



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

SAULO MONTENEGRO ARAÚJO

**REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA SOBRE O IMPACTO DA
SUJIDADE EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**

FORTALEZA-CE

2023

SAULO MONTENEGRO ARAÚJO

REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA SOBRE O IMPACTO DA SUJIDADE EM
MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Luiz Marcelo Antunes.

FORTALEZA

2023

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)

- A691r Araújo, Saulo Montenegro.
Revisão sistemática da literatura sobre o impacto da sujidade em módulos fotovoltaicos / Saulo Montenegro Araújo. – 2023.
36 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2023.
Orientação: Prof. Dr. Fernando Luiz Marcelo Antunes.
1. Energia solar. 2. Sujidade. 3. Módulos fotovoltaicos. 4. Eficiência. I. Título.

CDD 621.3

SAULO MONTENEGRO ARAÚJO

**REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA SOBRE O IMPACTO DA
SUJIDADE EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará como requisito parcial para obtenção do Título de Engenheiro Eletricista.

Prof. Dr. Fernando Luiz Marcelo Antunes – Orientador

Prof. Dr. Ricardo Silva The Pontes

Me. Anderson Jhones Passos Nascimento

Fortaleza, 07 de Junho de 2023.

À minha família e amigos.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Solange e Kenedy e irmão Samuel, pela ajuda direta e indireta, constante incentivo e compreensão nos momentos difíceis.

Ao professor Dr. Fernando, por ter sido meu orientador, e ter desempenhado tal função com esforço e dedicação. Aos demais participantes da banca por concordarem em participar do processo final de minha graduação. Aos demais professores, servidores e colegas de graduação que impactaram na minha formação acadêmica.

Aos meus amigos, que sempre estiveram ao meu lado, pela amizade incondicional e pelo apoio, demonstrado ao longo de todo o período de tempo em que me dediquei a este trabalho.

Por fim, a todos aqueles que contribuíram, de alguma forma, para a realização deste trabalho.

RESUMO

Em meio ao constante desenvolvimento industrial e a preocupação em buscar um desenvolvimento energético sustentável, estudos sobre fontes de energias renováveis são essenciais. A energia solar tornou-se a segunda maior fonte de geração da matriz energética brasileira e muitos dos estudos a respeito desta buscam apontar os fatores que diminuem sua eficiência e meios para mitigar tais fatores. A sujidade é o acúmulo de poeira e particulados nas superfícies dos painéis dos sistemas fotovoltaicos e uma das principais causas da diminuição na eficiência de tais sistemas. O presente trabalho visa realizar uma revisão sistemática da literatura a respeito do impacto da sujidade em módulos fotovoltaicos através de uma revisão bibliográfica do tema e da análise de quatro trabalhos realizados em diferentes sistemas no Brasil. Todos os estudos realizaram coletas de dados em módulos antes e após a realização de uma limpeza manual, alguns deles também analisaram a influência de precipitações. Com base nesses dados é possível verificar a importância de se incorporar limpezas manuais em prol do aumento de desempenho dos módulos fotovoltaicos que compõem esses sistemas.

Palavras-Chave: Energia solar. Sujidade. Módulos fotovoltaicos. Eficiência.

ABSTRACT

In the midst of constant industrial development and the concern of seeking for sustainable energy development, studies on renewable energy sources are essential. Solar energy has become the second largest source of energy generation in the Brazilian matrix and many of the studies about it seek to point out the factors that reduce its efficiency and ways to mitigate such factors. Soiling is the accumulation of dust and particulates on the surfaces of panels in photovoltaic systems and is one of the main causes of a decrease in the efficiency of such systems. The present work aims to carry out a systematic review of the literature regarding the impact of Soiling on photovoltaic modules through a bibliographical review of the subject and the analysis of four researches made in different systems in Brazil. All studies carried out data collection in modules before and after manual cleaning, and some of them also analyzed the influence of rain. Based on the data acquired, it was possible to verify the importance of incorporating routine manual cleaning in favor of the increase in the performance of the photovoltaic modules that make up these systems.

Keywords: Solar Energy. Soiling. Photovoltaic Modules. Efficiency.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	Tema	8
<i>1.1.1</i>	<i>Energia solar</i>	<i>8</i>
<i>1.1.2</i>	<i>Geração distribuída de energia elétrica</i>	<i>9</i>
1.2	Justificativa	10
1.3	Objetivos	11
1.4	Estrutura do trabalho	11
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1	Irradiação solar	13
2.2	Energia solar fotovoltaica	13
2.3	Fatores de perdas em módulos solares	15
<i>2.3.1</i>	<i>Sujidade</i>	<i>16</i>
<i>2.3.2</i>	<i>Sombreamentos e suas consequências</i>	<i>18</i>
<i>2.3.3</i>	<i>Ações para reduzir sujidade</i>	<i>19</i>
3	METODOLOGIA	21
4	DESCRIÇÃO DE PESQUISAS REALIZADAS	22
4.1	Avaliação do impacto de sujidades no desempenho de módulos fotovoltaicos em Minas Gerais	22
4.2	Efeitos da acumulação de sujeira sobre o desempenho de módulos fotovoltaicos	26
4.3	Análise dos Efeitos da Sujidade no Sistema Fotovoltaico de 34 kWp da EMC/UFG	28
4.4	Impacto da sujidade sobre o desempenho de sistemas fotovoltaicos	30
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	33
	REFERÊNCIAS	34

1 INTRODUÇÃO

1.1 Tema

1.1.1 Energia solar

A geração de energia elétrica a partir da fonte solar fotovoltaica é uma das que mais tem crescido no mundo. De acordo com dados informados pela Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA), em dezembro de 2022, a China, maior produtora de energia solar, alcançou a marca de 306,4 GW, classificado em termos de capacidade operacional, seguida pelos Estados Unidos (93,71 GW), Japão (74,19 GW), Alemanha (58,6 GW) e Índia (49,34 GW).

No Brasil, o crescimento da produção de energia solar tem ocorrido tanto devido ao aumento da geração própria de energia solar, como pela instalação de usinas fotovoltaicas que produzem grandes quantidades de energia. Um exemplo, em 2021, foi a entrada em operação comercial de 278,3 MW referentes ao complexo de usinas fotovoltaicas no Ceará (ANEEL, 2021). A Figura 1 mostra uma usina solar localizada no estado do Ceará.

Figura 1 – Usina solar controlada pela Canadian Solar como produção independente no Ceará.



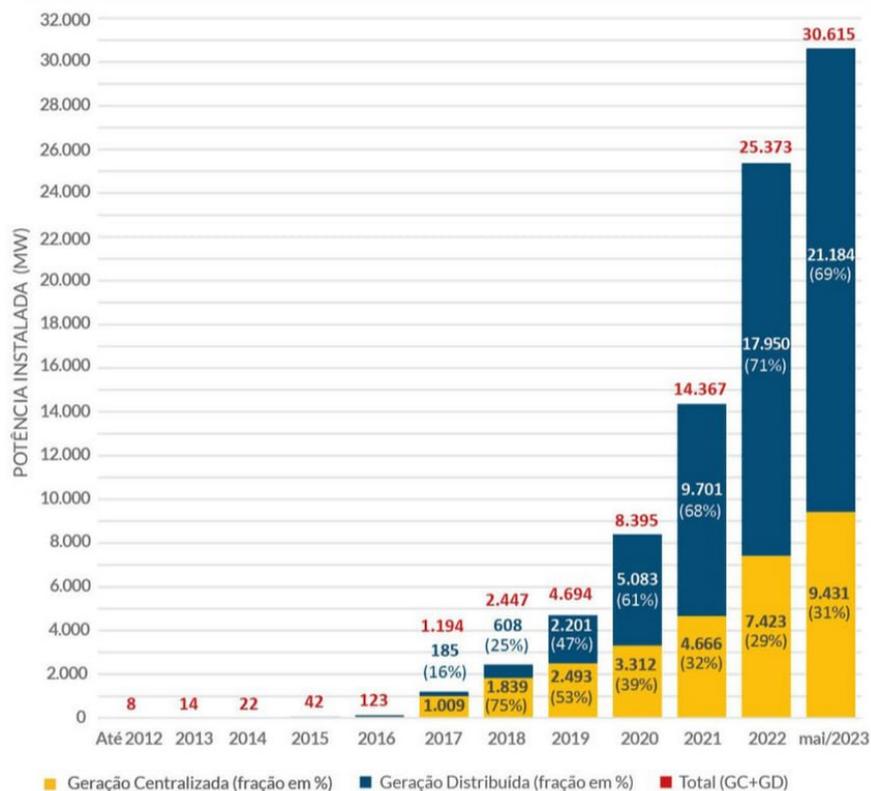
Fonte: Portal Solar (2020)

Segundo informação da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR, 2022), a potência ligada à fonte de energia solar no Brasil aumentou em um ano, do final de 2020 ao final de 2021, de 7,9 GW para aproximadamente 13 GW, sendo 4,6 GW em usinas de geração centralizada e 8,3 GW de potência instalada de geração própria de energia solar.

Ainda de acordo com a ABSOLAR (2023), em fevereiro de 2023 a energia fotovoltaica no Brasil atingiu 25 GW de potência, somando usinas solares industriais e residenciais. A potência operacional que era de 14,2 GW em fevereiro de 2022, e chegou a 25 GW em fevereiro de 2023, atingindo um crescimento em torno de 76% no período de um ano.

Atualmente, a energia fotovoltaica é a segunda maior fonte da matriz elétrica brasileira, com 21,18 GW de geração distribuída contra cerca de 9,43 GW gerados em grandes usinas (ABSOLAR, 2023). A Figura 2 ilustra a evolução, desde 2012 até janeiro de 2023, da produção de energia solar no Brasil.

Figura 2 – Evolução da Fonte Solar Fotovoltaica no Brasil



Fonte: ANEEL (2023).

1.1.2 Geração distribuída de energia elétrica

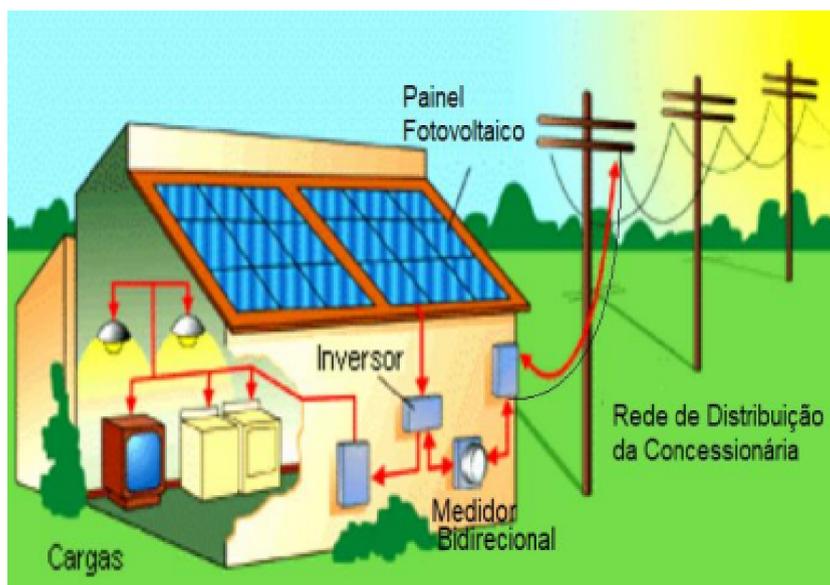
A geração própria de energia elétrica, também chamada de Geração Distribuída (GD), advém de fontes renováveis, tais como a biomassa (combustão de elementos orgânicos), o biogás (biodigestão anaeróbica de resíduos orgânicos), a energia eólica (força do vento), a energia movida a potencial hidráulico e a energia solar. A fonte solar fotovoltaica representa uma fração de 98,6% da potência instalada distribuída, líder isolada do segmento.

A geração distribuída é permitida ao consumidor brasileiro desde 2012, mas vem se expandindo com maior intensidade nos últimos anos. O Sistema de Compensação de Energia Elétrica é um dos incentivos do governo, oferecido para instalação de fonte de energia renovável. Regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) pela Resolução Normativa (REN) nº 482/2012 e revisado pela REN nº 687/2015, esse sistema visa motivar empresas e cidadãos a instalarem pequenas centrais geradoras de energia conectadas à rede de fornecimento da distribuidora de energia elétrica local. Desta forma, o consumidor produz energia que, quando não é consumida em sua totalidade, é fornecida à distribuidora. Assim, toda a energia excedente, injetada na rede, se transforma em crédito energético proporcional à energia fornecida para o Sistema Elétrico Nacional. Esse crédito de energia pode ser utilizado para abater o consumo nos meses seguintes ou em outras unidades de mesma titularidade (ANEEL, 2015). No início de 2022 foi sancionada a Lei nº 14.300, que regulamenta a produção da própria energia que utilizam a partir de fontes renováveis.

Os sistemas de distribuição de energia solar fotovoltaica podem ser implantados em residências, comércios, indústrias, propriedades rurais e prédios públicos sendo considerados microgeração, se a potência instalada for de até 75 kW, ou minigeração, para potências instaladas acima de 75 kW até 5 MW.

A Figura 3 apresenta um sistema fotovoltaico instalado em uma residência, indicando as conexões elétricas e o fluxo de potência do sistema.

Figura 3 – Sistema fotovoltaico conectado à rede



Fonte: Adaptado de Rodriguez (2002).

1.2 Justificativa

A energia solar fotovoltaica é uma alternativa renovável, inesgotável e de baixo impacto ambiental quando comparada a métodos convencionais de geração como a queima de combustíveis fósseis e grandes centrais hidrelétricas.

O constante desenvolvimento industrial e o aumento na utilização de equipamentos elétricos em diversas atividades humanas fizeram com que a demanda por energia elétrica aumentasse de maneira preocupante nas últimas décadas. Tal preocupação ocorre, pois, a segurança do suprimento de energia afeta diretamente o nível de economia, segurança e bem-estar social de um país. Se mostra então fundamental a diversificação da matriz energética através de maior representação de fontes renováveis como a solar fotovoltaica.

Diante do aumento da geração de energia proveniente de sistemas fotovoltaicos, surge a necessidade de estudar fatores externos que interferem no desempenho desses sistemas e buscar mitigar os problemas, a fim de obter um maior rendimento da energia gerada.

Alguns dos fatores responsáveis pelas variações na eficiência da produção de energia são: o acúmulo de material sobre o vidro que cobre os módulos, a localização geográfica, o clima da região, o sombreamento, o posicionamento e tipo dos módulos. Tem-se então a necessidade de conhecer os fatores ambientais e o módulo adequado para cada região, de forma a se obter maior eficiência na produção de energia com menor custo de manutenção e operação dos módulos fotovoltaicos.

Nota-se, então, a importância de uma busca constante na otimização dos painéis fotovoltaicos para evitar ao máximo o desperdício da energia que estes são capazes de gerar. São vários os parâmetros que influenciam na eficiência de tais sistemas como inclinação dos painéis, limpeza das placas, área de instalação, entre outros.

Por estarem em constante exposição, às intempéries ambientais como ventos e poeiras podem influenciar na performance dos sistemas.

1.3 Objetivos

Realização de revisão teórica a respeito da energia solar, Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR) e perda de produtividade em painéis fotovoltaicos em função do índice de sujidade.

Apresentação de trabalhos, realizados em diversas regiões do país, que estudam os efeitos do acúmulo de sujeira em sistemas fotovoltaicos, mostrando os métodos de coleta e análise dos resultados obtidos.

1.4 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está organizado em cinco capítulos contemplando:

Este capítulo introdutório consiste na definição do tema, na justificativa e nos objetivos a serem atingidos.

No capítulo 2 é elaborada uma fundamentação teórica sobre o tema energia fotovoltaica, módulos fotovoltaicos, irradiação solar e o impacto das sujeiras depositadas em módulos fotovoltaicos em diversos ambientes. Nele são descritos os conceitos a serem utilizados ao longo do trabalho, permitindo seu melhor entendimento do mesmo.

O capítulo 3 descreve a metodologia deste trabalho que consiste na pesquisa de dissertações e artigos acadêmicos que analisam o impacto no desempenho de módulos fotovoltaicos causado pela sujeira depositada nas placas.

O capítulo 4 apresenta estudos de autores brasileiros que utilizam a metodologia de comparação entre módulos sujos e limpos para obtenção de valores como potência de pico, energia gerada, dentre outros.

No capítulo 5 estão as considerações finais e as conclusões.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta primeiramente o conceito de irradiação solar e suas características. Em seguida são apresentados os fundamentos da energia fotovoltaica. Por fim, são mostrados os fatores que influenciam as sujidades depositadas em módulos fotovoltaicos, os sombreamentos e as estratégias para reduzir o acúmulo de materiais nos módulos.

2.1 Irradiação solar

A energia proveniente do sol é a mais abundante em nosso planeta e seu aproveitamento é uma das alternativas energéticas mais promissoras para prover a energia necessária ao desenvolvimento humano (PINHO; GALDINO, 2014). A energia radiante solar atinge parcialmente a superfície terrestre em forma de ondas eletromagnéticas, estando a maior parte da radiação solar concentrada na parte visível e próxima do visível do espectro.

Assim, o fluxo de radiação solar que atravessa uma superfície, sem considerar a direção, é denominado irradiação solar. A irradiância, taxa na qual a radiação solar incide em uma superfície, por unidade de área desta superfície, é medida em Watt por metro quadrado (W/m^2).

A irradiância que atinge a superfície terrestre é afetada por vários fatores, tais como localização geográfica, condições atmosféricas, estação do ano, hora do dia, cobertura de nuvens, quantidade de chuva e outros.

No verão, em virtude da inclinação da Terra, a irradiância é maior. No início ou fim do dia, devido à maior massa de ar a ser atravessada, uma parcela maior da irradiância é absorvida e dispersada pelos gases e partículas (QUASCHNING, 2005). A cobertura de nuvens e quantidade de chuva são inversamente proporcionais à radiação. Quanto à altitude, em regiões mais altas a pressão atmosfera costuma ser menor além do fato de a irradiação também ser menor. Já com a redução da latitude, proximidade da Linha do Equador, maiores são as temperaturas, o que acarreta um aumento na irradiância.

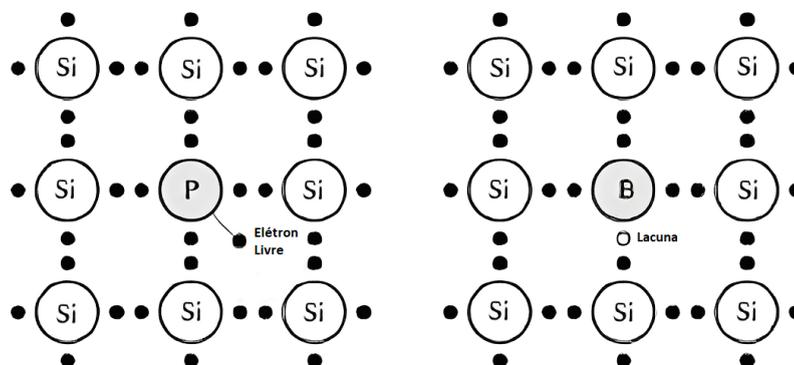
2.2 Energia solar fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica é a energia obtida por um processo que envolve a conversão da radiação solar diretamente em eletricidade, através de módulos solares fotovoltaicos. Essa conversão foi verificada pela primeira vez pelo francês Alexandre Edmond Becquerel, em 1839, que constatou uma diferença de potencial nos extremos de uma

estrutura de material semiconductor quando exposto à luz. A primeira célula fotovoltaica foi criada por Charles Fritts, em 1883, recobrando uma amostra de selênio com pó de ouro. Em 1954, os pesquisadores Gerald Pearson, Calvin Fuller e Daryl Chapin, dos Laboratórios Bell, descobriram de maneira acidental que semicondutores de silício dopado com certas impurezas eram muito sensíveis à luz, possibilitando a fabricação da primeira célula solar comercial (CHAPIN; FULLER; PEARSON, 1954). Les Hoffman, através da divisão de semicondutores, foi um dos pioneiros na fabricação e produção em grande escala de células solares, reduzindo os custos de fabricação do produto, o que permitiu sua comercialização.

O material mais utilizado para a fabricação de células fotovoltaicas é o semiconductor silício. Seus átomos possuem quatro elétrons na camada de valência que se ligam aos vizinhos formando uma rede cristalina. Adicionando-se átomos com cinco elétrons de ligação, por exemplo o fósforo, um elétron ficará em excesso deixando elétrons livres, indo para a Banda de Condução. Diz-se assim, que o fósforo é um dopante doador de elétrons ou um *dopante n*. Se forem introduzidos átomos com apenas três elétrons de ligação, como o boro, faltará um elétron para satisfazer as ligações com os átomos de silício. Essa ausência de elétron, denominada lacuna, permite que um elétron vizinho passe para esta posição, fazendo com que os elétrons livres se desloquem. Portanto, o boro é um aceitador de elétrons ou um *dopante p*. É importante ressaltar que os dois tipos de silício dopado não são carregados eletricamente, mas sim que eles têm elétrons livres ou buracos que podem ser facilmente movidos como indicado na Figura 4 (QUASCHNING, 2005). Tal processo se repete continuamente até que uma corrente elétrica seja estabelecida.

Figura 4 – Dopantes do tipo n (fósforo, à esquerda) e dopantes do tipo p (boro, à direita).



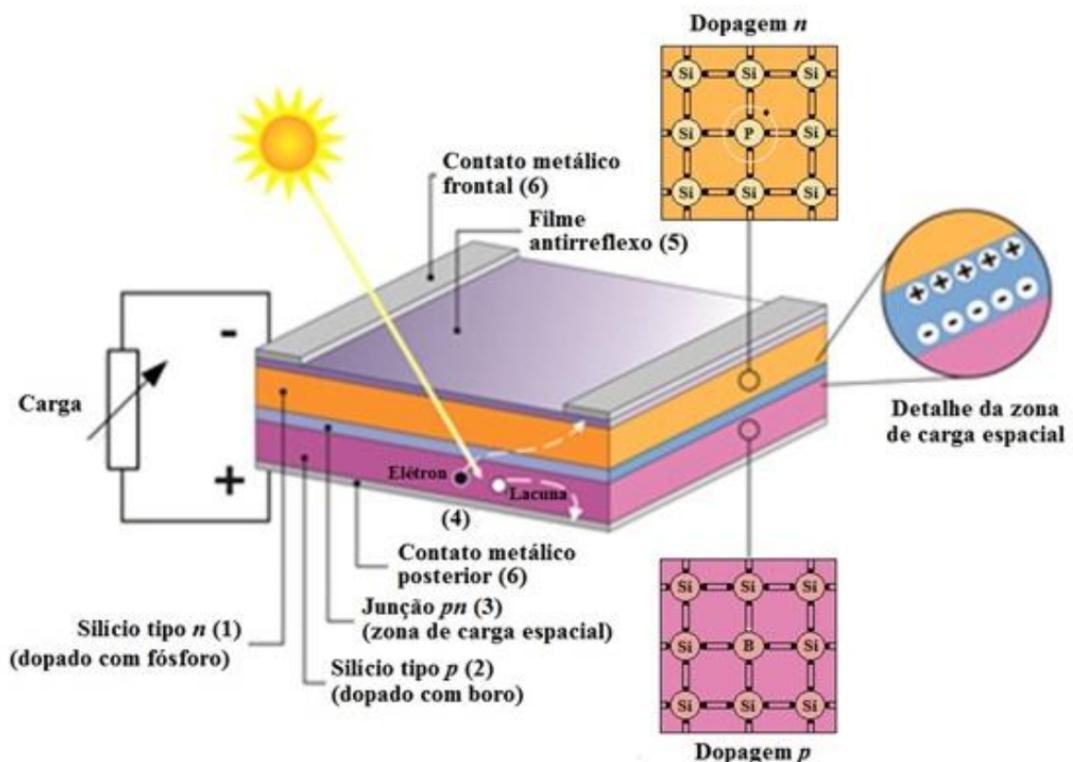
Fonte: Adaptado de Quaschnig (2005).

Quando esse processo for alcançado, as células deverão ser conectadas a um circuito externo. À medida que os elétrons atravessam o circuito externo, fornecem a sua

energia como trabalho útil e retornam à célula solar. De modo geral, uma célula é constituída pelas seguintes camadas descritas abaixo e ilustradas na Figura 5:

- Contato metálico frontal – transmite a corrente elétrica;
- Filme antirreflexo – substância concebida para evitar a luz que atinge as células seja refletida de forma que a máxima energia possa ser absorvida, aumentando sua eficiência;
- Contato metálico posterior – transmite a corrente elétrica;
- Semicondutor tipo n – fina camada de silício dopado com fósforo;
- Semicondutor tipo p – fina camada de silício dopado com boro.

Figura 5 – Esquema de uma célula fotovoltaica de silício.



Fonte: Pinho e Galdino (2014).

2.3 Fatores de perdas em módulos solares

A eficiência dos módulos fotovoltaicos depende de fatores como a localização geográfica e perdas associadas. Dentre esses fatores de perdas estão a sujeidade e o sombreamento que impedem que a irradiação solar incida diretamente sobre a superfície dos módulos, causando perdas de produção.

O acúmulo de partículas sobre os módulos, considerando características e fatores que influenciam essa deposição de poeira, bem como as perdas de eficiência, serão abordados neste estudo.

2.3.1 Sujidade

Sujidade são partículas de poeira (inorgânica) e outros contaminantes (orgânicos), tais como células ou dejetos de animais, folhas e outros tipos de poluição, que se depositam nas superfícies dos módulos. O acúmulo desses materiais sobre os módulos fotovoltaicos dificulta a irradiação solar de atingir as células afetando o desempenho do sistema. A Figura 6 apresenta um módulo sujo e um módulo limpo.

Figura 6 – Comparação visual entre módulo sujo (à esquerda) e limpo (à direita).



Fonte: Autor (2022).

Dentre os fatores responsáveis pelas variações na deposição de material estão a localização geográfica (latitude, longitude, área arenosa, etc), fatores de instalação (ângulo de

inclinação, material da placa, superfície lisa ou rugosa) e fatores ambientais tais como as estações do ano, o regime de chuvas, a influência da direção e da velocidade dos ventos.

Estudos relacionados à localização geográfica mostram sua influência nas quantidades e características dos materiais depositados nos módulos. Em Doha (Qatar), uma análise experimental de Javed *et al.* (2016) mostra que uma tempestade de areia pode provocar redução de 45% por dia do índice de limpeza. A composição mineral é formada principalmente por calcita, dolomita e quartzo, materiais predominantes daquela localidade. Pesquisas de Sarver, Al-Qaraghuli e Kazmerski (2013), haviam comprovado que as características da sujidade e as quantidades depositadas têm caráter altamente regional e sazonal.

Em regiões tipicamente agrícolas, matéria orgânica como pólen e fibras vegetais foram coletadas sobre os módulos. Já nas placas localizadas próximo ao Mar Mediterrâneo e ao Golfo da Pérsia, o material encontrado continha quantidades consideráveis de cloro e sódio (ELMINIR *et al.*, 2006).

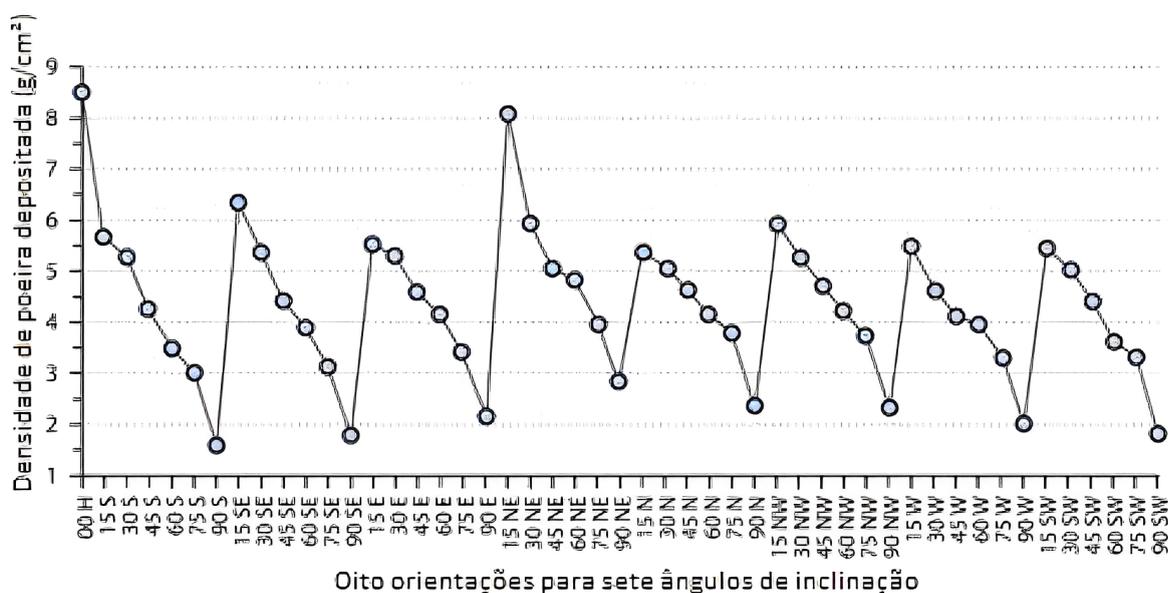
Segundo Siluk (2017), as características da sujidade são determinadas pelo ambiente local, variando em cada região do planeta. De acordo com Sarver, Al-Qaraghuli e Kazmerski (2013), tanto a matéria orgânica urbana quanto a rural, depositada nos módulos, contribuem para intensificar a fixação das partículas na superfície.

Quanto às estações do ano e ao regime de chuvas, observa-se que os índices de poluição são maiores no verão, nos períodos de seca, e no inverno, devido à maior densidade do ar. Fraga (2018) relata que em uma usina fotovoltaica instalada em um estádio de futebol em Minas Gerais (Brasil), ocorreu uma redução de 13,7% da potência de pico durante período seco e 6,5% no período após uma chuva, ocasionando em uma redução de aproximadamente 16,5% por dia da produção no período de seca e 8% por dia no período após uma chuva. Já no outono, na primavera e no período chuvoso do verão, o acúmulo de material é menor. Isto porque os ventos no outono e as chuvas na primavera removem parte da sujidade, principalmente dos módulos mais inclinados (ASL-SOLEIMANI; FARHANGI; ZABIHI, 2001).

O ângulo de inclinação do módulo fotovoltaico desempenha um papel importante no fator de perda por sujidade. O experimento realizado por Hachicha, Al-Sawafta e Said (2019), sob as condições climáticas de Sharjah (Emirados Árabes Unidos), verificou que após 2 semanas de exposição, ao aumentar o ângulo de 0° para 25°, a redução da eficiência passou de 37,63% para 14,11%. Portanto, a quantidade de material retido no módulo é menor quanto maior for sua inclinação, pois, devido a força da gravidade, a sujeira tende a cair das placas.

Esse resultado corrobora pesquisas realizadas, em regiões áridas, por Elminir *et al.* (2006) que, posicionando módulos fotovoltaicos em oito diferentes orientações e sete diferentes ângulos em relação ao plano horizontal, obtiveram diferentes concentrações de poeira para módulos com mesma inclinação, em todas as orientações (Figura 7), concluindo que a densidade de sujeira acumulada na superfície dos módulos diminuía com o aumento do ângulo de instalação.

Figura 7 – Quantidade de poeira acumulada em amostras em oito orientações diferentes para sete ângulos de inclinação, em região árida.



Fonte: Elminir *et al.* (2006).

Quanto à velocidade dos ventos, Goossens e Van Kerschaever (1999), em experimentos no deserto de Negev, em Israel, observaram que para altas velocidades de vento, uma maior quantidade de sujeira fica acumulada na superfície dos módulos. Isso ocorre devido as placas estarem submetidas a um maior fluxo de partículas e uma maior turbulência. Um exemplo extremo disso ocorre durante as tempestades de areia, quando grandes quantidades de particulado ficam suspensas na atmosfera.

2.3.2 Sombreamentos e suas consequências

O sombreamento acarreta uma redução no poder da radiação solar diminuindo o desempenho do módulo e conseqüentemente a geração de energia. Além disso, pode levar ao aparecimento de pontos quentes, danificando as células.

Os tipos de sombreamentos causados por sujeiras são intensos e leves. Nos sombreamentos intensos os materiais sólidos, como poeira acumulada ou dejetos de pássaros,

criam sombras que impedem a passagem da luz solar. Nos sombreamentos leves, devido à deposição no módulo de partículas suspensas na atmosfera ou poeira dispersa, há uma redução da irradiância solar a ser absorvida pelas células solares (MAGHAMI *et al.*, 2016).

Quando um módulo solar fotovoltaico é sombreado parcialmente, a área sombreada age como um resistor, fazendo com que a potência gerada seja dissipada causando aquecimento do módulo. Para evitar a formação de pontos quentes, são inseridos diodos de desvios (diodos de *bay-pass*) nos módulos, oferecendo um caminho alternativo para a corrente (DSG, 2008).

Segundo Pinho e Galdino, 2014, para um painel fotovoltaico, quando um módulo recebe menos irradiância solar do que os outros, a corrente fica limitada ao módulo de pior geração instantânea, pois a redução é propagada a todos os módulos da *string* (conjunto de células em série).

Estudo realizado por Tonolo (2019), em uma construção localizada na região central de Curitiba, constatou que o módulo sem sombreado apresentou potência OPC (do inglês *operational condition*) de 149,44 Watt-pico, enquanto o sombreado apresentou 93,61 Watt-pico, uma diferença de 37,35%. Portanto, o sombreado das células faz com que o módulo fotovoltaico todo tenha diminuição de potência.

2.3.3 Ações para reduzir sujidade

As sujidades impactam a eficiência do sistema de geração de energia e podem comprometer a vida útil dos módulos devido ao aquecimento anormal das células. Além disso, dependendo do tipo de resíduo acumulado, podem ocorrer manchas nos módulos fotovoltaicos, surgimento de fungos e corrosão, fatores que também reduzem a vida útil dos módulos.

Diante de tantos impactos negativos causados pela sujidade, faz-se necessário buscar meios para evitar a deposição e aderência de particulados, bem como para remover o material aderido aos módulos fotovoltaicos. A limpeza com uma periodicidade razoável é necessária para garantir maior eficiência do módulo solar e evitar a deterioração do equipamento.

A limpeza deve ser feita com água limpa corrente, jogada de cima para baixo, no sentido de inclinação das placas. Em nenhum caso deve-se utilizar produtos ou soluções que contenham substâncias corrosivas e alcalinas. O ideal é utilizar uma escova ou vassoura com cerdas macias e não abrasivas. Ao final, é recomendado secar as placas fotovoltaicas com um

rodo e pano macio para evitar o acúmulo de cálcio com a evaporação da água (PORTAL SOLAR, 2022).

Os painéis solares de superfície autolimpantes têm despertado interesse por ter a tecnologia de limpeza automática que não utiliza água ou movimentos mecânicos (MAZUMDER *et al.*, 2010). O módulo é feito de material de sensibilidade elétrica depositado no vidro. Sensores monitoram os níveis de poeira e captam quando está muito alto, passando a enviar cargas elétricas que repelem a sujeira. Segundo Mazumder *et al.* (2010), em dois minutos quase 90% da poeira é retirada, e a energia requisitada é mínima.

Majeed *et al.* (2020), pesquisando os efeitos da sujeira em módulos instalados em Islamabad (Paquistão), realizaram estudos de viabilidade e desempenho de um sistema de limpeza automático. Ao validar o sistema automático proposto, verificou-se que a potência foi recuperada em 98% no módulo sujo após a limpeza.

3 METODOLOGIA

Para elaboração deste trabalho buscou-se a realização de uma revisão da literatura sobre sujidade a fim de compreender qual a sua influência sobre o desempenho energético em sistemas fotovoltaicos diversos.

Foram realizadas pesquisas em sites da *internet*, livros, artigos, dissertações e demais trabalhos que versam sobre o tema. É importante ressaltar que tem crescido o interesse pelo uso de sistemas fotovoltaicos e, conseqüentemente, o aumento, nos últimos anos, das investigações sobre as características e os efeitos da sujidade que afetam os módulos fotovoltaicos.

As referências consultadas embasaram as revisões teóricas sobre os conceitos de irradiação solar, energia fotovoltaica e sujidade. Conceitos esses considerados necessários para o entendimento do tema.

Concluída a compilação bibliográfica, foram selecionados quatro estudos nos quais foi analisada a influência da sujidade em plantas fotovoltaicas através da coleta e comparação de dados entre módulos limpos e sujos. Foram realizadas observações, bem como a discussão sobre os tais resultados obtidos nestes estudos de referência.

Por fim, conflitou-se as referências teóricas e a análise dos dados secundários culminando na conclusão que se segue.

4 DESCRIÇÃO DE PESQUISAS REALIZADAS

O presente capítulo mostra estudos realizados abordando os impactos da sujeira nos módulos fotovoltaicos. São descritos os métodos da pesquisa e apresentados os resultados de experimentos ao ar livre com os efeitos da sujeira naturalmente depositada em módulos. Os trabalhos relacionados utilizaram a metodologia comparando a geração de eletricidade entre módulos limpos e sujos.

4.1 Avaliação do impacto de sujidades no desempenho de módulos fotovoltaicos em Minas Gerais

Dissertação de mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química de Mariana Myriam Fraga, 2018, analisou o impacto causado pela sujeira acumulada na superfície dos módulos da Usina Fotovoltaica Mineirão, localizada no estádio de futebol Mineirão, em Belo Horizonte. A usina é composta de 5910 módulos fotovoltaicos de silício policristalino distribuídos em 88 setores do estádio. No estudo foram selecionados oito setores, divididos em dois grupos de módulos: quatro deles orientados a Nordeste e quatro a Sudoeste, para acompanhamento durante 43 dias. Os dois grupos foram escolhidos em setores diametralmente opostos a fim de avaliar o efeito da orientação dos módulos na energia gerada. Dois setores, um de cada grupo, foram mantidos limpos durante todo o estudo para serem utilizados como módulos de referência. O estudo também considerou a ocorrência de uma precipitação de 7 mm para quantificar a energia gerada após a limpeza parcial da superfície dos módulos devido à chuva. (FRAGA, 2018).

Os dados de potência instantânea, de geração acumulada de energia e de irradiância instantânea foram coletados e utilizados para calcular potência, energia gerada e perdas de energia. Dados de precipitação foram coletados pela Estação Meteorológica Automática da Pampulha.

Os valores normalizados, razão entre os parâmetros de geração de módulos sujos sobre os de módulos limpos, consideraram os módulos limpos como a geração máxima nas condições do dia, foram calculados pelas Equações 1 e 2, conforme a seguir:

$$PP_{i,norm} = PP_i / PP_{i,ref} \quad (1)$$

$$E_{i,norm} = E_i / E_{i,ref} \quad (2)$$

Sendo,

$PP_{i,norm}$ a potência de pico normalizada para o setor i ,

PP_i a potência de pico absoluta do setor i

$PP_{i,ref}$ a potência de pico absoluta de referência para o grupo ao qual o setor i pertence;

$E_{i,norm}$ a energia gerada diária normalizada pelo setor i ,

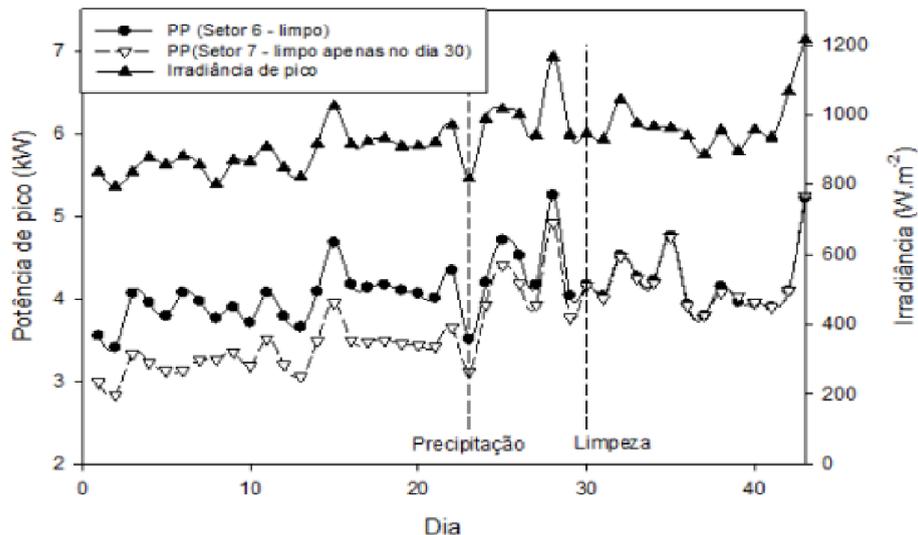
E_i a energia gerada diária absoluta pelo setor i

$E_{i,ref}$ a energia gerada diária absoluta de referência para o grupo ao qual o setor i pertence.

O trabalho apresenta gráficos, com dados dos setores limpo e sujo, de perfil de irradiância diária, irradiância de pico, radiação solar, potência instantânea, potência de pico, potência de pico normalizada, energia gerada diária e normalizada e perda de energia. Alguns desses gráficos traçados por Fraga (2018) são apresentados neste trabalho com informações da referida autora.

A Figura 8 mostra que a redução média da potência de pico causada pela poeira depositada foi de 600 W, entre o dia 1 e o dia 23. A chuva ocorrida no dia 23 reduziu a perda de potência para aproximadamente 300 W. No dia 30, a limpeza realizada no setor 7 praticamente eliminou a diferença entre as curvas (FRAGA, 2018).

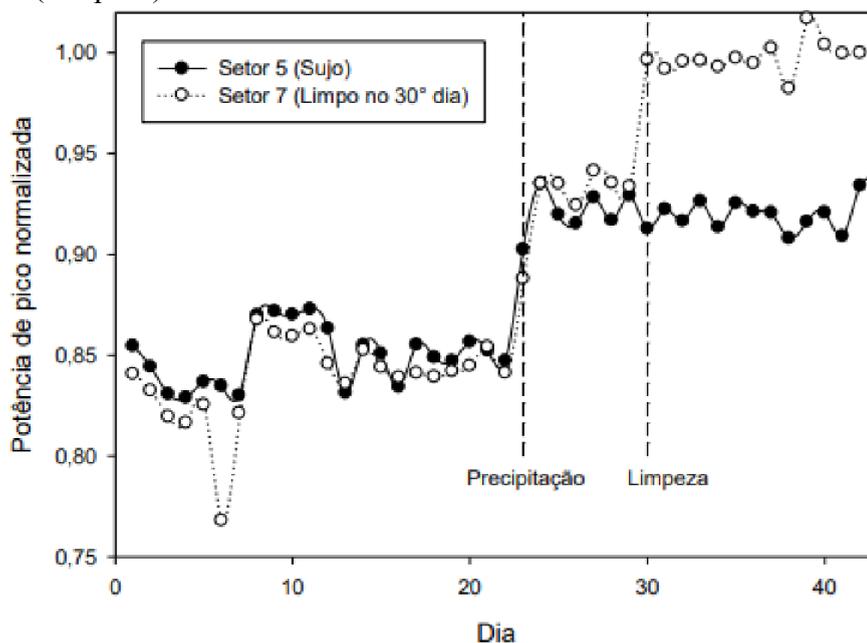
Figura 8 – Potência de pico durante todo o estudo para os setores 6 e 7 (Grupo S) e irradiância solar.



Fonte: Fraga (2018).

A potência de pico normalizada média aumentou de 0,85 para 0,93, devido ao impacto da chuva do dia 23 para os dois setores, conforme se observa na Figura 9.

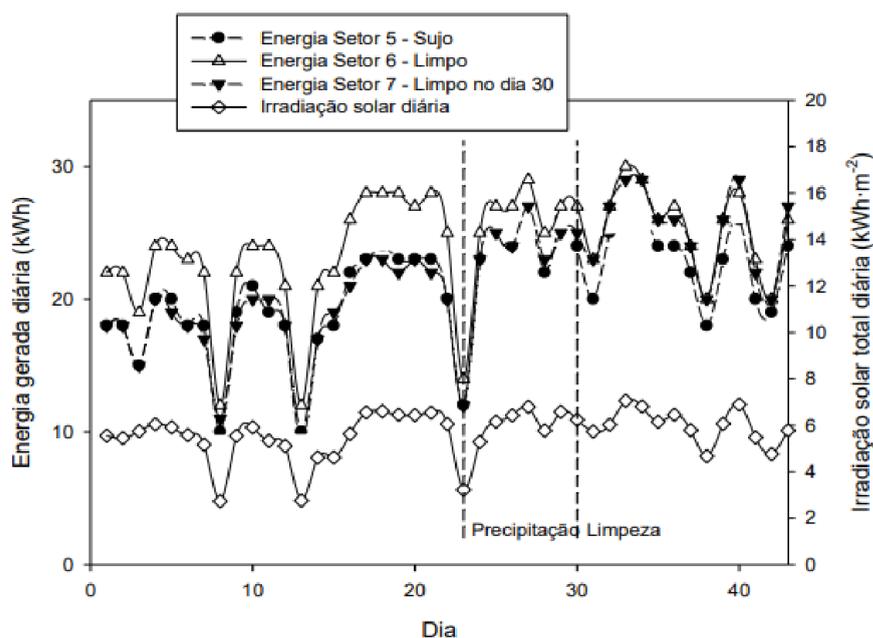
Figura 9 – Potência de pico normalizada durante todo o estudo para os setores 5 e 7 (Grupo S)



Fonte: Fraga (2018).

A Figura 10 apresenta os valores diários de energia gerada e radiação solar. Fraga (2018) ressalta que assim como a potência está diretamente relacionada com a irradiância, a energia gerada está relacionada com a radiação solar diária.

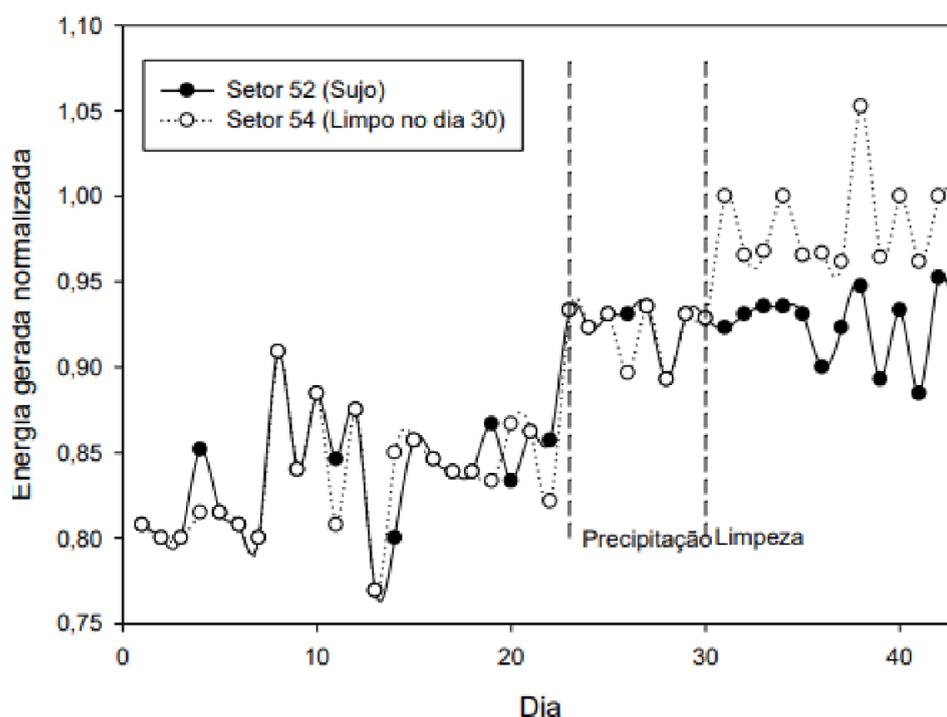
Figura 10 – Energia gerada pelos setores 5 e 7 (Grupo S) e a radiação solar total diária.



Fonte: Fraga (2018).

Analisando a Figura 11, que mostra a energia gerada normalizada para os setores 52 e 54 (Grupo N), observa-se que, enquanto os dois módulos estão sujos, há uma significativa redução na energia gerada em função da poeira, para ambos. Após a chuva, e consequente retirada de parte da sujidade, a energia gerada normalizada aumenta para os dois módulos. A partir do dia 30, com a limpeza ocorrida no setor 54, os valores normalizados do citado módulo atingem praticamente 1, ou seja, quase 100% da energia gerada, comprovando, mais uma vez, a necessidade de limpeza dos módulos.

Figura 11 – Energia gerada normalizada gerada para os setores 52 e 54 durante todo o estudo.



Fonte: Fraga (2018).

Os resultados obtidos mostram que a poeira depositada nos módulos reduziu tanto a potência de pico como a energia gerada. A redução da potência de pico foi de aproximadamente 13,7% durante o período seco e de 6,5% após a chuva de 7 mm que limpou parcialmente os módulos. Já a energia gerada teve redução de aproximadamente 16,5%/dia da produção no período de seca e 8%/dia no período após uma chuva. Após a limpeza manual dos módulos, os valores médios de perda de potência de pico e de energia gerada foram reduzidos, comprovando que somente com a limpeza manual foi possível restabelecer o desempenho do rendimento de energia.

4.2 Efeitos da acumulação de sujeira sobre o desempenho de módulos fotovoltaicos

Danielly Norberto Araujo, Paulo César Marques de Carvalho e Ivonne Montero Dupont, em 2019, publicaram um artigo na Revista Tecnologia onde exemplificam e descrevem trabalhos brasileiros e internacionais que abordam os impactos da sujeira em módulos fotovoltaicos. O artigo apresenta ainda um estudo para avaliar o impacto da sujeira no desempenho de uma planta fotovoltaica instalada no campus do Pici da UFC, em Fortaleza, Ceará, subdividida em 2 *strings* de 6 módulos fotovoltaicos cada.

Os dados de geração de eletricidade são coletados utilizando o equipamento eletrônico *datalogger*. A coleta dos dados de irradiância é realizada usando um sistema SCADA com um controlador lógico programável (CLP), modelo Twido TWDLC-E40DRF e um piranômetro. Os dados de chuva são obtidos da Estação Agroclimatológica de Fortaleza, localizada no Centro de Ciências Agrárias da UFC e validados com os dados fornecidos pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (Funceme).

Os dados de potência máxima atingida pelos módulos fotovoltaicos, de eletricidade gerada e irradiação, selecionados antes e depois de um período com chuva, são utilizados para o cálculo da eficiência dos módulos e dos parâmetros YIELD, PR (performance ratio) e SR, onde (Equações 3, 4 e 5):

- YIELD (Produtividade): relação entre a energia elétrica (kWh) entregue e a potência instalada (kWp) da planta fotovoltaica.

$$\text{YIELD} = \text{Energia entregue} / \text{Potência instalada} \quad (3)$$

- PR (Relação de desempenho): comparação da produção real da planta fotovoltaica em relação à eletricidade que a planta poderia ter gerado se não houvessem perdas (Irradiância referência = 1000 W/m²).

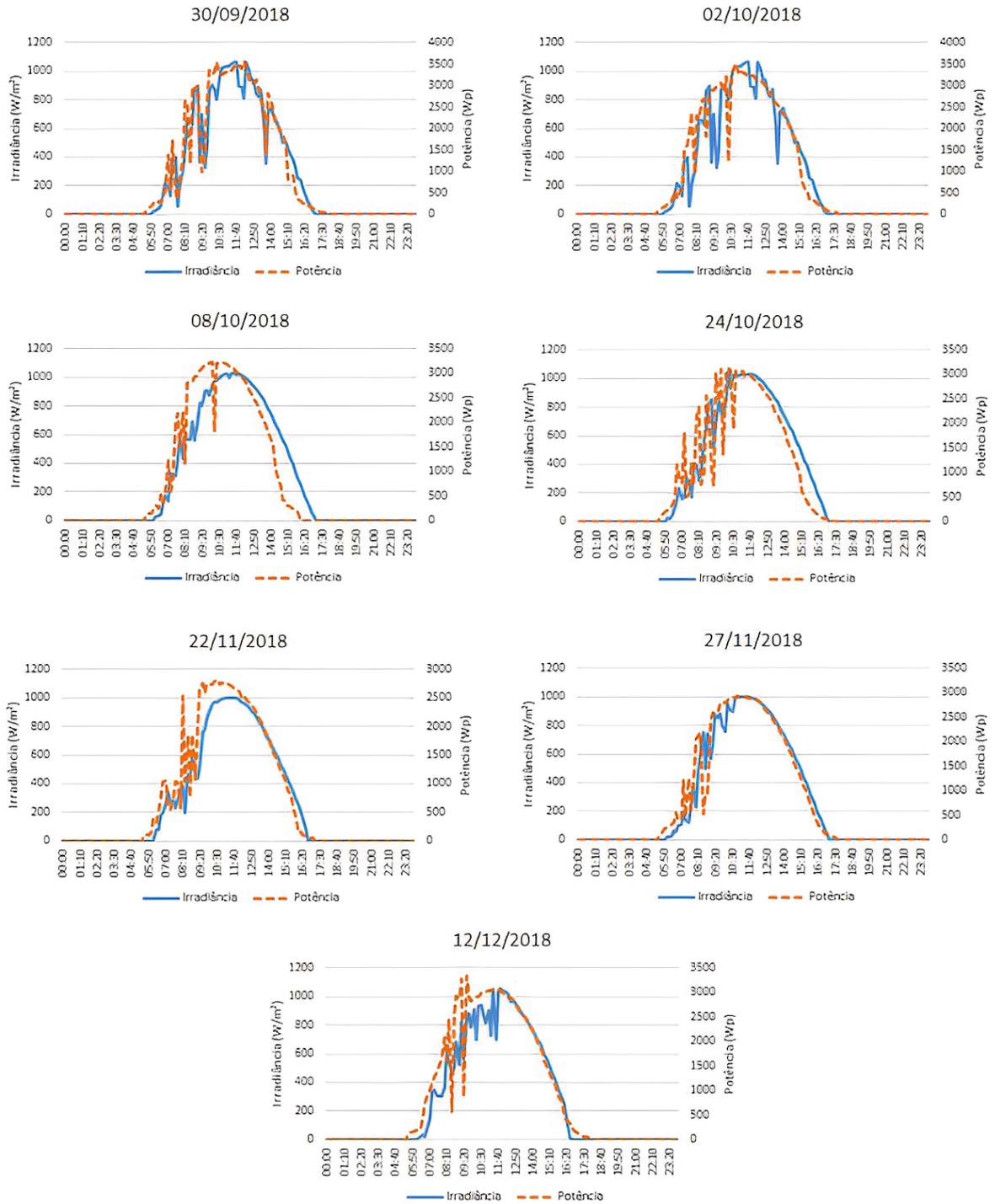
$$\text{PR} = \text{YIELD} / (\text{Irradiação} / \text{Irradiância referência}) \quad (4)$$

- Relação de sujeira: relação entre a potência máxima diária do módulo sujo e a potência máxima diária do módulo limpo.

$$\text{SR} = \text{Pmax sujo} / \text{Pmax limpo} \quad (5)$$

Nos gráficos apresentados na Figura 12 observa-se que há uma sobreposição entre as curvas de irradiância e potência, o que é coerente, pois a potência fotovoltaica gerada depende diretamente da irradiação que incide sobre a superfície dos mesmos (ARAUJO; DUPONT; CARVALHO, 2019).

Figura 12 – Gráficos da irradiância no plano horizontal e da potência fotovoltaica dos dias selecionados.



Fonte: Araújo, Dupont e Carvalho (2018).

Analisando os resultados vê-se que, nos 17 dias sem chuva, devido ao acúmulo de sujeira sobre os módulos, há diminuição de desempenho da eletricidade gerada em até 11,71% e que a perda máxima de eficiência da planta fotovoltaica é de 16,52%. Quando os módulos estão limpos, após ocorrência de chuva, há um aumento significativo de

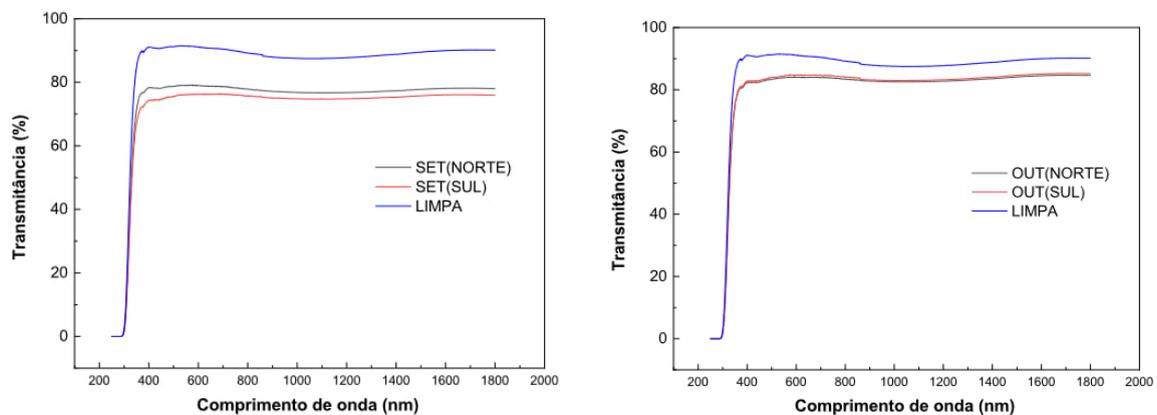
desempenho, em que um aumento de apenas 1,70% de irradiação gera um aumento de 9,09% da eletricidade gerada é de 6,20% da eficiência da planta (ARAÚJO, DUPONT; CARVALHO, 2019).

4.3 Análise dos Efeitos da Sujidade no Sistema Fotovoltaico de 34 kWp da EMC/UFG

Dissertação de mestrado de Pedro Victor Valadares Romanholo apresentada à Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da Universidade Federal de Goiás, em 2019, analisou os impactos da sujidade depositada sobre os módulos fotovoltaicos instalados na Universidade Federal de Goiás, cujo sistema é composto por 145 módulos fotovoltaicos de silício policristalino. Uma central meteorológica que se encontra próxima aos módulos fotovoltaicos coletou dados da velocidade e direção do vento, temperatura ambiente, umidade relativa do ar, índice pluviométrico, irradiância solar e pressão atmosférica. (ROMANHOLO, 2019).

Dois módulos foram escolhidos, sendo um direcionado ao norte e o outro ao sul. Em cada módulo foram fixadas 12 lâminas de microscopia e mensalmente cada par era recolhido e realizadas, em laboratório, medidas mensais de Espectroscopia na Região do Ultravioleta-Visível para se averiguar as perdas na transmitância da superfície. A partir desses dados foram traçados gráficos com o perfil da transmitância para a lâmina instalada na direção sul, para a lâmina instalada na direção norte e para uma lâmina limpa, para fins comparativos. A Figura 13 mostra gráficos sobre o efeito das chuvas na transmitância das lâminas fixadas na direção sul.

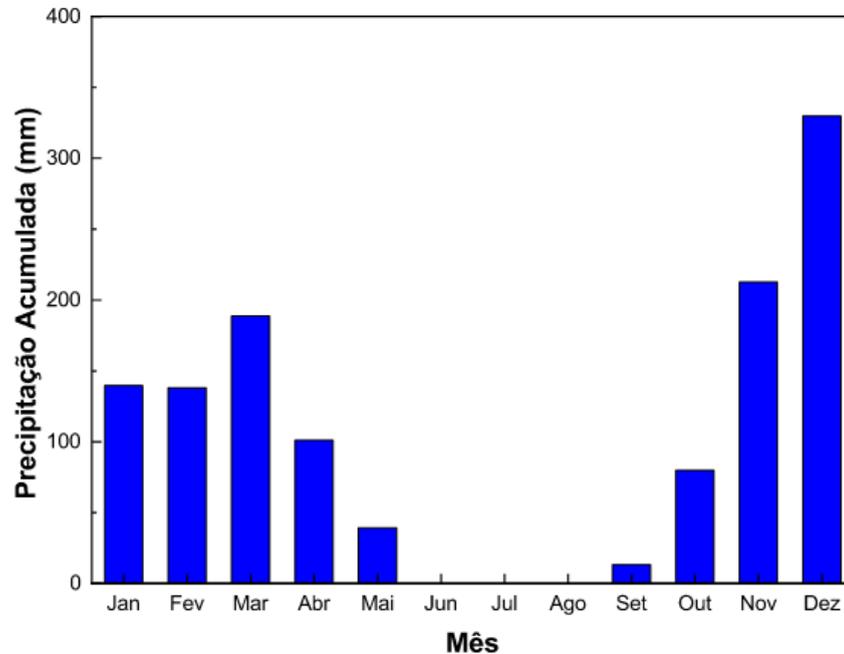
Figura 13 – Efeito das chuvas na transmitância das lâminas instaladas na direção sul nos meses de setembro e outubro de 2017.



Fonte: Romanholo (2019).

Os dados de precipitação acumulada de 2017 foram obtidos da central meteorológica da Universidade Federal de Goiás e informados na Figura 14.

Figura 14 – Precipitação acumulada no ano de 2017.



Fonte: Romanholo (2019).

Comparando os gráficos de transmitância (Figura 13) com as precipitações acumuladas em 2017 (Figura 14), verifica-se que em setembro ocorreu uma grande perda na transmitância, pois as lâminas retiradas naquele mês não sofreram a ação das chuvas, uma vez que não foram registradas chuvas em agosto. Já no mês de outubro a perda na transmitância foi menor coincidindo com o mês em que ocorreu precipitação. Portanto, a limpeza dos módulos devido às chuvas ocasiona maior transmitância da luz nos módulos fotovoltaicos, consequentemente reduzindo as perdas.

Esse estudo ainda comparou a geração de eletricidade entre módulos sujos e limpos. Inicialmente os 147 módulos foram limpos no dia 23 de junho de 2018. Após um mês, quatro grupos contendo 20 módulos cada, foram limpos mensalmente, no período de 5 meses. Outros dois grupos foram mantidos sujos.

Verificou-se que, após a primeira limpeza, todos os módulos aumentaram consideravelmente a geração de energia. Após um mês, a geração de energia e o rendimento global foram comparados para os módulos limpos e sujos, também levando em consideração os dados de precipitações ocorridas no período. Conforme esperado, a limpeza da superfície dos módulos aumentou a geração de energia elétrica e melhorou o rendimento global,

especialmente no mês de agosto, onde o rendimento global aumentou mais de 34% após a limpeza.

Tabela 1 – Diferenças percentuais entre os rendimentos globais dos inversores para o ano de 2018 em relação ao ano de 2017.

Mês	Diferença percentual do PR de 2018 em relação a 2017			
	Inversor 2 (%)	Inversor 3 (%)	Inversor 4 (%)	Inversor 5 (%)
Jan	-4,68	-4,59	-4,70	-4,65
Fev	-3,67	-3,73	-3,99	-4,05
Mar	-3,38	-3,60	-2,50	-3,56
Abr	-1,90	-1,84	-1,13	-1,26
Mai	-2,27	-2,35	-2,56	-2,95
Jun	8,72	9,37	8,56	11,89
Jul	16,33	17,62	24,77	23,73
Ago	26,20	23,73	30,42	34,45
Set	20,55	18,83	25,29	29,84
Out	17,35	16,38	18,69	19,97
Nov	16,08	15,08	16,15	17,60
Dez	8,43	7,24	10,45	12,26

Fonte: Romanholo (2019).

4.4 Impacto da sujidade sobre o desempenho de sistemas fotovoltaicos

Jair Gomes Soares Júnior, Silvia Ramos Cruz e Leonardo Santos Amaral em seu artigo para o VII Congresso Brasileiro de Energia Solar em 2018 apresentam a análise de um sistema fotovoltaico instalado na Universidade Estadual de Montes Claros. O sistema possui três arrays e cada um desses é composto por 84 módulos fotovoltaicos de silício policristalino de 50 Wp cada. (SOARES JUNIOR; CRUZ; AMARAL, 2018). A Figura 15 apresenta uma vista do sistema descrito.

Figura 15 – Usina fotovoltaica instalada na Universidade Estadual de Montes Claros.

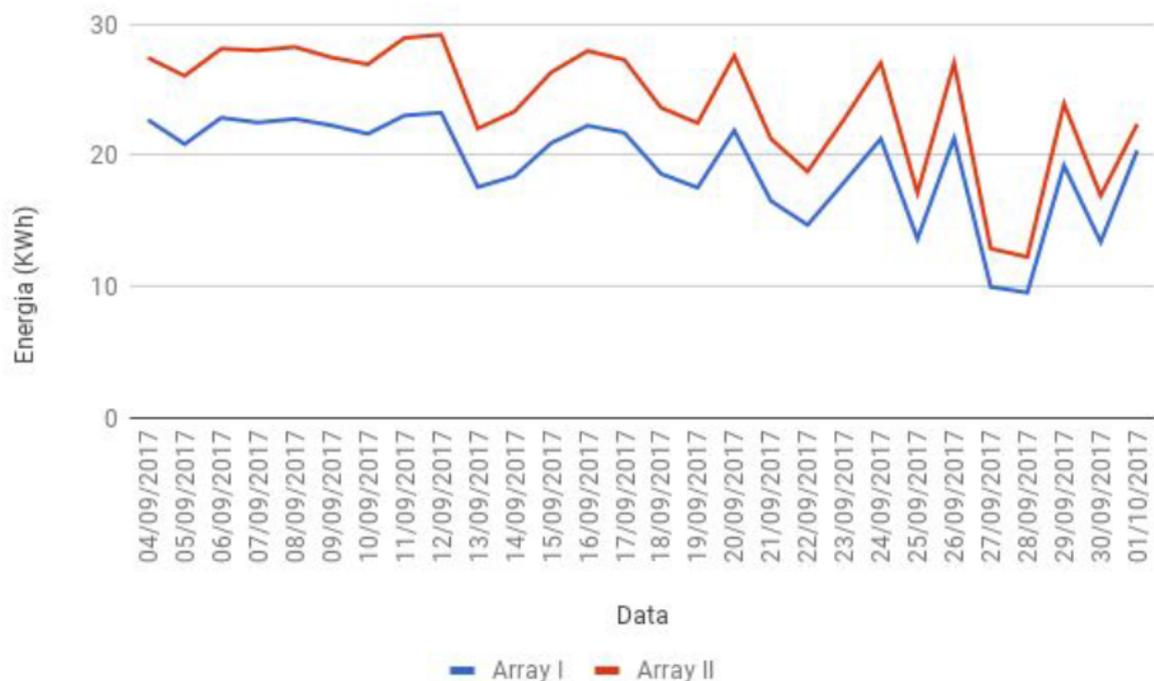


Fonte: Soares Junior, Cruz e Amaral (2018).

Os módulos do Array I foram mantidos sem alterações durante todo o período estudado. Já os módulos do Array II foram limpos nos dias quatro, onze e dezoito de setembro de 2017. A precipitação que ocorreu no dia trinta de setembro do mesmo ano afetou naturalmente os módulos de ambos os arrays também proporcionando dados sobre os impactos da sua ocorrência.

A Figura 16 mostra a geração de energia dos dois arrays após início do cronograma de limpeza. Conforme se observa a geração de energia do array cujas placas foram limpas é sempre superior à do array cujas placas não foram limpas.

Figura 16 – Usina fotovoltaica instalada na Universidade Estadual de Montes Claros.



Fonte: Soares Junior, Cruz e Amaral (2018).

Para calcular a perda de geração evitada, aplica-se a Equação 6:

$$\text{Perda de geração evitada (\%)} = 100 \times ((W_{ii} - W_i)/W_i) \quad (6)$$

Onde

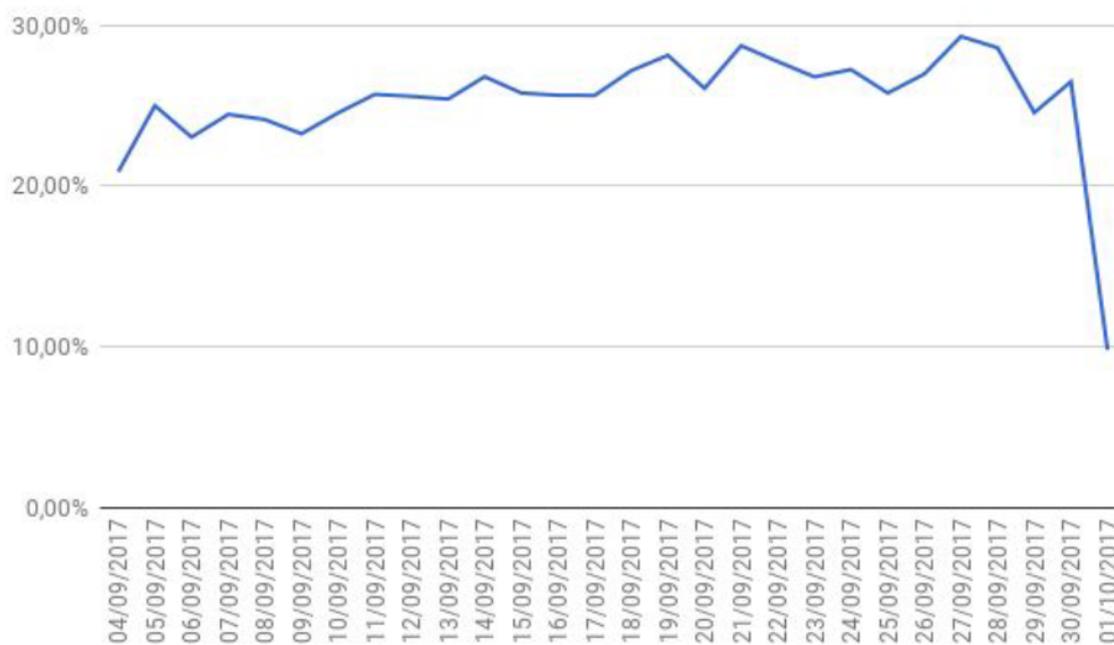
W_i é a energia do Array I (sujo)

W_{ii} é a energia do Array II (limpo)

Na Figura 17 nota-se que a diferença percentual após a limpeza dos módulos está entre 20% e 30% com exceção apenas do último dia de estudo. Nesse dia, como mencionado

anteriormente, choveu e, por consequência, houve significativa redução no nível de sujidade em todos os módulos.

Figura 17 – Usina fotovoltaica instalada na Universidade Estadual de Montes Claros.



Fonte: Soares Junior, Cruz e Amaral (2018).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise dos diversos estudos corroborou para a ideia de que o acúmulo de sujidade nos módulos tem impacto negativo significativo, pois os dados coletados desses estudos convergem para tal conclusão.

Considerando os resultados obtidos nos estudos é evidente que a compreensão dos efeitos da sujidade sobre o desempenho e eficiência dos painéis fotovoltaicos é fundamental para o desenvolvimento de estratégias de limpeza mais eficientes e sustentáveis, bem como a busca para encontrar uma frequência ótima para estas. Além disso, a análise da sujidade, suas características e influência nas propriedades dos sistemas fotovoltaicos pode contribuir para a criação e barateamento de módulos melhor preparados para a deposição de sujidade e para o aprimoramento das técnicas de monitoramento e manutenção dos sistemas. Portanto, é essencial que se dê continuidade a pesquisas que exploram esses temas, visando a busca pela otimização do desempenho dos módulos e a maximização da geração de energia a partir da energia fotovoltaica.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução normativa nº687, 24 de novembro de 2015**. Disponível em:

<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>. Acesso em: 28 jun. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Geração: Capacidade de geração de energia no Brasil supera os 180 GW**. 03 nov. 2021. Disponível em:

<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2022/capacidade-de-geracao-de-energia-no-brasil-supera-os-180-gw>. Acesso em: 28 jun. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Micro e Minigeração Distribuída. 10 fev. 2022**. Disponível em:

<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/geracao-distribuida>. Acesso em: 28 jun. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Evolução da Fonte Solar Fotovoltaica no Brasil. 15 mar. 2023**. Disponível em:

<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/fonte-solar>. Acesso em: 28 jun. 2023.

ARAÚJO, D. N.; DUPONT, I. M.; CARVALHO, P. C. M. Efeitos da acumulação de sujeira sobre o desempenho de módulos fotovoltaicos. **Revista Tecnologia**, Fortaleza, v. 40, n.2, p. 1-23, dez. 2019. DOI: 10.5020/23180730.2019.9414. Disponível em

https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/56363/1/2019_art_dnaraujo.pdf . Acesso em: 28 jun. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA - ABSOLAR. **Segunda maior fonte do país, energia solar cresce 83% em um ano**. 9 mar. 2023.

Disponível em:

<https://www.absolar.org.br/noticia/segunda-maior-fonte-do-pais-energia-solar-cresce-83-em-um-ano/> Acesso em: 28 jun. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA - ABSOLAR. **2022: o melhor ano da energia solar no Brasil**. 15 mar. 2022. Disponível em:

<https://www.absolar.org.br/noticia/2022-o-melhor-ano-da-energia-solar-no-brasil/>. Acesso em: 28 jun. 2023.

ASL-SOLEIMANI, E.; FARHANGI, S.; ZABIHI, M. The effect of tilt angle, air pollution on performance of photovoltaic systems in Tehran. **Renewable Energy**, [S.l.], v.24, n.1, p. 459-468, nov. 2001. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(01\)00029-5](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(01)00029-5).

Acesso em: 28 jun. 2023.

CHAPIN, D. M.; FULLER, C. S.; PEARSON, G. L. A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power. **Journal of Applied Physics**, Melville, v. 25, n.5, p. 676 – 677, maio 1954. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/1.1721711>

Acesso em: 28 jun. 2023.

DSG. **Planning and installing photovoltaicsystems**: a guide a for installers, a architects and engineeres, v. 2, Earthscan, London, 2008.

ELMINIR, H. K.; GHITAS, A. E.; HAMID, R. H.; EL-HUSSAINY, F.; BEHEARY, M. M.; ABDELMONEIM, K. M. Effect of dust on the transparent cover of solar collectors. **Energy Conversion and Management**, New York, v.47, [s.n], p. 3192-3203, 17 abr. 2006. Disponível em: doi:10.1016/j.enconman.2006.02.014 (ernet.in) Acesso em: 28 jun. 2023.

FRAGA, M. M. **Avaliação do impacto de sujidades no desempenho de módulos fotovoltaicos em Minas Gerais**. 2018. 62 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento em Engenharia Química, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/RAOA-BEKNBZ/1/disserta__o_de_mestrado_v.final__mariana.pdf Acesso em: 28 jun. 2023.

GOOSSENS, D.; VAN KERSCHAEVER, E. Aeolian dust deposition on photovoltaic solar cells: the effects of wind velocity and airborne dust concentration on cell performance. **Solar Energy**, New York, v.66, n. 4, p. 277-289, nov.1999. Disponível em: <http://www.irantahgig.ir/wp-content/uploads/30328.pdf> Acesso em: 28 jun. 2023.

HACHICHA, A. A.; AL-SAWAFTA, I.; SAID, Z. (2019). Impact of dust on the performance of solar photovoltaic (PV) systems under United Arab Emirates weather conditions. **Renewable Energy**, [S.l], v.141, [s.n], p. 287-297, oct. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096014811930477X> Acesso em: 28 jun. 2023.

JAVED, W.; GUO, B.; WUBULIKASIMU, Y; FIGGIS, BW. Degradação do desempenho fotovoltaico devido à sujeira e caracterização da poeira acumulada. *In*: IEEE International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE), 2016, Xangai, China, **Anais [...]**. Xangai: 2016, p. 580-584. Disponível em: doi: 10.1109/ICPRE.2016.7871142. Acesso em: 28 jun. 2023.

MACHADO, N. O mundo deve adicionar 59 GW de geração distribuída fotovoltaica em 2022. **Diálogos da Transição**, São Paulo, [s.a], [s.n], 09 maio 2022. Disponível em: <https://epbr.com.br/mundo-deve-adicionar-59-gw-de-geracao-distribuida-fotovoltaica-em-2022/> Acesso em: 28 jun. 2023.

MAGHAMI, M. R.; HIZAM, H.; GOMES, C.; RADZI, A. M.; REZADAD, M. I.; HAJIGHORBANI, S. Power loss due to soiling on solar panel: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 59, [s.n.], p. 1307-1316. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.044> Acesso em: 28 jun. 2023.

MAJEED, R.; WAGAS, A.; SAMI, H.; ALI, M.; SHAHZAD, N. Experimental investigation of soiling losses and a novel cost-effective cleaning system for PV modules. **Solar Energy**, v. 201, [s.n], p. 298-306, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X20302450>. Acesso em: 28 jun. 2023.

MAZUMDER, M.; JACKSON, D.; STARK, J.; BLUMENTHAL, S.; HORENSSTEIN, M. Self-Cleaning Solar Panel with Integrated Electrodynamics Screen. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 60, [s.n.], p. 1207-1216. 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542435119304222> Acesso em: 28 jun. 2023.

PINHO, J.T; GALDINO, M.A. (org.) **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: Edições Cresesb – Cepel, 2014. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf Acesso em: 28 jun. 2023.

PORTAL SOLAR. **Aneel enquadra usina solar controlada pela Canadian Solar como produção independente no Ceará**. 10 nov. 2022. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/noticias/politica/regulacao/aneel-enquadra-usina-solar-controlada-pela-canadian-solar-como-producao-independente-no-ceara>. Acesso em: 28 jun. 2023.

QUASCHNING, V. **Understanding Renewable Energy Systems**. [S.e.], Earthscan, Londres, 2005. p. 272

ROMANHOLO, P. V. V. **Análise dos efeitos da sujidade no sistema fotovoltaico de 34 kWp da EMC/UFG**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação) - Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação - Universidade Federal de Goiás. Goiana, 2019. Disponível em <https://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/9446> Acesso em: 28 jun. 2023.

SARVER, T.; AL-QARAGHULI, A.; KAZMERSKI, L. L. A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 22, [s.n.], p.698-733. 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.065> Acesso em: 28 jun. 2023.

SILUK, A. R. 2017. **Análise do desempenho de sistemas fotovoltaicos aplicados à edificação**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2017. Disponível em: https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/14260/DIS_PPGEC_2017_SILUK_ANDREI.pdf?sequence=1&isAllowed=y Acesso em: 28 jun. 2023.

SOARES JUNIOR, J. G.; CRUZ, S. R.; AMARAL, L. S. 2018. Impacto da sujidade sobre o desempenho de sistemas fotovoltaicos. *In: VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2018, Gramado, Anais [...]*. Gramado: 2018, p. 1-10. Disponível em <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/123> Acesso em: 28 jun. 2023.

SOUZA, J. J. S.; CARVALHO, P. C. M.; BARROSO, G. C. Revisão sistemática da literatura sobre sujidade em sistemas fotovoltaicos: efeitos e características. *In: IX Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2022, Florianópolis, Anais [...]*. Florianópolis: 2022, p. 1-10. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/1050> Acesso em: 28 jun. 2023.

TONOLO, É. A. **Análise dos fatores de perdas nos sistemas fotovoltaicos da UTFPR Campus Curitiba**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Pós-Graduação em Sistemas de Energia – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2019. 140 f. Disponível em: http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/4664/1/CT_PPGSE_M_Tonolo%2C%20%20%20%89dwin%20Augusto_2019.pdf Acesso em: 28 jun. 2023.