani, Líbano. A limpeza foi realizada a cada 14 dias, começando em 15/06/2018 e terminando em 21/09/2018, por meio de um dispositivo robótico projetado para limpeza. A metodologia empregada foi comparar a produção de eletricidade diária gerada durante o período de teste, em 2018, com aquela produzida durante o mesmo período sem limpeza, em 2017. Aplicando a limpeza de forma periódica, um aumento de 32,27% na produção de eletricidade foi obtida.

Mostefaoui *et al.* (2019) investigaram os efeitos negativos do acúmulo de poeira, causado por tempestades de areia, no desempenho de módulos FV em Adrar, Argélia. O experimento, que durou 180 dias, foi dividido em duas partes e quatro módulos m-Si de 100 W foram utilizados. Na primeira parte, para medir a densidade de deposição de sujidade na superfície dos módulos FV, um dos módulos foi utilizado para coleta da sujidade. No final dos 180 dias, foi constatado uma densidade de sujidade de 4,85 g/m^2 . Na segunda parte, a medição dos parâmetros elétricos dos outros três módulos, que ficaram expostos por 180 foi realizada.

Para comparação, a medição foi realizada antes e depois do período de exposição. Os resultados mostraram que a diferença entre P_{out} , I_{sc} e a eficiência (η) dos módulos, limpos e sujos, variou entre 31% e 29%, 26% e 24%, e 32% e 29%, respectivamente. Na Figura 21 é mostrado como a coleta da sujeira foi realizada no módulo FV.

Figura 21 – Coleta da sujeira do módulo FV.



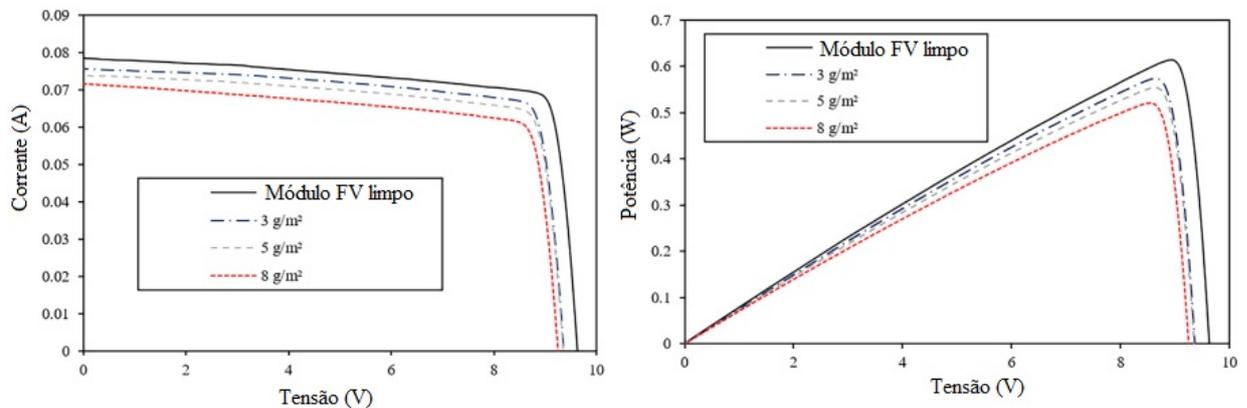
Fonte: Adaptado de Mostefaoui *et al.* (2019).

Hachicha *et al.* (2019) investigaram a sujeira e seus efeitos em módulos FV instalados em Sharjah, nos Emirados Árabes Unidos, dividindo o estudo, que durou 165 dias, em três partes. A primeira parte foi realizada em laboratório, utilizando um simulador de sol, um módulo p-Si de 5 W e amostras de sujeira coletadas do ambiente externo. Amostras de sujeira de 3 g/m², 5 g/m² e 8 g/m² foram homogeneamente espalhadas na superfície FV, uma de cada vez. Curvas I-V e P-V do módulo FV foram traçadas antes e depois das amostras de sujeira serem espalhadas. Uma relação linear entre a potência FV normalizada e o acúmulo de sujeira na superfície FV foi encontrada, tendo relação de queda de 1,70% por g/m². Além disso, ao aumentar a densidade de sujeira de 0 para 8 g/m², a corrente de curto circuito é mais afetada do que a tensão de circuito aberto, como pode ser visto na Figura 22.

Na segunda parte, experimentos em condições externas foram conduzidos, entre 11/01/2018 e 05/07/2018, em 3 módulos p-Si de 5 W com diferentes ângulos de inclinação (0°, 25° e 45°). Para comparação de eficiência, um módulo limpo de mesma inclinação foi colocado

ao lado do módulo sujo. Após 2 semanas de exposição ao ar livre, a queda na eficiência foi de 37,63%, 14,11% e 10,95% para os módulos inclinados em 0° , 25° e 45° , respectivamente. Após 5 meses de exposição, a perda de potência do módulo devido à sujidade aumentou de 0,29% para 12,70%, e a densidade de sujidade de 0 g/m^2 para $5,44 \text{ g/m}^2$. Na última parte do experimento, a caracterização da sujidade foi realizada, sendo observado partículas de sujidade com tamanhos entre $1,61$ e $38,40 \mu\text{m}$ de diâmetro, sendo 95% das partículas com tamanho menor do que $25 \mu\text{m}$ de diâmetro. Os principais elementos encontrados nas partículas de sujidade foram: oxigênio, carbono, cálcio e silício; e os principais minerais: o dióxido de silício, óxido de cálcio e óxido de ferro.

Figura 22 – Curvas I-V (esquerda) e P-V (direita) dos módulos limpos e sujos com diferentes acúmulos de sujeira.

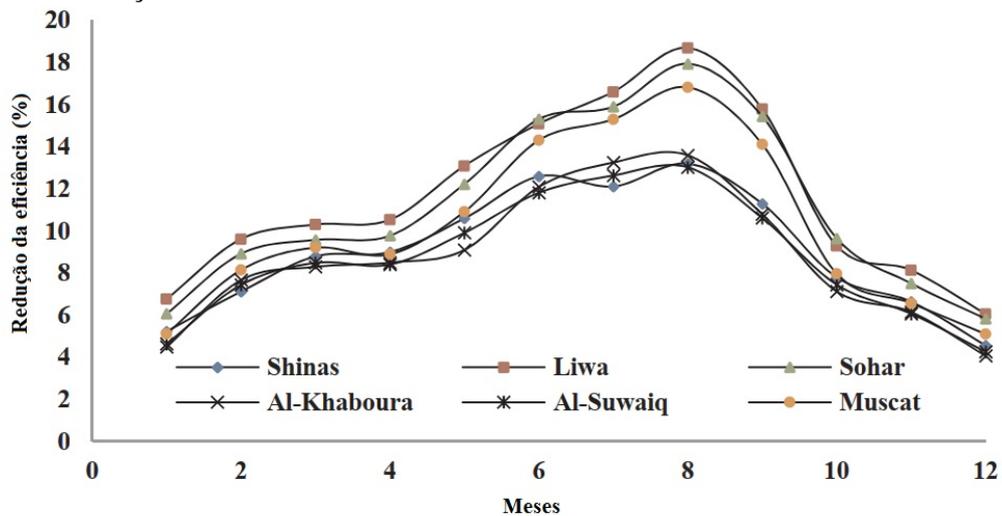


Fonte: Adaptado de Hachicha *et al.* (2019).

Kazem e Chaichan (2019) estudaram os efeitos de diferentes tipos de sujidade no desempenho de módulos FV instalados em seis cidades, Shinas, Liwa, Sohar, Al-Khabourah, Al-Suwaiq e Muscat, da região Norte de Omã. Dois módulos FV m-Si de 125 Wp foram instalados em cada cidade, sendo que para efeito de comparação, um módulo foi diariamente limpo e outro só foi limpo no final do mês. O estudo durou 12 meses e métodos de limpeza diferentes foram utilizados no final de cada mês do estudo. As maiores quantidades de acúmulo de sujeira foram registradas nas cidades de Liwa e Sohar, devido à proximidade com a zona industrial, e as menores quantidades foram em Al-Khabourah e Al-Suwaiq, devido serem cidades residências. Os principais compostos químicos da composição da sujidade foram: dióxido de silício e óxido de cálcio, porém em cidades industriais, com Liwa e Sohar, elevada concentração de poluentes foi observada. Em relação ao desempenho dos módulos FV, o maior declínio

na produção de eletricidade foi em Liwa (18%), seguido por Sohar, e o menor declínio em Al-Suwaiq Muscat e Al-Khabourah (5,50%), como mostrado na Figura 23. A partir da análise dos métodos de limpeza, em cidades residenciais, como Al-Khaburah, por exemplo, concluiu-se que a limpeza utilizando somente água foi suficiente e apresentou resultados positivos, porém em cidades industriais, como Liwa, por exemplo, o uso de uma solução de sódio foi a melhor opção de limpeza dos módulos.

Figura 23 – Redução da eficiência dos módulos nas cidades estudadas.



Fonte: Adaptado de Kazem e Chaichan (2019).

Zitouni *et al.* (2019) avaliaram o desempenho de um planta FV de 16,50 kWp, localizada em Ben Guerir, Marrocos, durante o período seco e o chuvoso. A planta é composta por três strings de 23 módulos, cada, mas somente duas das strings foram utilizadas, sendo uma limpa duas vezes na semana e a outra deixada suja durante todo o período de estudo, que durou 180 dias. A análise do desempenho foi realizada por meio da diferença entre a eletricidade produzida dos módulos limpos e sujos, e por meio da SRatio. A diferença de eletricidade produzida atingiu um valor máximo de 16%, no período seco, e 2%, no período chuvoso. Já SRatio atingiu valores próximos de 1,00 no período chuvoso, enquanto no período seco, atingiu valores próximos de 0,84, após 30 dias sem chuva. Na caracterização da sujidade, os principais elementos encontrados foram: oxigênio, silício, cálcio e ferro.

3.3 Visão Geral do Estado da Arte

Na Tabela 5 são resumidos os principais resultados dos trabalhos da revisão bibliográfica realizada. A tabela é dividida em: referência, localização do estudo e principais resultados.

Tabela 5 – Principais resultados dos trabalhos analisados.

| Referência | Localização | Principais Resultados |
|--------------------------------|---------------------------------|---|
| Goossens e Kerschaever (1999) | Lovaina, Bélgica | Diminuição de 0,62 para 0,53 do <i>fill factor</i> do módulo FV quando a densidade de sujidade na superfície FV aumentou de 0 para 23 mg/m ² |
| Jiang <i>et al.</i> (2011) | Hong Kong, China | Redução de 26% de η e de 22% de I_{sc} do módulo p-Si para uma densidade de sujidade na superfície FV de 22 g/m ² |
| Gostein <i>et al.</i> (2013) | ND | Redução de 15% de P_{out} , quando um nível de sujidade elevado foi simulado |
| Chaichan <i>et al.</i> (2015) | Bagdá, Iraque | Comparando o desempenho do módulo limpo a cada sete dias com o que foi deixado exposto ao ambiente, uma perda de η de 63,70% foi encontrada. Analisando o módulo que foi naturalmente limpo com o que foi limpo a cada sete dias, uma perda de η de 32,98% foi encontrada |
| Hickel <i>et al.</i> (2016) | Bahia, Brasil | Entre os módulos de silício cristalino, o de p-Si apresentou perdas de potência 2,50 vezes maiores que o de m-Si, e dentre os módulos de filmes finos, as maiores perdas foram no de a-Si |
| Paudyal e Shakya (2016) | Lalitpur, Nepal | Redução de 29,76% de η |
| Menoufi <i>et al.</i> (2017) | Beni-Suef, Egito | Redução de 65% de P_{out} |
| Barbosa <i>et al.</i> (2018) | Minas Gerais, Brasil | Aumento de 10,26% na produção de eletricidade quando a limpeza periódica foi aplicada |
| Conceição <i>et al.</i> (2018) | Évora e Alter do Chão, Portugal | Redução de 8% de P_{out} e de 3% de I_{sc} do módulo localizado em Évora |
| Costa <i>et al.</i> (2019) | Minas Gerais, Brasil | No período seco, SRatio atingiu valores em torno de 0,86 para o módulo p-Si e em torno de 0,75 para o módulo CdTe |
| Fraga <i>et al.</i> (2018) | Minas Gerais, Brasil | Redução de P_{out} em torno de 13,70% no período seco e em torno de 6,50% no período chuvoso. Redução da produção diária de eletricidade em aproximadamente 16,50% no período seco e 8% no período chuvoso. |
| Gholami <i>et al.</i> (2018) | Teerã, Irã | Redução de 21,47% de P_{out} quando a densidade da sujeira acumulada atingiu 6,10 g/m ² |

| Referência | Localização | Principais Resultados |
|---------------------------------|-------------------------------------|---|
| Gostein <i>et al.</i> (2018) | Califórnia, Estados Unidos | Valores de SRate correlacionados em locais distantes em até 50 km um do outro |
| Ferrada <i>et al.</i> (2019) | Deserto de Atacama, Chile | Os minerais mais encontrados foram: albita, anortita, quartzo e ortoclásio |
| Hammoud <i>et al.</i> (2019) | Zahrani, Líbano | Aumento de 32,27% da produção de eletricidade quando a limpeza periódica foi aplicada |
| Mostefaoui <i>et al.</i> (2019) | Adrar, Argélia | Redução entre 29% e 31% de P_{out} e entre 29% e 32% de η |
| Hachicha <i>et al.</i> (2019) | Sharjah, Emirados Árabes Unidos | Redução de 12,70% de P_{out} para uma densidade de sujidade na superfície FV de 5,44 g/m ² |
| Kazem e Chai- chan (2019) | Seis cidades da região Norte de Omã | A maior redução na produção de eletricidade foi encontrada em cidades industriais (18%) e a menor redução em cidades residenciais (5,50%) |
| Silva <i>et al.</i> (2019) | Minas Gerais, Brasil | Redução de 26,60 kWp da eletricidade gerada e aumento em torno de 10° C da temperatura do módulo |
| Zitouni <i>et al.</i> (2019) | Ben Guerir, Marrocos | A diferença de eletricidade produzida atingiu um valor máximo de 16%, no período seco, e 2%, no período chuvoso. |

4 METODOLOGIA

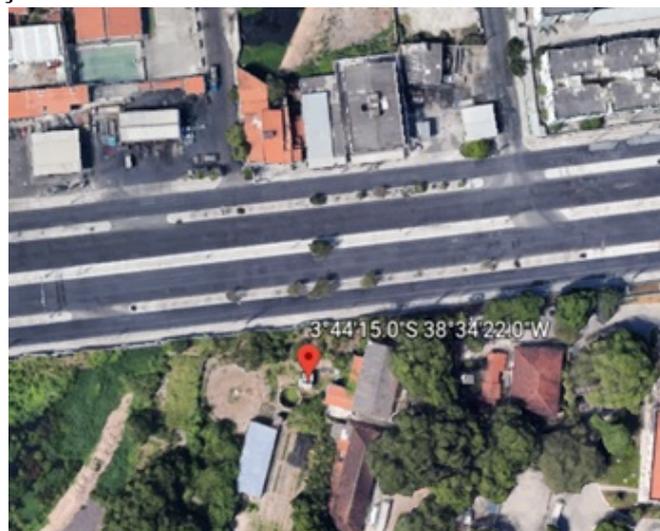
Na presente dissertação, a avaliação dos efeitos da sujidade no desempenho de duas plantas FV é realizada a partir das métricas: SRatio e PR. Para o cálculo dessas métricas, dados de irradiância solar, temperatura do módulo e de precipitação do local em que as plantas FV estão instaladas são necessários, além de dados da potência de saída e da energia elétrica produzida pelas plantas FV.

Logo, o objetivo deste capítulo é descrever a metodologia utilizada na presente dissertação, apresentando o local em que as plantas FV estão instaladas, as características elétricas das plantas, o sistema de aquisição de dados, assim como as etapas realizadas para extração das métricas de avaliação do desempenho FV sob condições de sujidade.

4.1 Local do Estudo

O estudo foi realizado no 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 24. As coordenadas *Universal Transversa de Mercator* (UTM) do laboratório são: latitude 3° 44' 15" S e longitude 38° 34' 22" W.

Figura 24 – Localização do LEA-UFC.

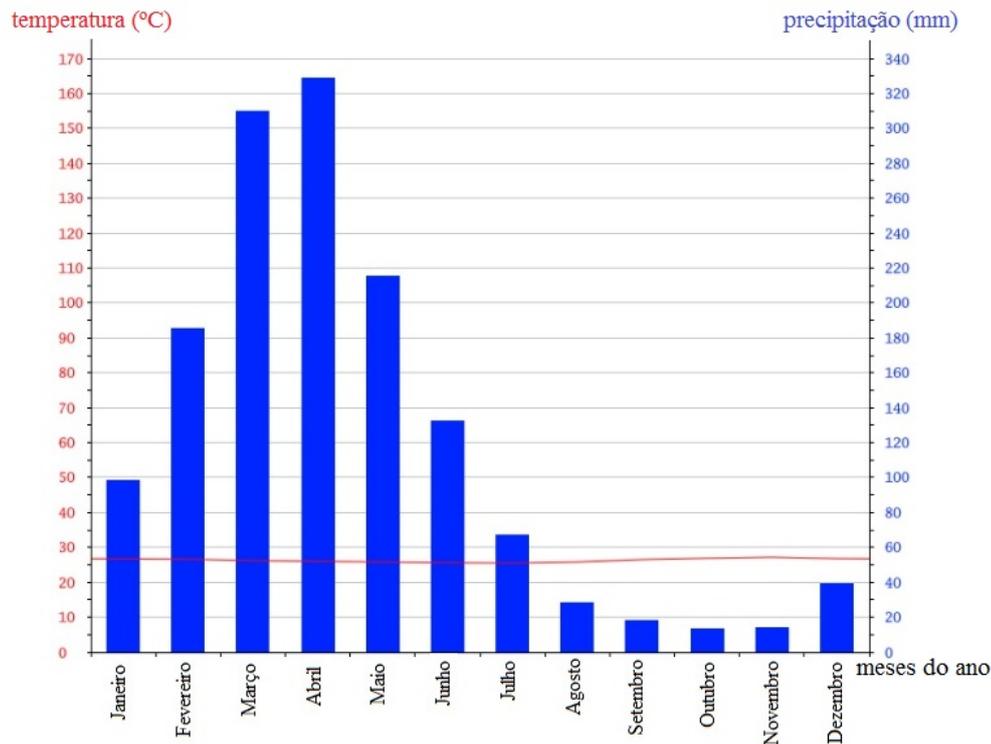


Fonte: Google (2019).

O clima característico da cidade de Fortaleza é tropical com estação seca, cujas

características são temperaturas médias mensais acima de 18 °C em todos os meses do ano e estação seca bem pronunciada (KÖPPEN; GEIGER, 1928). Em Fortaleza, a temperatura média anual é de 26,30 °C e a pluviosidade média anual é de 1448 mm, sendo os meses mais secos os de setembro, outubro e novembro, como mostrado na Figura 25.

Figura 25 – Temperatura média mensal e acúmulo mensal de precipitação em Fortaleza-CE.



Fonte: Climate-Data (2019).

Como a sujidade nos módulos FV é associada às características climáticas do local de instalação da planta FV, sendo setembro, outubro e novembro os meses mais secos do ano em Fortaleza, espera-se que o acúmulo de sujeira na superfície FV seja maior nesses meses do que nos outros, ocasionando, desse modo, um desempenho FV relativamente menor.

4.2 Plantas FV

A avaliação dos impactos da sujidade no desempenho FV é realizada a partir de dados de duas plantas FV interligadas à rede elétrica da UFC e que estão instaladas no LEA. A planta FV 1 analisada foi instalada em julho de 2016, possui potência instalada de 1,50 kWp, está orientada para o norte geográfico e possui ângulo de inclinação de 10° (indicado para Fortaleza).

Essa planta é constituída por seis módulos FV p-Si de 250 Wp, cada, que estão

conectados em série. Na Figura 26 é mostrada a planta FV 1 e na Tabela 6 são apresentadas as principais características do módulo da planta.

Figura 26 – Planta FV 1 analisada.



Tabela 6 – Principais características do módulo FV da planta 1.

| | |
|--|----------------|
| Fabricante | Yingli Solar |
| Modelo | YL250P-29b |
| Potência no MPP (P_{max}) | 250 Wp |
| Tensão no MPP (V_{max}) | 29,80 V |
| Corrente no MPP (I_{max}) | 9,39 A |
| Tensão de Circuito Aberto (V_{oc}) | 37,90 V |
| Corrente de Curto Circuito (I_{sc}) | 8,92 A |
| Eficiência (η) | 15,40 % |
| Coefficiente de Temperatura para Potência (γ) | -0,42 %/°C |
| Dimensões | 1650x990x35 mm |

Fonte: YingliSolar (2008).

A planta FV 1 é conectada ao inversor PHB1500-SS, da empresa PHB Eletrônica, que possui potência máxima de saída de 1950 W, tensão máxima CC e CA de 450 e 200 V, respectivamente, e corrente CC e CA máxima de 10 e 7,50 A, respectivamente. Para proteção da planta contra surtos provenientes da rede elétrica, a saída do inversor é ligada a fusíveis e dispositivos de proteção contra surtos.

Já a planta FV 2 analisada foi instalada em setembro de 2018, possui potência instalada de 3,90 kWp, também está orientada para o norte geográfico e possui inclinação de 10°. Essa planta é composta por 12 módulos FV p-Si de 330 Wp, cada, divididos em duas *strings* de

seis módulos, cada *string*. Na Figura 27 é mostrada a planta FV 2.

Figura 27 – Planta FV 2 analisada.



As características do módulo da planta 2 são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Principais características do módulo FV da planta 2.

| | |
|--|----------------|
| Fabricante | Jinko Solar |
| Modelo | JKM330PP |
| Potência no MPP (P_{max}) | 330 Wp |
| Tensão no MPP (V_{max}) | 37,80 V |
| Corrente no MPP (I_{max}) | 8,74 A |
| Tensão de Circuito Aberto (V_{oc}) | 46,90 V |
| Corrente de Curto Circuito (I_{sc}) | 9,14 A |
| Eficiência (η) | 17,01 % |
| Coefficiente de Temperatura para Potência (γ) | -0.40%/°C |
| Dimensões | 1956x992x40 mm |

Fonte: JinkoSolar (2016).

A planta FV 2 é conectada ao inversor PHB5000D-NS, da empresa PHB Eletrônica, que possui potência máxima de saída de 6500 W e potência CA nominal de 5000 W. Para proteção da planta contra surtos provenientes da rede elétrica, a saída do inversor é ligada a fusíveis e dispositivos de proteção contra surtos.

As plantas FV 1 e 2 instaladas no LEA estão mostradas na Figura 28, evidenciando a vegetação nos arredores do laboratório e a sua proximidade com a Av. Mister Hull.

Figura 28 – Vista aérea das plantas FV 1 e 2 do LEA-UFC.



4.3 Sistema de Aquisição e de Monitoramento dos Dados

A aquisição de dados para caracterização e monitoramento de sistemas é um dos principais mecanismos de ação e análise de desempenho do objeto em observação (CHAVES *et al.*, 2019). Na presente dissertação, dois sistemas independentes de aquisição de dados são utilizados.

O primeiro sistema coleta as variáveis elétricas das plantas FV: tensão, corrente e potência; e o segundo coleta os dados ambientais do local de instalação da planta: irradiância solar e temperatura ambiente e dos módulos FV.

4.3.1 Aquisição e monitoramento dos parâmetros elétricos

O sistema para aquisição e monitoramento das variáveis elétricas de plantas FV tem como equipamento principal o *datalogger*, que é um dispositivo eletrônico que registra os dados. O *datalogger* da planta FV 1, mostrado na Figura 29, é do mesmo fabricante do inversor.

Esse *datalogger* possui comunicação com o inversor por meio de uma comunicação serial baseada no protocolo RS485, e pode se comunicar com até 20 inversores, desde que a ligação entre o *datalogger* e o inversor não ultrapasse 800 m.

Figura 29 – *Datalogger* da Planta FV 1.



O tempo de amostragem do *datalogger* é de 10 minutos, sendo os dados enviados e armazenados, automaticamente, no servidor web do fabricante. No servidor da PHB Solar, uma interface é fornecida ao usuário de modo que os dados monitorados sejam visualizados e até mesmo exportados em formato .xls para uma análise mais detalhada.

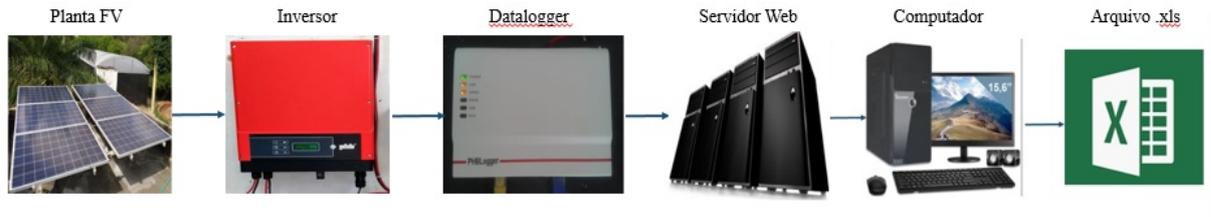
O *datalogger* da planta FV 2 é integrado ao inversor, que possui conexão Wi-Fi, permitindo conexão com vários dispositivos. O tempo de amostragem desse datalogger é de 1 minuto, sendo os dados enviados e armazenados, automaticamente, no servidor web da PHB Solar. Os dados podem ser visualizados no site ou exportados em formato .xls. Na Figura 30 é mostrado o inversor da planta FV 2.

Figura 30 – Inversor da planta FV 2.



Na Figura 31 é mostrado o diagrama de blocos generalizado do sistema de aquisição e monitoramento dos dados elétricos das plantas FV 1 e 2.

Figura 31 – Diagrama de blocos do sistema de aquisição e monitoramento dos dados elétricos das plantas FV.



Fonte: Adaptado de Chaves *et al.* (2019).

4.3.2 Aquisição e Monitoramento dos Parâmetros Ambientais

O sistema SCADA é utilizado para monitorar os dados de irradiância e de temperatura ambiente. Esse tipo de sistema não se comunica apenas por sinais elétricos e em quase todas as aplicações os dados são encapsulados em protocolos de comunicação.

A maioria dos sensores e dispositivos elétricos não consegue se comunicar por protocolos, sendo necessário então a utilização de um Controlador Lógico Programável (CLP), que possui a funcionalidade de adquirir os sinais dos sensores, processar a informação e transmitir por protocolo todos os dados para o SCADA (SILVEIRA, 2019).

Nessa dissertação, o CLP utilizado é o modelo Twido TWDLC-E40DRF, que é diretamente conectado ao computador do LEA-UFC, o qual possui o sistema SCADA instalado. O SCADA adquire dados a cada minuto, que são exportados em formato .xls.

Para coleta dos dados de irradiância, um piranômetro, instrumento que mede irradiância solar global incidente sobre um plano horizontal, modelo LP02 da empresa Hukseflux com sensibilidade de $18,56 \times 10^{-6} \text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$, foi utilizado. No LEA, o piranômetro está instalado na mesma direção e orientação das plantas FV, porém não possui inclinação como as plantas possuem.

Um sensor de temperatura Pt-100 é utilizado para aquisição dos dados de temperatura ambiente, cuja acúrcia é de $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. O sensor de temperatura foi blindado para proteção de intempéries. Na planta FV 1, dados de temperatura dos módulos também são medidos pelo Pt-100, enquanto na planta FV 2 não há coleta dos dados de temperatura dos módulos (até a conclusão deste estudo).

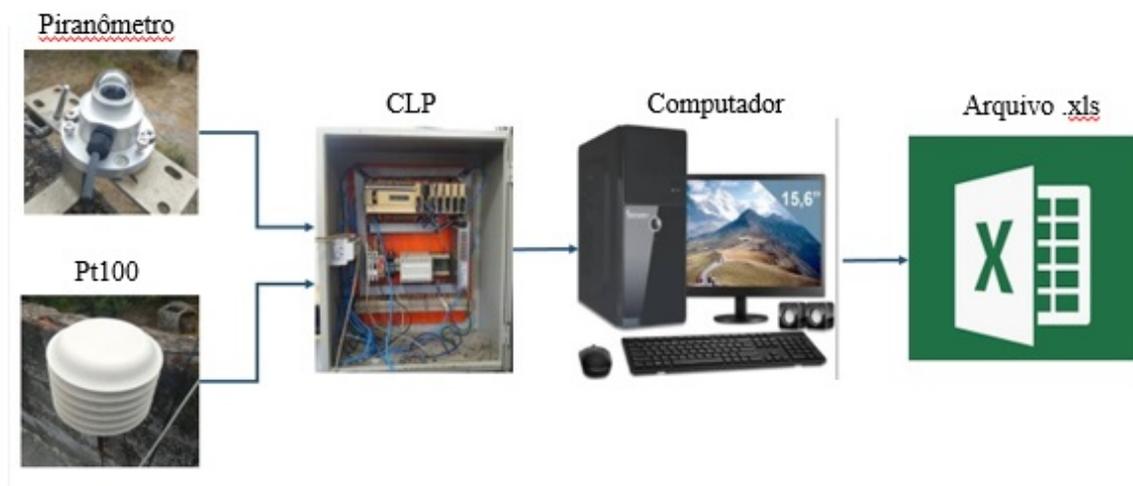
A temperatura dos módulos FV da planta 2 é calculada a partir do modelo desenvolvido por Lorenzo *et al.* (1994). Os sensores de temperatura e de irradiância solar são conectados ao CLP. Na Figura 32 são mostrados os sensores utilizados.

Figura 32 – Sensores utilizados para coleta de dados irradiância (esquerda) e temperatura ambiente (direita).



Na Figura 33 é mostrado o diagrama de blocos do sistema de aquisição e monitoramento dos parâmetros ambientais.

Figura 33 – Diagrama de blocos do sistema de aquisição e monitoramento dos parâmetros ambientais.



Fonte: Adaptado de Chaves *et al.* (2019).

Os dados de chuva são fornecidos pela Estação Agroclimatológica de Fortaleza, localizada no CCA da UFC, campus do Pici, cujas coordenadas UTM 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).

4.4 Etapas para Extração das Métricas de Avaliação do Desempenho FV

A partir dos métodos desenvolvidos por Gostein *et al.* (2018) e Deceglie *et al.* (2016), apresentados na seção 2 (subseção 2.4), a avaliação dos impactos da sujidade no desempenho FV pode ser feita por meio de dados da produção FV (potência de saída e eletricidade produzida) e de dados ambientais (irradiância solar incidente no plano inclinado, temperatura dos módulos e precipitação).

No LEA-UFC, em relação aos parâmetros ambientais, apenas dados de irradiância no plano horizontal, da temperatura dos módulos que compõem a planta FV 1 e da temperatura ambiente estão disponíveis. Desse modo, modelos matemáticos são utilizados para estimação da irradiância no plano inclinado e da temperatura dos módulos FV da planta 2.

Além disso, os dados de produção das duas plantas FV e dos parâmetros ambientais, como descrito na seção 4.3, apresentam tempos de amostragem diferentes, sendo da planta FV 1 de 10 minutos, e da planta FV 2 e dos parâmetros ambientais de 1 minuto. Afim de se obter uma melhor visualização e padronização dos resultados, todos os cálculos são realizados a partir de médias dos parâmetros ambientais e elétricos das plantas FV a cada 10 minutos. Desse modo, a estimação dos valores de irradiância solar no plano inclinado e da temperatura do módulo da planta FV 2 é feita a partir de médias dos valores de irradiância no plano horizontal e da temperatura ambiente a cada 10 minutos.

A partir de todos os dados necessários e disponíveis, para o cálculo de SRatio, na finalidade de reduzir a influência de ruídos ou interferências, alguns critérios de filtragem são introduzidos para remoção de dados não confiáveis, possivelmente devido a dias nublados, leituras incorretas dos instrumentos ou mau funcionamento inesperado do sistema (KIMBER *et al.*, 2016).

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/m^2 . Além disso, os cálculos dos valores de SRatio e de PR se restringem ao intervalo entre 11h e 13h (KIMBER *et al.*, 2016).

A limpeza das plantas FV é realizada de forma natural, ou seja, pela chuva, sendo os dados de precipitação fornecidos pela Estação Agroclimatológica de Fortaleza, localizada no CCA da UFC.

Nas subseções 4.4.1 e 4.4.2 são apresentados os modelos matemáticos utilizados para estimação da irradiância solar no plano inclinado e da temperatura dos módulos FV.

4.4.1 Irradiância solar incidente no plano inclinado

O desempenho de plantas FV depende fortemente da quantidade de irradiância solar incidente nos módulos FV, que depende ainda mais da orientação e do ângulo de inclinação dos módulos (ULLAH *et al.*, 2019). O piranômetro 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 piranômetro, apesar de estar com a mesma orientação das plantas, não possui o mesmo ângulo de inclinação (0°). Logo, a metodologia desenvolvida por Costa (2018) é aplicada para conhecimento da irradiância solar incidente efetiva nos módulos FV, que entre outros modelos, utiliza os modelos matemáticos de Maxwell (1987) e Sandia (2019).

A irradiância solar no plano horizontal (G) é composta por duas parcelas: irradiância solar direta (G_b), que é a irradiância que incide diretamente na superfície, e a irradiância solar difusa (G_d), que é a irradiância incidente na superfície depois de ter sua direção alterada devido ao espalhamento dos elementos que compõem a atmosfera, nuvens ou poeira (DUFFIE; BECKMAN, 1991).

Já a irradiância solar no plano inclinado é composta por três parcelas: irradiância solar direta ($G_{b(T)}$), irradiância que incide diretamente na superfície inclinada; irradiância solar difusa ($G_{d(T)}$), irradiância incidente na superfície inclinada depois de ter sua direção alterada devido ao espalhamento; e irradiância solar refletida ($G_{g(T)}$), parte da irradiância que atinge a superfície do módulo FV e é refletida. Matematicamente (SANDIA, 2019):

$$G_T = G_{b(T)} + G_{d(T)} + G_{g(T)} \quad (4.1)$$

As três parcelas que compõem a irradiância inclinada no plano horizontal dependem de vários fatores. Logo:

- Irradiância solar direta no plano inclinado ($G_{b(T)}$): é calculada ajustando a irradiância normal direta, (G_b) pelo ângulo de incidência (θ) (SANDIA, 2019):

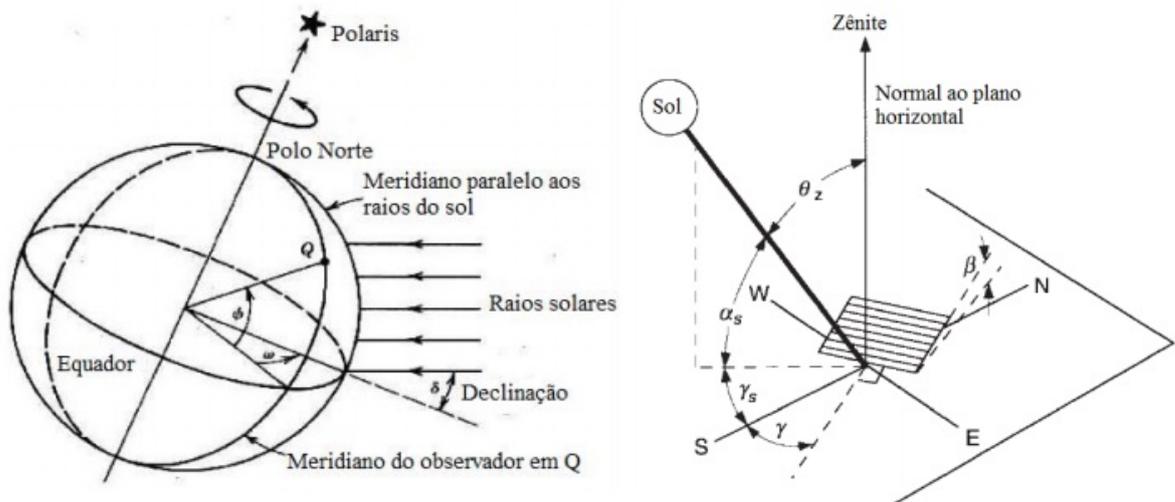
$$G_{b(T)} = G_b \cdot \cos(\theta) \quad (4.2)$$

- O ângulo de incidência (θ) para o hemisfério sul é calculado por:

$$\cos(\theta) = \cos(\phi + \beta) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \sin(\phi + \beta) \cdot \sin(\delta) \quad (4.3)$$

Sendo: ϕ é a latitude geográfica do local ($-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$); β é o ângulo entre a planta FV e a horizontal ($0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$); δ é a declinação solar, posição angular do sol ao meio-dia solar em relação ao plano do equador ($-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$); ω é o ângulo horário relativo ao deslocamento do Sol a partir do meio dia (contabilizando um deslocamento de 15° a cada uma hora). Para uma melhor visualização dos ângulos, a Figura 34 é apresentada.

Figura 34 – Ângulos solares.



Fonte: Adaptado de Duffie e Beckman (1991).

A declinação solar (δ) é calculada por:

$$\delta = 23,45 \cdot \text{sen} \left[\frac{360}{365} \cdot (n_{dia} + 284) \right] \quad (4.4)$$

Sendo n_{dia} o dia do ano, variando entre 1 e 365.

– G_b é calculado como segue (MAXWELL, 1987):

$$G_b = H_0 \cdot K_n \quad (4.5)$$

e Em que H_0 é a irradiância extraterrestre e K_n a transmitância direta normal.

A irradiância extraterrestre (H_0) é a intensidade de irradiância no topo da atmosfera da Terra e é calculada por:

$$H_0 = \frac{24.3600 \cdot G_{sc}}{\pi} \cdot \left(1 + 0,033 \cdot \cos \frac{360 \cdot n_{dia}}{365} \right) \cdot \left[\cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \text{sen}(\omega s) + \frac{\pi \cdot \omega s}{180^\circ} \cdot \text{sen}(\phi) \cdot \text{sen}(\delta) \right] \quad (4.6)$$

Em que G_{sc} é a constante solar, 1367 w/m^2 , ω_s a relação entre a latitude geográfica e a declinação solar:

$$\omega_s = \arccos[-\text{tg}(\phi) \cdot \text{tg}(\delta)] \quad (4.7)$$

A transmitância direta normal é calculada por (MAXWELL, 1987):

$$K_n = K_{nc} - \Delta K_n \quad (4.8)$$

Em que K_{nc} e ΔK_n variam de acordo com o índice de claridade atmosférica (K_t), que é definido por:

$$K_t = \frac{G}{G_{sc} \cdot \cos(\theta_z)} \quad (4.9)$$

em que θ_z é o ângulo zênite formado entre a vertical e a irradiância solar direta. Esse ângulo é calculado da seguinte forma:

$$\theta_z = \cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \sin(\phi) \cdot \sin(\delta) \quad (4.10)$$

Assim, para $K_t > 0$, o fator K_{nc} é calculado por (K_{nc} é definido como 0 quando $K_t < 0$):

$$K_{nc} = 0,886 - 1,222 \cdot (AM) + 0,0121 \cdot (AM)^2 - 0,000653 \cdot (AM)^3 + 0,000014 \cdot (AM)^4 \quad (4.11)$$

AM é a massa de ar, definida como porção de ar que apresenta condições internas de temperatura, pressão e umidade relativamente homogêneas. Matematicamente:

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta_z) + 0,5057 \cdot (96,080 - \theta_z)^{-1,634}} \quad (4.12)$$

Já o cálculo de ΔK_n é definido por:

$$\Delta K_n = a + b \cdot e^{c \cdot AM} \quad (4.13)$$

Sendo que a , b e c são coeficientes que variam de acordo com K_T , em que:

Se $K_t \leq 0,60$:

$$a = 0,512 - 1,56 \cdot (K_T) + 2,286 \cdot (K_T)^2 - 2,222 \cdot (K_T)^3 \quad (4.14)$$

$$b = 0,370 + 0,962 \cdot (K_T) \quad (4.15)$$

$$c = -0,280 + 0,932 \cdot (K_T) - 2,048 \cdot (K_T)^2 \quad (4.16)$$

Se $K_t > 0,60$:

$$a = -5,743 - 21,77.(K_T) + 27,49.(K_T)^2 - 11,56.(K_T)^3 \quad (4.17)$$

$$b = 41,40 - 118,50.(K_T) + 66,05.(K_T)^2 + 31,90.(K_T)^3 \quad (4.18)$$

$$c = -47,01 + 184,20.(K_T) - 222,00.(K_T)^2 + 73,81.(K_T)^3 \quad (4.19)$$

- Irradiância solar difusa no plano inclinado ($G_{d(T)}$): calculada a partir do modelo difuso do céu isotrópico, que assume que irradiância solar difusa, G_d , atinge uniformemente o hemisfério celeste visível. Pode ser calculada por:

$$G_{d(T)} = G_d * \frac{[1 + \cos(\beta)]}{2} \quad (4.20)$$

A irradiância difusa é calculada como segue:

$$G_d = G - G_b.\cos(\theta_z) \quad (4.21)$$

- Irradiância solar refletida no plano inclinado ($G_{g(T)}$): calculada em função da irradiância total no plano horizontal, da refletividade da superfície do solo (albedo) e do ângulo de inclinação da planta FV (SANDIA, 2019). Matematicamente:

$$G_{g(T)} = G * albedo * \frac{[1 - \cos(\beta)]}{2} \quad (4.22)$$

Para ambientes urbanos, o valor de albedo varia entre 0,14 e 0,22 (SANDIA, 2019).

4.4.2 Temperatura dos módulos

Os dados de temperatura dos módulos estão disponíveis apenas para os módulos da planta FV 1. Desse modo, a temperatura dos módulos da planta FV 2 foi estimada a partir do modelo matemático desenvolvido por Lorenzo *et al.* (1994). Nesse modelo, a temperatura do módulo (T_c) é calculada da seguinte forma:

$$T_c = T_a + \left[\frac{G_T.(NOCT - 20)}{800} \right] \quad (4.23)$$

Em que T_a é a temperatura ambiente medida (° C), G_T é a irradiância solar incidente no plano inclinado e NOCT é a temperatura de operação nominal do módulo FV (40° C).

4.5 Análise da composição química da sujidade

A composição química da sujidade foi analisada pelo Laboratório de Raios-X (LRX) da UFC, que disponibiliza seus aparelhos e auxilia no processo de análise das amostras de forma gratuita para alunos da UFC (LRX, 2019).

Para fazer uso dos serviços fornecidos pelo LRX, é necessário fazer um cadastro no site do laboratório, informando o serviço desejado, além dos dados do aluno e de seu professor responsável. Após essas etapas, o serviço deve ser aprovado pelo professor responsável e o laboratório. Após as aprovações, a amostra do material é entregue para teste no LRX e os resultados obtidos da análise são enviados para o email do aluno.

As amostras de sujidade dos módulos das duas plantas FV do LEA-UFC foram coletadas no dia da inspeção visual, 30/09/2019, e no processo de coleta foram utilizadas uma espátula de plástico, pincel e luva, a fim de evitar contaminação da sujidade. Na Figura 35 é mostrado como a coleta da sujidade dos módulos foi realizada.

Figura 35 – Coleta da sujidade.



Em relação às técnicas utilizadas para caracterização química da sujidade, foram selecionadas as seguintes: Difração de Raio-X (DRX) e Fluorescência de Raios-X (FRX). DRX é uma técnica laboratorial que revela informações estruturais, como composição química e estrutura do cristal. Estrutura cristalina é a designação dada ao conjunto de propriedades de um sólido que resultam da forma como estão espacialmente ordenados os seus átomos ou moléculas.

A técnica FRX permite identificar os elementos químicos e a proporção de cada elemento químico presente na amostra analisada. A técnica é precisa, rápida e não-destrutiva para análises elementares, tanto quantitativas quanto qualitativas usando o princípio de medida

dos comprimentos de onda e intensidade das radiações emitidas pelos elementos (CALLISTER, 2000).

No LRX, foi utilizado um difratômetro no teste de DRX do modelo XPert Pro MPD® – PANalytical, cujo princípio de funcionamento baseia-se no desvio que o raio-x sofre ao ser espalhado pelos elementos atômicos que formam os planos cristalinos. A caracterização dos compostos presentes na amostra baseia-se na análise do espectro emitido com a variação do ângulo de incidência (ângulo de Bragg).

Cada composto possui seus picos característicos, porém vale ressaltar que as confirmações dos resultados só podem ser realizadas por meio de cálculos, sendo a análise dos picos algo preliminar. Em relação ao ângulo de Bragg foi definido um intervalo de 10° a 100° , com uma variação angular de $0,013^{\circ}$.

O FRX foi realizado no equipamento ZSXMini II – Rigaku® e baseia-se num princípio básico da química que é o salto eletrônico. Ao receber energia o elétron salta para uma camada mais externa e ao retornar a camada original à energia é emitida na forma de fóton. Cada elemento químico possui sua emissão de energia característica.

O equipamento utilizado no FRX abrange um espectro, em relação à tabela periódica, do flúor ao urânio, sendo uma análise semi-quantitativa, podendo ser esta em forma elementar ou em forma de óxido. Na presente dissertação, a análise elementar foi escolhida, de forma a auxiliar e validar os resultados obtidos no DRX.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No presente capítulo, os efeitos da sujidade no desempenho das plantas FV do LEA-UFC são apresentados. Além disso, uma análise dos parâmetros ambientais é realizada, validando a estimativa da irradiância no plano inclinado e apresentando as sazonalidades encontradas nos dados de precipitação, temperatura ambiente e do módulo FV.

Os impactos da sujidade no desempenho FV são avaliados mediante um banco de dados com intervalos distintos, objetivando evidenciar as sazonalidades dos efeitos da sujidade nas plantas FV. Devido à disponibilidade dos dados, a planta FV 1 é avaliada entre janeiro e setembro do ano de 2018 e a planta FV 2 entre setembro de 2018 e outubro de 2019.

Durante os períodos analisados, há lacunas nos dados ambientais coletados no LEA-UFC, o que prejudica a avaliação dos efeitos da sujidade de forma mais detalhada e contínua. A percentagem de dados ambientais (irradiância, temperatura ambiente e dos módulos que compõem a planta FV 1) disponíveis para cada mês analisado está mostrada na Tabela 8.

Tabela 8 – Percentagem de dados ambientais disponíveis do LEA-UFC durante o período estudado.

| Ano | Mês | Dias disponíveis | Porcentagem (%) |
|------|-----------|------------------|-----------------|
| 2018 | Janeiro | 22 | 71,00 |
| | Fevereiro | 25 | 89,30 |
| | Março | 26 | 83,90 |
| | Abril | 30 | 100,00 |
| | Maio | 27 | 87,10 |
| | Junho | 30 | 100,00 |
| | Julho | 29 | 93,50 |
| | Agosto | 30 | 96,70 |
| | Setembro | 28 | 93,30 |
| | Outubro | 30 | 96,80 |
| | Novembro | 27 | 90,00 |
| | Dezembro | 16 | 51,60 |
| 2019 | Janeiro | 20 | 64,50 |
| | Fevereiro | 23 | 82,10 |
| | Março | 17 | 54,80 |
| | Abril | 19 | 63,30 |
| | Maio | 28 | 90,30 |
| | Junho | 27 | 90,00 |
| | Julho | 21 | 67,70 |
| | Agosto | 24 | 77,40 |
| | Setembro | 29 | 96,60 |
| | Outubro | 30 | 96,77 |

5.1 Parâmetros ambientais

5.1.1 Precipitação

Os dados de precipitação observados em Fortaleza, mais precisamente, no *campus* Pici da UFC, são disponibilizados pela Estação Agroclimatológica de Fortaleza, localizada no CCA da UFC. Nas Figuras 36 e 37 são mostrados os acúmulos mensais de precipitação para o ano de 2018 e para o período entre janeiro e outubro de 2019, respectivamente.

Figura 36 – Acúmulo mensal de precipitação de 2018.

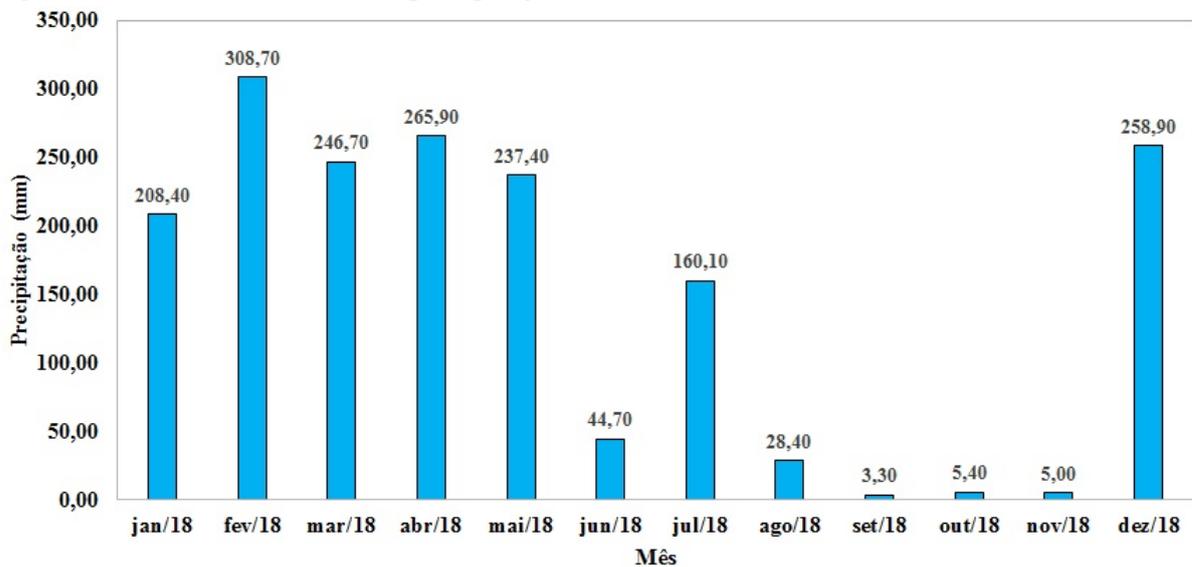
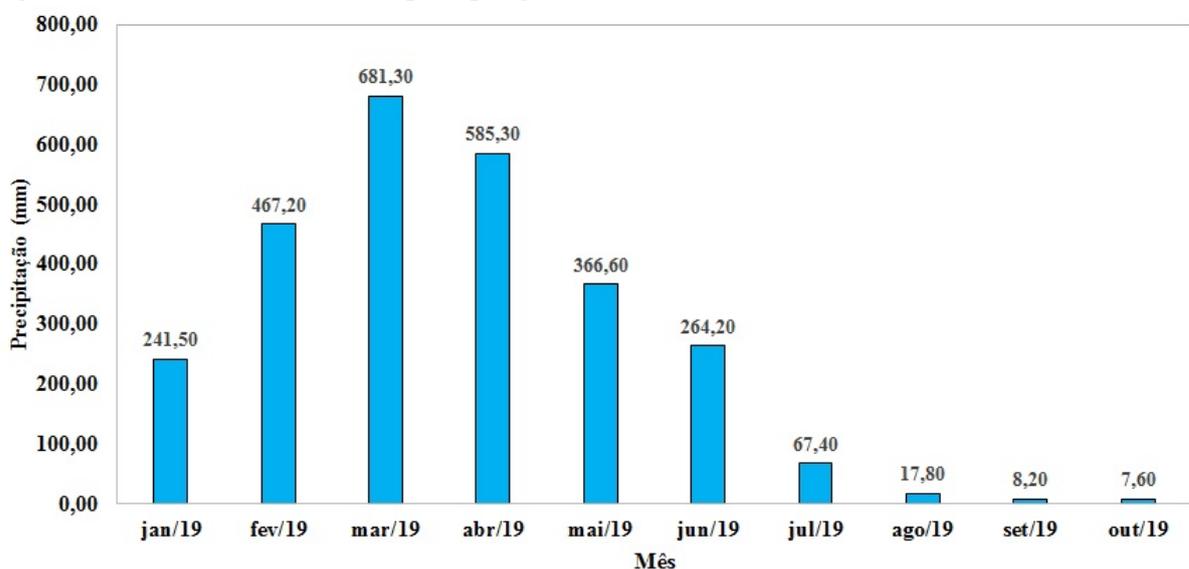


Figura 37 – Acúmulo mensal de precipitação de 2019.

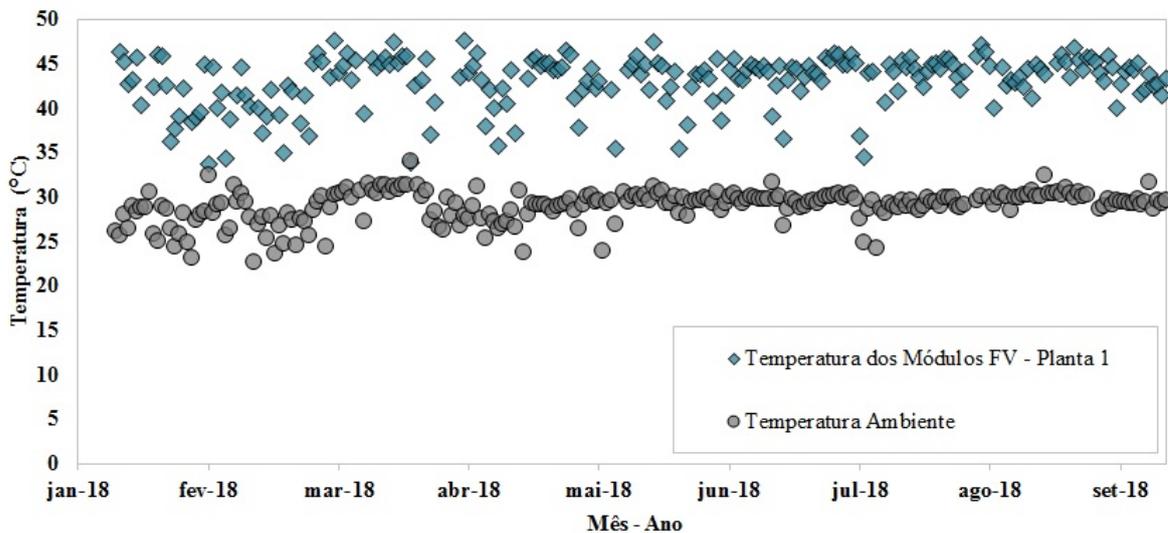


É perceptível que nos primeiros 6 meses de 2019 houve mais chuva do que nos primeiros 6 meses de 2018. Além disso, os meses com os menores registros de precipitação são: agosto, setembro e outubro, nos dois anos. Assim, espera-se que a sujidade acumulada seja maior nesses meses, provocando, desse modo, um menor desempenho FV das plantas localizadas em Fortaleza.

5.1.2 Temperatura ambiente e do módulo

Como já comentando, a análise das plantas FV é realizada em períodos diferentes, sendo a análise da planta FV 1 feita de 01/01/2018 até 17/09/2018 e da planta FV 2 de 30/09/2018 até 31/10/2019. Na Figura 38 são mostrados os valores médios diários de temperatura ambiente e dos módulos FV que compõem as plantas FV 1 do LEA-UFC para o ano de 2018. Os cálculos das médias diárias das temperaturas são realizados para o intervalo entre 5h e 18h.

Figura 38 – Médias diárias da temperatura ambiente e dos módulos FV que compõem a planta FV 1 no período estudado.

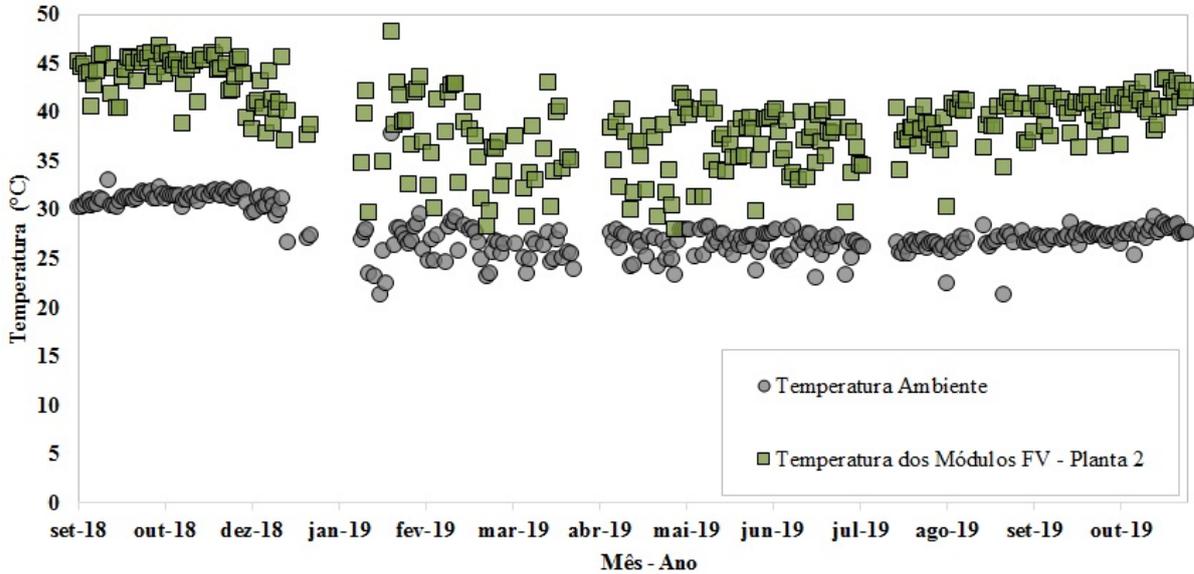


É visto que os valores de temperatura ambiente e dos módulos da planta FV 1 oscilam muito no período de janeiro a julho, período com os maiores índices de precipitação registrados (conforme a Figura 36). Nos meses de agosto e setembro, meses caracterizados por possuírem poucas ocorrências de chuva, os valores de temperatura se apresentam mais estáveis.

Os valores médios diários para o período entre setembro de 2018 e outubro de 2019 da temperatura ambiente e dos módulos FV que compõem a planta FV 2 são apresentados na Figura 39. Assim como na figura anterior, os valores médios oscilam mais nos meses com os

maiores índices de precipitação e se tornam mais estáveis nos meses de pouca precipitação registrada.

Figura 39 – Médias diárias da temperatura ambiente e dos módulos FV que compõem a planta FV 2 no período de setembro de 2018 a outubro de 2019.



A validação da estimativa dos valores de temperatura dos módulos da planta FV 2 é feita a partir da comparação dos valores de temperatura medidos pelo Pt-100 dos módulos da planta FV 1 com os valores calculados pelo modelo de Lorenzo *et al.* (1994). A diferença média mensal da temperatura dos módulos da planta 1 medida e calculada pelo modelo não é maior do que 10% e 6% no período chuvoso e no seco, respectivamente.

5.1.3 Irradiância no plano inclinado

A estimativa da irradiância no plano inclinado é realizada para as duas plantas FV a partir de modelos matemáticos desenvolvidos por Maxwell (1987) e Sandia (2019) para todo o período estudado. Para validação dos dados calculados a partir dos modelos matemáticos, os dados fornecidos pelo *software* Radasol 2 são utilizados.

O Radasol 2, *software* desenvolvido pelo Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, calcula dados de irradiação no plano inclinado mediante a entrada de dados de irradiação solar no plano horizontal, coordenadas geográficas, inclinação e orientação dos módulos FV (KREZNIGER; BUGS, 2010).

Nas Figuras 40 e 41, os valores médios mensais de irradiação horizontal medidos

no LEA-UFC são comparados com os valores médios mensais de irradiação no plano inclinado calculados a partir da metodologia desenvolvida por Costa (2018) e fornecidos pelo *software* Radasol 2. .

Figura 40 – Comparação entre a irradiação horizontal e a irradiação no plano inclinado para o ano de 2018.

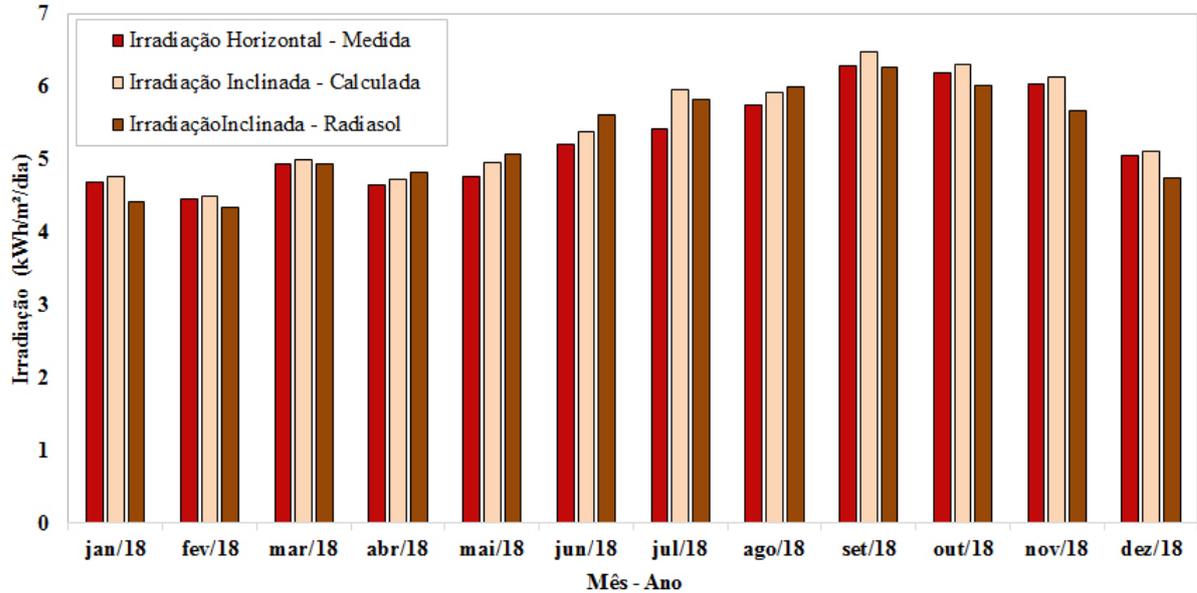
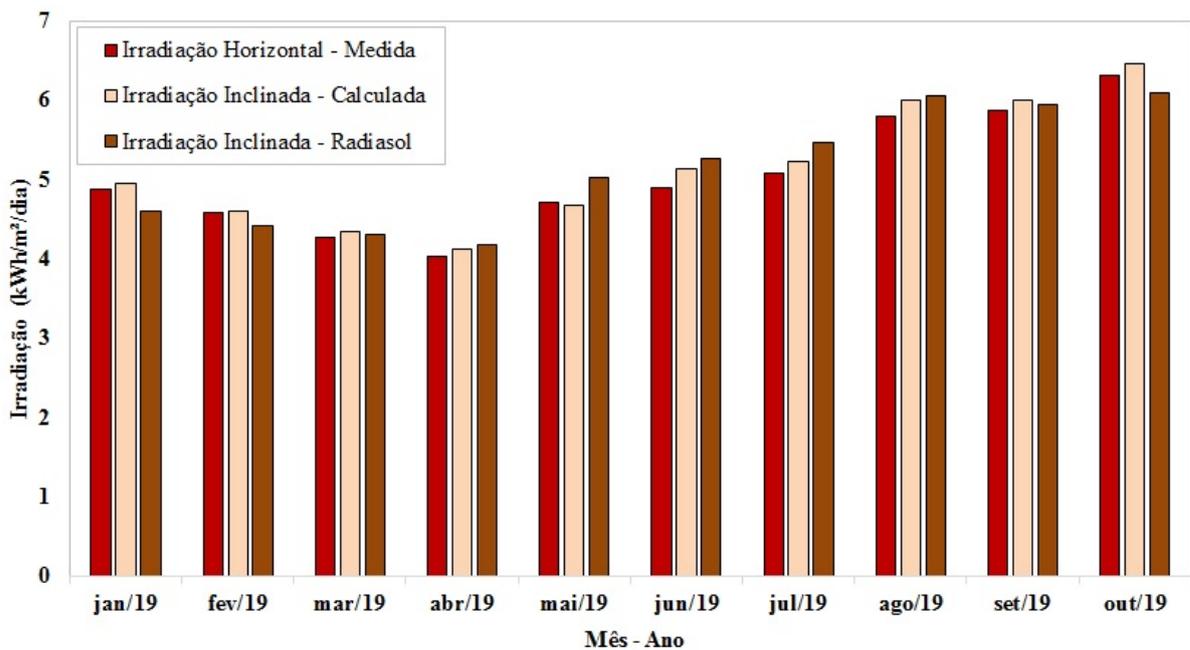


Figura 41 – Comparação entre a irradiação horizontal e a irradiação no plano inclinado para o período de janeiro até outubro de 2019.



As médias mensais de irradiação no plano inclinado obtidas pelo *software* Radasol

2 e por meio dos modelos matemáticos aplicados na metodologia de Costa (2018) para o período estudado em 2019 são apresentadas nas Tabelas 9 e 10, respectivamente, assim como a diferença percentual entre os dois métodos. A diferença entre os dois métodos não foi maior do que $\pm 8\%$.

Tabela 9 – Diferença entre as médias mensais da irradiação no plano inclinado obtidas a partir de modelos matemáticos e do Radasol 2 para o ano de 2018.

| Mês | Irradiação Inclinada Calculada (kWh/m ²) | Irradiação Inclinada Radasol (kWh/m ²) | Erro (%) |
|-----------|--|--|----------|
| Janeiro | 4,76 | 4,42 | 7,14 |
| Fevereiro | 4,50 | 4,34 | 3,56 |
| Março | 4,98 | 4,94 | 0,80 |
| Abril | 4,73 | 4,82 | -1,90 |
| Mai | 4,95 | 5,08 | -2,62 |
| Junho | 5,40 | 5,61 | -3,88 |
| Julho | 5,95 | 5,82 | 2,18 |
| Agosto | 5,93 | 6,00 | 1,18 |
| Setembro | 6,48 | 6,26 | 3,39 |
| Outubro | 6,29 | 6,02 | 4,29 |
| Novembro | 6,13 | 5,68 | 7,34 |
| Dezembro | 5,10 | 4,74 | 7,05 |

Tabela 10 – Diferença entre as médias mensais da irradiância no plano inclinado obtidas a partir de modelos matemáticos e do Radasol 2 para o período estudado em 2019.

| Mês | Irradiação Inclinada Calculada (kWh/m ²) | Irradiação Inclinada Radasol (kWh/m ²) | Erro (%) |
|-----------|--|--|----------|
| Janeiro | 4,95 | 4,61 | 6,86 |
| Fevereiro | 4,60 | 4,42 | 3,91 |
| Março | 4,34 | 4,30 | 0,92 |
| Abril | 4,13 | 4,18 | -1,21 |
| Mai | 4,68 | 5,02 | -7,26 |
| Junho | 5,12 | 5,27 | -2,93 |
| Julho | 5,22 | 5,46 | -4,60 |
| Agosto | 5,99 | 6,05 | -1,01 |
| Setembro | 6,01 | 5,95 | 0,99 |
| Outubro | 6,47 | 6,10 | 5,71 |

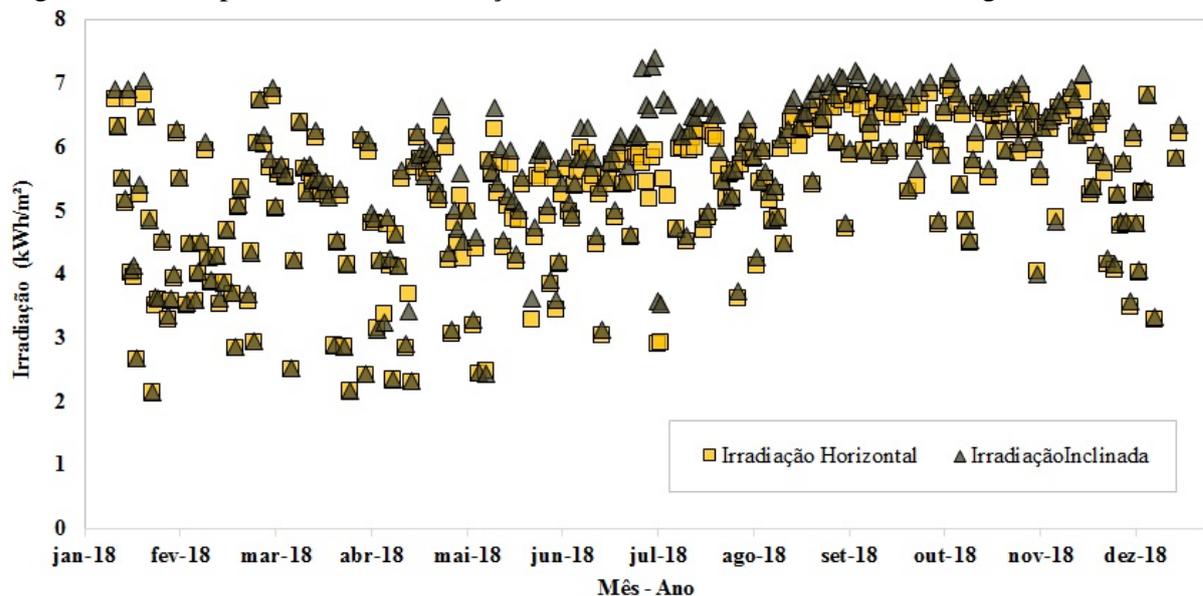
O cálculo da média mensal da irradiação no plano inclinado a partir de Costa (2018), que utiliza modelos matemáticos de Maxwell (1987) e Sandia (2019), é feito por meio de médias diárias de irradiação inclinada. As médias diárias de irradiação inclinada são calculadas a partir de médias a cada 10 minutos de irradiância horizontal durante 5h e 18h. No *software* Radasol 2, apenas as médias diárias de irradiação no plano horizontal são utilizadas para o cálculo da

irradiação no plano inclinado.

Além disso, o *software* Radasol 2 só fornece os dados de irradiação de forma mensal ou horária, o que prejudica o monitoramento e avaliação do desempenho FV. De acordo com a norma IEC 61724, o intervalo de amostragem para monitoramento do desempenho de plantas FV deve estar entre 1 e 10 minutos (COMMISSION *et al.*, 1998).

Logo, com a diferença percentual entre os dois métodos não maior do que $\pm 8\%$ e com o inconveniente do Radasol 2 só fornecer dados mensais ou horários, a metodologia desenvolvida por Costa (2018) se adequa bem para esse estudo. Nas Figuras 42 e 43 são mostrados os valores médios diários para a irradiação no plano inclinado, calculados a partir de Costa (2018), e no plano horizontal para o ano de 2018 e para os meses entre janeiro e outubro de 2019, respectivamente.

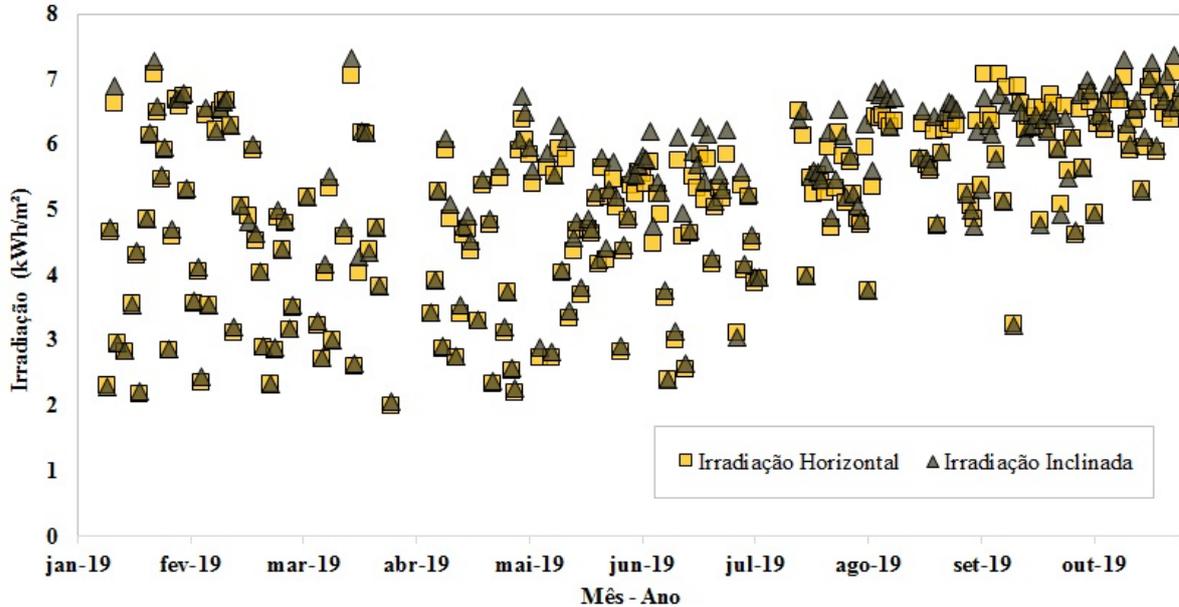
Figura 42 – Comportamento da irradiação diária inclinada e horizontal ao longo do ano de 2018.



Pode ser percebido que os menores níveis de irradiação e os maiores valores de desvio padrão são atingidos nos meses com os maiores índices de precipitação registrados. Os maiores valores médios de irradiação diária e os menores valores de desvio padrão são atingidos nos meses entre agosto e novembro, meses com os menores índices de precipitação em Fortaleza.

Vale ressaltar que as lacunas evidenciadas nas figuras apresentadas neste capítulo tem como razão a ausência de dados ambientais coletados no LEA-UFC. Conforme apresentado na Tabela 8 e exibido nessas figuras, a análise da sujidade para o período entre dezembro de 2018 até abril de 2019 é consideravelmente prejudicada devido à ausência desses dados.

Figura 43 – Comportamento da irradiação inclinada e horizontal para o período estudado em 2019.



5.2 Efeitos da Sujidade no Desempenho FV

Nesta seção são apresentados os efeitos da sujidade no desempenho das plantas FV do LEA. Primeiramente, é mostrada a situação de sujidade encontrada nos módulos a partir de uma inspeção visual e, em seguida, as métricas SRatio e PR são calculadas e apresentadas.

5.2.1 Inspeção Visual

Desde a instalação da planta FV 2, o único tipo de limpeza efetuada nos módulos dessa planta foi de forma natural. Na planta FV 1, três limpezas manuais já foram realizadas, tendo sido duas no ano de 2017 e uma no ano de 2018 (RABELO *et al.*, 2017; CHAVES *et al.*, 2019). Devido ao intervalo escolhido para análise, os efeitos das limpezas manuais na planta FV 1 não é avaliada.

Em uma inspeção visual realizada no dia 30/09/2019, a sujidade na planta 1 se apresentou de forma concentrada nas bordas inferiores de todos os módulos FV e dejetos de pássaros foram encontrados em alguns módulos, como mostrado na Figura 44. A última chuva registrada anterior ao dia 30 mencionado, foi no dia 22/09 de 0,2 mm.

No dia 30/09/2019, a inspeção visual também foi realizada na planta FV 2, sendo a sujidade encontrada também concentrada nas bordas inferiores dos módulos, como mostrado na Figura 45. Além disso, dejetos de pássaros também foram encontrados.

Figura 44 – Sujidade encontrada nos módulos da planta FV 1 no dia 30/09/2019.

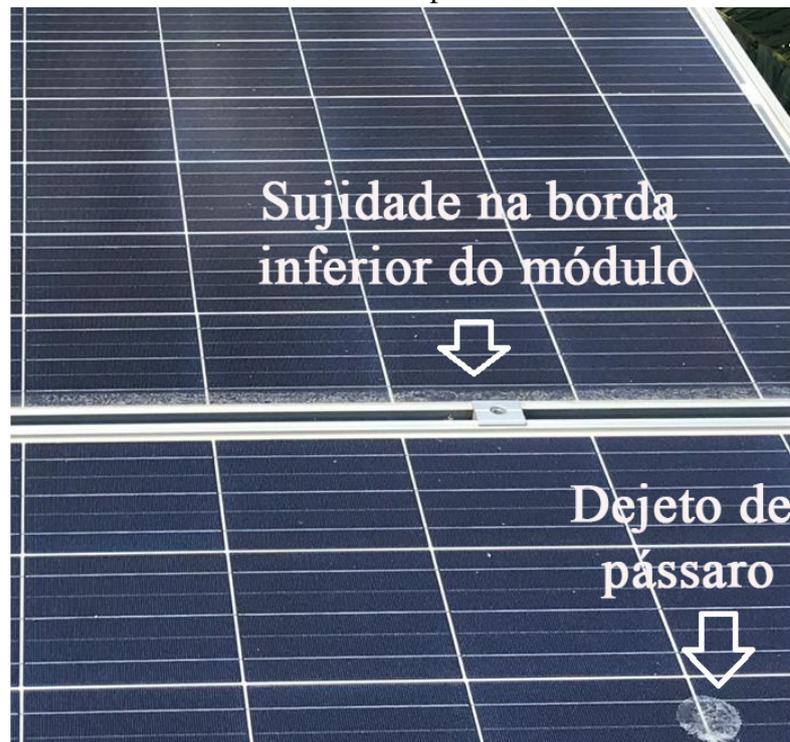


Figura 45 – Sujidade encontrada nos módulos da planta FV 2 no dia 30/09/2019.



A partir da inspeção visual, é observado que há sujidade não-uniforme nos módulos instalados no LEA, em que a partir dos diodos *by-pass* aplicados nos módulos de silício, a corrente é desviada das células sombreadas devido à sujidade. Neste caso, para uma melhor avaliação dos efeitos da sujidade no desempenho FV, o cálculo da métrica SRatio deve ser feito a partir dos valores de potência de saída.

5.2.2 Métricas de Sujidade

A avaliação do impacto da sujidade nas plantas FV do LEA é feita em períodos diferentes para as duas plantas, sendo para a planta FV 1 do dia 01/01/2018 até 17/09/2018 e para a planta FV 2 do dia 30/09/2018 até 31/10/2019. A avaliação da sujidade na planta FV 1 depois do dia 17/09/2018 até novembro de 2018 não foi realizada, pois a planta foi utilizada para um estudo sobre sombreamento neste período (CHAVES *et al.*, 2019; DUPONT *et al.*, 2019). Na Figura 46 é mostrado o experimento realizado na planta FV 1.

Figura 46 – Estudo de sombreamento realizado na planta FV 1.



No estudo de sombreamento, parte dos módulos FV são cobertos e então o valor medido da irradiância solar pelo piranômetro é diferente da irradiância recebida pelos módulos FV. A diferença entre a irradiância incidente na planta FV e a medida pelo piranômetro, distorce o valor calculado de SRatio, afetando o estudo da sujidade. Entre dezembro de 2018 e outubro de 2019, a avaliação de sujidade foi prejudicada devido à falta de dados ambientais e elétricos.

Vale ressaltar que, no cálculo das métricas de sujidade, algumas considerações são realizadas, entre elas (KIMBER *et al.*, 2016):

- Os cálculos da relação de sujidade (SRatio) e da relação de desempenho (PR) são feitos apenas entre 11h e 13h;
- A irradiância deve ser maior do que 500 W/m^2) e suas variações menores do que 10% em

intervalos de 10 minutos.

Na presente dissertação, não há estudo da correlação do comportamento do vento e da umidade relativa do ar com outras variáveis ambientais e com o comportamento das métricas de sujidade. Porém, deve ser frisado que esses parâmetros possuem impactos não negligenciáveis na sujidade depositada em módulos FV e, desse modo, nas métricas de avaliação do desempenho FV.

O vento pode aumentar a deposição das partículas de sujidade ou a probabilidade de ressalto, sendo o ressalto predominante em situações de partículas grandes, alta velocidade do vento e baixa umidade. Quando a umidade relativa do ar está alta e a temperatura do ar baixa, há formação do orvalho, que pode aumentar os processos a adesão da sujidade ou remover a sujidade após a secagem do orvalho.

5.2.2.1 *Relação de Sujidade - SRatio*

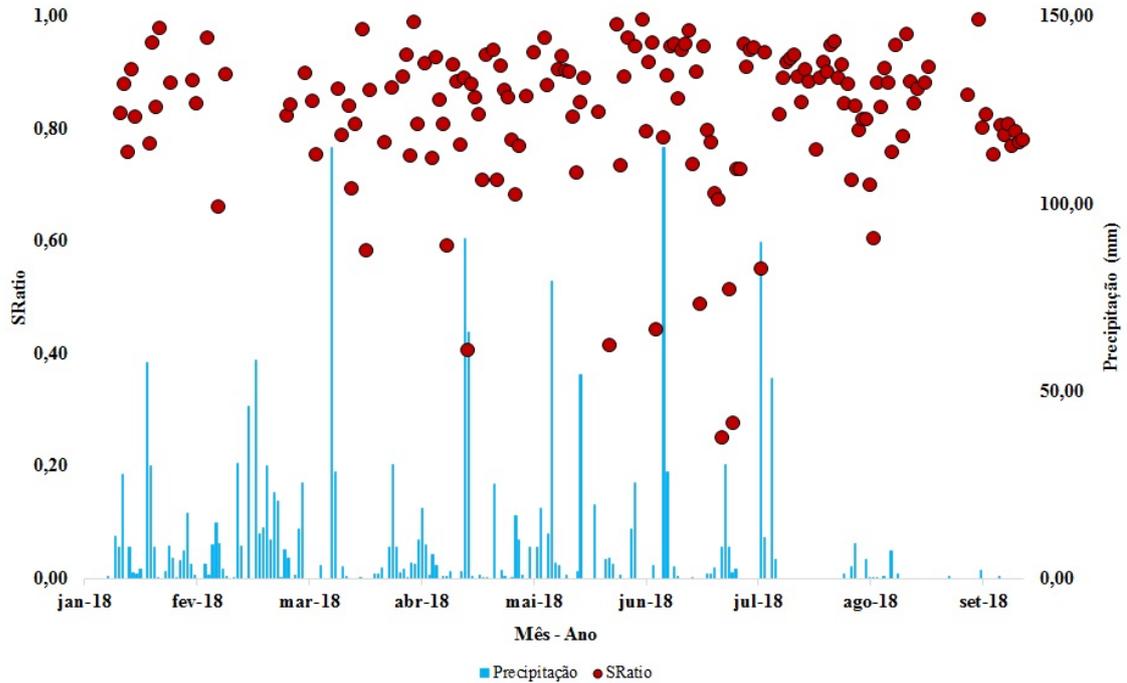
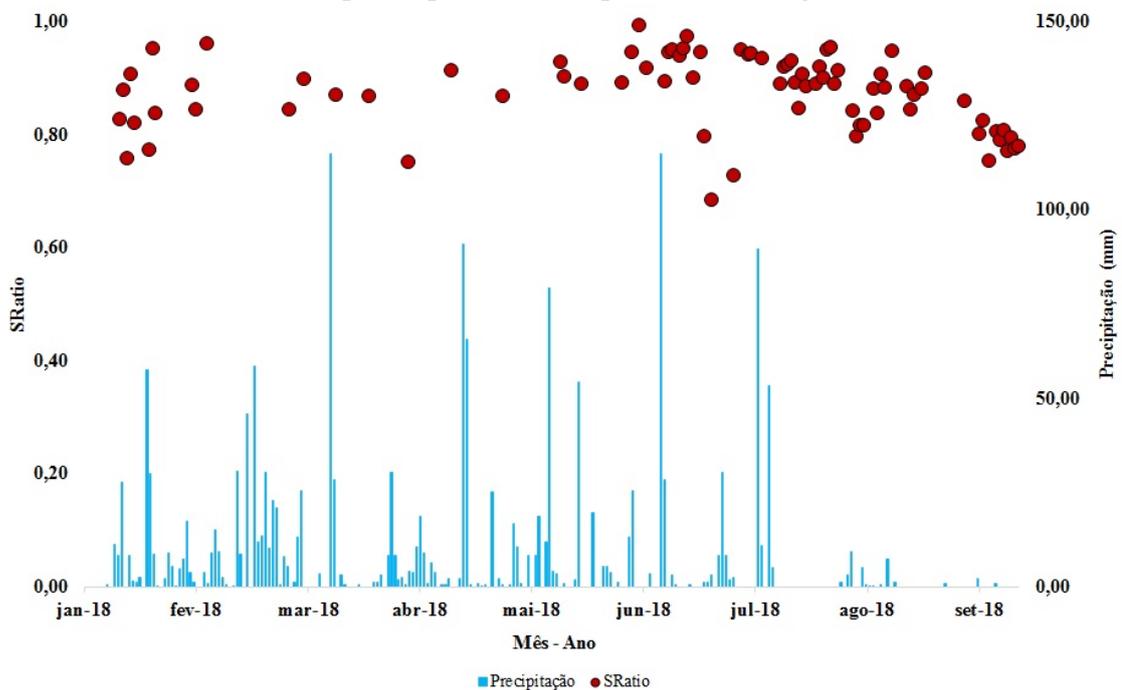
SRatio é calculado a partir de valores de potência máxima da planta FV, equação 2.2, pois para módulos de silício cristalino e para condições de sujidade não-uniforme, essa equação retrata de forma mais condizente o impacto da sujidade no desempenho FV. Essa métrica varia de 0 a 1, sendo que quando próxima de 0, a sujidade possui grande impacto no desempenho FV e quando próxima ou igual a 1, a sujidade possui pouco ou nenhum efeito no desempenho FV.

Os valores de SRatio para o período avaliado na planta FV 1, que começa em 01/01/2018, são mostrados na Figura 47, assim como os dados de precipitação diária acumulada em Fortaleza. As lacunas existentes nessa figura são causadas pela ausência de dados dos parâmetros ambientais e devido às considerações feitas para o cálculo de SRatio.

É percebido que os valores de SRatio são dispersos durante o período avaliado, sendo que essa dispersão pode ser causada devido às condições do céu, que no período chuvoso possui mais nuvens, e conseqüentemente, possui um índice de claridade atmosférica (K_t) menor; no período de estiagem, o índice de claridade atmosférica é maior, indicando poucas nuvens no céu.

Segundo Iqbal (2012), dias de céu claro possui K_t maior do que 0,70, desse modo, além dos filtros aplicados, a restrição de K_t ser maior do que 0,70 também é utilizada para uma melhor visualização dos resultados. O cálculo de K_t médio diário foi feito baseado na equação 4.9 e se restringiu ao horário entre 11h e 13h. Na Figura 48 são mostrados os valores de SRatio juntamente com os dados de precipitação registrados entre janeiro e setembro de 2018 após a consideração de K_t ser feita.

Figura 47 – Valores de SRatio para a planta FV 1.

Figura 48 – Valores de SRatio para a planta FV 1 após a consideração de K_t ser realizada.

Apesar de a chuva possuir efeito de limpeza nos módulos FV, sendo então esperado SRatio próximo de 1,00 no período chuvoso, os valores de SRatio ainda se apresentam dispersos e variam entre 0,80 e 1,00. Isso pode ser causado pelas gotículas de chuva na superfície dos módulos FV, que reduzem a transmitância (fração de luz que incide na superfície FV), refratando

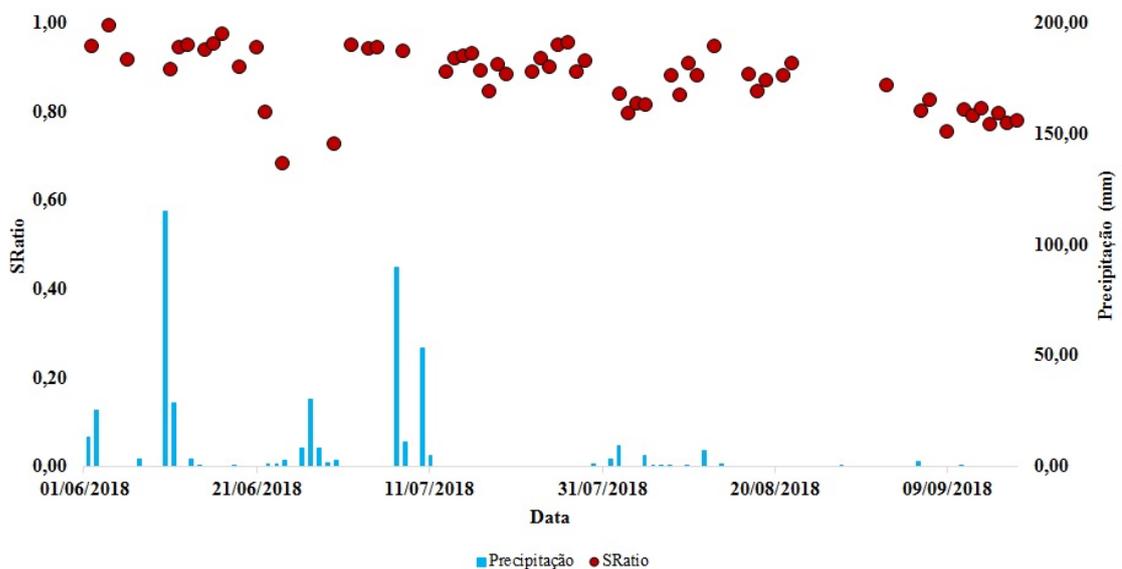
e refletindo os raios solares em diversas direções (COSTA, 2018).

No ano de 2018, percebe-se que as chuvas são mais intensas e frequentes no período que compreende os meses entre janeiro e julho, enquanto que nos meses de agosto e setembro as chuvas ocorrem de forma esporádica e com menos intensidade. Além disso, pode-se concluir que os dias de céu claro se concentram nos meses de pouca chuva.

A redução da transmitância ocasiona a diminuição da irradiância solar incidente no módulo FV, reduzindo então a produção FV. Sendo a irradiância solar incidente no módulo FV diferente da medida pelo piranômetro e utilizando essa última no cálculo de SRatio, os valores calculados de SRatio podem ser distorcidos, aparentando ter sujidade na superfície do módulo FV.

Na Figura 49 é mostrado um detalhamento maior de SRatio da planta FV 1 entre os meses de junho e setembro de 2018, objetivando uma melhor visualização dos valores de SRatio e da mudança de seu comportamento entre o período chuvoso e o de estiagem. Os valores de SRatio possuem tendência de decaimento no período de estiagem.

Figura 49 – Detalhamento dos valores de SRatio da planta FV 1 entre os meses de junho e setembro de 2018.

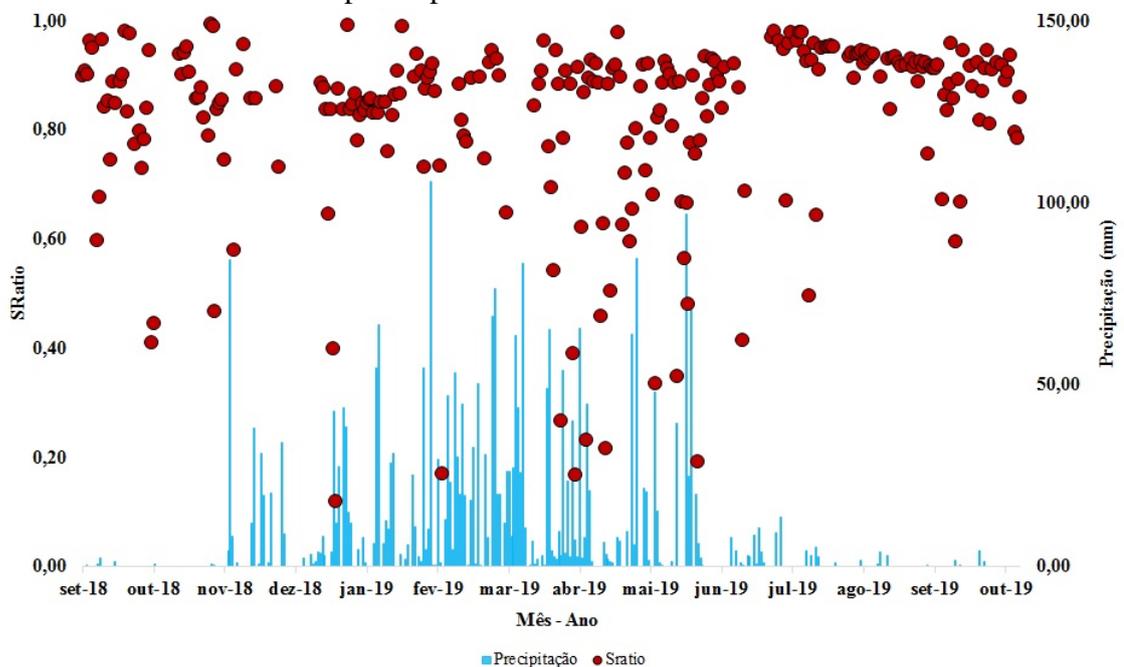


Os valores de SRatio são próximos de 1,00 no período chuvoso, porém à medida que os dias passam e não há chuva, SRatio decai atingindo um valor de 0,78 no dia 17/09/2018. Em alguns momentos, os valores de SRatio aumentam mesmo quando não há chuva registrada, podendo esses aumentos serem causados pela deposição de orvalho durante a noite na superfície FV, que remove a sujidade.

Percebe-se ainda que chuvas de pequenas intensidades ocorridas no começo do mês de agosto possuem efeito de limpeza nos módulos FV, mantendo o valor de SRatio próximo de 1,00. Entre os dias 02/06/2018 e o dia 17/09/2018, houve uma diminuição de SRatio de 17,90%, representando perdas no desempenho FV devido à sujidade.

Os valores de SRatio para o período avaliado na planta FV 2 são mostrados na Figura 50, assim como os dados de precipitação diária acumulada. As lacunas existentes nessa figura também são causadas pela ausência de dados dos parâmetros ambientais e devido às considerações feitas para o cálculo de SRatio. Os valores de SRatio, principalmente no período chuvoso, são dispersos.

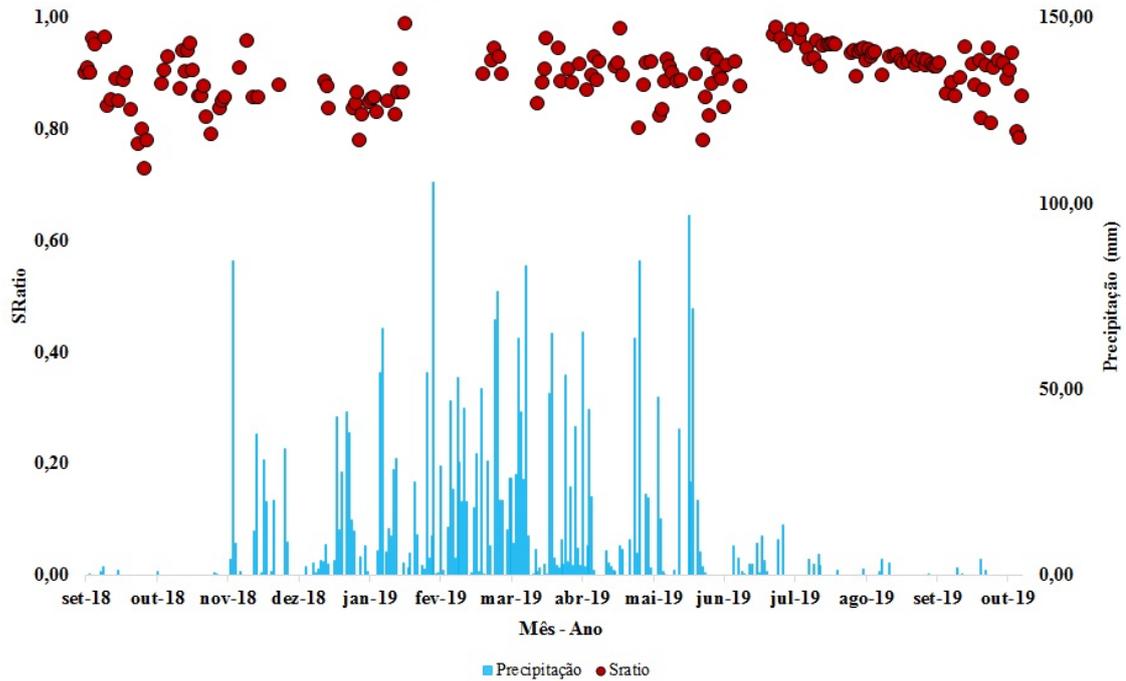
Figura 50 – Valores de SRatio para a planta FV 2.



Durante o intervalo analisado para a planta FV 2, que começa em 30/09/2018, percebe-se que o período chuvoso tem início em dezembro de 2018 e termina em julho de 2019, já em relação ao período seco, dois são observados, o primeiro varia de setembro até novembro de 2018 e o segundo período inicia em agosto e termina em setembro de 2019.

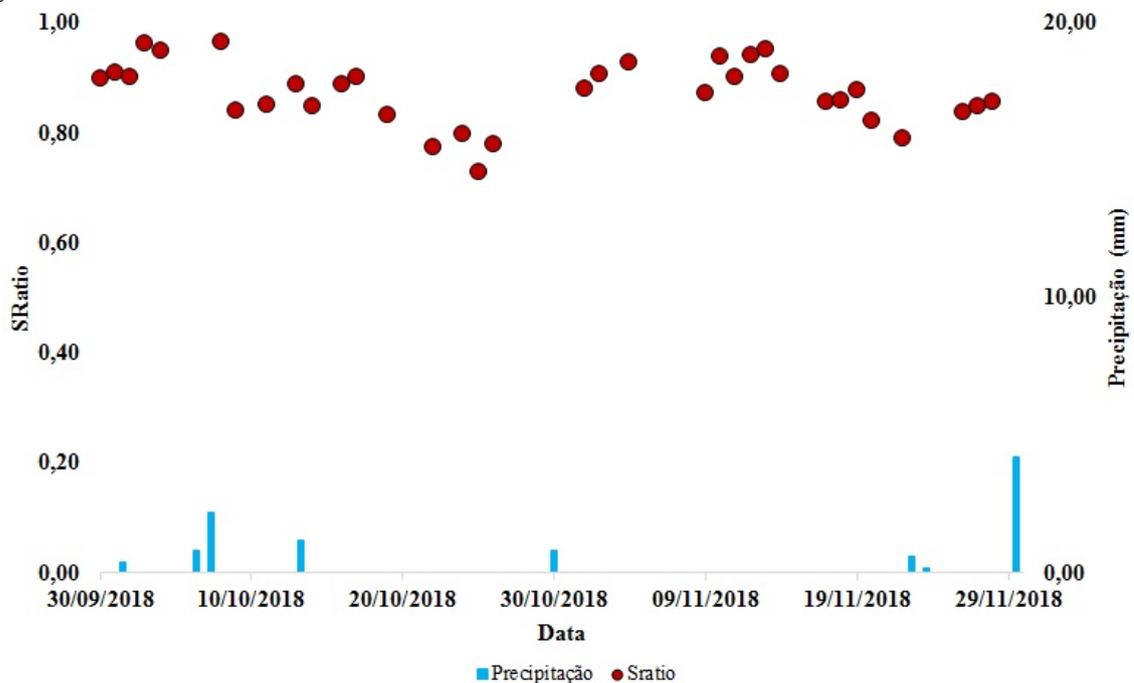
Além disso, no período chuvoso, assim como na análise da planta 1, os valores de SRatio oscilam e se dispersam muito. Para uma melhor visualização dos resultados, a consideração de que K_t (índice de claridade atmosférica) seja maior do que 0,7 também foi aplicada na análise de SRatio da planta 2. Os valores de SRatio da planta 2 após a consideração de K_t ser realizada são mostrados na Figura 51.

Figura 51 – Valores de SRatio para a planta FV 2 após a consideração de K_t ser realizada.



Na Figura 52 é mostrado um maior detalhamento durante o primeiro período seco que compreende o intervalo entre os dias 30/09/2018 e 30/11/2018, em que as chuvas diárias não acumulam nem 10,00 mm neste período.

Figura 52 – Detalhamento dos valores de SRatio entre os dias 30/09/2018 e 30/11/2018.



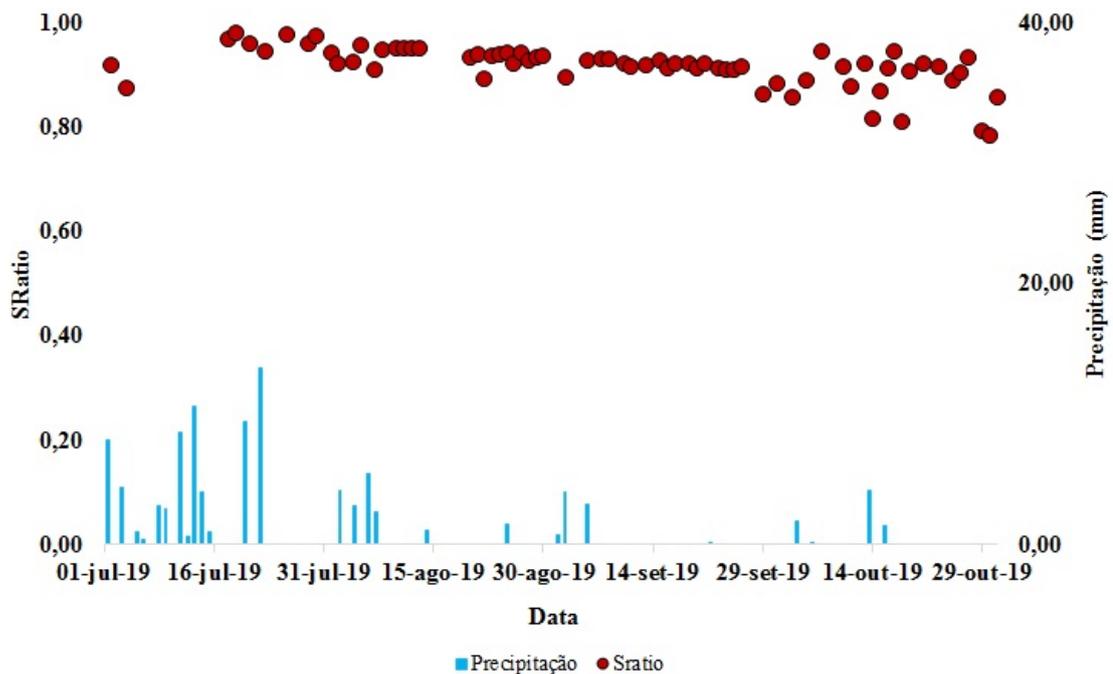
Entre 30/09 e 30/10, é visto que os valores de SRatio decaem à medida que os dias

passam e não há chuva. Após 13 dias de uma chuva de 1,20 mm ocorrida no dia 13/10, SRatio atinge um valor próximo de 0,80. Já analisando entre 30/10 e 30/11, é visto que no dia 30/10 ocorreu uma chuva de 0,80 mm, aumentando os valores de SRatio, que ficam próximos de 1,00.

Os valores de SRatio são mantidos próximos de 1,00 por 10 dias, aproximadamente, após a chuva do dia 30/10. Isso pode ter sido causado pela ressuspensão das partículas de sujidade ou pela remoção das partículas devido à formação do orvalho. Após 22 dias sem chuva, SRatio atinge valores próximos de 0,80. Após as chuvas dos dias 23 e 24/11 de 0,60 mm e 0,20 mm, respectivamente, os valores de SRatio aumentam.

Na Figura 53 é mostrado um maior detalhamento do segundo período seco, que compreende os meses entre agosto e outubro de 2019, porém com a análise sendo iniciada após um período chuvoso em julho do mesmo ano.

Figura 53 – Detalhamento dos valores de SRatio entre 01/07/2019 até 31/10/2019.



Nota-se que chuvas de pouca intensidade apresentam efeitos de limpeza nos módulos FV, mantendo os valores de SRatio praticamente constantes durante um certo período ou aumentando os valores de SRatio após um período seco. Entre 18/07/2019 e 31/10/2019, o valor de SRatio decaiu apenas 11,34% em 105 dias.

Os resultados encontrados estão de acordo com o esperado, pois segundo Kimber *et al.* (2016), a frequência da chuva é mais importante do que a quantidade acumulada por evento de chuva, em que chuvas de pequenas intensidades possuem efeitos significativos nos valores de

SRatio após um período de estiagem.

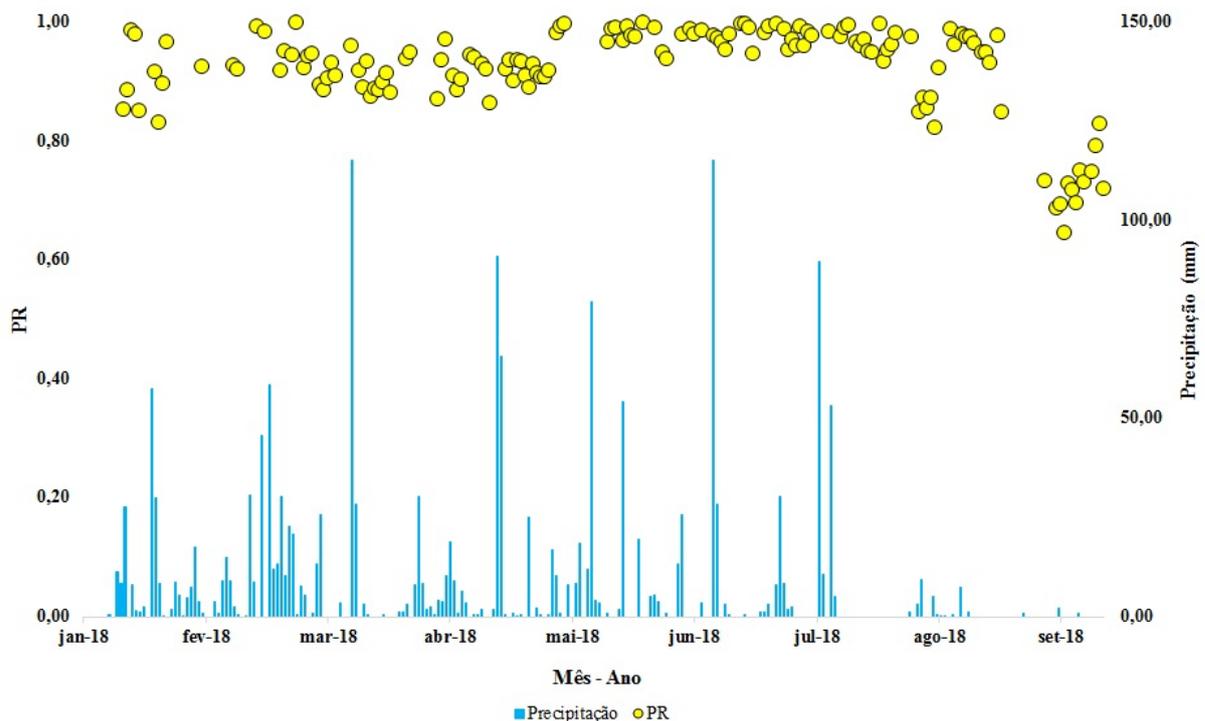
5.2.2.2 Relação de Desempenho - PR

PR pode ser calculado a partir da relação entre o rendimento final da planta FV (razão entre a eletricidade produzida e potência nominal da planta FV) e o rendimento de referência (razão entre a irradiação total no plano inclinado e a irradiação de referência no STC). O cálculo de PR dessa forma é normalizado pela irradiação solar com o objetivo de ser menos influenciado pelas condições climáticas, porém ainda apresenta variabilidade climática, como sensibilidade nas mudanças de temperatura.

Para o estudo da influência da sujidade, é necessário remover os efeitos da temperatura. Para isso, o conceito de PR corrigido que foi introduzido pelo NREL é utilizado na presente dissertação. Os valores de PR a partir dessa correção refletem um valor sazonal consistente de um local específico para qualquer tecnologia FV.

Os valores de PR para o período analisado da planta FV 1 são mostrados na Figura 54, ressaltando que as lacunas existentes são causadas pela ausência de dados dos parâmetros ambientais e devido às considerações feitas para o cálculo de PR. A análise da planta FV começa em 01/01/2018 e termina em 17/09/2018.

Figura 54 – Valores de PR juntamente com os valores de precipitação diária do período analisado da planta FV 1.



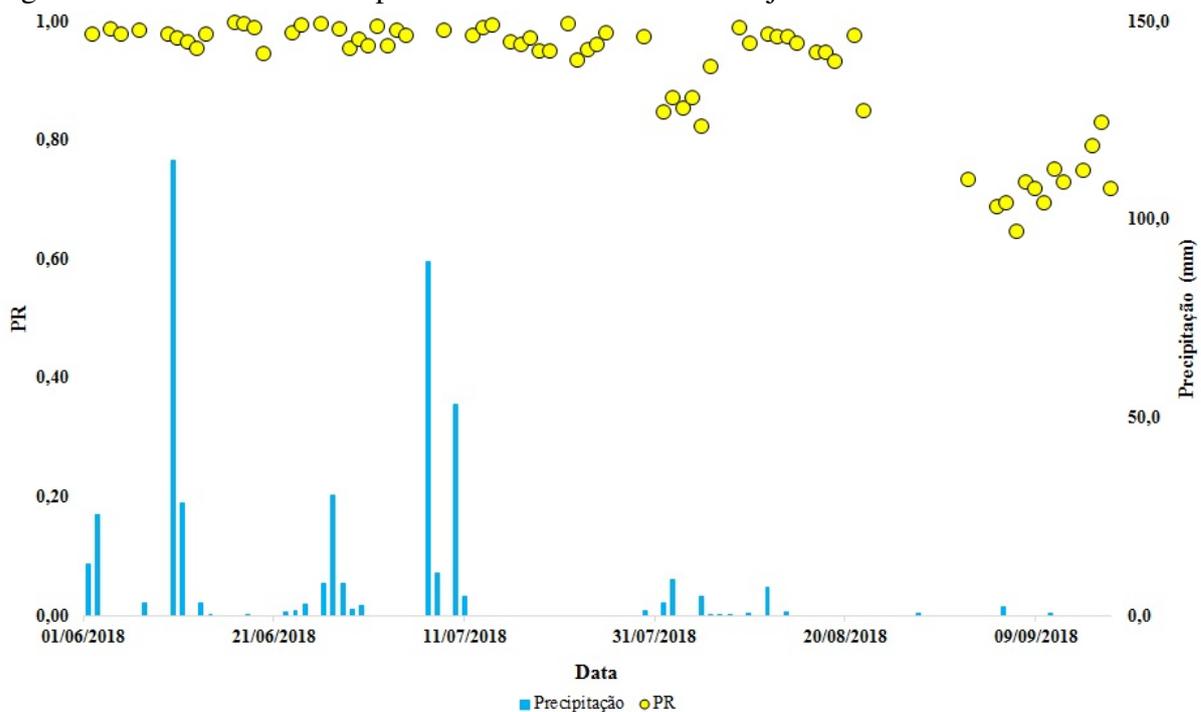
Primeiramente, é observado que os valores de PR variam e se dispersam menos do que os valores de SRatio. Isso acontece pois no cálculo de PR além da eletricidade gerada diária ser considerada, os efeitos das variabilidades climáticas são removidos para analisar somente os efeitos da sujidade no desempenho FV.

No período chuvoso, os valores de PR são próximos de 1,00 e são maiores do que no período de estiagem, que possuem tendência de decaimento e atingem valores próximos de 0,60. Assim, mesmo a irradiação solar alcançando índices diários maiores no período sem chuva (Figura 42), devido à sujidade, o desempenho da planta FV é melhor no período chuvoso.

Para visualização da mudança de comportamento de PR da planta FV 1 entre o período chuvoso e seco, na Figura 55 é mostrado um detalhamento maior dos valores de PR entre os meses de junho e setembro. É notado que chuvas frequentes mantêm PR próximo de 1,00 e que chuvas com pouco acúmulo de precipitação diária ocorridas após dias de estiagem possuem efeitos positivos em PR.

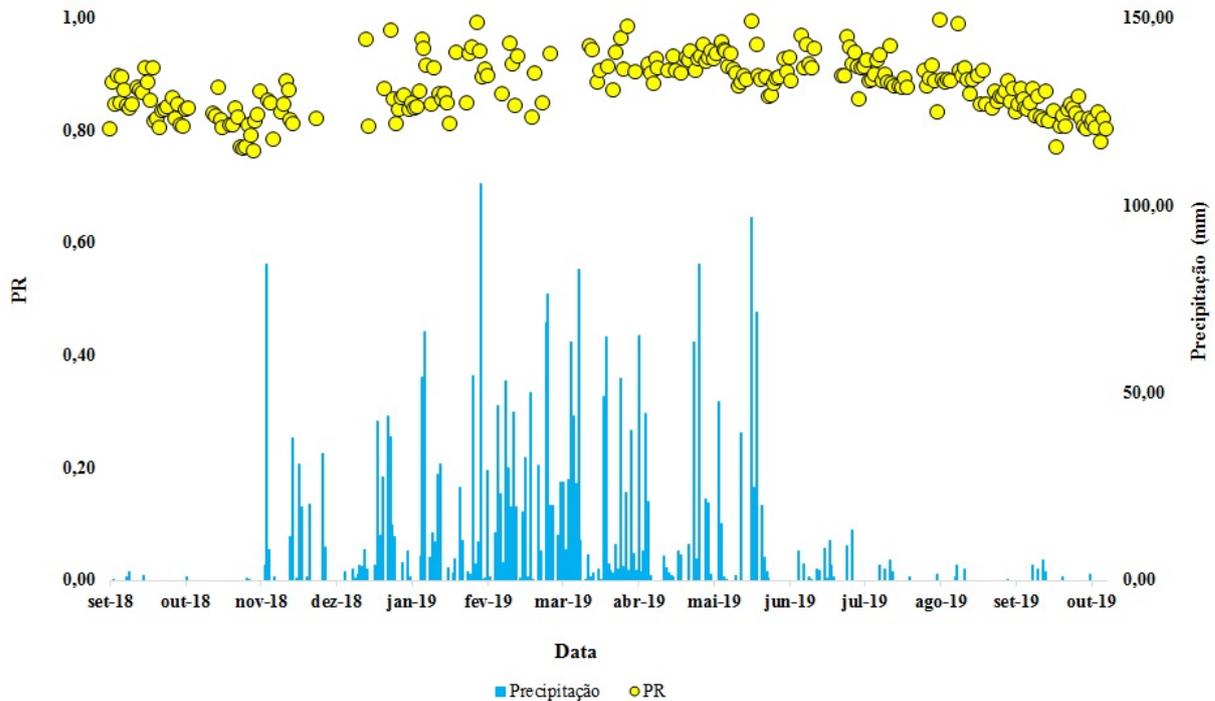
Após uma chuva de 2,20 mm no dia 06/09/2018, o valor de PR aumenta cerca de 13%, e o valor final de PR é de 0,72, representando um decaimento de 26,50% em relação ao dia 02/06/2018. O valor de decaimento de SRatio no mesmo período foi de 17,90%, salientando que quanto menor for o valor de SRatio mais o desempenho da planta FV é afetado.

Figura 55 – Valores de PR da planta FV 1 entre os meses de junho e setembro de 2018.



Os valores de PR para o período analisado da planta FV 2, que começa em 30/09/2018 e termina em 31/10/2019, são mostrados na Figura 56. Percebe-se uma sazonalidade no comportamento de PR, em que nos períodos de estiagem, PR possui os menores valores, enquanto que no período chuvoso, os maiores.

Figura 56 – Valores de PR juntamente com os valores de precipitação diária do período analisado da planta FV 2.



Assim como ocorre na planta FV 1, mesmo a irradiação solar alcançando índices diários maiores nos períodos de estiagem (Figuras 42 e 43), o desempenho da planta FV 2 é melhor no período chuvoso, em que PR é próximo de 1,00. Nos períodos de estiagem, PR atinge valores próximos de 0,80.

No primeiro período de estiagem, que começa em 30/09/2018 e termina em 30/11/2019, PR possui tendência de decaimento com o passar dos dias sem chuva, apresentando aumento quando chuvas de pequenas intensidades ocorrem. Vale ressaltar que o mesmo comportamento é observado com os valores de SRatio. Na Figura 57 são mostrados os valores de PR durante o primeiro período de estiagem observado.

Na Figura 58 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 sem chuva. O valor final do PR no dia 31/10/2019 é de 0,80, representando um

decaimento de 14%, aproximadamente, em relação ao dia 01/07/2019, cujo valor de PR é 0,93. O decaimento de SRatio no mesmo período é de 11,34%.

Figura 57 – Valores de PR da planta FV 2 entre 30/09/2018 e 30/11/2018.

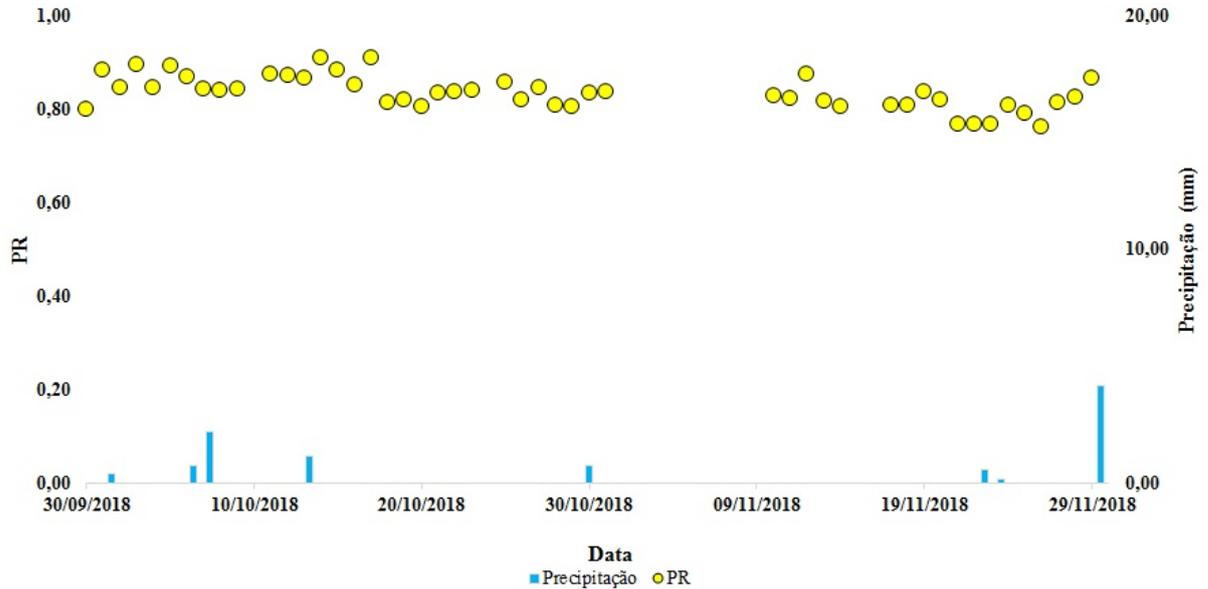
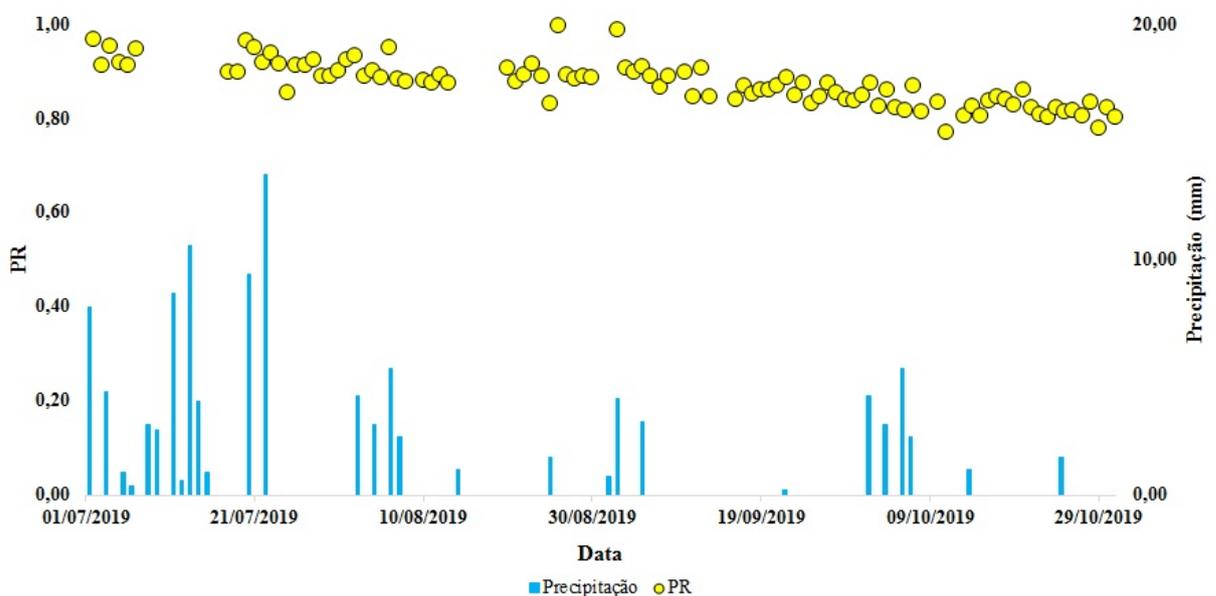


Figura 58 – Valores de PR da planta FV 2 entre 01/07/2019 e 31/10/2019.



5.3 Composição química da sujidade

A análise da composição química da sujidade das plantas FV foi realizada no LRX a partir das técnicas de DRX e FRX.

5.3.1 FRX (*Fluorescência de Raios-X*)

O equipamento utilizado nesta análise abrange o intervalo dos elementos químicos que começa no flúor e termina no urânio, não incluindo na análise, desse modo, elementos como carbono, nitrogênio, oxigênio, boro e hidrogênio. Além disso, foi solicitada uma análise semi-quantitativa da composição da sujidade, ou seja, de ordem de caracterização, com resultados na forma elementar (elementos químicos vistos de forma isolada).

Apesar de não ser possível analisar a presença do carbono nesta dissertação, frisa-se que possivelmente esse elemento está presente na sujidade dos módulos FV do LEA-UFC, devido à proximidade do laboratório com a Av. Mister Hull, que possui grande movimentação de veículos. É esperado que o carbono se apresente na forma de hidrocarbonetos (compostos formados apenas por carbono e hidrogênio), provindos da combustão realizada em motores de veículos.

Os elementos mais abundantes nas amostras coletadas das plantas FV 1 e 2 são: silício, cálcio, ferro, potássio e cloro, e os resultados estão de acordo com o esperado (Tabela 1). A diferença dos resultados entre as duas plantas é apenas a concentração de cada elemento, sendo essa diferença pequena. Isso é explicado pelo fato das características de instalação das plantas FV serem as mesmas. A porcentagem dos elementos químicos presentes na sujidade coletada das plantas FV é apresentada na Tabela 11.

Tabela 11 – Porcentagem dos elementos químicos encontrados nas sujidades das plantas FV.

| Elemento químico | Porcentagem (%) - Planta FV 1 | Porcentagem (%) - Planta FV 2 |
|------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Silício | 36,67 | 40,23 |
| Ferro | 19,55 | 17,28 |
| Cálcio | 18,27 | 17,18 |
| Alumínio | 8,87 | 10,30 |
| Potássio | 6,72 | 6,45 |
| Cloro | 4,18 | 2,81 |
| Titânio | 2,33 | 2,71 |
| Enxofre | 0,94 | 0,69 |
| Zinco | 0,85 | 0,62 |
| Manganês | 0,63 | 0,56 |
| Fósforo | 0,43 | 0,50 |
| Zircônio | 0,29 | 0,34 |

5.3.2 DRX (Difração de Raios-X)

Para auxiliar os resultados obtidos no DRX, o *software X-Pert Highscore Plus Panalytical B.V. Almelo, Holanda, © 2001 Koninklijke Philips Electronics N.V (All rights reserved)* foi utilizado para identificação das fases correspondentes aos compostos químicos das amostras de sujidade. Essa identificação é feita por meio da comparação entre a fase de cada composto químico do banco de dados do *software* com a fase obtida no DRX.

A análise da composição química realizada pelo *software X-Pert Highscore Plus* não é totalmente precisa, pois o programa trabalha com probabilidades, sendo então necessária a realização de uma análise chamada de refinamento estrutural (mais conhecido como Método Rietveld) para confirmação dos resultados. O Método Rietveld faz uso do modelo matemático de mínimos quadrados para refinar os perfis teóricos dos picos de difração até que esses perfis estejam próximos dos perfis medidos.

Na planta FV 1, foram identificados os seguintes componentes com alta probabilidade de ocorrência: SiO₂ (dióxido de silício - códigos de referência: 01-086-1629 e 01-082-1410), que pode ter como fonte a areia; Fe₂O₃ (óxido de ferro - código de referência: 00-052-1449), que pode ter como origem de elementos ferrosos; NaCl (cloreto de sódio - código de referência: 96-100-0042), possivelmente originária da salinidade oriunda do oceano; KAl₂(AlSi₃O₁₀)(OH)₂ (muscovita - (código de referência: 00-026-0911), mineral do grupo dos silicatos que pode ter como origem rochas sedimentares; C₆H₈O₆ (ácido ascórbico - código de referência: 00-046-1983), composto de origem orgânica.

Os resultados da planta FV 2 se assemelham com os resultados obtidos da planta FV 1, diferindo apenas na amplitude dos picos. Isso é explicado pelo fato de que as plantas FV possuem as mesmas características de instalação, estando localizadas no mesmo telhado com o mesmo ângulo de inclinação e direção.

Destaca-se que é possível a presença de mais compostos orgânicos ou inorgânicos com a presença de carbono, porém a análise não forneceu resultados concretos que indicassem a presença de compostos específicos.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo avaliou os efeitos da sujidade em plantas FV instaladas em Fortaleza, Ceará, tendo sido evidenciado no estado da arte apresentado que não houve nenhum estudo abrangente sobre a sujidade neste local. As métricas SRatio (relação de sujidade) e PR (relação de desempenho) foram utilizadas para avaliar a magnitude do impacto do acúmulo de sujeira em duas plantas FV localizadas no LEA-UFC, campus Pici.

A sazonalidade dos parâmetros ambientais (precipitação, irradiância solar, temperatura ambiente e dos módulos) durante os períodos estudados também foi analisada, sendo visto que, nos meses com as maiores precipitações registradas, os valores de temperatura ambiente e dos módulos FV apresentaram oscilações maiores do que no período seco. Em relação a irradiação solar, os meses com os menores níveis de irradiação foram os meses com os maiores registros de chuva, enquanto que o período seco possuiu os maiores níveis de irradiação.

As sujidades das plantas FV 1 e 2 não se apresentaram distribuídas de forma uniforme e, desse modo, SRatio foi calculado a partir dos valores de potência produzida. A análise do comportamento de SRatio para as duas plantas FV foi feita em conjunto com os dados diários de precipitação. Foi visto que SRatio não foi uma boa métrica de análise do impacto da sujidade no desempenho FV no período chuvoso, pois além de seu valor não ser condizente com o esperado, vários filtros foram necessários para uma melhor visualização de seu comportamento. Os valores não condizentes de SRatio podem ter sido causados pelas condições do céu ou pelas gotículas de chuva que ficaram depositadas na superfície FV.

No período de estiagem, os valores de SRatio das duas plantas FV diminuíram à medida que os dias passaram e não houve chuva, sendo observado que, em alguns dias, os valores aumentaram mesmo sem nenhuma chuva registrada. Esse aumento nos valores de SRatio pode ter sido causado pela remoção da sujidade da superfície FV devido à formação do orvalho. Chuvas de pequenas intensidades possuíram efeitos de limpeza nos módulos FV e aumentaram os valores de SRatio.

Os valores de PR foram menos dispersos do que os valores de SRatio, devido à metodologia empregada que foi desenvolvida pelo NREL que calcula os valores de PR removendo os efeitos das variáveis climáticas, representando uma boa métrica de avaliação. Nos períodos chuvosos, os valores de PR foram próximos de 1,00, e à medida que os dias passaram e não tinha chuva, os valores decaíram.

Na planta FV 1, entre os dias 02/06/2018 e 17/09/2018, SRatio decaiu 17,90%,

representando aumento na sujidade, que implicou em uma diminuição de 26,50% de PR. Além disso, após uma chuva de 2,20 mm, o valor de PR aumentou 13%, aproximadamente. Na planta FV 2, entre os dias 01/07/2019 e 31/10/2019, SRatio decaiu 11,34%, enquanto PR diminuiu cerca de 14%.

Em relação à análise da composição química da sujidade, compostos e elementos químicos semelhantes foram encontrados a partir das técnicas DRX e FRX, respectivamente. A semelhança dos resultados obtidos é explicada pelo fato de que as plantas FV estão no mesmo telhado, possuem a mesma orientação e direção. Foram encontrados compostos químicos como dióxido de silício e óxido de ferro, enquanto silício, alumínio, cálcio e ferro foram os elementos químicos mais abundantes.

REFERÊNCIAS

- ABSOLAR. **Associação Brasileira de Energia Solar - Infográfico ABSOLAR**. 2019. Disponível em: <http://www.absolar.org.br/infografico-absolar-.html>. Acesso em: 26 ago. 2019.
- BAGNOLD, R. A. The transport of sand by wind. **The Geographical Journal**, JSTOR, v. 89, n. 5, p. 409–438, 1937.
- BARBOSA, E. R.; FARIA, M. d. S. F. D.; GONTIJO, F. d. B. Influência da sujeira na geração fotovoltaica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR (CBENS), 2018, Gramado. **Anais do VII Congresso Brasileiro de Energia Solar**. Gramado: CBENS, 2018.
- BLOTT, S. J.; PYE, K. Particle size scales and classification of sediment types based on particle size distributions: Review and recommended procedures. **Sedimentology**, Wiley Online Library, v. 59, n. 7, p. 2071–2096, 2012.
- CALLISTER, W. **Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução**. [S. l.]: Grupo Gen-LTC, 2000.
- CHAICHAN, M. T.; MOHAMMED, B. A.; KAZEM, H. A. Effect of pollution and cleaning on photovoltaic performance based on experimental study. **International Journal of Scientific and Engineering Research**, v. 6, n. 4, p. 594–601, 2015.
- CHAVES, M. de P.; DUPONT, I. M.; CARVALHO, P. C. M. de; ARAUJO, D. N. Estudo sobre sombreamento em planta fotovoltaica localizada em zona urbana de fortaleza-ce. **Revista Tecnologia**, v. 40, n. 2, 2019.
- CLIMATE-DATA. **Clima Fortaleza**. 2019. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/ceara/fortaleza-2031/>. Acesso em: 29 set. 2019.
- CNES. **World first French seis instrument detects ‘marsquake’**. 2019. Disponível em: <https://presse.cnes.fr/en/world-first-french-seis-instrument-detects-marsquake>. Acesso em: 21 mai. 2019.
- COMMISSION, I. E. *et al.* Photovoltaic system performance monitoring-guidelines for measurement, data exchange and analysis. **IEC 61724**, 1998.
- CONCEIÇÃO, R.; SILVA, H. G.; MIRÃO, J.; GOSTEIN, M.; FIALHO, L.; NARVARTE, L.; COLLARES-PEREIRA, M. Saharan dust transport to europe and its impact on photovoltaic performance: A case study of soiling in portugal. **Solar Energy**, Elsevier, v. 160, p. 94–102, 2018.
- COSTA, S. C.; DINIZ, A. S. A.; BRAGA, D. S.; KAZMERSKI, L. L.; MAIA, C. B.; CAMATTA, V.; CAMPOS, C. D.; HANRIOT, S. d. M. Soiling loss in pv modules for various climate zones in brazil: Monitoring, soiling ratios, and pv technology differences. In: PHOTOVOLTAIC SPECIALISTS CONFERENCE (PVSC), 2019, Chicago. **Proceedings of IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)**. Chicago: IEEE, 2019.
- COSTA, S. C.; DINIZ, A. S. A.; KAZMERSKI, L. L. Solar energy dust and soiling r&d progress: Literature review update for 2016. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 82, p. 2504–2536, 2018.

- COSTA, S. C. S. **Estudo abrangente do efeito da sujidade no desempenho de módulos e sistemas fotovoltaicos**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica: Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.
- COSTA, S. C. S.; DINIZ, A. S. A. C.; SANTANA, V. A. C.; MULLER, M.; MICHELI, L.; KAZMERSKI, L. L. Avaliação da sujidade em módulos fotovoltaicos em minas gerais, brasil. In: VI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR (CBENS), 2016, Belo Horizonte. **Anais do Congresso Brasileiro de Energia Solar**. Belo Horizonte: CBENS, 2016. p. 1–7.
- DARWISH, Z. A.; KAZEM, H. A.; SOPIAN, K.; AL-GOUL, M.; ALAWADHI, H. Effect of dust pollutant type on photovoltaic performance. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 41, p. 735–744, 2015.
- DEB, D.; BRAHMBHATT, N. L. Review of yield increase of solar panels through soiling prevention, and a proposed water-free automated cleaning solution. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 82, p. 3306–3313, 2018.
- DECEGLIE, M. G.; MULLER, M.; DEFREITAS, Z.; KURTZ, S. A scalable method for extracting soiling rates from pv production datae. In: PHOTOVOLTAIC SPECIALISTS CONFERENCE (PVSC), 2016, Portland. **Proceedings of IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference**. Portland: IEEE, 2016. p. 2061–2065.
- DICIONÁRIO, P. **Orvalho**. 2019. Disponível em: <https://dicionario.priberam.org/orvalho>. Acesso em: 22 mai.2019.
- DIERAUF, T.; GROWITZ, A.; KURTZ, S.; CRUZ, J. L. B.; RILEY, E.; HANSEN, C. **Weather-corrected performance ratio**. [S. l.], 2013.
- DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes**. [S. l.]: Wiley New York, 1991.
- DUPONT, I. M.; CARVALHO, P. C.; JUCÁ, S. C.; NETO, J. S. Novel methodology for detecting non-ideal operating conditions for grid-connected photovoltaic plants using internet of things architecture. **Energy Conversion and Management**, Elsevier, v. 200, p. 112078, 2019.
- EPE. **Empresa de Pesquisa Energética - Balanço Energético Nacional**. 2019. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>. Acesso em: 26 ago.2019.
- FERRADA, P.; OLIVARES, D.; CAMPO, V. del; MARZO, A.; ARAYA, F.; CABRERA, E.; LLANOS, J.; CORREA-PUERTA, J.; PORTILLO, C.; SILVA, D. R. *et al.* Physicochemical characterization of soiling from photovoltaic facilities in arid locations in the atacama desert. **Solar Energy**, Elsevier, v. 187, p. 47–56, 2019.
- FIGGIS, B.; ENNAOUI, A.; AHZI, S.; RÉMOND, Y. Review of pv soiling particle mechanics in desert environments. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 76, p. 872–881, 2017.
- FRAGA, M. M.; CAMPOS, B. L. de O.; ALMEIDA, T. B. de; FONSECA, J. M. F. da; LINS, V. d. F. C. Analysis of the soiling effect on the performance of photovoltaic modules on a soccer stadium in minas gerais, brazil. **Solar Energy**, Elsevier, v. 163, p. 387–397, 2018.

- GHOLAMI, A.; KHAZAEE, I.; ESLAMI, S.; ZANDI, M.; AKRAMI, E. Experimental investigation of dust deposition effects on photo-voltaic output performance. **Solar Energy**, Elsevier, v. 159, p. 346–352, 2018.
- GHOSH, S.; YADAV, V. K.; MUKHERJEE, V. Impact of environmental factors on photovoltaic performance and their mitigation strategies—a holistic review. **Renewable Energy Focus**, Elsevier, v. 28, p. 153–172, 2019.
- GOOGLE. **Google Earth Software**. 2019. Disponível em: <http://earth.google.com/>. Acesso em: 06 ago. 2019.
- GOOSSENS, D.; KERSCHAEVER, E. V. Aeolian dust deposition on photovoltaic solar cells: the effects of wind velocity and airborne dust concentration on cell performance. **Solar Energy**, Elsevier, v. 66, n. 4, p. 277–289, 1999.
- GOSTEIN, M.; DÜSTER, T.; THUMAN, C. Accurately measuring pv soiling losses with soiling station employing module power measurements. In: PHOTOVOLTAIC SPECIALISTS CONFERENCE (PVSC), 2015, New Orleans. **Proceedings of IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)**. New Orleans: IEEE, 2015. p. 1–4.
- GOSTEIN, M.; LITTMANN, B.; CARON, J. R.; DUNN, L. Comparing pv power plant soiling measurements extracted from pv module irradiance and power measurements. In: PHOTOVOLTAIC SPECIALISTS CONFERENCE (PVSC), 2013, Tampa. **Proceedings of IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)**. Tampa: IEEE, 2013. p. 3004–3009.
- GOSTEIN, M.; PASSOW, K.; DECEGLIE, M. G.; MICHELI, L.; STUEVE, B. Local variability in pv soiling rate. In: WORLD CONFERENCE ON PHOTOVOLTAIC ENERGY CONVERSION (WCPEC), 2018, Waikoloa Village. **Proceedings of IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion**. Waikoloa Village: IEEE, 2018. p. 3421–3425.
- GREELEY, R.; IVERSEN, J. D. **Wind as a geological process: on Earth, Mars, Venus and Titan**. [S. l.]: CUP Archive, 1987. v. 4.
- GREENPEACE. **Revolução Energética**. São Paulo, 2016.
- HACHICHA, A. A.; AL-SAWAFTA, I.; SAID, Z. Impact of dust on the performance of solar photovoltaic (pv) systems under united arab emirates weather conditions. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 141, p. 287–297, 2019.
- HAMMOND, R.; SRINIVASAN, D.; HARRIS, A.; WHITFIELD, K.; WOHLGEMUTH, J. Effects of soiling on pv module and radiometer performance. In: IEEE PHOTOVOLTAIC SPECIALISTS CONFERENCE, 1997, Anaheim. **Proceedings of the Twenty Sixth IEEE Photovoltaic Specialists Conference**. Anaheim: IEEE, 1997. p. 1121–1124.
- HAMMOUD, M.; SHOKR, B.; ASSI, A.; HALLAL, J.; KHOURY, P. Effect of dust cleaning on the enhancement of the power generation of a coastal pv-power plant at zahrani lebanon. **Solar Energy**, Elsevier, v. 184, p. 195–201, 2019.
- HICKEL, B. M.; DESCHAMPS, E. M.; NASCIMENTO, L.; RÜTHER, R.; SIMÕES, G. C. Análise da influência do acúmulo de sujeira sobre diferentes tecnologias de módulos fv: Revisão e medições de campo. In: VI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR (CBENS),

2016, Belo Horizonte. **Anais do Congresso Brasileiro de Energia Solar**. Belo Horizonte: CBENS, 2016.

IEA. **International Energy Agency - Snapshot of Global Markets**. 2019. Disponível em: http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/statistics/IEA-PVPS_T1_35_Snapshot2019-Report.pdf. Acesso em: 15 jul. 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, p. 239–254, 2018.

IQBAL, M. **An introduction to solar radiation**. [S. l.]: Elsevier, 2012.

ISAIFAN, R. J.; JOHNSON, D.; ACKERMANN, L.; FIGGIS, B.; AYOUB, M. Evaluation of the adhesion forces between dust particles and photovoltaic module surfaces. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, Elsevier, v. 191, p. 413–421, 2019.

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, p. 876–891, 2017.

JASZCZUR, M.; TENETA, J.; STYSZKO, K.; HASSAN, Q.; BURZYŃSKA, P.; MARCINEK, E.; ŁOPIAN, N. The field experiments and model of the natural dust deposition effects on photovoltaic module efficiency. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 9, p. 8402–8417, 2019.

JAVED, W.; WUBULIKASIMU, Y.; FIGGIS, B.; GUO, B. Characterization of dust accumulated on photovoltaic panels in doha, qatar. **Solar Energy**, Elsevier, v. 142, p. 123–135, 2017.

JIANG, H.; LU, L.; SUN, K. Experimental investigation of the impact of airborne dust deposition on the performance of solar photovoltaic (pv) modules. **Atmospheric environment**, Elsevier, v. 45, n. 25, p. 4299–4304, 2011.

JINKOSOLAR. **JKM330PP-72 315-330 Watt**. [S. l.], 2016. Disponível em: <https://www.vattenfall.se/4a4fd3/globalassets/smarta-hem/solceller/produktblad/new-2019-08-28/244.pdf>. Acesso em: 24 ago. 2019.

JOHN, J. J. **Characterization of soiling loss on photovoltaic modules, and development of a novel cleaning system**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Instituto de Tecnologia Indiano, Bombaim, Bombaim, 2015.

JONES, R.; POLLOCK, H. M.; CLEAVER, J. A.; HODGES, C. S. Adhesion forces between glass and silicon surfaces in air studied by afm: Effects of relative humidity, particle size, roughness, and surface treatment. **Langmuir**, ACS Publications, v. 18, n. 21, p. 8045–8055, 2002.

KALDELLIS, J.; KOKALA, A. Quantifying the decrease of the photovoltaic panels' energy yield due to phenomena of natural air pollution disposal. **Energy**, Elsevier, v. 35, n. 12, p. 4862–4869, 2010.

KAZEM, H. A.; CHAICHAN, M. T. Experimental analysis of the effect of dust's physical properties on photovoltaic modules in northern oman. **Solar Energy**, Elsevier, v. 139, p. 68–80, 2016.

KAZEM, H. A.; CHAICHAN, M. T. The effect of dust accumulation and cleaning methods on pv panels' outcomes based on an experimental study of six locations in northern oman. **Solar Energy**, Elsevier, v. 187, p. 30–38, 2019.

KAZMERSKI, L. L.; DINIZ, A. S. A.; MAIA, C. B.; VIANA, M. M.; COSTA, S. C.; BRITO, P. P.; CAMPOS, C. D.; NETO, L. V. M.; HANRIOT, S. de M.; CRUZ, L. R. de O. Fundamental studies of adhesion of dust to pv module surfaces: Chemical and physical relationships at the microscale. **IEEE Journal of Photovoltaics**, IEEE, v. 6, n. 3, p. 719–729, 2016.

KIMBER, A.; MITCHELL, L.; NOGRADI, S.; WENGER, H. The effect of soiling on large grid-connected photovoltaic systems in california and the southwest region of the united states. In: WORLD CONFERENCE ON PHOTOVOLTAIC ENERGY CONFERENCE, 2006, Waikoloa. **Proceedings of IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conference**. Waikoloa: IEEE, 2006. p. 2391–2395.

KIMBER, A.; MITCHELL, L.; NOGRADI, S.; WENGER, H. Determining the effects of environment and atmospheric parameters on pv field performance. In: PHOTOVOLTAIC SPECIALISTS CONFERENCE (PVSC), 2016, Portland. **Proceedings of IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference**. Portland: IEEE, 2016. p. 1724–1729.

KOK, J. F.; PARTELLI, E. J.; MICHAELS, T. I.; KARAM, D. B. The physics of wind-blown sand and dust. **Reports on progress in Physics**, IOP Publishing, v. 75, n. 10, p. 106901, 2012.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. *Klimate der erde*. gotha: Verlag justus perthes. **Wall-map 150cmx200cm**, 1928.

KREZINGER, A.; BUGS, R. C. Radiasol 2: software para sintetizar dados de radiação solar. In: CONFERÊNCIA LATINO AMERICANA DE ENERGIA SOLAR (ISES CLAR) E SIMPÓSIO PERUANO DE ENERGIA SOLAR (SPES), 2010, Cusco. **Anais da IV Conferência Latino Americana de Energia Solar e XVII Simpósio Peruano de Energia Solar**. Cusco: SPES, 2010. p. 1–7.

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.

LORENZO, E.; ARAUJO, G. L.; CUEVAS, A. **Electricidad solar: ingeniería de los sistemas fotovoltaicos**. [S. l.]: Progensa Seville, 1994.

LRX. **Laboratório de Raio-xE!!!** 2019. Disponível em: <http://www.raiosx.ufc.br/site/>. Acesso em: 19 jan. 2020.

MANI, M.; PILLAI, R. Impact of dust on solar photovoltaic (pv) performance: Research status, challenges and recommendations. **Renewable and sustainable energy reviews**, Elsevier, v. 14, n. 9, p. 3124–3131, 2010.

MARION, B.; ADELSTEIN, J.; BOYLE, K. e.; HAYDEN, H.; HAMMOND, B.; FLETCHER, T.; CANADA, B.; NARANG, D.; KIMBER, A.; MITCHELL, L. *et al.* Performance parameters for grid-connected pv systems. In: PHOTOVOLTAIC SPECIALISTS CONFERENCE (PVSC), 2005, New Orleans. **Proceedings of Conference Record of the Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conference**. New Orleans: IEEE, 2005. p. 1601–1606.

- MAXWELL, E. L. **A quasi-physical model for converting hourly global horizontal to direct normal insolation**. [S. l.]: Solar Energy Research Institute, 1987.
- MENOUFI, K.; FARGHAL, H. F.; FARGHALI, A. A.; KHEDR, M. H. Dust accumulation on photovoltaic panels: a case study at the east bank of the Nile (Beni-Suef, Egypt). **Energy Procedia**, Elsevier, v. 128, p. 24–31, 2017.
- MICHELI, L.; CABALLERO, J. A.; FERNANDEZ, E. F.; SMESTAD, G. P.; NOFUENTES, G.; MALLICK, T. K.; ALMONACID, F. Correlating photovoltaic soiling losses to waveband and single-value transmittance measurements. **Energy**, Elsevier, v. 180, p. 376–386, 2019.
- MICHELI, L.; DECEGLIE, M. G.; MULLER, M. Predicting photovoltaic soiling losses using environmental parameters: An update. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, Wiley Online Library, v. 27, n. 3, p. 210–219, 2019.
- MICHELI, L.; MULLER, M. An investigation of the key parameters for predicting PV soiling losses. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, Wiley Online Library, v. 25, n. 4, p. 291–307, 2017.
- MICHELI, L.; MULLER, M. T.; DECEGLIE, M. G.; RUTH, D. **Time Series Analysis of Photovoltaic Soiling Station Data: Version 1.0, August 2017**. [S. l.], 2017.
- MOSTEFAOUI, M.; ZIANE, A.; BOURAIOU, A.; KHELIFI, S. Effect of sand dust accumulation on photovoltaic performance in the Saharan environment: southern Algeria (Adrar). **Environmental Science and Pollution Research**, Springer, v. 26, n. 1, p. 259–268, 2019.
- NEPAL, P.; KOREVAAR, M.; ZIAR, H.; ISABELLA, O.; ZEMAN, M. Accurate soiling ratio determination with incident angle modifier for PV modules. **IEEE Journal of Photovoltaics**, IEEE, v. 9, n. 1, p. 295–301, 2018.
- NISHIMOTO, S.; BHUSHAN, B. Bioinspired self-cleaning surfaces with superhydrophobicity, superoleophobicity, and superhydrophilicity. **RSC Advances**, Royal Society of Chemistry, v. 3, n. 3, p. 671–690, 2013.
- PAUDYAL, B. R.; SHAKYA, S. R. Dust accumulation effects on efficiency of solar PV modules for off-grid purpose: A case study of Kathmandu. **Solar Energy**, Elsevier, v. 135, p. 103–110, 2016.
- PAVAN, A. M.; MELLIT, A.; PIERI, D. D. The effect of soiling on energy production for large-scale photovoltaic plants. **Solar Energy**, Elsevier, v. 85, n. 5, p. 1128–1136, 2011.
- QUAN, Y.-Y.; ZHANG, L.-Z.; QI, R.-H.; CAI, R.-R. Self-cleaning of surfaces: the role of surface wettability and dust types. **Scientific Reports**, Nature Publishing Group, v. 6, p. 38239, 2016.
- RABELO, A. D. S.; COSTA, D. A. C.; CARVALHO, P. C. M. d.; TÁVORA, V. P. Estudo sobre sujidade em planta fotovoltaica localizada em zona urbana. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA (CBGD), 2010, Cusco. **Anais do Congresso Brasileiro de Geração Distribuída**. Fortaleza: CBGD, 2017. p. 1–7.
- SAID, S. A.; HASSAN, G.; WALWIL, H. M.; AL-AQEELI, N. The effect of environmental factors and dust accumulation on photovoltaic modules and dust-accumulation mitigation strategies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 82, p. 743–760, 2018.

SAIDAN, M.; ALBAALI, A. G.; ALASIS, E.; KALDELLIS, J. K. Experimental study on the effect of dust deposition on solar photovoltaic panels in desert environment. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 92, p. 499–505, 2016.

SANDIA, N. L. **PVPerformance Modeling Collaborative**. 2019. Disponível em: <https://pvpmc.sandia.gov/>. Acesso em: 02 out. 2019.

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, p. 698–733, 2013.

SCHWELA, D. H.; MORAWSKA, L.; KOTZIAS, D. Guidelines for concentration and exposure-response measurement of fine and ultra fine particulate matter for use in epidemiological studies. In: **Guidelines for concentration and exposure-response measurement of fine and ultra fine particulate matter for use in epidemiological studies**. [S. l.: s. n.], 2002.

SERBOT. **GEKKO Solar Robot**. 2019. Disponível em: <https://www.serbot.ch/en/solar-panels-cleaning/gekko-solar-farm-robot>. Acesso em: 06 ago. 2019.

SHAO, Y. **Physics and modelling of wind erosion**. [S. l.]: Springer Science & Business Media, 2008. v. 37.

SILVA, A. M.; MELO, F. C.; REIS, J. H.; FREITAS, L. C. The study and application of evaluation methods for photovoltaic modules under real operational conditions, in a region of the brazilian southeast. **Renewable energy**, Elsevier, v. 138, p. 1189–1204, 2019.

SILVEIRA, C. B. **Sistemas e Softwares SCADA**. 2019. Disponível em: <https://www.citisystems.com.br/software-scada/>. Acesso em: 01 out. 2019.

SMA, S. T. **Performance ratio - Quality factor for the PV plant**. [S. l.], 2019. Disponível em: <http://files.sma.de/dl/7680/Perfratio-TI-en-11.pdf>. Acesso em: 24 ago. 2019.

SPACETODAY. **Inédito! Registrado o primeiro terremoto em marte!!!** 2019. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=ampsQ2jrcBo>. Acesso em: 21 mai. 2019.

TOTH, S.; MULLER, M.; MILLER, D. C.; MOUTINHO, H.; TO, B.; MICHELI, L.; LINGER, J.; ENGTRAKUL, C.; EINHORN, A.; SIMPSON, L. Soiling and cleaning: Initial observations from 5-year photovoltaic glass coating durability study. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, Elsevier, v. 185, p. 375–384, 2018.

ULLAH, A.; IMRAN, H.; MAQSOOD, Z.; BUTT, N. Z. Investigation of optimal tilt angles and effects of soiling on pv energy production in pakistan. **Renewable energy**, Elsevier, v. 139, p. 830–843, 2019.

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, p. 338–347, 2016.

YINGLISOLAR. **YGE 60 Cell: 40mm Series**. [S. l.], 2008. Disponível em: <https://k2solar.com.au/wp-content/uploads/Yingli-Solar-POLY-YL250P-29b-Data-Sheet11LR.pdf>. Acesso em: 24 ago. 2019.

ZEREINI, F.; WISEMAN, C. L. **Urban airborne particulate matter**. [S. l.]: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.

ZITOUNI, H.; MERROUNI, A. A.; REGRAGUI, M.; BOUAICHI, A.; HAJJAJ, C.; GHENNIQUI, A.; IKKEN, B. Experimental investigation of the soiling effect on the performance of monocrystalline photovoltaic systems. **Energy Procedia**, Elsevier, v. 157, p. 1011–1021, 2019.

APÊNDICE A – TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, sugere-se:

- Avaliar os dados da planta FV 1 para um período de pelo menos 12 meses;
- Calcular as taxas de sujidades (*SRate*) das plantas FV;
- Avaliar o impacto do vento e da umidade relativa do ar nas métricas de sujidade;
- Analisar o tamanho das partículas de sujidade;
- Avaliar as métricas, assim como a composição físico-química da sujidade para diferentes lugares do Brasil.

APÊNDICE B – ARTIGOS PUBLICADOS E ENVIADOS

- Artigos publicados:
 - ARAUJO, D. N.; DUPONT, I. M. ; CARVALHO, P. C. M. . Impactos da Sujidade no Desempenho de uma Planta FV em Ambiente Urbano: Estudo para Fortaleza, CE. In: Congresso Brasileiro de Geração Distribuída (CBGD), 2019, Recife. Congresso Brasileiro de Geração Distribuída (CBGD), 2019.
 - ARAUJO, D. N; CARVALHO, P. C. M. ; DUPONT, I. M. Efeitos da acumulação de sujeira sobre o desempenho de módulos fotovoltaicos. REVISTA TECNOLOGIA (UNIFOR), v. 41, p. 1-23, 2019. (DOI: 10.5020/23180730.2019.9414).
- Artigos enviados:
 - ARAUJO, D. N.; FILHO, M. F. F; CARVALHO, P. C. M; SASAKI, J. M. Avaliação química da sujidade depositada em plantas fotovoltaicas instaladas na zona urbana de Fortaleza. In: Congresso Brasileiro de Eenergia Solar (CBENS), 2020, Fortaleza.
 - ARAUJO, D. N; COSTA, S. C. S; DUPONT, I. M.; CARVALHO, P. C. M. Impactos da sujidade e efeitos da limpeza no desempenho de módulos fotovoltaicos. In: Congresso Brasileiro de Eenergia Solar (CBENS), 2020, Fortaleza.