



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

JOSÉ JANIERE SILVA DE SOUZA

**IMPACTOS DA SUJIDADE NA GERAÇÃO E TEMPERATURA DE UMA PLANTA
FOTOVOLTAICA EM ÁREA URBANA DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO**

FORTALEZA

2025

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

S238i Souza, José Janiere Silva de.

Impactos da sujidade na geração e temperatura de uma planta fotovoltaica em área urbana do semiárido brasileiro / José Janiere Silva de Souza. – 2025.

186 f. : il. color.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2025.

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

1. Comportamento Térmico. 2. Desempenho Elétrico. 3. Semiárido. 4. Sistemas FV. 5. Sujidade. I.
Título.

CDD 621.3

JOSÉ JANIERE SILVA DE SOUZA

**IMPACTOS DA SUJIDADE NA GERAÇÃO E TEMPERATURA DE UMA PLANTA
FOTOVOLTAICA EM ÁREA URBANA DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Energias Renováveis e Sistemas Elétricos.

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

FORTALEZA

2025

JOSÉ JANIERE SILVA DE SOUZA

**IMPACTOS DA SUJIDADE NA GERAÇÃO E TEMPERATURA DE UMA PLANTA
FOTOVOLTAICA EM ÁREA URBANA DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Energias Renováveis e Sistemas Elétricos.

Aprovada em: ____ / ____ / ____.

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)

Profa. Dra. Antônia Sônia A. Cardoso Diniz
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC-Minas)

Prof. Dr. Lutero Carmo de Lima
Universidade Estadual do Ceará (UECE)

Profa. Dra. Renata Imaculada Soares Pereira
Instituto Federal de Alagoas (IFAL)

A Deus.

A minha família e amigos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela dádiva da vida, pela coragem e pela força que me permitiram superar os desafios e dificuldades ao longo da jornada do doutorado.

Aos meus familiares, em especial aos meus pais, Sônia Maria Silva de Souza e Joacir Gomes de Souza, e aos meus irmãos, pelo amor, incentivo constante e apoio imprescindível. Ao meu sobrinho/afilhado Pedro Daniel, por ter chegado em minha vida em um momento tão sensível e necessário, revelando-me o verdadeiro significado de um amor puro e singelo. Ao meu parceiro de vida, Deorge Martins, por seu suporte incondicional nos momentos mais difíceis, por me acolher sempre com carinho e respeito, e por estar ao meu lado, compreendendo e respeitando meu tempo e minha trajetória.

Aos professores e servidores técnico-administrativos do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, pela generosidade em compartilhar conhecimentos, pela disponibilidade e pelo ambiente de constante aprendizado e crescimento profissional.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho, pela orientação contínua, pela confiança no meu trabalho e pela parceria respeitosa e colaborativa ao longo de todo o doutorado. Levarei comigo, e buscarei aplicar em minha jornada profissional, todos os valores e experiências adquiridos nesse período de convivência.

Aos membros da banca, Prof. Dr. Giovanni Cordeiro Barroso, Profa. Dra. Antônia Sônia A. Cardoso Diniz, Prof. Dr. Lutero Carmo de Lima e Profa. Dra. Renata Imaculada Soares Pereira, pela generosidade em aceitar o convite para compor a banca avaliadora e pelas valiosas contribuições que enriqueceram este trabalho.

Aos companheiros e amigos de jornada do Laboratório de Energias Alternativas (LEA) e Grupo de Processamento de Energia e Controle (GPEC), pela receptividade, parceria, colaboração e suporte ao longo do desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – Campus Cedro, pelo apoio fundamental durante meu afastamento para a realização deste doutorado, permitindo-me dedicar plenamente a essa etapa tão significativa da minha formação acadêmica e profissional.

“Solar’s getting deployed, but we’re losing energy because solar’s getting deployed in dusty locations.”

Matthew Muller

RESUMO

A transição energética exige o avanço de tecnologias de baixa emissão, como a geração de eletricidade por sistemas fotovoltaicos (FV), cujo desempenho é influenciado por fatores ambientais, climáticos e antropogênicos, como a sujidade. Diante disso, o presente estudo investiga experimentalmente os impactos da sujidade no desempenho elétrico e comportamento térmico de uma planta FV, denominada LEA2, instalada em uma área urbana do semiárido brasileiro, considerando diferentes períodos pluviométricos e intervalos de limpeza manual. Inicialmente, é apresentada a caracterização climática do local e, sequencialmente, verifica-se que os modelos analíticos *Fixed Fill Factor Model* (FFFM), *Variable Fill Factor Model* (VFFM) e *Approximate Maximum Power Point Model* (AMPPM) podem ser combinados para estimar as perdas por sujidade a partir de um conjunto limitado de dados de entrada. A análise da geração revela uma diferença relativa percentual semanal ($\%E_{LEA2}$) de até 2,59%, quando obras são realizadas em uma avenida nas proximidades de LEA2, evidenciando a relevância dos impactos das ações antropogênicas. Durante o período chuvoso e pós-chuvoso de 2024, a tendência de aumento de $\%E_{LEA2}$ indica que a limpeza natural, apesar de reduzir a sujidade, não é suficiente para restaurar totalmente o desempenho de sistemas FV urbanos. No período seco, $\%E_{LEA2}$ atinge um pico de 5,25%. As métricas de avaliação mostram que a combinação de limpeza manual e precipitações regulares potencializa o desempenho dos módulos limpos. No aspecto térmico, os módulos limpos apresentaram temperaturas médias ligeiramente superiores às dos sujos, com diferença estatisticamente significativa, porém sem impacto substancial na operação de LEA2. Além disso, com o aumento do intervalo sem limpeza, o gradiente térmico entre o centro e a borda inferior tende a reduzir, enquanto o gradiente entre as bordas superior e inferior exibe comportamento não linear, sugerindo fases distintas de deposição de sujidade. Diante do exposto, evidencia-se o caráter inovador da presente tese, que reside na investigação dos efeitos sazonais de limpezas manuais, com diferentes frequências, na geração e temperatura de operação de uma planta FV instalada em uma área urbana no semiárido, incluindo os impactos de atividades antropogênicas de curto prazo; adicionalmente, verifica-se a aplicabilidade de modelos analíticos de estimativa de parâmetros elétricos para calcular as perdas por sujidade na planta FV analisada.

Palavras-chave: Comportamento Térmico. Desempenho Elétrico. Semiárido. Sistemas FV. Sujidade.

ABSTRACT

The energy transition requires the advancement of low-emission technologies, such as electricity generation from photovoltaic (PV) systems, whose performance is influenced by environmental, climatic, and anthropogenic factors, such as soiling. In this context, this study experimentally investigates the impacts of soiling on the electrical performance and thermal behavior of a PV plant, named LEA2, installed in an urban area of the Brazilian semiarid region, considering different rainfall periods and manual cleaning intervals. Initially, the climatic characterization of the site is presented, followed by an assessment showing that the analytical models Fixed Fill Factor Model (FFFM), Variable Fill Factor Model (VFFM), and Approximate Maximum Power Point Model (AMPPM) can be combined to estimate soiling losses using a limited set of input data. The generation analysis reveals a weekly relative percentage difference ($\%E_{LEA2}$) of up to 2.59% when construction work occurs on an avenue near LEA2, highlighting the relevance of anthropogenic impacts. During the rainy and post-rainy periods of 2024, the increasing trend of $\%E_{LEA2}$ indicates that natural cleaning, although reducing soiling, is not sufficient to fully restore the performance of urban PV systems. In the dry period, $\%E_{LEA2}$ reaches a peak of 5.25%. Performance metrics show that the combination of manual cleaning and regular precipitation enhances the performance of clean modules. Regarding thermal behavior, clean modules exhibit slightly higher average temperatures than dirty ones, with a statistically significant difference, though without substantial impact on LEA2's operation. Additionally, as the interval without cleaning increases, the thermal gradient between the center and inferior edge tends to decrease, while the gradient between the superior and inferior edges shows a nonlinear behavior, suggesting distinct phases of soiling deposition. Thus, the innovative nature of this thesis is evident, which resides in the investigation of the seasonal effects of manual cleaning, with different frequencies, on the generation and operating temperature of a PV plant installed in an urban area in the semi-arid region, including the impacts of short-term anthropogenic activities; additionally, the applicability of analytical models for estimating electrical parameters to calculate losses due to dirt in the analyzed PV plant is verified.

Keywords: Electrical Performance. PV Systems. Semiarid Region. Soiling. Thermal Behavior.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição do espectro da irradiância solar	25
Figura 2 – Perdas em uma célula FV de Si.....	29
Figura 3 – Resposta espectral de tecnologias FV em função do comprimento de onda.	29
Figura 4 – Fatores que influenciam no desempenho dos módulos FV.	30
Figura 5 – Arranjo FV sob sombreamento parcial: (a) curva P-V e (b) curva I-V.	31
Figura 6 – Exemplo de diferentes tipos de deposição de sujidade.	32
Figura 7 – FC de sistemas FV (2003–2014): (a) módulos com limpeza e (b) módulos sujos. 33	33
Figura 8 – Etapas do ciclo da sujidade.	36
Figura 9 – Regimes físicos de transporte das partículas.....	37
Figura 10 – Mecanismos de intensificação da sujidade.	38
Figura 11 – Estratégias de mitigação da sujidade.....	40
Figura 12 – Fluxograma de execução da RSL.....	53
Figura 13 – Classificação dos EPs por critérios de inclusão.	54
Figura 14 – Distribuição geográfica dos locais de realização dos EPs.	54
Figura 15 – Ocorrência de elementos na composição da sujidade nos EPs analisados.....	60
Figura 16 – Principais componentes da composição mineral das amostras de sujidade nos EPs.	61
Figura 17 – Perfil pluviométrico mensal de Fortaleza (2012-2022).	65
Figura 18 – Volume anual de precipitações em Fortaleza (2012-2022).	66
Figura 19 – Perfil da irradiação global horizontal mensal de Fortaleza (2012-2022).....	67
Figura 20 – Perfil mensal da temperatura ambiente de Fortaleza (2012-2022).	67
Figura 21 – Perfil horário da temperatura ambiente de Fortaleza (2012-2022).	68
Figura 22 – Perfil mensal da umidade relativa do ar de Fortaleza (2012-2022).	68
Figura 23 – Perfil horário da umidade relativa do ar de Fortaleza (2012-2022).	69
Figura 24 – Vista aérea das plantas FV do LEA – UFC.	70
Figura 25 – Estrutura geral do sistema de monitoramento IoT do LEA.	71
Figura 26 – Representação da parte traseira de LEA2 com identificação dos sensores de temperatura.	73
Figura 27 – Instalação dos sensores de temperatura: (a) isolamento térmico; (b) sensor DS18B20 sendo instalado e (c) sensores instalados em um módulo.....	74
Figura 28 – Análise estatística descritiva dos sensores instalados na ST1.....	75
Figura 29 – Análise estatística descritiva dos sensores instalados na ST2.....	75

Figura 30 – Diagrama de dispersão da temperatura ambiente mensurada pelos sensores DS18B20 e PT100.....	76
Figura 31 – Planta LEA2 antes da realização da primeira limpeza.....	84
Figura 32 – Etapas de execução das limpezas manuais dos módulos de LEA2.....	84
Figura 33 – Planta LEA2 antes, durante e depois da limpeza manual de 05 de julho 2023.....	85
Figura 34 – Fluxograma do estudo dos impactos das limpezas manuais na geração de LEA2.....	87
Figura 35 – Comparação das métricas de erro para diferentes níveis de irradiância: (a) MBE; (b) RMSE; (c) MAPE; (d) MPE.....	90
Figura 36 – Valores semanais de SRatio medido e estimado.....	93
Figura 37 – Métricas de erro médio de SRatio estimado em relação ao medido.....	94
Figura 38 – Comportamento do erro relativo de SRatio estimado em relação ao medido.....	95
Figura 39 – Métricas de avaliação de erro por período pluviométrico: (a) pré-chuvoso; (b) chuvoso; (c) pós-chuvoso; (d) seco.....	97
Figura 40 – Comportamento semanal de %E _{LEA2}	98
Figura 41 – Módulos limpos e sujos durante obras em uma avenida no entorno de LEA2....	99
Figura 42 – Módulos de LEA2 após a LM22 (17/07/2024).....	101
Figura 43 – Vista dos módulos limpos e sujos de LEA2 durante o período seco após a LM26.....	101
Figura 44 – Diferença acumulada da geração de energia elétrica de ST2 em relação à ST1.	102
Figura 45 – Comportamento mensal de %E _{LEA2} em função do volume de precipitação e intervalo médio entre limpezas manuais.	103
Figura 46 – Módulos de ST1 com excrementos de pássaros.....	104
Figura 47 – Comportamento de %E _{LEA2} em função dos valores médios de precipitação e dos intervalos entre limpezas.	105
Figura 48 – T _m média em função dos dias sem limpeza: (a) 1ST2 e (b) 6ST2.	112
Figura 49 – Gradiente de temperatura entre o centro e a borda inferior em função dos dias sem limpeza manual.	113
Figura 50 – Gradiente de temperatura entre as bordas superior e inferior em função dos dias sem limpeza.	113
Figura 51 – Módulos 1ST2 e 6ST2 com excrementos de pássaros durante o experimento... ..	114
Figura 52 – Compatibilidade elétrica LEA2: (a) comparativo P _{ST1} , P _{ST2} e P _{ST1C} ; (b) diferença absoluta antes e após correção dos dados.....	186

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação de sedimentos por tamanho.	34
Tabela 2 – Especificações dos módulos da LEA2 em STC.....	70
Tabela 3 – Especificações do piranômetro LP02.....	71
Tabela 4 – Especificações do anemômetro NRG #40C.....	72
Tabela 5 – Especificações do sensor DHT11.....	72
Tabela 6 – Características do sensor DS18B20.	72
Tabela 7 – Diferença entre os valores médios de temperatura dos módulos de ST1 medidos e estimados.	75
Tabela 8 – Diferença entre os valores médios de temperatura dos módulos de ST2 medidos e estimados.	75
Tabela 9 – Valores estimados de incerteza dos instrumentos de medição LEA2.....	77
Tabela 10 – Métricas de avaliação dos modelos dos parâmetros elétricos de ST2.	89
Tabela 11 – Métricas de avaliação dos modelos analíticos para dias representativos de céu nublado, parcialmente nublado e limpo.....	92
Tabela 12 – Métricas de desempenho para diferentes regimes de pluviométricos; os valores dos períodos com LM são usados como referência para calcular o ganho (%).	107
Tabela 13 – Resultado do Teste t para verificar significância estatística da T_m média entre os módulos limpos e sujos.	110
Tabela 14 – Temperatura média no centro e nas bordas dos módulos sujos e limpos.....	111
Tabela 15 – Resultado da análise estatística descritiva de ST1 e ST2.	185
Tabela 16 – Indicadores estatísticos do procedimento de compatibilidade elétrica ST1 e ST2.	186

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Elementos químicos emitidos por várias fontes geradoras de partículas.	35
Quadro 2 – Fatores que influenciam a sujidade.	35
Quadro 3 – Expressões de busca utilizadas no processo de buscas.	50
Quadro 4 – Datas das limpezas manuais de LEA2.....	85
Quadro 5 – Comparação do presente estudo com a literatura.	108
Quadro 6 – Estudos experimentais sob condições externas que descrevem as características físico-químicas da sujidade e os efeitos de sua acumulação natural no desempenho de geração de sistemas.....	154
Quadro 7 – Estudos experimentais sob condições externas que descrevem os efeitos do acúmulo natural de sujidade no desempenho de sistemas FV, mesmo sem menção às características físico-químicas da sujidade.	161
Quadro 8 – Estudos experimentais que descrevem as características da composição físico-química da sujidade coletada em sistemas FV ou amostras de vidro, mesmo sem menção à análise de desempenho dos sistemas FV.....	181

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar
AMPPM	<i>Approximate Maximum Power Point Model</i>
ANM	<i>Anderson Model</i>
BIPV	<i>Building Integrated Photovoltaic</i>
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CBENS	Congresso Brasileiro de Energia Solar
CdTe	Telureto de Cádmio
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
CIGS	Disseleneto de Cobre Índio e Gálio
CSP	Energia Solar Concentrada (<i>Concentrated Solar Power</i>)
EDS	Espectroscopia Dispersiva de Energia (<i>Energy Dispersive Spectroscopy</i>)
E-DS	Telas Eletrostáticas (<i>Electro-Dynamic Display</i>)
EDX	Espectroscopia Dispersiva de Energia de Raios-X (<i>X-Ray Energy Dispersive Spectroscopy</i>)
EPs	Estudos Primários
FFFM	<i>Fixed Fill Factor Model</i>
FUNCENE	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
FV	Sistemas Fotovoltaicos
GMPP	Ponto de Potência Máxima Global (<i>Global Maximum Power Point</i>)
IEA	Agência Internacional de Energia - <i>International Energy Agency</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IoT	Internet das Coisas (<i>Internet of Things</i>)
LEA	Laboratório de Energias Alternativas
LM	Limpeza Manual
LMPP	Ponto de Potência Máxima Local (<i>Local Maximum Power Point</i>)
MAPE	Erro Percentual Absoluto Médio (<i>Mean Absolute Percentual Error</i>).

MBE	Erro Quadrático Médio (<i>Mean Bias Error</i>)
MENA	<i>Middle East and North Africa</i>
MP	Material Particulado
MPE	Erro Percentual Médio (<i>Mean Percentage Error</i>)
MPP	Ponto de Máxima Potência (<i>Maximum Power Point</i>)
MPPT	Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (<i>Maximum Power Point Tracking</i>)
m-Si	Silício monocristalino
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
O&M	Operação e Manutenção
PNK	<i>Politeknik Negeri Kupang</i>
p-Si	Silício Molicristalino
QP	Questão Primária
QS	Questão Secundária
RMSE	Erro de Viés Médio (<i>Root Mean Square Error</i>)
ROTA	<i>Renewable Energy Outdoor Testing Area</i>
RSL	Revisão Sistemática da Literatura
SAPM	<i>Sandia Array Performance Model</i>
SEM	Microscopia Eletrônica de Varredura (<i>Scanning Electrode Microscopy</i>)
StArt	<i>State of the Art Through Systematic Review</i>
STC	Condições Padrões de Teste (<i>Standard Test Conditions</i>)
UFC	Universidade Federal do Ceará
UTC	Tempo Universal Coordenado (<i>Coordinated Universal Time</i>)
UTM	Universal Transversa de Mercator
VFFM	<i>Variable Fill Factor Model</i>
XRD	Difração de Raios X (<i>X-Ray Diffraction</i>)
XRF	Fluorescência de Raios-X (<i>X-Ray Fluorescence</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Coeficiente de Temperatura para Corrente de Curto-Círcuito
β	Coeficiente de Temperatura para Tensão de Circuito Aberto
γ	Coeficientes de temperatura para Potência Máxima
δ	Coeficiente de Correção Tensão de Circuito Aberto para Irradiância
ΔG	Parâmetros de Transição de Irradiância
ΔT	Diferença entre a Temperatura da Célula e o <i>Backsheet</i> do Módulo FV
η	Eficiência
θ_z	Ângulo de Zênite
$\%E_{LEA2}$	Diferença relativa percentual da geração de ST2 em relação à ST1
AM	Massa de Ar
$(E1) - (E6)$	Critérios de Exclusão
E_{CA}	Energia de Saída do Módulo FV
E_g	Energia do <i>gap</i>
FC	Fator de Capacidade (<i>Capacity Factor</i>)
FF	Fator de Forma (<i>Fill Factor</i>)
FF_o	Fator de Forma Intrínseco da Célula FV
FF_{oSTC}	Fator de Forma Intrínseco da Célula em STC
G_H	Irradiância no Plano Horizontal
G_{POA}	Irradiância Incidente no Plano dos Módulos
G_{sc}	Constante Solar (1.367 W/m ²)
G_{STC}	Irradiância em STC
h	Elevação Solar
H_{POA}	Irradiação no Plano dos Módulos
$(I1) - (I4)$	Critérios de Inclusão
I_{Max}	Corrente Máxima

I_{sc}	Corrente de Curto-Circuito (<i>Short-Circuit Current</i>)
$I_{sc_{Suj}}_o$	I_{sc} do módulo sujo
$I_{sc_{Limp}}_o$	I_{sc} do módulo limpo
k	Constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$)
k_t	Índice de Claridade (<i>Clearness Index</i>)
k'_t	Índice de Claridade Modificado (<i>Modified Clearness Index</i>)
$K_{mismatch}$	Disparidade de Potência Máxima da <i>String</i> Limpa e Suja
N	Número Total de Medições
P_{Max}	Potência Máxima de Saída (<i>Maximum Power</i>)
$P_{Max_{Suj}}_o$	P_{Max} do módulo sujo
$P_{Max_{Limp}}_o$	P_{Max} do módulo limpo
PR	Relação de Desempenho (<i>Performance Ratio</i>)
PR_{corr}	<i>Weather-Corrected Performance Ratio</i>
q	Carga de um Elétron ($1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$)
R^2	Coeficiente de Determinação
R_s	Resistência Série
$SRate$	Taxa de Sujidade (<i>Soiling Rate</i>)
$SRatio$	Relação de Sujidade (<i>Soiling Ratio</i>)
$ST1$	<i>String</i> 1 de LEA2
$ST2$	<i>String</i> 2 de LEA2
T_c	Temperatura da célula FV
$T_{c_{avg}}$	Temperatura Média Anual da Célula FV
T_m	Temperatura dos Módulos
T_{STC}	Temperatura em STC
U	Incerteza total (%)
V_{Max}	Tensão Máxima

v_{oc}	Tensão de Circuito Aberto Normalizada
V_{oc}	Tensão de Circuito Aberto (<i>Open Circuit Voltage</i>)
y_i	Valor Medido
\hat{y}_i	Valor Estimado
\bar{y}_i	Média dos Valores Medidos
$Yield$	Produtividade
Y_F	Rendimento Teórico da Planta FV
Y_R	Rendimento de Saída da Planta FV
W_p	Potência de Pico
z	Elevação do Local em Relação ao Mar

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 MOTIVAÇÃO	21
1.2 OBJETIVOS	23
1.2.1 <i>Geral</i>.....	23
1.2.2 <i>Específicos</i>	23
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	23
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	25
2.1 RECURSO SOLAR.....	25
2.2 TECNOLOGIA FV.....	26
2.2.1 <i>Efeito FV</i>.....	26
2.2.2 <i>Resposta espectral das tecnologias FV</i>	28
2.2.3 <i>Fatores que influenciam o desempenho das células FV</i>.....	30
2.3 SUJIDADE	32
2.3.1 <i>Natureza da composição da sujidade</i>.....	33
2.3.2 <i>Processo de deposição da sujidade</i>.....	36
2.4 MÉTODOS DE MITIGAÇÃO DA SUJIDADE	39
2.4.1 <i>Limpeza Natural</i>	40
2.4.2 <i>Limpeza Artificial</i>	41
2.4.3 <i>Ações Preventivas</i>	42
2.5 ESTIMATIVA DOS EFEITOS DA SUJIDADE EM PLANTAS FV	43
3 ESTUDO DO ESTADO DA ARTE	48
3.1 PLANEJAMENTO.....	48
3.1.1 <i>Protocolo de busca</i>.....	49
3.1.2 <i>Processo de condução</i>.....	52
3.2 ANÁLISE DOS EPS E DISCUSSÕES	53
3.2.1 <i>Critérios de inclusão</i>.....	53
3.2.2 <i>Localização geográfica</i>.....	54
3.2.3 <i>Tecnologias FV</i>	55
3.2.4 <i>Metodologia dos EPs</i>	56
3.2.5 <i>Métodos de limpeza</i>.....	56
3.2.6 <i>Efeitos da sujidade</i>.....	58
3.2.7 <i>Características físico-químicas</i>	60

3.2.8 Coleta e análise das amostras de sujidade.....	61
3.2.9 Discussões adicionais	62
4 METODOLOGIA.....	64
4.1 LOCAL DO ESTUDO.....	64
4.1.1 Caracterização ambiental.....	64
4.1.2 Descrição da planta FV LEA2	69
4.1.3 Monitoramento e aquisição de dados ambientais e operacionais.....	71
4.2 MODELOS ANALÍTICOS.....	77
4.2.1 Modelos analíticos para estimar parâmetros elétricos.....	78
4.3 EXTRAÇÃO DAS MÉTRICAS DE SUJIDADE	80
4.3.1 Aplicabilidade de modelos analíticos na determinação da SRatio	80
4.3.2 Métricas de avaliação	82
4.4 LIMPEZAS MANUAIS	83
4.4.1 Efeitos das limpezas manuais no desempenho elétrico.....	86
4.4.2 Efeitos das limpezas manuais no comportamento térmico	87
5 RESULTADOS.....	89
5.1 APLICABILIDADE DE MODELOS ANALÍTICOS NO LOCAL DE ESTUDO	89
5.1.1 Estimativa da métrica de sujidade através dos modelos analíticos.....	93
5.2 EFEITOS DAS LIMPEZAS MANUAIS NO DESEMPENHO ELÉTRICO	98
5.3 EFEITOS DAS LIMPEZAS MANUAIS NO COMPORTAMENTO TÉRMICO ...	109
6 CONCLUSÕES.....	116
REFERÊNCIAS	118
APÊNDICE A - PRODUÇÃO VINCULADA À PESQUISA	153
APÊNDICE B – EPS ANALISADOS DURANTE A RSL	154
APÊNDICE C – ANÁLISE DA COMPATIBILIDADE ELÉTRICA ENTRE ST1 E ST2	185

1 INTRODUÇÃO

A demanda por energia elétrica, impulsionada pelo crescimento industrial e tecnológico, tem aumentado de forma substancial. Dados da Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency - IEA*) apontam que, até 2050, a eletricidade representará mais de 50% do consumo final de energia nas economias modernas. Em 2021, cerca de 60% da geração de energia elétrica a nível global foi gerada com combustíveis fósseis (IEA, 2022a).

No cenário de transição energética, um importante indicador do progresso do setor elétrico é a participação de tecnologias de baixa emissão de poluentes (renováveis, nucleares, captura e armazenamento de carbono, co-queima de amônia e hidrogênio) na matriz elétrica. Em 2021, 39% da geração global de eletricidade provinha de tecnologias de baixa emissão (IEA, 2022a). Estima-se que no período de 2023 a 2028, o mundo deverá adicionar mais capacidade renovável em sua matriz elétrica do que toda capacidade instalada desde a construção da primeira central elétrica comercial renovável; essa adição pode chegar a 3.700 GW (IEA, 2023).

Historicamente, a energia do Sol tem sido usada pelo ser humano em diversas aplicações, como aquecimento, ventilação, secagem de alimentos e destilação de água. A utilização da energia solar para a geração de eletricidade em escala comercial tem se consolidado como uma tendência em diversos países, visando à substituição ou redução do uso de combustíveis fósseis na geração de eletricidade (Kazem *et al.*, 2020). De acordo com a IEA (2023), a geração fotovoltaica (FV) deve superar a geração nuclear em 2026, com as fontes renováveis representando mais de 42% da matriz elétrica mundial, das quais 12,60% são atribuídas à geração FV. A geração FV é a única tecnologia renovável cuja expansão está alinhada com o cenário de Emissões Líquidas Zero até 2050.

Os módulos FV são especificados de acordo com sua potência de pico (W_p), obtida sob Condições Padrões de Teste (*Standard Test Conditions - STC*). Contudo, sob condições operacionais, os sistemas FV são significativamente influenciados pelas condições ambientais do local de instalação, o que impacta seu desempenho elétrico (Lima; Ferreira; Morais, 2017). Um dos fatores críticos é a sujidade, resultante do acúmulo de contaminantes na superfície dos módulos (Jamil *et al.*, 2017a).

A sujidade pode absorver ou dispersar a irradiação que deveria incidir nas células FV, sendo sua deposição influenciada por variáveis como precipitações, temperatura, umidade, velocidade do vento e inclinação (Nurjanah; Dewi; Rusdianasari, 2021). Assim, o fenômeno da sujidade varia ao longo do tempo e entre diferentes localidades; inclusive, módulos ou *strings* de uma mesma planta FV podem apresentar níveis distintos de perdas devido à sujidade.

Todavia, a suposição de que a distribuição da sujidade na superfície dos módulos ocorre de forma uniforme é uma premissa comum na maioria dos estudos reportados na literatura científica (Bessa *et al.*, 2021).

Os impactos da sujidade foram, por um tempo, negligenciados pelos produtores FV. No entanto, em regiões com alta ocorrência de tempestades de poeira ou propensas à elevada deposição diária de contaminantes, a avaliação dos efeitos da sujidade torna-se crucial, especialmente em usinas FV em escala comercial (L. *et al.*, 2021). Caso o problema da sujidade seja desconsiderado, danos permanentes aos módulos FV, como o surgimento de manchas, podem ocorrer (Hammoud *et al.*, 2019).

Segundo Conceição *et al.* (2022), os efeitos da sujidade em sistemas solares foram observados pela primeira vez na década de 1940 em coletores solares térmicos, conforme relatado por Hottel e Woertz (1942). No que tange aos sistemas FV, pesquisas têm sido realizadas para evidenciar os efeitos da sujidade em diferentes tecnologias FV, sobretudo em regiões áridas e semiáridas; com o aumento da implementação de usinas FV, o interesse por essa temática tende a crescer.

Além de impactar o desempenho de geração, a sujidade aumenta os custos de operação e manutenção (O&M) e, consequentemente, eleva o risco financeiro de plantas FV em escala comercial (Myyas *et al.*, 2022). Dependendo das características da usina FV, a mitigação da sujidade pode representar até 70% dos custos de O&M (Gonçalves, 2024). Isso ocorre devido à demanda por mão de obra para intervenções rotineiras, elevando as despesas e reduzindo a margem de lucro dos empreendimentos, em detrimento do aumento da eficiência dos sistemas; em determinadas localidades, as intervenções de limpeza podem se mostrar economicamente inviáveis (Hammoud *et al.*, 2019).

Diante do exposto, a presente Tese apresenta os resultados de uma investigação experimental sobre os impactos de limpezas manuais, realizadas em frequências variadas e sob diferentes regimes pluviométricos, no desempenho elétrico e térmico de uma planta FV instalada em Fortaleza, a quarta maior cidade do Brasil; a cidade está localizada no semiárido brasileiro, com uma área de aproximadamente 1 milhão de km² e uma população de 22 milhões de habitantes, caracterizando-se como a área semiárida mais populosa do planeta. A área do estudo é afetada por secas recorrentes (uma seca severa por década) (Frischkorn; Araújo; Santiago, 2003). Desse modo, este escopo destaca a inovação do estudo, fornecendo orientações para otimizar a O&M de plantas FV urbanas em áreas com condições meteorológicas semelhantes. Adicionalmente, verifica-se a aplicabilidade de modelos analíticos de estimativa de parâmetros elétricos para calcular as perdas por sujidade na planta FV analisada.

1.1 Motivação

De acordo com a IEA (2022b), a geração FV em escala comercial é a forma mais competitiva de geração de eletricidade em diversas partes do mundo. No entanto, a expansão dessas usinas FV enfrenta desafios significativos devido à disponibilidade limitada de grandes áreas com recurso solar ideal (IEA, 2022b) e aos efeitos das mudanças climáticas (Ilse *et al.*, 2019). Como alternativa, os sistemas FV em ambientes urbanos têm sido amplamente adotados em todo o mundo em aplicações como coberturas de estacionamento (Maier *et al.*, 2024), estações de recarga de veículos elétricos (Yao *et al.*, 2024) e sistemas FV integrados a edifícios (*Building Integrated Photovoltaic - BIPV*) (Wang; Yang; Xiang, 2023; Frate; Oliveira; Carvalho, 2024); o uso crescente de usinas FV flutuantes está sendo motivado pela instalação em diferentes corpos d'água e pela conservação de terras, evitando a competição com zonas agrícolas ou verdes (Reges *et al.*, 2022). No entanto, as aplicações urbanas apresentam desafios adicionais, incluindo a ocorrência de baixas velocidades do vento que dificultam a dissipação de calor dos módulos, sombras de edifícios e problemas relacionados à poluição (Kazem *et al.*, 2020; Wang; Yang; Xiang, 2023).

Após a instalação, um dos principais métodos para melhorar a eficiência das plantas FV é a mitigação da sujidade. Diferentes fatores devem ser considerados ao projetar mecanismos de limpeza, como a inclinação, o tipo de módulo e a metodologia de limpeza (úmida ou seca) (Laksahani *et al.*, 2021). A adoção de estratégias inadequadas de limpeza, que desconsiderem as condições climáticas locais, os custos de mão de obra, o preço da eletricidade, a tecnologia FV e a degradação natural, podem comprometer a viabilidade financeira dos sistemas FV (Yazdani; Yaghoubi, 2022; Mehdi *et al.*, 2024).

Apesar de inúmeras soluções tecnológicas sob investigação (drones, robôs de limpeza, revestimentos autolimpantes e sistemas de limpeza automatizados/semitautomatizados (Khalid *et al.*, 2023)), essas alternativas muitas vezes não são financeiramente ou tecnicamente viáveis para sistemas FV em ambientes urbanos. Consequentemente, a limpeza manual continua sendo uma das soluções mais aplicadas em tais cenários, representando motivação para este estudo. Essa abordagem é particularmente relevante em áreas onde a limpeza natural é insuficiente, como regiões áridas e semiáridas, devido à irregularidade e escassez de precipitações. Em ambientes urbanos dessas regiões, precipitações de baixo volume podem remover partículas maiores, mas sua eficácia na eliminação de partículas menores é limitada (Alkharusi; Huang; Markides, 2023).

Segundo Ilse *et al.* (2019), em 2018, as perdas globais devido à sujidade foram

estimadas entre 3% e 4%, representando uma perda financeira entre 3 e 5 bilhões de euros. Nessa estimativa, não são considerados os custos adicionais de limpeza, resultantes da adoção de cronogramas inadequados, e limpeza de sistemas FV instalados em telhados, cujo custo de limpeza é entre 3 e 8 vezes maior que em sistemas instalados no solo. Ademais, estima-se que, em 2023, mesmo com adoção de cronogramas otimizados, as perdas por sujidade foram da ordem de 4% a 5%, equivalendo a perdas financeiras de 4 a 7 bilhões de euros. Um dos fatores que justificam esse aumento das perdas é o incremento de novas instalações FV em regiões com altos níveis de irradiação e expostas à sujidade, como China, Índia e MENA (*Middle East and North Africa*).

Contudo, o relatório “*Soiling Losses – Impact on the Performance of Photovoltaic Power Plants*” da IEA (Schill *et al.*, 2022) aponta que os níveis globais de perdas por sujidade devem ser ainda maiores, visto que o cenário traçado em Ilse *et al.* (2019) considera que todos os sistemas FV são submetidos a cronogramas otimizados de limpeza. Além disso, o incremento de novos sistemas FV instalados em telhados tende a agravar os impactos globais devido à sujidade. Os efeitos das mudanças climáticas também não devem ser subestimados, pois o aumento da temperatura global provoca maior aridez nos solos e eleva os riscos de incêndios florestais, resultando em um aumento do material particulado (MP) suspenso no ar (Ilse *et al.*, 2019).

Além disso, em países como o Brasil, onde a maioria da população vive em áreas urbanas, o interesse de consumidores residenciais e comerciais em reduzir os custos de eletricidade tem impulsionado um aumento expressivo da capacidade instalada de sistemas FV distribuídos, que já supera a das usinas FV centralizadas (ABSOLAR, 2024). Com uma expansão anual projetada de 7 GW até 2028 no país (IEA, 2023), a tendência de adoção de sistemas FV em ambientes urbanos deve se intensificar.

Nesse contexto, as motivações para a realização do presente estudo baseiam-se nas seguintes premissas:

- Verificação dos efeitos da sujidade no desempenho elétrico e comportamento térmico de plantas FV instaladas em áreas urbanas de regiões semiáridas (com baixa pluviometria e altas temperaturas); plantas FV próximas a rodovias ou locais com alta atividade humana estão particularmente sujeitas à deposição de fuligem, exigindo limpezas mecânicas frequentes;
- Análise dos efeitos da limpeza manual no processo de mitigação da sujidade, uma vez que não são relatadas investigações sobre os efeitos da limpeza regular, sob diferentes regimes pluviométricos, em plantas FV no local de estudo;

- Diversificação dos estudos sobre os efeitos da sujidade em sistemas FV no Brasil, dado que as investigações identificadas estão limitadas a um número restrito de localidades;
- Verificação da aplicabilidade de modelos analíticos em estudos de sujidade afim de contribuir com a simplificação e redução dos aparelhos utilizados na determinação das perdas por sujidade.

1.2 Objetivos

1.2.1 Geral

Realizar uma investigação experimental para verificação dos impactos da sujidade no desempenho elétrico e térmico de uma planta FV instalada em uma área urbana do semiárido brasileiro sob diferentes períodos pluviométricos e intervalos entre limpezas.

1.2.2 Específicos

- Analisar o comportamento da geração de uma planta FV instalada em ambiente urbano com clima semiárido sob efeito da sujidade;
- Examinar os efeitos da implementação de limpezas manuais regulares na temperatura de operação dos módulos de uma planta FV sob diferentes intervalos entre limpezas;
- Investigar a influência de atividades antropogênicas nas perdas por sujidade em uma planta FV instalada em ambiente urbano;
- Verificar a aplicabilidade de modelos analíticos de determinação de parâmetros elétricos na estimativa das perdas por sujidade.

1.3 Organização do trabalho

No Capítulo 1, são apresentados aspectos gerais de estudos que abordam os efeitos da sujidade em sistemas FV. Além disso, são expostas as motivações da pesquisa, bem como os objetivos gerais e específicos desta Tese.

No Capítulo 2, é desenvolvido o embasamento teórico sobre os temas relacionados à pesquisa. Inicialmente, são apresentados fundamentos sobre o recurso solar e tecnologias FV. Sequencialmente, discutem-se os aspectos físicos e químicos da sujidade, seguidos pelas etapas do processo de deposição da sujidade na superfície dos módulos FV. Em seguida, são analisados diferentes métodos restaurativos aplicados às plantas FV e, por fim, destacam-se as principais

métricas utilizadas para avaliar os impactos da sujidade no desempenho dessas plantas.

No Capítulo 3, é conduzido um estudo do estado da arte relativo à sujidade em sistemas FV, detalhando a metodologia adotada para o planejamento, buscas e sumarização dos estudos primários (EPs). As informações coletadas são organizadas para responder às questões de pesquisa estabelecidas no protocolo de busca. Além disso, discutem-se as tendências, lacunas identificadas nos EPs analisados e as contribuições específicas desta Tese.

No Capítulo 4, apresenta-se a metodologia adotada. Inicialmente, descrevem-se as características do local do estudo e da planta FV investigada. Em seguida, detalham-se as etapas do estudo que avalia a aplicabilidade de modelos analíticos na determinação da potência de plantas FV, identificando o modelo mais consistente com a métrica de sujidade adotada. Por fim, são descritos os procedimentos de limpeza manual realizados para analisar os efeitos elétricos e térmicos da sujidade nos módulos FV.

No Capítulo 5, são caracterizados os parâmetros climáticos e ambientais do local de estudo, abrangendo o comportamento das precipitações, temperatura ambiente (T_a), irradiação e umidade relativa do ar no período de 2012 a 2022. Em seguida, são apresentados os resultados sobre o estudo de aplicabilidade de modelos analíticos para estimar métricas de sujidade no local. Também são avaliados os impactos das limpezas manuais periódicas na planta FV, considerando diferentes regimes pluviométricos e intervalos de limpeza; essa análise aborda os efeitos no desempenho elétrico e no comportamento térmico dos módulos limpos e sujos, destacando a influência de atividades antropogênicas nas perdas causadas pela sujidade em um ambiente urbano.

No Capítulo 6, são apresentadas as principais conclusões obtidas ao longo do estudo e sugestões de estudos futuros visando a continuidade dessa linha de pesquisa.

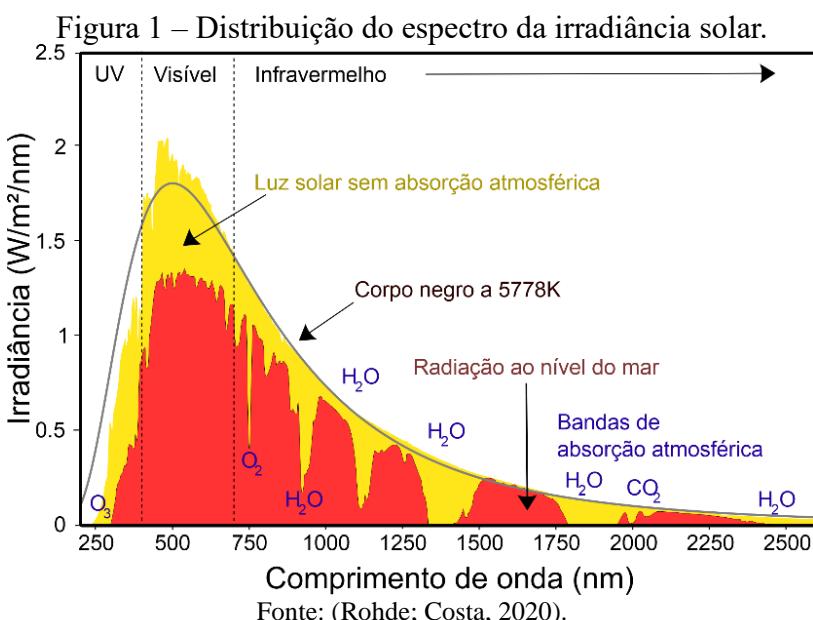
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, são abordados os aspectos teóricos referentes aos sistemas FV e ao processo de sujidade. Inicialmente, são apresentados conceitos sobre recursos solar e tecnologias FV. Em seguida, destacam-se as etapas do ciclo da sujidade, os métodos de mitigação e as métricas de avaliação utilizadas em estudos sobre o impacto da sujidade no desempenho elétrico de plantas FV.

2.1 Recurso solar

A radiação solar¹ é o fluxo de energia emitida pelo Sol que, como toda radiação eletromagnética, propaga-se na forma de ondas. Devido aos gradientes de temperatura e às diversas linhas de emissão e absorção da superfície do Sol, a radiação eletromagnética solar, denominada de espectro da radiação solar, é semelhante ao de um corpo negro com temperatura em torno de 5.800 K, que é a temperatura aproximada da superfície do Sol (OTOSFERA) (Pinho; Galdino, 2014).

O espectro solar pode ser classificado em faixas de acordo com o comprimento ou frequência da onda; a maior parte da faixa visível (400 a 780 nm) é emitida a partir daOTOSFERA, as outras faixas são a infravermelha (700 a 4.000 nm) e a ultravioleta (200 a 400 nm). Na Figura 1, são apresentados o espectro da irradiância no topo da atmosfera (extraterrestre), o espectro da irradiância de um corpo negro e o espectro da irradiância solar ao nível do mar.



¹O termo “radiação solar” geralmente é utilizado de forma genérica e pode ser associado ao fluxo de potência, denominado de irradiância solar, ou em função da energia disponibilizada em uma unidade de área, denominado de irradiação solar (Pinho; Galdino, 2014).

O espectro da irradiância ao nível do mar apresenta atenuações quando comparado ao da irradiância extraterrestre. Tal fato justifica-se pelo processo de absorção da irradiância solar devido à presença de elementos na atmosfera, como o ozônio (O_3), oxigênio (O_2), vapor d'água (H_2O) e gás carbônico (CO_2). Assim, a irradiância que atinge a superfície terrestre depende das condições meteorológicas de uma determina localidade (Camargo Schubert Engenheiros Associados *et al.*, 2019).

A densidade média anual da irradiância solar medida em um plano perpendicular à direção de propagação dos raios solares no topo da atmosfera é chamada de constante solar e corresponde ao valor de 1.367 W/m^2 (Pinho; Galdino, 2014). Quando a Terra está mais próxima do Sol (perihélio - 3 de janeiro), a irradiância extraterrestre corresponde a 1.400 W/m^2 e quando está mais distante (afélio - 4 de julho), é de cerca de 1.330 W/m^2 (Kalogirou, 2009).

É possível estimar que a potência total disponibilizada pelo Sol à Terra é de 174.000 TW. Todavia, a irradiância extraterrestre passa por processos de absorção, reflexão e difusão na atmosfera e na superfície terrestre; aproximadamente 94.000 TW efetivamente atinge a superfície da Terra (Pinho; Galdino, 2014).

Devido às interações com a atmosfera e o ambiente, a irradiância capturada por um receptor (irradiância global) pode ser decomposta em três componentes: a irradiância direta, a difusa e a refletida (Vian *et al.*, 2021).

A irradiância direta é a parcela da irradiância global que provém diretamente do Sol e atravessa a atmosfera até alcançar o receptor. A irradiância difusa origina-se das interações com os elementos presentes na atmosfera e não apresenta uma direção específica de propagação. Já a irradiância refletida, também conhecida como albedo, origina-se da reflexão da irradiância por superfícies em torno do receptor. Essa parcela pode apresentar valor elevado ou desprezível, dependendo das características de reflexão das superfícies refletoras: a neve recém-caída possui refletância de 0,80, enquanto um telhado apresenta refletância de 0,10 (Pinho; Galdino, 2014; Vian *et al.*, 2021).

2.2 Tecnologia FV

2.2.1 Efeito FV

Os elétrons de um átomo isolado possuem níveis de energia discretos. Quando átomos se aproximam, a energia eletrônica individual é alterada, de modo que os níveis de energia se agrupam em bandas. Os elétrons localizados na órbita de valência são os únicos que podem interagir com outros átomos e, ao se agruparem, formam banda de valência; alguns elétrons da

banda de valência podem adquirir energia suficiente para se mover para a banda de condução. A diferença de energia entre um elétron na banda de valência e a camada mais interna da camada de condução é denominada de banda proibida, *bandgap* ou *gap* (Markvart, 2000; Kalogirou, 2009).

Devido às bandas de energia, os semicondutores aumentam sua condutividade em função do aumento da temperatura, pois a excitação térmica promove elétrons da banda de valência para a banda de condução. Para temperaturas superiores a 0 K, há elétrons na banda de condução e o mesmo número de lacunas na banda de valência (Pinho; Galdino, 2014).

A propriedade que permite a geração das células FV é a criação de pares elétron-lacuna a partir da incidência de fótons com energia superior à energia do *gap* (E_g) do material; os pares elétrons-lacunas podem se mover no material, aumentando sua condutividade (efeito fotocondutivo). Contudo, para o aproveitamento da corrente e tensão elétrica é necessária a atuação de um campo elétrico para que haja a separação dos portadores; isso é possível a partir de uma junção PN (Pinho; Galdino, 2014).

Para a formação de uma junção PN, impurezas precisam ser introduzidas de forma controlada no semicondutor puro (semicondutor intrínseco) através do processo de dopagem. Ao introduzir átomos pentavalentes, como o Fósforo (P), em uma rede cristalina, haverá um elétron em excesso que ficará fracamente ligado ao seu átomo de origem. O semicondutor dopado com impurezas pentavalente (semicondutor extrínseco) é denominado de semicondutor tipo N. Por outro lado, caso o dopante seja um átomo trivalente, como o Boro (B), haverá ausência de elétrons (lacunas) na rede cristalina. O semicondutor dopado com impurezas trivalente (semicondutor extrínseco) é denominado de semicondutor tipo P. Na temperatura ambiente, há energia térmica suficiente para que praticamente todos os elétrons em excesso no semicondutor tipo N fiquem livres, assim como para que as lacunas criadas no semicondutor P possam se deslocar. Assim, ao realizar o processo de dopagem para formação de semicondutores tipo P e tipo N em uma mesma pastilha de Si, dá-se origem a uma junção PN (Pinho; Galdino, 2014; Costa, 2018).

Na interface de interação entre os materiais P e N, o excesso de elétrons no semicondutor tipo N se difunde para o semicondutor tipo P, dando origem a íons positivo devido à perda de elétrons. Os elétrons, ao se difundirem para o semicondutor tipo P, ocupam as lacunas existentes, gerando íons negativos. Essa movimentação é interrompida pela geração de um campo elétrico que impede a movimentação de elétrons e lacunas na junção PN; o equilíbrio é alcançado com o surgimento da zona de depleção, onde estão presentes cargas positivas e negativas que geram um campo elétrico e uma barreira de potencial (Pinho; Galdino, 2014; Markvart, 2000).

Na prática, a formação de uma junção PN ocorre a partir da difusão de compostos gasosos de fósforo (P) (dopante pentavalente), a fim de formar o semicondutor tipo N, na face frontal de uma pastilha de Si cristalino tipo P. Esse processo é realizado em fornos com altas temperaturas (870 °C) e demoram em torno de 15-30 minutos, permitindo a formação de um semicondutor tipo N com cerca de 0,50 µm de espessura (Markvart, 2000). Para fabricação de células FV, são inseridos contatos elétricos frontais (lado N) na forma de uma malha metálica e um contato na parte traseira (lado P) (Pinho; Galdino, 2014).

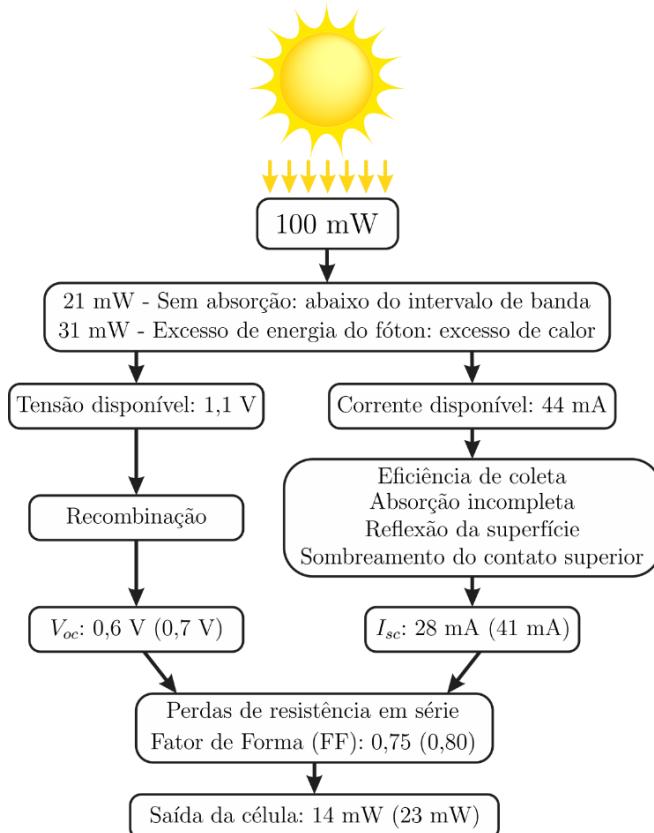
Quando a luz incide sobre uma célula FV, pode ser refletida, absorvida ou transmitida. Caso o fóton seja absorvido por um elétron, ocorre um incremento na sua energia; fótons com alta frequência, ou curtos comprimentos de onda, são os mais energéticos. Se o incremento de energia for maior que o *gap* do semicondutor, esse elétron passa para a banda de condução, podendo circular livremente e, concomitantemente, dá origem a uma lacuna, ou seja, a absorção de um fóton com energia maior que E_g desencadeia o processo de geração de um par elétron-lacuna; o excedente de energia é convertido em calor.

Independentemente da intensidade da energia de um fóton em relação *gap*, apenas um par elétron-lacuna será gerado, sendo esse um dos motivos da baixa eficiência de conversão das células FV (Markvart, 2000). Se o par elétron-lacuna for gerado na zona de depleção ou nas suas proximidades, ele é direcionado pelo campo elétrico formado na junção PN, fazendo com que os elétrons sejam acelerados para o lado N, enquanto as lacunas são aceleradas para o lado P, gerando uma corrente elétrica caso haja a conexão de uma carga, no sentido da região N para a P; esse processo é chamado de efeito FV (Kalogirou, 2009; Pinho; Galdino, 2014; Duffie; Beckman; Blair, 2020). Todavia, caso a energia do fóton seja menor que a do *gap*, o elétron não obterá energia suficiente para passar para a banda de condução. Na Figura 2 é representado um balanço de perdas em uma célula FV de Si.

2.2.2 Resposta espectral das tecnologias FV

As características elétricas das células FV podem ser alteradas pelo processo de fabricação, pelos materiais empregados, pelas resistências internas e pela seletividade de absorção, assim como por fatores ambientais como irradiação, temperatura e sujidade. A seletividade de absorção do espectro solar relaciona-se com o nível de energia necessário para que um fóton seja absorvido por uma célula FV e gerar um par elétron-lacuna. A resposta espectral das células FV depende do material e da tecnologia utilizados na sua fabricação (Zilles *et al.*, 2012).

Figura 2 – Perdas em uma célula FV de Si.

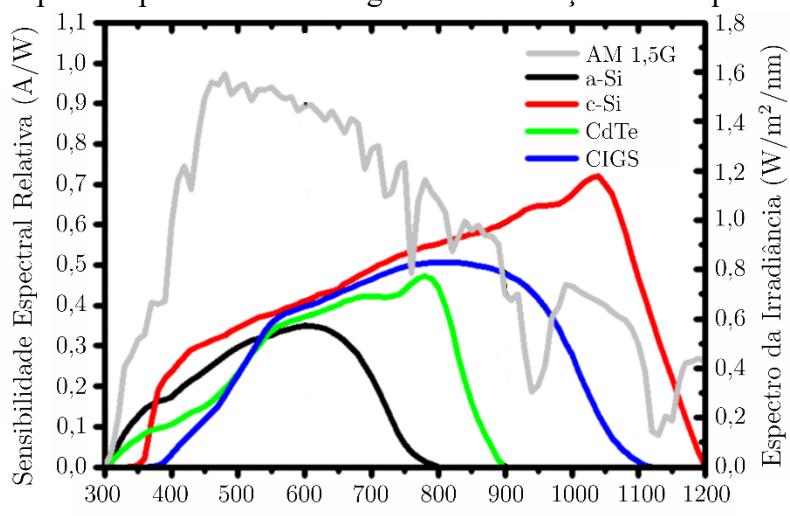


* Valores em cm^2 para células comerciais e (entre parênteses) para células de laboratório.

Fonte: Adaptado de (Markvart, 2000).

A resposta espectral relativa é a capacidade de uma célula FV de absorver a energia de fôtons com diferentes comprimentos de onda. Na Figura 3 é apresentada a resposta espectral relativa de diferentes tecnologias FV. Ressalta-se que o valor 1 no eixo das ordenadas representa a máxima absorção de energia para um determinado comprimento de onda (Zilles *et al.*, 2012).

Figura 3 – Resposta espectral de tecnologias FV em função do comprimento de onda.



Fonte: Adaptado de (John, 2016).

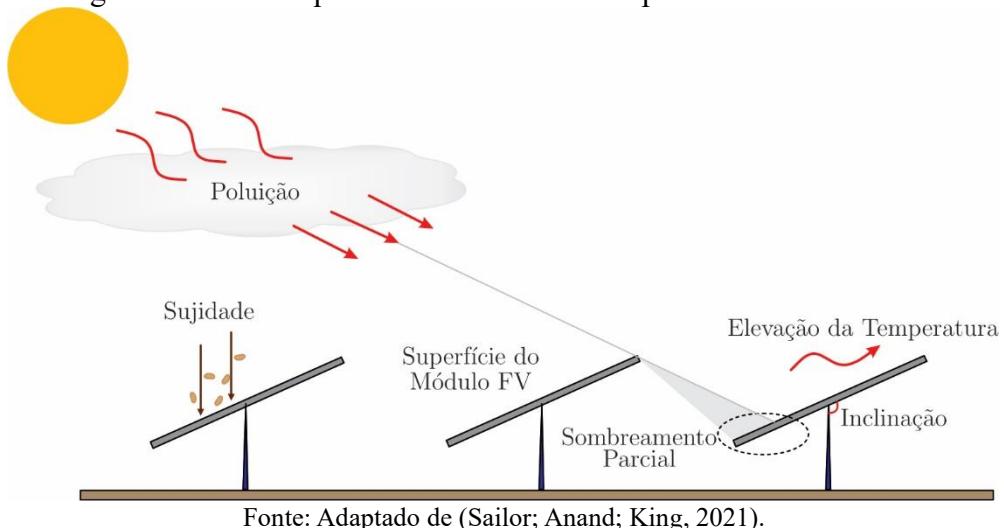
As células FV operam apenas na faixa do espectro das radiações eletromagnéticas; no caso das células de Si cristalino, essa faixa corresponde à luz visível e ao infravermelho próximo ao visível. Devido à falta de coincidência entre o máximo da energia de cada comprimento de onda do espectro solar e o máximo da resposta espectral das células FV, nem toda energia incidente é aproveitada (Zilles *et al.*, 2012).

Idealmente, a resposta espectral de uma célula FV aumentaria de forma linear com o comprimento de onda; todavia, nas células reais, como as de silício monocristalino (m-Si), a resposta máxima ocorre por volta de 800 nm e decresce a partir desse ponto. A resposta espectral distinta de cada tecnologia deve-se às perdas ópticas provocadas pela absorção e reflexão pela cobertura dos módulos (vidro), processos de recombinação elétrons-lacunas, defeitos, impurezas e diferenças nos tipos de dopagem dos semicondutores. No caso das células de multijunção, cada junção apresenta uma resposta espectral distinta, visando a maximização do aproveitamento do espectro solar. Dessa forma, a resposta espectral é a combinação da resposta espectral de cada junção individual (Winck, 2021).

2.2.3 Fatores que influenciam o desempenho das células FV

Os módulos FV são classificados sob STC, que não correspondem necessariamente às condições ambientais de uma determinada localidade. Em áreas urbanas, os módulos FV estão suscetíveis a altas temperaturas, poluição do ar, sombreamento e sujidade, conforme representado na Figura 4 (Sailor; Anand; King, 2021); nas seções subsequentes, serão abordados de forma mais detalhada aspectos referentes à sujidade.

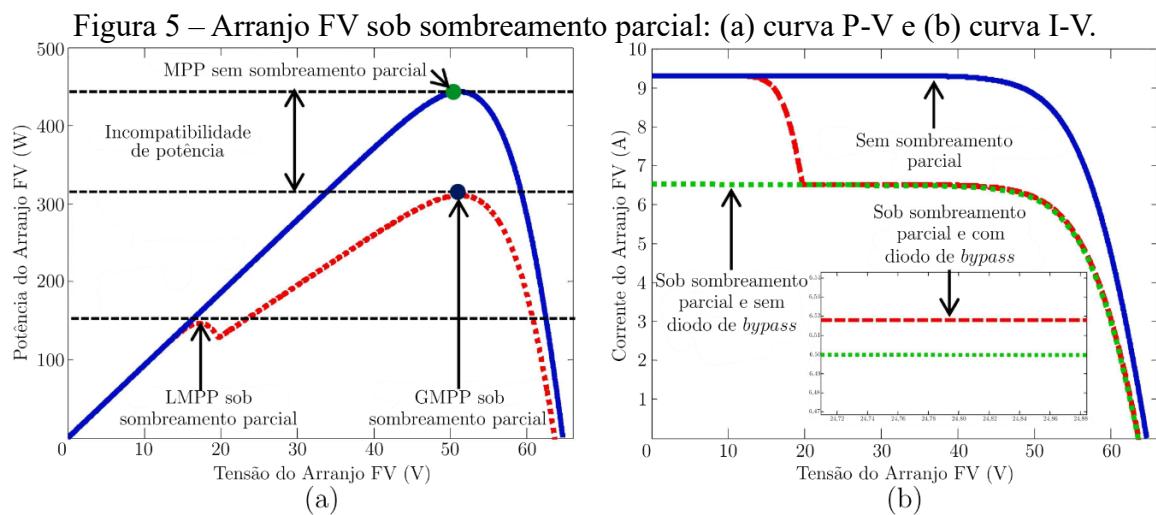
Figura 4 – Fatores que influenciam no desempenho dos módulos FV.



Fonte: Adaptado de (Sailor; Anand; King, 2021).

O sombreamento, resultante do acúmulo de poeira, excremento de pássaros, cobertura de nuvens, presença de árvores, edifícios ou chaminés, e a quebra do vidro de cobertura dos módulos, pode incidir de forma parcial ou total nos módulos FV. Esse fenômeno induz à redução do desempenho e é considerado uma das falhas mais recorrentes em sistemas FV; (Fadhel *et al.*, 2019; Satpathy; Sharma, 2019).

A caracterização elétrica dos módulos FV inclui as curvas de potência-tensão (P-V) e corrente-tensão (I-V), que representam de forma gráfica a operação dos módulos sob determinadas condições de operação. Essas curvas fornecem informações que permitem a adoção de estratégias para que os módulos operem próximo ao Ponto de Máxima Potência (*Maximum Power Point - MPP*). Todavia, as características elétricas dos módulos FV sob sombreamento são modificadas; formam-se múltiplos picos na curva P-V, provocando falso Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (*Maximum Power Point Tracking - MPPT*) resultando em perda de potência. O MPP real do sistema é denominado Ponto de Potência Máxima Global (*Global Maximum Power Point - GMPP*), enquanto os demais picos são denominados de Ponto de Potência Máxima Local (*Local Maximum Power Point - LMPP*) (Satpathy; Sharma, 2019). Na Figura 5, são representadas curvas P-V e I-V de um arranjo FV sob sombreamento parcial.



Fonte: Adaptado de (Satpathy; Sharma, 2019).

A temperatura dos módulos FV depende do *design*, dos materiais empregados em sua construção e da temperatura ambiente. A tensão de circuito aberto (*Open Circuit Voltage - V_{oc}*) e o Fator de Forma (*Fill Factor – FF*) reduzem com o aumento da temperatura, enquanto a corrente de curto-circuito (*Short-Circuit Current - I_{sc}*) aumenta, mesmo que de forma discreta, resultando em uma redução da eficiência (η); a mudança em V_{oc} é menor para materiais com maior *gap* (Sailor; Anand; King, 2021).

2.3 Sujidade

A sujidade pode ser compreendida como uma camada de poeira, neve ou qualquer material contaminante que se acumula na superfície dos módulos FV, causando a redução da transmitância do vidro e, consequentemente, redução do desempenho elétrico do sistema FV (Ferrada *et al.*, 2019; Raina *et al.*, 2021). A poeira é definida como qualquer MP com até 500 µm de diâmetros, originado de diversas fontes, tais como poluição do ar, tempestades de areia/poeira, erupções de vulcões, emissões de veículos e indústrias, podendo conter fungos, bactérias, microfibras, vegetação e compostos orgânicos (Darwish *et al.*, 2015).

Um módulo com sujidade pode estar sujeito a condições de sombreamento parcial, dependendo da distribuição (uniforme ou não uniforme) e da espessura da camada de sujidade. Tipicamente, a deposição não uniforme é observada em módulos FV com molduras, onde há maior propensão de acúmulo de sujidade nas extremidades inferiores devido ao deslocamento das partículas pela precipitação, especialmente em módulos instalados com pequenos ângulos de inclinação. Dependendo da localidade, pode haver padrões de deposição distintos mesmo em módulos próximos. A deposição não uniforme compromete o desempenho elétrico dos módulos FV e pode causar o surgimento de pontos quentes, que eventualmente podem danificar de forma permanente as células FV (Braga, 2018). Adicionalmente, a deposição não-uniforme de sujidade pode estar relacionada à presença de excrementos de animais, bem como à proliferação de fungos, musgo e algas. Na Figura 6 são representados exemplos de diferentes tipos de deposição de sujidade.

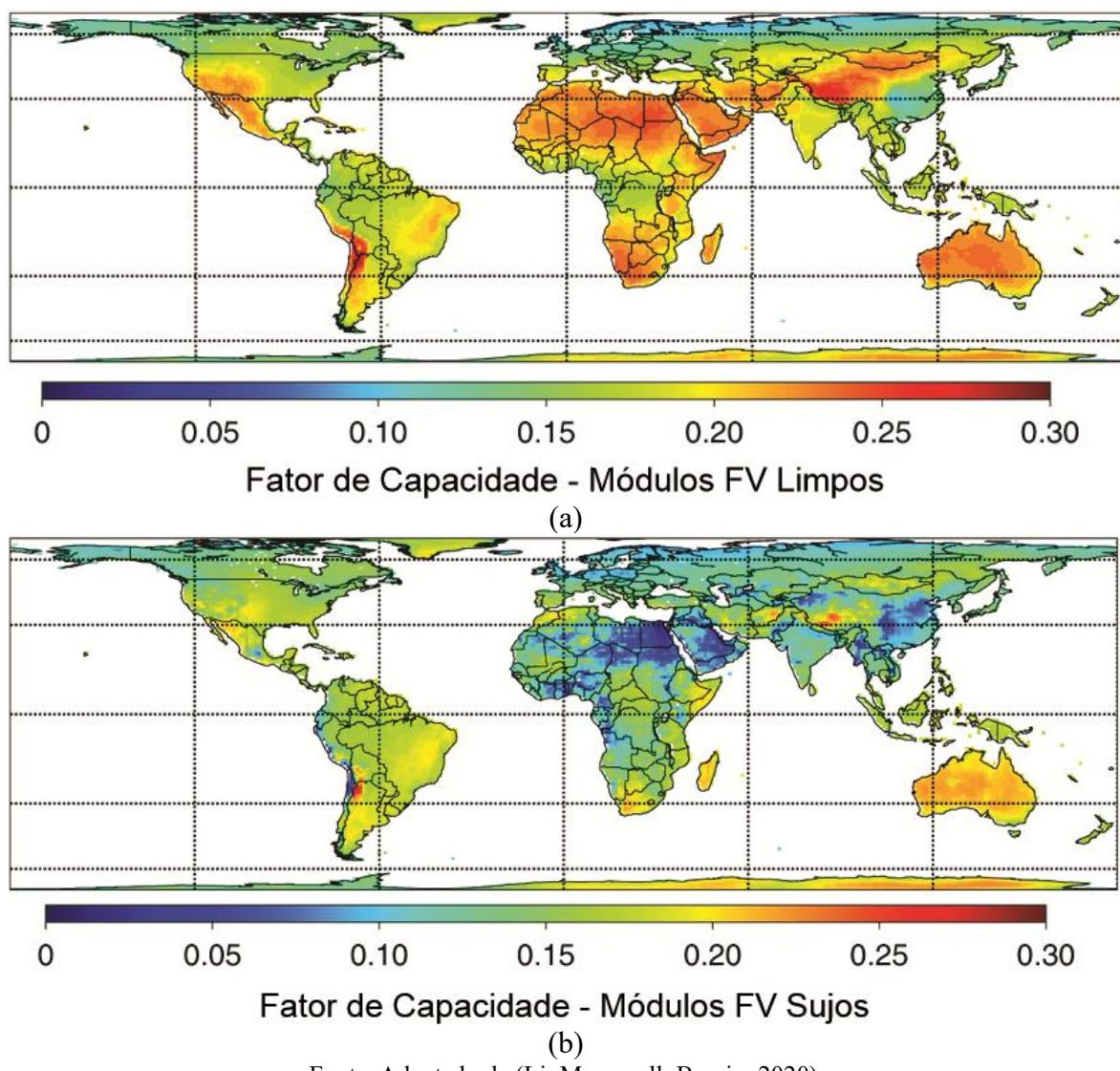
Figura 6 – Exemplo de diferentes tipos de deposição de sujidade.



Fonte: Adaptado de (Ilse *et al.*, 2019).

A maioria das regiões com abundância de recurso solar apresentam Fator de Capacidade (FC - *Capacity Factor*) médio entre 0,20 e 0,25. Ao considerar o impacto anual da sujidade, incluindo apenas os efeitos das precipitações, o FC dos sistemas FV nessas regiões pode reduzir em mais de 30%, conforme apresentado nas Figura 7(a) e (b) (Li; Mauzerall; Bergin, 2020). Em termos diários, a redução no desempenho dos módulos FV pode atingir 1%/dia, especialmente em regiões desérticas (Adothu *et al.*, 2024). O fenômeno da sujidade é reversível, mas é uma característica global, inevitável e desafiadora.

Figura 7 – FC de sistemas FV (2003–2014): (a) módulos com limpeza e (b) módulos sujos.



Fonte: Adaptado de (Li; Mauzerall; Bergin, 2020).

2.3.1 Natureza da composição da sujidade

De acordo com Rao, Mani e Ramamurthy (2018), a distribuição do tamanho das partículas de sujidade varia conforme a localidade, pois depende da fonte e dos mecanismos de geração e dispersão. As características químicas também são específicas para cada local, pois

estão sujeitas aos mecanismos de produção e fontes geradoras. Portanto, para uma compreensão abrangente, é necessária a caracterização e medição da sujidade em todas as estações do ano em cada local; esses fatores dificultam o estabelecimento de um fator universal de deterioração da geração de plantas FV devido à sujidade (Salamah *et al.*, 2022).

A caracterização da composição da sujidade e a forma de sua distribuição pela superfície dos módulos FV são fatores cruciais para o entendimento das interações partículas e módulos, determinação dos seus efeitos no desempenho elétrico/térmico e escolha de métodos de mitigação adequados às particularidades de cada localidade.

O carregamento de partículas suspensas no ar está principalmente relacionado à erosão causada pelo vento no solo. Após o início da movimentação das partículas, os mecanismos de transporte dependem, sobretudo, do seu tamanho (Picotti *et al.*, 2018). Partículas maiores são afetadas principalmente por efeitos iniciais e gravitacionais, enquanto as partículas menores são influenciadas pelas interações inter-partículas. Assim, partículas finas ($<1 \mu\text{m}$) tendem a se acumular com maior rapidez do que partículas grossas ($>5 \mu\text{m}$) (Salamah *et al.*, 2022). Na Tabela 1 é apresentada a classificação de sedimentos com base na distribuição do tamanho das partículas.

Tabela 1 – Classificação de sedimentos por tamanho.

Diâmetro (μm)	Classificação
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; Pye, 2012).

As partículas presentes no ar têm origem em processos naturais ou decorrem de atividades antropogênicas. Geralmente, a queima de combustíveis, processos mecânicos, moagem, beneficiamento mineral e resuspensão de poeira, por exemplo, resultam na emissão de um conjunto de elementos químicos associados a cada processo (Schwela; Morawska; Kotzias, 2002). Na literatura, são apresentados os conjuntos de elementos químicos presentes na sujidade relacionados com suas fontes geradoras, conforme descrito no Quadro 1.

Quadro 1 – Elementos químicos emitidos por várias fontes geradoras de partículas.

Fonte Geradora	Elementos Químicos Característicos
Emissão de motores veiculares	Br, Pb, Ba, Mn, Cl, Zn, V, Ni, Se, Sb, As
Desgaste do motor	Fe, Al
Conversores catalíticos	Metais de terras-raras
Desgaste dos pneus	Zn
Poeira à beira da estrada	Ca elementar, Al, Si, K, Ca, Ti, Fe, Zn
Usinas termoelétricas a óleo	V, Ni
Combustão de carvão	Se, As, Cr, Co, Cu Al, S, P, Ga
Refinarias	V
Fundições de metais não ferrosos	As, In (Ni fundido), Cu, Zn
Usinas de ferro e aço	Pb
Planta produtora de metais de Mn e produtos químicos de Mn	Mn
Refinaria de cobre	Cu
Incineração de resíduos	Zn, Sb, Cu, Cd, Hg, K, Pb
Fumaça de madeira	Ca, Na, K, Fe, Br, Cl, Cu, Zn
Emissões de carbonização de carne	Na, Al, K, Sr, Ba, Cl
Processamento de minerais e materiais	Mg, Al, K, Sc e Fe, Mn.
Maresia	Na, Cl, S, K
Solo ressuspenso	Si, V, Cr, Ca, Ti, Sr, Al, Mn, Sc

Fonte: Adaptado de (Schwela; Morawska; Kotzias, 2002).

Segundo Schwela, Morawska e Kotzias (2002), a presença dos conjuntos de elementos descritos no Quadro 1 e sua concentração pode variar com o tempo e depende da fonte geradora e do ambiente local. Outro ponto a ser observado é a forma química que o elemento apresenta, pois há diferença nas propriedades químicas e físicas, o que pode afetar o processo de transporte ambiental das diferentes formas químicas. No Quadro 2 são apresentadas as características e fatores que influenciam na composição da sujidade.

Quadro 2 – Fatores que influenciam a sujidade.

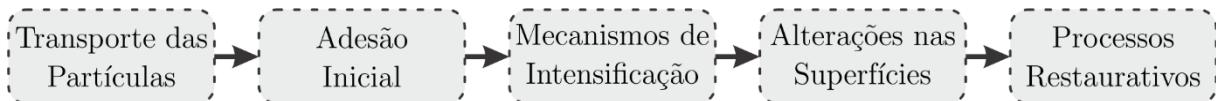
Característica	Fator Influenciador
Distribuição do Tamanho	Composição química, velocidade do vento e direção do vento
Composição Química	Aerossóis atmosféricos, chuva, vento
Morfologia	Fonte de poeira, composição química
Fonte Geradora	Localização do sistema FV
Teor de umidade/índice de plasticidade de partículas de poeira	Razão de umidade, composição química
Gravidade específica das partículas de poeira	Composição química/espécies

Fonte: Adaptado de (Rao; Mani; Ramamurthy, 2018).

2.3.2 Processo de deposição da sujidade

Para compreender e, eventualmente, controlar a sujidade, é necessário conhecer as etapas que compõem o seu ciclo, conforme apresentado na Figura 8 (John, 2015). No âmbito desta Tese o termo “deposição” refere-se ao transporte de partículas contaminantes para a superfície dos módulos FV, independentemente de sua posterior aderência ou não.

Figura 8 – Etapas do ciclo da sujidade.



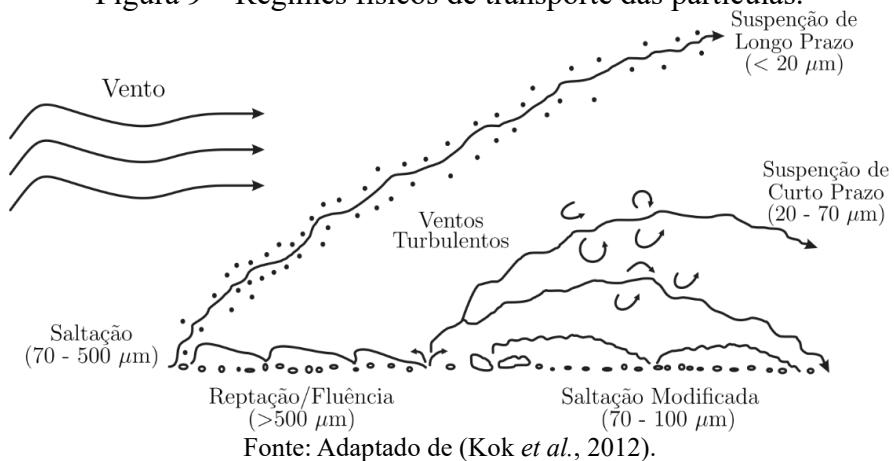
Fonte: Adaptado de (Jonh, 2015).

De acordo com Figgis *et al.* (2017), os mecanismos de deposição de partículas podem ser classificados como: sedimentação por gravidade, deposição inercial ou turbulenta e movimento *browniano*; a atuação desses mecanismos depende do tamanho da partícula transportada e da velocidade do vento. Partículas com tamanho da ordem de 1 μm se difundem no espaço de forma aleatória e têm maior propensão a permanecerem no fluxo de vento (movimento *browniano*); partículas com tamanho $\geq 10 \mu\text{m}$ são depositadas predominantemente por inércia. Partículas com cerca de 100 μm têm a sedimentação gravitacional como mecanismo predominante.

A sedimentação por gravidade é influenciada por características das partículas, como tamanho, densidade e morfologia. A deposição inercial, por sua vez, depende da velocidade e da turbulência do vento. No caso de módulos FV, o processo de sedimentação pode ser atenuado por sua inclinação ou pela inserção de uma cobertura de proteção contra sujidade quando não estão em operação. A influência da deposição inercial pode ser reduzida posicionando a planta FV em uma localidade com um fluxo de ar padrão ou instalando-a acima do nível do solo, onde o vento tende a ser mais veloz (Figgis *et al.*, 2017).

De maneira geral, o transporte de partículas pelo vento pode ser dividido em quatro regimes físicos: (1) suspensão de longo prazo ($\leq 20 \mu\text{m}$), (2) suspensão de curto prazo (20-70 μm), (3) saltação (70-500 μm) e (4) reptação e fluênciia ($\geq 500 \mu\text{m}$). Cada um desses regimes transita continuamente para o próximo, dependendo das alterações na velocidade do vento, tamanho e distribuição das partículas (Kok *et al.*, 2012). Na Figura 9 são ilustrados os regimes físicos do transporte de partículas pelo vento.

Figura 9 – Regimes físicos de transporte das partículas.



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

Partículas no regime de suspensão de longo prazo podem permanecer no ar por semanas e serem transportadas por longas distâncias; a saltação pode modificar o tamanho das partículas maiores. Partículas maiores que 500 μm têm grande inércia e não são susceptíveis à saltação; contudo, são sujeitas a movimentos como a reptação, que envolve saltos de aproximadamente um centímetro, e a fluênciam, que é o rolamento/deslizamento ao longo de uma superfície devido à ação de partículas no regime de saltação (Kok *et al.*, 2012).

Durante a etapa de transporte, as partículas são removidas do ar de forma contínua por processos de deposição seca e/ou úmida, havendo uma dependência temporal e espacial desses mecanismos. A deposição seca resulta da sedimentação gravitacional e mistura de partículas suspensas que se depositam nos módulos FV, enquanto a deposição úmida é caracterizada pela eliminação de partículas suspensas devido às precipitações ou neve (Lawrence; Neff, 2009). Assim, as partículas são assentadas na superfície dos objetos expostos às condições ambientais, possibilitando o início do processo de adesão. Na adesão inicial da sujidade à superfície dos módulos FV, várias forças atuam entre partículas e superfície, como forças capilares, van der Waals, eletrostática e gravitacionais.

As forças capilares dominam quando a umidade interage com partículas e superfície através da formação de pontes de água (Brambilla; Speckart; Brown, 2017). A atuação dessa força é dependente do diâmetro da partícula, sendo especialmente eficaz para partículas maiores que 10 μm, umidade (níveis da ordem de 30-40% já são suficientes), geometria da superfície e ângulos de contato (Brambilla; Speckart; Brown, 2017; Isaifan *et al.*, 2019). Em contrapartida, as forças capilares são reduzidas em superfícies hidrofóbicas, repelentes à água e com alta rugosidade (Ilse *et al.*, 2018a).

A força de van der Waals resulta da atração ou repulsão entre átomos ou moléculas (Isaifan *et al.*, 2019). Esta força tem curto alcance e tende a zero quando as superfícies

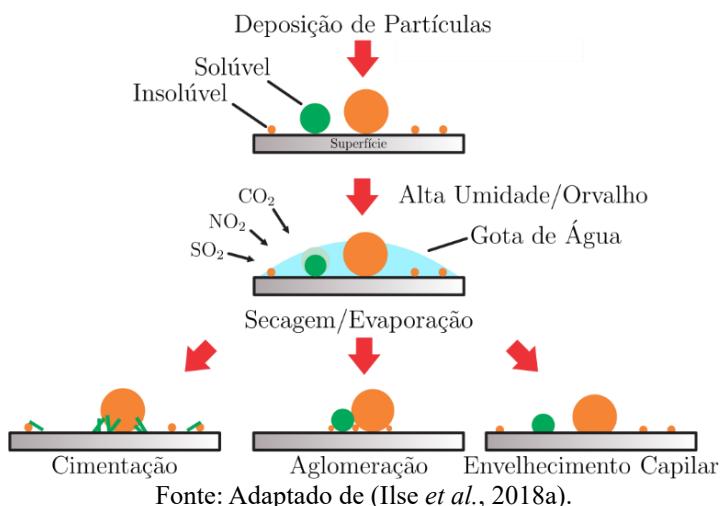
inicialmente em contato são separadas. Assim, há uma dependência da área de contato partículas e superfície; as propriedades do material e a presença de umidade são fatores que reduzem a sua eficácia (Ilse *et al.*, 2018a).

Partículas suspensas no ar podem adquirir carga elétrica por colisões e outros meios, atraindo ou repelindo cargas nos módulos FV, mesmo quando a superfície inicial não está carregada, originando forças eletrostáticas (Isaifan *et al.*, 2019). Essa força é influenciada por campos elétricos, propriedades elétricas da carga e superfície, distância de separação e estado de carga das partículas. Normalmente, as forças eletrostáticas não são dominantes para distâncias menores que 20 nm (Ilse *et al.*, 2018a).

Em condições úmidas, as forças capilares representam 98% das forças atuantes entre partículas e superfície, enquanto as forças de van der Waals correspondem a 2%. As forças eletrostáticas são consideradas desprezíveis, uma vez que, a umidade atua na eliminação de seus efeitos. Ademais, as forças gravitacionais são irrelevantes para partículas menores que 500 μm (Isaifan *et al.*, 2019).

Os módulos FV, expostos ao ar livre, são sujeitos a mecanismos de limpeza natural, mas o processo de adesão das partículas à sua superfície pode ser intensificado. De modo geral, precipitações de baixa intensidade e frequência, alta umidade e formação de orvalho são responsáveis por mecanismos que aumentam a adesão da sujidade, como cimentação, aglomeração de partículas e envelhecimento capilar (Sarver; Al-Qaraghuli; Kazmerski, 2013; Ilse *et al.*, 2018a). Na Figura 10 são representados os mecanismos de intensificação da sujidade na superfície dos módulos FV.

Figura 10 – Mecanismos de intensificação da sujidade.



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

A sujidade apresenta natureza orgânica e inorgânica. Na presença de água ou em condições com alta umidade, a parte solúvel tende a formar gotículas microscópicas de soluções

salinas que envolvem a parte não solúvel (Sarver; Al-Qaraghuli; Kazmerski, 2013). Durante o processo de secagem, o material salino precipitado provoca a formação de pontes sólidas entre o material não solúvel e a superfície dos módulos, atuando como um cimento. Consequentemente, as partículas não podem ser removidas por rolamento ou deslizamento. Caso esse processo ocorra periodicamente, sem que haja intervenção de limpeza, ocorrerá o acúmulo de camadas de partículas cimentadas, tornando o processo de limpeza (manual ou natural) mais complicado e, em casos mais extremos, podendo alterar permanentemente as propriedades do vidro dos módulos FV (Ilse *et al.*, 2018a).

A aglomeração de partículas é provocada pelo rearranjo, aglomeração e compactação de partículas durante eventos de orvalho. A formação de gotas de água na superfície dos módulos provoca a suspensão de partículas pequenas e, à medida que a gota seca, ocorre a aglutinação das partículas em um volume menor até que elas entrem em contato novamente com a superfície dos módulos. Assim, partículas pequenas se alocam entre os espaços formados por partículas maiores, unindo-as após a evaporação da água e aumentando as forças de van der Waals (Ilse *et al.*, 2018a).

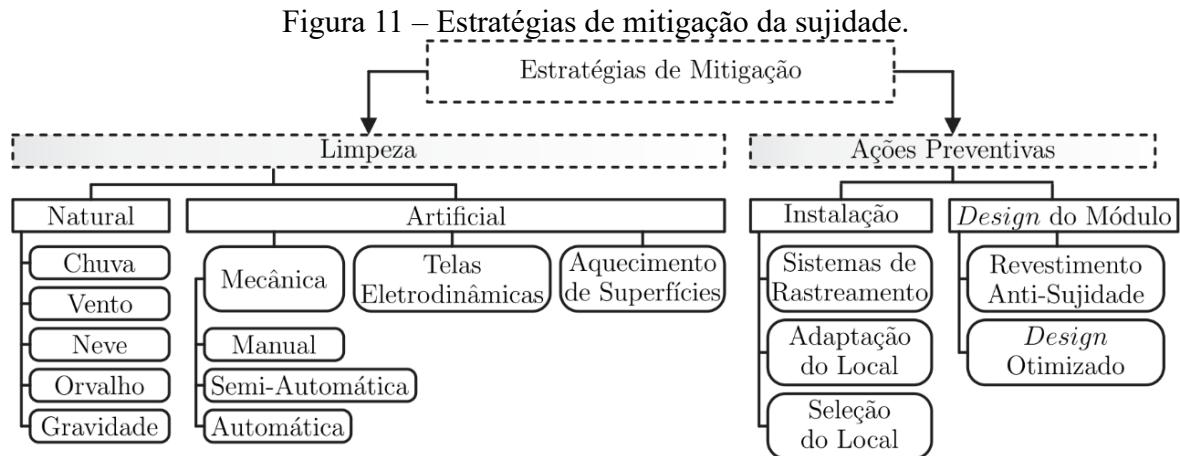
O processo de envelhecimento capilar é causado pelo achatamento das partículas de sujidade contra a superfície dos módulos FV, provocado pelas forças capilares quando as pontes líquidas entre partículas e superfície estão secando. Em consequência, há aumento da área de contato e intensificação das forças de adesão, como as forças de van der Waals. Além disso, esse mecanismo de adesão pode ocorrer entre partículas, promovendo aglomeração e cimentação, dificultando a remoção pelo vento (Ilse *et al.*, 2018a).

Como consequência dos mecanismos de adesão da sujidade, a superfície dos módulos pode sofrer alterações de suas características originais, podendo até resultar em maior acúmulo de partículas (John, 2015). Características como textura aparente e revestimento adicional influenciam a taxa de assentamento da sujidade (Jamil *et al.*, 2017b). Portanto, os métodos de mitigação, se bem empregados, podem prevenir danos à integridade de módulos FV. Segundo Nurjanah, Dewi e Rusdianasari (2021), manchas de poeira em algumas partes dos módulos (sujidade cimentada) podem induzir superaquecimento nas células FV e causar curto-circuito. Os processos restaurativos, que compõem o ciclo da sujidade, são apresentados na seção subsequente.

2.4 Métodos de mitigação da sujidade

O primeiro estágio para lidar com a sujidade é a realização de um monitoramento adequado para determinar o melhor método de mitigação, uma vez que não há uma estratégia

universalmente válida devido à da influência de características locais (Bessa *et al.*, 2021). De maneira geral, as estratégias de mitigação são divididas em duas categorias: limpeza e ações preventivas, conforme ilustrado na Figura 11.



Fonte: Adaptado de (Bessa *et al.*, 2021).

Segundo Bessa *et al.* (2021), a adoção de uma estratégia otimizada de mitigação oferece as seguintes vantagens: (1) o aumento das receitas das plantas FV devido ao incremento do FC, permitindo que a porcentagem de geração FV seja elevada sem a necessidade de implantação de novas plantas, e (2) melhoria nas margens financeiras, incentivando novos investimentos e, consequentemente, favorecendo o aumento da capacidade instalada e contribuindo com o mercado local, nacional e global.

Embora as perdas diárias de desempenho de plantas FV variem de acordo com a localidade, diversos estudos experimentais mostram que essas perdas se acumulam com o tempo. Portanto, a escolha do método de limpeza, periodicidade, eficiência e custos associados depende de um estudo de caso prévio. Além disso, devem ser considerados aspectos como tamanho da planta FV, disponibilidade de água, parâmetros climáticos e características da sujidade (Kazem *et al.*, 2020).

Segundo Li, Mauzerall e Bergin (2020), o maior benefício das limpezas em sistemas FV é observado em áreas desérticas, como no norte da África, no Oriente Médio e no oeste da China. No caso do Brasil, para o período 2003-2014, estima-se que a execução de limpezas trimestrais e semanais tem potencial de elevar o FC entre 2 e 4%.

2.4.1 Limpeza Natural

Em certas condições, a limpeza natural provocada pela incidência de precipitações fortes ou pelo derretimento de neve pode ser suficiente para restaurar o desempenho da geração FV impactado pela presença de sujidade (Styszko *et al.*, 2018). As precipitações exercem um

papel importante na mitigação de sujidade, em especial, nos sistemas FV que não adotam cronograma de limpeza, devido à indisponibilidade de água ou mão de obra qualificada (L. *et al.*, 2021). No entanto, precipitações de baixa intensidade podem contribuir para uma maior deposição de contaminantes, bem como acelerar o processo de cimentação da sujidade (Jaszczur *et al.*, 2019).

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

Outro agente que pode contribuir com a limpeza natural de módulos FV é o vento, sobretudo aquele com velocidade moderada e que não carrega poeira (Kazem *et al.*, 2020). Para L. *et al.* (2021), a deposição de sujidade na superfície dos módulos depende da velocidade e direção do vento, devido ao processo de suspensão e transporte das partículas; por outro lado, os autores mencionam o efeito de limpeza provocado por esse agente.

É importante destacar ainda que a rugosidade da superfície dos módulos FV contribui para a redução da adesão de partículas de sujidade em todos os níveis de umidade. Assim, em condições secas, há uma redução da área de contato superfície-partícula, enquanto em condições úmidas, ocorre a formação de pontes líquidas entre a superfície e as partículas. No entanto, considerando os procedimentos de mitigação natural, a eliminação da ocorrência do processo de condensação na superfície de módulos com sujidade é difícil, uma vez que esse processo pode ocorrer através da formação de gotículas microscópicas, mesmo em superfícies hidrofóbicas mais quentes que o ponto de orvalho (Figgis *et al.*, 2018).

2.4.2 Limpeza Artificial

A limpeza mecânica manual é similar a limpeza de janelas em edifícios com escovas de cedas macias. Devido a ação localizada, essa metodologia pode se mostrar mais eficiente do que a limpeza natural ou limpeza mecânica não manual com água canalizada. Contudo, a interação direta com a superfície pode causar danos físicos nos módulos, como abrasões e rachaduras, pela falta de uniformidade dos movimentos/pressão ou manuseio incorreto dos equipamentos. Além disso, requer o emprego de mão de obra especializada, o que resulta em um aumento dos custos em relação a outros métodos passivos (Kazem *et al.*, 2020). O risco de

acidentes de pessoal, as dificuldades de movimentação e o desperdício de água são outras desvantagens do método de limpeza manual (Laksahani *et al.*, 2021).

Na limpeza mecânica não manual, são utilizados dispositivos semiautomáticos, que necessitam da intervenção/supervisão de trabalhadores, ou totalmente automáticos que, com auxílio de sensores, se movem pela superfície dos módulos utilizando escovas, com uso de água ou não, para realizar a remoção da sujidade. Os sistemas baseados em limpeza mecânica não manual a seco podem ser uma solução viável para áreas com dificuldade de acesso à água; todavia, o contato direto das escovas com a superfície dos módulos pode causar danos físicos. Outro limitante na adoção de um sistema mecânico não manual a seco é o consumo adicional de energia, a necessidade de manutenção nas partes mecânicas e a alta complexidade no controle dos sistemas utilizados, como robôs, motores ou *scanners* (Kazem *et al.*, 2020).

Os sistemas mecânicos não manuais úmidos agem de forma similar às precipitações, canalizando água até os módulos FV a fim de remover a sujidade. Contudo, esse método requer disponibilidade de água e utilização de bombas para aumentar a pressão da água; em alguns casos, podem ser adicionados agentes de limpeza para auxiliar no processo de remoção das partículas. Outros fatores limitantes são o consumo de energia pelas bombas, entupimento/rompimento das mangueiras e a possibilidade de choques térmicos na superfície dos módulos, uma vez que, frequentemente, esse tipo de limpeza é acionado quando a intensidade do sol está alta, para proporcionar a secagem dos módulos (Kazem *et al.*, 2020).

Outro método de mitigação é o uso de telas eletrostáticas (*Electro-Dynamic Display – E-DS*). De acordo com Kazem *et al.* (2020), esse método depende do uso de um campo elétrico, alimentado em alta tensão, para produzir um campo elétrico em uma tela fixada na superfície dos módulos, com objetivo de carregar as partículas de poeira e facilitar sua remoção. As principais características incluem rápida remoção e facilidade no controle. As desvantagens são: degradação da tela E-DS devido à radiação ultravioleta, necessidade de uma fonte de alta tensão para produzir o campo elétrico e limitação à remoção de partículas secas e pequenas.

2.4.3 Ações Preventivas

O ângulo de inclinação exerce uma relação direta de controle da quantidade de deposição de sujidade, visto que a gravidade tende a puxar as partículas para a parte inferior ou para fora dos módulos à medida que ficam mais próximos da vertical (Rao; Mani; Ramamurthy, 2018). Em outras palavras, ângulos de inclinação maiores dificultam a deposição de partículas de sujidade e facilitam a remoção das partículas depositadas, seja pelas forças gravitacionais ou pela ação de agentes de limpeza natural (precipitações e vento, por exemplo) (Jaszczur *et al.*,

2019). Em Conceição *et al.* (2022) é destacada a importância de uma análise de direcionalidade dos módulos para o desenvolvimento de barreiras para a poeira, principalmente diante de fontes de geração de sujidade em direções específicas.

De acordo com Jamil *et al.* (2017a), os métodos autolimpantes em módulos FV são utilizados para reduzir custos de mão de obra e em áreas de difícil acesso para limpeza. Assim, a utilização de revestimentos baseia-se na aplicação de soluções hidrofóbicas na superfície dos módulos FV em finas camadas, para atuar como uma barreira contra a cimentação da sujidade. Diante da precipitação de água, as gotículas rolam pela superfície dos módulos, carregando as partículas de sujidade já depositadas. Todavia, devido à radiação ultravioleta, a eficácia desse método pode ser limitada pela degradação do revestimento. Ademais, revestimentos autolimpantes hidrofóbicos requerem a presença de água para remoção da sujidade, ou seja, seu uso é limitado em ambientes secos (Kazem *et al.*, 2020).

No que se refere ao processo de condensação em superfícies com revestimentos hidrofóbicos, Figgis *et al.* (2018) afirmam que há consistência na redução da adesão de partículas de sujidade para diferentes níveis de umidade relativa em experimentos laboratoriais. No entanto, o uso de revestimentos hidrofóbicos não foi necessariamente capaz de reduzir o acúmulo de sujidade em experimentos de campo. Diante do exposto, a utilização desses revestimentos não elimina totalmente a necessidade do uso da água para otimização dos resultados das limpezas, sendo essa uma das razões apontadas por Conceição *et al.* (2022) para a utilização limitada desse recurso pelo mercado.

2.5 Estimativa dos efeitos da sujidade em plantas FV

De acordo com Bessa *et al.* (2021), a variabilidade e interação de parâmetros ambientais são fundamentais no processo de assentamento e remoção da sujidade. Assim, ao conhecer as correlações com esses parâmetros, é possível estimar os efeitos da sujidade sem a necessidade de utilizar de detectores ou analisar o desempenho das plantas FV. Portanto, é possível estimar antecipadamente as perdas devido à sujidade durante a elaboração do projeto, avaliação de custos e seleção de local de instalação.

Para Kazem *et al.* (2020), muitas características interferem nos impactos causados pela sujidade, tais como composição, tamanho e forma das partículas, além de parâmetros ambientais como umidade, temperatura e vento. De acordo com Conceição *et al.* (2022), a deposição da sujidade resulta da interação de diversas variáveis, não podendo ser estabelecida como tendo uma dependência direta de um único parâmetro.

Nesse sentido, um dos principais desafios para o estudo da sujidade pelo cálculo de métricas de desempenho é a identificação e eliminação de questões não relacionadas com o processo da sujidade, como degradação e falhas dos módulos e inversores. Quanto à utilização de métricas de avaliação, Conceição *et al.* (2022) destacam a necessidade de padronização de símbolos e nomenclaturas a fim de garantir seu uso adequado, uma vez que a literatura apresenta casos de utilização incorreta de nomenclaturas, o que pode induzir ao erro de interpretação sobre o real efeito da sujidade.

Na literatura, são encontradas diferentes métricas de avaliação da sujidade. Contudo, Costa (2018) estabelece que inicialmente é necessário realizar as correções dos parâmetros para STC para que possam ser realizadas comparações de desempenho de plantas FV independentemente de sua localização geográfica, posicionamento, inclinação e potência nominal. As Equações (1) e (2) são utilizadas para correções da I_{sc} e potência máxima (*Maximum Power – P_{Max}*). Ressalta-se que o subscrito STC é utilizado para descrever as características elétricas dos módulos informados no catálogo fornecido pelo fabricante.

$$I_{sc_{Norm}} = I_{sc_{STC}} \cdot [1 + \alpha(T_c - T_{STC})] \cdot \frac{G_{POA}}{G_{STC}} \quad (1)$$

$$P_{Max_{Norm}} = P_{Max} \cdot [1 + \gamma(T_c - T_{STC})] \cdot \frac{G_{POA}}{G_{STC}} \quad (2)$$

Os parâmetros $I_{sc_{Norm}}$ e $P_{Max_{Norm}}$ representam a I_{sc} e P_{Max} normalizadas para STC; α e γ são os coeficientes de temperatura para a corrente de curto-círcuito e potência; e T_c é a temperatura da célula, respectivamente. T_{STC} e G_{STC} são a temperatura e irradiação nas condições de referência (25 °C e 1.000 W/m²), e G_{POA} é a irradiação incidente no plano dos módulos.

Uma métrica amplamente difundida na comunidade científica para determinação dos efeitos da sujidade é a Relação de Sujidade (*Soiling Ratio - SRatio*). Essa métrica pode ser determinada por meio dos dados de I_{sc} (*SRatio_{Isc}*) ou P_{Max} (*SRatio_{PMax}*) de módulos sujos e limpos, sendo relatado que *SRatio_{PMax}* apresenta melhor resultado para a mensuração de sujidade não uniforme em módulos FV que utilizam diodos de *by-pass*. A *SRatio* é uma métrica adimensional que varia entre 0 e 1; à medida que os valores se aproximam de 1, considera-se que há menor impacto pela sujidade, enquanto valores próximos de 0 indicam um forte efeito da sujidade no desempenho dos módulos FV. Para situações que utilizam estações de sujidade (módulos FV da mesma tecnologia expostos às mesmas condições, sendo um limpo e outro sujo), a *SRatio* é quantificada pelas Equações (3) e (4). Caso a utilização de uma estação de

sujidade não seja possível, a *SRatio* pode ser estimada através das Equações (5) e (6) (Gostein; Duster; Thuman, 2015).

$$\text{SRatio}_{I_{sc}} = \frac{I_{sc\text{Sujo}}}{I_{sc\text{Limp}}} \quad (3)$$

$$\text{SRatio}_{P_{Max}} = \frac{P_{Max\text{Sujo}}}{P_{Max\text{Limp}}} \quad (4)$$

$$\text{SRatio}_{I_{sc}} = \frac{I_{sc\text{Sujo}}}{I_{sc\text{STC}} \cdot [1 + \alpha (T_{m\text{Sujo}} - T_{\text{STC}})] \cdot \frac{G_{POA}}{G_{\text{STC}}}} \quad (5)$$

$$\text{SRatio}_{P_{Max}} = \frac{P_{Max\text{Sujo}}}{P_{Max\text{STC}} \cdot [1 + \gamma (T_{m\text{Sujo}} - T_{\text{STC}})] \cdot \frac{G_{POA}}{G_{\text{STC}}}} \quad (6)$$

Em que $I_{sc\text{Sujo}}$ e $I_{sc\text{Limp}}$ são as correntes de curto-circuito do módulo sujo e limpo, respectivamente; e $P_{Max\text{Sujo}}$ e $P_{Max\text{Limp}}$ são as potências máximas do módulo sujo e limpo, respectivamente.

Quanto à determinação de *SRatio*, estudos realizados por Gostein *et al.* (2013) mostram que, mesmo considerando fatores de correção para eliminar os efeitos da temperatura, $\text{SRatio}_{I_{sc}}$ subestima a perda de sujidade. Assim, para obtenção da *SRatio*, é preciso realizar o registro e comparar da potência dos módulos limpos e sujos durante o período de teste (Yazdani; Yaghoubi, 2022).

De acordo com Conceição *et al.* (2022), a variação da *SRatio* ao longo do tempo é definida como Taxa de Sujidade (*Soiling Rate – SRate*), geralmente expressa em termos de perdas diárias. Os valores de *SRate* são negativos, representando um coeficiente de perda, e quanto mais próximos de 0, menor é o efeito da sujidade no desempenho da planta FV (Araújo, 2019).

Para a determinação de *SRate*, inicialmente devem ser identificados os períodos secos com duração igual ou superior a 14 dias e estimado o desempenho do sistema FV por meio de uma métrica de desempenho. Com base nisso, o estimador de Theil-Sen é utilizado para determinar a inclinação dos dados de desempenho (em cada período seco) e fornecer a mediana de todas as inclinações (Costa, 2018). O estimador de Theil-Sen foi proposto inicialmente por Theil (1950) e Sen (1968) e apresenta menor influência de anomalias; a regressão de Theil-Sen é determinada de acordo com a Equação (7).

$$\beta_1 = \text{Mediana} \left\{ b_{i,j} = \frac{t_i - t_j}{x_i - x_j} : x_i \neq x_j, 1 \leq i \leq j \leq n \right\} \quad (7)$$

Em que (x_i, t_i) e (x_j, t_j) são as coordenadas bidirecionais dos pares de pontos analisados, e n representa o número de pontos que compõem a amostra.

A Relação de Desempenho (*Performance Ratio – PR*), que estabelece uma relação de eficácia de conversão em energia elétrica de um módulo/planta FV em relação ao valor teórico, é outra métrica recorrentemente utilizada; é adimensional e varia entre 0 e 1. Valores mais próximos de 1 indicam funcionamento próximo ao projetado pelo fabricante (Araújo, 2019).

De acordo com Urrejola *et al.* (2016), o *PR* compara o rendimento de saída da planta FV (Y_R) com o rendimento teórico (Y_F). Assim, apresenta dependência da irradiação e pode ser estabelecido como a relação entre a energia de saída do módulo FV (E_{CA}) e o seu valor de potência de pico em STC, conforme mostrado na Equação (8).

$$PR = \frac{Y_F}{Y_R} = \frac{E_{CA}}{P_{MáxSTC} \cdot \frac{G_{POA}}{G_{STC}}} \quad (8)$$

O valor de *PR* dependente da T_m , dissipação de energia, sistema de medição e sujidade. Ademais, o valor de *PR* não reflete necessariamente perdas inerentes apenas à sujidade, pois incorporam efeitos de sombreamentos, perdas elétricas da instalação, degradação dos módulos e perdas de refletância solar. A determinação de *PR*, conforme Equação (8), é normalizada em relação à irradiação e mostra-se menos afetada por variações dessa variável. Todavia, apresenta vulnerabilidade em relação à variação da temperatura e vento (Urrejola *et al.*, 2016).

Diante do exposto, o *PR* corrigido pelo clima (*Weather-Corrected Performance Ratio – PR_{Corr}*) proposto pelo National Renewable Energy Laboratory (NREL) (Dierauf *et al.*, 2013), reflete o comportamento sazonal condizente para a determinação do *PR* para qualquer tecnologia FV em uma determinada localidade, enquanto o valor do *PR* padrão pode variar até -0,90% para elevações de 3 °C na T_m e de 3 m/s na velocidade do vento (Urrejola *et al.*, 2016). O valor de *PR_{Corr}* é definido pela Equação (9).

$$PR_{Corr} = \frac{\sum_i E_{CA_i}}{\sum_i P_{MáxSTC} \cdot [1 + \gamma (T_{c_{Avg}} - T_{c_i})] \cdot \frac{H_{POA_i}}{G_{STC}}} \quad (9)$$

Em H_{POA} é a irradiação no plano dos módulos e $T_{c_{Avg}}$ é a temperatura média anual da célula FV, definida como o somatório hora a hora, durante 365 dias, do produto entre a irradiação e a T_c , conforme expresso na Equação (10); T_{c_i} é a temperatura medida da célula estimada conforme Equação (11).

$$T_{c_{Avg}} = \frac{\sum_i G_{POA_i} \cdot T_{c_i}}{\sum_i G_{POA_i}} \quad (10)$$

$$T_{c_i} = T_{m_i} + \frac{G_{POA_i}}{G_{STC}} \cdot \Delta T \quad (11)$$

O parâmetro ΔT é a diferença entre a T_c e o *backsheets* do módulo, sendo dependente da construção dos módulos. Tipicamente, o valor de ΔT varia entre 2 e 3 °C para módulos planos com montagem em vão aberto (Kratochvil; Boyson; King, 2004).

3 ESTUDO DO ESTADO DA ARTE

Neste capítulo, é apresentado o estado da arte referente aos estudos experimentais realizados ao ar livre com objetivo de identificar os efeitos e características físico-química da sujidade em sistemas FV. Inicialmente, é descrita a metodologia de busca e, em seguida, realiza-se a síntese dos estudos.

3.1 Planejamento

O volume e multidisciplinaridade dos campos de desenvolvimento tornam cada vez mais inviável a análise de todas as publicações científicas em uma determinada área. Apesar da disponibilidade de softwares e repositórios organizados por áreas do conhecimento, bem como a possibilidade de aplicação de filtros, essa atividade torna-se difícil e dispendiosa. O mau uso dessas ferramentas pode até induzir a erros de processamento durante a coleta de dados. Diante disso, esse estudo do estado da arte é construído por meio de uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL).

A RSL é uma metodologia que auxilia no direcionamento da busca por informações, pois estabelece, de forma prévia, parâmetros de busca, critérios de inclusão/exclusão e a forma como as informações serão tratadas (Ribeiro *et al.*, 2018).

Durante a execução dessa RSL, utiliza-se a ferramenta StArt (*State of the Art Through Systematic Review*) (Hernandes *et al.*, 2012), e o processo é dividido em seis etapas, a saber:

1. **Planejamento:** definição do objetivo, delimitação das questões da pesquisa, seleção dos repositórios, estabelecimento dos critérios de seleção e escolha das palavras-chaves;
2. **Busca e Identificação:** aplicação da expressão de busca nos repositórios selecionados, inserção manual de estudos indicados pelo grupo de estudo com potencial de seleção e exclusão de estudos duplicados;
3. **Seleção Primária:** leitura do título e resumo de todos os Estudos Primários (EPs) identificados e aplicação dos critérios de inclusão e exclusão;
4. **Seleção Secundária:** leitura superficial da metodologia, resultados e conclusão dos estudos selecionados na etapa anterior e reaplicação dos critérios de inclusão e exclusão;
5. **Extração:** leitura completa de todos os EPs selecionados a fim de responder às questões da pesquisa;
6. **Sumarização:** análise qualitativa e quantitativa dos estudos selecionados.

3.1.1 Protocolo de busca

Inicialmente, são estabelecidas as questões da pesquisa com objetivo de auxiliar no direcionamento e foco da busca. Essas questões podem ser classificadas em Questão Principal (QP) e Questões Secundárias (QS) (Ribeiro *et al.*, 2018; Machado *et al.*, 2021). As questões de pesquisa abordadas são:

- **(QP):** Quais são as principais características e efeitos da sujidade no desempenho de sistemas FV?
- **(QS1):** Quais são as características físico-químicas da sujidade?
- **(QS2):** Quais métodos de mitigação são usados para avaliar os efeitos do acúmulo natural da sujidade em sistemas FV?
- **(QS3):** Quais são as métricas/parâmetros utilizados na avaliação do desempenho dos sistemas FV?
- **(QS4)** Quais são as principais variáveis meteorológicas/climáticas coletadas durante esses estudos experimentais?

Quanto às estratégias de busca, são adotados os repositórios *Engineering Village*, *IEEE Xplore*, *Scopus* e *Web of Science*, devido à extensão de seus acervos, à possibilidade de exportação dos resultados das buscas no formato *.bib* e à acessibilidade através do Portal Periódico da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Os estudos analisados se limitam ao período de 2016 a 2024, redigidos em inglês, português ou espanhol, e publicados em periódicos ou congressos. As buscas são realizadas em três etapas: (I) julho de 2022; (II) maio de 2023 e (III) junho de 2024; as pesquisas são conduzidas considerando os mesmos repositórios, expressões de busca e filtros.

As palavras-chave são a estratégia mais utilizada para a busca dos EPs (Ribeiro *et al.*, 2018). Além disso, podem configurar critérios de seleção através da composição de expressões de busca, construídas através da combinação das palavras-chave com os operadores booleanos *AND*, *OR* e *NOT*. Para delimitar as buscas, são aplicados filtros em cada repositório. As expressões de busca, filtros e campos de busca usados nessa RSL estão apresentados no Quadro 3. A escolha dos termos foi realizada após análise prévia de revisões de literatura sobre sujidade, como os estudos de Chanchangi *et al.* (2020), Darwish *et al.* (2015), Fouad, Shihata e Morgan (2017), Gholami *et al.* (2020), Maghami *et al.* (2016), Mani e Pillai (2010), Mussard e Amara (2018) e Santhakumari e Sagar (2019).

Quadro 3 – Expressões de busca utilizadas no processo de buscas.

Repositório	Expressões de busca	Campo de busca	Filtros
Engineering Village	(Photovoltaic OR Photovoltaics OR {Solar Energy} OR PV) AND (Dust OR Dirt OR Soiling) AND ((Effect OR Effects OR Impact OR Impacts OR Influence) OR (Characteristic OR Property OR Characteristics OR Properties)) AND (Analy* OR Investigation OR Study OR Assessment OR Evaluation OR Research OR Investigations OR Studies OR Researches OR Evaluations) NOT ({Artificial (Dust OR Dirt OR Soiling)} OR {Artificial (deposition OR accumulation)})	All Fields	Journal Article/Conference Article/ Article in Press English/Portuguese/Spanish 2016-2024
IEEE Xplore	(Photovoltaic OR Photovoltaics OR {Solar Energy} OR PV) AND (Dust OR Dirt OR Soiling) AND ((Effect OR Effects OR Impact OR Impacts OR Influence) OR (Characteristic OR Property OR Characteristics OR Properties)) AND (Analy* OR Investigation OR Study OR Assessment OR Evaluation OR Research OR Investigations OR Studies OR Researches OR Evaluations) NOT ({Artificial (Dust OR Dirt OR Soiling)} OR {Artificial (deposition OR accumulation)})	All Metadata	Article/Conferences/Journals 2016-2024
Scopus	(Photovoltaic OR Photovoltaics OR {Solar Energy} OR PV) AND (Dust OR Dirt OR Soiling) AND ((Effect OR Effects OR Impact OR Impacts OR Influence) OR (Characteristic OR Property OR Characteristics OR Properties)) AND (Analy* OR Investigation OR Study OR Assessment OR Evaluation OR Research OR Investigations OR Studies OR Researches OR Evaluations) AND NOT ({Artificial (Dust OR Dirt OR Soiling)} OR {Artificial (deposition OR accumulation)})	Article Title, Abstract, Keywords	Article/Conference Paper English/Portuguese/ Spanish 2016-2024
Web of Science	(Photovoltaic OR Photovoltaics OR “Solar Energy” OR PV) AND (Dust OR Dirt OR Soiling) AND ((Effect OR Effects OR Impact OR Impacts OR Influence) OR (Characteristic OR Property OR Characteristics OR Properties)) AND (Analy* OR Investigation OR Study OR Assessment OR Evaluation OR Research OR Investigations OR Studies OR Researches OR Evaluations) NOT (“Artificial (Dust OR Dirt OR Soiling)” OR “Artificial (deposition OR accumulation)”)	Topic	Article/Proceedings Paper/Early Access English/Portuguese/Spanish 2016-2024

Fonte: Autor (2025).

Definidas as palavras-chave, diversas expressões de busca são testadas e são estabelecidos grupos de controle para cada repositório, contendo os EPs admitidos pelos critérios de inclusão desta RSL. Todos os artigos dos grupos de controle são retornados com as expressões de busca usadas nesta RSL para cada repositório.

Uma das características fundamentais de uma RSL é a definição prévia dos critérios de seleção (inclusão e exclusão) dos EPs. Esses critérios são determinantes na qualidade da RSL (Scannavino *et al.*, 2017). Os critérios de inclusão devem estar alinhados com a finalidade da RSL e são usados para definir os parâmetros de elegibilidade dos EPs, devendo ser aplicados de forma estrita. É essencial que seja previamente estabelecido se a inclusão de um EP está condicionada à aplicação de um ou mais critérios de inclusão (Scannavino *et al.*, 2017). Para esta RSL, são estabelecidos quatro critérios de inclusão (I1) - (I4) que devem ser aplicados em conjunto para a admissão de um EP:

- **(I1):** Estudos disponíveis na íntegra *AND*;
- **(I2):** Estudos experimentais sob condições externas que descrevem as características físico-químicas da sujidade e os efeitos de sua acumulação natural no desempenho de geração de sistemas FV *OR*;
- **(I3):** Estudos experimentais sob condições externas que descrevem os efeitos do acúmulo natural de sujidade no desempenho de sistemas FV, mesmo sem menção às características físico-químicas da sujidade *OR*;
- **(I4):** Estudos experimentais que descrevem as características da composição físico-química da sujidade coletada em sistemas FV ou amostras de vidro, mesmo sem menção à análise de desempenho dos sistemas FV.

Os critérios de exclusão definem as características utilizadas para identificar EPs irrelevantes para uma RSL, como o não atendimento dos critérios de inclusão. Outros critérios de exclusão podem ser definidos para delimitar o escopo da pesquisa. No presente estudo, são adotados seis critérios de exclusão (E1) – (E6) que, ao serem aplicados de forma isolada, são suficientes para desqualificar um EP nesta RSL:

- **(E1):** Estudos que descrevem o efeito da sujidade no desempenho de sistemas FV apenas sob condições artificiais de deposição/parâmetros ambientais/sujidade *OR*;
- **(E2):** Estudos que analisam impactos apenas por simulações e/ou modelos matemáticos *OR*;
- **(E3):** Estudos que investigam os efeitos da sujidade apenas em sistemas de Energia Solar Concentrada (*Concentrated Solar Power - CSP*) *OR*;

- **(E4):** Estudos publicados apenas como resumos ou pôsteres *OR*;
- **(E5):** Trabalhos de revisão de literatura *OR*;
- **(E6):** Trabalhos que não atendem aos critérios de inclusão.

3.1.2 Processo de condução

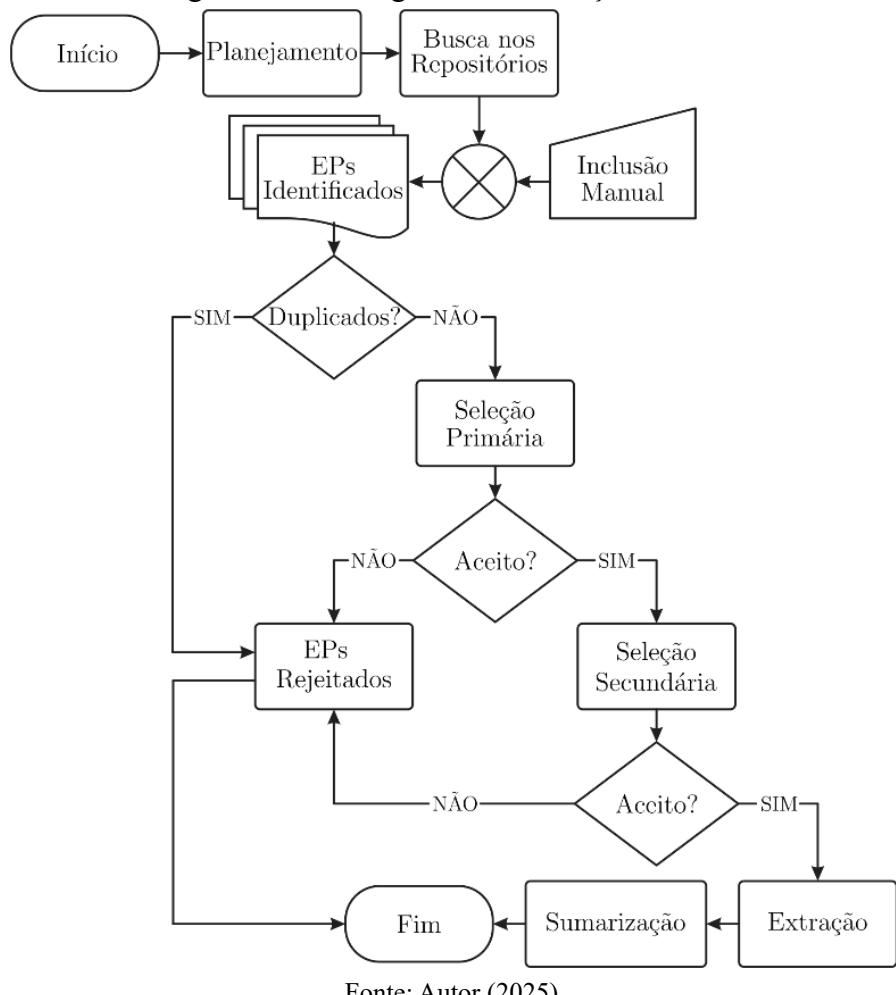
Após a etapa de planejamento, as expressões de busca são inseridas nos repositórios selecionados para a coleta dos EPs. Também são realizadas buscas nos anais do Congresso Brasileiro de Energia Solar (CBENS) e Revista Tecnologia a fim de identificar estudos com potencial de seleção para inserção manual, conforme definido no protocolo da RSL. Após a identificação, os resultados das buscas são exportados em formato *.bib*, exceto os trabalhos inseridos manualmente, e importados para o StArt.

Ao inserir os arquivos de busca no StArt, o *software* identifica automaticamente parte dos trabalhos como duplicados. Além disso, alguns casos de duplicação não identificados pelo *software* são detectados e excluídos manualmente; nesta RSL, consideram-se duplicados os EPs indexados em mais de um dos repositórios utilizados. Durante a seleção primária, são analisados o título e resumo de todos os estudos aceitos, aplicando-se os critérios (I1) – (I4) e (E1) – (E6). Na seleção secundária, realiza-se a leitura superficial da metodologia, resultados e conclusões para a reaplicar dos critérios (I1) – (I4) e (E1) – (E6).

Na fase de extração, os EPs aceitos são lidos na íntegra para coletar as informações necessárias para o preenchimento da tabela de extração de dados. Além das informações básicas (nome dos autores, data de publicação, informações bibliográficas), são extraídos dados sobre o local de realização do estudo, tipo de tecnologia FV utilizada, métricas/parâmetros utilizados na avaliação do desempenho de geração, métodos de mitigação empregado, período/periodicidade de coleta, características físico-químicas da sujidade, variáveis meteorológicas/climáticas mensuradas, técnicas de caracterização físico-química, metodologia de coleta das amostras de sujidade e principais conclusões do estudo. Essas informações são essenciais para responder às questões da pesquisa.

Na Figura 12 é apresentado o fluxograma genérico das etapas adotadas nesta RSL. Devido ao elevado número de artigos analisados, a sintetização das informações dos EPs está apresentada no Apêndice B.

Figura 12 – Fluxograma de execução da RSL.



Fonte: Autor (2025).

3.2 Análise dos EPs e discussões

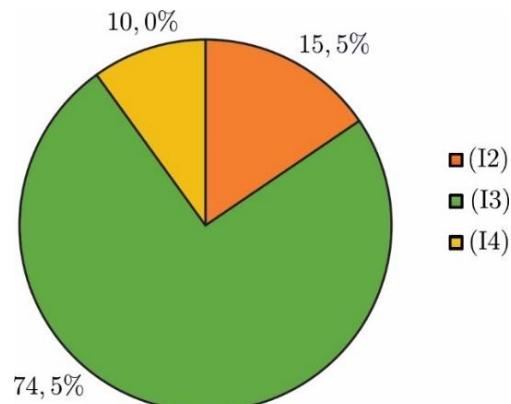
Objetivando sintetizar e proporcionar uma melhor compreensão das tendências de pesquisa, a análise dos EPs é apresentada observando as seguintes áreas temáticas: (1) critérios de inclusão, (2) localização geográfica, (3) tecnologias FV utilizadas, (4) metodologias adotadas nos estudos, (5) métodos de limpeza, (6) efeitos da sujidade, (7) características físico-químicas e (8) metodologias de coleta de amostras de sujidade. Essa organização visa ajudar no estabelecimento da relação entre os EPs e as respostas para questões de pesquisa (QP) e (QS1) - (QS4).

3.2.1 Critérios de inclusão

Na Figura 13 é mostrada a classificação dos EPs analisados de acordo com os critérios de inclusão (I2) - (I4); todos os estudos atendem simultaneamente ao critério (I1). Conforme observado, os EPs concentram-se, sobretudo, no critério (I3). Por outro lado, verifica-se que os

critérios (I2) e (I4) apresentam um menor número de EPs selecionados. Assim, é possível perceber que há espaço para a realização de mais estudos relacionados às características de composição da sujidade, alinhado ao estudo de desempenho elétrico, uma vez que a composição da sujidade varia de uma localidade para outra e pode apresentar comportamento distinto dependendo dos elementos presentes.

Figura 13 – Classificação dos EPs por critérios de inclusão.

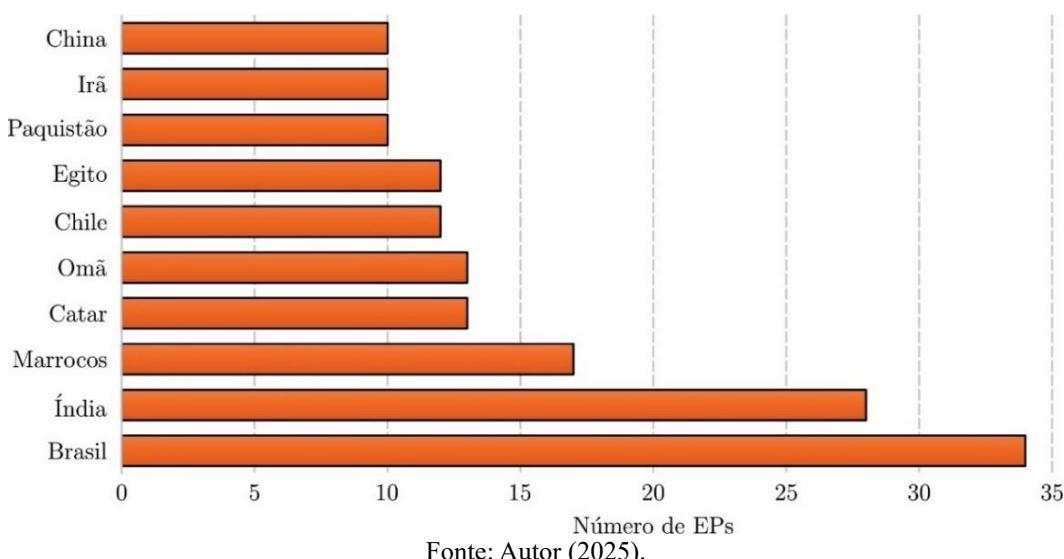


Fonte: Autor (2025).

3.2.2 Localização geográfica

Considerando que a sujidade apresenta características e efeitos diferentes dependendo da localização geográfica, aspectos climáticos e fatores ambientais, na Figura 14 são mostrados os países onde os estudos relatados nos EPs são realizados.

Figura 14 – Distribuição geográfica dos locais de realização dos EPs.



Fonte: Autor (2025).

Ao avaliar a distribuição por continentes, 53,26% dos EPs são conduzidos na Ásia, 19,93% na América, 19,57% na África, 5,80% na Europa e 0,36% na Oceania. Observa-se uma

concentração de estudos no Norte da África e Oriente Médio, regiões que, segundo Ghazi, Sayigh e Ip (2014), possuem a maior quantidade de poeira suspensa no ar. No total, são identificados 49 países diferentes; em 3 EPs a localização não é identificada. Em geral, o Brasil concentra o maior número de estudos (34 EPs). Contudo, esse número é influenciado pela inclusão manual de EPs publicados no CBENS e na Revista Tecnologia. Se os EPs inseridos manualmente forem desconsiderados, a Índia é o país com o maior número de estudos (28 EPs), seguida pelo Marrocos (17 EPs) e Brasil (14 EPs).

3.2.3 *Tecnologias FV*

Os módulos de silício policristalino (p-Si) e m-Si são os mais utilizados em estudos sobre sujidade, representando cerca de 65,40% do EPs analisados. Segundo IEA (2022b), mais de 95% dos módulos FV disponíveis no mercado global em 2021 utilizavam tecnologia de silício cristalino. Nesse sentido, a compreensão dos impactos da sujidade em módulos de silício cristalino em diferentes localidades pode contribuir para o desenvolvimento e implementação de estratégias de mitigação de sujidade, além de possibilitar o estabelecimento de aspectos relacionados à otimização construtiva dos módulos e à formulação de recomendações para lidar com a sujidade em módulos deste tipo.

No entanto, outras tecnologias são utilizadas, como células de Telureto de Cádmio (CdTe) e célula de Disseleneto de Cobre Índio e Gálio (CIGS). Estudos sobre módulos com células FV orgânicas (Luo *et al.*, 2024; Touhami *et al.*, 2022) e de heterojunção monofaciais e bifaciais (Abdallah *et al.*, 2023) também são identificados. Vale ressaltar que os resultados obtidos em uma determinada tecnologia não devem ser extrapolados para outras, pois há diferenças nas respostas espectrais (Costa *et al.*, 2018; Costa *et al.*, 2019b). Assim, para uma melhor compreensão do efeito da sujidade, é importante utilizar diferentes tecnologias FV, como em Baras *et al.* (2016), Kaundilya *et al.* (2018), Adouane *et al.* (2020), Alabdulrazzaq, Adouane e Al-Qattan (2020) e Shadid *et al.* (2023).

Outro aspecto que deve ser considerado é a utilização de módulos bifaciais, pois, devido às suas características construtivas, o processo de deposição e a necessidade de mitigação ocorrem de forma diferenciada em relação aos módulos monofaciais, conforme observado em Baras *et al.* (2016), Ayala *et al.* (2018), Ullah *et al.* (2020) e Raina e Sinha (2023). Além disso, o modo de instalação (retrato ou passagem) (Kagan *et al.*, 2018), a geometria (Adouane *et al.*, 2020; Alabdulrazzaq; Adouane; Al-Qattan, 2020) e o material dos módulos são fatores que influenciam o efeito da sujidade.

3.2.4 Metodologia dos EPs

Analisando as metodologias, observa-se cerca de 57,20% dos estudos consistem em comparar o desempenho de módulos ou usinas FV submetidas à limpeza manual e natural (Jaszczur *et al.*, 2018a; Bhaduri; Kottantharayil, 2019; Jo *et al.*, 2023; Souza; Carvalho, 2024). Cerca de 21,80% dos EPs observam módulos ou plantas FV submetidas apenas à limpeza natural, avaliando os efeitos da sujidade por meio de métricas (como *SRatio* e *PR/PR_{Corr}*), durante o período de observação e uso de dados climáticos/ambientais/operacionais para determinar o comportamento sazonal (Tripathi; Aruna; Murthy, 2017; Touati *et al.*, 2017; Costa *et al.*, 2019b; Araújo *et al.*, 2020a). Além disso, são observados estudos utilizando revestimentos anti-sujidade (Plessis; Strauss; Rix, 2019; Du Plessis; Strauss; Rix, 2020; Al Bakri; Abu Elhaija; Al Zyoud, 2021), sistemas de limpeza automática (Costa *et al.*, 2020a) e sistemas robóticos (Tiwari; Rani; Patel, 2019; Ghodki; Swarup; Pal, 2019; Hammoud *et al.*, 2019; Ghodki, 2022).

No que diz respeito ao uso de revestimentos anti-sujidade, há uma necessidade de expansão nos estudos sobre a efetividade desse método de mitigação, especialmente em condições desérticas, devido a fatores como indisponibilidade de água e dificuldade de acesso aos módulos FV. Adicionalmente, o envelhecimento causado pela exposição às condições desérticas, como alta irradiação e temperatura, deve ser considerado na análise de aplicabilidade desse tipo de metodologia de mitigação da sujidade.

3.2.5 Métodos de limpeza

A água é comumente utilizada no processo de limpeza manual. No entanto, em áreas desérticas, o acesso a esse recurso tende a ser um fator limitante. Portanto, a utilização de métodos de lavagem a seco/vibração (Dahlioui; Laarabi; Barhdadi, 2019; Al-Housani; Bicer; Koç, 2019a; Shenouda *et al.*, 2022), revestimentos anti-sujidade e sistemas com reaproveitamento de água (Majeed *et al.*, 2020) podem ser soluções viáveis. Dependendo das características da sujidade, esses métodos podem ter ação limitada ou até potencializar o efeito da sujidade, conforme verificado em Plessis, Strauss e Rix (2019) e Du Plessis, Strauss e Rix (2020) ao utilizar revestimentos anti-sujidade na África do Sul. Uma alternativa é a combinação de métodos de mitigação, conforme investigado em Al-Badra, Abd-Elhady e Kandil (2020) e Al-Housani, Bicer e Koç (2019a).

Em geral, a escolha do melhor método de mitigação depende das características da sujidade, da disponibilidade de recursos, dos custos associados à sua implementação e da

frequência de limpeza. Este último aspecto depende das características do local de instalação dos módulos FV (Barbosa; Farias; Gontijo, 2018; Al-Housani; Bicer; Koç, 2019a), podendo ser estabelecido um cronograma de limpeza a cada 5 dias (Tripathi; Aruna; Murthy, 2017), ou atingindo intervalos entre 5 e 10 meses, dependendo do valor mínimo de *PR* desejado (Gaio; Campos; Tiepolo, 2018). O intervalo de limpeza também é influenciado pelo ângulo de instalação dos módulos FV (Ullah *et al.*, 2020); deixar os módulos FV sem limpeza pode causar uma mudança no ângulo ideal de instalação (Abdeen; Orabi; Hasaneen, 2017; Abdolzadeh; Nikkhah, 2019).

Um fator a ser considerado na definição do método de mitigação da sujidade e na frequência das intervenções é a viabilidade técnico-econômica, visando não aumentar o risco financeiro de usinas FV em escala comercial devido à demanda por mão de obra especializada para intervenções de limpeza.

Outro aspecto relevante no processo de mitigação da sujidade é a limpeza natural. Em períodos com precipitações frequentes, as perdas por sujidade tendem a ser menores, reduzindo a necessidade de intervenções de limpeza (Jesus *et al.*, 2018), exceto pela deposição não uniforme, especialmente em módulos emoldurados, para evitar pontos quentes (Costa; Kazmerski; Diniz, 2021). Portanto, as precipitações são um importante mecanismo de autolimpeza dos sistemas FV (Tanesab *et al.*, 2017; Urrejola *et al.*, 2016; Tonolo; Mariano; Urbanetz Junior, 2018); a eficácia da limpeza depende da frequência e volume das precipitações (Jesus *et al.*, 2018; Daher *et al.*, 2018; Chiteka *et al.*, 2020; Javed *et al.*, 2020), do período seco anterior (Javed *et al.*, 2016), de eventos extremos (Yazdani; Yaghoubi, 2021), do ângulo de inclinação (Ullah *et al.*, 2020) e de precipitações de baixa intensidade podem potencializar os efeitos da sujidade (Larico, Cutipa; Callata, 2020), enquanto, em função da natureza físico-química das partículas de sujidade, precipitações frequentes podem não ser suficientes para manter os módulos FV limpos (Bessa *et al.*, 2023).

Outro agente natural eficaz no processo de autolimpeza é o vento (Costa *et al.*, 2020a; Alamri *et al.*, 2020; Javed *et al.*, 2020), principalmente quando combinado com baixa umidade (Kasim *et al.*, 2021); o vento contribui para o processo de resuspensão da sujidade depositada nos módulos (Costa *et al.*, 2020a; Javed *et al.*, 2020).

Em relação à umidade, a formação de orvalho pode haver maior acúmulo de sujidade na superfície dos módulos (Costa *et al.*, 2016; Al-Housani; Bicer; Koç, 2019b), provocando deposição não uniforme (Azouzoute *et al.*, 2021a) ou resultar em efeito autolimpante (Paudyal; Shakya, 2016). O orvalho também influencia a escolha do melhor momento para executar as intervenções de limpeza (Kazem; Chaichan, 2019).

3.2.6 Efeitos da sujidade

A sujidade não uniformemente depositada causa irregularidade na temperatura das células FV (pontos quentes) (Costa; Kazmerski; Diniz, 2021; Alonso-Montesinos *et al.*, 2020). No entanto, os módulos com sujidade uniforme podem apresentar temperaturas mais baixas do que os módulos limpos para as mesmas condições ambientais (Walwil *et al.*, 2017; Adouane *et al.*, 2020; Galal *et al.*, 2023; Chala; Shaharin; Alshaikh, 2024b; Keskin, 2024), uma vez que a sujidade reduz a transmissão da irradiação solar nas células FV (Kaundilya *et al.*, 2018; Al-Housani; Bicer; Koç, 2019a). Módulos limpos têm maiores perdas térmicas devido à menor refletância da radiação solar (Adouane *et al.*, 2020). Contudo, o efeito de redução da T_m do módulo sujo pode ser limitado pelas propriedades da sujidade (Badamasi *et al.*, 2021), sendo insignificante em algumas localidades (Shariah; Al-Ibrahim 2023). Quanto ao ângulo de instalação, identifica-se uma relação inversa com a sujidade: quanto menor o ângulo, maior a deposição de sujidade (Majeed *et al.*, 2020; Tanesab *et al.*, 2017; Jaszczur *et al.*, 2018; Khodakaram-Tafti; Yaghoubi, 2020). Além disso, o padrão de deposição (Azouzoute *et al.*, 2021a) e a formação de lama estão relacionados ao ângulo de inclinação.

O uso de dados climáticos e meteorológicos é importante para avaliar o efeito da sujidade. As principais informações ambientais utilizadas nos EPs são irradiância, temperatura ambiente, velocidade e direção do vento, precipitações e umidade. Além disso, para consolidar o entendimento dos efeitos da sujidade em função das condições ambientais, pode ser relevante considerar a concentração de MP (Dogan *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2019), pressão atmosférica (Alonso-Montesinos *et al.*, 2020) e registro de queda de neve (Lee *et al.*, 2018).

Considerando a influência de fatores climáticos, ambientais, operacionais e antropogênicas no processo de deposição, é recomendado que os estudos sobre os impactos da sujidade sejam realizados ao ar livre, com exposição ao espectro solar e sujidade naturalmente depositada, por um período que represente mudanças sazonais locais. Embora os estudos realizados em condições controladas de laboratório forneçam informações relevantes, tais investigações não conseguem representar adequadamente todas as condições atmosféricas e a complexa interligação entre as diferentes variáveis e a sujidade.

Os efeitos da sujidade podem ser monitorando diretamente os parâmetros elétricos dos módulos FV submetidos à limpeza natural ou comparando dados de módulos sujos (somente limpeza natural) e limpos (submetidos a métodos de limpeza ativos ou passivos). Os principais parâmetros elétricos monitorados são potência, energia, I_{sc} e a V_{oc} .

Outra metodologia utilizada é a adoção de métricas de avaliação, que, além de utilizar dados elétricos, podem incluir informações referentes a variáveis climáticas, ambientais e operacionais para padronizar os resultados para as condições de STC. As principais métricas de avaliação são PR/PR_{Corr} , eficiência, $SRatio$ e $SRate$; métricas como FF , FC e produtividade ($Yield$) também são aplicadas.

Avaliar o efeito da sujidade no desempenho elétrico dos sistemas FV é um processo complexo, pois depende de diversos fatores. Portanto, cuidados adicionais devem ser tomados na determinação das métricas de avaliação para evitar subestimar ou superestimar os resultados. O uso de I_{sc} para determinar a $SRatio$ pode levar a erros se a sujidade não for uniformemente distribuída na superfície dos módulos (Kagan *et al.*, 2018); dados de potência são mais recomendados para módulos de Si devido à atuação dos diodos *by-pass* (Costa *et al.*, 2018). No entanto, no caso de deposição uniforme em módulos p-Si, os valores de $SRatio$ dos dados de potência e I_{sc} são semelhantes (Costa *et al.*, 2018).

Apesar da dificuldade em generalizar o impacto da sujidade nos parâmetros elétricos de uma planta FV, em geral, V_{oc} costuma ser o parâmetro menos impactado, pois apresenta baixa variação mesmo com o aumento do tempo de exposição; o efeito da sujidade pode ser desprezado (Olivares *et al.*, 2020; Shah *et al.*, 2020). Por outro lado, I_{sc} e potência são geralmente os parâmetros mais impactados; à medida que a sujidade aumenta, observa-se uma maior redução desses parâmetros, uma vez que a sujidade bloqueia parte da radiação solar (Farahmand *et al.*, 2021; Mostefaoui *et al.*, 2018). No entanto, em módulos p-Si, a deposição não uniforme tem maior impacto, pois os diodos internos atuam isolando as células comprometidas pela sujidade (normalmente concentrada na parte inferior devido à inclinação do módulo) (Costa *et al.*, 2019). Além disso, os impactos da sujidade no desempenho dos sistemas FV dependem das suas propriedades e das condições climáticas prevalecentes (Javed *et al.*, 2021; Jaszcjur *et al.*, 2018).

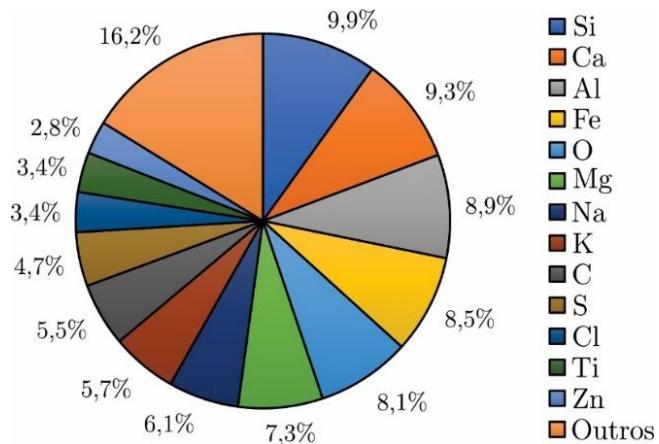
O acúmulo de sujidade afeta a transmissão de luz nos módulos, causando atenuação da irradiância em diferentes comprimentos de onda; as maiores perdas estão relacionadas a baixos níveis de irradiância (Konyu; Ketjoy; Sirisamphanwong, 2020) e se tornam maiores para tecnologia p-Si, em comparação à m-Si, para níveis de irradiação inferiores a 500 W/m² (Benghanem *et al.*, 2023). Além disso, as maiores reduções de potência estão associadas a pequenos ângulos de instalação (Ullah *et al.*, 2020; Abdeen; Hasaneen; Orabi, 2016; Radonjić *et al.*, 2021). A potência dos sistemas FV tende a diminuir gradualmente com o aumento do período de exposição e das condições climáticas (Alvarenga; Luchini; Guimarães,

2020). Todavia, o tempo de exposição não fornece informações suficientes para avaliar a redução da irradiação incidente devido à deposição de sujidade (Jaszczur *et al.*, 2018).

3.2.7 Características físico-químicas

Em relação às características físico-químicas, a concentração e o tipo de elemento presente na composição da sujidade dependem das particularidades climáticas e geológicas do local de instalação dos módulos FV (Olivares *et al.*, 2017), da ocorrência de eventos não comuns (Javed *et al.*, 2017) e do período de exposição (Zitouni *et al.*, 2021). No entanto, os elementos comumente presentes na sujidade são Si, Ca, Al, Fe, O e Mg. Na Figura 15 são apresentados os elementos mais relatados nas amostras de sujidade analisadas; os valores mostrados não representam a proporção de cada elemento nas amostras, mas o percentual de ocorrência nos EPs.

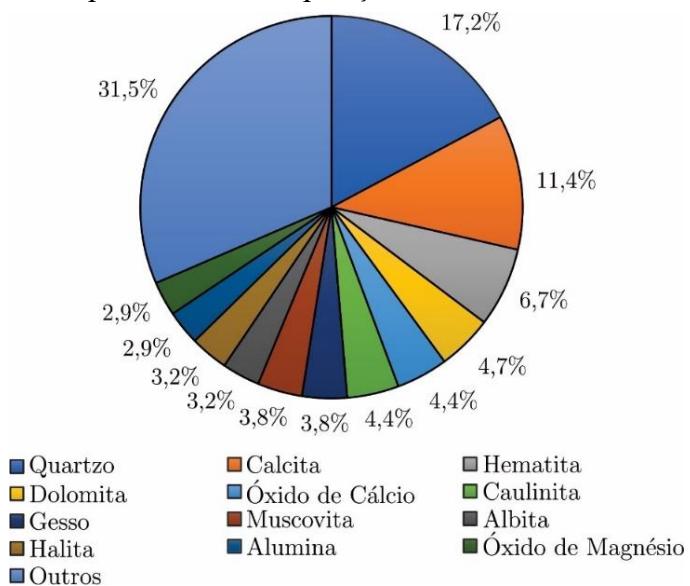
Figura 15 – Ocorrência de elementos na composição da sujidade nos EPs analisados.



Fonte: Autor (2025).

Considerando a composição mineral das amostras, observa-se uma variabilidade significativa, com quartzo, calcita, hematita, dolomita e óxido de cálcio sendo relatados com maior frequência, conforme mostrado na Figura 16. Verificam-se semelhanças entre as amostras de sujidade coletadas na superfície de módulos FV e no solo no local de instalação, com diferenças na intensidade de ocorrência dos elementos (Ferrada *et al.*, 2019; Olivares *et al.*, 2017). Entretanto, partículas de origem remota desempenham um papel significativo no desempenho dos sistemas FV, uma vez que a sujidade não provém apenas de eventos locais (Conceição *et al.*, 2018).

Figura 16 – Principais componentes da composição mineral das amostras de sujidade nos EPs.



Fonte: Autor (2025).

Com relação ao tamanho das partículas, observa-se uma variação de 0,01 µm (Alraeesi *et al.*, 2023) a 500 µm (Abdolzadeh, Nikkhah, 2019); partículas menores que 10 µm são de difíceis remoção (Romanholo *et al.*, 2018). Partículas pequenas estão associadas a longos períodos de exposição, enquanto partículas maiores são atribuídas a períodos curtos e ocorrência de tempestades de areia (Zitouni *et al.*, 2021; Javed *et al.*, 2017).

Morfologicamente, as partículas de sujidade apresentam diferentes formas: prismáticas, placas, varetas, agulhas, esferas e aglomerados; a morfologia altera-se com o aumento do período de exposição (Zitouni *et al.*, 2021; Javed *et al.*, 2017). A aglomeração de partículas está associada à longos períodos de exposição, uma vez que as partículas tendem a ser pequenas (Javed *et al.*, 2017). Partículas em forma de agulha são apontadas como as principais responsáveis pelo processo de cimentação da sujidade na superfície dos módulos (Ilse *et al.*, 2016) e são predominantemente formadas durante eventos de orvalho devido ao processo de dissolução-precipitação (Ilse *et al.*, 2018b).

3.2.8 Coleta e análise das amostras de sujidade

Considerando a metodologia de coleta de amostras de sujidade, observam-se duas técnicas principais: raspagem com cotonetes (Romanholo *et al.*, 2018) ou espátulas (Javed *et al.*, 2016; Javed *et al.*, 2021; Araújo *et al.*, 2020b) e exposição de amostras de vidro à deposição natural de sujidade (Ehsan *et al.*, 2021; Conceição *et al.*, 2018; Dida *et al.*, 2020). As principais técnicas para a caracterização físico-química das partículas de sujidade são Microscopia Eletrônica de Varredura (*Scanning Electrode Microscopy* – SEM), Espectroscopia Dispersiva

de Energia (*Energy Dispersive Spectroscopy* - EDS), Difração de Raios-X (*X-Ray Diffraction* - XRD) e Fluorescência de Raios-X (*X-Ray Fluorescence* – XRF).

3.2.9 Discussões adicionais

Observa-se, a partir da RSL, que a sujidade afeta negativamente as plantas FV e apresenta comportamento distinto em diferentes regiões. Portanto, modelar com precisão as perdas por sujidade, considerando partículas com diferentes características físico-química-biológicas e tecnologias FV distintas, é uma tarefa difícil. Ademais, a maior parte dos EPs analisados foca em investigações sobre os impactos da sujidade nos parâmetros elétricos de plantas FV; a análise físico-química da sujidade, considerando períodos com diferentes regimes climáticos, é limitada.

Embora diferentes estudos tenham sido realizados globalmente, investigações sobre os impactos da sujidade são desafiadoras e ainda limitadas, pois dependem de condições climáticas locais específicas. Além disso, os impactos das atividades antropogênicas nas proximidades de plantas FV devem ser considerados, uma vez que representam uma importante fonte geradora de partículas de sujidade e são comumente negligenciadas durante a fase de implementação de sistemas FV. Nesse sentido, avaliações sobre diferentes processos de mitigação devem ser sistematicamente analisadas, visando maximizar a produção FV, especialmente em grandes ambientes urbanos; a literatura indica que a mitigação natural da sujidade pelas precipitações não é suficiente para a limpeza completa de módulos FV instalados neste tipo de ambiente (Alkharusi; Huang; Markides, 2023) e que há lacunas significativas na investigação do efeito da poluição no desempenho de plantas FV, uma vez que, a maior parte dos estudos concentra-se em regiões desérticas (Rehman *et al.*, 2025).

Adicionalmente, são observadas poucas pesquisas sobre como a deposição natural de sujidade afeta o comportamento sazonal da T_m . Considerando que a eficiência do módulo FV é reduzida com o aumento da temperatura de operação, esse aspecto deve ser observado com cautela, sobretudo, em áreas semiáridas, como a brasileira, que é caracterizada por níveis de irradiação favoráveis para a geração FV, mas também por alta temperatura ambiente e áreas sujeitas à desertificação e, consequentemente, aumento da aridez.

Diante disso, fica evidente a necessidade de ampliar e diversificar os estudos sobre os impactos da sujidade em sistemas FV no Brasil, uma vez que as investigações estão limitadas a um número restrito de localidades e tecnologias FV pouco diversificadas. A crescente participação da geração FV na matriz elétrica brasileira (2^a maior fonte, depois da hidroelétrica (ABSOLAR, 2024)) torna imperativo compreender e mitigar os fatores que impactam a geração

FV, especialmente considerando que a geração distribuída corresponde à maior parte da potência instalada.

No curto prazo, a adoção de cronogramas de limpeza pode reduzir os efeitos da deposição de contaminantes na geração dos módulos FV, especialmente para instalações em telhados de regiões urbanas altamente poluídas. Por outro lado, a longo prazo, a mitigação da poluição e a recuperação de áreas desertificadas pode contribuir com a redução dos aerossóis atmosféricos e, consequentemente, da taxa de deposição de sujidade (Li; Mauzerall; Bergin, 2020).

Além disso, a sujidade tende a continuar sendo uma problemática de interesse mundial em decorrência das mudanças climáticas, do aumento da temperatura global e da ocorrência de períodos prolongados de seca. Assim, estudos voltados para a modelagem, adaptação e estratégias de mitigação da sujidade são essenciais para maximizar a geração e os ganhos financeiros e econômicos de plantas FV (Schill *et al.*, 2022).

Nesse contexto, a inovação da presente Tese reside na investigação dos efeitos sazonais de limpezas manuais, com diferentes frequências, na geração e T_m de uma planta FV instalada em uma área urbana no semiárido, incluindo os impactos de atividades antropogênicas de curto prazo.

4 METODOLOGIA

Neste capítulo, são apresentados os procedimentos metodológicos adotados. Inicialmente, caracteriza-se a planta FV utilizada, que pertence ao Laboratório de Energias Alternativas da Universidade Federal do Ceará (LEA – UFC), e o sistema de aquisição de dados. Na sequência, são apresentados os procedimentos adotados no estudo de aplicabilidade de modelos elétricos analíticos para avaliar os impactos da sujidade no local de pesquisa. Também são descritas as etapas de limpeza manual empregadas e as diretrizes utilizadas na análise dos efeitos da sujidade sobre o desempenho elétrico e o comportamento térmico da planta FV.

4.1 Local do estudo

O LEA – UFC está situado no Campus do Pici da UFC em Fortaleza – Ceará, cujas coordenadas no sistema Universal Transversa de Mercator (UTM) são: latitude 3° 44' 15" S, longitude 38° 34' 22" W e elevação de 21 m. As plantas FV do LEA - UFC estão instaladas em um ambiente urbano semiárido, próximas à Avenida Mister Hull, via que interliga Fortaleza e Caucaia, respectivamente a primeira e segunda maior cidade do Ceará. O LEA - UFC está rodeado por árvores de várias espécies e áreas residenciais.

Fortaleza está localizada em uma região semiárida, com clima tropical quente subúmido (ou tropical chuvoso), apresentando temperatura anual média de 26,60 °C, com máxima e mínima de 31 °C e 22,50 °C, respectivamente. A pluviosidade média anual é de 1.338 mm, insolação média de 2.840 horas/ano, baixo grau de nebulosidade, evaporação média de 1.500 mm/ano e alta umidade relativa do ar (média anual de 78,80%) (Fortaleza, 2019; Maia, 2015). O período chuvoso ocorre no primeiro semestre (entre fevereiro e maio), enquanto o período seco ocorre no segundo semestre (entre agosto e novembro) (Moura *et al.*, 2015).

4.1.1 Caracterização ambiental

Como os fatores ambientais de uma localidade estão fortemente relacionados com o estudo da sujidade, faz-se necessária a caracterização dos principais aspectos climáticos e ambientais do local de estudo. Para tal, são analisados os comportamentos sazonais da temperatura ambiente, irradiação em plano horizontal, umidade relativa do ar e precipitações pluviométricas em Fortaleza, no período de 2012 a 2022.

Para a obtenção dos dados de precipitação, são identificadas três estações pluviométricas próximas ao LEA – UFC (distância inferior a 2 km), do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), e uma estação pluviométrica da

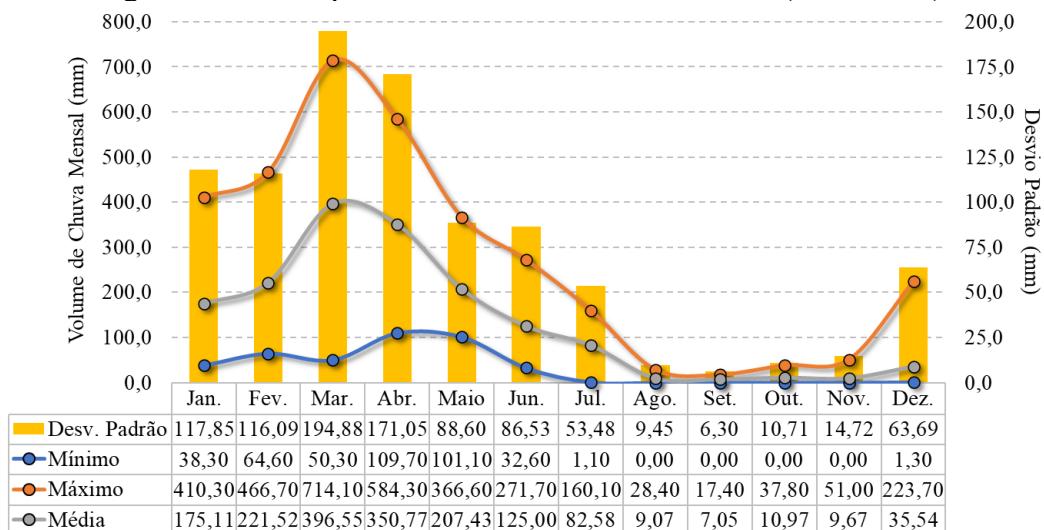
Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCME). Os dados da estação Pici da FUNCME são utilizados devido ao volume de informações disponíveis.

Para os demais parâmetros ambientais, são utilizados os dados da Estação Automática (A305) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada a cerca de 9,5 km do LEA - UFC. Ressalta-se, que as estações pluviométricas do CEMADEN e meteorológica do INMET apresentam dados em escala horária, registrados em Tempo Universal Coordenado (*Coordinated Universal Time – UTC-0*), enquanto os dados fornecidos pela FUNCME correspondem ao volume de precipitação diário. Os dados horários das estações do INMET e CEMADEN são convertidos para o horário de Brasília (UTC-3), e os dados de irradiação, medidos em kJ/m^2 , são convertidos para kWh/m^2 .

Para caracterização ambiental das medidas de temperatura ambiente e umidade relativa do ar, são utilizados filtros de valores máximos e mínimos para eliminar erros de medição. Esses filtros são definidos com base nas Normas Climatológicas do Brasil, elaboradas pelo INMET, considerando o período 1991 - 2020 (INMET, 2022b). Para Fortaleza, utiliza-se as medições de temperatura ambiente entre 19,90 e 36,50 °C e para umidade relativa do ar valores entre 39 e 97,50%.

Fortaleza tem dois períodos pluviométricos distintos: o chuvoso, no primeiro semestre, e o seco, no segundo. Na Figura 17 são apresentados os volumes pluviométricos mensais (máximo, médio e mínimo) e desvio padrão no período de 2012 a 2022.

Figura 17 – Perfil pluviométrico mensal de Fortaleza (2012-2022).



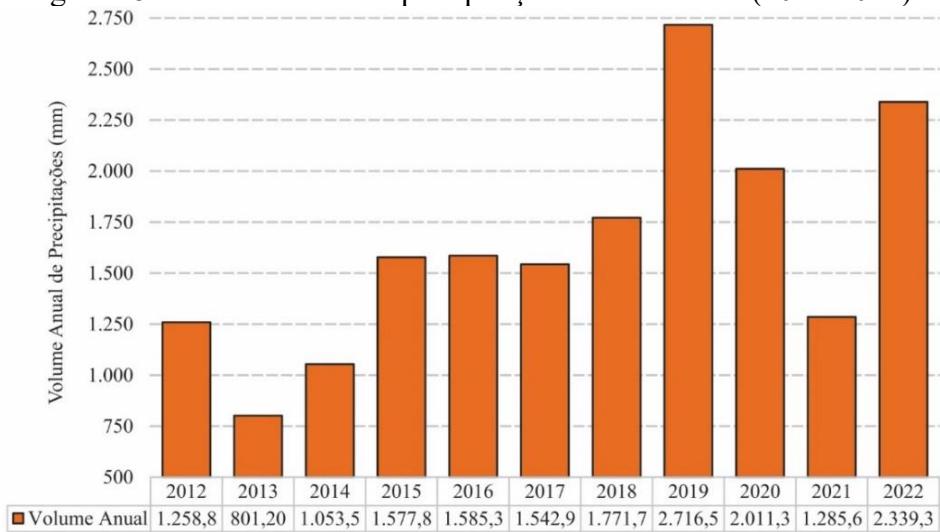
Fonte: Adaptado de (FUNCME, 2022).

O mês de março apresenta-se como o mais chuvoso, com média pluviométrica mensal de 396,55 mm, enquanto setembro é o mais seco, com volume mensal médio de 7,05 mm.

Observa-se uma transição entre o período chuvoso (fevereiro-maio) e o seco (agosto-novembro), correspondendo aos períodos pós-chuvoso (junho e julho) e pré-chuvoso (dezembro e janeiro). Em outubro, há aumento do volume de precipitações, popularmente conhecido como “chuvas do caju”.

Ao analisar o desvio padrão dos volumes mensais de precipitações, nota-se uma relação como total pluviométrico: meses com mais precipitações têm maiores desvios padrão. Isso evidencia a irregularidade das precipitações ao longo do tempo, conforme relatadas por Moura *et al.* (2015), que analisa registros pluviométricos de 62 anos (1951-2012) em Fortaleza. Na Figura 18 são apresentados o volume anual de precipitações em Fortaleza entre 2012 e 2022.

Figura 18 – Volume anual de precipitações em Fortaleza (2012-2022).

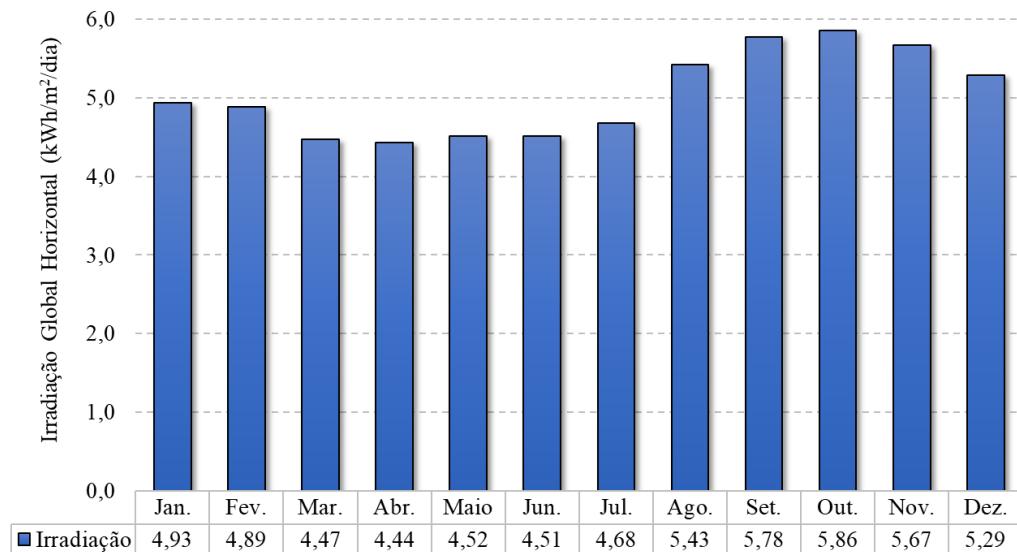


Fonte: Adaptado de (FUNCME, 2022).

Entre 2012 e 2022 o volume anual de precipitações em Fortaleza apresenta padrões distintos em relação à média pluviométrica local (1.338 mm). A média anual de precipitações para o período é de 1.631,26 mm, ou seja, 21,92% maior que a média local (1.338 mm/ano). Contudo, os anos de 2012, 2013, 2014 e 2021 apresentam volume de precipitações 5,92%, 40,12%, 21,26% e 3,92%, respectivamente, inferiores à média pluviométrica local.

Durante o segundo semestre, ocorre em Fortaleza o período seco, o que justifica os altos níveis de irradiação solar. Os maiores níveis de irradiação global horizontal ocorrem nos meses de agosto (5,43 kWh/m²/dia), setembro (5,78 kWh/m²/dia), outubro (5,86 kWh/m²/dia) e novembro (5,67 kWh/m²/dia). Os menores índices ocorrem em março (4,47 kWh/m²/dia), abril (4,44 kWh/m²/dia) e maio (4,52 kWh/m²/dia). A irradiação global horizontal média é de 5,04 kWh/m²/dia. Na Figura 19 são apresentados os níveis mensais de irradiação global horizontal em Fortaleza.

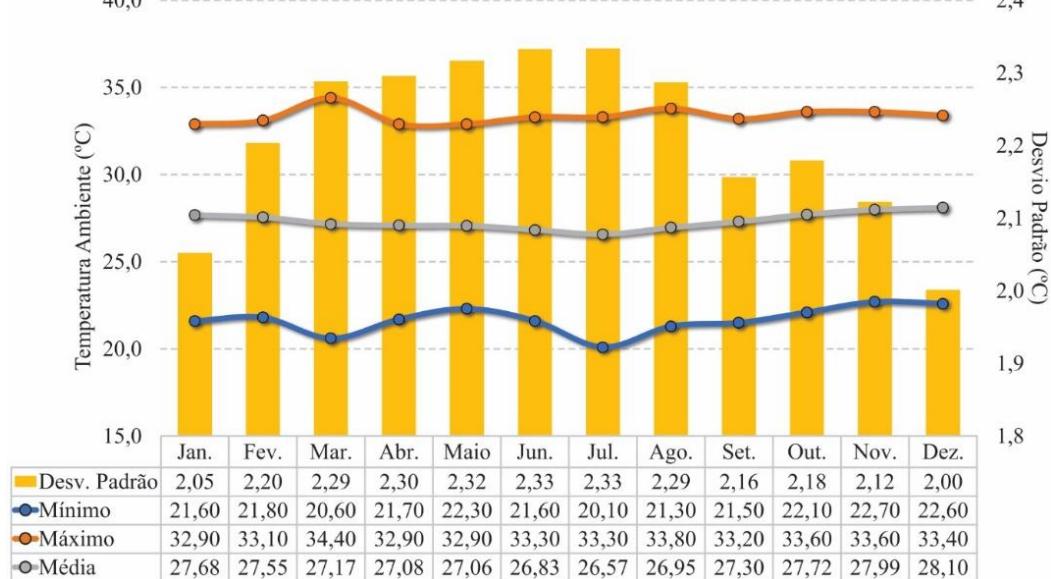
Figura 19 – Perfil da irradiação global horizontal mensal de Fortaleza (2012-2022).



Fonte: Adaptado de (INMET, 2022c).

Entre 2012 e 2022, a temperatura ambiente média mensal apresenta baixa variação, com média anual de 27,33 °C. A maior temperatura registrada é de 34,40 °C em março e mínimo de 20,10 °C em julho. Na Figura 20 é apresentado o perfil da temperatura ambiente de Fortaleza no período de 2012 a 2022. Apesar da baixa variação da temperatura média mensal, o desvio padrão é maior nos meses do período pós-chuvoso (junho e julho) e menor no pré-chuvoso (dezembro e janeiro).

Figura 20 – Perfil mensal da temperatura ambiente de Fortaleza (2012-2022).

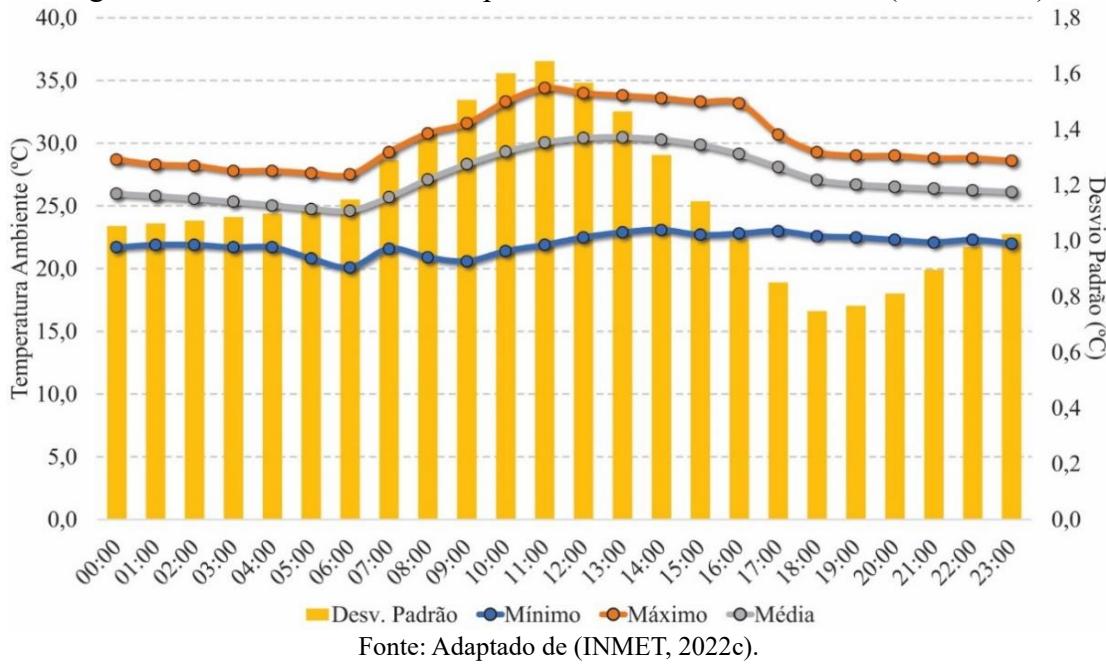


Fonte: Adaptado de (INMET, 2022c).

Na Figura 21 é apresentado o perfil horário da temperatura ambiente em Fortaleza entre 2012 e 2022. O comportamento da temperatura ambiente varia ao longo do dia, com os valores

mais elevados entre 10 e 16 horas; os valores mínimos não apresentam grande variação ao longo do dia. O desvio padrão é maior entre 7 e 14 horas.

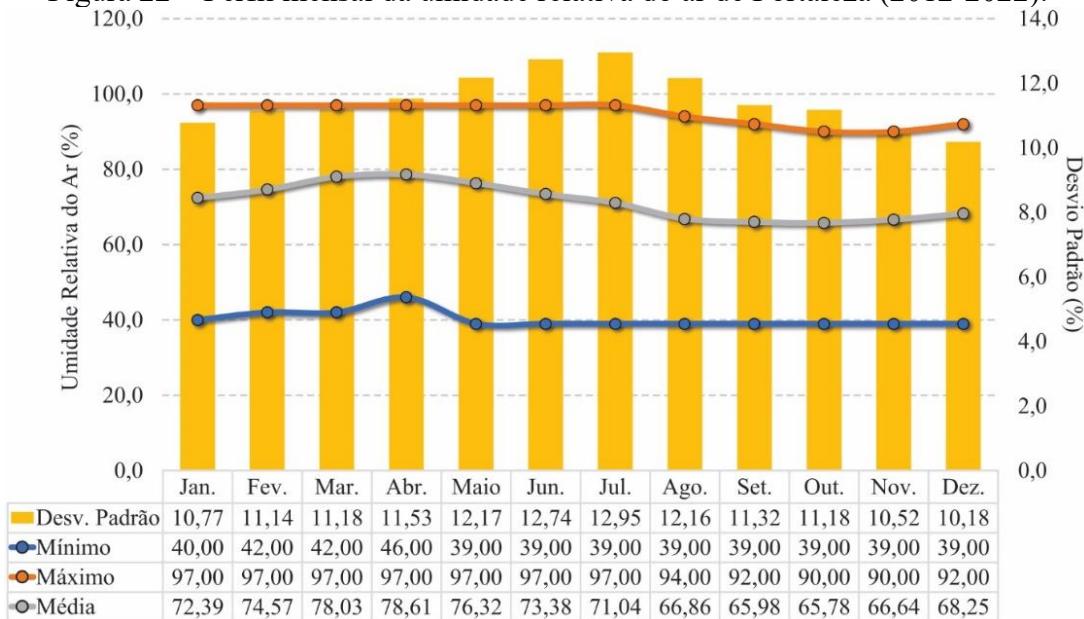
Figura 21 – Perfil horário da temperatura ambiente de Fortaleza (2012-2022).



Fonte: Adaptado de (INMET, 2022c).

Na Figura 22 é apresentado o perfil mensal da umidade relativa do ar de Fortaleza no período de 2012 a 2022. A umidade relativa do ar apresenta pouca variabilidade, sendo maior no primeiro semestre, coincidente com o período chuvoso. A média anual é de 71,49%. Nos períodos chuvoso e seco, as médias são de 76,88% e 66,31%, respectivamente.

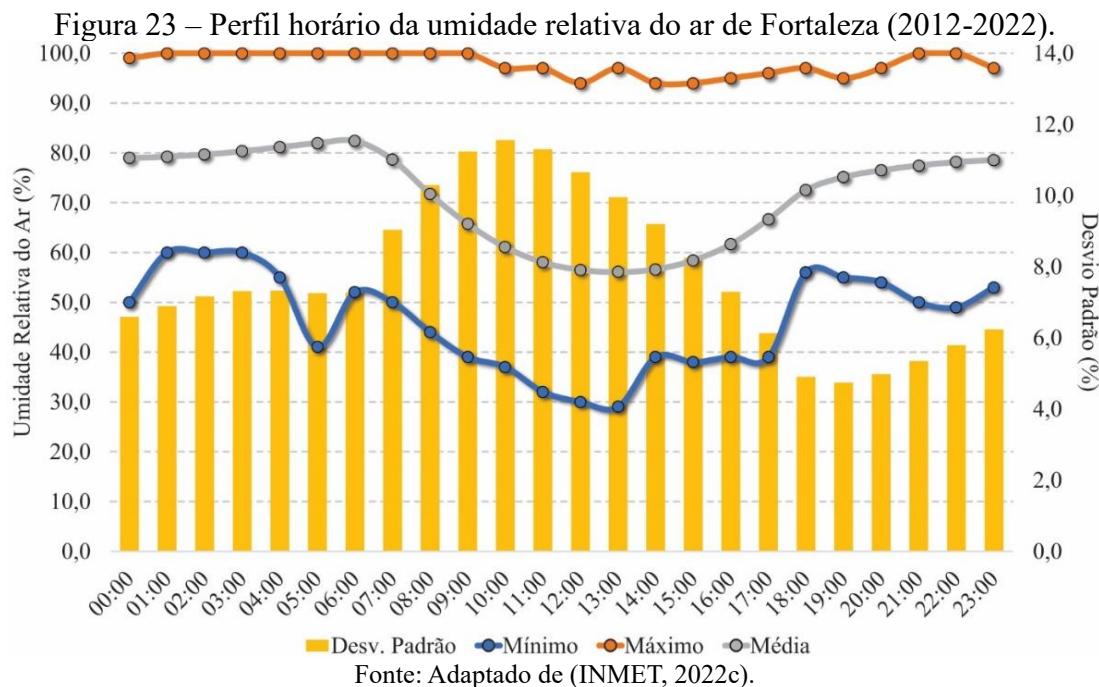
Figura 22 – Perfil mensal da umidade relativa do ar de Fortaleza (2012-2022).



Fonte: Adaptado de (INMET, 2022c).

Ao analisar o desvio padrão da umidade relativa, verifica-se baixa variação ao longo do ano, sendo que os valores máximos são registrados em junho (12,74) e julho (12,95), período de transição entre o período chuvoso e seco. Assim, a umidade relativa do local apresenta comportamento estável durante o ano.

Na Figura 23 é apresentado o perfil horário da umidade relativa do ar em Fortaleza no período de 2012 a 2022. O comportamento da umidade relativa do ar é inverso ao da temperatura ambiente entre 6 e 18 horas, apresentando redução nesse período, enquanto a temperatura ambiente aumenta.

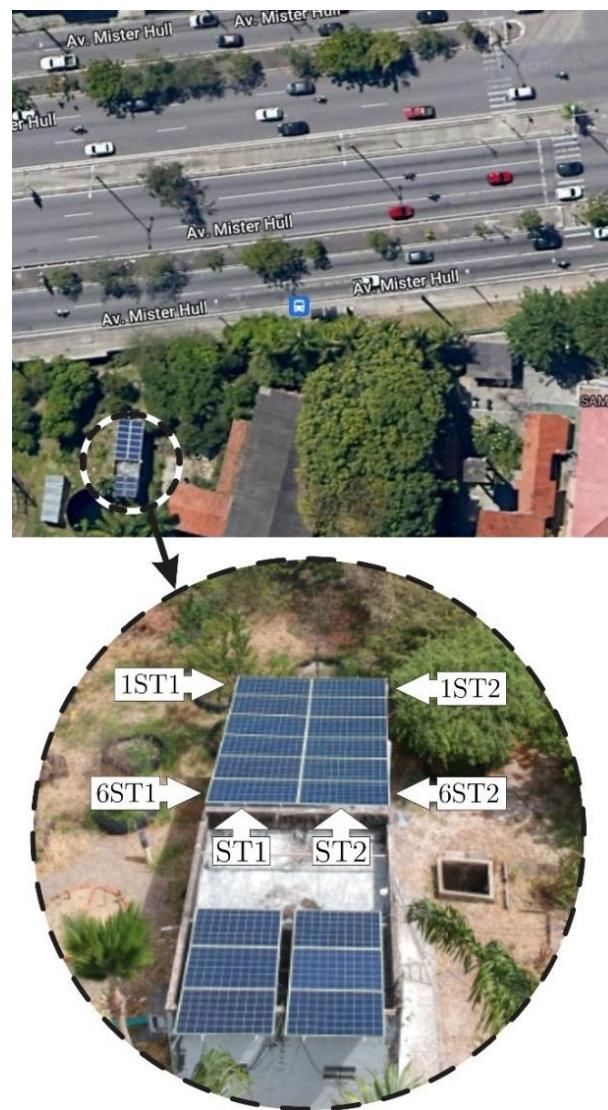


4.1.2 Descrição da planta FV LEA2

A planta LEA2, utilizada nesse estudo, possui potência de 3,9 kW_p, sendo composta por 12 módulos p-Si de 330 W_p, distribuídos em duas *strings* conectadas em paralelo (6 módulos em série em cada *string*). LEA2 têm inclinação de 10°, orientação ao norte geográfico, entrou em operação em setembro de 2018, encontra-se instalada em um vão livre e está próxima da Av. Mister Hull. Na Figura 24 é apresentada uma visão aérea da localização das plantas FV do LEA - UFC, destacando as principais características de LEA2. Na Tabela 2 são apresentadas as especificações técnicas dos módulos da LEA2.

Para a interconexão com a rede, LEA2 utiliza um inversor modelo PHB5000D-NS, com fusíveis e dispositivos de proteção contra surtos. O *datalogger*, integrado ao inversor, possui conexão *Wi-Fi* e registra os parâmetros elétricos de operação. A amostragem é de 1 minuto, com os dados sendo enviados e armazenados no servidor *web* do fabricante do inversor.

Figura 24 – Vista aérea das plantas FV do LEA – UFC².



Fonte: Adaptado de (Freitas Filho *et al.*, 2020; Google, 2022).

Tabela 2 – Especificações dos módulos da LEA2 em STC.

Característica	Especificação
Fabricante	Jinko Solar
Modelo	JKM330PP-72
Potência (P_{Max})	330 W
Eficiência (η)	17,01%
Tensão Máxima (V_{Max})	37,80 V
Corrente Máxima (I_{Max})	8,74 A
Tensão de Circuito Aberto (V_{oc})	46,90 V
Corrente de Curto-Círculo (I_{sc})	9,14 A
Coeficiente de P_{Max} (γ)	-0,38%/ $^{\circ}$ C
Coeficiente de V_{oc} (β_{Voc})	-0,31%/ $^{\circ}$ C
Coeficiente de I_{sc} (α)	-0,06%/ $^{\circ}$ C
Dimensões (L x W x H)	1956mm x 992mm x 40mm

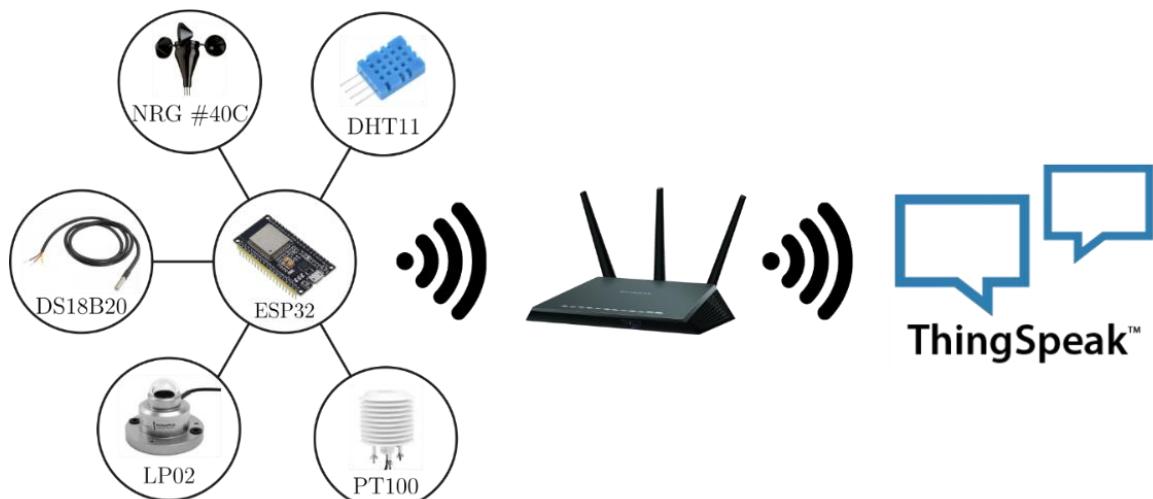
Fonte: Adaptado de (Jinko Solar, 2016).

² As nomenclaturas ST1 e ST2 na Figura 17 representam, respectivamente, as *strings* 1 e 2 da planta LEA2.

4.1.3 Monitoramento e aquisição de dados ambientais e operacionais

Para o monitoramento das condições ambientais/operacionais utiliza-se o sistema IoT (*Internet of Thing*) proposto por Assis (2023), adaptado para enviar dados por Wi-Fi, cuja estrutura é apresentada na Figura 25. O servidor *ThingSpeak* é utilizado para o armazenamento e disponibilização dos dados coletados.

Figura 25 – Estrutura geral do sistema de monitoramento IoT do LEA.



Fonte: Adaptado de (Assis, 2023).

A aquisição dos dados de irradiação é feita com um piranômetro modelo LP02 da Hukseflux, cuja amostragem ocorre a cada 1 minuto. Na Tabela 3 são apresentadas as especificações do piranômetro LP02.

Tabela 3 – Especificações do piranômetro LP02.

Parâmetro	Especificação
Classificação ISO 9060:1990	2ª Classe
Tempo de resposta (95%)	18 segundos
Faixa de Medição	0 a 2.000 W/m ²
Faixa de Sensibilidade	7 a 25·10 ⁻⁶ V/(W/m ²)
Sensibilidade (normal)	15·10 ⁻⁶ V/(W/m ²)
Faixa de temperatura operacional nominal	-40 a +80 °C
Alcance espectral (20% de pontos de transmissão)	285 a 3.000·10 ⁻⁹ m

Fonte: Adaptado de (Hukseflux, 2008).

A velocidade do vento é medida por um anemômetro NRG #40C da NRG Systems. A medição da velocidade do vento ajudar a verificar a influência do vento sobre a sujidade e na T_m . Na Tabela 4 são apresentadas as especificações do anemômetro NRG #40C.

A umidade relativa do ar é medida pelo sensor DHT11, com amostragem de 1 minuto. Na Tabela 5 são presentadas as especificações do sensor DHT11.

Tabela 4 – Especificações do anemômetro NRG #40C.

Parâmetro	Especificação
Faixa de Medição	1 m/s a 96 m/s
Faixa de umidade operacional	0 a 100%
Faixa de temperatura operacional	-55 a 60 °C

Fonte: Adaptado de (NRG Systems, 2010).

Tabela 5 – Especificações do sensor DHT11.

Parâmetro	Especificação
Faixa de Medição	20-90% e 0-50 °C
Acurácia (Umidade)	±5%
Acurácia (Temperatura)	±2°C

Fonte: Adaptado de (Mouser Electronics, 2021).

Para o monitoramento da T_m , são usados sensores digitais modelo DS18B20, que possuem encapsulamento à prova d’água e três terminais (GND – Terra; DATA – Saída de dados e VDD - Alimentação); informações adicionais são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Características do sensor DS18B20.

Parâmetro	Valor
Faixa de leitura	-55 a 125 °C
Tensão de alimentação	3 a 5,5 V
Precisão	±0,5 °C (-10 a 85 °C) e ±2 °C (-55 a 125 °C)
Tempo de conversão	750 ms
Resolução	9 bits

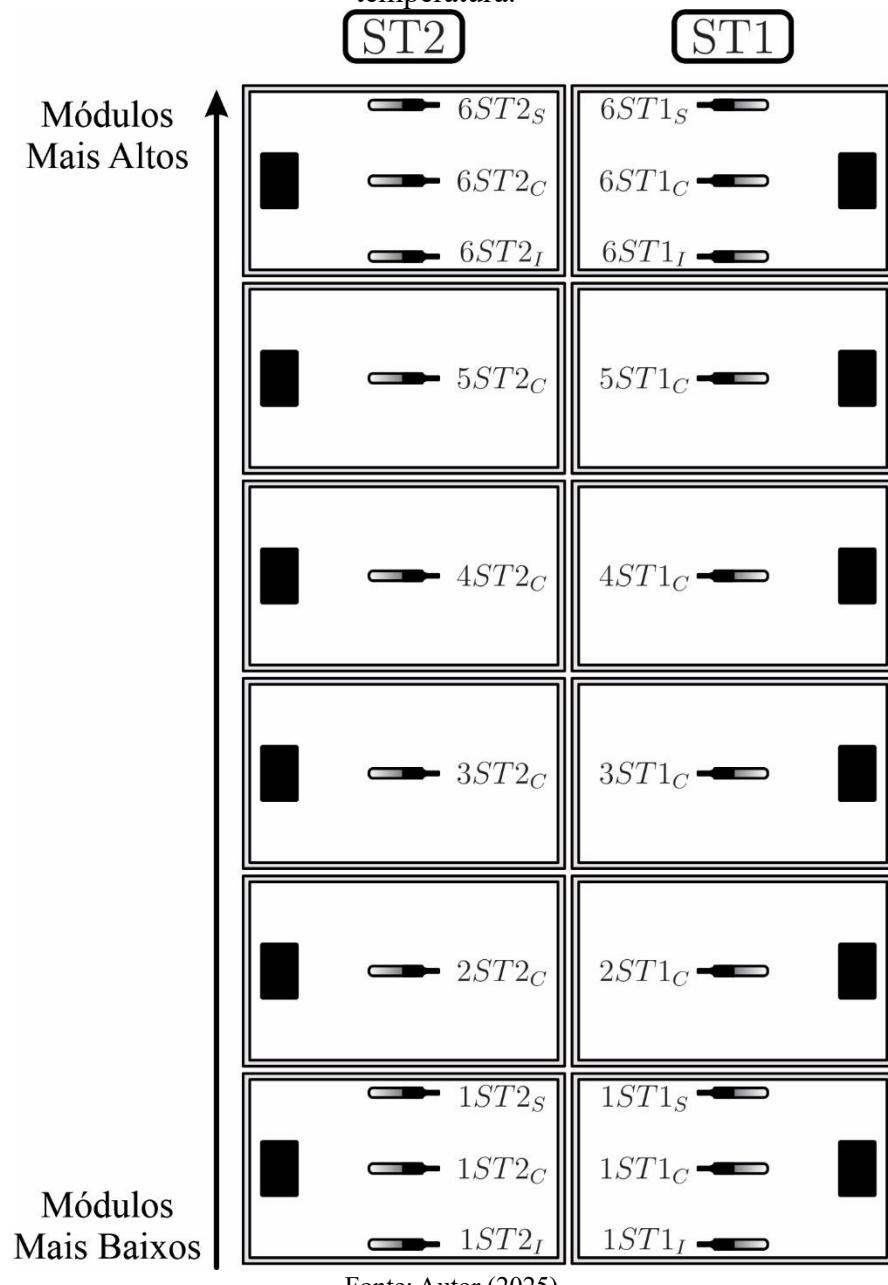
Fonte: Adaptado de (Maxim Integrated, 2018).

Inicialmente, os sensores passam por um processo de calibração adotando procedimentos de imersão em padrões de temperatura e instrumento de referência; os testes são realizados em três temperaturas: (1) 0 °C (equilíbrio sólido/líquido – recipiente isolante com gelo); (2) 24,50 °C - temperatura ambiente do local, usando como referência um termômetro de mercúrio, e (3) 100 °C (equilíbrio líquido/gasoso – recipiente com ebulidor de água).

Para a coleta de informações operacionais da planta LEA2 são monitoradas a temperatura no centro de todos os módulos e nas bordas superior e inferior dos módulos localizados nas extremidades da planta. Na Figura 26 é representada a localização dos sensores com as suas respectivas nomenclaturas. A designação da nomenclatura dos sensores segue a seguinte sistemática: o primeiro número indica a posição do módulo na *string* (1 é o módulo mais próximo à Av. Mister Hull e 6 é o mais próximo à laje do LEA), seguido por ST1 e ST2 para indicar a *string* correspondente, e por C, I ou S para indicar o centro, borda inferior e borda superior do módulo, respectivamente. Os sensores centrais são instalados em dezembro de 2022, enquanto os sensores nas bordas são adicionados em abril de 2023.

O monitoramento da temperatura das bordas dos módulos objetiva analisar o efeito da sujidade, uma vez que o seu acúmulo pode alterar o equilíbrio térmico e, ocasionalmente, elevar a T_m (Sánchez-Barroso *et al.*, 2021).

Figura 26 – Representação da parte traseira de LEA2 com identificação dos sensores de temperatura.



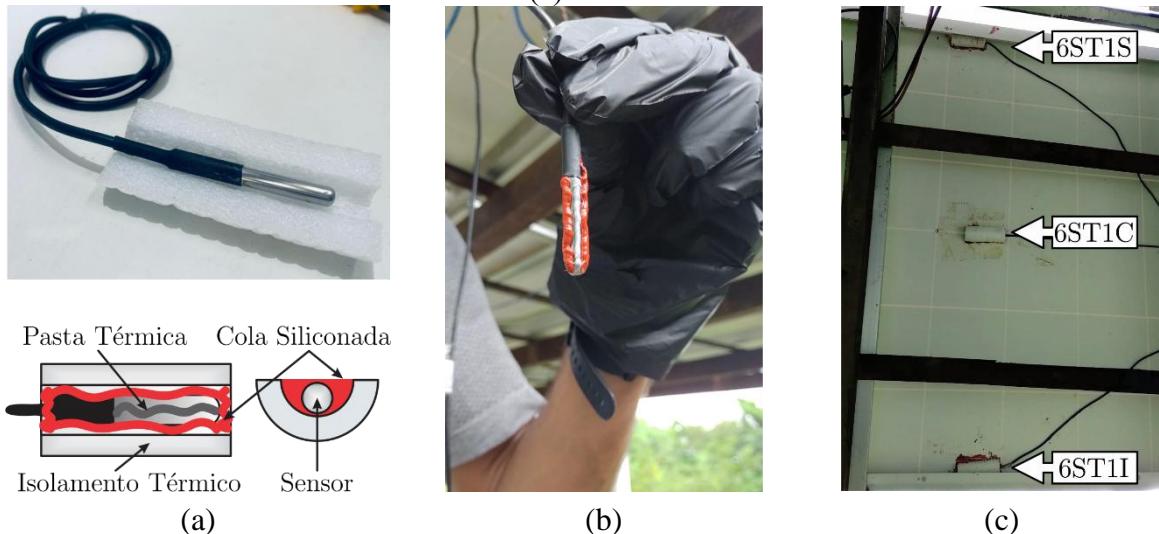
Fonte: Autor (2025).

Para instalação dos sensores é usada pasta térmica, para garantir melhor contato entre o sensor e o *backsheet* do módulo, cola silicone adesiva resistente à altas temperaturas, e espuma de polietileno, com película protetora, para isolamento térmico, evitando interferências ambientais nas leituras. Na Figura 27 é representado o procedimento de instalação dos sensores nos módulos de LEA2.

Com o objetivo de verificar a coerência das leituras de T_m da planta LEA2 é realizada uma análise preliminar dos dados coletados; são utilizadas medições coletadas entre 21/05/2023 e 04/07/2023. Durante esse período, alguns intervalos não possuem dados devido a problemas de conexão com a internet ou erro de leitura. Para a análise, as seguintes são aplicadas:

1. São excluídos os erros de leitura (valores -127 ou ≥ 129);
2. Valores menores que 19 °C são desconsiderados;
3. Consideram-se apenas os instantes em que são coletadas medições de todos os sensores DS18B20, inclusive da temperatura ambiente;
4. São consideradas medições durante 24 horas com amostragem a cada 1 minuto;
5. Instantes sem medições de irradiância são desconsiderados;
6. São analisadas 19.372 medições de cada sensores;

Figura 27 – Instalação dos sensores de temperatura: (a) isolamento térmico; (b) sensor DS18B20 sendo instalado e (c) sensores instalados em um módulo.

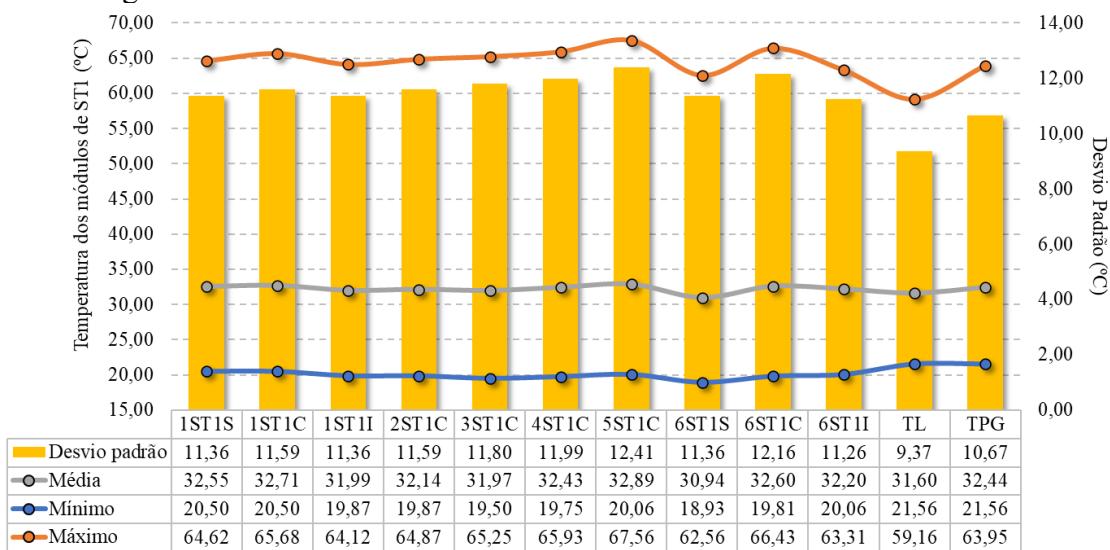


Fonte: Autor (2025).

As medições são comparadas com as equações propostas por Lorenzo, Araujo e Cuevas (1994) (T_L) e Pinho e Galdino (2014) (T_{PG}). Nas Figuras 28 e 29 são apresentadas as análises estatísticas descritivas das medições dos sensores de temperatura das *strings* ST1 e ST2, respectivamente, juntamente com os valores de T_m estimados pelas equações de referência. Observa-se que há compatibilidade entre os valores mensurados pelos sensores e os estimados pelas equações de referência.

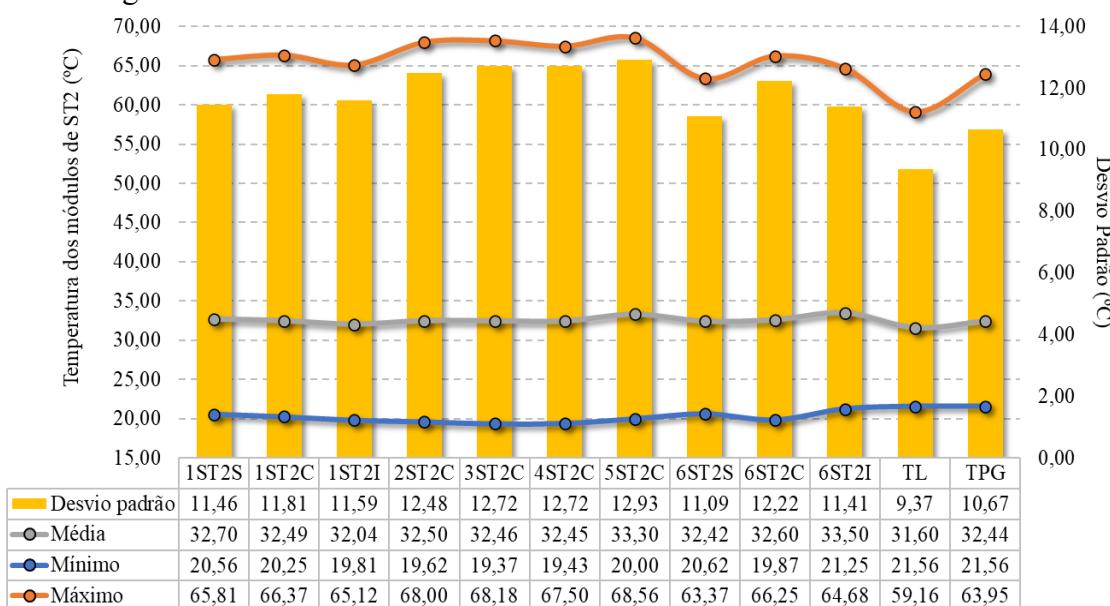
Nas Tabelas 7 e 8 são apresentados os valores das diferenças entre a média das temperaturas dos sensores e os valores estimados pelas equações de referência.

Figura 28 – Análise estatística descritiva dos sensores instalados na ST1.



Fonte: Adaptado de (Assis, 2023).

Figura 29 – Análise estatística descritiva dos sensores instalados na ST2.



Fonte: Adaptado de (Assis, 2023).

Tabela 7 – Diferença entre os valores médios de temperatura dos módulos de ST1 medidos e estimados.

	1ST1s	1ST1c	1ST1I	2ST1c	3ST1c	4ST1c	5ST1c	6ST1s	6ST1c	6ST1I
T _L	-3,02%	-3,52%	-1,25%	-1,73%	-1,20%	-2,63%	-4,09%	2,08%	-3,17%	-1,91%
T _{PG}	-0,36%	-0,84%	1,38%	0,90%	1,43%	0,03%	-1,39%	4,62%	-0,49%	0,73%

Fonte: Adaptado de (Assis, 2023).

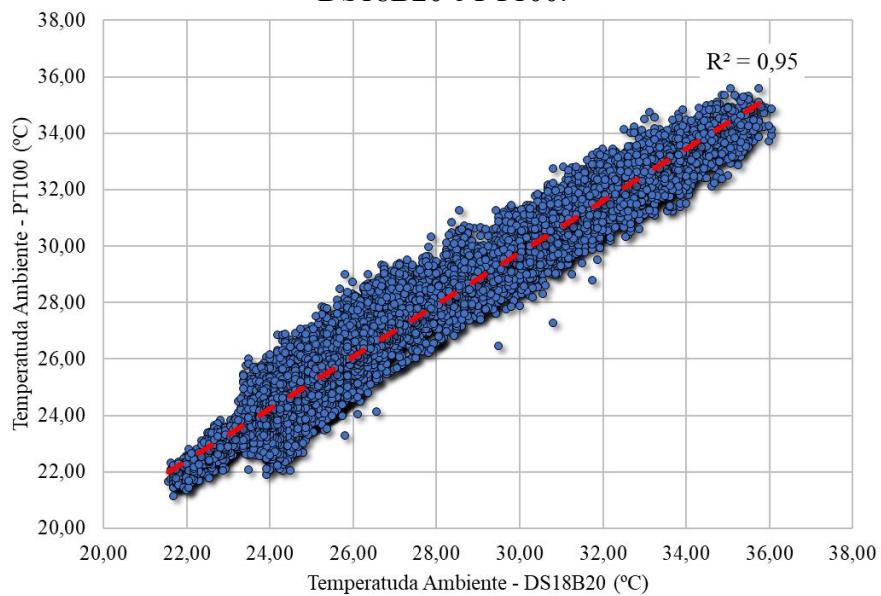
Tabela 8 – Diferença entre os valores médios de temperatura dos módulos de ST2 medidos e estimados.

	1ST2s	1ST2c	1ST2I	2ST2c	3ST2c	4ST2c	5ST2c	6ST2s	6ST2c	6ST2I
T _L	-3,50%	-2,83%	-1,42%	-2,85%	-2,74%	-2,71%	-5,40%	-2,59%	-3,19%	-6,02%
T _{PG}	-0,81%	-0,16%	1,21%	-0,19%	-0,07%	-0,05%	-2,67%	0,07%	-0,51%	-3,28%

Fonte: Adaptado de (Assis, 2023).

A medição da temperatura ambiente é feita por um sensor do tipo PT100, dotado de escudo de proteção contra radiação, e um por um sensor DS18B20; o diagrama de dispersão apresentado na Figura 30 mostra que há compatibilidade nas medições, sendo observado coeficiente de determinação (R^2) de 0,95. O valor médio da temperatura ambiente mensurada pelo sensor DS18B20 é de $27,39\text{ }^\circ\text{C} \pm 3,24$ enquanto pelo sensor PT100 é de $27,36\text{ }^\circ\text{C} \pm 3,06$. Para garantir a compatibilidade na amostragem dos dados elétricos, ambientais e operacionais, neste trabalho são adotadas as médias a cada 10 minutos para todas as variáveis.

Figura 30 – Diagrama de dispersão da temperatura ambiente mensurada pelos sensores DS18B20 e PT100.



Fonte: Adaptado de (Assis, 2023).

As incertezas dos equipamentos usados em investigações experimentais são cruciais para avaliar a precisão dos resultados. Considerando que as medições individuais são independentes e exibem comportamento aleatório, a incerteza dos sistemas de monitoramento pode ser estimada pela Equação (12) (Al-Housani; Bicer; Koç, 2019b), onde U representa a incerteza total; ∂y e ∂x denotam as incertezas associadas às variáveis dependente (y) e independente (x), respectivamente.

$$U = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)^2 u_x^2} \quad (12)$$

Os níveis de incerteza estimados para cada dispositivo de medição são mostrados na Tabela 9, incluindo parâmetros elétricos (medidos diretamente pelo inversor) e variáveis meteorológicas (monitoradas pelo sistema IoT integrado). Para LEA2, a incerteza total dos parâmetros é de aproximadamente 2,75%.

Tabela 9 – Valores estimados de incerteza dos instrumentos de medição LEA2.

Parâmetro	Incerteza (%)
Irradiância (LP02)	1,80
Velocidade do vento (NRG #40C)	1,48
Temperatura dos módulos (DS18B20)	1,00 ^{3*}
Temperatura ambiente (DS18B20)	1,00 ^{3*}
Umidade relativa do ar (DHT11)	1,00 ^{3**}
Elétricos (PHB5000D-NS)	1,00 ^{3***}
Total	2,75

Fonte: Adaptado de (Huksflux, 2008; NRG Systems, 2010; Yulizar *et al.*, 2023; Gupta *et al.*, 2022b; Arabkoohsar, 2016).

4.2 Modelos analíticos

A sujidade é um processo diretamente relacionado às condições locais e operacionais das plantas FV, o que significa que os resultados de um estudo específico não podem ser necessariamente generalizados para outros ambientes. Desse modo, torna-se essencial realizar estudos sobre sujidade na área de interesse para instalação de novos sistemas FV. Contudo, o uso de dispositivos de monitoramento específicos para sujidade pode ser oneroso e exigir manutenção frequente.

Nesse contexto, a utilização de modelos analíticos para estimar parâmetros elétricos de sistemas FV limpos e compará-los com valores medidos em módulos não limpos para verificar os efeitos da sujidade é uma alternativa para este tipo de estudo (Fernández-Solas *et al.*, 2022). Porém, é fundamental avaliar a adequação e a precisão desses métodos em relação aos valores reais do local analisado.

Nesta Tese, é verificada a adequação de modelos analíticos para estimar parâmetros elétricos de plantas FV no local de estudo e sua posterior aplicabilidade para estudos de sujidade. Inicialmente os modelos são selecionados através do estudo de Fernández-Solas *et al.* (2022), que usa modelos analíticos para estimar os efeitos da sujidade nas condições ambientais da Universidade de Jaén (Espanha), classificadas pelos autores como de baixos/moderados níveis de sujidade; o estudo considera para três tecnologias FV distintas: m-Si, CdTe e CIS. Adicionalmente é verificada a aplicabilidade do modelo proposto Anderson (1996).

Para validação da aplicabilidade dos modelos analíticos, são utilizados dados da *SRatio*, estabelecidos pela relação da saída elétrica de um módulo sujo pela saída elétrica de um módulo limpo sob as mesmas condições ambientais e de operação. Diferentemente da metodologia

³ Valores obtidos/estimados de ^{*}Yulizar *et al.* (2023), ^{**}Gupta *et al.* (2022b) e ^{***}Arabkoohsar (2016). Os demais valores são obtidos da folha de dados fornecida pelos fabricantes dos sensores.

utilizada por Fernández-Solas *et al.* (2022), neste estudo não é utilizada uma bancada experimental exclusiva para essa finalidade, sendo utilizados dados da planta LEA2. Como a planta está dividida em duas *strings* (ST1 e ST2), cada uma associada a um MPPT do inversor (MPPT1 e MPPT2), são utilizados os dados de tensão e corrente para determinar a potência de cada *string*. Os módulos de ST1 ficam sujeitos apenas à limpeza natural, enquanto os módulos de ST2 são submetidos a intervenções de limpeza regulares (frequência variada). Dessa forma, é possível estabelecer um procedimento de análise da *SRatio* real da localidade sem a necessidade de medições adicionais.

No que se refere aos procedimentos de limpeza aplicados à ST2, um cronograma de intervenções periódicas é estabelecido. As limpezas seguem diretrizes baseados em Rezende (2018):

- Procedimento de limpeza manual úmida com frequência variável entre 1 e 5 semanas;
- Uso de água potável e detergente neutro;
- Intervenções realizadas no período da manhã, até das 10 horas;
- A limpeza inicia-se pelos módulos FV mais elevados, para facilitar a drenagem da água devido à inclinação de instalação.

A adoção dos procedimentos permite observar a influência da limpeza nos sistemas FV no local de estudo e de forma sazonal, com intervenções realizadas nos períodos chuvoso e seco. Informações adicionais sobre a caracterização das *strings* ST1 e ST2 estão disponíveis no Apêndice C.

4.2.1 Modelos analíticos para estimar parâmetros elétricos

O modelo *Sandia Array Performance Model* (SAPM) assume que a P_{Max} de um módulo FV depende apenas de G_{POA} e T_c (OSTERWALD, 1986). Dessa maneira, a P_{Max} pode ser estabelecida conforme a Equação (13).

$$P_{Max} = P_{Max_{STC}} \cdot [1 + \gamma(T_c - T_{STC})] \cdot \frac{G_{POA}}{G_{STC}} \quad (13)$$

No modelo *Fixed Fill Factor Model* (FFFM), assume-se que o *FF* de um módulo não apresenta variação no durante sua operação (Fuentes *et al.*, 2007), portanto, a P_{Max} pode ser determinada pela Equação (14). Para definir V_{oc} e I_{sc} , utilizam-se as Equações (15) e (16), respectivamente, inicialmente propostas por Anderson (1996).

$$P_{Max} = FF \cdot I_{sc} \cdot V_{oc} \quad (14)$$

$$V_{oc} = V_{oc_{STC}} \cdot [1 + \beta(T_c - T_{STC})] \cdot \left[1 + \delta \cdot \ln \left(\frac{G_{POA}}{G_{STC}} \right) \right] \quad (15)$$

$$I_{sc} = I_{sc_{STC}} \cdot [1 + \alpha(T_c - T_{STC})] \cdot \frac{G_{POA}}{G_{STC}} \quad (16)$$

Em que β é o coeficiente de temperatura de V_{oc} , e δ é o coeficiente de correção de V_{oc} para irradiação; o valor de δ normalmente não é fornecido no *datasheet* dos módulos FV. A determinação correta do seu valor é complexa, pois depende da tecnologia e das características estruturais dos módulos FV. Na literatura, valores de δ podem chegar à 0,11. Nesse trabalho, δ é determinado através da Equação (17) (Batzelis, 2017).

$$\delta = \frac{1 - \beta(T_{STC} + 273,15)}{50,1 - \alpha(T_{STC} + 273,15)} \quad (17)$$

O modelo *Variable Fill Factor Model* (VFFM), de Araujo e Sánchez (1982), considera que o *FF* varia em função das condições de operação dos módulos FV, podendo ser determinado pelas Equações (18) - (21). Para a estimativa de V_{oc} e I_{sc} são utilizadas nas Equações (15) e (16), respectivamente. Já para determinar P_{Max} utiliza-se a Equação (14) considerando o *FF* da Equação (18).

$$FF = FF_o \cdot \left(1 - \frac{R_s}{\frac{V_{oc}}{I_{sc}}} \right) \quad (18)$$

$$R_s = \frac{V_{oc_{STC}}}{I_{sc_{STC}}} \cdot \left(1 - \frac{FF_{STC}}{FF_{o_{STC}}} \right) \quad (19)$$

$$FF_o = \frac{V_{oc} - \ln(V_{oc} + 0,72)}{V_{oc} + 1} \quad (20)$$

$$V_{oc} = \frac{V_{oc}}{k \cdot T_c} \cdot q \quad (21)$$

Em que R_s é a resistência série, FF_o é o fator de forma intrínseco da célula, V_{oc} é a tensão de circuito aberto normalizada, k é a constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$), q é a carga de um elétron ($1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$) e T_c é a temperatura da célula em kelvin (K); $FF_{o_{STC}}$ é o fator de forma intrínseco da célula em STC, sendo determinado pelas Equações (20) e (21) considerando as informações em STC fornecidas no *datasheet* do módulo.

No modelo de Araujo e Sánchez (1982), denominado *Approximate Maximum Power Point Model* (AMPPM), os valores máximos de tensão, corrente e potência são estimados em função dos valores de I_{sc} e V_{oc} . Para tal, devem-se seguir as seguintes etapas: (1) determinam-se V_{oc} e I_{sc} pelas Equações (15) e (16); (2) calculam-se os valores dos parâmetros r_s , a e b pelas Equações (22) - (24), respectivamente; (3) determinam-se os valores de I_{Max} e V_{Max} pelas Equações (25) e (26), respectivamente; e (4) calcula-se valor de P_{Max} pela Equação (27).

$$r_s = 1 - \frac{FF_{STC}}{FF_o} \quad (22)$$

$$a = V_{oc} + 1 - 2 \cdot V_{oc} \cdot r_s \quad (23)$$

$$b = \frac{a}{1+a} \quad (24)$$

$$I_{Max} = I_{sc} \cdot (1 - a^{-b}) \quad (25)$$

$$V_{Max} = V_{oc} \cdot \left[1 - \frac{b}{V_{oc}} \cdot \ln(a) - r_s \cdot (1 - a^{-b}) \right] \quad (26)$$

$$P_{Max} = V_{Max} \cdot I_{Max} \quad (27)$$

Adicionalmente, P_{Max} é determinada considerando os modelos para determinação de I_{sc} e V_{oc} propostas por Anderson (1996) (*ANM - Anderson Model*), conforme apresentado na Equação (28).

$$P_{Max} = P_{Max_{STC}} \cdot [1 + \beta(T_c - T_{STC})] \cdot \left[1 + \delta \cdot \ln \left(\frac{G_{POA}}{G_{STC}} \right) \right] \cdot \frac{G_{STC}}{G_{POA}} \quad (28)$$

4.3 Extração das métricas de sujidade

Na presente seção, são apresentadas as diretrizes utilizadas para o estudo da aplicabilidade de modelos analíticos para a determinação de *SRatio*. Também são descritas as métricas de avaliação utilizadas para determinar o modelo analítico com maior acurácia.

4.3.1 Aplicabilidade de modelos analíticos na determinação da SRatio

Para quantificar as perdas por sujidade no local de estudo, calcula-se a *SRatio* a partir da relação entre a potência medida e a estimada por cada um dos métodos analíticos apresentados anteriormente. Na Equação (29) é apresentada a expressão da *SRatio* estimada para cada um dos métodos.

$$SRatio_{estimado} = \frac{P_{Max_{medido}}}{P_{Max_{estimado}}} \quad (29)$$

Em que $P_{Max_{medido}}$ e $P_{Max_{estimado}}$ correspondem à potência medida e estimada, respectivamente, utilizando os métodos analíticos.

O valor de $SRatio$ varia ao longo do dia, com picos geralmente próximos ao meio-dia. Esse comportamento deve-se à variação da radiação direta e difusa em função do ângulo de incidência no decorrer do dia (Zorrilla-Casanova *et al.*, 2012). Em vista disso, a IEC 61724-1 (2017) recomenda que a determinação da $SRatio$ em sistemas de ângulo fixo ou sistemas de rastreamento com ângulo de incidência inferior a 35° seja estimado a partir de medições no intervalo de ±2 horas em relação ao meio-dia. Devido às condições ambientais, a $SRatio$ apresenta alta variação; para melhor visualização dos dados, são aplicadas as seguintes considerações:

- Os valores diários de $SRatio$ são determinados pela mediana de todos os dados de $SRatio$ calculados no período das 10 às 14 horas;
- Dentro esse intervalo, a irradiância deve ser $\geq 700 \text{ W/m}^2$, com variação inferior a ±10% em um período de 10 minutos;
- Dados espúrios, resultantes de inconsistências e/ou ausência de dados de irradiância ou potência no período considerado, são excluídos;
- São excluídos os intervalos em que a condição do céu é considerada nublada.

Para estabelecer a condição do céu no intervalo estudado, utiliza-se o Índice de Claridade Modificado (*Modified Clearness Index - k'*_t), por apresentar menor dependência do ângulo de elevação solar em comparação ao Índice de Claridade (*Clearness Index - k_t*) (Amillo; Huld; Müller, 2014). A Equação (30) é utilizada para calcular o k' _t.

$$k'_t = \frac{k_t}{1,031 \cdot \exp \frac{-1,40}{0,90 + \frac{9,40}{AM}}} + 0,10 \quad (30)$$

Onde AM é a massa de ar, conforme definida pela Equação (31) (Djafer; Irbah, 2013), e k_t é calculado pela Equação (32).

$$AM = [\sin(h) + 0,15 \cdot (3,885 + h)^{-1,253}]^{-1} \cdot \left[\frac{101325 \cdot \exp(-0,0001184 \cdot z)}{101325} \right] \quad (31)$$

$$k_t = \frac{G_H}{G_{sc} \cdot \cos(\theta_z)} \quad (32)$$

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

Segundo Amillo, Huld e Müller (2014), as condições do céu podem ser classificadas em três intervalos distintos de k' : nublado ($0 < k' \leq 0,30$), parcialmente nublado ($0,30 < k' \leq 0,65$) e limpo ($0,65 < k' \leq 1$). Assim, os dados de $SRatio$ são filtrados considerando $k' > 0,30$. É importante destacar que o valor de k'_t de um dia é considerado como sendo a média dos valores de k' entre as 10 e 14 horas em intervalos de 10 minutos.

Os dados da $SRatio$ estimado por cada um dos métodos analíticos são comparados com a $SRatio$ medida pela relação entre a P_{Max} de ST1 (sujo) e ST2 (limpo), conforme apresentado na Equação (33).

$$SRatio_{medido} = \frac{P_{Max_{sujo}}}{P_{Max_{limpo}}} \cdot K_{mismatch} \quad (33)$$

Em que $K_{mismatch}$ representa a disparidade de P_{Max} da *string* limpa e suja ($P_{Max_{limpo}}$ e $P_{Max_{sujo}}$), quando ambas estão sob as mesmas condições de operação. Para determinação de $K_{mismatch}$ são utilizados valores mensurados entre 05/07/2023 e 11/07/2023, já que nesse período ambas as *strings* estavam sob as mesmas condições de operação, após uma limpeza manual realizada em 05/07/2023; informações adicionais sobre a análise de compatibilidade elétrica entre ST1 e ST2 descrito no Apêndice C. Segundo Fernández-Solas *et al.* (2022), módulos da mesma tecnologia FV apresentam taxas de degradação semelhantes; portanto, considera-se que $K_{mismatch}$ permanece constante durante todo o período experimental, com valor de 1,04.

4.3.2 Métricas de avaliação

Para determinar os modelos analíticos com maior acurácia e, consequentemente, com maior aplicabilidade na estimativa de parâmetros elétricos de plantas FV no local de estudo, são utilizadas as seguintes métricas de avaliação: Erro de Viés Médio (*Mean Bias Error - MBE*), Erro Quadrático Médio da Raiz (*Root Mean Squared Error - RMSE*), Erro Percentual Absoluto Médio (*Mean Absolute Percentage Error - MAPE*) e Erro Percentual Médio (*Mean Percentage Error - MPE*)

A métrica MBE , Equação (34), determina o desvio médio dos valores estimados e os valores medidos; valores negativos indicam que o modelo subestima o parâmetro calculado, enquanto valores positivos indicação superestimação. O indicador $RMSE$, Equação (35), calcula o valor de erro médio de previsão, sendo que, quanto menor seu valor melhor a previsão do modelo. A métrica $MAPE$, Equação (36), expressa a porcentagem média dos erros dos valores estimados em relação aos valores medidos; quanto menor o $MAPE$, melhor é a estimativa. O indicador MPE , Equação (37), representa a diferença percentual média dos erros previstos em relação ao medidos, permitindo a comparação direta entre variáveis mensuradas em diferentes unidades de medida.

$$MBE = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i) \quad (34)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (35)$$

$$MAPE = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \quad (36)$$

$$MPE = \frac{100\%}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \quad (37)$$

Em que y_i é o valor medido, \hat{y}_i é o valor estimado, \bar{y}_i é a média dos valores medidos e N é o número total de medições.

4.4 Limpezas manuais

Uma visão geral da planta LEA2 antes da limpeza manual realizada em 05 julho de 2023 é apresentada na Figura 31. Observa-se uma camada de sujidade distribuída de forma uniforme, além da presença de excrementos, especialmente nos módulos inferiores, com incrustações que dificultam a remoção natural.

Para a realização da limpeza manual, utiliza-se um *mop* limpador de janelas com extensão de 3,00 m, detergente neutro, água potável, panos macios de limpeza doméstica (microfibra), balde e um pulverizador de água. A limpeza é realizada no período da manhã, com a escolha do detergente neutro para garantir a remoção da sujidade incrustada. Quanto aos procedimentos de limpeza, destacam-se as seguintes etapas: (1) molhar os módulos; (2) esfregar

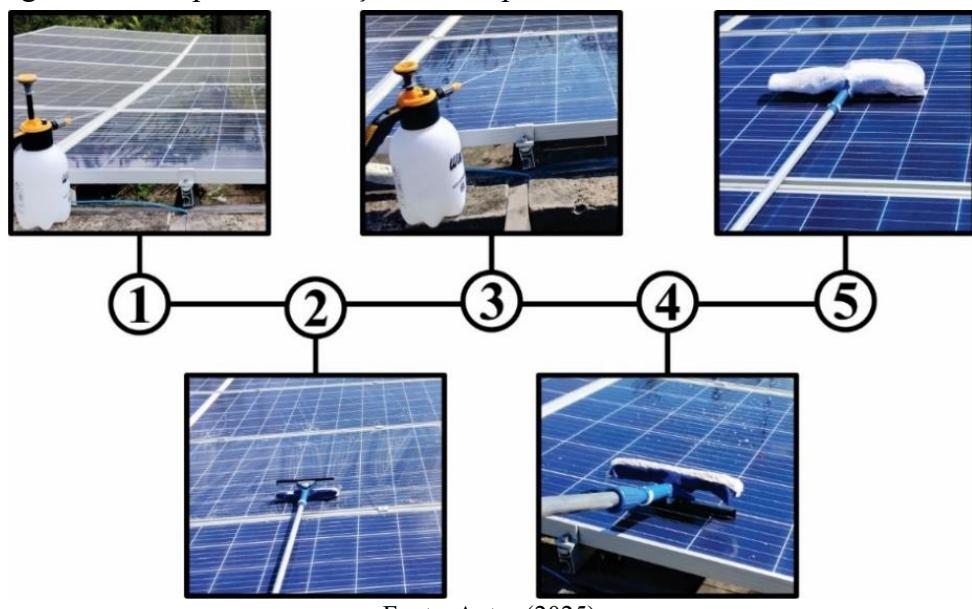
os módulos com detergente neutro adicionado no *mop*; (3) enxaguar os módulos; (4) remover o excesso de água; (5) secar os módulos com o pano de microfibra. Caso necessário, os procedimentos são repetidos. Na Figura 32 são ilustradas as etapas das limpezas dos módulos de LEA2.

Figura 31 – Planta LEA2 antes da realização da primeira limpeza.



Fonte: Autor (2025).

Figura 32 – Etapas de execução das limpezas manuais dos módulos de LEA2.



Fonte: Autor (2025).

Devido à configuração da planta LEA2, a limpeza é dividida em duas etapas: (1) a partir da laje (topo) do LEA, são limpos os módulos 4, 5 e 6 de cada *strings*; (2) os módulos 1, 2 e 3

são limpos com auxílio de escadas, a partir da base da planta. Na Figura 33 é apresentada a planta LEA2 antes, durante e depois da limpeza manual realizada em 05 de julho 2023.

Figura 33 – Planta LEA2 antes, durante e depois da limpeza manual de 05 de julho 2023.



Fonte: Autor (2025).

De forma sistemática, após a intervenção realizada em 05 de julho de 2023 apenas os módulos da *string* ST2 são submetidos a limpezas manuais em intervalos variados, a fim de verificar os efeitos da sujidade no desempenho elétrico e comportamento térmico de LEA2. As datas das limpezas manuais são listadas no Quadro 4. A partir desse ponto, utiliza-se designação LM, seguida do numeral, para se referir a cada uma das limpezas manuais executadas.

Quadro 4 – Datas das limpezas manuais de LEA2.

Identificação	Data	Intervalo entre limpezas
LM0	05/07/2023 ⁴	-
LM1	12/07/2023	7 dias
LM2	19/07/2023	
LM3	26/07/2023	
LM4	02/08/2023	
LM5	16/08/2023	14 dias
LM6	30/08/2023	
LM7	13/09/2023	
LM8	27/09/2023	
LM9	18/10/2023	21 dias
LM10	08/11/2023	
LM11	29/11/2023	
LM12	20/12/2023	
LM13	10/01/2024	7 dias
LM14	17/01/2024	
LM15	24/01/2024	
LM16	31/01/2024	
LM17	07/02/2024	28 dias
LM18	06/03/2024	
LM19	03/04/2024	
LM20	08/05/2024	35 dias
LM21	12/06/2024	
LM22	17/07/2024	
LM23	07/08/2024	7 dias

⁴ ambas as strings limpam

LM24	14/08/2024	14 dias
LM25	28/08/2024	21 dias
LM26	18/09/2024	28 dias
LM27	16/10/2024	35 dias
LM28	20/11/2024	28 dias
LM29	11/12/2024	21 dias
LM30	15/01/2025	-

Fonte: Autor (2025).

4.4.1 Efeitos das limpezas manuais no desempenho elétrico

Essa análise é conduzida entre janeiro de 2023 e janeiro de 2025 e é dividida em três fases:

- Fase (I): ST1 e ST2 sem limpeza manual (de 04/01/2023 a 04/07/2023);
- Fase (II): ST1 e ST2 limpam manualmente (de 05/07/2023 a 11/07/2023);
- Fase (III): apenas ST2 é limpa manualmente, com intervalos de limpeza variando entre 1 e 5 semanas (de 12/07/2023 a 28/01/2025).

Para mitigar a influência de interrupções nas medições dos parâmetros elétricos, são as seguintes considerações são adotadas:

- Utiliza-se apenas dados de dias que apresentam no mínimo 75% das medições possíveis entre 10 e 14h (periodo de maior geração) e entre 7 e 17h (operação plena de LEA2);
- Para a geração total diária, considera-se o intervalo entre 7 e 17h.

De forma inicial, a diferença relativa percentual de geração ($\%E_{LEA2}$), calculada conforme Equação (38), é utilizada para avaliar as perdas por sujidade em LEA2; em que E_{ST_1} e E_{ST_2} representam a energia elétrica gerada por ST1 e ST2, respectivamente.

$$\%E_{LEA2} = \left(1 - \frac{E_{ST1}}{E_{ST2}} \right) \cdot 100\% \quad (38)$$

Para a análise comparativa entre os regimes de precipitação (com e sem limpeza), além de $\%E_{LEA2}$, utilizam-se as métricas *Yield*, *FC* e *PR*, equações (39)-(41) respectivamente. Para evitar distorção no comportamento das métricas, são considerados apenas os dias com irradiação maior ou igual 2,50 kWh/m²/dia.

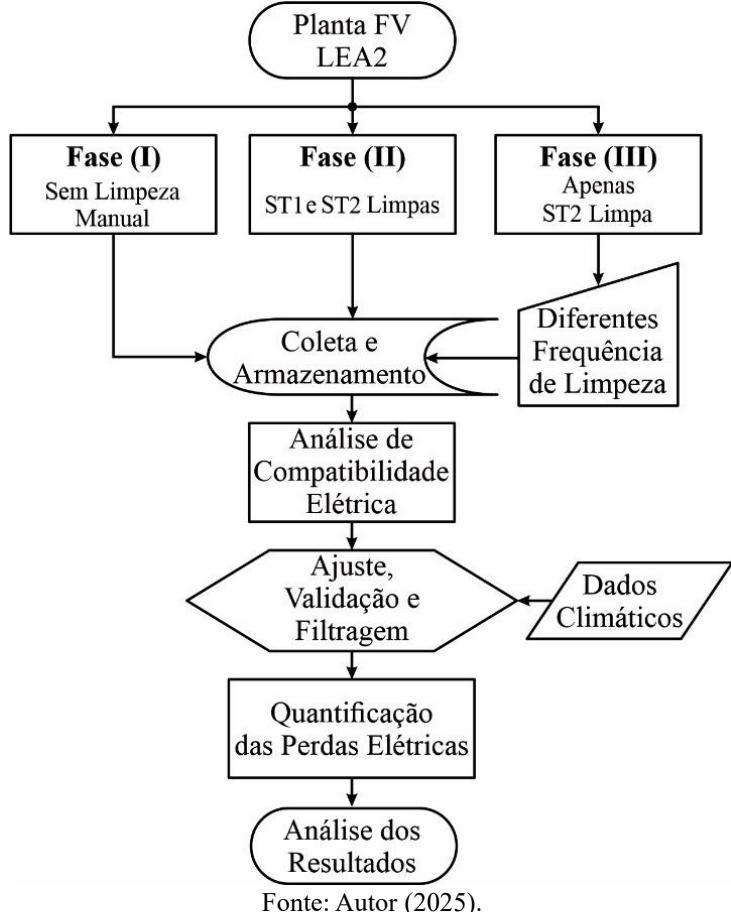
$$Yield = \frac{E_{ST1-2}}{P_{STC}} \quad (39)$$

$$FC = \frac{E_{ST1-2}}{24 \cdot P_{STC}} \quad (40)$$

$$PR = \frac{E_{ST1-2}}{P_{STC} \cdot \frac{GHI}{G_{STC}}} \quad (41)$$

Com base nessas premissas, o fluxograma genérico das etapas de execução dessa etapa do estudo é apresentado na Figura 34.

Figura 34 – Fluxograma do estudo dos impactos das limpezas manuais na geração de LEA2.



Fonte: Autor (2025).

4.4.2 Efeitos das limpezas manuais no comportamento térmico

Os dados utilizados na análise dos efeitos das limpezas manuais no comportamento térmico limitam-se às medições de temperatura coletadas entre 10:00 e 14:00 horas no período de 05 de julho de 2023 a 28 de janeiro de 2025. Os dados são pré-processados para evitar erros de leitura ou valores nulos, além disso, são utilizados apenas os instantes que há registro de leitura em todos os sensores de temperatura instalados nos módulos e adota-se valor mínimo de irradiação de 100 kWh/m²; as medições de T_m não são diretamente afetadas pela limpeza manual do ST2, pois os procedimentos são executados antes das 10:00 horas da manhã. Para verificar a distribuição térmica, são utilizados os dados coletados no centro e bordas superior e inferior dos módulos instalados nas extremidades de LEA2.

Uma análise estatística descritiva geral é realizada para o conjunto de dados, abrangendo as *strings* suja (ST1) e a limpa (ST2). Para verificar se há diferença significativa entre as médias da T_m dos módulos limpos e sujos é aplicado o Teste t com nível de significância de 5% ($\alpha=0,05$). Preliminarmente, o Teste F é utilizado para verificar se as variâncias dos conjuntos de dados das amostras são equivalentes ou não, sendo essa etapa uma condição essencial para a escolha do tipo de Teste t a ser aplicado. Além disso, a fim de compreender se há uma relação entre o tempo sem limpeza e o comportamento térmico dos módulos uma análise de regressão linear é conduzida.

Considerando que a sujidade pode se acumular de forma desigual, uma análise estatística é realizada para entender a distribuição das medições da T_m no centro, bordas inferior e superior dos módulos ST1 e ST2. Os valores médios de T_m no centro e nas bordas dos módulos ST2, juntamente com seus respectivos gradientes, são examinados em relação ao aumento do intervalo de limpeza. Adicionalmente, realiza-se a avaliação do impacto do incremento do número de dias sem limpeza em ST2 sobre T_m .

5 RESULTADOS

Neste capítulo, são inicialmente descritos os parâmetros ambientais do local de estudo, com base nos dados da FUNCEME e do INMET para o período de 2012 a 2022. Em seguida, são apresentados os resultados do estudo de aplicabilidade de modelos analíticos para estimar métricas de sujidade no local. Posteriormente, são detalhadas as métricas de avaliação utilizadas para verificar o impacto da sujidade no desempenho elétrico de LEA2, bem como a efetividade das intervenções de limpeza manual. Além disso, são discutidos os resultados referentes ao comportamento térmico dos módulos.

5.1 Aplicabilidade de modelos analíticos no local de estudo

Considerando que apenas a ST2 é submetida a limpezas manuais regulares, o estudo de aplicabilidade dos modelos analíticos para determinação de parâmetros elétricos é conduzido exclusivamente com os valores medidos e estimados dessa *string*. A análise abrange medições realizadas entre 05 de julho de 2023 e 30 de novembro de 2024. Após a aplicação dos filtros descritos no Apêndice C, são considerados válidos para a análise 23.190 pontos de cada variável.

Na Tabela 10 são representados os valores das métricas de erro utilizadas para avaliar os modelos analíticos para estimar a P_{Max} de ST2. Adicionalmente, são apresentados os valores das métricas de erro para os modelos de estimativa de I_{Max} (MI1) e V_{Max} (MV1), que correspondem, respectivamente, às Equações (25) e (26).

Tabela 10 – Métricas de avaliação dos modelos dos parâmetros elétricos de ST2.

Parâmetro	Modelo	MBE	RMSE	MAPE	MPE (%)
P_{Max}	SAPM	86,98	127,99	0,13	9,39
	FFFM	66,12	121,15	0,12	8,46
	VFFM	-9,18	97,35	0,09	1,38
	AMPPM	66,36	121,24	0,12	8,48
	ANM	106,21	142,21	0,14	11,91
I_{Max}	MI1	0,34	0,61	0,11	7,79
V_{Max}	MV1	1,87	6,57	0,02	0,84

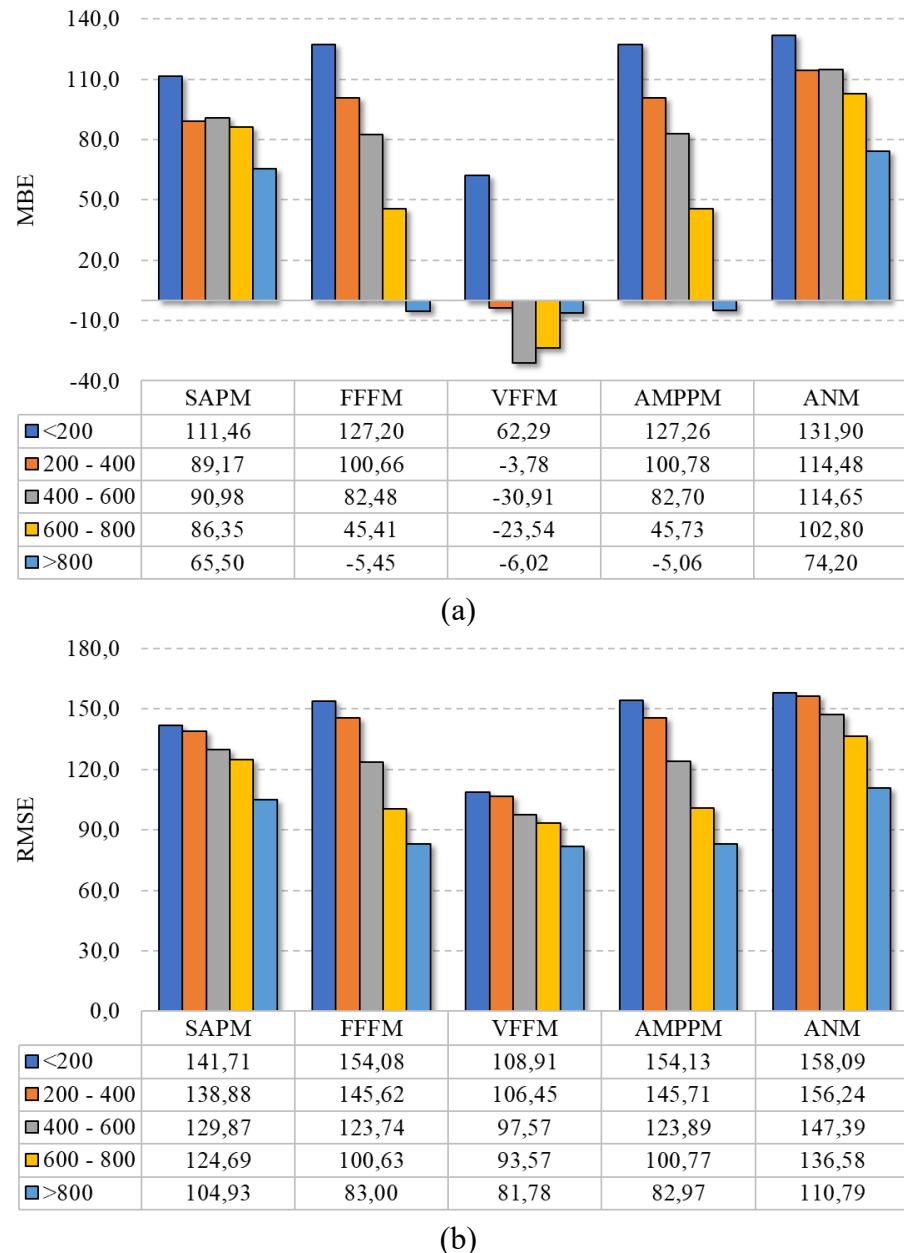
Fonte: Autor (2025).

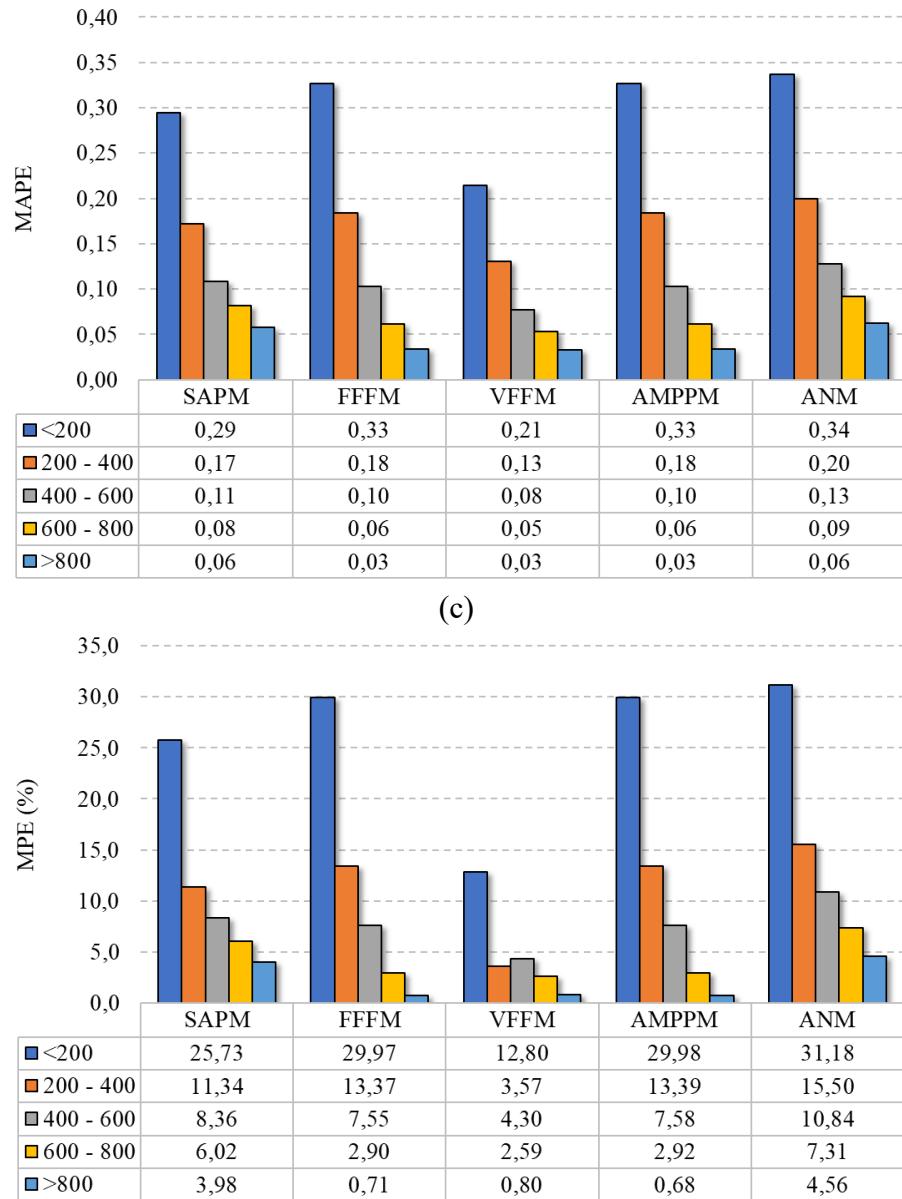
Entre todas as métricas avaliadas, o modelo VFFM apresenta os menores erros na estimativa da potência da ST2. De acordo com os critérios de avaliação do MAPE estabelecidos por Lewis (1982), os modelos SAPM, FFFM, AMPPM e ANM são classificados como de boa precisão, com valores de MAPE entre 0,10 e 0,20. Já o VFFM se destaca por sua alta acurácia, apresentando um MAPE inferior a 0,10.

Na Figura 35 é apresentado o comportamento das métricas de erro em função dos níveis

de irradiância para cada modelo de estimativa de P_{Max} . Os melhores desempenhos de estimativa ocorrem em níveis de irradiância mais elevados. De acordo com os critérios de MAPE, todos os modelos apresentam boa acurácia de previsão para irradiâncias entre 200 e 600 W/m² e alta acurácia para irradiâncias superiores a 600 W/m².

Figura 35 – Comparação das métricas de erro para diferentes níveis de irradiância: (a) MBE; (b) RMSE; (c) MAPE; (d) MPE.





Fonte: Autor (2025).

O modelo VFFM apresenta os menores valores de erro em todas as métricas avaliadas para irradiâncias de até 800 W/m². No entanto, para irradiâncias > 800 W/m², os modelos FFFM e AMPPM demonstram desempenho superior nas métricas MBE e MPE, enquanto o MAPE dos três modelos (VFFM, FFFM e AMPPM) é igual.

Para avaliar a compatibilidade dos modelos analíticos em diferentes condições de céu, são selecionados três dias representativos: (I) nublado (02/06/2024 - $k'_t = 0,30$); (II) parcialmente nublado (19/08/2023 - $k'_t = 0,33$) e (III) limpo (14/09/2023 - $k'_t = 0,63$). Na Tabela 11 são apresentadas as métricas de avaliação de erro dos modelos analíticos para essas condições.

Tabela 11 – Métricas de avaliação dos modelos analíticos para dias representativos de céu nublado, parcialmente nublado e limpo.

Condição do céu	Modelo	MBE	RMSE	MAPE	MPE (%)
Nublado (02/06/2024)	SAPM	136,54	153,99	0,19	17,04
	FFFM	137,12	157,90	0,20	17,79
	VFFM	38,09	76,27	0,09	4,78
	AMPPM	137,30	158,04	0,20	17,81
Parcialmente Nublado (19/08/2023)	ANM	159,89	175,68	0,22	20,19
	SAPM	83,76	95,28	0,12	12,02
	FFFM	99,87	104,01	0,14	13,53
	VFFM	-14,72	51,54	0,05	1,07
Limpo (14/09/2023)	AMPPM	100,05	104,14	0,14	13,55
	ANM	118,99	117,50	0,16	15,55
	SAPM	44,26	76,44	0,08	1,01
	FFFM	15,71	52,69	0,06	0,51
	VFFM	-59,13	80,02	0,10	9,57
	AMPPM	16,02	52,78	0,06	0,49
	ANM	70,56	85,81	0,09	3,38

Fonte: Autor (2025).

Para a condição de céu nublado, o melhor desempenho é observado para o modelo VFFM, que apresenta os menores valores em todas as métricas avaliadas, destacando-se no MAPE (0,09) e MPE (4,78%). Por outro lado, o modelo ANM apresenta os maiores valores de erro, evidenciando baixa precisão nessa condição. Os modelos SAPM, FFFM e AMPPM exibem comportamento semelhante entre si, porém com erros significativamente maiores em comparação ao VFFM.

Para o dia com céu parcialmente nublado, os resultados são similares aos observados para o céu nublado. O modelo VFFM novamente se destaca, com um valor negativo de MBE (-14,72), indicando uma leve subestimação, e os menores MAPE (0,05) e MPE (1,07%). Em contrapartida, o modelo ANM mantém o pior desempenho, com os maiores valores de erro, incluindo MBE (118,99), RMSE (117,50), MAPE (0,16) e MPE (15,55%).

Para a condição de céu limpo, os modelos FFFM e AMPPM apresentam comportamento semelhante, com os menores valores de MAPE (0,06). O modelo FFFM se destaca ligeiramente nas métricas MBE e RMSE, enquanto o AMPPM demonstra uma leve vantagem na métrica MPE. Por outro lado, o modelo VFFM apresenta os maiores valores de MBE (-59,13) e RMSE (80,02), indicando uma subestimação significativa.

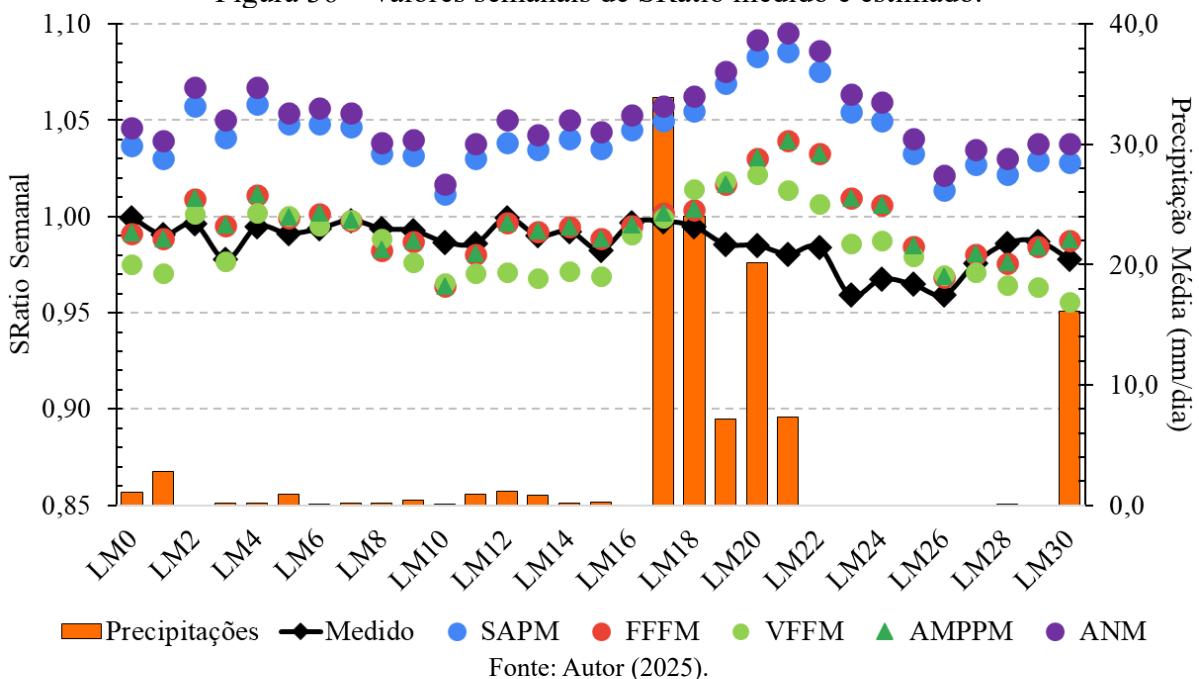
De modo geral, o VFFM é o modelo mais preciso nas condições de céu nublado e parcialmente nublado, mas seu desempenho diminui na condição de céu limpo. Já os modelos FFFM e AMPPM se destacam na condição de céu limpo, apresentando os menores erros nessa situação. O modelo ANM apresenta, consistentemente, o pior desempenho em todas as

condições analisadas. Os modelos apresentam maior consistência de desempenho em condições de céu limpo, enquanto as condições nubladas resultam em maior dispersão nas métricas de erro.

5.1.1 Estimativa da métrica de sujidade através dos modelos analíticos

Os valores de SRatio estimados por meio dos modelos analíticos e os respectivos valores de SRatio medidos a partir da potência dos módulos sujos e limpos são avaliados ao longo de um período de 18 meses (de junho de 2023 a janeiro de 2025) e estão apresentados na Figura 36. Os valores de SRatio são calculados considerando um intervalo semanal em relação à realização da limpeza manual de ST2.

Figura 36 – Valores semanais de SRatio medido e estimado.



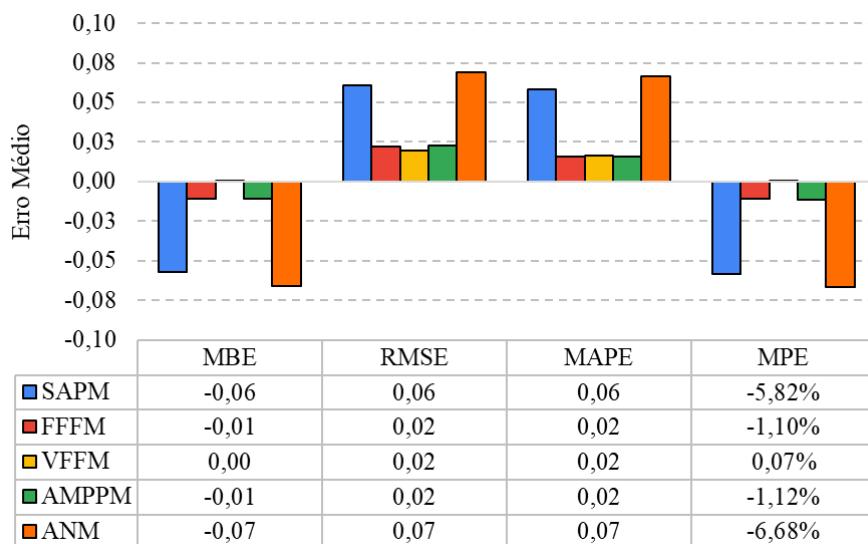
Os valores de SRatio estimados pelos modelos FFFM, VFM e AMPPM são os que mais se aproximam dos valores medidos, com resultados quase idênticos entre os modelos FFFM e AMPPM. Durante todo o período analisado, a diferença média entre os valores estimados e os medidos varia de 0,07% para o modelo VFFM até -6,68% para o modelo ANM. Para os modelos SAPM, FFFM e AMPPM, as diferenças médias são de -5,82%, -1,10% e -1,12%, respectivamente.

Além disso, nota-se que todos os métodos analisados são influenciados pela sazonalidade, especialmente no período LM17-LM24, quando ocorre uma superestimação dos valores de SRatio. Nesse intervalo, a diferença média em relação aos valores medidos varia de

-4,81% para o modelo FFFM a -9,42% para o ANM. Para os modelos SAPM, VFFM e AMPPM, as diferenças médias nesse período são de -5,55%, -5,19% e -6,55%, respectivamente.

Complementarmente, na Figura 37 são apresentadas as métricas utilizadas para avaliar a acurácia dos diferentes modelos analíticos na determinação da SRatio. Essas métricas são calculadas considerando o conjunto completo de dados, abrangendo os 18 meses de execução do estudo, o que proporciona uma visão abrangente do desempenho de cada modelo.

Figura 37 – Métricas de erro médio de SRatio estimado em relação ao medido.



Fonte: Autor (2025).

O modelo ANM apresenta o pior desempenho de previsão de SRatio, pois apresenta os maiores valores de MBE (-0,07), RMSE (0,07) e MPE (-6,68%) em comparação com os demais modelos analisados. O modelo SAPM apresenta resultados semelhantes, sendo o segundo modelo com pior desempenho geral.

De modo geral, os valores negativos de MBE para ambos os modelos (ANM e SAPM) indicam uma tendência consistente de subestimação dos valores preditos, enquanto os valores de RMSE refletem uma maior variação nos erros em relação aos outros modelos. Adicionalmente, os valores de MPE destacam essa tendência de subestimação, com os modelos SAPM (-5,85%) e ANM (-6,68%).

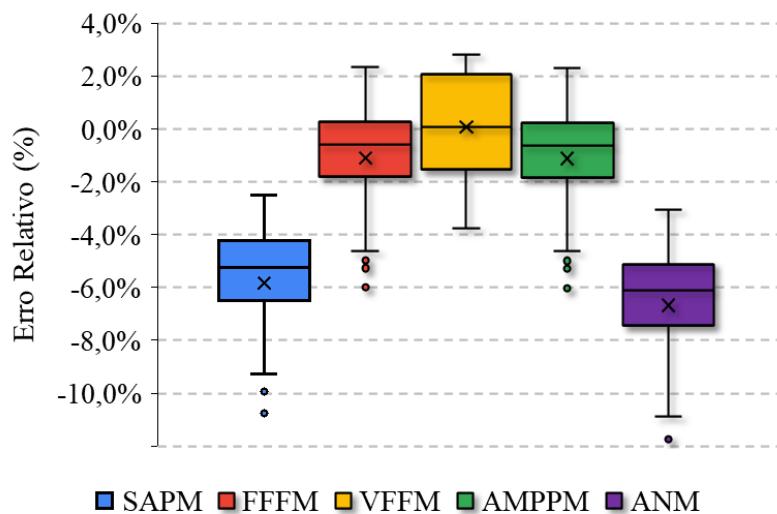
No caso dos modelos FFFM e AMPPM, observa-se que apresentam resultados idênticos nas métricas MBE, RMSE e MAPE, com valores de -0,01, 0,02 e 0,02, respectivamente. Entretanto, ao analisar a métrica MPE, o modelo FFFM apresenta um desempenho ligeiramente superior ao AMPPM, com MPE de -1,10% contra -1,12% do AMPPM. De maneira geral, ambos os modelos demonstram desempenho semelhante, com baixos valores de RMSE, MAPE e MPE, além de um leve viés negativo no MBE (-0,01), tornando-os adequados para aplicações que

exigem menor tolerância a erros absolutos.

Na análise geral, o modelo VFFM se destaca como o mais preciso e confiável, apresentando o menor MBE (0,00), indicando alta precisão sem tendência de super ou subestimação. Além disso, o RMSE (0,02) é ligeiramente inferior ao dos modelos FFFM e AMPPM, sugerindo uma menor magnitude de erros. Esse equilíbrio entre todas as métricas posiciona o VFFM como o modelo de melhor desempenho no conjunto analisado.

Na Figura 38 é apresentado o comportamento do erro relativo de SRatio estimado em relação ao medido para os diferentes modelos analíticos empregados.

Figura 38 – Comportamento do erro relativo de SRatio estimado em relação ao medido.



Fonte: Autor (2025).

O modelo ANM, conforme indicado nas análises anteriores, apresenta a maior dispersão entre os métodos avaliados. Seu erro relativo possui uma mediana de -6,11%, seguido pelo SAPM, com mediana de -5,25%. Ambos os métodos mostram desempenho consistentemente subestimado em relação ao valor esperado.

Por outro lado, os métodos FFFM e AMPPM exibem medianas de -0,60% e -0,63%, respectivamente, com menor variação em comparação ao ANM e SAPM. Apesar de ainda tenderem a subestimar os resultados, esses métodos demonstram maior precisão e menor dispersão. Por sua vez, o VFFM apresenta uma mediana de 0,09%, evidenciando baixa tendência a erros sistemáticos, ou seja, a subestimações ou superestimações. Além disso, a dispersão dos dados sugere um bom equilíbrio entre precisão e exatidão, destacando-o como o modelo mais confiável entre os analisados.

Levando em consideração que o local de estudo está localizado em uma região com pluviometria irregular e que as perdas por sujidade tendem a se intensificar durante os períodos

com menor ocorrência de eventos de limpeza natural, torna-se essencial avaliar o desempenho dos modelos considerando os diferentes períodos pluviométricos, conforme ilustrado na Figura 39. Essa análise permite compreender como as condições climáticas específicas de cada período influenciam o comportamento dos modelos.

Durante o período pré-chuvoso, os modelos apresentam valores de erro relativamente baixos, com destaque para o FFFM e o AMPPM, que registram os menores valores em todas as métricas avaliadas, indicando maior precisão em relação aos demais modelos. Em contrapartida, os modelos SAPM e ANM apresentam valores negativos mais acentuados em MPE, sugerindo uma tendência a subestimativas.

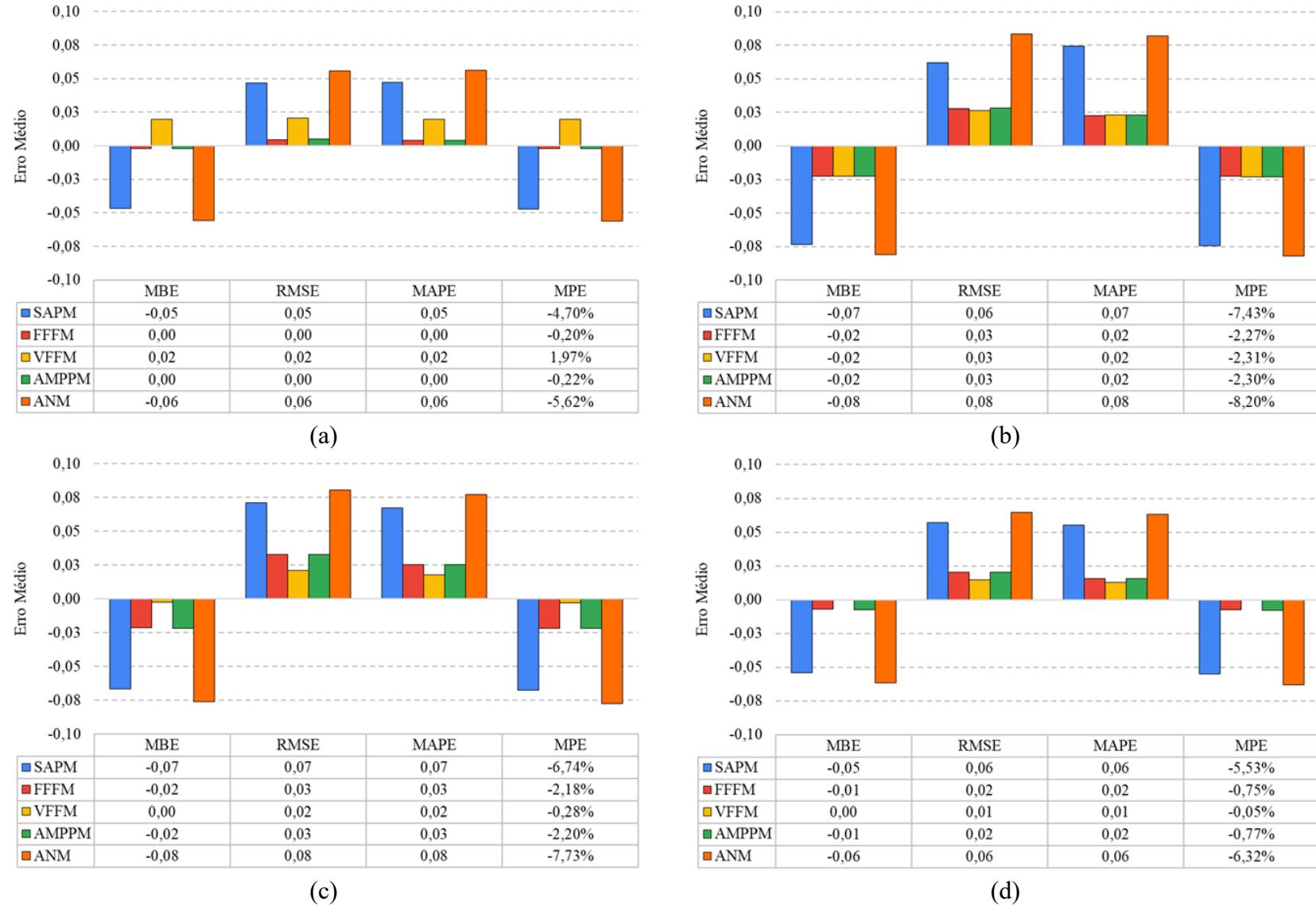
No período chuvoso, há um aumento geral nos erros de todos os modelos, com destaque negativo para o SAPM e o ANM, que continuam apresentando os maiores valores de MPE negativos (-7,43% e -8,20%, respectivamente). Em contraste, os modelos FFFM, VFFM e AMPPM exibem comportamento similar em todas as métricas e mantêm melhor desempenho relativo, com MAPE e MPE inferiores a -3%, evidenciando maior consistência.

Durante o período pós-chuvoso, os padrões de erro são semelhantes aos do período anterior, com destaque para o VFFM, que registra uma redução consistente nos valores de MBE e MPE em relação ao período chuvoso. Os modelos FFFM e AMPPM mantêm um comportamento estável, com ligeira redução no MPE e pequeno incremento no MAPE, o que demonstra resiliência em sua performance.

No período seco, observa-se que os modelos FFFM, VFFM e AMPPM apresentam uma redução nas métricas de erro, com o VFFM sobressaindo-se em relação aos demais em todas as métricas avaliadas. Por outro lado, os modelos SAPM e ANM continuam apresentando os piores desempenhos, reforçando sua menor adequação em condições de menor pluviometria.

Os modelos FFFM, VFFM e AMPPM destacam-se pela maior precisão ao longo dos diferentes períodos pluviométricos, enquanto os modelos SAPM e ANM apresentam os maiores erros, sugerindo menor adequação para estimar a métrica de sujidade (SRatio). Essa análise evidencia a influência das condições sazonais na performance dos modelos e ressalta a importância de considerar essas variações na avaliação dos efeitos da sujidade no desempenho da planta FV em diferentes regimes pluviométricos.

Figura 39 – Métricas de avaliação de erro por período pluviométrico: (a) pré-chuvoso; (b) chuvoso; (c) pós-chuvoso; (d) seco.



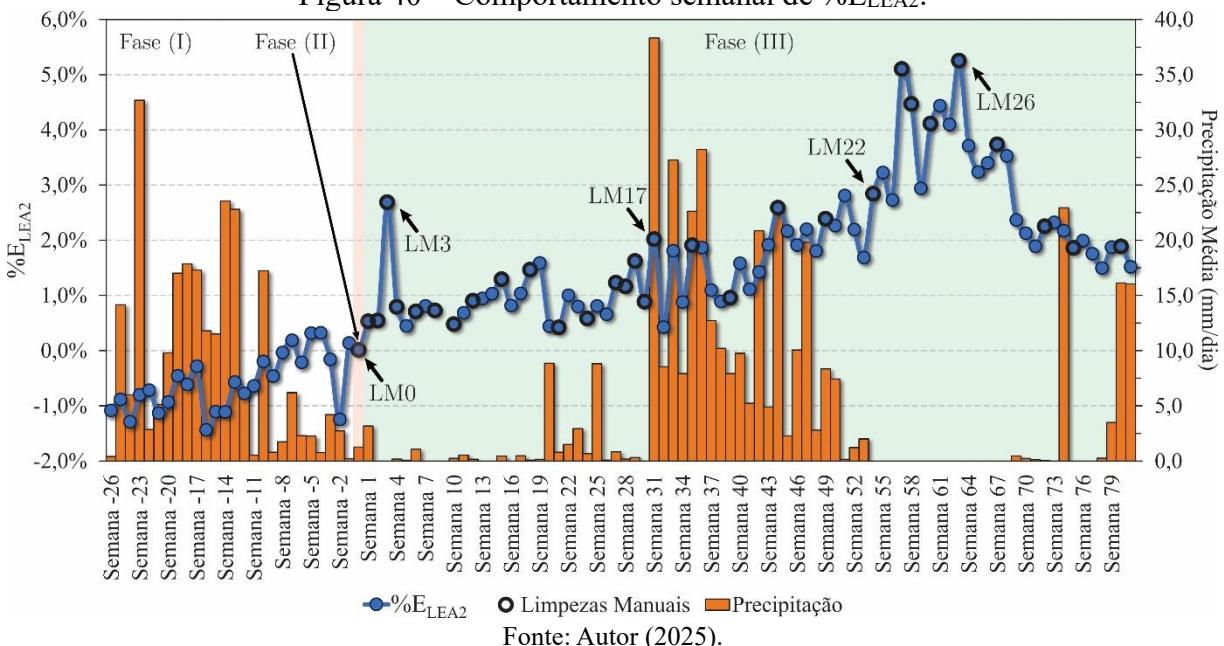
Fonte: Autor (2025).

Sumariamente, os modelos FFFM e AMPPM mostram-se mais assertivos na estimativa das perdas por sujidade durante o período pré-chuvoso. Nos períodos com menores níveis de precipitação (pós-chuvoso e seco), o modelo VFFM apresenta o melhor desempenho. Já no período chuvoso, os modelos FFFM, VFFM e AMPPM exibem desempenho semelhante, com leve vantagem para o FFFM. Nesse sentido, a análise demonstra que os modelos analíticos FFFM, VFFM e AMPPM apresentam potencial para serem utilizados de forma integrada na estimativa, em tempo real, das perdas por sujidade em plantas FV, a partir de um conjunto limitado de informações de entrada: potência, irradiação e T_m .

5.2 Efeitos das limpezas manuais no desempenho elétrico

O comportamento semanal de $\%E_{LEA2}$ é ilustrado na Figura 40. Os círculos destacados em preto indicam as limpezas manuais realizadas. Devido às interrupções nas medições ambientais e elétricas, a Semana 9 é excluída da análise. Para facilitar a correlação entre os intervalos semanais e as fases do estudo, a semana em que ambas as *strings* são limpas é denominada Semana 0 (Fase II), servindo como referência para as semanas anteriores (Fase I) e posteriores (Fase III). As semanas anteriores à limpeza são numeradas de -26 a -1, enquanto as semanas em que apenas ST2 é limpa são numeradas de 1 a 81. Adicionalmente, a área branca representa a Fase (I) (4 de janeiro de 2023 a 4 de julho de 2023), a vermelha representa a Fase (II) (5 de julho de 2023 a 11 de julho de 2023) e a verde representa a Fase (III) (12 de julho de 2023 a 28 de janeiro de 2025).

Figura 40 – Comportamento semanal de $\%E_{LEA2}$.

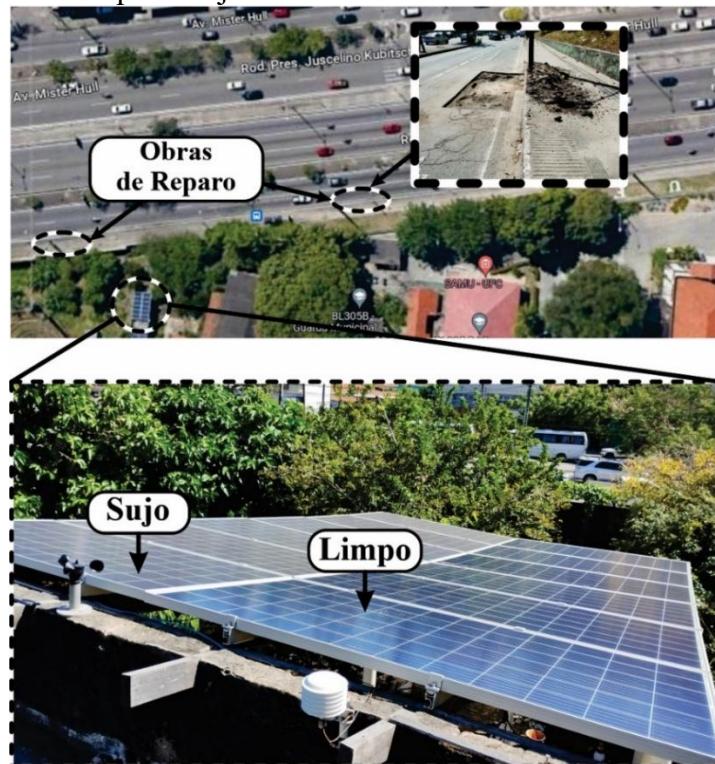


Durante a Fase (I) (Semana -26 a Semana -1), em média, a geração de energia elétrica de ST1 é 0,59% superior em relação à de ST2. No total, ST1 produz 1.357,21 kWh, enquanto ST2 gera 1.349,54 kWh, uma diferença de 7,68 kWh. As médias diárias de geração são 7,62 kWh para ST1 e 7,58 kWh para ST2.

Em 5 de julho de 2023, é realizada a limpeza de LEA2 (LM0); ambas as *strings* estão sob as mesmas condições até 11 de julho de 2023 (Fase (II) – Semana 0), resultando em %E_{LEA2} de 0,01%, que pode ser desprezado devido à baixa magnitude; ST1 e ST2 apresentam compatibilidade elétrica quando expostos às mesmas condições. A geração média diária de ST1 e ST2 na Fase (II) é de 9,38 kWh e 9,39 kWh, respectivamente.

Na Fase (III) (Semana 1 – Semana 81), a geração de ST2 (4.674,83 kWh) é 88,29 kWh superior à de ST1 (4.586,54 kWh). Na Semana 3 (26 de julho a 1 de agosto de 2023), após a LM3, %E_{LEA2} alcança 2,69%, devido a obras de reparo em uma das pistas de uma avenida próxima, que aumentam a sujidade nos módulos de ST1, conforme apresentado na Figura 41.

Figura 41 – Módulos limpos e sujos durante obras em uma avenida no entorno de LEA2.



Fonte: Autor (2025).

Examinando o comportamento diário do LEA2 antes e depois da LM3, é registrada elevação de %E_{LEA2} de 0,32% (1 dia antes do LM3 – 25 de julho de 2023) para 2,79% (1 dia depois do LM3 – 27 de julho de 2023), mesmo com uma redução de 7,75% na irradiação; o aumento de %E_{LEA2} deve-se à camada de poeira na superfície dos módulos ST1, consequência

das obras aliadas à ausência de limpeza manual e precipitações (última precipitação em 18 de julho de 2023 – 9,60 mm). Este evento destaca o impacto das atividades humanas na sujidade de módulos FV, especialmente em períodos secos. Assim, áreas com presença regular de emissões de poluentes/poeira devem ser analisadas cuidadosamente na implementação de plantas FV, uma vez que intervenções de curto prazo se mostram efetivas na redução da geração.

Na Semana 4, uma precipitação de 1,20 mm causa uma redução acentuada de %E_{LEA2}, passando de 2,69% para 0,79%. Entre as Semanas 5 e 19, período seco de 2023, %E_{LEA2} aumenta gradualmente, variando de 0,44% a 1,59%.

Nas Semanas 20 a 30, entre o fim do período seco e o pré-chuvoso de 2023, o aumento das precipitações (média de até 8,86 mm/dia) resulta em variações acentuadas de %E_{LEA2}, com mínimo de 0,44% (Semana 20) e máximo de 1,62% (Semana 29); embora as precipitações ajudem a reduzir os efeitos da sujidade, não restauram totalmente o desempenho de geração de energia elétrica dos módulos de ST1.

Entre as Semanas 31 e 55, durante o período chuvoso e pós-chuvoso de 2024, o volume máximo de precipitação chega a 38,31 mm/dia, provocando variação em %E_{LEA2}. A LM17 (Semana 31) provoca aumento em %E_{LEA2} de 0,73% para 3,56%; a última precipitação é registrada em 29 de janeiro de 2024 (2,20 mm). A maior precipitação registrada é de 215,10 mm (1 de fevereiro de 2024), o que contribui para o maior valor médio diário de precipitação na Semana 31. Apesar das precipitações, %E_{LEA2} apresenta tendência de crescimento, indicando que a limpeza natural é insuficiente para recuperar totalmente o desempenho dos módulos sujos. Os módulos de ST1 permanecem opacos (ver Figura 42), evidenciando a limitação das precipitações na remoção completa da sujidade. Além disso, conforme registrado na literatura, as perdas por sujidade são amplificadas em condições de baixa irradiação.

Durante o período seco de 2024 (Semanas 56 a 72), após a LM26, %E_{LEA2} atinge o pico de 5,25% (Semana 63). Este é o intervalo mais seco do estudo, com precipitação acumulada de 5,80 mm; a sujidade se intensifica durante os longos períodos sem precipitações, conforme observado na Figura 43. Após 15 semanas de estiagem, uma precipitação de 3,20 mm na Semana 69 reduz %E_{LEA2} de 3,53% para 2,37%.

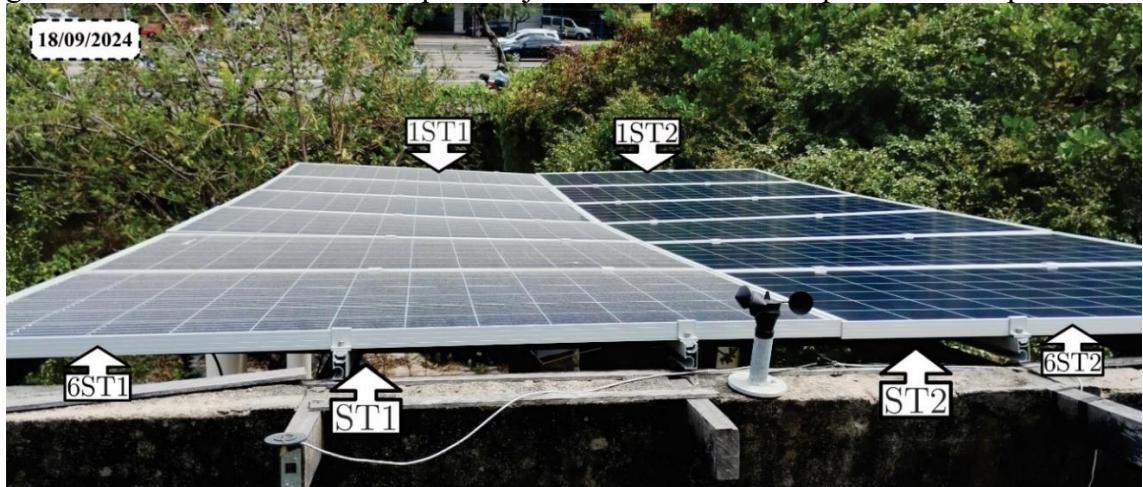
Entre as Semanas 73 e 81, %E_{LEA2} apresenta comportamento mais estável, com tendência de redução devido ao aumento das precipitações, que reduzem o acúmulo de sujidade nos módulos sujos, contribuindo para manter o desempenho elétrico de ST1 e ST2 mais equilibrado. Este comportamento reforça a importância de considerar a dinâmica das precipitações no planejamento de manutenção de plantas FV.

Figura 42 – Módulos de LEA2 após a LM22 (17/07/2024).



Fonte: Autor (2025).

Figura 43 – Vista dos módulos limpos e sujos de LEA2 durante o período seco após a LM26.

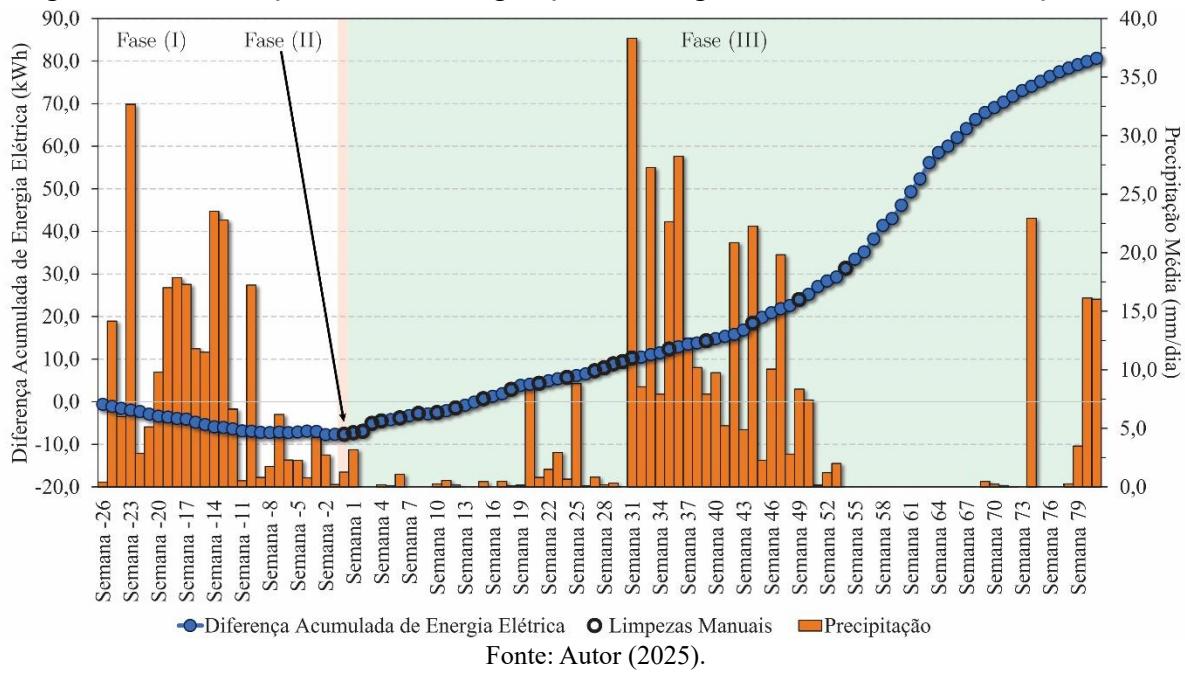


Fonte: Autor (2025).

A sujidade, por sua natureza, é um fenômeno de efeitos cumulativos, resultando em perdas de geração que tendem a se intensificar na ausência de ações de mitigação. Nesse contexto, na Figura 44 é apresentado, em termos absolutos, o comportamento acumulado da diferença na geração de ST2 em relação a ST1; valores negativos indicam que a geração de ST1 supera a de ST2, enquanto valores positivos representam o comportamento oposto.

Na Fase (I), a diferença de geração tem uma tendência negativa. Na Semana -26 a diferença acumulada é de -0,65 kWh passando para -7,68 kWh na Semana -1 (28 de junho de 2023 a 4 de julho de 2023 - antes da LM0). Na Fase (II), a diferença acumulada permanece estável (variação de 0,01 kWh). Já na Fase (III), a diferença absoluta acumulada entre ST2 e ST1 cresce positivamente; a geração de ST2 supera a de ST1 em 88,29 kWh. Considerando que a geração média diária de ST2 nesta fase é de 7,79 kWh, essa diferença equivale a 11,33 dias de operação de ST2.

Figura 44 – Diferença acumulada da geração de energia elétrica de ST2 em relação à ST1.



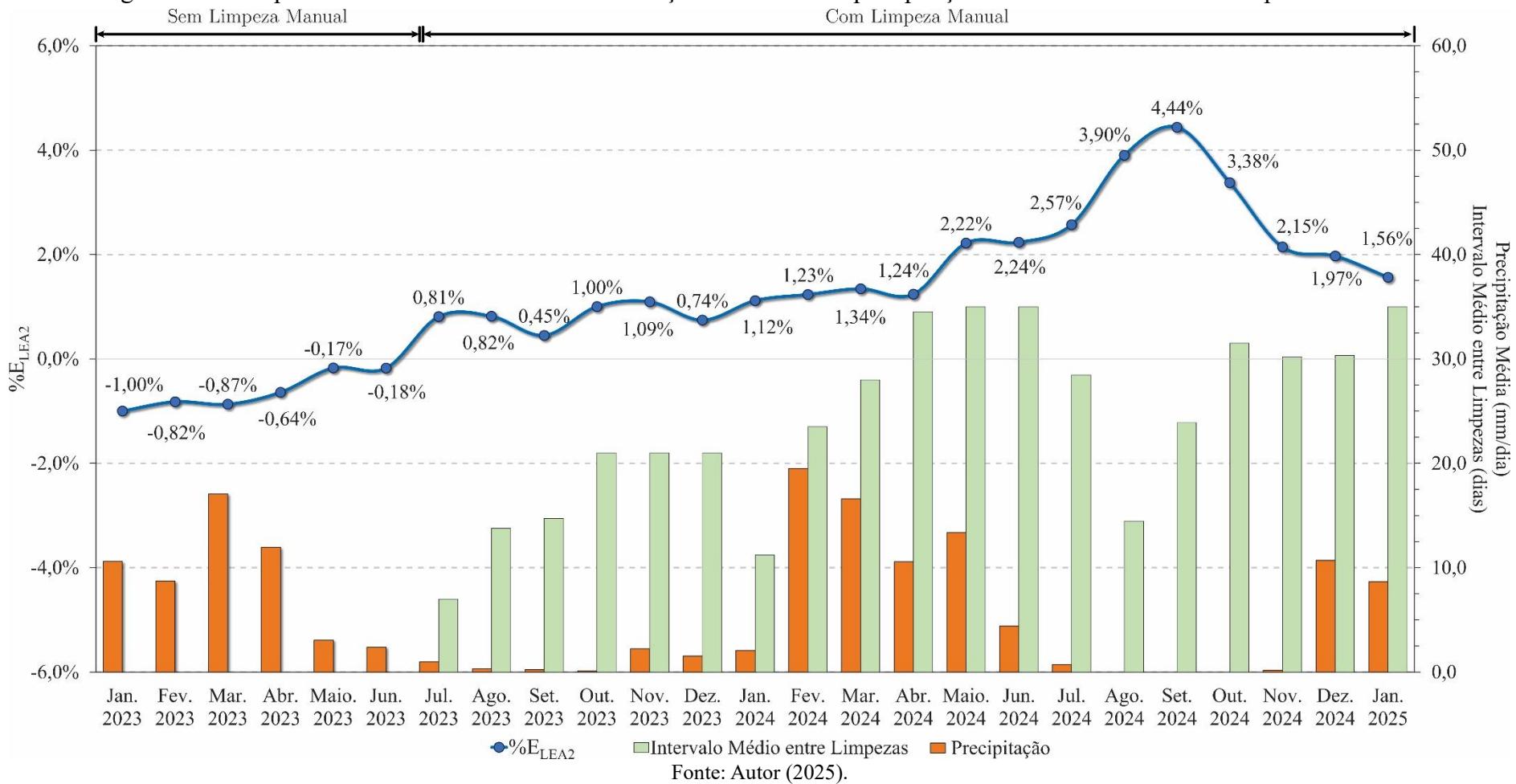
Fonte: Autor (2025).

Ao analisar o comportamento mensal de %E_{LEA2}, mostrado na Figura 45, observa-se que em janeiro de 2023, a geração de ST2 é 1% inferior à de ST1. No entanto, a partir de julho de 2023, com o início do cronograma de limpezas, a geração de ST2 passa a superar a de ST1, com o %E_{LEA2} máximo (4,44%) registrado em setembro de 2024.

A transição do período chuvoso para a pós-chuvoso, entre maio e junho de 2023, é marcada por um aumento gradual dos níveis de irradiação; as precipitações, ainda frequentes, promovem a lavagem dos módulos de ST1 e ST2, reduzindo a sujidade e permitindo que as *strings* apresentem geração em níveis similares. Além disso, destacam-se os seguintes aspectos:

- Julho a agosto de 2023: Apesar do aumento no intervalo médio entre limpezas, de 7 dias para 11,67 dias, e uma redução no volume médio diário de precipitação (1 mm/dia para 0,30 mm/dia), %E_{LEA2} permanece estável (de 0,81% para 0,82%). Isso sugere que a sujidade continua controlada devido ao curto intervalo entre as limpezas.
- Setembro de 2023: O menor valor de %E_{LEA2} (0,45%) está associado a um volume médio de precipitação de 0,24 mm/dia e um intervalo médio de 14 dias entre limpezas; a combinação de limpezas manuais regulares e precipitação, ainda que baixa, mostra-se suficiente para manter a sujidade controlada. Observação similar é registrada no intervalo de outubro a dezembro de 2023, onde o intervalo médio entre limpezas é mantido em 21 dias, e o menor valor de %E_{LEA2} (0,74%) está associado a um volume de precipitação de 1,55 mm/dia;

Figura 45 – Comportamento mensal de %E_{LEA2} em função do volume de precipitação e intervalo médio entre limpezas manuais.



- Janeiro a junho de 2024: %ELEA2 apresenta tendência ascendente, passando de 1,12% para 2,24%, mesmo com variações no intervalo médio entre limpezas de 11,20 dias a 35 dias. Fatores que contribuem para esse aumento incluem: (1) a precipitação média diária varia entre 2,08 mm/dia e 19,50 mm/dia, o que implica na redução do acúmulo de sujidade; embora ambas as *strings* sejam submetidas a este processo, devido ao aumento do tempo de exposição dos módulos ST1 sem limpeza manual, há uma tendência crescente da atuação dos mecanismos intensificadores de sujidade, dificultado a completa remoção da sujidade pelas precipitações, mantendo ST1 mais sujo que ST2; (2) são registrados excrementos de pássaros apenas nos módulos ST1, conforme Figura 46. Esses resíduos aumentam o nível de sujidade e, devido à sua disposição irregular, contribuem para o surgimento de pontos quentes;

Figura 46 – Módulos de ST1 com excrementos de pássaros.



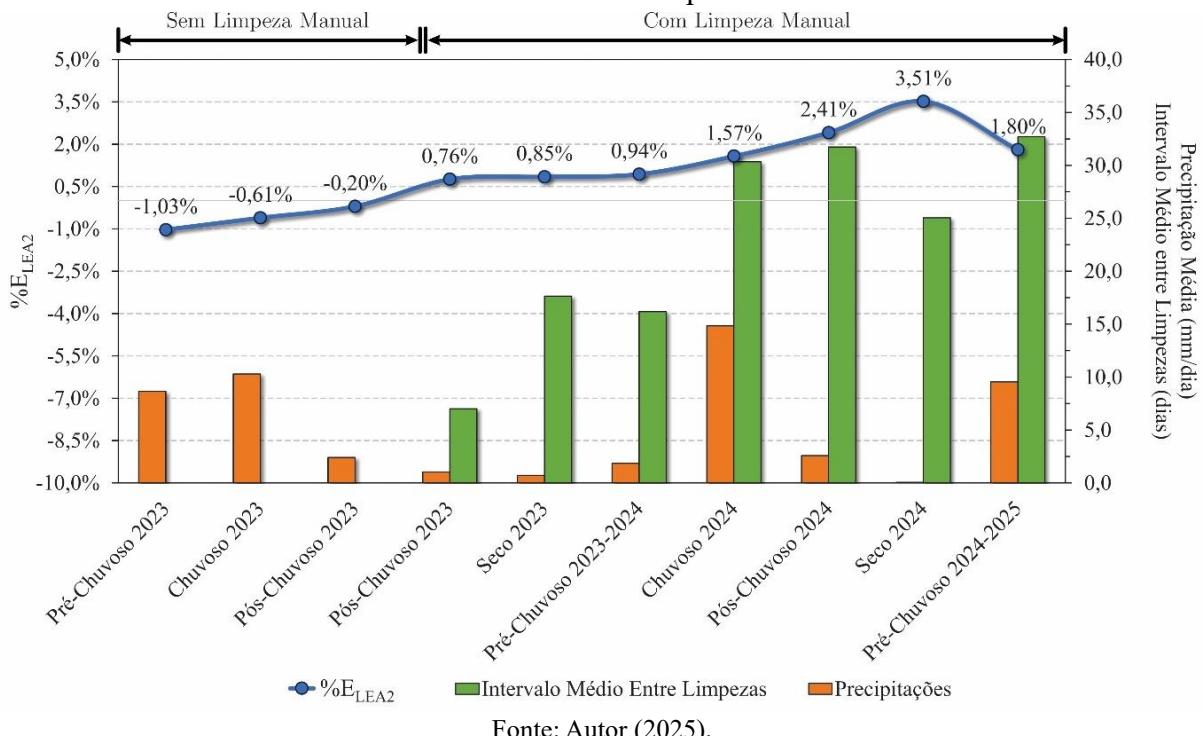
Fonte: Autor (2025).

- Julho a setembro de 2024: Observa-se uma tendência de aumento acentuado de %ELEA2, de 2,54% para 4,44%, enquanto o intervalo médio entre limpezas reduz de 28,47 para 23,90 dias. Esse período é caracterizado por ausência de precipitações, o que intensifica o acúmulo de sujidade e aumento das perdas; embora o período sem precipitações estenda-se para o mês de outubro de 2024, o aumento do intervalo médio entre limpezas para 31,50 dias (outubro de 2024) contribui para a redução do desempenho de ST2, aproximando-o ao de ST1. Esse comportamento reflete o impacto da sujidade nos módulos, agravado pela ausência de limpezas naturais;

- Outubro de 2024 a janeiro de 2025: Há uma tendência geral de redução de %E_{LEA2}, enquanto o intervalo médio entre limpezas se mantém relativamente estável (variando entre 30,17 dias e 35 dias). Durante esse período, registros de precipitações, incluindo um pico de 111,30 mm em 05 de dezembro de 2024, contribuíram para a limpeza natural dos módulos e redução das perdas por sujidade.

%E_{LEA2} está representado na Figura 47 em função dos valores médios de precipitação diária e do intervalo entre limpezas e os períodos pluviométricos do local do estudo.

Figura 47 – Comportamento de %E_{LEA2} em função dos valores médios de precipitação e dos intervalos entre limpezas.



Fonte: Autor (2025).

Entre os períodos pós-chuvoso e pré-chuvoso de 2023, a variação do intervalo entre limpezas entre 7 dias e 17,64 dias mantém %E_{LEA2} em torno de 0,85%. Em média, cada limpeza proporciona um aumento de 0,58, 1,18 e 1,17 kWh na geração de ST2 em relação à de ST1 nos períodos pós-chuvoso, seco e pré-chuvoso de 2023, respectivamente.

Em 2024, o período médio entre limpeza varia entre 25,05 dias (período seco) e 32,70 dias (período pré-chuvoso), enquanto %E_{LEA2} varia entre 1,57% (período chuvoso) e 3,51% (período seco). Nesse contexto, o maior valor de %E_{LEA2} é registrado no período seco, quando o menor volume médio diário de precipitação (0,05 mm/dia) e o maior intervalo entre limpezas resultam no acúmulo acentuado de sujidade nos módulos. Em contrapartida, o menor valor de %E_{LEA2} (1,57%) ocorre no período chuvoso, quando o maior volume médio diário de

precipitação (14,84 mm/dia) e intervalo médio entre limpezas de 30,33 dias favorecem a limpeza natural dos módulos, minimizando as perdas por sujidade. Esses resultados reforçam a importância da precipitação como fator determinante na redução das perdas por sujidade, evidenciando que períodos com maior pluviometria proporcionam uma limpeza natural mais eficaz, reduzindo a necessidade de intervenções manuais.

Por outro lado, durante períodos prolongados sem precipitação, como observado no período seco de 2024, a ausência de limpezas naturais acentua os efeitos da sujidade, tornando necessário reduzir o intervalo entre limpezas manuais para mitigar as perdas na geração de energia elétrica e evitar impactos significativos na geração de plantas FV. Complementarmente, na Tabela 12 é apresentada uma comparação das métricas Yield, FC e PR para os diferentes regimes de pluviométricos com e sem limpeza manual.

Ao comparar o período pré-chuvoso de 2023 (sem LM) com o de 2023-2024 (com LM), todas as métricas de ambas as *strings* apresentaram ganhos positivos. Contudo, ao comparar os períodos pré-chuvoso de 2023-2024 (com LM) e 2024-2025 (com LM), verifica-se uma tendência de decréscimo nas métricas. Esse comportamento está associado a dois fatores principais: o aumento no intervalo médio entre limpezas, de 16,18 dias para 32,70 dias, que potencializa a deposição de sujidade, e o incremento no volume médio de precipitações, de 1,85 mm/dia para 9,74 mm/dia, que, embora contribua para a lavagem dos módulos, não é suficiente para completa remoção da sujidade.

Nos períodos chuvosos, os ganhos mostram que, embora as precipitações atuem como um agente natural de mitigação, não são capazes de restaurar completamente o desempenho dos módulos sujos. Isso é evidenciado pela redução de -0,25% no valor de Yield_{ST1} e -0,22% FC_{ST1}. Em contrapartida, os módulos limpos apresentaram um comportamento oposto, registrando ganhos de 1,71% em Yield_{ST2} e 1,76% FC_{ST1}, mostrando um comportamento superior à ST1. Os valores de PR reforçam essa tendência: os módulos sujos apresentaram um ganho de 3,19% em PR_{ST1} e 5,21% em PR_{ST2}, com o incremento de ST2 sendo cerca de 63,33% superior ao de ST1; a combinação de limpeza manual e precipitações regulares potencializa o desempenho dos módulos de ST2.

Ao comparar o período pós-chuvoso de 2023 (sem LM) com o mesmo período de 2023 (com LM), as métricas Yield e FC apresentaram ganhos de 15,02% para ST1 e 15,87% para ST2, sendo o ganho de ST1 cerca de 5,35% inferior ao de ST2. Para a métrica PR, o ganho de ST2 (3,23%) é 48,85% superior ao de ST1 (2,17%). Por outro lado, ao comparar os períodos pós-chuvoso de 2023 e 2024, ambos com LM, registra-se uma redução nos ganhos das métricas

Yield e FC para ambas as *strings*, sendo essa redução menos acentuada para ST2. A PR_{ST2} novamente se destaca, com um aumento de 10,58%, 7,96% superior ao de ST1 (9,80%), reforçando que ST2 é beneficiada pelas limpezas regulares, mesmo com o aumento do intervalo médio entre as intervenções manuais.

Tabela 12 – Métricas de desempenho para diferentes regimes de pluviométricos; os valores dos períodos com LM são usados como referência para calcular o ganho (%).

Regime Pluviométrico	Yield_{ST1} (kWh/kWp)	Yield_{ST2} (kWh/kWp)	FC_{ST2} (%)	FC_{ST2} (%)	PR_{ST1}	PR_{ST2}
Pré-Chuvoso 2023 (sem LM)	4,07	4,03	17,95	17,78	0,84	0,83
Pré-Chuvoso 2023-2024 (com LM)	4,22	4,26	18,69	18,86	0,97	0,98
Pré-Chuvoso 2024-2025 (com LM)	4,10	4,17	18,16	18,45	0,96	0,98
Ganho (%) (sem-com LM)	3,55	5,40	3,96	5,73	13,40	15,31
Ganho (%) (com LM)⁵	-2,93	-2,16	-2,92	-2,22	-1,04	0,00
Chuvoso 2023 (sem LM)	4,05	4,03	17,92	17,82	0,91	0,91
Chuvoso 2024 (com LM)	4,04	4,10	17,88	18,14	0,94	0,96
Ganho (%) (sem-com LM)	-0,25	1,71	-0,22	1,76	3,19	5,21
Pós-Chuvoso 2023 (sem LM)	4,13	4,12	18,27	18,23	0,90	0,90
Pós-Chuvoso 2023 (com LM)	4,86	4,90	21,51	21,67	0,92	0,93
Pós-Chuvoso 2024 (com LM)	4,51	4,62	19,95	20,43	1,02	1,04
Ganho (%) (sem-com LM)	15,02	15,92	15,06	15,87	2,17	3,23
Ganho (%) (com LM)⁶	-7,76	-6,06	-7,82	-6,07	9,80	10,58
Seco 2023 (com LM)	4,79	4,83	21,20	21,38	0,92	0,92
Seco 2024 (com LM)	4,78	4,95	21,15	21,92	0,89	0,92
Ganho (%) (com LM)⁷	-0,21	2,42	-0,24	2,46	-3,37	0,00

Fonte: Autor (2025).

⁵ Pré-Chuvoso 2024-2025 (com LM) tomado como referência para o cálculo do ganho (%).

⁶ Pós-Chuvoso 2024 (com LM) tomado como referência para o cálculo do ganho (%).

⁷ Seco 2024 (com LM) tomado como referência para o cálculo do ganho (%).

No período seco, todas as métricas de ST1 apresentaram redução, com destaque para a redução de 3,37% em PR_{ST1} ao comparar os períodos secos de 2024 e 2023. Essa redução está associada ao longo período sem precipitações registrado no período seco de 2024 (116 dias de estiagem – última precipitação em 17 de julho de 2024: 7,40 mm); o incremento no intervalo médio entre limpezas, de 17,64 dias para 25,05 dias, também contribui para a redução do desempenho. Em contrapartida, os módulos limpos apresentaram ganhos de 2,42% em Yield_{ST2} e 2,46% em FC_{ST2}, evidenciando a eficácia das limpezas regulares na mitigação dos efeitos da sujidade, mesmo com o aumento do intervalo médio entre as limpezas; PR_{ST2} mantém-se estável.

Embora a comparação dos resultados apresentados com a literatura seja limitada pelas diferenças nas condições climáticas locais, fontes específicas de sujidade, métodos e intervalos de limpeza, tecnologia FV utilizada e particularidades das instalações analisadas, no Quadro 5 é apresentada uma comparação com base nas principais observações e descobertas.

Quadro 5 – Comparaçao do presente estudo com a literatura.

Referência	Localização	Principais Resultados
Costa, Kazmerski e Diniz (2021)	Minas Gerais (Brasil)	<ul style="list-style-type: none"> A interação entre precipitação e sujidade, durante curtos períodos chuvosos no verão, pode resultar em incrustamento e não uniformidade da sujidade, exigindo limpeza adicional; Durante a estação chuvosa, a limpeza, geralmente, é desnecessária, exceto se a sujidade for não uniforme.
Chbihi <i>et al.</i> (2021)	Boujdour e Midelt (Marrocos)	<ul style="list-style-type: none"> A frequênci da limpeza deve ser ajustada com base nos dados climáticos; As perdas por sujidade são mais pronunciadas durante a estação quente.
Sánchez-Barroso <i>et al.</i> (2021)	Extremadura (Espanha)	<ul style="list-style-type: none"> A limpeza regular melhora a geração e reduz a ocorrência de pontos quentes; Condições específicas de intensidade e duração das chuvas devem ser combinadas para reduzir os efeitos da sujidade.
Este estudo	Fortaleza (Brasil)	<ul style="list-style-type: none"> Os intervalos de limpeza devem ser ajustados com base nos padrões sazonais de chuva; Chuvas intensas reduzem, mas não eliminam a necessidade de limpezas manuais;

		<ul style="list-style-type: none"> • Em áreas com baixa precipitação e alta exposição à sujidade, intervalos regulares de limpeza são cruciais para minimizar as perdas de geração; • Atividades humanas de curto prazo impactam o desempenho de plantas FV, especialmente durante períodos de seca.
--	--	--

Fonte: Autor (2025).

5.3 Efeitos das limpezas manuais no comportamento térmico

Os valores médios de T_m nos módulos 1ST1 (sujo) e 1ST2 (limpo) são 55,23 °C e 55,34 °C, e desvios padrão de 6,29 °C e 6,32 °C, respectivamente. Nos módulos 6ST1 (sujo) e 6ST2 (limpo), os valores médios são 53,91 °C e 54,68 °C, e desvios padrão de 6,10 °C e 6,06 °C, respectivamente. Esses resultados indicam que os módulos limpos tendem a apresentar temperaturas médias ligeiramente mais elevadas do que os sujos. Esse comportamento pode ser atribuído às limpezas periódicas, que aumentam a absorção de irradiância solar nos módulos limpos, resultando em maior conversão em potência e calor. Em contrapartida, a sujidade atua como barreira, reduzindo a absorção de fótons e, consequentemente, diminuindo os valores de T_m dos módulos sujos.

Em relação aos desvios padrão, observa-se que os valores são relativamente elevados (~6 °C), refletindo a variabilidade climática ao longo do período experimental (18 meses). A similaridade dos desvios padrão entre módulos limpos e sujos sugere que, embora a limpeza afete a média da T_m , não impacta de forma significativa a dispersão dos dados; as oscilações climáticas sazonais são os principais determinantes da variabilidade térmica ao longo do período observado.

O resultado do Teste t para verificar se há diferença estatística entre as médias da temperatura dos módulos limpos e sujos é apresentado na Tabela 13. Ressalta-se que a partir do Teste F, previamente realizado, os módulos 1ST1 e 1ST2 possuem variâncias equivalentes, enquanto para os módulos 6ST1 e 6ST2 as variâncias são significativamente diferentes.

A análise estatística de 1ST1 e 1ST2 revela que existe diferença estatisticamente significativa entre as médias de T_m dos módulos limpos e sujos ($t = -3,97$, $p\text{-valor} = 4,49 \times 10^{-5}$), indicando que a limpeza manual influencia na temperatura média dos módulos. O mesmo comportamento é observado para os módulos 6ST1 e 6ST2, com o $p\text{-valor}$ próximo de zero ($9,39 \times 10^{-167}$), o que também confirma a diferença significativa entre as médias das T_m dos módulos limpos e sujos. Em ambos os casos, o valor absoluto de t estatístico, superior ao valor

de t crítico, e os p-valores baixos confirmam a rejeição da hipótese nula com alta confiança, ou seja, a temperatura média dos módulos limpos e sujos são estatisticamente diferentes. Além disso, por se tratar de uma análise uni-caudal (utilizada para testar uma hipótese alternativa em uma direção específica) e devido ao valor negativo de t estatístico, pode-se concluir que a T_m de ST2 (limpos) é maior do que a dos módulos de ST1 (sujos).

Tabela 13 – Resultado do Teste t para verificar significância estatística da T_m média entre os módulos limpos e sujos.

Parâmetro	1ST1	1ST2	6ST1	6ST2
Média	55,23	55,34	53,91	54,68
Variância	39,59	39,97	37,27	36,76
Variância agrupada	39,78		-	
gl (graus de liberdade)	190.316		190.307	
t estatístico	-3,97		-27,55	
p-valor (uni-caudal)	$4,49 \cdot 10^{-5}$		$9,39 \cdot 10^{-167}$	
t crítico (uni-caudal)	1,64		1,64	

Fonte: Autor (2025).

Embora a análise estatística tenha identificado uma diferença estatisticamente significativa nas temperaturas médias dos módulos limpos e sujos, essa diferença, em relação aos valores médios, está na ordem de 0,11 °C nos módulos inferiores e 0,77 °C nos superiores; na prática, essa variação não representa um impacto substancial na operação dos módulos FV, ou seja, não resulta em mudanças significativas na eficiência de conversão dos módulos.

Além disso, ainda que a sujidade tenha apresentado um impacto na conversão de energia, conforme apresentado anteriormente, essa influência não é necessariamente refletida em uma diferença de temperatura substancial, especialmente considerando a predominância da homogeneidade da deposição da sujidade dos módulos durante a campanha experimental e das limpezas naturais ocasionadas pelas precipitações; há relatos na literatura que fatores como a composição das partículas e a espessura/massa da camada de sujidade também influenciam no comportamento térmico dos módulos sujos.

Para avaliar a relação entre o número de dias sem limpeza manual e a T_m média, calculase o coeficiente de correlação. Nos módulos 1ST1 e 1ST2, obtém-se coeficientes de -0,02 e -0,07, respectivamente, enquanto nos módulos 6ST1 e 6ST2 é de -0,03 e -0,06, respectivamente. Esses coeficientes negativos sugerem que, à medida que o número de dias sem limpeza manual aumenta, a T_m média tende a diminuir. A uniformidade na composição das partículas de sujidade ao longo do período analisado, associada à ocorrência de condições meteorológicas como ventos de baixa intensidade e precipitações leves, podem ter contribuído, ao menos parcialmente, para os baixos coeficientes de correlação observados. Contudo, investigações

complementares são necessárias para a validação desta hipótese.

Adicionalmente, a análise de regressão linear simples mostra que, para os módulos sujos, cada dia adicional sem limpeza manual resulta em uma redução de T_m de 0,0006 °C (1ST1) e 0,0012 °C (6ST1), com coeficientes de determinação (R^2) de 0,0003 e 0,0012, respectivamente. Para os módulos limpos, cada dia adicional sem limpeza está associado a uma redução de T_m de 0,0502 °C (1ST2) e 0,0420 °C (6ST2), com R^2 de 0,0047 e 0,0036, respectivamente; esses baixos valores de R^2 , embora estatisticamente significativas (p -valor < 0,05), indicam que o número de dias sem limpeza explica uma fração mínima da variabilidade observada em T_m ; em outras palavras, ocorrem mudanças mensuráveis, embora de baixa magnitude, na T_m em razão do aumento do número de dias sem limpeza manual.

A fim de compreender melhor o comportamento térmico em diferentes pontos de medição, na Tabela 14 são exibidos os valores médios de T_m registrados no centro e nas bordas dos módulos sujos e limpos. A variação percentual (Δ), considerando os módulos limpos como referência, também é apresentada.

Tabela 14 – Temperatura média no centro e nas bordas dos módulos sujos e limpos.

ST1	T_m (°C)	ST2	T_m (°C)	Δ (%)
1ST1 _S	55,27	1ST2 _S	55,45	0,33%
1ST1 _C	55,99	1ST2 _C	55,83	-0,29%
1ST1 _I	54,42	1ST2 _I	54,73	0,57%
6ST1 _S	52,76	6ST2 _S	53,70	1,78%
6ST1 _C	55,68	6ST2 _C	55,78	0,18%
6ST1 _I	53,28	6ST2 _I	54,54	2,37%

Fonte: Autor (2025).

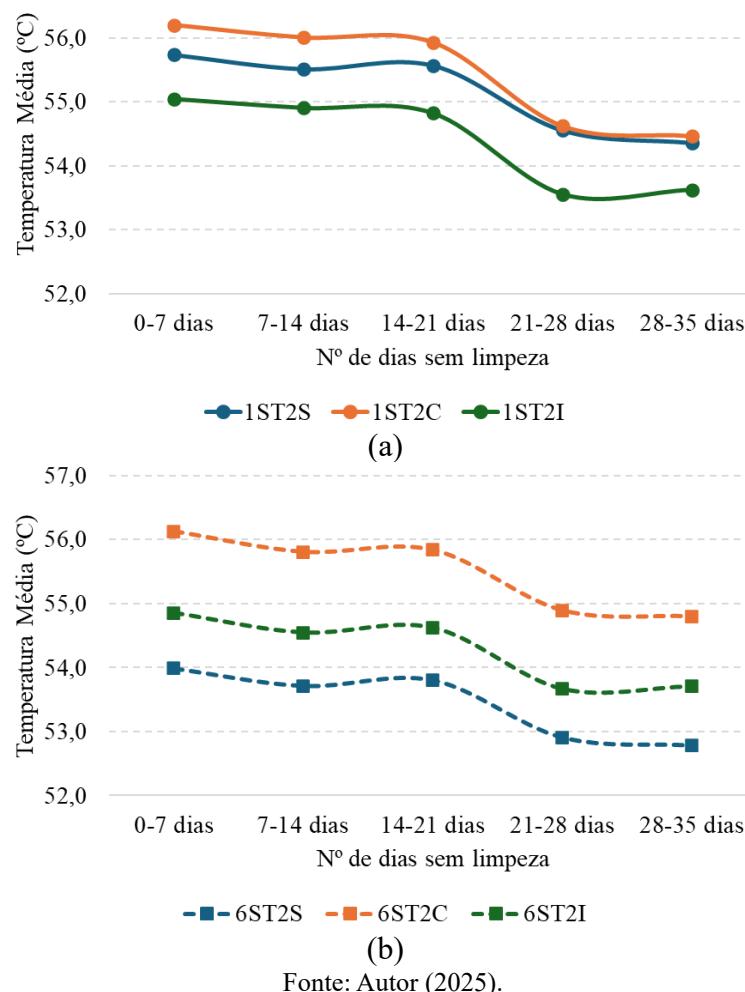
De modo geral, tanto nos módulos sujos quanto nos limpos, a T_m no centro é consistentemente maior do que nas bordas. Essa distribuição térmica é esperada, pois as bordas tendem a dissipar mais calor para o ambiente, enquanto o centro retém mais energia térmica. Ademais, a proximidade dos valores médios de T_m entre módulos limpos e sujos reforça que o impacto da sujidade sobre a temperatura global é limitado, embora possa influenciar localmente os gradientes térmicos.

Ao comparar 1ST1 e 1ST2, a diferença de temperatura entre as bordas superior e inferior do módulo sujo (0,85 °C) é ligeiramente maior do que a do limpo (0,72 °C), sugerindo uma possível relação entre o acúmulo de sujidade e a variação térmica nas superfícies do módulo. Em contraste, 6ST1 (-0,52 °C) e 6ST2 (-0,84 °C) exibem comportamento oposto, em função de sua posição na planta FV e devido à influência térmica de um módulo adjacente com maior massa térmica. Essa proximidade pode dominar os efeitos da sujidade, evidenciando a

importância de considerar as condições de instalação e a interação entre módulos. Para confirmar essa hipótese, recomenda-se a realização de testes adicionais em módulos isolados, sem a influência térmica de módulos adjacentes.

Para demonstrar o efeito do aumento do número de dias sem limpeza manual, analisam-se dados coletados apenas dos módulos limpos em intervalos de limpeza distintos. Na Figura 48 (a) e (b), são apresentados os valores médios de T_m dos módulos limpos em função de diferentes intervalos de dias sem limpeza manual.

Figura 48 – T_m média em função dos dias sem limpeza: (a) 1ST2 e (b) 6ST2.

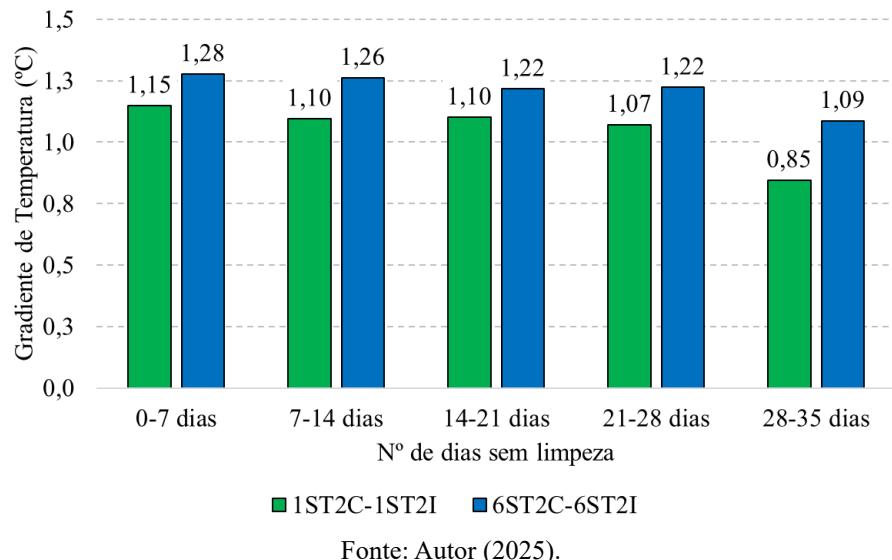


Fonte: Autor (2025).

Constata-se que à medida que o intervalo sem limpeza manual aumenta, a T_m tende a diminuir e o gradiente de temperatura entre o centro e as bordas reduz; a T_m média das bordas se aproxima do centro. Em 1ST2, por exemplo, quando o intervalo sem limpeza varia entre 0-7 dias, a diferença de T_m entre o centro e a borda inferior é de 1,15 °C; ao passar para 28-35 dias, essa diferença cai para 0,85 °C (Figura 49). O mesmo ocorre em 6ST2: a diferença entre o centro e a borda inferior varia de 1,28 °C para 1,09 °C no mesmo período (Figura 49). Assim,

com o aumento do intervalo sem limpeza, a sujidade tende a se depositar de forma mais uniforme na superfície do módulo, diminuindo o gradiente de T_m entre o centro e a borda inferior.

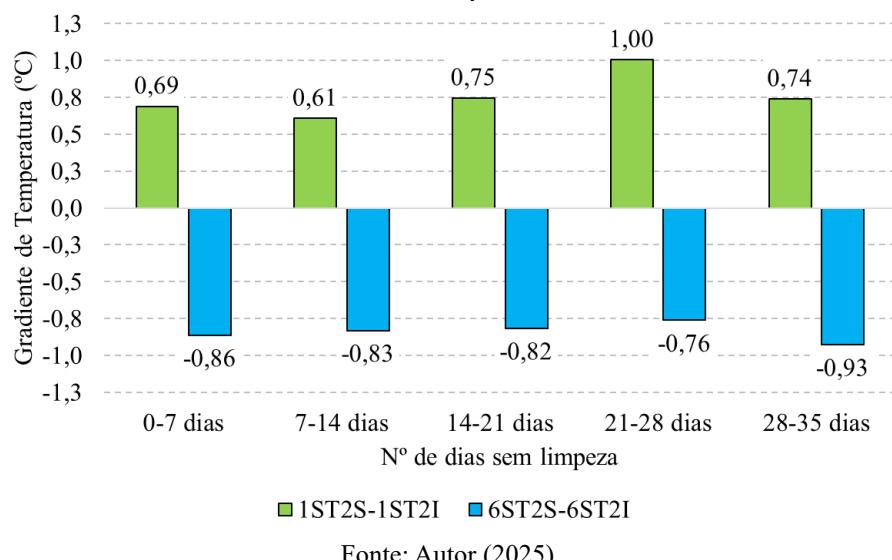
Figura 49 – Gradiente de temperatura entre o centro e a borda inferior em função dos dias sem limpeza manual.



Fonte: Autor (2025).

O comportamento do gradiente de temperatura das bordas inferior e superior de 1ST2 e 6ST2 à medida que o intervalo sem limpeza aumenta é mostrado na Figura 50.

Figura 50 – Gradiente de temperatura entre as bordas superior e inferior em função dos dias sem limpeza.

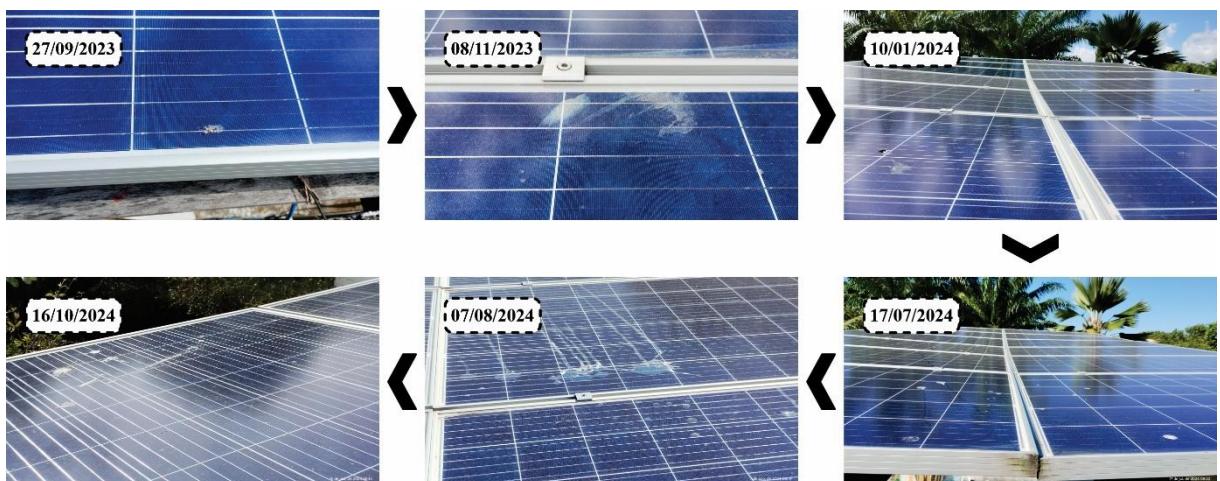


Fonte: Autor (2025).

Para 1ST2, quando o intervalo sem limpeza varia entre 0-7 dias, a temperatura da borda superior atinge temperatura cerca de 0,69°C maior do que a borda inferior. Entre 7-14 dias, com acúmulo de sujidade, esse gradiente reduz ligeiramente para 0,61 °C. No intervalo 14-21 dias,

a diferença de T_m entre as bordas superior e inferior aumenta novamente ($0,75\text{ }^{\circ}\text{C}$), indicando que a borda inferior tende a acumular mais sujidade, reduzindo sua temperatura em comparação à borda superior; esse efeito se intensifica no intervalo de 21 a 28 dias, atingindo um gradiente de $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, mas diminui para $0,74\text{ }^{\circ}\text{C}$ entre 28 e 35 dias. Esse comportamento não linear sugere fases distintas na deposição da sujidade, influenciadas, por exemplo, por variações na taxa de deposição de sujidade nos diferentes períodos pluviométricos e influência de sujidade não uniforme, como a presença de excrementos nos módulos, como observado na Figura 51.

Figura 51 – Módulos 1ST2 e 6ST2 com excrementos de pássaros durante o experimento.



Fonte: Autor (2025).

No caso de 6ST2, o padrão é inverso, com a borda superior apresentando T_m menor em comparação à borda inferior, com variações entre $-0,76\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $-0,93\text{ }^{\circ}\text{C}$. Observa-se ainda uma tendência de redução desse gradiente à medida que aumenta o intervalo sem limpeza. Este processo pode ser explicado pela proximidade de um módulo adjacente e pela maior dissipação de calor na borda superior, em função da ação do vento, pois a posição desse módulo na planta FV favorece o seu resfriamento (módulo mais elevado).

Em síntese, embora a sujidade se distribua progressivamente ao longo das superfícies dos módulos, causando mudanças mensuráveis na T_m e nos gradientes térmicos, seu impacto absoluto sobre a temperatura média é limitado; fatores como a composição e espessura da camada de sujidade, a influência ambiental (vento, irradiação, precipitação e umidade relativa do ar) e a interação térmica entre módulos desempenham papéis significativos na determinação do seu comportamento térmico.

Os resultados obtidos, em conjunto com contribuições existentes na literatura especializada, indicam que estudos prolongados sobre sujidade, conduzidos inteiramente em condições externas, apresentam variações consideráveis quanto ao comportamento térmico dos

módulos. Lasfar *et al.* (2021), por exemplo, registam que apesar da redução de 21,57% na potência de saída dos módulos sujos, não é registrada diferença significativa na T_m entre módulos limpos e sujos. Já Njok, Akonjom e Ogbulezie (2022) demonstram que módulos equipados com mecanismos de limpeza automática apresentam uma T_m 5,30°C menor em comparação com módulos sem limpeza. De forma similar, Rahman *et al.* (2022) relatam que módulos sujos apresentam consistentemente temperaturas mais elevadas quando comparados aos módulos limpos. No entanto, Kamal, Abdel-Salam e Nayel (2023) mostram um resultado contrastante: após três meses de acúmulo de sujidade, a T_m de um módulo limpo é 10°C maior do que a de um sujo, destacando a complexidade da relação entre sujidade e temperatura operacional. Essa discrepância pode ser atribuída a fatores como propriedades ópticas da sujidade, mudanças na emissividade térmica da superfície e variações nas condições ambientais específicas de cada experimento.

Além disso, a variação térmica não ocorre de maneira homogênea ao longo da superfície dos módulos. Ehsan *et al.* (2022), reportam que a diferença média de temperatura entre as superfícies superior e inferior é de -1,41°C, -2,52°C e -0,45°C para módulos com revestimentos A, B e C, respectivamente, enquanto para módulos não revestidos, as diferenças são de 1,68°C, 0,33°C e 0,01°C. No entanto, a maioria dos estudos se concentra apenas na medição da T_m na área central dos módulos, sendo Ehsan *et al.* (2022), um dos poucos a monitorar tanto o centro quanto as bordas, ainda que por um período limitado (10 dias). Essa lacuna, aliada ao envelhecimento dos revestimentos e a sua eficácia dependente das propriedades físico-químicas da sujidade, reforça a relevância da presente tese. Em particular, os resultados reportados contribuem para um melhor entendimento dos efeitos da sujidade na temperatura dos módulos FV, especialmente em ambientes urbanos, onde o efeito de resfriamento devido ao vento pode ser reduzido pela presença de obstáculos ao redor das usinas FV.

6 CONCLUSÕES

A crescente expansão do uso da geração FV tem impulsionado a busca por soluções que otimizem o desempenho dos sistemas FV. Nesse contexto, os impactos da sujidade sobre a geração de energia elétrica e a temperatura dos módulos FV, bem como estratégias de mitigação, têm ganhado destaque na literatura.

No tocante ao desempenho dos modelos analíticos, VFFM apresenta os menores erros para irradiâncias de até 800 W/m², destacando-se pela alta precisão em condições de céu nublado e parcialmente nublado. Para irradiâncias superiores, e sob condição de céu limpo, os modelos FFFM e AMPPM demonstram melhor desempenho. Todavia, o modelo ANM apresenta, consistentemente, o pior desempenho, evidenciando limitações em sua aplicação.

A análise de SRatio revela que os modelos FFFM, VFFM e AMPPM são os mais assertivos, com diferenças médias entre valores estimados e medidos variando de 0,07% (VFFM) a -6,68% (ANM). Contudo, a sazonalidade exerce influência significativa sobre todos os modelos. Esses resultados reforçam a importância de considerar as condições ambientais locais na calibração dos modelos para melhorar sua aplicabilidade aos estudos de sujidade.

De modo geral, nos períodos com menores níveis de precipitação (pós-chuvoso e seco), VFFM apresenta o melhor desempenho. Já no período chuvoso, os modelos FFFM, VFFM e AMPPM exibem desempenho semelhante, com ligeira vantagem para o FFFM. Esses modelos apresentam potencial para serem combinados para estimar as perdas por sujidade a partir de um conjunto limitado de informações de entrada: potência, irradiância e T_m.

A análise dos efeitos das limpezas manuais em LEA2, evidencia a influência de fatores antropogênicos, como obras viárias, no aumento da sujidade: %E_{LEA2} aumenta de 0,32% (1 dia antes do MC3) para 2,79% (1 dia após o MC3); áreas com presença regular de emissões de poluentes/poeira devem ser analisadas cuidadosamente na implementação de plantas FV.

Durante o período chuvoso e pós-chuvoso de 2024, a LM17 provoca aumento em %E_{LEA2} de 0,73% para 3,56%. Essa tendência de crescimento, apesar das precipitações frequentes, indica que a limpeza natural é insuficiente para recuperar totalmente o desempenho dos módulos sujos; os intervalos de limpeza devem ser ajustados com base na precipitação sazonal, pois precipitações intensas reduzem, mas não eliminam a necessidade de limpeza em sistemas FV urbanos. Durante o período mais seco, após a LM26, %E_{LEA2} atinge o pico de 5,25%, confirmando que a sujidade se intensifica durante os longos períodos sem precipitações.

A análise das métricas de desempenho reforça a eficácia das limpezas regulares na manutenção do desempenho de LEA2. Nos períodos chuvosos, o incremento em PR_{ST2} (5,21%)

é cerca de 63,33% superior ao de PR_{ST1} (3,19%); combinar limpeza manual e precipitações regulares potencializa o desempenho dos módulos limpos.

Ao comparar o período seco de 2023 e 2024, ambos com limpezas manuais, todas as métricas de ST1 apresentam redução. Em contrapartida, os módulos limpos mostram ganhos de 2,42% em Yield_{ST2} e 2,46% em FC_{ST2}, mesmo com o aumento do intervalo médio entre as limpezas. Assim, intervalos regulares de limpeza, ajustados à sazonalidade, são essenciais para minimizar as perdas por sujidade em locais com baixa precipitação e alta propensão à sujidade.

No que diz respeito ao comportamento térmico, os módulos limpos apresentam temperaturas médias ligeiramente mais altas do que os sujos, devido à maior absorção de fótons. O Teste t confirma diferença estatisticamente significativa entre as médias, embora sem impacto operacional relevante nos módulos FV.

Quanto ao comportamento da temperatura em diferentes pontos dos módulos, a T_m no centro mostra-se consistentemente maior do que nas bordas; à medida que o intervalo sem limpeza manual aumenta, a T_m e o gradiente entre o centro e as bordas reduzem, pois, a sujidade tende a se depositar de forma uniforme, diminuindo o gradiente de T_m entre o centro e a borda inferior. O gradiente de temperatura entre as bordas superior e inferior apresenta comportamento não linear, sugerindo fases distintas na deposição da sujidade, influenciadas por sazonalidades e presença de contaminantes específicos e não uniforme, como excrementos.

Em síntese, os resultados oferecem orientações para otimização da operação de sistema FV no ambiente urbano de regiões semiáridas, além de fornecerem as bases teóricas para o desenvolvimento de estratégias de manutenção sazonais. Adicionalmente, a presente tese contribui com a ampliação das investigações sobre os impactos da sujidade em sistemas FV no Brasil, considerando a variabilidade climática das regiões semiáridas.

Para a continuidade dessa linha de pesquisa, recomenda-se que estudos futuros abordem os seguintes aspectos: (i) análise da viabilidade econômica e da otimização financeira da implementação de rotinas regulares de limpeza em plantas FV urbanas; (ii) avaliação do comportamento sazonal do material particulado proveniente do tráfego de veículos em usinas FV próximas a avenidas de grande fluxo; e (iii) investigação sistemática das características físico-químicas-biológicas da sujidade sob diferentes regimes climáticos. Ademais, o desenvolvimento de uma metodologia de monitoramento das perdas por sujidade, baseada em modelos analíticos integrados a gráficos de cartas de controle, pode contribuir significativamente para o gerenciamento das operações de mitigação da sujidade em plantas FV em tempo real e com um número limitado de informações de entrada.

REFERÊNCIAS

- ABDALLAH, Marwan *et al.* Soiling loss rate measurements of photovoltaic modules in a hot and humid desert environment. **Journal of Solar Energy Engineering**, v. 143, n. 3, 2020. <https://doi.org/10.1115/1.4048406>.
- ABDALLAH, Ramez *et al.* The effects of soiling and frequency of optimal cleaning of PV panels in Palestine. **Energies**, v. 15, n. 12, p. 4232, 2022. <https://doi.org/10.3390/en15124232>.
- ABDALLAH, Amir A. *et al.* Performance of monofacial and bifacial silicon heterojunction modules under desert conditions and the impact of PV soiling. **Sustainability**, v. 15, n. 10, p. 8436, 2023. <https://doi.org/10.3390/su15108436>.
- ABDEEN, Eltaib; HASANEEN, El-Sayed; ORABI, Mohamed. Real study for Photovoltaic system performance in desert environment - Upper Egypt - case study. In: 2016 EIGHTEENTH INTERNATIONAL MIDDLE EAST POWER SYSTEMS CONFERENCE (MEPCON), 2016, Cairo, Egypt. **2016 eighteenth international middle east power systems conference (MEPCON)**. [S. l.]: IEEE, 2016. <https://doi.org/10.1109/mepcon.2016.7836993>.
- ABDEEN, Eltaib; ORABI, Mohamed; HASANEEN, El-Sayed. Optimum tilt angle for photovoltaic system in desert environment. **Solar Energy**, v. 155, p. 267-280, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.06.031>.
- ABDEL HAMID, Radwan H. *et al.* Examining the impact of different technical and environmental parameters on the performance of photovoltaic modules. **Environmental and Climate Technologies**, v. 25, n. 1, p. 1-11, 2020. <https://doi.org/10.2478/rtuect-2021-0001>.
- ABDOLZADEH, Morteza; NIKKHAH, Reza. Experimental study of dust deposition settled over tilted PV modules fixed in different directions in the southeast of Iran. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 30, p. 31478-31490, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06246-z>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR - ABSOLAR. **Energia solar fotovoltaica no Brasil**: Infográfico ABSOLAR. ABSOLAR: São Paulo. 2024. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em: 13 Maio 2024.
- ABRAIM, Mounir *et al.* PVSMS: A system for quantifying soiling effects and optimizing cleaning schedule in PV solar plants. **Energy Conversion and Management**, v. 284, p. 116978, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116978>.
- ADOTHU, Baloji *et al.* Comprehensive review on performance, reliability, and roadmap of c-Si PV modules in desert climates: a proposal for improved testing standard. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, 2024. <https://doi.org/10.1002/pip.3827>.
- ADOUANE, Mabrouk *et al.* Comparative performance evaluation of different photovoltaic modules technologies under Kuwait harsh climatic conditions. **Energy Reports**, v. 6, p. 2689-2696, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.09.034>.
- AHMED, Ahsan *et al.* Experimental investigation of dust accumulation on the performance of the photovoltaic modules: a case study of Karachi, Pakistan. **Applied Solar Energy**, v. 57,

n. 5, p. 370-376, 2021. <https://doi.org/10.3103/s0003701x21050029>.

AHMED, Husham M. *et al.* Dust accumulation and its effect on solar photovoltaic output: an experimental study in Bahrain. In: 2023 IEEE 8TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING TECHNOLOGIES AND APPLIED SCIENCES (ICETAS), 2023, Bahrain, Bahrain. **2023 IEEE 8th international conference on engineering technologies and applied sciences (ICETAS)**. [S. l.]: IEEE, 2023.
<https://doi.org/10.1109/icetas59148.2023.10346519>.

AIDARA, Mohamed Cherif *et al.* Contribution to the building of a weather information service for solar panel cleaning operations at Diass plant (Senegal, Western Sahel). **Open Geosciences**, v. 15, n. 1, 2023. <https://doi.org/10.1515/geo-2022-0449>.

AÏSSA, Brahim *et al.* Structural and physical properties of the dust particles in Qatar and their influence on the PV panel performance. **Scientific Reports**, v. 6, n. 1, 2016.
<https://doi.org/10.1038/srep31467>.

AKTER, Sumaiya *et al.* Degradation of PV module performance due to dust accumulation on the high-rise buildings. In: 2020 IEEE INTERNATIONAL WOMEN IN ENGINEERING (WIE) CONFERENCE ON ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING (WIECON-ECE), 2020, Bhubaneswar, India. **2020 IEEE international women in engineering (WIE) conference on electrical and computer engineering (WIECON-ECE)**. [S. l.]: IEEE, 2020.
<https://doi.org/10.1109/wiecon-ece52138.2020.9398017>.

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

ALAWASA, Khaled M. *et al.* Experimental study on the effect of dust deposition on a car park photovoltaic system with different cleaning cycles. **Sustainability**, v. 13, n. 14, p. 7636, 2021. <https://doi.org/10.3390/su13147636>.

AL BAKRI, Homam; ABU ELHAIJA, Wejdan; AL ZYOOD, Ali. Solar photovoltaic panels performance improvement using active self-cleaning nanotechnology of SurfaShield G. **Energy**, v. 223, p. 119908, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.119908>.

ALABDULRAZZAQ, Bader; ADOUANE, Mabrouk; AL-QATTAN, Ayman. On the effect of PV geometry on soiling: exploring use-cases for cylindrical PV modules as a soiling loss mitigation method. In: 2020 IEEE 47TH PHOTOVOLTAIC SPECIALISTS CONFERENCE (PVSC), 2020, Calgary, OR. **2020 IEEE 47th photovoltaic specialists conference (PVSC)**. [S. l.]: IEEE, 2020. <https://doi.org/10.1109/pvsc45281.2020.9300771>.

ALAMRI, Hatem R. *et al.* Experimental investigation to improve the energy efficiency of solar PV panels using hydrophobic sio₂ nanomaterial. **Coatings**, v. 10, n. 5, p. 503, 2020. <https://doi.org/10.3390/coatings10050503>.

AL-BADI, A. H. Measured performance evaluation of a 1.4 kW grid connected desert type

PV in Oman. **Energy for Sustainable Development**, v. 47, p. 107-113, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2018.09.007>.

AL-BADRA, M. Z.; ABD-ELHADY, M. S.; KANDIL, H. A. A novel technique for cleaning PV panels using antistatic coating with a mechanical vibrator. **Energy Reports**, v. 6, p. 1633-1637, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.06.020>.

ALDIHANI, Adel. Performance and cost assessment of three different crystalline silicon PV modules in Kuwait environments. **International Journal of Renewable Energy Research**, 2017. <https://doi.org/10.20508/ijrer.v7i1.5126.g6972>.

ALGHAMDI *et al.* Dust removal from solar PV modules by automated cleaning systems. **Energies**, v. 12, n. 15, p. 2923, 2019. <https://doi.org/10.3390/en12152923>.

AL-HOUSANI, Mohammed; BICER, Yusuf; KOÇ, Muammer. Assessment of various dry photovoltaic cleaning techniques and frequencies on the power output of CdTe-type modules in dusty environments. **Sustainability**, v. 11, n. 10, p. 2850, 2019a. <https://doi.org/10.3390/su11102850>.

AL-HOUSANI, Mohammed; BICER, Yusuf; KOÇ, Muammer. Experimental investigations on PV cleaning of large-scale solar power plants in desert climates: comparison of cleaning techniques for drone retrofitting. **Energy Conversion and Management**, v. 185, p. 800-815, 2019b. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.01.058>.

ALI, Hafiz *et al.* Effect of dust deposition on the performance of photovoltaic modules in Taxila, Pakistan. **Thermal Science**, v. 21, n. 2, p. 915-923, 2017. <https://doi.org/10.2298/tsci140515046a>.

ALJDAEH, Emran *et al.* Performance enhancement of self-cleaning hydrophobic nanocoated photovoltaic panels in a dusty environment. **Energies**, v. 14, n. 20, p. 6800, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14206800>.

ALKHARUSI, Tarik; HUANG, Gan; MARKIDES, Christos N. Characterisation of soiling on glass surfaces and their impact on optical and solar photovoltaic performance. **Renewable Energy**, p. 119422, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119422>.

ALONSO-MONTESINOS, Joaquín *et al.* Economic effect of dust particles on photovoltaic plant production. **Energies**, v. 13, n. 23, p. 6376, 2020. <https://doi.org/10.3390/en13236376>.

ALRAEESI, Abdulrahman *et al.* Characterisation of dust particles deposited on photovoltaic panels in the United Arab Emirates. **Applied Sciences**, v. 13, n. 24, p. 13162, 2023. <https://doi.org/10.3390/app132413162>.

AL-SALAYMEH, A. S. *et al.* Electrostatic cleaning effect on the performance of PV modules in Jordan. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 13, p. 100606, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100606>.

AL SIYABI, Idris *et al.* Effect of soiling on solar photovoltaic performance under desert climatic conditions. **Energies**, v. 14, n. 3, p. 659, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14030659>.

AL-SOEIDAT, Mohammad; KHWALDEH, Habes; LU, Dylan D.-C. Investigation of photovoltaic panel degradation affected by dust in Jordan. In: 2023 INTERNATIONAL FUTURE ENERGY ELECTRONICS CONFERENCE (IFEEC), 2023, Sydney, Australia. **2023 international future energy electronics conference (IFEEC)**. [S. l.]: IEEE, 2023. <https://doi.org/10.1109/ifeec58486.2023.10458569>.

ALVARENGA, Laryssa Souza; LUCHINI, Mateus Bassani; GUIMARÃES, Warley. Avaliação do desempenho da geração fotovoltaica na região metropolitana da Grande Vitória diante da poluição atmosférica. In: Congresso Brasileiro De Energia Solar, 8., 2020, Fortaleza. **Anais [...]**. Fortaleza: ABENS, 2020. p. 1-8.

ALVES, Custodio da Cunha *et al.* A estatística Média Móvel Exponencialmente Ponderada para o controle preditivo, monitoramento e ajuste de processos. In: Congresso Brasileiro-Iberoamericano de Investigación Operativa - Simpósio Brasileiro De Pesquisa Operacional, 1., 2012, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: SOBRAPO. 2012. p. 1320-1331.

ALZAHRANI, Khaled S. Experimental investigation of soiling impact on PV module performance in Yanbu Al Sinaiyah, Saudi Arabia. **Renewable Energy**, p. 119117, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119117>.

AMAN, Rahma; RIZWAN, M.; KUMAR, Astitva. Investigating the effect of dust on the performance of rooftop solar photovoltaic system. In: 2023 INTERNATIONAL CONFERENCE ON MODELING, SIMULATION & INTELLIGENT COMPUTING (MOSICOM), 2023, Dubai, United Arab Emirates. **2023 international conference on modeling, simulation & intelligent computing (MoSICom)**. [S. l.]: IEEE, 2023. <https://doi.org/10.1109/mosicom59118.2023.10458817>.

AMILLO, Ana; HULD, Thomas; MÜLLER, Richard. A new database of global and direct solar radiation using the eastern meteosat satellite, models and validation. **Remote Sensing**, v. 6, n. 9, p. 8165-8189, 2014. <https://doi.org/10.3390/rs6098165>.

AMMARI, Nabil *et al.* Experimental study on the impact of soiling on the modules temperature and performance of two different PV technologies under hot arid climate. **Heliyon**, p. e11395, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11395>.

AMMARI, Nabil *et al.* Experimental analysis of Anti-Reflective coating performance in desert Climate: yield analysis, soiling impact and cleaning durability evaluation. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 60, p. 103547, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103547>.

AMMARI, Nabil *et al.* In-situ soiling evaluation and cleaning schedules optimization for several PV technologies under desert climate. **Renewable Energy**, p. 120167, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120167>.

ANDERSON, A. J. **Photovoltaic translation equations: A new approach. Final subcontract report**. National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States), 1996.

ARABATZIS, Ioannis *et al.* Photocatalytic, self-cleaning, antireflective coating for photovoltaic panels: characterization and monitoring in real conditions. **Solar Energy**, v. 159,

p. 251-259, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.10.088>.

ARABKOOHSAR, Ahmad. **Dynamic modeling of a compressed air energy storage system in a grid connected photovoltaic plant.** 2016. 176 p. Tese de Doutorado — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

ARAÚJO, Danielly Norberto *et al.* Impactos da sujidade e efeitos da limpeza no desempenho de módulos fotovoltaicos. In: Congresso Brasileiro De Energia Solar, 8., 2020a, Fortaleza. **Anais [...].** Fortaleza: ABENS, 2020a. p. 1-8.

ARAÚJO, Danielly Norberto *et al.* Análise química preliminar da sujidade depositada em duas plantas fotovoltaicas instaladas na zona urbana de Fortaleza. In: Congresso Brasileiro De Energia Solar, 8., 2020b, Fortaleza. **Anais [...].** Fortaleza: ABENS, 2020b. p. 1-9.

ARAÚJO, Danielly Norberto. **Investigação experimental dos efeitos da sujidade no desempenho de plantas fotovoltaicas instaladas no campus do Pici da UFC.** 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2019.

ARAÚJO, Danielly Norberto; CARVALHO, Paulo César Marques de; DUPONT, Ivonne Montero. Efeitos da acumulação de sujeira sobre o desempenho de módulos fotovoltaicos. **Revista Tecnologia**, v. 40, n. 2, 2019.
<https://doi.org/10.5020/23180730.2019.9414>.

ARAUJO, G. L.; SÁNCHEZ, E. Analytical expressions for the determination of the maximum power point and the fill factor of a solar cell. **Solar Cells**, v. 5, n. 4, p. 377-386, 1982. [https://doi.org/10.1016/0379-6787\(82\)90008-4](https://doi.org/10.1016/0379-6787(82)90008-4).

ASSIS, Dionizio Porfirio. **Desenvolvimento de um sistema de monitoramento com rede LORA aplicado a uma planta fotovoltaica.** 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Telecomunicações) — Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2023.

AYALA, Paulo *et al.* Bifacial technology performance compared with three commercial monofacial PV technologies under outdoor high irradiance conditions at the Atacama desert. In: 2018 IEEE 7TH WORLD CONFERENCE ON PHOTOVOLTAIC ENERGY CONVERSION (WCPEC) (A JOINT CONFERENCE OF 45TH IEEE PVSC, 28TH PVSEC & 34TH EU PVSEC), 2018, Waikoloa Village, HI. **2018 IEEE 7th world conference on photovoltaic energy conversion (WCPEC) (A joint conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC).** [S. l.]: IEEE, 2018.<https://doi.org/10.1109/pvsc.2018.8547345>.

AZOUZOUTE, Alae *et al.* Modeling and experimental investigation of dust effect on glass cover PV module with fixed and tracking system under semi-arid climate. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 230, p. 111219, 2021a. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111219>.

AZOUZOUTE, Alae *et al.* Developing a cleaning strategy for hybrid solar plants PV/CSP: case study for semi-arid climate. **Energy**, v. 228, p. 120565, 2021b.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120565>.

BABATUNDE, A. A.; ABBASOGLU, S.; SENOL, M. Analysis of the impact of dust, tilt angle and orientation on performance of PV Plants. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 90, p. 1017-1026, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.102>.

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

BADI, Humaid Al *et al.* Dust event impact on photovoltaic systems: role of humidity in soiling and self-cleaning. In: 2018 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SMART ENERGY GRID ENGINEERING (SEGE), 2018, Oshawa, ON. **2018 IEEE international conference on smart energy grid engineering (SEGE)**. [S. l.]: IEEE, 2018. <https://doi.org/10.1109/sege.2018.8499442>.

BARAS, Abdulaziz *et al.* Measured soiling loss and its economic impact for PV plants in central Saudi Arabia. In: 2016 SAUDI ARABIA SMART GRID (SASG), 2016, Jeddah, Saudi Arabia. **2016 Saudi Arabia smart grid (SASG)**. [S. l.]: IEEE, 2016. <https://doi.org/10.1109/sasg.2016.7849657>.

BARBOSA, Elismar Ramos; FARIAS, Merlim dos Santos Ferreira; GONTIJO, Fabio de Brito. Influência da sujeira na geração fotovoltaica. In: Congresso Brasileiro De Energia Solar, 7., 2018, Gramado. **Anais [...]**. Gramado: ABENS, 2018. p. 1-8.

BATZELIS, Efstratios I. Simple PV performance equations theoretically well founded on the single-diode model. **IEEE Journal of Photovoltaics**, v. 7, n. 5, p. 1400-1409, 2017. <https://doi.org/10.1109/jphotov.2017.2711431>.

BAZARBAYEV, Rustam et al. Physical and chemical properties of dust in the Pre-Aral region of Uzbekistan. Environmental Science and Pollution Research, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18827-6>.

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

BENGHANEM, Mohamed *et al.* Effect of dust accumulation on the performance of photovoltaic panels in desert countries: A case study for Madinah, Saudi Arabia. **International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)**, v. 9, n. 3, p. 1356, 2018. <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v9.i3.pp1356-1366>.

BENGHANEM, Mohamed *et al.* Evaluation of the performance of polycrystalline and monocrystalline PV technologies in a hot and arid region: an experimental analysis. **Sustainability**, v. 15, n. 20, p. 14831, 2023. <https://doi.org/10.3390/su152014831>.

BESSA, João Gabriel *et al.* Monitoring photovoltaic soiling: assessment, challenges, and perspectives of current and potential strategies. **iScience**, v. 24, n. 3, p. 102165, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.102165>.

BESSA, João Gabriel *et al.* An investigation on the pollen-induced soiling losses in utility-scale PV plants. **IEEE Journal of Photovoltaics**, p. 1-7, 2023. <https://doi.org/10.1109/jphotov.2023.3326560>.

BESSON, Pierre *et al.* Long-Term soiling analysis for three photovoltaic technologies in Santiago region. **IEEE Journal of Photovoltaics**, v. 7, n. 6, p. 1755-1760, 2017. <https://doi.org/10.1109/jphotov.2017.2751752>.

BHADURI, Sonali; KOTTANTHARAYIL, Anil. Mitigation of soiling by vertical mounting of bifacial modules. **IEEE Journal of Photovoltaics**, v. 9, n. 1, p. 240-244, 2019. <https://doi.org/10.1109/jphotov.2018.2872555>.

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.

BOEING, A. *et al.* The impact of lower quality water on soiling removal from photovoltaic panels. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 169, p. 112870, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112870>.

BRAGA, Daniel Sena. **Interrelação entre os parâmetros de desempenho e distribuição de sujidade em módulos fotovoltaicos**. 2018. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

BRAMBILLA, Sara; SPECKART, Scott; BROWN, Michael J. Adhesion and aerodynamic forces for the resuspension of non-spherical particles in outdoor environments. **Journal of Aerosol Science**, v. 112, p. 52-67, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2017.07.006>.

CARAMAGO SCHUBERT ENGENHEIROS ASSOCIADOS *et al.* (Brasil). **Atlas eólico e solar**: Ceará: ADECE:FIEC:SEBRAE, 2019. 188 p.

CAPDEVILA, Hugo; NAIDOO, Vijandren; GRAEBER, Max. Soiling forecast and measurements for large PV power generation projects in desert environments. In: 2016 IEEE 43RD PHOTOVOLTAIC SPECIALISTS CONFERENCE (PVSC), 2016, Portland, OR, USA. **2016 IEEE 43rd photovoltaic specialists conference (PVSC)**. [S. l.]: IEEE, 2016. <https://doi.org/10.1109/pvsc.2016.7749994>.

CHALA, Girma T.; SULAIMAN, Shaharin A.; AL ALSAIKH, Shamsa M. Effects of cooling and interval cleaning on the performance of soiled photovoltaic panels in Muscat, Oman. **Results in Engineering**, p. 101933, 2024a. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101933>.

CHALA, Girma T.; SULAIMAN, Shaharin A.; AL ALSAIKH, Shamsa M. Effects of climatic conditions of Al Seeb in Oman on the performance of solar photovoltaic panels. **Heliyon**, p. e30944, 2024b. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30944>.

CHANCHANGI, Yusuf N. *et al.* Dust and PV performance in Nigeria: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 121, p. 109704, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109704>.

CHANCHANGI, Yusuf N. *et al.* Soiling on PV performance influenced by weather parameters in Northern Nigeria. **Renewable Energy**, v. 180, p. 874-892, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.08.090>.

CHAOUKI, Fatima *et al.* Physical and chemical analysis of outdoor dust deposited on photovoltaic panels installed in Rabat. In: 2016 INTERNATIONAL RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY CONFERENCE (IRSEC), 2016, Marrakech. **2016 international renewable and sustainable energy conference (IRSEC)**. [S. l.]: IEEE, 2016.
<https://doi.org/10.1109/irsec.2016.7983995>.

CHATURVEDI, Meenakshi; RAMALINGAM, Velraj. Dust repellent nano coating for operational efficiency enhancement of solar photovoltaic system. **Applied Solar Energy**, v. 58, n. 2, p. 210-216, 2022. <https://doi.org/10.3103/s0003701x22020037>.

CHAVES, Matheus de Paula. **Estudo sobre sombreamento em planta fotovoltaica localizada em zona urbana de Fortaleza-CE**. 2018. TCC (Graduação em Engenharia Elétrica) — Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2018.

CHBIHI, Abdelouahed *et al.* Outdoor investigation of the performance of three PV panels technologies in Morocco. **Solar Energy**, v. 220, p. 8-17, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.03.009>.

CHEN, Jinxin *et al.* Study on impacts of dust accumulation and rainfall on PV power reduction in East China. **Energy**, v. 194, p. 116915, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.116915>.

CHITEKA, Kudzanayi *et al.* A novel approach to Solar PV cleaning frequency optimization for soiling mitigation. **Scientific African**, v. 8, p. e00459, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00459>.

CONCEIÇÃO, Ricardo *et al.* Saharan dust transport to Europe and its impact on photovoltaic performance: A case study of soiling in Portugal. **Solar Energy**, v. 160, p. 94-102, 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.11.059>.

CONCEIÇÃO, Ricardo *et al.* Soiling and rainfall effect on PV technology in rural Southern Europe. **Renewable Energy**, v. 156, p. 743-747, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.119>.

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

COSTA, Suellen Caroline Silva *et al.* Avaliação da sujidade em módulos fotovoltaicos em Minas Gerais, Brasil. In: Congresso Brasileiro De Energia Solar, 7., 2018, Gramado. **Anais [...]**. Gramado: ABENS, 2018. p. 1-8.

COSTA, Suellen Caroline Silva *et al.* Caracterização físico-química da sujidade depositada sobre módulos fotovoltaicos instalados em zonas climáticas de Minas Gerais. In: Congresso Brasileiro De Energia Solar, 6., 2016, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Belo Horizonte: ABENS, 2016. p. 1-9.

COSTA, Suellen Caroline Silva *et al.* Determinação das taxas de sujidade para módulos fotovoltaicos de filme fino e silício cristalino instalados em diferentes zonas climáticas brasileiras. In: Congresso Brasileiro De Energia Solar, 8., 2020a, Fortaleza. **Anais [...]**. Fortaleza: ABENS, 2020. p. 1-8.

COSTA, Suellen Caroline Silva *et al.* Effects of soiling of photovoltaic modules and systems in Brazil's climate zones. In: ISES solar world congress 2019/IEA SHC international conference on solar heating and cooling for buildings and industry 2019, 2019b, Santiago, Chile. Freiburg, Germany: International Solar Energy Society, 2019. <https://doi.org/10.18086/swc.2019.16.07>.

COSTA, Suellen Caroline Silva. **Estudo abrangente do efeito da sujidade no desempenho de módulos e sistemas fotovoltaicos**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) — Pontifícia Universidade Católica de Minas, Belo Horizonte, 2018.

COSTA, Suellen C. S. *et al.* Modelo para estimativa da irradiação solar incidente sobre o módulo fotovoltaico inclinado utilizando dados de irradiação global horizontal. In: Congresso Brasileiro De Energia Solar, 9., 2022, Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis: ABENS, 2022. p. 1-9.

COSTA, Suellen C. *et al.* Comparative investigations of the effects of soiling of PV modules and systems in tropical, subtropical, and semi-arid climate zones in Brazil. In: 2019 IEEE 46TH PHOTOVOLTAIC SPECIALISTS CONFERENCE (PVSC), 2019a, Chicago, IL, USA. **2019 IEEE 46th photovoltaic specialists conference (PVSC)**. [S. l.]: IEEE, 2019. <https://doi.org/10.1109/pvsc40753.2019.8980505>.

COSTA, Suellen C. S. *et al.* Impact of Soiling Deposition on CdTe and Si PV Modules in Different Climate Zones in Brazil. In: 2020 IEEE 47TH PHOTOVOLTAIC SPECIALISTS CONFERENCE (PVSC), 2020b, Calgary, OR. **2020 IEEE 47th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)**. [S. l.]: IEEE, 2020. <https://doi.org/10.1109/pvsc45281.2020.9300382>.

COSTA, Suellen C. Silva; KAZMERSKI, Lawrence L.; DINIZ, Antônia Sônia A. C. Impact of soiling on Si and CdTe PV modules: Case study in different Brazil climate zones. **Energy Conversion and Management**: X, v. 10, p. 100084, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2021.100084>.

CRUZ, David Venancio da. **Controle estatístico de processo aplicado à qualidade de águas no abastecimento de Campina Grande - PB**. 2014. 67 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Biometria e Estatística Aplicada, Universidade Federal Rural e Pernambuco, Recife, 2014.

CUI, Yong-Qin *et al.* Characterization of soiling bands on the bottom edges of PV modules. **Frontiers in Energy Research**, v. 9, 2021. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.665411>.

DAHER, Daha Hassan *et al.* Impact of tropical desert maritime climate on the performance of a PV grid-connected power plant. **Renewable Energy**, v. 125, p. 729-737, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.013>.

DAHLIOUI, Dounia *et al.* New approach towards mitigating photovoltaic panels soiling by dew flowing. **Environmental Science and Pollution Research**, 2022a. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19171-5>.

DAHLIOUI, Dounia *et al.* Waterless cleaning technique for photovoltaic panels on dual-axis tracker. **Environmental Science and Pollution Research**, 2022b. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23218-y>.

DAHLIOUI, Dounia; LAARABI, Bouchra; BARHDADI, Abdelfettah. Investigation of soiling impact on PV modules performance in semi-arid and hyper-arid climates in Morocco. **Energy for Sustainable Development**, v. 51, p. 32-39, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2019.05.001>.

DARWISH, Zeki Ahmed *et al.* Effect of dust pollutant type on photovoltaic performance. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 41, p. 735-744, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.068>.

DEEPAK, Deepak; MALVI, C. S. Performance-enhancing and improvement studies in a 210 kw rooftop solar photovoltaic plant by manual cleaning. **AMBIENT SCIENCE**, v. 09, n. 01, p. 38-42, 2021. <https://doi.org/10.21276/ambi.2022.09.1.ta04>.

DEEPAK; MALVI, Chandra Shekhar; SAGAR, Manish Kumar. Dust and cleaning effect on 50 kw rooftop solar photovoltaic power plant. In: 2023 1ST INTERNATIONAL CONFERENCE ON INNOVATIONS IN HIGH SPEED COMMUNICATION AND SIGNAL PROCESSING (IHCSP), 2023, BHOPAL, India. **2023 1st international conference on innovations in high speed communication and signal processing (IHCSP)**. [S. l.]: IEEE, 2023. <https://doi.org/10.1109/ihcsp56702.2023.10127121>.

DHAOUADI, Rached *et al.* A characterization study for the properties of dust particles collected on photovoltaic (PV) panels in Sharjah, United Arab Emirates. **Renewable Energy**, v. 171, p. 133-140, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.083>.

DIDA, Mustapha *et al.* Output power loss of crystalline silicon photovoltaic modules due to dust accumulation in Saharan environment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 124, p. 109787, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109787>.

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

DIOUF, Mame Cheikh *et al.* A framework of optimum cleaning schedule and its financial impact in a large-scale PV solar plant: a case study in Senegal. **EPJ Photovoltaics**, v. 13, p. 21, 2022. <https://doi.org/10.1051/epjpv/2022019>.

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

DOGAN, Tuba Rastgeldi *et al.* Seasonal effects of atmospheric particulate matter on performance of different types of photovoltaic modules in Sanliurfa, Turkey. **Atmospheric Pollution Research**, v. 11, n. 12, p. 2173-2181, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.06.009>.

DOLAN, Johnathan *et al.* Power loss due to photovoltaic module soiling in a California utility scale system. In: 2019 9TH International Conference on Power and Energy Systems (ICPES), 2019, Perth, Australia. **2019 9th international conference on power and energy systems (ICPES)**. [S. l.]: IEEE, 2019. <https://doi.org/10.1109/icpes47639.2019.9105409>.

DRAME, Mamadou Simina *et al.* Structural and physicochemical properties of dust collected on PV panels surfaces and their potential influence on these solar modules efficiency in Dakar, Senegal, West Africa. **Scientific African**, v. 12, p. e00810, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e00810>.

DUFFIE, John A.; BECKMAN, William A.; BLAIR, Nathan. **Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind**. 5. ed. Danvers: Wiley, 2020.

DU PLESSIS, Armand A.; STRAUSS, Johannes M.; RIX, Arnold J. Application of dust mitigation strategies to single-axis-tracking photovoltaic modules in the semi-arid areas of South Africa. **IET Renewable Power Generation**, v. 14, n. 15, p. 2781-2790, 2020. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2019.1424>.

DUPONT, Ivonne Montero. **Metodologia para identificação de condições não ideais de operação de plantas fotovoltaicas**. 2021. 168 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, 2021.

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

EBERT, Sabrina Rodrigues *et al.* Análise da taxa de sujidade de duas tecnologias FV em Florianópolis. In: Congresso Brasileira de Energia Solar, IX, 2022, Florianópolis. **Anais CBENS 2022**. [S. l.]: ABENS, 2022. p. 1-8.

EHSAN, R. Muhammad *et al.* Effect of soiling on photovoltaic modules and its mitigation using hydrophobic nanocoatings. **IEEE Journal of Photovoltaics**, v. 11, n. 3, p. 742-749, 2021. <https://doi.org/10.1109/jphotov.2021.3062023>.

EHSAN, R. Muhammad *et al.* Effects of nanocoatings on the temperature-dependent cell parameters and power generation of photovoltaic panels. **Applied Nanoscience**, 20 set. 2022. <https://doi.org/10.1007/s13204-022-02633-0>.

EISA, K. *et al.* Mitigation of dust on PV panels that operate light posts using a wind shield, mechanical vibrations and AN antistatic coating. **Ain Shams Engineering Journal**, p. 101993, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101993>.

EKINCI, Fırat *et al.* Experimental investigation on solar PV panel dust cleaning with solution method. **Solar Energy**, v. 237, p. 1-10, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.03.066>.

ELAMIM, Abderrazzak *et al.* Experimental studies of dust accumulation and its effects on the performance of solar PV systems in Mediterranean climate. **Energy Reports**, v. 11, p. 2346-2359, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.01.078>.

ELIAS, M. A. *et al.* Effects of coal and fly ash dust deposition of photovoltaic panel performance: a photovoltaic system at coal-fired power plant case study. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1358, p. 012038, 2019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1358/1/012038>.

ELNOZAHY, Ahmed; ABD-ELBARY, Heba; ABO-ELYOUSR, Farag K. Efficient energy harvesting from PV panel with reinforced hydrophilic nano-materials for eco-buildings. **Energy and Built Environment**, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2022.12.001>.

ELSHAZLY, Engy *et al.* Effect of dust and high temperature on photovoltaics performance in the new capital area. **WSEAS TRANSACTIONS ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT**, v. 17, p. 360-370, 2021. <https://doi.org/10.37394/232015.2021.17.36>.

ENAGANTI, Prasanth K. *et al.* Experimental investigations for dust build-up on low-iron glass exterior and its effects on the performance of solar PV systems. **Energy**, v. 239, p. 122213, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122213>.

FADHEL, S. *et al.* PV shading fault detection and classification based on I-V curve using principal component analysis: application to isolated PV system. **Solar Energy**, [S.I.], v. 179, p. 1-10, 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2018.12.048>.

FARAHMAND, Mahsa Z. *et al.* The simultaneous impacts of seasonal weather and solar conditions on PV panels electrical characteristics. **Energies**, v. 14, n. 4, p. 845, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14040845>.

FATIMA, Kulsoom *et al.* Experimental analysis of dust composition impact on Photovoltaic panel Performance: a case study. **Solar Energy**, v. 267, p. 112206, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.112206>.

FERNÁNDEZ-SOLAS, Álvaro *et al.* Estimation of soiling losses in photovoltaic modules of different technologies through analytical methods. **Energy**, v. 244, p. 123173, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123173>.

FERRADA, Pablo *et al.* Physicochemical characterization of soiling from photovoltaic facilities in arid locations in the Atacama Desert. **Solar Energy**, v. 187, p. 47-56, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.05.034>.

FERREIRA, Daniel Caldas Soares *et al.* Computational study of dirt's effect on solar panel efficiency. In: 2023 15TH SEMINAR ON POWER ELECTRONICS AND CONTROL (SEPOC), 2023, Santa Maria, Brazil. **2023 15th seminar on power electronics and control (SEPOC)**. [S. l.]: IEEE, 2023. <https://doi.org/10.1109/sepac58810.2023.10322592>.

FIGGIS, Benjamin *et al.* Investigation of factors affecting condensation on soiled PV modules. **Solar Energy**, v. 159, p. 488-500, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.10.089>.

FIGGIS, Benjamin et al. Review of PV soiling particle mechanics in desert environments. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 76, p. 872-881, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.100>.

FORTALEZA, Prefeitura Municipal. Plano Fortaleza 2040: qualidade do meio ambiente e dos recursos naturais. 2. ed. Fortaleza: IPLANFOR, 2019. 316 p.

FOUAD, M. M.; SHIHATA, Lamia A.; MORGAN, ElSayed I. An integrated review of factors influencing the performance of photovoltaic panels. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, p. 1499-1511, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.141>.

FRAGA, Mariana Myriam *et al.* Analysis of the soiling effect on the performance of photovoltaic modules on a soccer stadium in Minas Gerais, Brazil. **Solar Energy**, v. 163, p. 387-397, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.02.025>.

FRATE, Cláudio Albuquerque; SANTOS, Letícia de Oliveira; CARVALHO, Paulo Cesar Marques de. Photovoltaic systems for multi-unit buildings: Agents' rationalities for supporting distributed generation diffusion in Brazil. **Energy Policy**, v. 193, p. 114267, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2024.114267>.

FREITAS FILHO, Marcelo Ferreira *et al.* Análise da composição físico-química da sujidade de plantas fotovoltaicas: estudo de caso para Fortaleza. **Revista Tecnologia**, v. 41, n. 2, 2020. <https://doi.org/10.5020/23180730.0.10751>.

FUENTES, M. *et al.* Application and validation of algebraic methods to predict the behavior of crystalline silicon PV modules in Mediterranean climates. **Solar Energy**, v. 81, n. 11, p. 1396-1408, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.12.008>.

FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS - FUNCHEME. **Postos pluviométricos**. 2022. [Online]. Disponível em: http://www.funceme.br/?page_id=2694. Acesso em: 28 Set. 2022.

GAIO, João Nicolau; CAMPOS, Kleverson Moisés Apolinário de; TIEPOLO, Gerson Máximo. Determination of the ideal time for cleaning of photovoltaic panels aiming at better productivity - case study of the implanted grid-connected photovoltaic system at the federal university of technology of Paraná. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 61, n. spe, 2018. <https://doi.org/10.1590/1678-4324-smart-2018000210>.

GALAL, Eslam M. *et al.* The performance of polycrystalline and monocrystalline solar modules under the climate conditions of El-Kharga oasis, new valley governorate, Egypt. **International Journal of Thin Film Science and Technology**, v. 12, n. 3, p. 207-215, 2023. <https://doi.org/10.18576/ijtfst/120306>.

GAO, P., GOLAB, L., and KESHAV, S. What's Wrong with my Solar Panels: a Data-Driven Approach. In **EDBT/ICDT Workshops**. 2015.

GHAZI, Sanaz; SAYIGH, Ali; IP, Kenneth. Dust effect on flat surfaces – A review paper. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 33, p. 742-751, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.02.016>.

GHODKI, Manish Kumar. An infrared based dust mitigation system operated by the robotic arm for performance improvement of the solar panel. **Solar Energy**, v. 244, p. 343-361, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.08.064>.

GHODKI, Manish Kumar; SWARUP, Akhilesh; PAL, Yash. A new IR and sprinkler based embedded controller directed robotic arm for automatic cleaning of solar panel. **Journal of Engineering, Design and Technology**, v. 18, n. 4, p. 905-921, 2019. <https://doi.org/10.1108/jedt-10-2019-0253>.

GHOLAMI, Aslan *et al.* Experimental investigation of dust deposition effects on photovoltaic output performance. **Solar Energy**, v. 159, p. 346-352, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.11.010>.

GHOLAMI, Aslan *et al.* Photovoltaic potential assessment and dust impacts on photovoltaic systems in Iran: review paper. **IEEE Journal of Photovoltaics**, v. 10, n. 3, p. 824-837, 2020. <https://doi.org/10.1109/jphotov.2020.2978851>.

GNEDI, Eman M.; SALEH, Ibrahim M. Evaluating the performance of different PV modules technology due to dust accumulation in Tripoli region. In: 2021 IEEE 1ST INTERNATIONAL MAGHREB MEETING OF THE CONFERENCE ON SCIENCES AND TECHNIQUES OF AUTOMATIC CONTROL AND COMPUTER ENGINEERING MI-STA, 2021, Tripoli, Libya. **2021 IEEE 1st international maghreb meeting of the conference on sciences and techniques of automatic control and computer engineering MI-STA**. [S. l.]: IEEE, 2021. <https://doi.org/10.1109/mi-sta52233.2021.9464502>.

GOEL, Sonali *et al.* Effect of soiling on power output of a photovoltaic system. In: GOEL, Sonali *et al.* **Lecture notes in electrical engineering**. Singapore: Springer Singapore, 2020. p. 351-359. ISBN 9789811523045. https://doi.org/10.1007/978-981-15-2305-2_28.

GONÇALVES, Vinícius. **Aumento na produtividade com a utilização de robô de limpeza**. 2024. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/aumento-na-produtividade-com-a-utilizacao-de-robo-de-limpeza/>. Acesso em: 8 Ago. 2024.

GOOGLE. **Google Maps**. 2022. [Online]. Disponível em: <https://www.google.com.br/maps/@-3.7371846,-38.5726685,98m/data=!3m1!1e3>. Acesso em: 28 Set. 2022.

GOSTEIN, Michael *et al.* Comparing PV power plant soiling measurements extracted from PV module irradiance and power measurements. In: 2013 IEEE 39TH PHOTOVOLTAIC SPECIALISTS CONFERENCE (PVSC), 2013, Tampa, FL, USA. **2013 IEEE 39th photovoltaic specialists conference (PVSC)**. [S. l.]: IEEE, 2013. ISBN 9781479932993. <https://doi.org/10.1109/pvsc.2013.6745094>.

GOSTEIN, Michael; DUSTER, Tim; THUMAN, Christopher. Accurately measuring PV soiling losses with soiling station employing module power measurements. In: 2015 IEEE 42ND PHOTOVOLTAIC SPECIALISTS CONFERENCE (PVSC), 2015, New Orleans, LA. **2015 IEEE 42nd photovoltaic specialists conference (PVSC)**. [S. l.]: IEEE, 2015. ISBN 9781479979448. <https://doi.org/10.1109/pvsc.2015.7355993>.

GUO, Xiao *et al.* Prediction of thermal boundary layer thickness and bidirectional effect of

dust deposition on the output of photovoltaic modules. **Solar Energy**, v. 268, p. 112262, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.112262>.

GUPTA, Vinay *et al.* Design and development of self-cleaning PV sliding system. **Clean Energy**, v. 6, n. 3, p. 392-403, 2022a. <https://doi.org/10.1093/ce/zkac015>.

GUPTA, Vinay *et al.* Performance Analysis of Solar PV system using Customize wireless data acquisition system and novel cleaning technique. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v. 44, n. 2, p. 2748-2769, 2022b. <https://doi.org/10.1080/15567036.2022.2061091>.

GUPTA, Vinay *et al.* Performance enhancement of solar photovoltaic system using waterless cleaning system. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v. 44, n. 4, p. 10285-10304, 2022c. <https://doi.org/10.1080/15567036.2022.2146813>.

GUPTA, Vinay; RAJ, Prateek; YADAV, Ankit. Investigate the effect of dust deposition on the performance of solar PV module using LABVIEW based data logger. In: 2017 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER, CONTROL, SIGNALS AND INSTRUMENTATION ENGINEERING (ICPCSI), 2017, Chennai. **2017 IEEE international conference on power, control, signals and instrumentation engineering (ICPCSI)**. [S. l.]: IEEE, 2017. <https://doi.org/10.1109/icpcsi.2017.8391812>.

HACHICHA, Ahmed Amine; AL-SAWFTA, Israa; SAID, Zafar. Impact of dust on the performance of solar photovoltaic (PV) systems under United Arab Emirates weather conditions. **Renewable Energy**, v. 141, p. 287-297, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.004>.

HAMMOUD, Mohammad *et al.* Effect of dust cleaning on the enhancement of the power generation of a coastal PV-power plant at Zahrani Lebanon. **Solar Energy**, v. 184, p. 195-201, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.04.005>.

HARROU, Fouzi *et al.* Reliable fault detection and diagnosis of photovoltaic systems based on statistical monitoring approaches. **Renewable Energy**, v. 116, p. 22-37, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.09.048>.

HAYDAROĞLU, Cem; GÜMÜŞ, Bilal. Investigation of the effect of short term environmental contamination on energy production in photovoltaic panels: Dicle University solar power plant example. **Applied Solar Energy**, v. 53, n. 1, p. 31-34, 2017. <https://doi.org/10.3103/s0003701x17010066>.

HERNANDES, Elis *et al.* Using GQM and TAM to evaluate StArt – a tool that supports Systematic Review. **CLEI Electronic Journal**, v. 15, n. 1, 2012. <https://doi.org/10.19153/cleiej.15.1.2>.

HICKEL, Bernardo Meyer *et al.* Análise da influência do acúmulo de sujeira sobre diferentes tecnologias de módulos FV: revisão e medições de campo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Belo Horizonte: ABENS, 2016. p. 1-8.

HOSSAIN, Maruf *et al.* Study of dust effect on PV panel's efficiency during winter for Dhaka, Bangladesh. In: 2020 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE

TECHNOLOGIES FOR INDUSTRY 4.0 (STI), 2020, Dhaka, Bangladesh. **2020 2nd international conference on sustainable technologies for industry 4.0 (STI)**. [S. l.]: IEEE, 2020. <https://doi.org/10.1109/sti50764.2020.9350391>.

HOTTEL, H; WOERTZ, B. Performance of flat-plate solar-heat collectors. **Trans. ASME (Am. Soc. Mech. Eng)**, v. 64. 1942. <https://www.osti.gov/biblio/5052689>.

HUKSEFLUX. **User manual LP02**: Second class pyranometer. 2008. Disponível em: https://www.hukseflux.com/uploads/inline/LP02_manual_v2008_DISCONTINUED.pdf. Acesso em: 26 Out. 2022.

HUSSAIN, Athar; BATRA, Ankit; PACHAURI, Rupendra. An experimental study on effect of dust on power loss in solar photovoltaic module. **Renewables: Wind, Water, and Solar**, v. 4, n. 1, 2017. <https://doi.org/10.1186/s40807-017-0043-y>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. **Electricity Sector**. IEA: Paris. 2022a. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/electricity-sector>. Acesso em: 13 Out. 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. **Solar PV**. IEA: Paris. 2022b. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/solar-pv>. Acesso em: 13 Out. 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. **Renewables 2023**. IEA: Paris. 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>. Acesso em: 13 Maio 2023.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION - IEC. **Photovoltaic System Performance – Part 1: Monitoring** (IEC 61724-1, Edition 1.0, 2017-03). CENELEC, 2017.

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

ILSE, Klemens *et al.* Microstructural analysis of the cementation process during soiling on glass surfaces in arid and semi-arid climates. **physica status solidi (RRL) - Rapid Research Letters**, v. 10, n. 7, p. 525-529, 2016. <https://doi.org/10.1002/pssr.201600152>.

ILSE, Klemens *et al.* Techno-Economic assessment of soiling losses and mitigation strategies for solar power generation. **Joule**, v. 3, n. 10, p. 2303-2321, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.08.019>.

ILSE, Klemens K. *et al.* Comprehensive analysis of soiling and cementation processes on PV modules in Qatar. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 186, p. 309-323, 2018b. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.06.051>.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET. **Dados históricos anuais**. 2022c. [Online]. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>. Acesso em: 28 Set. 2022.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET. **Mapa de Estações**. 2022a. [online]. Disponível em: <https://mapas.inmet.gov.br/>. Acesso em: 28 Set. 2022.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET. **Normais Climatológicas do Brasil.** 2022b. [online]. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/normais>. Acesso em: 28 Set. 2022.

ISAFAN, Rima J. et al. Evaluation of the adhesion forces between dust particles and photovoltaic module surfaces. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 191, p. 413-421, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.11.031>.

ISHII, Tetsuyuki. Annual degradation rates and soiling losses of photovoltaic systems composed of recent crystalline silicon technologies in temperate climate. **Engineering Reports**, 2024. <https://doi.org/10.1002/eng2.12937>.

ISLAM, Mohammad Didarul et al. A techno-economic analysis of bifacial panels under soiling in South-Asian urban area. In: 2022 IEEE REGION 10 SYMPOSIUM (TENSYMP), 2022, Mumbai, India. **2022 IEEE Region 10 Symposium (TENSYMP)**. [S. l.]: IEEE, 2022. <https://doi.org/10.1109/tensymp54529.2022.9864510>.

JAMIL, Wan Juzaili et al. Performance degradation of photovoltaic power system: review on mitigation methods. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 67, p. 876-891, 2017a. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.072>.

JAMIL, Basharat; AKHTAR, Naiem. Comparative analysis of diffuse solar radiation models based on sky-clearness index and sunshine period for humid-subtropical climatic region of India: a case study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 78, p. 329-355, 2017b. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.073>.

JAMIL, Wan Juzaili et al. Modeling of soiling derating factor in determining photovoltaic outputs. **IEEE Journal of Photovoltaics**, v. 10, n. 5, p. 1417-1423, 2020. <https://doi.org/10.1109/jphotov.2020.3003815>.

JASSASI, Ibrahim S. Al et al. Experimental investigation of the soiling effect on the PV systems performance and the cleaning intervals in Oman. **Solar Energy Advances**, p. 100045, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.seja.2023.100045>.

JASZCZUR, Marek et al. Impact of dust and temperature on energy conversion process in photovoltaic module. **Thermal Science**, v. 23, n. Suppl. 4, p. 1199-1210, 2019. <https://doi.org/10.2298/tsci19s4199j>.

JASZCZUR, Marek et al. Study of dust deposition and temperature impact on solar photovoltaic module. **MATEC Web of Conferences**, v. 240, p. 04005, 2018a. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201824004005>.

JASZCZUR, Marek et al. 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, 2018b. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1970-x>.

JASZCZUR, Marek et al. An investigation of the dust accumulation on photovoltaic panels. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 2, p. 2001-2014, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06742-2>.

- JAVED, Wasim *et al.* Characterization of dust accumulated on photovoltaic panels in Doha, Qatar. **Solar Energy**, v. 142, p. 123-135, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.11.053>.
- JAVED, Wasim *et al.* Dust potency in the context of solar photovoltaic (PV) soiling loss. **Solar Energy**, v. 220, p. 1040-1052, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.04.015>.
- JAVED, Wasim *et al.* Field evaluation of two types of EDS-integrated PV modules with different configurations and surface properties. **Solar Energy**, v. 241, p. 515-524, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.06.035>.
- JAVED, Wasim *et al.* Multi-year field assessment of seasonal variability of photovoltaic soiling and environmental factors in a desert environment. **Solar Energy**, v. 211, p. 1392-1402, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.10.076>.
- JAVED, Wasim *et al.* Photovoltaic performance degradation due to soiling and characterization of the accumulated dust. In: 2016 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER AND RENEWABLE ENERGY (ICPRE), 2016, Shanghai, China. **2016 IEEE international conference on power and renewable energy (ICPRE)**. [S. l.]: IEEE, 2016. <https://doi.org/10.1109/icpre.2016.7871142>.
- JESUS, Magnum Augusto Moraes Lopes de *et al.* Anti-soiling coatings for solar cell cover glass: climate and surface properties influence. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 185, p. 517-523, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.05.036>.
- JINKO SOLAR. **JKM330PP-72 315-330 Watt**. [S.l.]: Yingli Solar, 2016.
- JO, Wonkyun *et al.* The cleaning effect of photovoltaic modules according to precipitation in the operation stage of a large-scale solar power plant. **Energies**, v. 16, n. 17, p. 6180, 2023. <https://doi.org/10.3390/en16176180>.
- JOHN, J. J. **Characterization of soiling loss on photovoltaic modules, and development of a novel cleaning system**. Tese (Doutorado) — Indian Institute of Technology Bombay, Mumbai, India, 2015.
- JOHN, Jim J. *et al.* Study of Soiling Loss on Photovoltaic Modules With Artificially Deposited Dust of Different Gravimetric Densities and Compositions Collected From Different Locations in India. **IEEE Journal of Photovoltaics**, [S. l.], v. 6, n. 1, p. 236-243, 2016. <http://dx.doi.org/10.1109/jphotov.2015.2495208>.
- JOSHI, Abhijeet *et al.* Experimental investigations on the performance of solar photovoltaic system for different industrial weather conditions with dust accumulation. **Materials Today: Proceedings**, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.637>.
- JUAIDI, Adel *et al.* Experimental validation of dust impact on-grid connected PV system performance in Palestine: an energy nexus perspective. **Energy Nexus**, p. 100082, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100082>.
- JUNG, David *et al.* Effects of soiling on agrivoltaic systems: Results of a case study in Chile. In: AGRIVOLTAICS2021 CONFERENCE: CONNECTING AGRIVOLTAICS WORLDWIDE, Freiburg, Germany. **AGRIVOLTAICS2021 CONFERENCE: connecting**

agrivoltaics worldwide. [S. l.]: AIP Publishing, 2022. <https://doi.org/10.1063/5.0107943>.

KABIR, Md Ahsan *et al.* Dust effect on photovoltaic output performance: comparative analysis and A case study in Dhaka, Bangladesh. In: 2021 INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTOMATION, CONTROL AND MECHATRONICS FOR INDUSTRY 4.0 (ACMI), 2021, Rajshahi, Bangladesh. **2021 International Conference on Automation, Control and Mechatronics for Industry 4.0 (ACMI)**. [S. l.]: IEEE, 2021.<https://doi.org/10.1109/acmi53878.2021.9528120>.

KALF, Yahya Mohammed; ATWAN, Ahmed F. The impact of some environmental variables on the performance of solar PV module. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 1325, n. 1, p. 012035, 2024. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1325/1/012035>.

KAGAN, Seth *et al.* Impact of non-uniform soiling on PV system performance and soiling measurement. In: 2018 IEEE 7TH WORLD CONFERENCE ON PHOTOVOLTAIC ENERGY CONVERSION (WCPEC) (A JOINT CONFERENCE OF 45TH IEEE PVSC, 28TH PVSEC & 34TH EU PVSEC), 2018, Waikoloa Village, HI. **2018 IEEE 7th world conference on photovoltaic energy conversion (WCPEC) (A joint conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC)**. [S. l.]: IEEE, 2018. <https://doi.org/10.1109/pvsc.2018.8547728>.

KALOGIROU, Soteris. **Solar energy engineering: proceses and systems**. San Diego: Elsevier, 2009.

KAMAL, Reham; ABDEL-SALAM, Mazen; NAYEL, Mohamed. Performance characteristic of a PV module as influenced by dust accumulation: theory versus experiment. **Journal of Engineering and Applied Science**, v. 70, n. 1, 2023. <https://doi.org/10.1186/s44147-023-00181-0>.

KASIM, Naseer K. *et al.* Experimental study for the effect of dust cleaning on the performance of grid-tied photovoltaic solar systems. **International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)**, v. 11, n. 1, p. 74, 2021. <https://doi.org/10.11591/ijece.v11i1.pp74-83>.

KAUNDILYA, Shivendra *et al.* Soiling effect on crystalline and thin-film technology PV modules for composite climate zone of India. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 11, p. 23275-23280, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.11.060>.

KAZEM, Hussein A. *et al.* A review of dust accumulation and cleaning methods for solar photovoltaic systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 276, p. 123187, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123187>.

KAZEM, Hussein A. *et al.* Dust and cleaning impact on the performance of photovoltaic: an outdoor experimental study. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v. 45, n. 1, p. 3107-3124, 2023. <https://doi.org/10.1080/15567036.2023.2191064>.

KAZEM, Hussein A. *et al.* Dust impact on photovoltaic/thermal system in harsh weather conditions. **Solar Energy**, v. 245, p. 308-321, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.09.012>.

KAZEM, Hussein A.; CHAICHAN, Miqdam 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**, v. 187, p. 30-38, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.05.036>.

KAZEM, Hussein A.; CHAICHAN, Miqdam T.; AL-WAELI, Ali H. A. A comparison of dust impacts on polycrystalline and monocrystalline solar photovoltaic performance: an outdoor experimental study. **Environmental Science and Pollution Research**, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21958-5>.

KAZMERSKI, Lawrence L. *et al.* Fundamental studies of adhesion of dust to PV module surfaces: chemical and physical relationships at the microscale. **IEEE Journal of Photovoltaics**, v. 6, n. 3, p. 719-729, 2016. <https://doi.org/10.1109/jphotov.2016.2528409>.

KESKIN, Vedat. Energy- and exergy-based economical and environmental (4E) evaluation of the influence of natural pollutants on PV array performance. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, 2024. <https://doi.org/10.1007/s10973-024-13160-1>.

KHALID, Haris M. *et al.* Dust accumulation and aggregation on PV panels: an integrated survey on impacts, mathematical models, cleaning mechanisms, and possible sustainable solution. **Solar Energy**, v. 251, p. 261-285, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.01.010>.

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

KHAN, Raja Ammar Tasadduq *et al.* Performance assessment and root-cause analysis of a deteriorating On-Grid Industrial PV System for the identification of newly originating power degrading defect. **Energy for Sustainable Development**, v. 76, p. 101306, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2023.101306>.

KHAZAAL, H. F. *et al.* Evaluation the influences of temperature, dust and shading on photovoltaic system performance. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 765, p. 012015, 2020. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/765/1/012015>.

KHODAKARAM-TAFTI, Amin; YAGHOUBI, Mahmood. Experimental study on the effect of dust deposition on photovoltaic performance at various tilts in semi-arid environment. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 42, p. 100822, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100822>.

KICHENE, Moadh *et al.* Performance investigation of a large-scale grid-tied PV plant under high plateau climate conditions: case study Ain El-Melh, Algeria. **Journal Européen des Systèmes Automatisés**, v. 56, n. 3, p. 483-492, 2023. <https://doi.org/10.18280/jesa.560316>.

KOK, Jasper F. *et al.* The physics of wind-blown sand and dust. **Reports on Progress in Physics**, v. 75, n. 10, p. 106901, 2012. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/75/10/106901>.

KONYU, Maruphong; KETJOY, Nipon; SIRISAMPHANWONG, Chatchai. Effect of dust on the solar spectrum and electricity generation of a photovoltaic module. **IET Renewable Power Generation**, v. 14, n. 14, p. 2759-2764, 2020. [10.1049/iet-rpg.2020.0456](https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2020.0456).

KRATOCHVIL, Jay A.; BOYSON, William Earl; KING, David L. **Photovoltaic array performance model.** [S. l.]: Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 2004. <https://doi.org/10.2172/919131>.

L., Sahana *et al.* Impact of soiling on energy yield of solar PV power plant and developing soiling correction factor for solar PV power forecasting. **European Journal of Energy Research**, v. 1, n. 2, p. 21-29, 2021. <https://doi.org/10.24018/ejenergy.2021.1.2.7>.

LAARABI, Bouchra *et al.* Chemical analysis of soiling of photovoltaic modules in different Moroccan areas. **Applied Solar Energy**, v. 57, n. 2, p. 120-127, 2021. <https://doi.org/10.3103/s0003701x21020055>.

LAARABI, Bouchra *et al.* Characterization of dust particles in South India and investigation on soiling image analysis for photovoltaic application. **Environmental Science and Pollution Research**, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22630-8>.

LAKSAHANI, U. C. *et al.* Design mechanism for solar panel cleaning process. In: 2021 10TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION AND AUTOMATION FOR SUSTAINABILITY (ICIAFS), 2021, Negombo, Sri Lanka. **2021 10th international conference on information and automation for sustainability (iciafs).** [S. l.]: IEEE, 2021. <https://doi.org/10.1109/iciafs52090.2021.9606104>.

LARICO, Elmer Rodrigo Aquino; CUTIPA, Jose Manuel Ramos; CALLATA, Leonidas Vilca. Effect of dust and rain on the performance of a photovoltaic system at more than 3800 m altitude. In: 2020 IEEE ENGINEERING INTERNATIONAL RESEARCH CONFERENCE (EIRCON), 2020, Lima, Peru. **2020 IEEE engineering international research conference (EIRCON).** [S. l.]: IEEE, 2020. <https://doi.org/10.1109/eircon51178.2020.9254058>.

LASFAR, Sara *et al.* Study of the influence of dust deposits on photovoltaic solar panels: Case of Nouakchott. **Energy for Sustainable Development**, v. 63, p. 7-15, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2021.05.002>.

LAWRENCE, Corey R.; NEFF, Jason C. The contemporary physical and chemical flux of aeolian dust: a synthesis of direct measurements of dust deposition. **Chemical Geology**, v. 267, n. 1-2, p. 46-63, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.02.005>.

LEE, Hyo-Mun *et al.* Power performance loss factor analysis of the a-Si BIPV window system based on the measured data of the BIPV test facility. **Applied Sciences**, v. 8, n. 9, p. 1645, 2018. <https://doi.org/10.3390/app8091645>.

LEÓN VARGAS, Fabian *et al.* Efecto de la suciedad en el desempeño de módulos fotovoltaicos en Bogotá. **Ingeniería**, v. 26, n. 2, p. 273-283, 2021. <https://doi.org/10.14483/23448393.16601>.

LEWIS, C. D. **Industrial and business forecasting methods:** a practical guide to exponential smoothing and curve fitting. London: Butterworth Scientific, 1982. 143 p. ISBN 0408005599.

LI, Fen *et al.* Evaluation index system for photovoltaic systems statistical characteristics under hazy weather conditions in central China. **IET Renewable Power Generation**, v. 11,

n. 14, p. 1794-1803, 2017. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2017.0259>.

LI, Xiaoyuan; MAUZERALL, Denise L.; BERGIN, Mike H. Global reduction of solar power generation efficiency due to aerosols and panel soiling. **Nature Sustainability**, v. 3, n. 9, p. 720-727, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0553-2>.

LI, Wan *et al.* Analysis of soiling of a 10-Year installation in the urban environment and tropical climate. In: SILICONPV 2022, THE 12TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON CRYSTALLINE SILICON PHOTOVOLTAICS, Konstanz, Germany. **Siliconpv 2022, the 12th international conference on crystalline silicon photovoltaics**. [S. l.]: AIP Publishing, 2023. <https://doi.org/10.1063/5.0140935>.

LIMA, Lutero Carmo de; FERREIRA, Leonardo de Araújo; MORAIS, Francisco Hedler Barreto de Lima. Performance analysis of a grid connected photovoltaic system in northeastern Brazil. **Energy for Sustainable Development**, v. 37, p. 79-85, abr. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2017.01.004>.

LIU, Fuguang *et al.* A method of calculating the daily output power reduction of PV modules due to dust deposition on its surface. **IEEE Journal of Photovoltaics**, v. 9, n. 3, p. 881-887, 2019. <https://doi.org/10.1109/jphotov.2019.2903086>.

LIU, Xueqing *et al.* Study on the adhesion characteristics of dust accumulation on solar photovoltaic glass. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, 2023. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c01630>.

LORENZO, Eduardo; ARAUJO, Gerardo L.; CUEVAS, Andrés. **Electricidad solar: ingeniería de los sistemas fotovoltaicos**. Seville: Progensa, 1994.

LÓPEZ, Gabriel *et al.* Design of a low-cost multiplexer for the study of the impact of soiling on PV panel performance. **Energies**, v. 14, n. 14, p. 4186, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14144186>.

LOPEZ-LORENTE, Javier *et al.* Characterizing soiling losses for photovoltaic systems in dry climates: A case study in Cyprus. **Solar Energy**, v. 255, p. 243-256, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.03.034>.

LUO, Wei *et al.* Long-term outdoor study of an organic photovoltaic module for building integration. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, 2024. <https://doi.org/10.1002/pip.3791>.

LUQUE, Enric Grau; ANTONANZAS-TORRES, Fernando; ESCOBAR, Rodrigo. Effect of soiling in bifacial PV modules and cleaning schedule optimization. **Energy Conversion and Management**, v. 174, p. 615-625, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.065>.

M. ABDELSALAM, Mohamed A. *et al.* Experimental study of the impact of dust on azimuth tracking solar PV in Sharjah. **International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)**, v. 11, n. 5, p. 3671, 2021. <https://doi.org/10.11591/ijece.v11i5.pp3671-3681>.

MACHADO, Andre *et al.* A systematic review on product recognition for aiding visually impaired people. **IEEE Latin America Transactions**, v. 19, n. 4, p. 592-603, 2021. <https://doi.org/10.1109/tla.2021.9448542>.

MAFTAH, Anas *et al.* Soiling investigation for PV and CSP system: experimental and ANN modelling analysis in two sites with different climate. **International Journal of Sustainable Energy**, p. 1-17, 2021. <https://doi.org/10.1080/14786451.2021.1965605>.

MAGHAMI, Mohammad Reza *et al.* Power loss due to soiling on solar panel: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 59, p. 1307-1316, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.044>.

MAIA, Magda Helena de Araújo. **Projeto: plano de desenvolvimento econômico e social - Fortaleza 2040 (Anexo IX – meio ambiente)**. Fortaleza: IPLANFOR, 2015. 95 p.

MAIER, Rachel *et al.* Potential of floating, parking, and agri photovoltaics in Germany. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 200, p. 114500, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114500>.

MAJEEED, Rizwan *et al.* Experimental investigation of soiling losses and a novel cost-effective cleaning system for PV modules. **Solar Energy**, v. 201, p. 298-306, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.03.014>.

MANI, Monto; PILLAI, Rohit. Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: research status, challenges and recommendations. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 9, p. 3124-3131, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.065>.

MARASHLI, Abdullah *et al.* Impact of accumulated dust on performance of two types of photovoltaic cells: evidence from the south of Jordan. **International Journal of Renewable Energy Development**, v. 11, n. 2, 2022. <https://doi.org/10.14710/ijred.2022.42625>.

MARKVART, Tomas. **Solar electricity**. 2. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2000. 298 p.

MATSUMOTO, Yasuhiro *et al.* PV-module soiling as a main photovoltaic system performance suppressor. In: 2020 IEEE 47TH PHOTOVOLTAIC SPECIALISTS CONFERENCE (PVSC), 2020, Calgary, OR. **2020 IEEE 47th photovoltaic specialists conference (PVSC)**. [S. l.]: IEEE, 2020. <https://doi.org/10.1109/pvsc45281.2020.9300387>.

MAXIM INTEGRATED. **DS18S20 High-Precision 1-Wire Digital Thermometer**. 2018.

MEHDI, Maryam *et al.* An experimental comparative analysis of different PV technologies performance including the influence of hot-arid climatic parameters: toward a realistic yield assessment for desert locations. **Renewable Energy**, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.01.082>.

MEHDI, Maryam *et al.* Modeling, assessment and characterization of soiling on PV Technologies. Toward a Better understanding of the Relation between dust deposition and performance losses. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 71, p. 104023, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.104023>.

MEHMOOD, Umer; AL-SULAIMAN, Fahad A.; YILBAS, B. S. Characterization of dust collected from PV modules in the area of Dhahran, Kingdom of Saudi Arabia, and its impact on protective transparent covers for photovoltaic applications. **Solar Energy**, v. 141, p. 203-209, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.11.051>.

MEMICHE, Meriem *et al.* Effects of dust, soiling, aging, and weather conditions on photovoltaic system performances in a Saharan environment—Case study in Algeria. **Global Energy Interconnection**, v. 3, n. 1, p. 60-67, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.gloei.2020.03.004>.

MICHELI, Leonardo *et al.* Analysis and mitigation of nonuniform soiling distribution on utility-scale photovoltaic systems. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 30, n. 3, p. 211-228, 2021. <https://doi.org/10.1002/pip.3477>.

MICHELI, Leonardo; MULLER, Matthew; KURTZ, Sarah. Determining the effects of environment and atmospheric parameters on PV field performance. In: 2016 IEEE 43RD PHOTOVOLTAIC SPECIALISTS CONFERENCE (PVSC), 2016, Portland, OR, USA. **2016 IEEE 43rd photovoltaic specialists conference (PVSC)**. [S. l.]: IEEE, 2016. <https://doi.org/10.1109/pvsc.2016.7749919>.

MISQUITA, Í. da S.; ZILLES, R. Soiling accumulation impact on PV modules installed at different tilted angles in São Paulo, Brazil. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 2180, n. 1, p. 012008, 2022. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2180/1/012008>.

MOHEYER, M. Gerardo *et al.* Notable changes in the performance of a photovoltaic system due to the dirt and cleaning cycles of PV-array. In: 2021 IEEE 48TH PHOTOVOLTAIC SPECIALISTS CONFERENCE (PVSC), 2021, Fort Lauderdale, FL, USA. **2021 IEEE 48th photovoltaic specialists conference (PVSC)**. [S. l.]: IEEE, 2021. <https://doi.org/10.1109/pvsc43889.2021.9518611>.

MONTGOMERY, Douglas C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. Tradução: Ana Maria Lima de Farias, Vera Regina Lima de Farias e. Flores. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

MORAES, Jeovanna C. S. *et al.* Análise comparativa dos efeitos da sujidade e do sombreamento em sistemas fotovoltaicos instalados em telhado. In: Congresso Brasileira de Energia Solar, IX, 2022, Florianópolis. **Anais CBENS 2022**. [S. l.]: ABENS, 2022. p. 1-9.

MOSTEFAOUI, Mohammed *et al.* Effect of sand dust accumulation on photovoltaic performance in the Saharan environment: southern Algeria (Adrar). **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 1, p. 259-268, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3496-7>.

MOURA, Ícaro Jael Mendonça *et al.* Caracterização dos períodos seco e chuvoso da cidade de Fortaleza (CE). **Ciência e Natura**, v. 37, 2015. <https://doi.org/10.5902/2179460x16206>.

MOURA, Renan C. *et al.* Analysis of losses by soiling and degradation: methodological proposal for applications in situ. In: 2017 IEEE 6TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON RENEWABLE ENERGY RESEARCH AND APPLICATIONS (ICRERA), 2017, San Diego,

CA. 2017 IEEE 6th international conference on renewable energy research and applications (ICRERA). [S. l.]: IEEE, 2017. <https://doi.org/10.1109/icrera.2017.8191107>.

MOUSER ELECTRONICS. **DHT11 Humidity & Temperature Sensor**. 2021. Disponível em: <https://www.mouser.com/datasheet/2/758/DHT11-Technical-Data-Sheet-Translated-Version-1143054.pdf>. Acesso em: 18 de março de 2024.

MUSSARD, Maxime; AMARA, Mohamed. Performance of solar photovoltaic modules under arid climatic conditions: a review. **Solar Energy**, v. 174, p. 409-421, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.08.071>.

MUSTAFA, Ramadan J. *et al.* Environmental impacts on the performance of solar photovoltaic systems. **Sustainability**, v. 12, n. 2, p. 608, 2020. [10.3390/su12020608](https://doi.org/10.3390/su12020608).

MYYAS, Ra'ed Nahar *et al.* A novel solar panel cleaning mechanism to improve performance and harvesting rainwater. **Solar Energy**, v. 237, p. 19-28, 2022. D. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.03.068>.

NAZIFIFARD, Mohammad; TORABI, Nazanin. Experimental analysis of dust accumulation on the panels of a microgrid-connected photovoltaic system in an arid climate. In: 2023 13TH SMART GRID CONFERENCE (SGC), 2023, Tehran, Iran, Islamic Republic of. **2023 13th smart grid conference (SGC)**. [S. l.]: IEEE, 2023. <https://doi.org/10.1109/sgc61621.2023.10459274>.

NDETO, Martin Paul *et al.* Aeolian dust distribution, elemental concentration, characteristics and its effects on the conversion efficiency of crystalline silicon solar cells. **Renewable Energy**, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.03.065>.

NDETO, Martin Paul *et al.* Correlating dust deposits with wind speeds and relative humidity to overall performance of crystalline silicon solar cells: An experimental study of Machakos County, Kenya. **Solar Energy**, v. 246, p. 203-215, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.09.050>.

NDIAYE, Ababacar *et al.* Study of the correlation between the dust density accumulated on photovoltaic module's surface and their performance characteristics degradation. In: **Innovation and interdisciplinary solutions for underserved areas**. Cham: Springer International Publishing, 2018. p. 31-42. ISBN 9783319729640. [10.1007/978-3-319-72965-7_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-72965-7_3).

NDIAYE, Mouhamadou Falilou *et al.* Photovoltaics systems performances improvement: problematic of dust waterless automatic cleaning on the photovoltaic solar panels surface. In: 2023 IEEE 11TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEMS AND CONTROL (ICSC), 2023, Sousse, Tunisia. **2023 IEEE 11th international conference on systems and control (ICSC)**. [S. l.]: IEEE, 2023. <https://doi.org/10.1109/icsc58660.2023.10449803>.

SAHOUANE, Nordine *et al.* Technical and economic study of the sand and dust accumulation impact on the energy performance of photovoltaic system in Algerian Sahara. **Renewable Energy**, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.01.033>.

NJOK, Armstrong O.; AKONJOM, Nsed A.; OGBULEZIE, Julie C. Design and performance

evaluation of photovoltaic systems with automatic dust wiper in a natural dusty environment. **Asian Journal of Physical and Chemical Sciences**, p. 1-15, 30 nov. 2022. <https://doi.org/10.9734/ajopacs/2022/v10i4186>.

NRG SYSTEMS. **NRG #40C Anemometer**. 2010. Disponível em: <https://www.nrgsystems.com/products/met-sensors/detail/40c-anemometer>. Acesso em: 26 Out. 2022.

NURJANAH, Siti; DEWI, Tresna; RUSDIANASARI. Dusting and soiling effect on PV panel performance: case study open-pit mining in south Sumatra, Indonesia. In: 2021 INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL AND INFORMATION TECHNOLOGY (IEIT), 2021, Malang, Indonesia. **2021 international conference on electrical and information technology (IEIT)**. [S. l.]: IEEE, 2021. <https://doi.org/10.1109/ieit53149.2021.9587351>.

NYGARD, Magnus Moe *et al.* Combined degradation and soiling with validation against independent soiling station measurements. **IEEE Journal of Photovoltaics**, p. 1-9, 2023. <https://doi.org/10.1109/jphotov.2023.3239752>.

OLIVEIRA, Iara F. B. de; VASCONCELOS, Leandro A.; FREITAS, Igor S. O. Impact of dirt on the performance of photovoltaic plants in the north of minas gerais. In: 2023 15TH IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRY APPLICATIONS (INDUSCON), 2023, São Bernardo do Campo, Brazil. **2023 15th IEEE international conference on industry applications (INDUSCON)**. [S. l.]: IEEE, 2023. <https://doi.org/10.1109/induscon58041.2023.10374784>.

OLIVARES, Douglas *et al.* Characterization of soiling on PV modules in the Atacama Desert. **Energy Procedia**, v. 124, p. 547-553, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.263>.

OLIVARES, Douglas *et al.* Determination of the soiling impact on photovoltaic modules at the coastal area of the Atacama Desert. **Energies**, v. 13, n. 15, p. 3819, 2020. <https://doi.org/10.3390/en13153819>.

OLIVARES, Douglas *et al.* Microstructural analysis of the PV module cementation process at the Solar Platform of the Atacama Desert. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 227, p. 111109, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111109>.

OLIVEIRA, Fernando Schuck de; PRIEB, César Wilhelm Massen; KRENZINGER, Arno. Impacto da sujidade na operação de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica. In: Congresso Brasileira de Energia Solar, IX, 2022, Florianópolis. **Anais CBENS 2022**. [S. l.]: ABENS, 2022. p. 1-5.

OSTERWALD, C. R. Translation of device performance measurements to reference conditions. **Solar Cells**, v. 18, n. 3-4, p. 269-279, 1986. [10.1016/0379-6787\(86\)90126-2](https://doi.org/10.1016/0379-6787(86)90126-2).

PALMETTO SOLAR. **Explain Like I'm 5: Solar Panels (ELI5)**. Disponível em: <https://palmetto.com/learning-center/blog/eli5-explain-like-im-5-solar-panels>. Acesso em: 06 Abr. 2023.

PARANHOS, G. d. B. d. C. **Detecção de anomalias utilizando métodos paramétricos e múltiplos classificadores.** 78 p. Tese (Doutorado) — Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação - ICMC-USP, 2014.

PAUDYAL, Basant Raj *et al.* Soiling-induced transmittance losses in solar PV modules installed in Kathmandu Valley. **Renewables: Wind, Water, and Solar**, v. 4, n. 1, 2017. <https://doi.org/10.1186/s40807-017-0042-z>.

PAUDYAL, Basant Raj; SHAKYA, Shree Raj. Dust accumulation effects on efficiency of solar PV modules for off grid purpose: A case study of Kathmandu. **Solar Energy**, v. 135, p. 103-110, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.05.046>.

PEDRINI, Danilo Cuzzuol; CATEN, Carla Schwengber ten. Método para aplicação de gráficos de controle de regressão no monitoramento de processos. **Production**, v. 21, n. 1, p. 106-117, 2011. <https://doi.org/10.1590/s0103-6513201100500001>.

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

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio (org.). **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL-CRESES, 2014.

PLESSIS, Armand A. du; STRAUSS, Johannes M.; RIX, Arnold J. Application of dust mitigation strategies to single-axis-tracking photovoltaic modules in the semi-arid areas of South Africa. In: 2019 INTERNATIONAL CONFERENCE ON CLEAN ELECTRICAL POWER (ICCEP), 2019, Otranto, Italy. **2019 international conference on clean electrical power (ICCEP)**. [S. l.]: IEEE, 2019. <https://doi.org/10.1109/iccep.2019.8890145>.

PRASAD, Hari Om; MAHANTA, S. S. Kalikinkar; BOJJAGANI, Sreekanth. Evaluation of particle pollution influence on loss of solar power generation between commercial and background areas in Lucknow, India. **Environment, Development and Sustainability**, 2023. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03359-x>.

POULADIAN-KARI, Arman *et al.* A novel solution for addressing the problem of soiling and improving performance of PV solar systems. **Solar Energy**, v. 241, p. 315-326, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.06.012>.

RABELO, Antônio David Sena *et al.* Estudo sobre sujidade em planta fotovoltaica localizada em zona urbana. In: 2º Congresso Brasileiro de Geração Distribuída, 2017, Fortaleza. **CBGD** 2017. [S. l.: s. n.]. p. 1-7.

RADONJIĆ, Ivana *et al.* Investigation of fly ash soiling effects on solar modules performances. **Solar Energy**, v. 220, p. 144-151, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.03.046>.

RAHBAR, Kiyarash *et al.* 3-D numerical simulation and experimental study of PV module self-cleaning based on dew formation and single axis tracking. **Applied Energy**, v. 316, p. 119119, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119119>.

RAHMAN, Habibur *et al.* Performance study of photovoltaic modules considering natural

dust impact on high altitude. In: 2022 2ND ASIAN CONFERENCE ON INNOVATION IN TECHNOLOGY (ASIANCON), 2022, Ravet, India. **2022 2nd asian conference on innovation in technology (ASIANCON)**. [S. l.]: IEEE, 2022. <https://doi.org/10.1109/asiancon55314.2022.9909087>.

RAINA, Gautam *et al.* Decoding the effects of soiling on bifacial gain from latitude mounted bifacial modules. In: 2021 IEEE 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON SMART TECHNOLOGIES FOR POWER, ENERGY AND CONTROL (STPEC), 2021, Bilaspur, Chhattisgarh, India. **2021 IEEE 2nd international conference on smart technologies for power, energy and control (STPEC)**. [S. l.]: IEEE, 2021.10.1109/stpec52385.2021.9718682.

RAINA, Gautam; SINHA, Sunanda. Experimental investigations of front and rear side soiling on bifacial PV module under different installations and environmental conditions. **Energy for Sustainable Development**, v. 72, p. 301-313, 2023. 10.1016/j.esd.2023.01.001.

RAINA, Gautam; SHARMA, Shubham; SINHA, Sunanda. Analyzing the impact of dust accumulation on power generation and bifacial gain. **IEEE Transactions on Industry Applications**, p. 1-8, 2022. <https://doi.org/10.1109/tia.2022.3189613>.

RAMLI, Makbul A. M. *et al.* On the investigation of photovoltaic output power reduction due to dust accumulation and weather conditions. **Renewable Energy**, v. 99, p. 836-844, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.07.063>.

RAO, Roshan R.; MANI, Monto; RAMAMURTHY, Praveen C. An updated review on factors and their inter-linked influences on photovoltaic system performance. **Heliyon**, v. 4, n. 9, p. e00815, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00815>.

RASHID, Mahnoor *et al.* Effect of dust accumulation on the performance of photovoltaic modules for different climate regions. **Heliyon**, v. 9, n. 12, p. e23069, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23069>.

RASHID, Mahnoor; YOUSIF, Muhammad. Effect of dust deposition on performance of photovoltaic module and methods of cleaning for improved performance in Pakistan. In: 2023 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON EMERGING TRENDS IN ENGINEERING, SCIENCES AND TECHNOLOGY (ICES&T), 2023, Bahawalpur, Pakistan. **2023 IEEE international conference on emerging trends in engineering, sciences and technology (ICES&T)**. [S. l.]: IEEE, 2023. <https://doi.org/10.1109/icest56843.2023.10138862>.

RATHOD, Arun Pratap Singh; MISHRA, Pawan K.; MISHRA, Abhilasha. Effect of dust accumulation on efficiency of solar panels in clement town region (Dehradun) India: an empirical study. **NanoWorld Journal**, v. 9, S1, p. 326-330, 2023. 10.17756/nwj.2023-s1-064.

REGES, Jonas Platini *et al.* Sizing methodology of floating photovoltaic plants in dams of semi-arid areas. **Journal of Solar Energy Engineering**, v. 144, n. 4, 2022. <https://doi.org/10.1115/1.4052959>.

REHMAN, Tauseef-ur *et al.* Global perspectives on advancing photovoltaic system performance—A state-of-the-art review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 207, p. 114889, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114889>.

REZENDE, Vinícius Gouveia Scartezini de. **Análise das perdas de produtividade em geradores fotovoltaicos por efeitos de sujidade.** 2018. 140 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Energia), Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

REZENDE, Vinícius Gouveia Scartezini de; ZILLES, Roberto. Análise das perdas de produtividade em geradores fotovoltaicos por efeito de sujidade. In: Congresso Brasileiro De Energia Solar, 7., 2018, Gramado. **Anais [...].** Gramado: ABENS, 2018. p. 1-8.

RIBEIRO, S. *et al.* Literature review on the theory of constraints applied in the software development process. **IEEE Latin America Transactions**, v. 16, n. 11, p. 2747-2756, 2018. <https://doi.org/10.1109/tla.2018.8795116>.

ROHDE, Robert A.; COSTA, Jucá. **Ficheiro:** Solar spectrum pt.svg. 2020. Disponível em: https://pt.m.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Solar_spectrum_pt.svg. Acessado em: 21 Mar. 2023.

ROMANHOLO, Pedro Victor Valadares *et al.* Sujidade depositada sobre módulos fotovoltaicos instalados em Goiânia: morfologia e composição química. In: Congresso Brasileiro De Energia Solar, 7., 2018, Gramado. **Anais [...].** Gramado: ABENS, 2018. p. 1-8.

ROUMPAKIAS, Elias; STAMATELOS, Tassos. Surface dust and aerosol effects on the performance of grid-connected photovoltaic systems. **Sustainability**, v. 12, n. 2, p. 569, 11 Jan. 2020. <https://doi.org/10.3390/su12020569>.

SAILOR, D.J.; ANAND, J.; KING, R.R.. Photovoltaics in the built environment: a critical review. **Energy And Buildings**, [S.l.], v. 253, p. 111479, 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111479>.

SAKARAPUNTHIP, Nattakarn *et al.* Effects of dust accumulation and module cleaning on performance ratio of solar rooftop system and solar power plants. **Japanese Journal of Applied Physics**, v. 56, n. 8S2, p. 08ME02, 2017. <https://doi.org/10.7567/jjap.56.08me02>.

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

SALAMAHI, Tareq *et al.* Effect of dust and methods of cleaning on the performance of solar PV module for different climate regions: comprehensive review. **Science of The Total Environment**, v. 827, p. 154050, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154050>.

SÁNCHEZ-BARROSO, Gonzalo *et al.* Markov chains estimation of the optimal periodicity for cleaning photovoltaic panels installed in the Dehesa. **Renewable Energy**, v. 179, p. 537-549, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.07.075>.

SANTHAKUMARI, Manju; SAGAR, Netramani. A review of the environmental factors degrading the performance of silicon wafer-based photovoltaic modules: failure detection methods and essential mitigation techniques. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 110, p. 83-100, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.024>.

SARAEI, Farshad *et al.* Effect of cleaning, cooling and shading on current and electrical power of photovoltaic panels. In: 2019 IRANIAN CONFERENCE ON RENEWABLE ENERGY & DISTRIBUTED GENERATION (ICREDG), 2019, Tehran, Iran. **2019 Iranian conference on renewable energy & distributed generation (ICREDG)**. [S. l.]: IEEE, 2019. <https://doi.org/10.1109/icredg47187.2019.194255>.

SARVER, Travis; AL-QARAGHULI, Ali; KAZMERSKI, Lawrence L. A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: history, investigations, results, literature, and mitigation approaches. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 22, p. 698-733, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.065>.

SATPATHY, Priya Ranjan; SHARMA, Renu. Power and mismatch losses mitigation by a fixed electrical reconfiguration technique for partially shaded photovoltaic arrays. **Energy Conversion And Management**, [S.l.], v. 192, p. 52-70, 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2019.04.039>.

SCANNAVINO, Katia Romero Felizardo *et al.* **Revisão Sistemática da Literatura em Engenharia de Software: teoria e prática**. 2017. Rio de Janeiro: Elsevier.

SCHILL, Christian *et al.* **Soiling Losses – Impact on the Performance of Photovoltaic Power Plants**. Report IEA-PVPS T13-22: ISBN 978- 3-907281-09-3, 2022.

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

SEMAOUI, S. *et al.* Experimental investigation of soiling impact on grid connected PV power. **Energy Reports**, v. 6, p. 302-308, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.08.060>.

SEN, P. K. Estimates of the regression coefficient based on kendalls tau. **Journal of the American Statistical Association**, Taylor and Francis Group, v. 63, n. 324, p. 1379–1389, 1968.

ŞEVIK, Seyfi; AKTAŞ, Ahmet. Performance enhancing and improvement studies in a 600 kW solar photovoltaic (PV) power plant; manual and natural cleaning, rainwater harvesting and the snow load removal on the PV arrays. **Renewable Energy**, v. 181, p. 490-503, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.09.064>.

SHADID, Reem *et al.* Investigation of weather conditions on the output power of various photovoltaic systems. **Renewable Energy**, p. 119202, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119202>.

SHAH, Ali Hasan *et al.* The influence of cleaning frequency of photovoltaic modules on power losses in the desert climate. **Sustainability**, v. 12, n. 22, p. 9750, 2020. <https://doi.org/10.3390/su12229750>.

SHAPSOUGH, Salsabeel *et al.* An IoT-based remote IV tracing system for analysis of city-

wide solar power facilities. **Sustainable Cities and Society**, v. 57, p. 102041, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102041>.

SHARIAH, Adnan; AL-IBRAHIM, Ehab. Impact of dust and shade on solar panel efficiency and development of a simple method for measuring the impact of dust in any location. **Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems**, v. 11, n. 2, p. 1-14, 2023. <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d11.0448>.

SHENOUDA, R. et al. Influence of vibration time on dust accumulation on PV panels that operate light posts. **Energy Reports**, v. 8, p. 309-318, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.10.151>.

SISODIA, Anil Kumar; MATHUR, Ram Kumar. Impact of bird dropping deposition on solar photovoltaic module performance: a systematic study in Western Rajasthan. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 30, p. 31119-31132, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06100-2>.

SISODIA, Anil Kumar; MATHUR, Ramkumar. Performance enhancement of solar photovoltaic (PV) module using a novel flat plate (NFP) glass cover by reducing the effect of bird dropping (BD) settlement. **Environmental Science and Pollution Research**, n. 29, p. 6104-6124, 2022.

SOARES JÚNIOR, Jair Gomes; CRUZ, Silvia Ramos; AMARAL, Leonardo Santos. Impacto da sujidade sobre o desempenho de sistemas fotovoltaicos. In: Congresso Brasileiro De Energia Solar, 7., 2018, Gramado. **Anais [...]**. Gramado: ABENS, 2018. p. 1-8.

SOUZA, José Janiere Silva de; CARVALHO, Paulo Cesar Marques de. Estimativa da taxa de sujidade da planta fotovoltaica do IFCE – Campus Cedro: um estudo de caso. In: Congresso Brasileira de Energia Solar, X, 2024, Natal. **Anais [...]**. [S.l.]: ABENS, 2024. <https://doi.org/10.59627/cbens.2024.2341>.

SOUZA, Tiago L. S. de; LIMA, Regina L. F. A.; LIMA JÚNIOR, Claudemiro De. Dirt on photovoltaic modules and efficient energy generation in the Brazilian semiarid. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 26, n. 5, p. 321-326, 2022. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v26n5p321-326>.

SOZA, Douglas O. et al. Analysis of the local factors that influence the cementation of soil and effects on PV generation at the plataforma solar del Desierto de Atacama, Chile. In: ISES SOLAR WORLD CONGRESS 2019/IEA SHC INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOLAR HEATING AND COOLING FOR BUILDINGS AND INDUSTRY 2019, 2019, Santiago, Chile. **ISES solar world congress 2019/IEA SHC international conference on solar heating and cooling for buildings and industry 2019**. Freiburg, Germany: International Solar Energy Society, 2019. <https://doi.org/10.18086/swc.2019.19.08>.

SPUHL, Celso Carlos Soares; ASANO, Patrícia Teixeira Leite; BENEDITO, Ricardo da Silva. Estudo sobre a perda de desempenho causada pelo acúmulo de sujeira depositado nos módulos fotovoltaicos da usina da UFABC - Campus Santo André - SP. In: Congresso Brasileira de Energia Solar, IX, 2022, Florianópolis. **Anais CBENS 2022**. [S. l.]: ABENS, 2022. p. 1-10.

STYSZKO, Katarzyna *et al.* An analysis of the dust deposition on solar photovoltaic modules. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 9, p. 8393-8401, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1847-z>.

SULAIMAN, Shaharin A. *et al.* Impact of soiling rate on solar photovoltaic panel in Malaysia. **MATEC Web of Conferences**, v. 225, p. 04008, 2018. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201822504008>.

TAKEUCHI, Renan de Oliveira Alves *et al.* Avaliação físico-química da sujidade depositada sobre módulos fotovoltaicos instalados em zonas climáticas do Paraná, Brasil. In: Congresso Brasileiro de Energia Solar, IX, 2022, Florianópolis. **Anais CBENS 2022**. [S. l.]: ABENS, 2022. p. 1-9.

TANESAB, Julius *et al.* Seasonal effect of dust on the degradation of PV modules performance deployed in different climate areas. **Renewable Energy**, v. 111, p. 105-115, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.03.091>.

TANESAB, Julius *et al.* Temporary performance degradation of photovoltaic street light in Kupang city, Nusa Tenggara Timur province, Indonesia. **E3S Web of Conferences**, v. 190, p. 00018, 2020. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019000018>.

TARIGAN, Elieser. The effect of dust on solar PV system energy output under urban climate of Surabaya, Indonesia. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1373, p. 012025, 2019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1373/1/012025>.

THEIL, H. A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis, part 3. In: **Proceedings of Koninklijke Nederlandse Akademie van Weinenschapen A.**, v. 53, p. 1397–1412, 1950.

THONGSUWAN, W. *et al.* Antireflective, photocatalytic, and superhydrophilic coating prepared by facile sparking process for photovoltaic panels. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05733-7>.

TIWARI, Shruti; RANI, Pooja; PATEL, Ram Narayan. Examining the economic viability of a solar panel dust cleaning. In: 2019 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL, COMPUTER AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES (ICECCT), 2019, Coimbatore, India. **2019 IEEE international conference on electrical, computer and communication technologies (ICECCT)**. [S. l.]: IEEE, 2019. 10.1109/icecct.2019.8869011.

TOBOSQUE, P. *et al.* Extreme arid conditions: association among soiling characteristics, transmittance loss and climatic conditions. **Solar Energy**, v. 240, p. 13-26, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.05.020>.

TONOLO, Édwin Augusto *et al.* Study of the performance reduction due to the dirt effect in the photovoltaic systems of UTFPR - Curitiba. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 61, n. spe, 2018. <https://doi.org/10.1590/1678-4324-smart-2018000240>.

TONOLO, Édwin Augusto; MARIANO, Juliana D'Angela; URBANETZ JUNIOR, Jair. Análise do efeito do acúmulo de sujeira nos sistemas fotovoltaicos da UTFPR – Câmpus

Curitiba. In: Congresso Brasileiro De Energia Solar, 7., 2018, Gramado. **Anais [...]**. Gramado: ABENS, 2018. p. 1-8.

TOUATI, Farid *et al.* Investigation of solar PV performance under Doha weather using a customized measurement and monitoring system. **Renewable Energy**, v. 89, p. 564-577, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.12.046>.

TOUATI, Farid *et al.* Long-term performance analysis and power prediction of PV technology in the State of Qatar. **Renewable Energy**, v. 113, p. 952-965, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.06.078>.

TOUHAMI, Ghaitaoui *et al.* Evaluation experimental of the impact of Saharan climate conditions on the infinity organic photovoltaic module performance. **Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering**, p. 1-11, 2022. <https://doi.org/10.1080/1448837x.2022.2108585>.

TRIPATHI, Abhishek Kumar; ARUNA, M.; MURTHY, Ch S. N. Performance evaluation of PV panel under dusty condition. **International Journal of Renewable Energy Development**, v. 6, n. 3, p. 225, 2017. <https://doi.org/10.14710/ijred.6.3.225-233>.

ULLAH, Asad *et al.* Investigation of optimal tilt angles and effects of soiling on PV energy production in Pakistan. **Renewable Energy**, v. 139, p. 830-843, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.114>.

ULLAH, Asad *et al.* Investigation of soiling effects, dust chemistry and optimum cleaning schedule for PV modules in Lahore, Pakistan. **Renewable Energy**, v. 150, p. 456-468, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.090>.

URREJOLA, Elias *et al.* Effect of soiling and sunlight exposure on the performance ratio of photovoltaic technologies in Santiago, Chile. **Energy Conversion and Management**, v. 114, p. 338-347, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.016>.

UMAR, Shayan *et al.* A building integrated solar PV surface-cleaning setup to optimize the electricity output of PV modules in a polluted atmosphere. **Renewable Energy**, p. 119122, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119122>.

VALERINO, Michael *et al.* Seasonal photovoltaic soiling: analysis of size and composition of deposited particulate matter. **Solar Energy**, v. 227, p. 44-55, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.08.080>.

VEDULLA, Gowtham; GEETHA, Anbazhagan; SENTHIL, Ramalingam. Review of strategies to mitigate dust deposition on solar photovoltaic systems. **Energies**, v. 16, n. 1, p. 109, 2022. <https://doi.org/10.3390/en16010109>.

VIAN, Ângelo *et al.* **Energia Solar: fundamentos, tecnologia e aplicações**. São Paulo: Blicher, 2021. 130 p.

VUMBUGWA, M. *et al.* Effects of current mismatch due to uneven soiling on the performance of multi-crystalline silicon module strings. **Journal of Energy in Southern Africa**, v. 31, n. 1, p. 62-72, 2020. <https://doi.org/10.17159/2413-3051/2020/v31i1a7571>.

WALWIL, Husam M. *et al.* Comparative studies of encapsulation and glass surface modification impacts on PV performance in a desert climate. **Solar Energy**, v. 142, p. 288-298, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.12.020>.

WANG, Haidong; MENG, Xiangzhe; CHEN, Jianbo. Effect of air quality and dust deposition on power generation performance of photovoltaic module on building roof. **Building Services Engineering Research and Technology**, v. 41, n. 1, p. 73-85, 2019. <https://doi.org/10.1177/0143624419868806>.

WANG, WanTing; YANG, Hongxing; XIANG, ChangYing. Green roofs and facades with integrated photovoltaic system for zero energy eco-friendly building – A review. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 60, p. 103426, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103426>.

WERNER, Liane; ARGENTA, Aline da Silva; SOARES, Felipe. Análise do desempenho dos gráficos de controle CUSUM e EWMA: estudo comparativo com uso de simulação. **Cadernos do Ime - Série Estatística**, [S.l.], v. 47, n. 1, p. 17-34, 2020. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. <http://dx.doi.org/10.12957/cadest.2019.51576>.

WILLOUGHBY, Alexander A.; OSINOWO, Muritala O. Development of an electronic load I-V curve tracer to investigate the impact of Harmattan aerosol loading on PV module performance in southwest Nigeria. **Solar Energy**, v. 166, p. 171-180, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.03.047>.

WINCK, André Luís. **Efeitos da distribuição espectral da radiação solar na caracterização de dispositivos fotovoltaicos de diferentes tecnologias**. 2021. 142 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2021.

WU, Shing-Lih; CHEN, Hung-Cheng; PENG, Kai-Jun. Effect of dust deposition on solar panel in solar power generation. **Sensors and Materials**, v. 35, n. 7, p. 2371, 2023. <https://doi.org/10.18494/sam4441>.

XIONG, Changquan; ZHANG, Yuning; YUAN, Qiang. Characterization of dust on the surface of photovoltaic panels in low latitude and high altitude plateau areas. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 2356, n. 1, p. 012007, 2022. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2356/1/012007>.

YADAV, Satish Kumar *et al.* Assessment of soiling impacts and cleaning frequencies of a rooftop BAPV system in composite climates of India. **Solar Energy**, v. 242, p. 119-129, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.07.022>.

YAO, Ming *et al.* A review of capacity allocation and control strategies for electric vehicle charging stations with integrated photovoltaic and energy storage systems. **World Electric Vehicle Journal**, v. 15, n. 3, p. 101, 2024. <https://doi.org/10.3390/wevj15030101>.

YAZDANI, Hamed; YAGHOUBI, Mahmood. Dust deposition effect on photovoltaic modules performance and optimization of cleaning period: a combined experimental-numerical study. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 51, p. 101946, 2022.

[https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101946.](https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101946)

YAZDANI, Hamed; YAGHOUBI, Mahmood. Techno-economic study of photovoltaic systems performance in Shiraz, Iran. **Renewable Energy**, v. 172, p. 251-262, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.012>.

YINGLI SOLAR. **YGE 60 CELL SERIES**. [S.I]: Yingli Solar, 2008.

YOUSSIF, Jabar H. *et al.* Artificial neural network modelling and experimental evaluation of dust and thermal energy impact on monocrystalline and polycrystalline photovoltaic modules. **Energies**, v. 15, n. 11, p. 4138, 2022. <https://doi.org/10.3390/en15114138>.

YULIZAR, David *et al.* Performance analysis comparison of DHT11, DHT22 and DS18B20 as temperature measurement. In: YULIZAR, David *et al.* **Proceedings of the 2nd international conference on science education and sciences 2022 (ICSES 2022)**. Dordrecht: Atlantis Press International BV, 2023. p. 37-45. https://doi.org/10.2991/978-94-6463-232-3_5.

ZAGO, Vincenzo Augusto. **Avaliação da aplicação de gráficos de controle com memória em uma indústria de papel e embalagens**. 2009. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009

ZILLES, Roberto; MACEDO, Wilson Negrão; GALHARDO, Marcos André Barros; OLIVEIRA, Sérgio Henrique Ferreira de. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica**. 1^a Ed. São Paulo: Oficina de Textos, v. 1, 208f, 2012.

ZITOUNI, Houssain *et al.* Experimental investigation and modeling of photovoltaic soiling loss as a function of environmental variables: a case study of semi-arid climate. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 221, p. 110874, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110874>.

ZITOUNI, Houssain *et al.* Experimental investigation of the soiling effect on the performance of monocrystalline photovoltaic systems. **Energy Procedia**, v. 157, p. 1011-1021, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.268>.

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

ZORRILLA-CASANOVA, J. *et al.* Analysis of dust losses in photovoltaic modules. In: WORLD RENEWABLE ENERGY CONGRESS – SWEDEN, 8–13 MAY, 2011, LINKÖPING, SWEDEN. **World renewable energy congress – sweden, 8–13 may, 2011, Linkoping, sweden**. [S. I.]: Linköping University Electronic Press, 2011. ISBN 9789173930703. <https://doi.org/10.3384/ecp110572985>.

APÊNDICE A - PRODUÇÃO VINCULADA À PESQUISA

Artigo Publicado:

SOUZA, José Janiere Silva de; CARVALHO, Paulo C. M.; BARROSO, Giovanni Cordeiro. Revisão sistemática da literatura sobre sujidade em sistemas fotovoltaicos. In: Congresso Brasileira de Energia Solar, IX, 2022, Florianópolis. **Anais** [...]. [S.I.]: ABENS, 2022. p. 1-10. <https://doi.org/10.59627/cbens.2022.1050>.

SOUZA, José Janiere Silva de; CARVALHO, Paulo Cesar Marques de; BARROSO, Giovanni Cordeiro. Analysis of the characteristics and effects of soiling natural accumulation on photovoltaic systems: a systematic review of the literature. **Journal of Solar Energy Engineering**, [S.I.], p. 1-21, 2022. ASME International. <http://dx.doi.org/10.1115/1.4056453>.

SOUZA, José Janiere Silva de; CARVALHO, Paulo Cesar Marques de; PEREIRA, Renata Imaculada Soares. Efeitos da sujidade no desempenho elétrico de uma planta fotovoltaica: um estudo de caso no LEA - UFC. **Conexões - Ciência e Tecnologia**, [S.I.], v. 17, p. e022011, 2023. ISSN 2176-0144. <https://doi.org/10.21439/conexoes.v17i0.2724>.

SOUZA, José Janiere Silva de; CARVALHO, Paulo Cesar Marques de; DUPONT, Ivonne Montero. Efeitos da mitigação manual de sujidade no desempenho de uma planta fotovoltaica em ambiente urbano. **Revista Brasileira de Energia**, v. 30, n. 1, 2024. <https://doi.org/10.47168/rbe.v30i1.845>.

SOUZA, José Janiere Silva de; CARVALHO, Paulo Cesar Marques de. Estimativa da taxa de sujidade da planta fotovoltaica do IFCE – Campus Cedro: um estudo de caso. In: Congresso Brasileira de Energia Solar, X, 2024, Natal. **Anais** [...]. [S.I.]: ABENS, 2024. <https://doi.org/10.59627/cbens.2024.2341>.

SOUZA, José Janiere S. de; CARVALHO, Paulo C. M. Experimental investigation of the soiling impact on the generation of a photovoltaic plant in an urban area of the Brazilian semiarid. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 73, p. 104153, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.104153>.

APÊNDICE B – EPs ANALISADOS DURANTE A RSL

Quadro 6 – Estudos experimentais sob condições externas que descrevem as características físico-químicas da sujidade e os efeitos de sua acumulação natural no desempenho de sistemas.

(continua)

Citação	Local do estudo	Tecnologia FV	Período	Principais conclusões
Aïssa <i>et al.</i> (2016)	Doha (Qatar)	p-Si	Não específica	A sujidade é composta por Carbono (C) (24,14%), Oxigênio (O) (61,46%) e, em menor proporção, Mg, Al, Si, Ca e Fe. Os principais minerais são: calcita, silimanita, olivina, akermanita e quartzo. A limpeza aumenta a I_{sc} em até 38% e a potência em 28%.
Javed <i>et al.</i> (2016)	Doha (Qatar)	p-Si	1 ano	O CI varia entre -0,52%/dia (semestral) e -0,55%/dia (bimestral). Tempestades de areia podem reduzir o CI em até 45%/dia.
Tanesab <i>et al.</i> (2017)	Perth (Austrália) e Sonda Oriental (Indonésia)	a-Si, p-Si e m-Si	1 ano	Em ROTA (<i>Renewable Energy Outdoor Testing Area</i>), a sujidade contém principalmente O (34%), Si (29,14%), Ca (13,21%), Al (9,26%), Fe (8,83%) e K (5,56%). Em PNK (<i>Politeknik Negeri Kupang</i>), prevalecem Ca (31,20%), O (26,68%), Si (19,42), Fe (9,03%), Al (7,28%), K (4,08%) e P (2,31%). As perdas de energia variam de 6-8% em ROTA e entre 16-19% em PNK, sendo p-Si o módulo mais afetado.
Tripathi, Aruna e Murthy (2017)	Chitradurga (Índia)	p-Si	5 dias	Após 5 dias, A I_{sc} reduz 39,58% e a potência diminui 43,18%. O SRatio cai de 77,55% para 56,80%. A análise revela partículas com formas diversas, compostas por O (51,80%), C (25,90%) e Fe (17,51%).
Conceição <i>et al.</i> (2018)	Évora e Alter do Chão (Portugal)	p-Si	1 dia	Em Alter do Chão, detectam-se aluminossilicatos, halita, Al, S e Cl. Em Évora, as amostras E6 contêm aluminossilicatos, quartzo e calcita, enquanto N6 possui óxidos de ferro, calcita, gesso e rutilo. Tempestades de areia em Évora reduzem a potência em 8% e a I_{sc} em 3%.
Fraga <i>et al.</i> (2018)	Minas Gerais (Brasil)	p-Si	43 dias	A potência reduz 13,70% no período seco e 6,50% após chuvas. Os principais minerais são quartzo, hematita, caulinita, calcita e muscovita. Os principais: Si, Fe, Al, Ca e S. Diâmetro das partículas variam entre 10,50 e 51,50 µm.

(continuação)

Citação	Local do estudo	Tecnologia FV	Período	Principais conclusões
Ilse <i>et al.</i> (2018b)	Doha (Qatar)	m-Si	28 dias	As amostras contêm calcita (47-53%) e dolomita (25-29%), com partículas de 0,60 a 50 µm. CI varia em média 0,54%/dia em outubro, com perdas entre 14% e 16% após 28 dias de exposição.
Ferrada <i>et al.</i> (2019)	Deserto do Atacama (Chile)	p-Si e CdTe	10 meses	As partículas em diferentes localidades variam de 1 a 130 µm, predominando Oxigênio (O) e Silício (Si). Os principais minerais identificados são albita, anortita, calcita, quartzo e outros. Após 10 meses, a corrente elétrica reduz em 40% e a energia em 45%.
Hachicha, Al-Sawafta e Said (2019)	Sharjah (Emirados Árabes Unidos)	p-Si	5 meses	As partículas variam entre 1,61 e 38,40 µm, com Oxigênio (46,10%) e Carbono (20,30%) como principais elementos. Após 2 semanas, a eficiência cai de 37,63% a 14,11%, e após 5 meses, a perda de energia atinge 12,70%.
Kazem e Chaichan (2019)	Shinas, Liwa, Sohar, Al-Khabourah, Al-Suwaiq e Muscat (Omã)	m-Si	1 ano	Liwa e Sohar apresentam maior quantidade de partículas e fumaça, com Al-Khabourah e Muscat contendo sais de Na e óxido de cálcio. A eficiência cai até 18% em Liwa.
Zitouni <i>et al.</i> (2019)	Benguerir (Marrocos)	m-Si	6 meses	A diferença na produção entre módulos limpos e sujos é de 4,56 kWh em dias secos e 0,03 kWh em dias chuvosos. Após 43 dias de seca, a perda média é de 2,70 kWh/dia, com taxa de sujidade variando de 0,32%/dia no seco a 0,02%/dia no chuvoso.
Chen <i>et al.</i> (2020)	Hangzhou (China)	m-Si	2 semanas	As partículas contêm Si (20,63%), Ca (9,22%), Al (8,69%), Fe (8,49%) e outros elementos em menor proporção. Após 2 semanas, a produção reduz em 13,90%, passando para 7,07% após uma chuva.
Dida <i>et al.</i> (2020)	Ouargla (Argélia)	m-Si e p-Si	2 meses	A análise de XRF identifica Si (52,16%), Fe (16,69%) e outros elementos, com acúmulo de 2,69 g/m² de poeira resultando em 5,71% de perda de potência e 32,85% de redução na geração de uma usina após tempestade de areia.

(continuação)

Citação	Local do estudo	Tecnologia FV	Período	Principais conclusões
Majeed <i>et al.</i> (2020)	Islamabad (Paquistão)	p-Si e m-Si	2 meses	As partículas variam de 0,50 µm a 200 µm, contendo O (48,36%) e C (25,26%). A sujidade causa perda de potência de 11,13% a 19,33% em módulos m-Si e de 7,95% a 13,80% em p-Si. Com 10,50 g/m ² de deposição, a potência reduz em 36,75% (m-Si) e 26,25% (p-Si).
Ullah <i>et al.</i> (2020)	Lahore (Paquistão)	p-Si	4 meses	A análise identifica C (46%), O (30,40%), Si (8,70%), Al (3,20%), Fe (3,20%), Ca (2,60%) e T _a (2,50%). Minerais: quartzo (50%), alumina, hematita, cianita e calcita. Após 42 dias, a perda de potência varia entre 45% (0°) e 8,30% (90°), com perda diária de 1,12% para módulos bifaciais a 30°.
Alawasa <i>et al.</i> (2021)	Omã	p-Si	16 meses	No 1º ciclo de limpeza (32 dias), a perda de rendimento específico é de 18,20%, enquanto no 2º ciclo (73 dias) atinge 31,13%. No 3º ciclo, fortes chuvas promovem limpeza natural, com predominância de quartzo, óxido de sódio e óxido de cálcio.
Azouzoute <i>et al.</i> (2021a)	Benguerir (Marrocos)	m-Si	1 ano	Em P1 (chuvas intensas), o SRatio chega a 1 com redução de até 5% e SRate de 0,0079%/dia. Em P2 (chuvas leves), o SRatio varia de 0,74 a 0,84, com SRate estimado em 0,14%/dia. Compostos principais: quartzo, dolomita, calcita e silicato de potássio e alumínio.
Chanchangi <i>et al.</i> (2021)	Kano (Nigéria)	p-Si, m-Si, CdTe e a-Si	17 meses	A eficiência reduz em 71% para p-Si e m-Si, 77% para CdTe e 78% para a-Si, com perdas de energia entre 68,60% e 78,30%. Amostras de sujidade contêm quartzo, calcita, ilita, microline e albite, com partículas >100 µm.
Ehsan <i>et al.</i> (2021)	Tiruchirappalli (Índia)	m-Si	2 meses	Módulos m-Si revestidos aumentam a geração instantânea em 10,82% comparados aos não revestidos. A Espectroscopia Dispersiva de Energia (<i>Energy Dispersive Spectroscopy - EDS</i>) revela a presença de O (50%–55%), Si (22%–26%) e Al (12%–13%).
Farahmand <i>et al.</i> (2021)	Teerã (Irã)	m-Si	4 meses	As partículas contêm Al, Fe, Cr, Ni, Mn, Zn, Cd e Pb, com tamanho entre 2,37 e 3,92 µm. Módulos a 35° reduzem I_{sc} em 8,42% (verão) e 27,27% (inverno). Para módulos a 0°, a redução é de até 39,52% no inverno.

(continuação)

Citação	Local do estudo	Tecnologia FV	Período	Principais conclusões
Javed <i>et al.</i> (2021)	Doha (Qatar)	p-Si	2 anos	Perdas entre 6% e 23% são identificadas devido à deposição mensal, com composição de Ca (70%), Si (11%), Fe (5%), Mg (4,80%), Al (4%), K (0,70%) e Na (0,50%).
M. Abdelsalam <i>et al.</i> (2021)	Sharjah (Emirados Árabes Unidos)	p-Si	5 meses	As partículas têm 18 µm de diâmetro médio, contendo O (45,30%), C (29,30%), Ca (8,80%) e Si (6,60%). Principais minerais: óxido de cálcio, quartzo e óxido de ferro III. A perda de potência aumenta gradualmente, atingindo 8,47% após 41 dias.
Sakarapunthip <i>et al.</i> (2021)	Tailândia	p-Si	1 ano	A densidade máxima de sujidade é de 1,64 g/m ² (após 70 dias), causando uma redução de 6,68% na I _{Max} . A composição orgânica é 55,90% C, 24,30% O, 12,10% Si, 2,80% Ca, 1,10% Al e 3,80% outros elementos; a parte inorgânica contém 13,30% C, 49% O, 26,50% Si, 2% Ca, 3,90% Al, 1,50% Fe e 3,80% outros elementos.
Valerino <i>et al.</i> (2021)	Gandhinagar (Índia)	p-Si;	1 ano	Em períodos secos, a SRate varia de 0,21% a 0,61% ao dia; com chuvas frequentes, , as perdas não ultrapassam 5% em três semanas. Elementos como O, Si, C, Al, Fe, Zn, Ti, Ca, Mg, K, Na, Cl e S compõem quase 100% da sujidade, e fungos aparecem após três semanas. As partículas têm diâmetro entre 5 e 10 µm.
Zitouni <i>et al.</i> (2021)	Benguerir (Marrocos)	m-Si	1 ano	Durante períodos secos (P1 e P3) e úmido (P2), a SRatio diminui de 1 para 0,83 (17% de perda) no P1 e retorna a 0,85 após chuva; no P3, a SRatio é 0,72 (28% de perda). As SRate são ~0,17%/dia em P1 e 0,35%/dia em P3, resultando em perdas de 28% (82,50 kWh) após um ano.
Boeing <i>et al.</i> (2022)	Nevada (Estados Unidos da América)	p-Si	18 meses	O programa de lavagem manual revela maior eficiência nos módulos lavados com água destilada (11,79%), seguido por efluente tratado (11,74%), e outros métodos. O SEM-EDS detecta Na, Al, Si, K, O, C, Mg, Ca, S, B, Cl, Zn e Fe.
Ekinci <i>et al.</i> (2022)	Adana (Turquia)	Não específica	Não específica	A produção elétrica dos módulos limpos é 10% superior à dos sujos; usando diferentes soluções de limpeza, a energia gerada aumenta 15% (Solução 1), 14% (Solução 2), e 11% (Solução3). As partículas variam entre 10 e 46 µm, com EDX detectando Si, O, Al, Na, S, K, Fe e Ca.

(continuação)

Citação	Local do estudo	Tecnologia FV	Período	Principais conclusões
Enaganti <i>et al.</i> (2022)	Hyderabad (Índia)	m-Si e p-Si	4 meses	Após 120 dias sem limpeza, a potência dos módulos m-Si e p-Si diminui para 44,88 W e 47,84 W, respectivamente, com reduções de 20,40% e 22,96%. O tamanho das partículas é de 33,71 µm para módulos horizontais e 0,45-0,75 µm para os inclinados. Os principais elementos são C (27,70%), O (40,70%) e Si (17%).
Marashli <i>et al.</i> (2022)	Ma'an (Jordânia)	p-Si e CdTe	7 meses	A diferença média de eficiência entre módulos p-Si limpos e sujos é de 1,11%; para módulos CdTe, varia de 0,16 W a 3 W. Predominam Ca e Si, com menor quantidade de Fe, Al, K e Ti.
Spuhl, Asano e Benedito (2022)	Santo André (São Paulo)	m-Si	22 meses	A perda de potência entre medições sujas e limpas é de 16,71% na string 4 e 18,06% na string 6. A I_{sc} da string 6 tem uma diferença de 18,06%, enquanto na string 4 é de 18,79%. A composição inclui C (47,50%), O (38,10%) e Si (6,84%).
Alzahrani (2023)	Yanbu (Reino da Arábia Saudita)	p-Si e m-Si	2 anos	Entre junho de 2020 e maio de 2021, as perdas mensais de potência do módulo m-Si sujo aumentam de 12,70% para 29,60%, chegando a 39,04% nos últimos meses. Para o módulo p-Si, as perdas vão de 15% a 29%. As partículas de sujidade são irregulares, com tamanho entre 2 e 65 µm.
Kamal, Abdel-Salam e Nayel (2023)	Assiut (Egito)	m-Si	3 meses	Após 3 meses, a temperatura da célula do módulo limpo atinge 74 °C, enquanto a do sujo é de 64 °C, com redução máxima de I_{sc} de 31%. O tamanho das partículas varia de 0,22 a 16,49 µm.
Kazem <i>et al.</i> (2023)	Sohar (Omã)	m-Si e p-Si	1 ano	No módulo m-Si, a I_{sc} reduz 19% após 1 semana; V_{oc} cai 2,16% e a potência diminui 19,20%. Após 3 semanas, a potência cai 25% e a I_{sc} 33,90%. Para p-Si, a I_{sc} reduz 14% após 1 semana, com partículas entre 25 e 61 µm, predominantemente SiO_2 e CaO.
Khan <i>et al.</i> (2023)	Islamabad (Paquistão)	p-Si	6 meses	Com deposição média, a diferença percentual entre tensão e corrente é de 1,50% (limpo) e 5,60% (sujo); na deposição máxima, as diferenças são de 9,40% (limpo) e 22,50% (sujo), com C, O, Ba e Si como principais elementos.

(continuação)

Citação	Local do estudo	Tecnologia FV	Período	Principais conclusões
Li <i>et al.</i> (2023)	(Singapura)	p-Si	10 anos	Módulos horizontais sofrem maior redução de I_{sc} (10-15%) comparados aos inclinados. O módulo mais limpo, M68, apresenta ganho de 1,70% em I_{sc} ; o módulo mais sujo reduz cerca de 30%. O EDX revela predominância de C, O e Si, com partículas entre 10 e 50 µm.
Ndeto <i>et al.</i> (2023)	Condado de Machakos (Quênia);	m-Si;	7 meses;	Há abundância de Al, K, Ca e Fe na sujidade, com reduções de eficiência variando em locais após 15 dias de exposição: 1,30%, 1,74%, 4,05%, 2,74% e 1,38% nos locais 1 a 5, respectivamente.
Rashid <i>et al.</i> (2023)	Islamabad e Bahawalpur (Paquistão)	p-Si	6 semanas	A redução de potência é de 15,08% em Islamabad e 25,42% em Bahawalpur. Em Islamabad, a sujidade contém: C (55,80%), O (22,71%), Si (9,78%) e Ca (3,85%); em Bahawalpur, os elementos predominantes são: O (46,90%), C (20,11%), Si (16,98%) e Al (4,26%). Os principais compostos em Bahawalpur são quartzo e calcita, enquanto em Islamabad é apenas quartzo.
Rashid e Yousif (2023)	(Paquistão)	p-Si	42 dias	As partículas apresentam tamanhos variados, formas assimétricas e arranjos irregulares, compostas por O (48,70%), C (20,03%), Si (17,06%) e Al (4,42%) além de pequenas quantidades de Mg, Ca, Fe e K. Após seis semanas, a potência reduz em 25,42% com uma densidade de deposição de 10,254 g/m ² .
Umar <i>et al.</i> (2023)	Islamabad (Paquistão)	p-Si	2 meses	A sujidade sob efeito do orvalho reduz a tensão em até 3% para ângulos de 23°, 33° e 43°, mas aumenta a corrente em 13,74%, 12,07% e 11,21% após a limpeza. A potência do módulo limpo melhora em 12,07%, 11,40% e 9,92% para os mesmos ângulos. As partículas variam de 0,20 a 100 µm. O espectro EDS da sujidade livre de orvalho mostra predominância de O (40,80%), Si (24%), S (9,80%), Ca (6,90%) e Zn (5,30%); a sujidade sob efeito do orvalho contém O (46,80%), Si (24%), Al (9,80%), Ca (6,90%) e Fe (5,30%).

(conclusão)

Citação	Local do estudo	Tecnologia FV	Período	Principais conclusões
Elamim <i>et al.</i> (2024)	Mohammedia (Marrocos)	p-Si, m-Si e μ c-Si/a-Si	1 ano	Os parâmetros elétricos das três tecnologias apresentam reduções entre 11,64% e 18% na I_{Max} e entre 7,40% e 12,35% na potência. A amostra de sujidade contém: O (51%), Ca (8,20%), C (6,40%), Al (6,36%), Fe (3,08%) e Mg (1,49%). Os principais compostos incluem quartzo (SiO_2) (40,20%), calcita ($CaCO_3$) (23,40%), óxido de alumínio (Al_2O_3) (12%), óxido de cálcio (CaO) (11,50%) e óxido de ferro (III) (Fe_2O_3) (4,40%). As partículas têm formas geométricas irregulares, com tamanho médio entre 0,50 μm e 12,50 μm .
Fatima (2024)	Lucknow (Índia)	p-Si	1 ano	Destaca-se a presença de sílica/aluminossilicatos e quartzo, com concentrações mais altas de O (43,20%), C (18,02%), Ca (10,30%), Si (9,10%) e Fe (6,60%). As perdas de energia são reduzidas a 7% após limpeza quinzenal.

Fonte: Autor (2025).

Quadro 7 – Estudos experimentais sob condições externas que descrevem os efeitos do acúmulo natural de sujidade no desempenho de sistemas FV, mesmo sem menção às características físico-químicas da sujidade.

(continua)

Citação	Local do estudo	Tecnologia FV	Período	Principais conclusões
Abdeen, Hasaneen e Orabi (2016)	Benban (Egito)	p-Si	2 meses	A redução de potência é de 9,20% para o módulo FV a 15° e 4% a 45°; a potência reduz 8,50% (20°) e 5% (30°).
Baras <i>et al.</i> (2016).	Rumah (Arábia Saudita)	CIS, a-Si, c-Si, m-Si, p-Si e HJ-Si	3 anos	A perda de energia varia de 3 a 10%/mês no 1º ano de análise. As perdas de sujidade são de 16% no mês de maior incidência de poeira e 2% no menos empoeirado.
Capdevila, Naidoo e Graeber (2016)	Benban (Índia)	p-Si	6 meses	A perda média por sujidade é de 6%/mês. A ocorrência de chuva em março (8 tempestades de areia) aumenta <i>SRatio</i> em 8%; considerando o período antes e após uma chuva, <i>SRatio</i> aumenta 1%.
Hickel <i>et al.</i> (2016)	Brotas de Macaúbas (Brasil)	m-Si, p-Si, μc-Si/a-Si, a-Si e CIGS	1 mês	As perdas de potência no ponto máximo são 3,50% (CIGS), 11,30% (p-Si), 4,50% (m-Si), 8,20% (a-Si) e 5,60% (μc-Si/a-Si). A limpeza melhora a eficiência em até 12,10% para p-Si.
Micheli, Muller e Kurtz (2016)	Estados Unidos da América	p-Si	11 meses	<i>SRatio</i> varia entre 93,20% e 99,30% em diferentes locais. A <i>SRate</i> em períodos secos varia de 0,16%/dia a 0,03%/dia, e em períodos chuvosos, de +1,99%/dia a +0,01%/dia. No local D, a <i>SRatio</i> diminui de 97% para 87,30% após 4 semanas.
Paudyal e Shakya (2016)	Katmandu (Nepal)	p-Si	5 meses	A potência do módulo sujo é de 20 W e do limpo diariamente é de 25 W; a redução de eficiência é de até 29,76%.
Ramli <i>et al.</i> (2016)	Surabaya (Indonésia)	p-Si	1 mês	Após 1 semana, a potência do módulo sujo reduz 2,05%; após 2 semanas a redução é de 10,80%. Na 4ª semana, a potência reduz 87,29%.
Touati <i>et al.</i> (2016)	Doha (Qatar)	p-Si	5 meses	Após 5 meses, uma limpeza aumenta a potência de 70 para 112 W; a curva <i>P-V</i> mostra um aumento de 30% na potência.
Urrejola <i>et al.</i> (2016)	Santiago (Chile)	p-Si, m-Si e filme fino	2 anos	A <i>PR</i> mensal varia de 76,79% a 77,62% para filme fino (TF), 72,80% a 74,01% para p-Si e 74,78% a 76,71% para silício monocristalino (m-Si) no verão de 2014 e 2015. No inverno, a <i>PR</i> diminui para 68,94% a 74,07% (TF), 73,53% a 77,93% (p-Si) e 74,48% a 79,08% (m-Si). A taxa de sujidade (<i>SRate</i>) é de 0,14%/dia no verão e 0,56%/dia no outono, ambos para TF.

(continuação)

Citação	Local do estudo	Tecnologia FV	Período	Principais conclusões
Abdeen, Orabie Hasaneen (2017)	Aswan (Egito)	p-Si	64 dias	A redução da potência é de 10% a 15° e 4,20% a 45°. Após 20 semanas, essas reduções chegam a 14,68% e 8,60%, respectivamente. $SRate$ é de 0,214%/dia nas duas primeiras semanas, com perdas de 2% e 3,50%. Entre a terceira e quarta semana, a $SRate$ cai para 0,057%/dia. Após 10 meses, a potência diminui mais de 40% a 15° e 25% a 45°.
Aldihani (2017)	Kuwait	m-Si, p-Si e HIT	1 ano	O m-Si sofre maior impacto da sujidade, com uma redução de 53 W, comparado ao p-Si, que perde 21 W. O módulo HIT (<i>Heterojunction Intrinsic-layer Technology</i>) apresenta uma perda de 27,50 W. A eficiência do m-Si varia de 14,60% (limpo) para 10% (sujo); no HIT, de 14,20% para 12%; e no p-Si, de 12% para 9,50%.
Ali <i>et al.</i> (2017)	Taxila (Paquistão),	m-Si e p-Si	11 semanas	As medições de potência às 9h mostraram uma redução de 18,70% (m-Si) e 14,10% (p-Si) em módulos sujos. Às 12h, as reduções são de 20,20% (m-Si) e 15,20% (p-Si), enquanto às 15h as perdas são de 20,80% (m-Si) e 14,20% (p-Si). Quanto à eficiência, às 9h, a queda média é de 19% (m-Si) e 13,80% (p-Si), e às 15h é de 15,80% (m-Si) e 13,50% (p-Si).
Besson <i>et al.</i> (2017)	Santiago (Chile)	m-Si, p-Si e a-Si/ μ -Si	2,5 anos	A $SRate$ fica entre 0,24%/dia (dezembro) e 0,35%/dia (março); $SRate$ de 0,79%/dia em junho e setembro.
Gupta, Raj e Yadav (2017)	Jaipur (Índia)	p-Si	55 dias	I_{sc} reduz aproximadamente 12%; a perda de potência é de 9%.
Haydaroğlu e Gümüş (2017)	Dicle (Turquia)	p-Si	17 dias	A perda média diária é 6,80 kWh; as perdas por sujidade são de 4,86%.
Hussain, Batra e Pachauri (2017)	Não especifica	p-Si	1 mês	I_{sc} e a V_{oc} do módulo sujo são, respectivamente, 24,32% e 1,41% menor em relação ao limpo; a potência do módulo sujo reduz 26%.
Li <i>et al.</i> (2017)	Wuhan (China)	p-Si	Não especificado	Para ângulos menores que 20°, a produção aumenta entre 9,18% e 14,08% após a limpeza, para ângulos maiores que 50° o ganho varia de 15,21% a 19,86%.

(continuação)

Citação	Local do estudo	Tecnologia FV	Período	Principais conclusões
Moura <i>et al.</i> (2017)	Petrolina (Brasil)	p-Si	1 mês	Uma limpeza manual no 2º dia de exposição aumenta a produção em 4,75%, mas após 30 dias, sem novas limpezas, a diferença de produção torna-se insignificante.
Paudyal <i>et al.</i> (2017)	Katmandu (Nepal)	p-Si	5 meses	Corrobora os resultados de Paudyal e Shakya (2016). Reporta perda de 69,06% de transmitância de uma amostra de vidro após 5 meses.
Sakarapunthip <i>et al.</i> (2017)	Bangkok, Nakhon Pathom e Prachinburi (Tailândia)	p-Si, m-Si e filme fino;	4 meses	Em Bangkok, a PR instantâneo após um mês de deposição é de 73,73%, subindo para 78,24% após a limpeza. Em Nakhon Pathom, as zonas 1 e 2 apresentam aumentos de desempenho entre 6% e 8% após uma limpeza. Em Prachinburi, a limpeza após dois meses eleva o PR de 68,88% para 74,93%.
Touati <i>et al.</i> (2017)	Doha (Qatar)	p-Si	8 meses	Sem limpeza, a sujidade reduzir a potência em 50% após 8 meses; redução média de 5 a 6%/mês da potência.
Walwil <i>et al.</i> (2017)	Dahran (Arábia Saudita)	m-Si	21 meses	Módulos com nanorevestimento e microrrevestimento antirreflexo aumentam a potência em 7% e 3%, respectivamente. No geral, esses revestimentos aumentam a produção dos módulos limpos entre 5% e 12%.
Al-Badi (2018)	Muscate (Omã)	p-Si	2 anos	É relatada uma perda média de produção de 10%/ano.
Arabatzis <i>et al.</i> (2018)	Ática (Grécia) e Qinghaim (China)	p-Si	7 meses	Em Ática, após 16 dias, a diferença de potência entre módulos limpos (revestidos) e sujos (sem revestimento) é de 5%, aumentando para 9% no 83º dia. A variação máxima de potência chega a 19,81% em dias nublados. Em Qinghaim, a diferença de potência é de 12,43% ao dia após uma tempestade de areia, atingindo 13,17% devido à poeira acumulada em módulos não revestidos. O aumento médio de potência com revestimento é de 6%.
Babatunde, Abbasoglu e Senol (2018)	Chipre do Norte	Não especificado	8 meses	A string do inversor 30 (INV 30), que está limpa, aumenta a geração em 2% em relação à string conectada ao INV 1 (sujo). Após a limpeza da string do INV 1, seu desempenho melhora em 2,90% em relação ao INV 30. No INV 29, uma limpeza resulta em um aumento de desempenho de 1,80%. Em média, uma limpeza eleva o rendimento em 2,50%.

(continuação)

Citação	Local do estudo	Tecnologia FV	Período	Principais conclusões
Badi <i>et al.</i> (2018)	Mascate e Nizwa (Omã)	Não especificado	2 dias	Na primeira tempestade de areia, a usina FV de Mascate enfrenta uma redução de 37% na geração. Na segunda tempestade, a redução de desempenho é de 2%, aumentando para 7% no quarto dia; em Nizwa, a redução na produção é de 0,90%.
Barbosa, Farias e Gontijo (2018)	Patos de Minas (Brasil)	p-Si	2 meses	Módulos de três <i>strings</i> com um mês sem limpeza apresentam geração semelhante, mas após a limpeza de uma delas, a geração aumenta em 10,26%.
Benghanem <i>et al.</i> (2018)	Medina (Arábia Saudita)	p-Si	2 meses	A diferença de I_{Max} , V_{Max} e potência entre os módulos sujo e limpo é de 26%, 4% e 28%, respectivamente. I_{sc} e V_{oc} do módulo sujo são 27% e 5% inferiores em comparação aos limpos.
Costa <i>et al.</i> (2018)	Belo Horizonte, Brasil	CdTe e p-Si	4 meses	$SRatio$ próximo a 0,8 no período seco, passando para 1 após chuva de 20 mm (CdTe). Nos p-Si, $SRatio$ é 0,86, passando para 1 após chuvas.
Daher <i>et al.</i> (2018)	Djibouti	p-Si	47 meses	A PR reduz, em média, entre 0,31 e 0,36%/dia nos períodos de estiagem. Após chuvas, a PR aumenta em 6,80%, e na estação chuvosa, a variação é de 0,87% a 4,33%. As perdas por sujidade variam de 0,03% (após chuva) a 14,23% (em períodos secos).
Gaio, Campos e Tiepolo (2018)	Curitiba (Brasil)	p-Si	65 meses	Na planta do <i>Green Office</i> , a limpeza melhora a produtividade de 86,19 kWh/kWp para 122,86 kWh/kWp, eleva a PR de 71,07% para 76,99% e FC de 11,58% para 17,06%. Na Neoville, a produtividade sobe de 108,45 kWh/kWp para 123,88 kWh/kWp e o FC de 14,58% para 17,21%.
Gholami <i>et al.</i> (2018)	Teerã (Irã)	m-Si	70 dias	A potência reduz 21,47%. I_{sc} apresenta redução superior a 20%. A perda média de geração é de 14,44%.
Jaszczur <i>et al.</i> (2018a)	Cracóvia (Polônia)	p-Si	6 meses	Em um dia ensolarado e nublado, há perdas máximas de eficiência de 0,32% e 0,37% e de 2,39% e 2,26% na potência, respectivamente.
Jaszczur <i>et al.</i> (2018b)	Cracóvia (Polônia)	p-Si	3 semanas	Após 1 semana, a produção dos módulos sujos é reduzida em 2,10%.
Kagan <i>et al.</i> (2018)	Estados Unidos da América	Não especificado	7 semanas	$SRatio$ varia entre 1 e 0,85 (local A) e de 1 a 0,90 (local B). Analisando as curvas I-V, há variação de 4,60% na I_{sc} e 7,60% na potência.

(continuação)

Citação	Local do estudo	Tecnologia FV	Período	Principais conclusões
Luque, Antonanzas-Torres e Escobar (2018)	Santiago (Chile)	m-Si	2 meses	<i>SRate</i> de 0,301%/dia para o minimódulo monofacial e 0,236%/dia (face frontal) e 0,0394%/dia (face traseira) do módulo bifacial
Mostefaoui <i>et al.</i> (2018)	Adrar (Argélia)	m-Si	6 meses	Módulos sujos apresentam redução de potência entre 29% e 31%, I_{sc} entre 24% e 26% e eficiência entre 29% e 32% em relação aos limpos. Em dias de tempestade de areia, as perdas são de 25,97% na potência, 8,27% na I_{sc} e 16,48% no rendimento.
Ndiaye <i>et al.</i> (2018)	Não especifica	m-Si e p-Si	6 semanas	Nos módulos sujos, a redução da I_{sc} é de 30% (m-Si) e 34% (p-Si); a potência reduz cerca de 26% (m-Si) e 40% (p-Si).
Rezende e Zilles (2018)	São Paulo (Brasil)	p-Si	7 meses	A perda média de geração é de 0,60%/mês. O array V, com 30 meses de sujidade, perde 10,50% e tem produtividade de 777,94 kWh/kW. O array VII, com limpeza mensal, não apresenta perdas e tem produtividade de 868,74 kWh/kW.
Soares Júnior, Cruz e Amaral (2018)	Montes Claro (Brasil)	p-Si	6 meses	Após a limpeza do array II e exposição por 2 semanas, a produção varia 2%; perda média de 20% (6 meses).
Sulaiman <i>et al.</i> (2018)	Perak (Malásia)	m-Si	1 mês	Para os depósitos semanais e mensais a redução é de 2,45% e 5,92%, respectivamente.
Tonolo <i>et al.</i> (2018)	Curitiba (Brasil)	p-Si	3 meses	Após a limpeza, a planta <i>Green Office</i> aumenta a geração em 6,26%, e a Neoville em 0,81%. No período seguinte, a produção cresce 27,40% no <i>Green Office</i> e 16,87% na Neoville.
Tonolo, Mariano e Urbanetz Júnior (2018)	Curitiba (Brasil)	p-Si	5 meses	Em comparação entre seca e chuva, a produção aumenta 19,33% no <i>Green Office</i> e 12,03% na Neoville. PR varia de 75,47% a 83,97% na <i>Green Office</i> e de 80,82% a 87,93% na Neoville após chuvas.
Willoughby e Osinowo (2018)	Osun (Nigéria)	m-Si	3 meses	Após 3 meses, I_{sc} do módulo sujo reduz de 1% a 27%, a I_{Max} reduz entre 18% e 23%, a potência reduz entre 20% e 27%, e a eficiência diminui entre 18 e 33%.
Abdolzadeh e Nikkhah (2019)	Kerman (Irã)	Não especificado	1 ano	A redução máxima de geração é de 15% para o ângulo de 0° voltado para o norte, chegando a 45% se não houver chuva.

(continuação)

Citação	Local do estudo	Tecnologia FV	Período	Principais conclusões
Alghamdi <i>et al.</i> (2019)	Jeddah (Arábia Saudita)	p-Si	20 dias	Ao limpar os módulos 3 vezes por semana com água, há uma diferença média de 27% da potência dos módulos limpos e sujos.
Al-Housani, Bicer e Koç (2019a)	Doha (Qatar)	CdTe	7 meses	A potência aumenta 0,50 W/dia com limpeza diária e 1 W/dia com limpeza semanal. Com limpeza diária, a melhora na produção é de 4,80% na 1ª semana, 5,10% na 2ª, 7% na 3ª e 11% na 4ª, enquanto a limpeza mensal eleva a produção em 4,20% na estação chuvosa.
Al-Housani, Bicer e Koç (2019b)	Doha (Qatar)	CdTe	3 meses	No verão, a limpeza mensal aumenta a produção em 7%, com aumento de 3,70% para limpeza diária e 4% para limpeza semanal. No inverno, a melhora é de 5,10% na 1ª semana, 7% na 2ª e 11% na 3ª semana.
Araújo, Carvalho e Dupont (2019)	Fortaleza (Brasil)	p-Si	3 meses	O melhor PR é 84,10% e o pior é 70,21%. O acúmulo de sujidade reduz em até 11,71% a produção e 16,52% a eficiência da planta FV.
Bhaduri e Kottanthalayil (2019)	Mumbai (Índia)	Não especificado	120 dias	Módulos bifaciais (BF55,70% e BF90%) têm SRate de 0,39%/dia e 0,02%/dia, respectivamente, a 19° e 90°, enquanto módulos monofaciais têm SRate de 0,40%/dia e 0,45%/dia, devido a uma obra próxima da planta FV.
Costa <i>et al.</i> (2019a).	Belo Horizonte, Porto Alegre e Brotas de Macaúbas (Brasil)	CdTe e p-Si	15 meses	Em Belo Horizonte, a tecnologia CdTe apresenta SRatio em torno de 0,8 e p-Si em 0,86, com SRate entre 0,20% e 0,12%, respectivamente. Em Porto Alegre e Brotas de Macaúbas, a SRatio se mantém próxima de 1.
Costa <i>et al.</i> (2019b), Costa <i>et al.</i> (2020a) e Costa <i>et al.</i> (2020b)	Belo Horizonte, Porto Alegre e Brotas de Macaúbas (Brasil)	p-Si e CdTe	2 anos	A SRatio em Belo Horizonte é 0,94 para CdTe e 0,92 para p-Si; em Porto Alegre, 0,97 para CdTe e 0,98 para p-Si. Em Brotas de Macaúbas, permanece próxima de 1, com SRate de 0,20%/dia para CdTe e 0,14%/dia para p-Si em Belo Horizonte, e 0,04%/dia para p-Si e 0,08%/dia para CdTe em Brotas de Macaúbas.
Dahlioui, Laarabi e Barhdadi (2019)	Rabat e Errachidia (Marrocos)	Não especificado	2 anos	Em Rabat, a SRatio reduz 5% no primeiro ano e cerca de 3% no segundo; em Errachidia, a redução é de 23% após 1 mês.

(continuação)

Citação	Local do estudo	Tecnologia FV	Período	Principais conclusões
Dolan <i>et al.</i> (2019)	Califórnia (EUA)	p-Si	7 semanas	Após 4 semanas, a diferença de potência entre painel limpo e sujo é de 2,50 kW (perda de 4,56%). Com mais exposição, essa diferença varia para 4,5 a 5 kW na 5 ^a semana (perda de 6,42%) e de 5 a 6 kW na 6 ^a e 7 ^a semanas (redução de 10,72%), com <i>SRate</i> de 0,20%/dia.
Elias <i>et al.</i> (2019)	Malásia	Não especificado	3 semanas	A deposição de sujidade causa uma redução de produção de 2,72% após 1 semana, passando para 2,83% (2 ^a semana) e 2,59% (3 ^a semana).
Ghodki, Swarup e Pal (2019)	Bhopal (Índia)	p-Si	73 dias	O sistema de limpeza aumenta a produção em 11,26%. A redução média da produção do módulo sujo média de 9,65%. A eficiência dos módulos é de 13,63% (limpos) e 12,36% (sujos). A PR média é de 85,20% (limpos) e 77,27% (sujos).
Hammoud <i>et al.</i> (2019)	Zahrani (Líbano)	p-Si	4 meses	O subsistema da área do tanque apresenta um aumento de até 93,27% na geração após limpeza, com um incremento médio de 32,27% em comparação ao ano anterior.
Jaszczur <i>et al.</i> (2019)	Cracóvia (Polônia)	p-Si	5 meses	Após 5 semanas, a diferença máxima de eficiência entre os módulos é de 2,34%, e a maior queda de energia semanal é de 2,10%, com a maior perda de eficiência de 5,80% a 37,10°C.
Liu <i>et al.</i> (2019)	Changzhou e Yantai (China)	Não especificado	40 dias	Em 40 dias sem chuva, as perdas são de 0,138%/dia em Changzhou e 0,259%/dia em Yantai, com PR variando de 93% a 88% e de 95% a 85%, respectivamente.
Plessis, Strauss e Rix (2019)	África do Sul	p-Si	97 dias	O efeito da sujidade em módulos revestidos e não revestidos em sistemas de Rastreador de Eixo Único (<i>Single Axis Tracker - SAT</i>) mostra que o PR varia de 0,98 a 0,93 no SAT1 e, no SAT2, a diferença de desempenho é de 5,54%.
Tarigan (2019)	Surabaya (Indonésia)	m-Si	2 meses	A produção de sistemas fotovoltaicos limpos é 20% maior que a dos sujos após 15 a 20 dias, com uma diferença de 8% durante a estação chuvosa.
Saraei <i>et al.</i> (2019)	Teerã (Irã)	Não especificado	1 ano	Em quatro cenários de análise, a corrente aumenta de 27% a 34% após a limpeza, e a potência cresce 9,50% sem sombreamento e 40% com sombreamento.

(continuação)

Citação	Local do estudo	Tecnologia FV	Período	Principais conclusões
Sisodia e Mathur, (2019)	Jodhpur (Índia)	Não especificado	3 anos	Durante períodos secos, excrementos de aves causam perdas de até 23,80% por mês; a perda anual é de 6,24% para ângulos de 25° e 9,70% para ângulos entre 60 e 90°.
Tiwari, Rani e Patel (2019)	Bhilai (Índia)	Não especificado	2 semanas	No geral, a perda de energia é de 4%/dia; redução de produção de 24%.
Ullah <i>et al.</i> (2019)	Lahore (Paquistão)	Não especificado	100 dias	Mostra uma perda mínima de 13,50% para um módulo a 90° e uma perda máxima de 26,20% a 0°; módulos instalados a 35° têm perdas de 18,40%.
Wang, Meng e Chen (2019)	Xangai (China)	Não especificado	7 dias	Redução de 1,36% na potência. A eficiência do módulo sujo é 1,46% menor.
Akter <i>et al.</i> (2020)	Dhaka (Bangladesh)	m-Si	4 meses	Redução de I_{sc} entre 5,52 e 22,31%, a geração reduz até 35%. Analisando a geração mensal, dezembro de 2019 apresenta redução de 22%.
Abdallah <i>et al.</i> (2020)	Thuwal (Arábia Saudita)	p-Si	15 meses	As perdas de sujidade são superiores a 5%/semana caso não ocorra limpeza. Perda média de 2,20% para módulos limpos semanalmente.
Abdel Hamid <i>et al.</i> (2020)	Helwan (Egito)	p-Si	75 dias	Para medições no 25° e 75° dia de exposição, a redução de eficiência é de 30% e 53%, respectivamente.
Adouane <i>et al.</i> (2020)	Kuwait	m-Si, p-Si, HIT, TF, CdTe, CIGS e a-Si	1 ano	O módulo HIT tem rendimento de 1.120 kWh/kWp e PR de 0,91. Módulos a-Si têm PR de 0,81 (limpos) e 0,46 (sujos). Módulos CIGS cilíndricos apresentam PR de 0,84, enquanto os planos têm 0,74, ambos limpos.
Al-Badra, Abd-Elhady e Kandil (2020)	Cairo (Egito)	m-Si	6 semanas	A eficiência dos módulos varia de 11,20% a 7,51% no sem revestimento/vibração. O módulo revestido tem eficiência de 8,46% (redução de 24,46%), e com vibração, chega a 9,75% (redução de 12,94%).
Alamri <i>et al.</i> (2020)	Assiut (Egito)	Não especificado	45 dias	Um módulo limpo manualmente gera 10% mais eletricidade que o sujo. O módulo revestido tem potência 15% maior que o sujo e 5% maior que o limpo manualmente.

(continuação)

Citação	Local do estudo	Tecnologia FV	Período	Principais conclusões
Alonso-Montesinos <i>et al.</i> (2020)	Almería (Espanha)	p-Si	6 meses	A geração de energia elétrica varia entre 4,28% (janeiro) e 6,05% (março), equivalente à redução média de 5,06%.
Alvarenga, Luchini e Guimarães (2020)	Serra e Vitória (Brasil)	p-Si e m-Si	6 meses	O rendimento global varia de 100% para cerca de 50% (após 6 meses). Usando análise de variância, conclui-se que não há evidências da influência da poluição na produtividade das usinas FV.
Araújo <i>et al.</i> (2020a)	Fortaleza (Brasil)	p-Si	13 meses	Para o 1º período seco, a PR média é 0,84 e 0,87 no 2º período. Na estação chuvosa, o valor médio de PR é 0,92.
Chiteka <i>et al.</i> (2020)	Muzarabani (Zimbabwe)	m-Si	7 meses	Perdas de 3,47 kWh/dia e 104,03 kWh/mês. Perdas médias entre 0,29%/dia em maio (8,84%/mês) e 0,48%/dia em agosto (14,48%/mês).
Conceição <i>et al.</i> (2020)	Évora (Portugal)	Não especificado	1 ano	SRate varia entre 0,07%/dia e 0,14%/dia.
Dogan <i>et al.</i> (2020)	Sanliurfa (Turquia)	p-Si e m-Si	8 meses	Perda média de energia de 8%/dia para o m-Si (2,77%/ano) e até 10%/dia p-Si (3%/ano). Perdas no verão: 6,25% (p-Si) e 4,39% (m-Si).
Du Plessis, Strauss e Rix (2020)	África do Sul	p-Si	6 meses	Módulos não revestidos com rastreamento têm PR 2,10% superior aos revestidos. Módulos revestidos com manobras de limpeza apresentam PR de 1 a 2% maior que os sem manobras.
Goel <i>et al.</i> (2020)	Bhubaneswar (Índia),	p-Si	9 meses	Após 6 dias, a perda de geração é de 3,10%, aumentando para 4,27% no 15º dia sem limpeza, com uma redução média de 3,09%. Nos meses chuvosos, as perdas médias são de 0,93% devido às chuvas.
Hossain <i>et al.</i> (2020)	Dhaka (Bangladesh)	m-Si e p-Si	2 meses	A eficiência reduz 27,17% (m-Si) e 20% (p-Si). PR de m-Si diminui de aproximadamente 1 para 0,50 e de 1 para 0,20 para o p-Si.
Jamil <i>et al.</i> (2020)	Chalok (Malásia)	p-Si	1 ano	Perdas superiores a 50% para uma usina FV de 250 MWp após 12 meses; perdas médias de 26,22%, variando entre 4,86% e 58,67%.
Javed <i>et al.</i> (2020)	Doha (Qatar)	p-Si	6 anos	CI médio de $-0,52\% \pm 1,05\%/\text{dia}$. Dias com eventos extraordinários, SRate reduz 3,10%/dia; o evento mais grave reduz CI em 7,82%/dia.
Khazaal <i>et al.</i> (2020)	(Iraque)	p-Si	54 dias	Redução de 7,88% na potência.

(continuação)

Citação	Local do estudo	Tecnologia FV	Período	Principais conclusões
Khodakaram-Tafti e Yaghoubi (2020)	Shiraz (Irã)	m-Si	8 meses	A potência do módulo é reduzida em mais de 57% a 0° e entre 20% e 27% para ângulos de 15°, 30° e 45°. A taxa média de redução de geração antes de uma tempestade de areia é de 8,60%/dia a 0° e 0,80%/dia para as demais inclinações. A redução média de geração é de 33,40% a 0°, 15,80% a 15°, 12,10% a 30° e 11,70% a 45°.
Konyu, Ketjoy e Sirisamphanwong (2020)	Phitsanulok (Tailândia)	a-Si e p-Si	1 mês	Redução de potência de 3,50% (a-Si) e 2,60% (p-Si). O a-Si com irradiância entre 800 e 900 W/m ² apresenta redução de geração de 2,80%; irradiância de 600 - 700 W/m ² redução 3% na geração e 3,50% e para irradiância entre 400 e 500 W/m ² . No p-Si, a redução de geração é de 1,60% (800 – 900 W/m ²), 2% (600 – 700 W/m ²) e 2,60% (400 – 500 W/m ²).
Larico, Cutipa e Callata (2020)	Juliaca (Peru)	m-Si	1 mês	Redução de 3% (corrente) e 3,60% (potência) do módulo sujo em relação ao limpo.
Matsumoto <i>et al.</i> (2020)	Cidade do México (México)	m-Si	2 anos	PR média de 76,98%, 76,27% (1º ano) e 77,70% (2º ano). Para um período antes e após uma chuva, PR varia de 68,20% para 75,24%.
Memiche <i>et al.</i> (2020)	Biskra (Argélia)	m-Si	Não especificado	A deposição de sujidade entre 1,19 e 2,72 mg/cm ² induz perdas de potência entre 4,57 e 10,27%.
Mustafa <i>et al.</i> (2020)	Mu'tah (Jordânia)	p-Si	4 meses	Redução 12,47% na potência e eficiência de 13,86% (limpo) e 11,70% (sujo), redução de 11,86%. Devido excrementos de aves, há decréscimo de 7,40% na potência.
Olivares <i>et al.</i> (2020)	Deserto do Atacama (Chile)	p-Si	130 dias	A eficiência de 13,50% (limpo) e 11,50% (sujo). No 1º dia do experimento, FF é de 70,80, passando para 70,70 (limpo) e 72,80 (sujo). A I_{sc} tem perdas de 17,66% (-0,14%/dia); uma chuva reduz as perdas para 3,86%.
Roumpakias e Stamatelos (2020)	Grécia	p-Si	6 anos	PR diária de 0,86 e a eficiência normalizada de 14,65%, sendo inferior à condição de referência de 0,89 e 14,76%, respectivamente.
Semaoui <i>et al.</i> (2020)	Argélia	m-Si	16 meses	Perdas de até 14%/dia na I_{sc} ; a redução média no verão é de 8,79%/dia. Após uma limpeza, há uma perda máxima de 9,60%.

(continuação)

Citação	Local do estudo	Tecnologia FV	Período	Principais conclusões
Shah <i>et al.</i> (2020)	Al Ain, (Emirados Árabes Unidos)	p-Si	3 meses	Redução na I_{sc} de 2%, 3,90%, 6,80% e 12,80% após 10 dias, 20 dias, 1 mês e 3 meses de exposição, respectivamente. A potência reduz 3% após 10 dias, 5% após 20 dias, 7% após 1 mês e 13% após 3 meses.
Shapsough <i>et al.</i> (2020)	Sharjah (Emirados Árabes Unidos)	p-Si	2 meses	I_{sc} reduz 8,33% após 1 semana, 23,98% após 1 mês e 39,83% após 2 meses; V_{oc} varia até 1,33%.
Tanesab <i>et al.</i> (2020)	Kupang (Indonésia)	p-Si	5 meses	A zona litorânea é o ambiente mais afetado pela sujidade (perdas entre 11,27 e 13,94%), seguida pela urbana (perdas de 12,02 a 13,53%), industrial (perdas de 9,82 a 10,37%) e rural (perdas de 9,13 a 9,75%).
Vumbugwa <i>et al.</i> (2020)	Joanesburgo (África do Sul)	p-Si	Não especificado	Apenas um módulo com excrementos de pássaros, o FF e potência reduzem 0,14% e 0,16%, respectivamente. Observam-se reduções de: 0,18% na potência da string, 0,001% no FF, 1,30% na I_{Max} e 1,10% na V_{Max} .
Ahmed <i>et al.</i> (2021)	Karachi (Paquistão)	p-Si	1 ano	Eficiência reduz 0,30%/mês; PR reduz entre 0,43 e 3,57%.
Al Bakri, Abu Elhaija e Al Zyoud, (2021)	AzZarqa'a (Jordânia)	m-Si	3 meses	Melhoria de 0,35% (potência) e 0,10% (eficiência) em módulos com revestimento e limpos. Na condição suja, o módulo não revestido tem redução de 20,52% na potência; no revestido a redução é de 0,78%.
Aljdaeh <i>et al.</i> (2021)	Zarqa (Jordânia)	p-Si	9 meses	Módulos revestidos sem limpeza geram 15% mais de energia.
Al Siyabi <i>et al.</i> (2021)	Muscate (Omã)	p-Si	1 ano	A geração reduz 4,80%, 18,10% e 38,10% após 1, 3 e 5 semanas, respectivamente. Os maiores decréscimos ocorrem após 2,5 meses e variam entre 30% (1.000 W/m ²) e 40% (200 W/m ²).
Azouzoute <i>et al.</i> (2021b)	Ben-Guerir (Marrocos)	m-Si	118 dias	A perda média de energia é de, respectivamente, -0,01%/dia, -0,02%/dia, -0,04%/dia e -0,13%/dia para a limpeza semanal, quinzenal, mensal e sem limpeza.
Badamasi <i>et al.</i> (2021)	Abuja (Nigéria)	m-Si	4 dias	Redução de 20,60% da potência do módulo sujo à 60°.

(continuação)

Citação	Local do estudo	Tecnologia FV	Período	Principais conclusões
Benabdelkrim <i>et al.</i> (2021)	Adrar (Argélia)	a-Si	1 ano	Redução de 87% da potência, 72,50% da eficiência e 40,54% do FF do módulo sujo.
Chbihi <i>et al.</i> (2021)	Boujdour e Midelt (Marrocos)	p-Si, CdTe e CIGS	1020 dias	Em Boujdour, na estação quente, a potência reduz em 10,70% para p-Si, 11,70% para CdTe e 12% para CIGS; na estação fria, as perdas são de 2,60% (p-Si), 3,40% (CdTe) e 4,60% (CIGS). Em Midelt, as perdas na estação quente variam de 3% a 5% e de 0,50% a 2,50% na estação fria.
Costa, Kazmerski e Diniz (2021)	Belo Horizonte, Porto Alegre e Brotas de Macaúbas (Brasil)	CdTe e p-Si	2 anos	Em Belo Horizonte, no período seco de 85 dias, <i>SRatio</i> é de 0,73 (CdTe) e 0,83 (p-Si); <i>SRate</i> é de 0,20%/dia (CdTe) e 0,14%/dia (p-Si). Em Porto Alegre e Brotas de Macaúbas, <i>SRatio</i> é próximo de 1; <i>SRate</i> em Brotas de Macaúbas é estimado em 0,04%/dia (p-Si) e 0,08%/dia (CdTe).
Cui <i>et al.</i> (2021)	Xi'an e Kaifeng (China)	Não especificado	34 dias	Em Kaifeng, registra diferença relativa de 20% em I_{Max} após duas chuvas leves e uma moderada.
Elshazly <i>et al.</i> (2021)	Cairo (Egito)	p-Si e m-Si	50 semanas	Após uma limpeza, a eficiência aumenta entre 20 e 30%. Nos módulos m-Si nanorevestimento a potência e a eficiência melhoram cerca de 1%. Em um sistema FV sem limpeza, as perdas por sujidade são de 32%.
Gnedi e Saleh (2021)	Trípoli (Líbia)	p-Si, m-Si e a-Si	7 meses	Redução de 10,95% (p-Si), 10,74% (m-Si) e 13% (a-Si) na potência dos módulos sujos. Nos módulos sujos I_{sc} reduz 10,40% (m-Si), 10,70% (p-Si) e 11,90% (a-Si); V_{oc} varia de 0,96% (m-Si) a 2,07% (a-Si).
Joshi <i>et al.</i> (2021)	Não especifica	Não especifica	1 mês	A diferença de energia entre o sistema FV revestido e não revestido é de 935,22 kWh (próximo da fábrica de cimento) e de -0,64 kWh (distante da fábrica de cimento).
Kabir <i>et al.</i> (2021)	Savar, Dhaka (Bangladesh)	Não especificado	50 dias	Redução média de 2,84% da potência; a eficiência reduz até 21%.
Kasim <i>et al.</i> (2021)	Bagdá (Iraque)	HIT	6 meses	A limpeza semanal com água pressurizada proporciona ganho na geração de até 7,69% em janeiro; 2,68% e 2,87% em março e abril (chuvas frequentes), respectivamente. A eficiência melhora até 1,31%. Há diferença máxima de 4,34% na PR de módulos limpos e sujos.

(continuação)

Citação	Local do estudo	Tecnologia FV	Período	Principais conclusões
Khan <i>et al.</i> (2021)	Mirpur (Paquistão)	p-Si	10 semanas	É projetado um Mecanismo de Autolimpeza (<i>Automatic Self Cleaning Mechanism - ASCM</i>). I_{sc} reduz para 5,30 A (sem ASCM) e 6,60 A (com ASCM) (redução de 22%).
Lasfar <i>et al.</i> (2021)	Nouakchott (Mauritânia)	p-Si	3 meses	Para a <i>string</i> 1 (limpa antes das medições), há aumento de potência de 2,88 kW para 3,29 kW. Para a <i>string</i> 2 (limpa a cada 10 dias), aumento de 2,95 kW para 3,26 kW. A redução da geração dos módulos sujos é de 21,57% após 3 meses de exposição.
Leon-Vargas <i>et al.</i> (2021)	Bogotá (Colômbia)	p-Si	2 meses	Sem limpeza, aumento de 26,02% na potência da configuração móvel em relação à fixa.
López <i>et al.</i> (2021)	Almería (Espanha)	Não específica	3 meses	A perda de potência passa de 5% para 7% após 2 meses; V_{oc} não reduz.
Moheyer <i>et al.</i> (2021)	Cidade do México (México)	m-Si	2 anos	PR reduz de ~72% para ~65% devido à sujidade.
Nurjanah, Dewi e Rusdianasari (2021)	Tanjung Enim (Indonésia)	p-Si	6 meses	A eficiência do módulo limpo varia de 13,74% (dezembro) a 26,36% (julho) do sujo de 12,46% (dezembro) e 25,62% (julho).
Radonjić <i>et al.</i> (2021)	Niš (Sérvia)	m-Si	168 dias	Após 45 dias, há redução de 87,20% da potência dos módulos sujos (0°) e 30,60% (32°). A maior redução de potência é superior a 10%/dia (0°).
Raina <i>et al.</i> (2021)	Jaipur (Índia)	Não específica	1 mês	Perdas por sujidade de 6,86% (<i>SRate</i> de -0,233%/dia).
Sanchez-Barroso <i>et al.</i> (2021)	Extremadura (Espanha)	p-Si	11 meses	Incremento de energia elétrica de 11,15%, 6,89% e 1,62% para as limpezas mensal, trimestral e semestral, respectivamente.
Yazdani e Yaghoubi (2021)	Shiraz (Irã)	m-Si	3 anos	Após 25 dias sem chuva, a geração diminui mais de 5%/dia. A <i>SRatio</i> dos módulos sujos varia de 98,30% a 88,10%, resultando em uma redução de 10,20% após 93 dias sem chuvas. Em 170 dias de chuvas leves, a perda média de geração é inferior a 1,50%, mas uma tempestade de areia provoca uma redução de 22%. As perdas médias mensais são de 2% no inverno e primavera, e de 12,20% no verão e outono.

(continuação)

Citação	Local do estudo	Tecnologia FV	Período	Principais conclusões
Abdallah <i>et al.</i> (2022)	Tulkarm (Palestina)	p-Si	1 ano	A diferença de energia entre os módulos limpos semanalmente e os não limpos por um ano é de ~13%.
Ammari <i>et al.</i> (2022)	Benguerir (Marrocos)	p-Si e CdTe	1 ano	Período seco, redução de 160 kWh (CdTe) e 400 kWh (p-Si) na geração de energia devido à sujidade.
Chaturvedi e Ramalingam (2022)	Chennai (Índia)	p-Si	1 mês	Incremento de 14,38% no desempenho dos módulos revestido em relação aos não revestidos.
Dahlioui <i>et al.</i> (2022a)	Rabat (Marrocos)	p-Si	4 meses	As perdas por sujidade variam de 2 a 7% nos módulos com rastreamento e de 7 a 21% no vidro solar fixo à 30°.
Dahlioui <i>et al.</i> (2022b)	Rabat (Marrocos)	p-Si	10 meses	SRate de 0,10%/dia (período seco); as perdas por sujidade variam de 2 a 7%.
Deepak (2022)	Agra (Índia)	p-Si	1 mês	Após a 1ª limpeza, a energia gerada é de 281,10 kWh (módulos limpos) e 271,30 kWh (módulos sujos).
Diouf <i>et al.</i> (2022)	Senegal	Não específica	23 meses	SRate de -0,49%/dia (1º período), -0,34%/dia (2º período), -0,42%/dia (3º período) e 0,33%/dia (4º período).
Ebert <i>et al.</i> (2022)	Florianópolis (Brasil)	p-Si e CdTe	14 meses	Em média, o sistema FV tem perda de 0,62% (p-Si) e 1,11% (CdTe). As perdas máximas mensais são de 2,85% (p-Si) e 2,65% (CdTe).
Elnozahy, Abd-Elbary e Abo-Elyousr (2022)	Assiut (Egito)	Não específica	5 meses	A redução na potência dos módulos sujo e revestidos é de 26% e 14% em comparação ao limpo manualmente.
Ghodki (2022)	Bhopal (Índia)	p-Si	73 dias	Após limpeza, incrementos médios de 11,88% na geração de energia, 13,02% na eficiência e 81,35% em PR.
Gupta <i>et al.</i> (2022)	Jaipur (Índia)	p-Si	1 ano	A eficiência reduz 24,50% (verão), 15,60% (inverno), 5,14% (pós-monção) e 1,95% (monção).
Gupta <i>et al.</i> (2022a)	Jaipur (Índia)	p-Si	124 dias	No verão, a redução da eficiência dos módulos sem e com autolimpeza é de 18,43% e 3,30%, respectivamente.

(continuação)

Citação	Local do estudo	Tecnologia FV	Período	Principais conclusões
Gupta <i>et al.</i> (2022c)	Jaipur (Índia)	Não específica	274 dias	No sistema FV fixo com limpeza semanal, a eficiência reduz em 1,92%, 2,01%, 1,62% e 2% após a 1 ^a , 2 ^a , 3 ^a e 4 ^a semana de exposição, respectivamente; no sistema de limpeza proposto, a redução é de 0,67%, 0,67%, 0,42% e 0,25%, respectivamente.
Islam <i>et al.</i> (2022)	Dhaka (Bangladesh)	Não específica	3 meses	No inverno, <i>SRate</i> na parte frontal é de -1,05 (0°), -0,75 (20°) e -0,68%/dia (30°); não há sujidade na parte traseira.
Kazem, Chaichan e Al-Waeli (2022)	Sohar (Omã)	m-Si e p-Si	35 dias	A potência reduz, devido à sujidade, em até 41% (m-Si) e 38% (p-Si).
Kazem <i>et al.</i> (2022)	Sohar (Omã)	p-Si	2 meses	Perdas de geração de energia de 9% (1 mês) e 20% (2 meses).
Javed <i>et al.</i> (2022)	Doha (Qatar)	m-Si	3 meses	<i>SRatio</i> reduz de 1 para 0,80; <i>SRate</i> é de -0,42%/dia (módulos com superfície de vidro) e -0,49%/dia (polímero com o E-DS desativado).
Juaidi <i>et al.</i> (2022)	Nablus (Cisjordânia)	p-Si	7 meses	Perda de energia de 9,99% após 7 meses sem limpeza.
Jung <i>et al.</i> (2022)	Santiago (Chile)	p-Si	6 meses	Devido à limpeza, a média móvel de <i>PR_{Corr}</i> aumenta para 82%; 36 dias após a limpeza a média móvel de <i>PR_{Corr}</i> é de 74% (-0,35%/dia).
Maftah <i>et al.</i> (2022)	Rabat e Ben Guerir (Marrocos)	m-Si	1 ano	Redução de 2,60% (períodos chuvosos) e 4,50% (período seco) no desempenho da planta FV.
Micheli <i>et al.</i> (2022)	Coquimbo (Chile)	p-Si	3 anos	<i>SRatio</i> média é de 0,91±,013; <i>SRate</i> varia de -0,03%/dia a -0,10%/dia.
Misquita e Zilles (2022)	São Paulo (Brasil)	p-Si	18 meses	A diferença máxima de geração, em relação ao módulo sujo à 0°, fica entre 14,19% (módulos à 20°) e 14,89% (módulos à 25°).
Moraes <i>et al.</i> (2022)	Goiânia (Brasil)	m-Si	18 meses	No período seco a degradação relativa por sujidade (<i>DRS%</i>), varia entre 7,70 e 13%. No período chuvoso, <i>DRS%</i> varia de -0,20% a 4,90%.
Ndeto <i>et al.</i> (2022)	Machakos (Quênia)	m-Si	7 meses	Redução de 4,40%/quinzena (<i>I_{Max}</i>) e 4,10%/quinzena (potência) (local 3) e 4,40%/quinzena (<i>I_{Max}</i>) e 3,80%/quinzena (potência) (local 4).
Oliveira, Prieb e Krenzinger (2022)	Porto Alegre (Brasil)	Não específica	4 meses	Após 3 anos limpeza, a perda média anual de desempenho é de 3,70%. Nos 4 meses posteriores a limpeza, PR passa de 76,69% para 70,94%.

(continuação)

Citação	Local do estudo	Tecnologia FV	Período	Principais conclusões
Pouladian-Kari <i>et al.</i> (2022)	Nazarabad (Irã)	Não específica	2 anos	Após 92 dias: perdas acumuladas de 33,20% (sistema fixo), 11,90% (SAT padrão) e 5,90% (SAT com manobra de autolimpeza).
Raina, Sharma e Sinha (2022)	Jaipur (Índia)	Não específica	1 mês	SRate varia entre -0,23%/dia e -0,27%/dia.
Rahbar <i>et al.</i> (2022)	Nazarabaad (Irã)	Não específica	3 meses	O sistema SAT com posição noturna tem rendimento específico 34,24% superior ao sistema fixo; diferença máxima de 22,75% no desempenho diário do sistema FV SAT com e sem posição noturna, ambos sujos.
Sevik e Aktas (2022)	Çorum (Turquia)	p-Si	4 meses	No dia seguinte à limpeza, aumento médio da eficiência é de 4,95%; a diferença passa para 3,67% no 15º dia após a limpeza.
Shenouda <i>et al.</i> (2022)	Caico (Egito)	m-Si	6 semanas	Redução de 19,02% na eficiência dos módulos sujos; esse percentual reduz para 13,75% e 11,14% nos módulos com sistemas de vibração com tempo de acionamento de 2 e 4 minutos, respectivamente.
Sisodia e Mathur (2022)	Jodhpur (Índia)	Não específica	4 meses	Em TR I (0° a 25°) as perdas médias de potência são 19,21% (RFP) e 19,17% (NFP); em TR II (25° a 60°), a redução média de potência varia de 19,21 a 9,77% (RFP) e de 19,17 a 2,67% (NFP); em TR III (60° a 90°) a perda de potência aumenta de 9,77 para 14,69% (RFP).
Souza, Lima e Lima Júnior (2022)	Petrolina (Brasil)	p-Si	8 meses	A maior diferença entre a potência dos módulos limpo e sujo é de 18,72% (48 dias após 0,30 mm de chuva).
Thongsuwan <i>et al.</i> (2022)	Chiang Mai (Tailândia)	m-Si	9 meses	Módulos revestidos e não revestidos limpos: a diferença média diária da potência (ΔP) varia entre 5 e 9%; o maior valor de ΔP é 14,22%.
Touhami <i>et al.</i> (2022)	Adrar (Algeria)	Orgânico	2 meses	Redução de 25,60% da potência no módulo sujo em relação ao limpo; I_{sc} passa de 48,58 mA (limpo) para 35,867 mA (sujo).
Yadav <i>et al.</i> (2022)	Lucknow (Índia)	p-Si	1 ano	Após 85 dias sem chuvas, a perda de sujidade atinge valor máximo de 29,34% e SRate passa de 0,34%/dia para 0,25%/dia.
Yazdani e Yaghoubi (2022)	Shiraz (Irã)	m-Si	6 meses	A taxa de perda da eficiência passa de -0,27%/dia (1ª semana) para -0,13%/dia (6 meses).
Yousif <i>et al.</i> (2022)	Sohar (Omã)	m-Si e p-Si	35 dias	Redução de 30,24% (m-Si), 28,94% (p-Si) e 36,21% (m-Si flexível) na energia gerada.

(continuação)

Citação	Local do estudo	Tecnologia FV	Período	Principais conclusões
Abdallah <i>et al.</i> (2023)	Doha (Catar).	Heterojunção monofacial Heterojunção bifacial	3 anos	Entre abril e dezembro de 2017, o módulo bifacial limpo duas vezes apresenta <i>SRate</i> média de 0,86%/dia, enquanto o monofacial limpo cinco vezes tem <i>SRate</i> de 3,40%/dia. De maio a outubro de 2018, o bifacial limpo uma vez registra <i>SRate</i> de 0,39%/dia, e o monofacial limpo duas vezes apresenta <i>SRate</i> de 1,80%/dia. Em novembro e dezembro de 2019, a <i>SRate</i> é de 0,03%/dia para o bifacial e 0,02%/dia para o monofacial.
Abraim <i>et al.</i> (2023)	Ben Guerir (Marrocos)	m-Si	3 meses	A maior perda diária de energia devido à sujidade é de 8,30 MWh, e a perda total de energia após 3 meses é de 264,5 MWh.
Ahmed <i>et al.</i> (2023)	(Bahrein)	m-Si	4 meses	Redução de 2,30%, 3,50% e 7,10% na eficiência ao limpar os módulos a cada 2 semanas, 3 semanas e 4 semanas, respectivamente.
Aidara <i>et al.</i> (2023)	Dakar (Senegal)	p-Si	2 meses	Redução de 12 e 15% na potência após 2 e 3 semanas sem limpeza, respectivamente.
Al-Salaymeh <i>et al.</i> (2023)	Amã (Jordânia)	p-Si	2 semanas	A diferença de potência normalizada dos módulos limpos naturalmente, neutralizados eletrostaticamente e revestidos, em relação ao limpo manualmente, é de 5,93%, 4,56 e 2,33%, respectivamente.
Al-Soeidat, Khawaldeh e Lu (2023)	(Jordânia)	m-Si	2 meses	A potência do módulo FV, reduz 70 W (cada módulo). No pior cenário, a potência do módulo degradado e com sujidade é 176,20 W menor em relação ao limpo e íntegro. O <i>FF</i> do limpo é de 77,19% e 76,21% do sujo.
Aman, Rizwan e Kumar (2023)	Não especifica	Não especifica	4 meses	<i>SRatio</i> mínimo de 86,56% em abril; chuvas leves não são eficientes para limpeza dos módulos. A maior perda de potência é de 110 W.
Ammari <i>et al.</i> (2023)	Benguerir (Marrocos)	p-Si e Amostra de vidro	10 meses	A perda semanal atinge 19,15% para a amostra não revestida e 16,86% para a amostra ARC (revestimento antirreflexo). Durante o período seco, redução na eficiência de 9% (não revestido) e 10% (com ARC).
Benghanem <i>et al.</i> (2023)	Medina (Arábia Saudita).	p-Si e m-Si	5 meses	Módulos p-Si sofrem redução de 1,65% na potência (1039 W/m^2) e 9,17% (467 W/m^2); m-Si tem redução de potência de 6,06% (1.010 W/m^2) e 6,69% (472 W/m^2). O impacto da sujidade reduz com o aumento da irradiação.

(continuação)

Citação	Local do estudo	Tecnologia FV	Período	Principais conclusões
Bessa <i>et al.</i> (2023)	Carolina do Norte (EUA)	Não específica	1 ano	Há redução do desempenho na primavera, as perdas chegam a 15%. No local A, após limpeza manual, há recuperação de 5% da geração. <i>SRate</i> no maior período seco é de 0,0015%/dia. Incremento entre 5 e 11% no desempenho devido à limpeza manual em todos os locais analisados.
Deepak, Malvi e Sagar (2023)	Gwalior (Índia)	Não específica	1 dia	A energia elétrica gerada pelos módulos antes da limpeza é de 125,50 kWh e de 193,50 kWh após a limpeza; a diferença de geração é de 68 kWh.
Eisa <i>et al.</i> (2023)	Cairo (Egito)	p-Si	6 semanas	A blindagem 1D reduz o acúmulo de poeira, a redução na eficiência não excede 10%, exceto após a 3ª semana; redução da eficiência de 11% (módulo sem blindagem) e 19% (blindado 2D) após a 1ª semana.
Ferreira <i>et al.</i> (2023)	Serra (Brasil)	p-Si	6 anos	A limpeza dos módulos aumenta a potência em 4,01%. A sujidade acumulada durante 6 anos reduz a potência da planta FV em 3,86%.
Galal <i>et al.</i> (2023)	Oásis de Kharga (Egito).	m-Si e p-Si	1 ano	A densidade deposição na faixa de 0,014-0,057 g/m ² resulta em perdas entre 42% (m-Si) e 21% (p-Si); <i>I_{sc}</i> reduz 40% em ambas as tecnologias. A temperatura do módulo limpo é maior em comparação ao sujo.
Jassasi <i>et al.</i> (2023)	Al Batinah (Omã)	p-Si	6 meses	A diferença média da corrente é 14%; em novembro, a diferença da corrente é de 2%, e passa para 5% (dezembro) e 10% (janeiro). A diferença média da energia elétrica dos módulos limpos e sujos é de 11%.
Jo <i>et al.</i> (2023)	Coreia do Sul	Não específica	Não especifica	Quando comparada a produção média trimestral de energia elétrica, há aumento de 26% da geração após uma chuva. Comparando um período antes e após uma chuva, há aumento de 4,80% na produção de energia.
Kichene <i>et al.</i> (2023)	Ain El-Melh (Argélia)	p-Si	1 mês	<i>PR</i> médio é de 65,74% (limpo) e 62,63% (sujo). A perda média de captura da <i>string</i> suja é de 2,39 h/dia e de 2,11 h/d para a <i>string</i> limpa.
Lopez-Lorente <i>et al.</i> (2023)	Nicósia (Chipre)	Não específica	2 anos	<i>SRate</i> varia entre 0,10%/dia e 0,20%/dia nos períodos sem chuva. Nos dias secos do período chuvoso, <i>SRate</i> é de 0,039%/dia. Nos episódios de poeira e com alta concentração de PM, <i>SRate</i> é >0,20%/dia. As perdas diárias variam entre 0,01% e 9,91% (valor médio de 1,90%). As perdas mensais são de 2,40% variando de 0,30% (janeiro) a 4,34% (agosto).

(continuação)

Citação	Local do estudo	Tecnologia FV	Período	Principais conclusões
Mehdi <i>et al.</i> (2023)	Benguerir (Marrocos)	p-Si e CdTe	4 meses	No 1º período de seca, <i>SRatio</i> reduz de 1 (p-Si e CdTe) até 0,74 (p-Si) e 0,76 (CdTe). As perdas máximas são de 25,49% (p-Si) e 23,15% (CdTe).
Ndiaye <i>et al.</i> (2023)	Dakar (Senegal)	p-Si	1 mês	I_{sc} é de 8,72 A (limpo) e 7,48 A (sujo) (redução de 14,22%). A potência máxima é de 141,15 W (limpo) e 114,50 W (sujo); a redução da potência passa de 1,05 para 18,88% para o módulo sujo em comparação ao limpo.
Nygard <i>et al.</i> (2023)	Não especifica	p-Si	3 anos e 2 meses	<i>SRatio</i> ~1 na estação chuvosa; <i>SRate</i> de -0,07%/dia (agosto a dezembro).
Oliveira, Vasconcelos e Freitas (2023)	Montes Claros (Brasil)	Não especifica	2 anos	Em setembro de 2022, a limpeza dos módulos da planta de 15 kWp aumenta a geração de energia em 28,85% em relação ao ano anterior, com um incremento de 20,62% em novembro. Para a planta de 45 kWp, a geração cresce 4,56% após 6 dias da limpeza, alcançando 17,64% em novembro e 16,16% em dezembro de 2022.
Prasad, Mahanta e Bojjagani (2023)	Lucknow (Índia)	p-Si e m-Si	1 semana	A perda de energia é, no máximo, de 17,20% (área comercial) e 6,17% (área isolada).
Raina e Sinha (2023)	Jaipur (Índia)	Não especifica	80 dias	Após 45 dias, as perdas de sujidade são de 12% no módulo bifacial [<i>SRate</i> de 0,328%/dia (face frontal) e 0,031%/dia (fase traseira)] e 14% para o monofacial (<i>SRate</i> de 0,367%/dia).
Rathod, Mishra e Mishra (2023)	Dehradun (Índia)	p-Si	4 dias	A potência do SPP A (sujo) reduz de 213,34 W para 174,71 W após 45 dias; a potência do SPP B (limpo) varia entre 213,33 W e 197,20 W. Há redução de 22,50% na eficiência de SPP A e de até 3,20% em SPP B.
Sahouane <i>et al.</i> (2023)	Adrar (Argélia)	m-Si	126 dias	O incremento de energia chega a 1,46%, 0,53% e 1,83% após a 1ª, 2ª e 3ª limpeza, respectivamente. As perdas de energia são de 1,93%, 2,13% e 2,43% após 15, 21 e 28 dias sem limpezas, respectivamente.
Shadid <i>et al.</i> (2023)	Amã (Jordânia)	p-Si, m-Si e a-Si	4 semanas	Após 2 semanas, a potência média do sistema FV sujo reduz 12,10% (m-Si e p-Si/Sul), 19,20% (m-Si e p-Si Leste/Oeste) e 14,30% (a-Si). Em comparação com a superfície limpa, a eficiência reduz 12,30%, 15,80%, 10,60%, 23,50% e 14% para os sistemas m-Si/Sul, m-Si Leste/Oeste, p-Si/Sul, p-Si Leste/Oeste e a-Si, respectivamente.

(conclusão)

Citação	Local do estudo	Tecnologia FV	Período	Principais conclusões
Shariah e Al-Ibrahim (2023)	Irbid (Jordânia)	p-Si	5 meses	Módulos limpos apresentam redução de potência (10,70%), I_{sc} (11,80%), I_{Max} (11,20%), V_{Max} (1%) e V_{oc} (0,50%). A variação média diária é de 7,50%, sendo mais acentuada ao meio-dia. A sujidade não impacta significativamente na temperatura dos módulos.
Wu, Chen e Peng (2023)	Taichung (Taiwan)	p-Si	3,5 dias	A geração acumulada do módulo limpo é de 9,90 kWh, enquanto no sujo gera 9,68 kWh, uma diferença de 2,22%.
Ammari <i>et al.</i> (2024)	Benguerir (Marrocos)	p-Si e m-Si e CdTe	1 ano	$SRatio$ são 72% (m-Si), 73% (p-Si) e 76% (CdTe). $SRate$ variam entre -0,0025% e -0,035%/dia, dependendo da estação, com maiores reduções no verão e primavera.
Chala, Sulaiman e Al Alshaikh (2024a)	Mascate (Omã)	m-Si	9 dias	Módulos limpos manualmente a cada três dias atingem 85,60 W e 23,60% de eficiência; módulos sujos chegam a 75,70 W e 17,10%. Às vezes, módulos sujos apresentam desempenho ligeiramente superior.
Chala, Shaharin e Alshaikh (2024b)	Al Seen (Omã)	m-Si	2 meses	Densidades de sujidade de 20,70 g/m ² , 27 g/m ² e 41,30 g/m ² causam reduções de geração elétrica de 18%, 33% e 40% após 1, 2 e 3 semanas, respectivamente. Sujidade diária resulta em 14% de perda na geração.
Ishii (2024)	Gunma (Japão)	p-Si e Heterojunção	6 anos	Antes da limpeza, as taxas de degradação das <i>strings</i> FV são de 0,80% a 1,60%/ano, aumentando para 3,60% a 7,30% após a limpeza.
Kalf e Atwan (2024)	Bagdá (Iraque)	m-Si	9 meses	No inverno, não há diferença significativa entre módulos limpos e sujos devido à chuva. Após 9 meses, a potência dos módulos diminui 18%.
Keskin (2024)	Samsun (Turquia)	p-Si	3 meses	Em junho, <i>strings</i> limpas têm perda de 9,41% a 10,02%, enquanto sujas variam de 12,44% a 19,03%. A geração de energia é reduzida em até 0,26%/dia devido à sujidade.
Luo <i>et al.</i> (2024)	Arábia Saudita	Orgânico	4,5 anos	A geração de energia elétrica é reduzida em até 0,26%/dia. Se o módulo não for limpo, a corrente é reduzida entre 5% e 10% devido à sujidade.
Souza e Carvalho (2024)	Cedro (Brasil)	m-Si	1,5 ano	PR médio de 0,56, com chuvas de 2,49 mm/dia. $SRate$ varia de -0,558%/dia a -0,021%/dia em períodos secos, com média de -0,160%/dia.

Fonte: Autor (2025).

Quadro 8 – Estudos experimentais que descrevem as características da composição físico-química da sujidade coletada em sistemas FV ou amostras de vidro, mesmo sem menção à análise de desempenho dos sistemas FV.

(continua)

Citação	Local do estudo	Superfície de coleta	Período de coleta/exposição	Principais conclusões
Chaouki <i>et al.</i> (2016)	Rabat (Marrocos)	Não específica	Não especifica	O DRX identifica a presença de quartzo e calcita, enquanto a Calorimetria Exploratória Diferencial (<i>Differential Scanning Calorimetry - DSC</i>) confirma quartzo, carbonatos de cálcio e matéria orgânica. A análise XRF detecta sílica, alumina e óxidos de ferro, cálcio, magnésio e potássio.
Costa <i>et al.</i> (2016)	Diamantina, Montes Claros e Sete Lagoas (Brasil)	Não específica	Única coleta	Nas amostras de Diamantina e Montes Claros são identificados calcita e gesso; a amostra Sete Lagoas apresenta dióxido de titânio. Todas as amostras contêm quartzo, hematita e caulinita. A amostra 1 tem partículas variando de 0,50 a 100 µm, a amostra 2 possui partículas esféricas, e a amostra 3 mostra aglomeração.
Ilse <i>et al.</i> (2016)	Doha (Qatar)	Amostra de vidro	1 mês	A Espectroscopia Dispersiva de Energia de Raios-X (<i>X-Ray Energy Dispersive Spectroscopy - EDX</i>) revela SiO ₂ (66%), MgO (16%), Al ₂ O ₃ (7%), Fe ₂ O ₃ (5%), CaO (4%), K ₂ O (1%) e Na ₂ O (1%).
Kazmerski <i>et al.</i> (2016)	Brasil e Arábia Saudita	Não específica	Não especifica	Para a amostra A da Arábia Saudita, com 20% de umidade e 41°C, a análise EDS indica O (42%), Si (40,80%), C e Ca (1,60%), K (1,40%), Cl (1,30%), Na e Mg (1,20%). A amostra B, com 82% de umidade e 36°C, apresenta O (45,30%), Si (31,40%), C (6,30%), Ca (2,40%), K (1,80%), Cl (4%), Na (6,20%) e Mg (1,90%). No Brasil, uma amostra de local remoto contém O (45,80%), Si (16,70%), Fe (8,60%), C (5,60%), Ca (4,20%), K (2,70%), Mg (5,70%) e Al (5,40%), para a amostra de área de tráfego intenso: O (41%), Si (11%), Fe (7,10%), C (13,80%), Ca (9,10%), K (1,60%), Mg (2,40%), Al (6,80%) e S (4%). As partículas na Arábia Saudita variam de 30 a 120 µm, enquanto no Brasil, de 40 a 120 µm.
Javed <i>et al.</i> (2017)	Doha (Qatar)	Módulo CdTe	10 meses	O diâmetro médio das partículas é de 44, 36, 32 e 27 µm para exposições de 1 dia, 1 mês, 2 meses e 6 meses, respectivamente, com análise elementar indicando presença de Ca e Si. Após tempestade de areia, a proporção de halita, quartzo, calcita e dolomita aumenta, com tamanho variando entre 30 e 60 µm.

(continuação)

Citação	Local do estudo	Superfície de coleta	Período de coleta/exposição	Principais conclusões
Jesus <i>et al.</i> (2018)	Brasil e Itália	Amostra de vidro	5 meses	No Brasil, a análise por SEM identifica pólen, partes de plantas e minerais com tamanhos entre 1 e 55 µm. A EDS revela a composição da sujidade: O (54,70%), Ca (17,40%), Si (12,60%), Na (3,10%), Al (2,40%), Fe (1,50%) e Mg (1,20%), com a presença de hematita, calcita, goethita, mica, lepidocrocita e carbono amorfos. Na Itália, os minerais predominantes incluem carbonato de cálcio, silicatos e quartzo.
Mehmood, Al-Sulaiman e Yilbas (2017)	Dahran (Arábia Saudita)	Não especifica	Não especifica	As partículas variam de 4 a 600 µm, com composição de O (35,30%), Ca (22,50%), C (19,10%), Si (13,90%), Mg (2,20%) e Fe (1,90%). A Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (<i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy - FTIR</i>) detecta quartzo, calcita, pirofilita, hematita, dolomita e outros minerais.
Olivares <i>et al.</i> (2017)	Deserto do Atacama (Chile)	Amostra de vidro	4 meses	As partículas do solo e dos módulos apresentam tamanhos de 4 a 200 µm, com identificação de albita, anortita, calcita, gesso, halita, quartzo e muscovita.
Romanholo <i>et al.</i> (2018)	Goiânia (Brasil)	Módulo p-Si	1 ano	A amostra 1 revela alta concentração de Si, Al e Mg (manchas esbranquiçadas), enquanto as amostras 2 (manchas escuras) e 3 (sujidade uniforme) contêm compostos orgânicos com tamanho médio <10 µm. A amostra 4 (sujidade abundante) contém S e O, e a amostra 5 (material sedimentado) tem tamanho médio de 100 µm com altas concentrações de C, O, Ca e N.
Soza <i>et al.</i> (2019)	Deserto do Atacama (Chile)	Amostra de vidro	7 meses	O exame SEM indica que as partículas tendem a ter geometria esférica e prismática, corroborando resultados de Olivares <i>et al.</i> (2017), e revela a presença de ilita.
Araújo <i>et al.</i> (2020b)	Fortaleza (Brasil)	Módulo p-Si	Única coleta	A análise de XRF identifica as concentrações de elementos em PV1 e PV2, com Si variando de 36,67% a 40,23%, Fe de 19,54% a 17,28%, e outros elementos.
Freitas Filho <i>et al.</i> (2020)	Fortaleza (Brasil)	Módulo p-Si	Única coleta	A análise SEM mostra que em PV1 as partículas variam de 14 a 112,10 µm e em PV2 de 11,31 a 208,30 µm, corroborando os resultados de Araújo <i>et al.</i> (2020b).

(continuação)

Citação	Local do estudo	Superfície de coleta	Período de coleta/exposição	Principais conclusões
Dhaouadi <i>et al.</i> (2021)	Sharjah (Emirados Árabes Unidos)	Amostra de vidro	4 meses	As partículas variam entre 2 e 20 µm, com formato de placa e partículas menores quase esféricas. A DRX identifica gesso, sílica, calcita, akermanita e vestígios de óxidos de ferro, silimanita e olivina, com principais componentes sendo O, C, Ca e Si.
Drame <i>et al.</i> (2021)	Dakar (Senegal)	Não especifica	9 meses	As partículas entre 0,10 e 10 µm. A análise EDS revela O (48,50%), Si (24,10%), Al (9,78%), Fe (8,11%), Ca (4,17%), Mg (1,59%), K (1,08%) e Cl (1,05%). A DRX mostra 73,80% de quartzo/a-quartzo, 13,60% de calcita e 12,60% de cloreto de óxido de ferro, kaersutita e mantienneita.
Laarabi <i>et al.</i> (2021)	Rabat, Errachidia, Agadir, Ifrane e Oujda (Marrocos)	Não especifica	Não especifica	As análises de XRD e FTIR identificam quartzo, calcita e caulinita, com XRD confirmando a presença desses minerais em diversas localidades, como Rabat, Errachidia, Agadir, Ifrane e Oujda.
Olivares <i>et al.</i> (2021)	Deserto do Atacama (Chile)	Amostra de vidro	1 ano	Os resultados corroboram estudos anteriores, identificando também anidrita em análise realizada por Olivares <i>et al.</i> (2021).
Bazarbayev <i>et al.</i> (2022)	Nukus e Khorezm (Uzbequistão)	Amostras de vidro	1 ano	A sujidade acumula-se com taxas de deposição variando de 160 a 1200 mg/m ² por semana em Nukus e de 80 a 1000 mg/m ² em Khorezm, com partículas entre 20 nm e 10 µm, e altas concentrações de C, O, Na, Mg, Al, Si, K, Ca e Fe.
Laarabi <i>et al.</i> (2022)	Tamil Nadu (Índia)	Amostras de vidro	5 meses	As partículas apresentam formas elípticas, esféricas ou alongadas, com diâmetro de 0 a 4 µm, destacando-se elementos como Si, Na, Ca e Mg.
Takeuchi <i>et al.</i> (2022)	Medianeira (MD), Pato Branco (PB), Campo Mourão (CM) e Curitiba (CT) (Brasil)	Módulos m-Si, p-Si, CdTe e CIGS	Não específica	Nas amostras de MD, PB, CM e CT, as partículas variam de 1 a 44 µm, 1 a 49 µm, 1 a 17 µm e 1 a 58 µm, respectivamente. O oxigênio é o elemento dominante, seguido por Fe, Si, Al, Ca, Sn, Mg, Ti, Ba, K, S, F, Cu, Na, Cl, P e Mn.

(conclusão)

Citação	Local do estudo	Superfície de coleta	Período de coleta/exposição	Principais conclusões
Tobosque <i>et al.</i> (2022)	Deserto do Atacama (Chile)	Amostras de vidro	28, 35, 42 e 49 dias (verão e inverno);	As amostras contêm muscovita, clorita, quartzo e calcita. A composição química nas amostras com 42 e 49 dias de exposição no verão apresenta aumentos em Cl, S, Al e C. O diâmetro mediano das partículas é inferior a 2,36 µm.
Xiong, Zhang e Yuan (2022)	Sichuan Ocidental (China)	Não especifica	Não especifica	XRD confirma a presença de quartzo (SiO_2). A maior parte das partículas no lado direito (X1), esquerdo (X2), face frontal (Z1) e traseira (Z2) estão na faixa de 1,71, 2,19, 2,54 e 2,20 µm de diâmetro físico, respectivamente. EDS revela presença de C, O, Fe, Mg, Al, Si, K e Ca.
Alkharusi, Huang e Markides (2023)	Mascate (Omã)	Amostras de vidro	1 ano	Após um ano de deposição, a amostra de vidro sujo (horizontal) contém dióxido de silício, carbonato de cálcio, carbonato de cálcio e magnésio, dióxido de titânio, carboneto de ferro e silicato de alumínio, sendo o Si o elemento dominante. As partículas de sujidade são heterogêneas.
Alraeesi <i>et al.</i> (2023)	Dubai (Emirados Árabes Unidos)	Não especifica	1 mês	Amostras de sujidade foram coletadas em cinco locais distintos, incluindo a superfície do solo e dos painéis de uma usina de 13 MW. As composições químicas variam, mas calcita está presente em todas. As partículas variam em tamanho de 0,01 a 30 µm, com formatos irregulares e rugosos em algumas amostras.
Liu <i>et al.</i> (2023)	Dengkou e Wuhan (China)	Amostras de vidro	Não especifica	As partículas apresentam formas irregulares com tamanhos na ordem de 10^{-5} m. As características da sujidade de Wuhan são semelhantes às de Dengkou, contendo elementos como S, Fe, Ca, K, Si, Al, Mg, Na, O, C, H e Cl. Os principais minerais identificados são quartzo, sal de alumínio e calcário.
Nazififard e Torabi (2023)	Kashan (Irã)	Amostras de vidro	6 dias	Os compostos minerais predominantes incluem quartzo, calcita, albita, biotita e cloritos, com diâmetro máximo entre 250 e 350 nm; partículas com diâmetro inferior a 150 nm ou superior a 500 nm são insignificantes.
Guo <i>et al.</i> (2024)	Hohhot (China)	p-Si	Não especifica	O tamanho das partículas varia de 0,112 a 199,60 µm, com um diâmetro médio de 15,710 µm. Algumas partículas são aproximadamente esféricas, e os principais elementos identificados são O, Si, Al, Fe, Ca, Na e Mg.

Fonte: Autor (2025).

APÊNDICE C – ANÁLISE DA COMPATIBILIDADE ELÉTRICA ENTRE ST1 E ST2

Antes de iniciar este estudo, é fundamental verificar se os módulos de ST1 e ST2 são idênticas ou, caso contrário, identificar as diferenças entre ambos. Para avaliar a compatibilidade elétrica de ST1 e ST2, sob as mesmas condições operacionais, os parâmetros elétricos medidos são analisados estatisticamente. O servidor *web* do fabricante do inversor disponibiliza as medições de tensão e corrente máximas (V_{ST1} , V_{ST2} , I_{ST1} e I_{ST2}), sendo a potência de ST1 (P_{ST1}) e ST2 (P_{ST2}) dadas pelo produto entre tensão e corrente de cada *string*.

A análise estatística utiliza dados coletados no período entre 05/07/2023 e 11/07/2023, período em que as *strings* operam sob as mesmas condições ambientais e operacionais. Filtros são aplicados para evitar a inclusão de dados espúrios decorrentes de erros de medição e/ou desconexões temporárias (valores nulos) do sistema de medição:

- Medições de tensão inferiores a 120 V (tensão de disparo do inversor) são excluídos;
- Medições de potência inferiores a 10% da potência nominal da *string* são desconsiderados;
- Para minimizar a influência de variações nas condições ambientais, as médias de cada parâmetro são calculas a cada 10 minutos;

Na Tabela 15 são apresentados os resultados dessa análise e os respectivos valores da diferença relativa percentual (Δ_x). Para o cálculo de Δ_x , os parâmetros de ST2 são utilizados como referência, conforme definido na Equação (C1).

Tabela 15 – Resultado da análise estatística descritiva de ST1 e ST2.

	V_{ST1} (V)	V_{ST2} (V)	Δ_V (%)	I_{ST1} (A)	I_{ST2} (A)	Δ_I (%)	P_{ST1} (W)	P_{ST2} (W)	Δ_P (%)
Máximo	226,77	226,19	-0,26%	8,59	8,89	3,37%	1644,47	1673,46	1,73%
Média	194,95	195,68	0,37%	5,00	5,20	3,93%	967,30	1007,24	3,97%
Mediana	194,49	194,73	0,12%	5,09	5,33	4,53%	1003,70	1036,07	3,12%
Mínimo	160,31	174,43	8,09%	0,93	0,90	-3,33%	206,90	203,57	-1,64%
Desvio Padrão	6,67	7,31	8,69%	2,01	2,07	2,79%	373,17	380,48	1,92%

Fonte: Autor (2025).

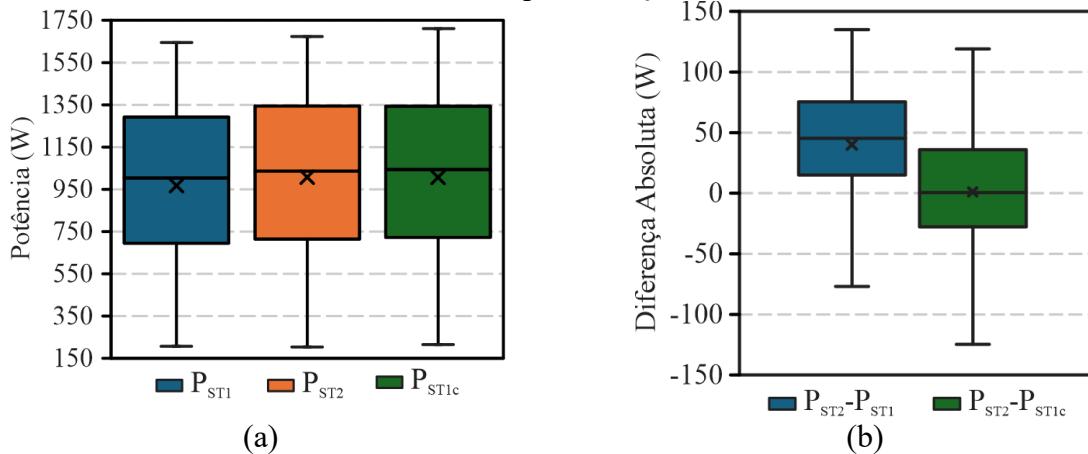
$$\Delta_x = \frac{X_{ST2} - X_{ST1}}{X_{ST2}} \cdot 100\% \quad (C1)$$

Em que X_{ST1} e X_{ST2} são os parâmetros da *string* ST1 e ST2 que estão sendo comparados, respectivamente.

O valor médio de P_{ST2} é cerca de 4% superior ao valor médio de P_{ST1} . Em virtude dessa diferença, optou-se por aplicar uma correção linear de 4% ao valor de P_{ST1} , que é denotado

como P_{ST1C} , indicando a incorporação dessa correção dos dados. Na Figura 52 (a) são apresentados os *boxplot* comparativos das medições de P_{ST1} , P_{ST2} e P_{ST1C} . Além disso, na Figura 48 (b), é mostrado o *boxplot* da diferença absoluta entre as medições de P_{ST2} (referência) e P_{ST1} e P_{ST1C} , respectivamente.

Figura 52 – Compatibilidade elétrica LEA2: (a) comparativo P_{ST1} , P_{ST2} e P_{ST1C} ; (b) diferença absoluta antes e após correção dos dados.



Fonte: Autor (2025).

Os indicadores estatísticos, apresentados na Tabela 16, destacam os impactos do procedimento de correção linear na compatibilidade elétrica das medições de potência entre ST1 e ST2. Os indicadores incluídos são: MBE, RMSE, MAPE, MPE e R^2 ; detalhes sobre esses indicadores estatísticos podem ser encontrados em Jamil e Akhtar (2017).

Tabela 16 – Indicadores estatísticos do procedimento de compatibilidade elétrica ST1 e ST2.

-	MBE	RMSE	MAPE	MPE	R^2
P_{ST1}	39,94	60,45	0,06	4,24	0,97
P_{ST1C}	1,25	46,32	0,05	0,41	0,99

P_{ST2} e P_{ST1C} apresentam um comportamento similar, com uma diferença entre seus valores médios em torno de 0,12%; valor similar é encontrado em Sahouane *et al.* (2023). Além disso, o procedimento de correção resulta na redução do MBE de 39,94 para 1,25. Da mesma forma, os valores de RMSE, MAPE e MPE também diminuem, indicando que P_{ST1C} e P_{ST2} são próximos, ou seja, o procedimento de correção linear aumenta a compatibilidade entre ST1 e ST2; o aumento do R^2 reforça essa conclusão. Devido à baixa magnitude do MBE, essa diferença pode ser desprezada e, consequentemente, permitindo concluir que as *strings* são idênticas quando operando com módulos limpos manualmente e sob as mesmas condições ambientais.