

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS
GERAIS – *CAMPUS* IPATINGA BARACHELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Paulo Henrique Ferreira da Silva

Pedro Henrique de Aquino Rangel

**AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DAS CHUVAS NO DESEMPENHO DE UMA USINA
FOTOVOLTAICA – ESTUDO DE CASO: USINA DO IFMG IPATINGA**

Ipatinga

2023

PAULO HENRIQUE FERREIRA DA SILVA
PEDRO HENRIQUE DE AQUINO RANGEL

**AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DAS CHUVAS NO DESEMPENHO DE UMA USINA
FOTOVOLTAICA – ESTUDO DE CASO: USINA DO IFMG IPATINGA**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Curso Bacharelado em
Engenharia Elétrica do Instituto Federal
de Minas Gerais – *Campus* Ipatinga,
para obtenção do grau de bacharel em
Engenharia Elétrica.

Orientador: Willian Marlon Ferreira

Ipatinga

2023

S581a Silva, Paulo Henrique Ferreira da; Rangel, Pedro Henrique de Aquino.

Avaliação dos impactos das chuvas no desempenho de uma usina fotovoltaica: estudo de caso – Usina do IFMG Ipatinga. Paulo Henrique Ferreira da Silva; Pedro Henrique de Aquino Rangel. – 2023.

69f.;il.

Orientador: Willian Marlon Ferreira.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Minas Gerais. *Campus Ipatinga*, 2023.

1. Energia Renovável. 2. Sistema fotovoltaico. 3. Chuvas. I. Ferreira, Willian Marlon. II. Instituto Federal de Minas Gerais - *Campus Ipatinga*. III. Título.

CDD 621.47

Catálogo: Rejane Valéria Santos - CRB-6/2907



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS
Campus Avançado Ipatinga
Rua Maria Silva, n.º 125, Veneza - Ipatinga - MG - CEP 35.164-261
(31) 3829-8615 / (31) 97133-4399 - gabinete.ipatinga@ifmg.edu.br

ANEXO III

ATA DA DEFESA DO TCC

Aos 12 dias do mês de dezembro de 2023, às 16:55 horas, na sala 205 do IFMG Campus Avançado Ipatinga, foi realizada a defesa do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) pelo(a)/pelos(as) aluno(a)/alunos(as), sendo aprovados com a nota 77 pela Banca Examinadora, que está condicionada ao cumprimento dos procedimentos pós-defesa do TCC.

O(A)/Os(As) aluno(a)/alunos(as) deverá(ão) apresentar o trabalho com as devidas modificações e no formato solicitado em 04 de janeiro de 2024.

O(A)/Os(As) aluno(a)/alunos(as) está(ão) ciente(s) de que, caso não cumpra(m) os procedimentos pós-defesa de TCC até a data estipulada, sua(s) nota(s) será(ão) considerada(s) zero e a sua defesa será anulada. Também está(ão) ciente(s) de que o trabalho de conclusão de seu curso poderá ser divulgado pela instituição através dos seus meios de comunicação.

Observações pertinentes à defesa:

Realizar as correções solicitadas pela banca examinadora.

NOME COMPLETO E ASSINATURA DOS COMPONENTES
DA BANCA E DO DISCENTE ORIENTADO

Orientador:	<u>William Marlen Ferreira</u>	Assinatura:	<u>William</u>
Membro:	<u>Gustavo Rafael de Souza Reis</u>	Assinatura:	<u>Gustavo</u>
Membro:	<u>Carlos Renato Magalhães Duarte</u>	Assinatura:	<u>Carlos</u>
Aluno(a):	<u>Paulo Henrique Ferreira da Silva</u>	Assinatura:	<u>P. Silva</u>
Aluno(a):	<u>Pedro Henrique do Aquino Rangel</u>	Assinatura:	<u>Pedro</u>

RESUMO

Devido à alta demanda energética mundial e os prejuízos ambientais causados pelas matrizes comumente utilizadas na geração de energia elétrica, existe a necessidade de buscar novas alternativas, fontes energéticas renováveis com produção de energia limpa, sem poluentes. Nesse cenário, os sistemas fotovoltaicos vêm se mostrando uma alternativa válida, visto o aumento da utilização dessa matriz no decorrer dos anos. O presente trabalho analisou os impactos das chuvas nos sistemas fotovoltaicos, mostrando os benefícios que ela pode trazer para a melhoria da produtividade uma vez que os módulos são limpos de forma natural. O estudo foi realizado utilizando como base a Usina Solar Fotovoltaica instalada no Instituto Federal de Minas Gerais, Campus de Ipatinga-MG, que tem uma potência instalada de 44,88kWp, estando situada nos arredores de uma região industrial, sendo assim, propensa ao acúmulo de sujeira. Através deste estudo verificou-se a melhoria da eficiência na referida usina, exclusivamente por conta das precipitações observadas, determinando o impacto que essas chuvas operam sobre sistemas fotovoltaicos.

Palavras-chave: Fontes energéticas renováveis. Sistemas fotovoltaicos. Acúmulo de sujeira. Chuvas. Eficiência.

ABSTRACT

Due to the high global energy demand and the environmental damage caused by the traditional sources to generation of electricity, there is a need to research for new alternatives, renewable energy with clean ways of production, without pollutants. Photovoltaic systems have proven to be a valid alternative, verified by the increased use of this method over the last years. Following this way, the present research examined the impact of rainfall on photovoltaic systems, showing the benefits it can bring to improve productivity, once naturally the modules cleaned will be. This study was carried out using as base of the Solar Photovoltaic Plant installed at the Federal Institute of Minas Gerais, Campus of Ipatinga-MG, which has an installed power of 44.88kWp, and is located in an industrial region, so therefore is subject to accumulation of dirt. Through this study, the improvement in efficiency of the mentioned plant was verified, exclusively due to the observed precipitations, determining the impact that these rains have on photovoltaic systems.

Keywords: Renewable energy sources. Photovoltaic systems. Dirt accumulation. Rain. Efficiency.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Matriz de Produção de Energia Elétrica Mundial	11
Figura 2 - Perda por sujidade em determinadas regiões.....	14
Figura 3 - Irradiação solar no Brasil	18
Figura 4 - Funcionamento de uma célula fotovoltaica	19
Figura 5 - Imagem de satélite do Campus	27
Figura 6 - Localização em Ipatinga	28
Figura 7 - Inversores utilizados no sistema	29
Figura 8 - Representação das <i>strings</i> utilizadas.....	31
Figura 9 - Distância do Campus IFMG até o pátio da Usiminas.....	34
Figura 10 - Estação meteorológica do instituto	35
Figura 11 - Estação meteorológica do Instituto	36
Figura 12 - Módulos antes e após a limpeza.....	38
Figura 13 - Decorrencia de chuvas em março.....	41
Figura 14 - Decorrencia de chuvas em abril.....	41
Figura 15 - Decorrencia de chuvas em maio.....	41
Figura 16 - Decorrencia de chuvas em setembro.....	42
Figura 17 - Decorrencia de chuvas em outubro	42
Figura 18 - Decorrencia de chuvas em novembro	43
Figura 19 - Decorrencia de chuvas em dezembro.....	44
Figura 20 - Decorrencia de chuvas em janeiro.....	44
Figura 21 - Decorrencia de chuvas em fevereiro.....	51
Figura 22 - Influência da sujidade em relação as limpezas manuais e índice pluviométrico	50

Figura 23 - Influência da sujidade em relação as limpezas manuais e índice pluviométrico	51
Figura 24 - Influência da sujidade em relação as limpezas manuais e índice pluviométrico	52
Figura 25 - Influência da sujidade em relação as limpezas manuais e índice pluviométrico	52
Figura 26 - Influência da sujidade em relação as limpezas manuais e índice pluviométrico	53
Figura 27 - Influência da sujidade em relação as limpezas manuais e índice pluviométrico	54
Figura 28 - Influência da sujidade em relação as limpezas manuais e índice pluviométrico	55
Figura 29 - Influência da sujidade em relação as limpezas manuais e índice pluviométrico	55
Figura 30 - Mês sem dados de geração devido problema na internet.....	56
Figura 31 - Influência da sujidade em relação as limpezas manuais e índice pluviométrico	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados da usina	29
Tabela 2 - Dados do sistema efetivamente estudado	31
Tabela 3 - Datas das Limpezas acompanhadas	39
Tabela 4 – Dados de geração das <i>strings</i> nos meses de março e abril	45
Tabela 5 - Dados de geração das <i>strings</i> nos meses de maio e junho	45
Tabela 6 - Dados de geração das <i>strings</i> nos meses de julho e agosto	47
Tabela 7 - Dados de geração das <i>strings</i> nos meses de setembro e outubro	48
Tabela 8 - Dados de geração das <i>strings</i> no mês de novembro e janeiro	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

I – Corrente

W – Watts

Wh – Watt-hora

V – Volts

M – Metros

mm - Milímetros

FV – Fotovoltaica

PV – Conjunto de Painéis Solar Fotovoltaicos

TCC – Trabalho de Conclusão de Curso

IFMG – Instituto Federal de Minas Gerais

SUMÁRIO

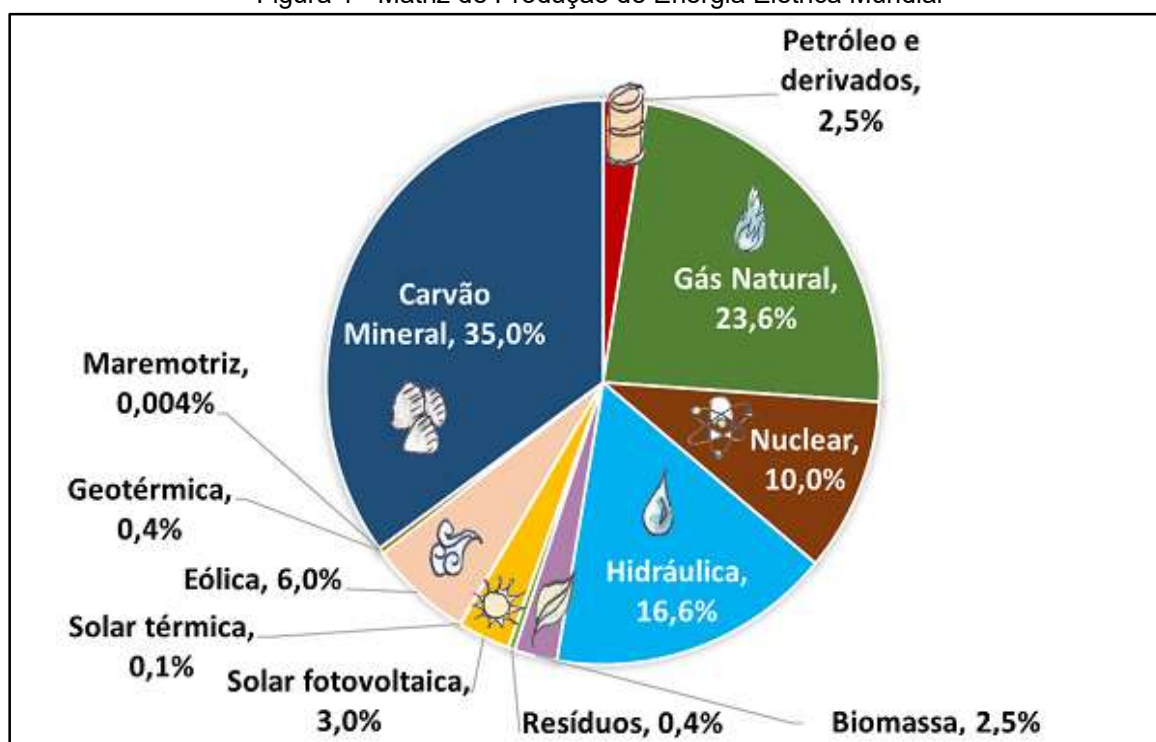
1. INTRODUÇÃO	11
1.1. Justificativa.....	13
1.2. Objetivos	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1. A energia elétrica	15
2.2. A energia solar fotovoltaica	16
2.3. Histórico	16
2.4. Efeito fotovoltaico	18
2.5. Impactos da sujidade	21
2.6. Estudo do índice pluviométrico	22
2.7. Métodos de limpeza das placas fotovoltaicas	22
2.8. Métodos preventivos aos impactos da sujidade nos painéis fotovoltaicos	24
2.9. Métodos para determinar o impacto da sujidade	25
3. DESENVOLVIMENTO	27
3.1. Caracterização da usina do IFMG	28
3.2. Análise da localização da usina	32
3.3. Análise do índice pluviométrico da região de ipatinga e estação meteorológica.....	35
3.4. Identificação do método de estudo.....	37
3.5. Identificação das realizações das limpezas	37
3.6. Método de acompanhamento da geração.....	39
3.7. Regime de chuva registrado	40
3.8. Geração efetiva e comparação entre PVs.....	44
3.9. Relação do impacto das chuvas com a geração e perdas por sujidade	49
3.10. Análise macro temporal	58
4. CONCLUSÃO	61
4.1 Trabalhos futuros	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho trata da influência da chuva sobre a sujidade nos módulos fotovoltaicos e, este capítulo introdutório, trata da problemática proposta, a justificativa que foi levada em conta para validar o assunto, o que se espera com o desenvolvimento do trabalho e a estruturação pretendida.

Fontes renováveis para geração de energia vêm se tornando parte essencial do panorama mundial energético. Isso se deve pelo grande prejuízo ambiental trazido pelos combustíveis fósseis, ou pela necessidade de engenhosas estruturas em fontes consideradas mais limpas, como hidrelétricas. A Figura 1 retrata as fontes primárias que suprem a matriz elétrica mundial em 2020. Observa-se que fontes não renováveis e, que emitem grande volume de CO₂ na atmosfera, são responsáveis por grande parte da energia mundial. Por isso, a energia provinda do sol é um ponto muito importante a ser estudado e melhorado, para tornar mais eficiente o processo de conversão dessa irradiação em, de fato, Energia Elétrica.

Figura 1 - Matriz de Produção de Energia Elétrica Mundial



Fonte: [https:// www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica](https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica);

A utilização de fontes renováveis é extremamente apreciada quando se olha o cenário atual da dependência de fontes finitas de energia, principalmente os combustíveis fósseis. Outro aspecto no qual interessa a implementação de recursos

alternativos de produção de energia é a poluição emitida pelos métodos mais utilizados hoje em dia. Dito isso, observa-se que sistemas fotovoltaicos estão cada vez mais presentes no mercado energético, sendo proveniente de uma fonte limpa, “inesgotável” e abrangente em toda a Terra, a luz do Sol. (FILHO et al., 2015; GREGORY, 2015).

A conversão da energia proveniente da luz do sol em energia elétrica é realmente um meio promissor para o suprimento de energia, e os painéis responsáveis por isso tendem a ser os protagonistas nessa nova etapa da matriz energética. A demanda de energia solar tem crescido cada vez mais tanto em contextos urbanos residenciais, quanto nos industriais, e isso tende a ser a decisão correta quando se trata de redução de custos com energia em médio e longo prazo. (ZANESCO et al., 2011).

Tendo em vista essa crescente demanda pela energia fotovoltaica, surgem alguns temas a serem aperfeiçoados, como é o caso da melhoria de eficiência de conversão, novos materiais, as perdas geradas por impurezas sobre os módulos fotovoltaicos e demais assuntos provindos dessa grande fonte energética emergente.

Ainda existem muitas dúvidas quando se trata do desempenho de sistemas fotovoltaicos. Apesar de serem bastante confiáveis, em ambientes propensos a acumular poluição ou materiais particulados se faz imprescindível a busca por conhecimento dos efeitos causados por eles, a fim de manter uma operação adequada. (RYAN; VIGNOLA; McDANIELS, 1989; FARKAS; FRONTINI; MATURI, 2012).

A sujidade e materiais particulados são temas recentes diante da academia, na qual se encontra poucas informações sobre eles. O estudo para se entender melhor o que esses problemas representam auxilia diversos ramos em seus respectivos projetos, desenvolvendo metodologias modernas capazes de aumentar a capacidade e eficiência dos sistemas. (COSTA; DINIZ; KAZMERSKI, 2016).

Existem no meio acadêmico algumas pesquisas já realizadas na intenção de averiguar o impacto da sujidade nos módulos fotovoltaicos, como é o caso do estudo feito por Felipe Rabello (2018), “Estudo do efeito da sujidade na eficiência dos módulos fotovoltaicos”, e a dissertação de Vinícius Gouveia (2018), “Análise das perdas de produtividade em geradores voltaicos por efeito da sujidade”.

Este trabalho é dividido em 3 capítulos, onde, no primeiro capítulo é tratada a Introdução, Justificativa e Objetivos. No capítulo 2 há uma revisão da bibliografia sobre o tema, iluminando o conhecimento existente sobre a energia elétrica em si, a energia fotovoltaica, sobre a sujeidade e ainda se desenvolve a pesquisa realizada. O capítulo 3 conclui com os resultados obtidos e perspectivas observadas.

1.1 Justificativa

O baixo rendimento de conversão entre radiação solar em energia elétrica dos módulos fotovoltaicos é um dos fatores observados ao analisar a viabilidade de um sistema desse tipo. Quanto menor a eficiência, maior será o tempo de *PayBack* (retorno do investimento), e os acúmulos de impurezas sobre as placas são agentes que agravam ainda mais essa situação, nesse contexto, a chuva é potencialmente um fenômeno que pode se tornar favorável para a mitigação dessa adversidade.

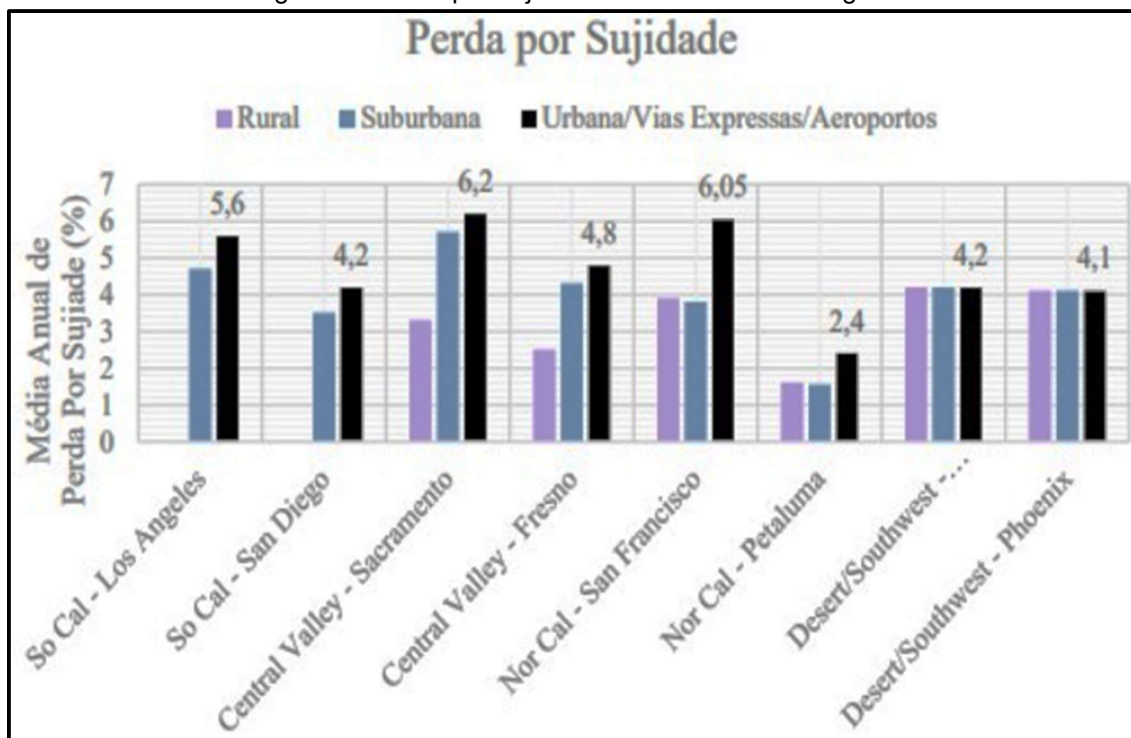
A limpeza dos módulos da geração fotovoltaica (FV) ajuda a minimizar os efeitos negativos que a sujeidade causa sobre eles, e diferentes métodos podem ser utilizados para se atingir esse objetivo, a depender das características de cada sistema. Os dois tipos de limpeza mais comuns são a manual ou automatizada, ambas se tratam de ações humanas, porém, se o local possui chuvas regulares, pode-se observar a limpeza que naturalmente ocorre diante dessa precipitação. (Hammoud *et al.*, 2019).

O impacto causado pela perda de geração entre os módulos que estão mais sujos ante aos que estão mais limpos pode ser um grande problema quando se trata de sistemas mais robustos, afetando negativa e diretamente a capacidade de geração. (CASANOVA *et al.*, 2013; APPELS *et al.*, 2013). Observando o outro aspecto, a limpeza desses módulos gera custos com a mão de obra, água, equipamentos e efetivamente a parada no sistema durante o procedimento. (PAVAN *et al.*, 2011; LEMOS, 2016). Por isso é importante equilibrar e analisar essas questões numa ordem econômica para conseguir definir uma faixa de operação em que o sistema atinja seu melhor desempenho.

Nessa conjuntura um agente a ser observado é o trabalho que as chuvas realizam para melhoria da eficiência das usinas fotovoltaicas, pois, teoricamente, elas não geram custos ao mantenedor do sistema FV. Entender a importância desse fenômeno e o grau de contribuição que traz para a limpeza dos módulos é recomendado se forem contar com ele, visto que nem todos os tipos de sujeidade são

facilmente retirados pela chuva. A Figura 2 foi extraída de um estudo realizado por (KIMBER, 2006), onde caracteriza as perdas médias anuais na produção de energia elétrica devido a sujidade em algumas regiões dos EUA, sendo qualificadas como regiões rurais, suburbanas e urbanas. O estudo concluiu que as regiões urbanas sofrem maior impacto da sujidade do que as demais áreas, com perdas de até 6% em produtividade média anual.

Figura 2 - Perda por sujidade em determinadas regiões



Fonte: KIMBER, et al., 2006

1.2 Objetivos

Esta pesquisa tem por objetivo geral investigar e caracterizar o impacto da chuva na mitigação da sujidade nos módulos fotovoltaicos, traçando um paralelo entre a perda pelo efeito da sujidade, e o ganho de eficiência com a ocorrência de chuva.

Como objetivos específicos, são tratados os seguintes pontos:

- Analisar o índice pluviométrico da região de Ipatinga/MG;
- Analisar o impacto da sujidade na usina observada;
- Verificar a ação da chuva na limpeza da superfície dos módulos solares;
- Relacionar a chuva acontecida com a melhoria de eficiência da geração, por meio da limpeza dos módulos.
- Calcular as perdas de geração mensal devido o efeito da sujidade para a usina do IFMG Campus Ipatinga.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentadas as referências bibliográficas que fundamentam o estudo. Artigos técnicos científicos, pesquisas e literaturas relacionadas ao assunto envolvendo Energia Elétrica, e, especialmente, a Fotovoltaica estão disponíveis em grande quantidade, e é importante buscar nestes acervos as informações iniciais que possam auxiliar o começo de qualquer estudo.

2.1 A energia elétrica

Sendo uns dos pilares necessários para o bem-estar da vida humana, a energia elétrica desempenha um papel fundamental no cotidiano das pessoas, sendo fundamental nos meios de transportes, telecomunicações e saneamento, ela integra a infraestrutura básica necessária do ser humano atualmente, por isso se faz tão importante as discussões sobre os meios energéticos e buscas para um desenvolvimento de matrizes renováveis e sustentáveis.

O crescimento populacional mundial acarretado do desenvolvimento industrial tem alavancado cada vez mais a demanda por energia elétrica, estimativas apontam que as fontes tradicionais de geração, fóssil, hidráulica e nuclear, chegarão no seu limite máximo de produção em aproximadamente 20 TW (INPE, 2017), sendo esse déficit de demanda compensado pela geração de energia através de fontes renováveis.

No Brasil, as hidroelétricas são as principais fontes de geração de energia elétrica, em seguida encontra-se a geração eólica (EPE, 2022). Como fontes alternativas e renováveis dessa energia observa-se o crescimento do uso da biomassa, uso dos ventos e da proliferação de pequenas centrais hidroelétricas, todas impulsionadas por programas governamentais de incentivo a Geração Distribuída (FRAUNHOFER, 2013).

Segundo o relatório (ANEEL, 2021) publicado em agosto, houve uma crescente na geração de energia elétrica proveniente de fontes renováveis no território brasileiro, sendo a solar fotovoltaica uma das matrizes que mais se desenvolveu na participação da geração de energia elétrica no cenário brasileiro. Ainda pelo relatório publicado pela ANEEL, as usinas solares eram responsáveis por 1,46% da demanda de energia elétrica no Brasil em 2019, e em 2021 esse número passou para 2,1%, um salto de 0,64% entre o período.

Já no ano de 2022, em março, o Brasil registrou 10 gigawatts de potência instalada, considerando micro e minigeração distribuída, na qual a principal fonte é a fotovoltaica. Conforme o artigo da ANEEL:

A fonte mais utilizada para micro e minigeração distribuída é a solar fotovoltaica, com 910,6 mil micro e miniusinas e cerca de 9,9 gigawatts (GW) de potência instalada (99% do total). Essa capacidade se soma aos 4,88 GW de potência instalada por empreendedores em usinas solares de grande porte, demonstrando o crescimento exponencial da energia solar no país. (ANEEL, 2022)

2.2 A energia solar fotovoltaica

Com o intuito de solucionar o déficit entre demanda e consumo de energia elétrica, fontes alternativas de energia vêm sendo amplamente investigadas nos últimos anos, e dentre esses estudos, a energia solar fotovoltaica vem se mostrando uma alternativa eficaz visto a crescente na utilização dessa matriz. Estudos apontam ser oportuno e acertada a utilização da matriz solar como fonte de geração alternativa, sendo uma produção de energia limpa, possibilitando acesso em grandes centros urbanos ou locais isolados de rede de distribuição convencional, garantindo uma produção eficiente, propiciando redução de custos em médio e longo prazo. (ZANESCO et al., 2011).

Sendo a energia solar fotovoltaica uma parte essencial do estudo apresentado, se faz necessário compreender o histórico, o efeito fotovoltaico e o funcionamento, já que é uma tecnologia em constante desenvolvimento e inovação.

2.3 Histórico

Segundo CRESESB (2006, p. 4), o cientista francês Alexandre Edmond Becquerel em 1839, foi o primeiro a relatar o efeito fotovoltaico, através de um experimento o cientista percebeu a existência de uma diferença de potencial provinda de uma solução ácida que estava sendo iluminada pela radiação solar. Em 1876, W. Adams e R. E. Day notaram efeito semelhante em um material sólido de selênio. (ZILLES et al., 2012; PINHO e GALDINO, 2014; VILLALVA, 2015; VIVACQUA, 2016).

Segundo (ZANESCO, 2011), os Estados Unidos da América, em meados dos anos 50, deram início as pesquisas para colocar em prática as utilizações desses

sistemas, com o objetivo de fornecer energia a satélites, e em 1954, foi produzida a primeira célula fotovoltaica em silício.

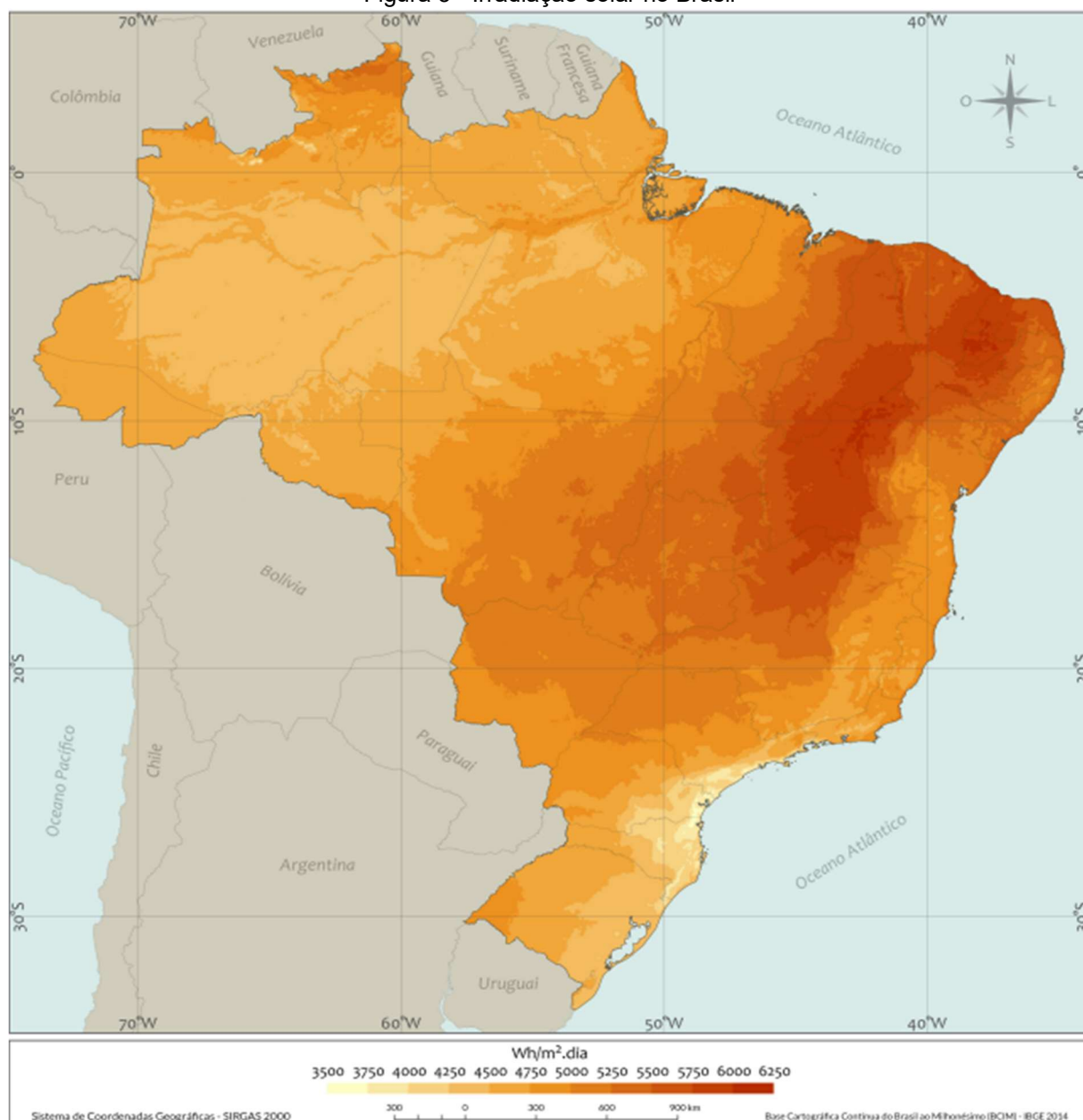
Na década de 70, o mundo sofreu uma grande crise energética, gerando um movimento por pesquisas e ideias inovadoras para gerar energia, e assim as células fotovoltaicas deixaram de ser restritas apenas a uso de programas espaciais e começaram a ser desenvolvidas como meio de atender a demanda de energia para os demais usos.

As placas fotovoltaicas são geralmente construídas de silício cristalino, silício amorfo ou arseneto de gálio. Atualmente os módulos FV constituídos de silício cristalino dominam o mercado mundial, pois vem sofrendo uma redução significativa no custo em função do aumento da capacidade instalada, dos avanços tecnológicos e redução dos custos dos materiais utilizados (ISE, 2019). Estudos indicam que cerca de 50% da geração de energia no mundo até 2050 será proveniente de fontes renováveis, sendo cerca de 25% proveniente da energia solar fotovoltaica. (CGEE, 2010; SMETS et al., 2016).

Na América Latina, o Brasil é o país mais avançado no assunto, sendo o pioneiro na fabricação de células fotovoltaicas para comercialização. (MARINI; ROSSI, 2003). Conforme o aumento das instalações de usinas FV em número e escala, aumenta, também, a necessidade de novos métodos para garantir a confiabilidade e o desempenho dessas usinas. Os principais problemas em um sistema fotovoltaico que causam impactos negativos na geração de energia são as falhas na rede e nas conexões elétricas, falhas nos inversores, bem como a degradação do módulo fotovoltaico, gerada muitas vezes pelo sombreamento parcial e pelas sujidades sobre o gerador solar (MUNOZ et al., 2011).

Segundo o Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017, p.36), o Brasil possui um índice de irradiação solar em quase todo o território, com valores entre 3500 até 6250 Wh/m².dia por ano, sendo um número muito maior comparado a países europeus onde a energia solar fotovoltaica está sendo mais difundida. (TIBA; FRAIDENRAICH; BARBOSA, 2001). Essa disparidade expressiva nos índices de irradiação solar evidencia o potencial imenso do Brasil no aproveitamento da energia solar. Enquanto países europeus, apesar de seu desenvolvimento tecnológico, enfrentam desafios devido a condições climáticas menos propícias, o Brasil surge como um cenário altamente favorável para a implantação e expansão de sistemas fotovoltaicos. A Figura 3 mostra a irradiação solar no Brasil.

Figura 3 - Irradiação solar no Brasil



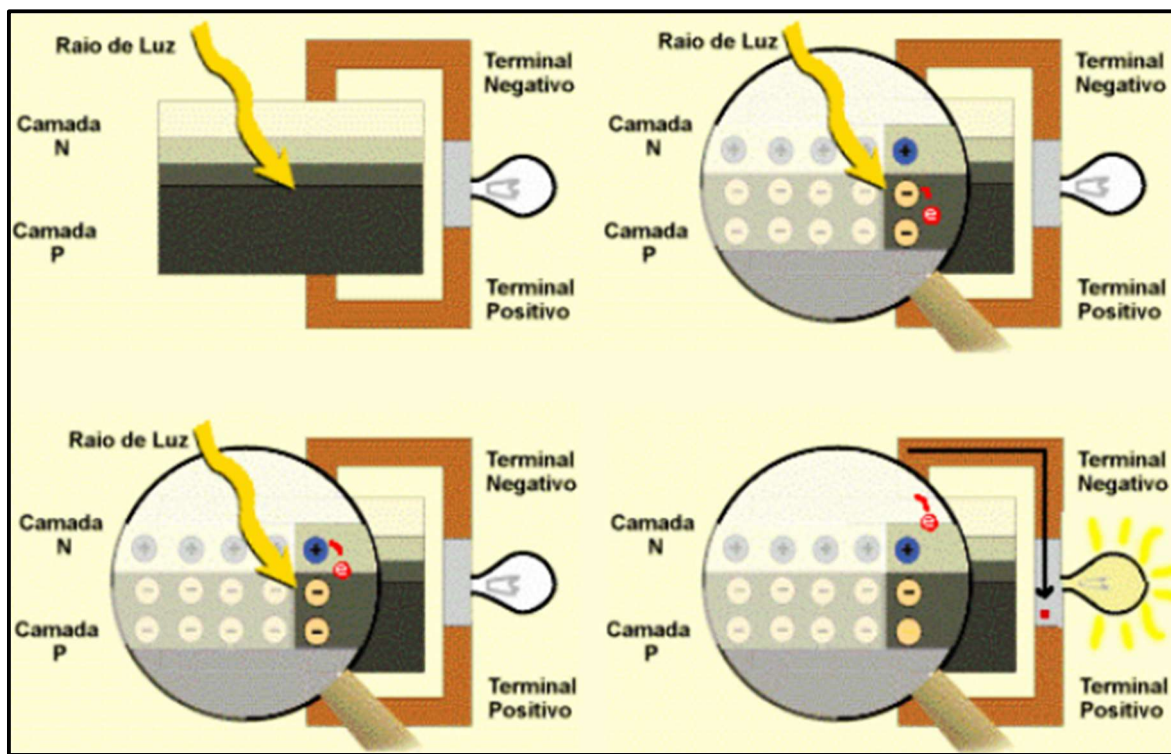
Fonte: <http://www.inpe.br/informativo/08/nota03>;

2.4 Efeito fotovoltaico

O efeito fotovoltaico é observado em elementos semicondutores, tais elementos transitam energia de forma mais eficaz do que os materiais isolantes e ao mesmo tempo menos eficaz do que os materiais condutores, suas propriedades podem ser modificadas adicionado elementos dopantes ou impurezas (PINHO e GALDINO, 2014). O silício é o semicondutor mais utilizado para este fim, pois é um

material abundante e de baixo custo. A Figura 4 apresenta como ocorre o efeito fotovoltaico no interior da célula.

Figura 4 - Funcionamento de uma célula fotovoltaica



Fonte: http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=321;

O efeito fotovoltaico é o fenômeno físico em que a luz é convertida diretamente em eletricidade em um material semicondutor, como o silício. Quando a luz atinge a superfície do material semicondutor, ela pode fornecer energia suficiente para que elétrons sejam excitados e se movam através do material. Isso cria uma diferença de potencial elétrico entre duas camadas do material semicondutor, resultando na geração de uma corrente elétrica. (PINHO e GALDINO, 2014).

Esse fenômeno é a base da tecnologia de células solares, que convertem a luz do sol em eletricidade. As células solares consistem em camadas de materiais semicondutores de silício, com diferentes níveis de dopagem que criam uma camada "p" e uma camada "n". Quando a luz solar incide na célula solar, elétrons são excitados e se movem da camada "n" para a camada "p", gerando uma corrente elétrica que é coletada através de contatos elétricos colocados na parte superior e inferior do material semicondutor, que então pode ser usado para fornecer energia elétrica a dispositivos ou armazenados em baterias para uso posterior.

Os módulos fotovoltaicos, também conhecidos como painéis solares, ampliam o princípio fundamental das células solares para escala comercial e prática.

Eles são compostos por várias células solares interconectadas e encapsuladas em materiais de proteção, formando uma unidade coletora de energia solar. Essa abordagem em módulos permite a captação eficiente de luz solar em larga escala, otimizando a produção de eletricidade. Além disso, os módulos fotovoltaicos são projetados para resistir a condições ambientais adversas, garantindo durabilidade e desempenho ao longo do tempo. A capacidade de conectar vários módulos em um sistema maior oferece flexibilidade na adaptação a diferentes necessidades de energia, desde pequenos sistemas residenciais até grandes instalações comerciais e industriais.

Além da configuração e interconexão de células solares em módulos, a organização estratégica desses módulos em um sistema solar é fundamental para otimizar a eficiência da geração de eletricidade. Nesse contexto, a configuração de módulos em série, conhecida como *string*, desempenha um papel crucial. Uma *string* é essencialmente uma cadeia de módulos fotovoltaicos conectados em série, o que significa que a corrente flui através deles de maneira sequencial. A conexão em série aumenta a tensão total do sistema, contribuindo para minimizar perdas de transmissão e melhorar a eficiência global.

No entanto, é importante equilibrar essa abordagem com a configuração em paralelo, conhecida como arranjo, na qual várias *strings* são conectadas em paralelo. A combinação adequada de módulos em série e em paralelo é determinada com base na aplicação específica e nas características do sistema, garantindo a otimização da produção de eletricidade e a adaptação às variações nas condições de iluminação solar ao longo do dia.

Módulos do tipo *wafer*, compostos por silício cristalino ocupavam cerca de 95% do mercado mundial de módulos fotovoltaicos, isso em 2017, e hoje em dia ainda são os tipos de semicondutores mais comumente utilizados, afirmam Igor e Anízio (2018, p8.).

Pensando na máxima eficiência de conversão da irradiação solar, durante um ano completo, a placa solar deve ter um ângulo de inclinação equivalente à latitude onde está sendo instalada. Variações de até 10% nesse valor da latitude não é considerado prejudicial, mantendo a mesma média de geração esperada para o ano completo. (PINHO e GALDINO, 2014).

Sistemas de geração que são conectados à rede (*On Grid*) possuem módulos fotovoltaicos, cabos de conexão, inversores e um medidor capaz de medir energia consumida da rede e enviada pela geração. (VALADARES, 2016). Sistemas FV são classificados de acordo com a potência instalada e pelo tipo de fonte, despacháveis e não despacháveis. Sendo a microgeração, que atinge um máximo de 75 KW, a minigeração de centrais despacháveis, que estão os sistemas de 75 kW até 5 MW e a minigeração de centrais não despacháveis e fotovoltaica despachável com armazenamento, que são sistemas que possuem potência instalada acima de 75 KW até 3 MW. Tais definições regulamentadas dentro do primeiro artigo da lei 14.300/22 (Brasil, 2022).

A irradiância solar e a temperatura da célula fazem parte de um grupo de fatores que determinam a eficiência de um sistema de geração FV. (REZA et al., 2016). A produtividade do sistema pode ser medida pela razão da energia efetivamente injetada na rede e o potencial nominal dos módulos instalados. (CRISPIM, 2021). Índices de desempenho e outros parâmetros fornecem a performance que cada equipamento tem na conversão de energia, podendo ser usados como referência para qualificar a competência do sistema, definir expectativas e ter previsões de como se comporta. (MELLO e RAMPINELLI, 2016).

Estudos realizados previamente identificam alguns fatores como impactantes na geração fotovoltaica, e determinam o quanto geralmente influenciam nos sistemas. Segundo a Sociedade Alemã de Energia Solar – DGS, em 2013, o sombreamento (0 a -5%); reflexão (-3 a -5%); perdas da corrente contínua (-0,5 a -1,5%); perdas na conversão de energia (-0,5 a -3%); perdas no inversor (-3 a -7,5%) e perdas na fiação elétrica (-0,2 a -1,5%) são alguns fatores que impactam nessa eficiência de geração. (OLIVEIRA e TIEPOLO, 2018).

2.5 Impactos da sujeidade

A poeira depositada nos módulos é um fenômeno natural que afeta negativamente o desempenho dos módulos. (SANTHAKUMARI e SAGAR, 2019). O efeito do acúmulo dessa sujeira, areia e poeira, na superfície dos módulos tem sido alvo de esforços da comunidade acadêmica, sendo motivo de pesquisas, estudos e experimentos. (BEATTIE et al., 2012).

A redução de desempenho ocasionada pela sujeidade é constatada em 3 aspectos, sendo eles a reflexão da radiação solar, a dispersão ou até mesmo a absorção. Isso influencia na quantidade de luz que as células do módulo recebem.

(MEJIA e KLEISSL, 2013; MAGHAMI et al., 2016; MANI et al., 2016). Situações ambientais como a umidade, ventos e secas mudam as características das impurezas depositadas nos módulos. (SARVER et al., 2013 apud LEMOS et al., 2016). Essas sujeiras diminuem consideravelmente o desempenho das placas, algumas das mais impactantes são as que chegam a um ponto, seja por condições ambientais ou de sua própria natureza, de necessitar de uma limpeza manual.

A inclinação dos módulos impacta na sujeira, como diz Costas et al, (2016) Regiões com baixas latitudes necessitam de menor ângulo de inclinação dos módulos FV, para obter o ganho máximo solar, no entanto menores inclinações propiciam maior acúmulo de sujeira.

A perda de eficiência dos sistemas FV se dão também por conta do *mismatch*, que é a perda por descasamento elétrico de tensão e corrente entre as células mais limpas e as mais sujas, ou até mesmo entre os módulos mais limpos e mais sujos de uma mesma série de módulos. (NASCIMENTO, 2013 apud HICKEL et al., 2016). É como se um módulo mais sujo limitasse a conversão de energia dos outros módulos, potencialmente mais limpos e, portanto, mais eficientes, de uma mesma *string*.

2.6 Estudo do índice pluviométrico

A meteorologia é o campo científico dedicado à análise do ambiente que nos rodeia, envolvendo a investigação de fenômenos climáticos, o ambiente natural e o habitat da nossa biosfera. A coleta de dados meteorológicos permite a condução de pesquisas ambientais essenciais para a produção de alimentos, o entendimento do comportamento dos seres vivos, o progresso industrial e o dia a dia das pessoas. (VIANELLO, 2000).

A medição e o registro das condições meteorológicas são fundamentais para entender as variações climáticas e prever eventos climáticos significativos. Um componente essencial desse sistema de monitoramento é a estação meteorológica, que coleta dados sobre temperatura, umidade, vento, pressão atmosférica e, é claro, as precipitações pluviométricas. (OLIVEIRA, 2007).

Segundo C. Donald Ahrens (2018) uma estação meteorológica é um conjunto de instrumentos e equipamentos de medição que registram várias variáveis meteorológicas em tempo real. Esses dispositivos estão estrategicamente localizados

em diferentes partes do mundo para coletar dados abrangentes e contínuos sobre as condições atmosféricas. As informações coletadas incluem temperatura do ar, umidade relativa, velocidade e direção do vento, pressão atmosférica e, crucialmente, a quantidade de precipitação.

O índice pluviométrico é uma medida que quantifica a quantidade de chuva que cai em uma determinada área durante um período específico. É uma ferramenta essencial para avaliar os padrões de precipitação, identificar tendências climáticas e tomar decisões informadas em vários setores, como agricultura, gestão de recursos hídricos e previsão de inundações. (OLIVEIRA, 2007).

O cálculo do índice pluviométrico envolve a coleta de dados de chuva de uma estação meteorológica. Os dados consistem em registros diários ou horários da quantidade de chuva que caiu em um recipiente calibrado, chamado de pluviômetro. Para obter o índice pluviométrico em um período específico, como um mês ou um ano, somam-se todos os valores registrados durante esse período. O resultado é expresso em milímetros (mm) ou centímetros (cm) e representa a quantidade total de chuva naquela área durante o período em questão (VAREJÃO-SILVA, 2006).

Além da previsão do tempo, a meteorologia e o índice pluviométrico desempenham um papel crucial em várias áreas, como agricultura, aviação, navegação, gestão de recursos hídricos, energia e estudo das mudanças climáticas. Ela ajuda a tomar decisões informadas em situações que dependem das condições atmosféricas, como o plantio de culturas, o planejamento de voos, a prevenção de desastres naturais e a formulação de políticas ambientais. (OLIVEIRA, 2007).

2.7 Métodos de limpeza das placas fotovoltaicas

A chuva é um importante fator natural que contribui para a limpeza das placas solares. Quando chove, a água ajuda a remover a sujeira, poeira e detritos acumulados na superfície das placas solares, sendo especialmente útil em áreas onde a seca e a poeira são comuns. De acordo com Appels et al. (2013), dependendo do local de instalação, a chuva tem efeitos restauráveis suficientes que tornam dispensáveis as limpezas manuais de forma regular na superfície fotovoltaica.

Além disso, o vento também pode ajudar a remover a poeira e detritos das placas solares, especialmente em locais onde há ventos fortes. Isso ocorre porque o vento pode movimentar partículas leves, como poeira e detritos, e afastá-las da superfície das placas solares.

Existem vários métodos de limpeza de placas solares que podem ser utilizados para garantir o funcionamento com a máxima eficiência:

- a) Limpeza com água: a limpeza com água é um dos métodos mais simples e eficazes de limpeza de placas solares. Água limpa e um pano macio podem ser utilizados para remover sujeira, poeira e outros resíduos acumulados nas placas solares. (SAYYAH et al., 2014);
- b) Limpeza com produtos químicos: em alguns casos, pode ser necessário utilizar produtos químicos para limpar as placas solares. É importante utilizar produtos químicos específicos para limpeza de painéis fotovoltaicos, pois outros produtos podem causar danos. Esses produtos químicos são geralmente diluídos em água e aplicados nos módulos com um pano macio. (SAYYAH et al., 2014);
- c) Limpeza automatizada: o processo de limpeza automatizado consiste em usar dispositivos mecânicos controlados por computador para automatizar o procedimento de limpeza, a fim de minimizar o uso de água e manter a eficiência do módulo fotovoltaico a um nível aceitável (SAYYAH et al., 2014).

2.8 Métodos preventivos aos impactos da sujidade nos painéis fotovoltaicos

Os métodos passivos de limpeza de placas solares são aqueles que visam modificar a superfície das células fotovoltaicas para torná-las menos suscetíveis à acumulação de sujeira e poeira, sem exigir intervenções regulares de limpeza. (SAYYAH et al., 2014).

Um exemplo de método passivo é a utilização de revestimentos hidrofóbicos nas superfícies dos módulos FV. Esses revestimentos criam uma superfície repelente à água, o que impede a aderência de partículas de poeira e sujeira, tornando-as mais fáceis de serem removidas pela chuva ou pelo vento.

Outro método passivo é a utilização de superfícies com texturas especiais, como estruturas microscópicas ou nanoestruturas, que melhoram a molhabilidade da superfície, permitindo que a água se espalhe mais uniformemente sobre a superfície dos módulos FV e remova a sujeira e a poeira de forma mais eficiente.

Segundo Lemos et al. (2016), os métodos passivos de limpeza podem ser uma alternativa eficaz e econômica para garantir que as células solares estejam sempre funcionando com a máxima eficiência, sem a necessidade de intervenções regulares de limpeza. No entanto, eles ainda são relativamente novos e em fase de

pesquisa e desenvolvimento, sendo necessário avaliar a eficácia e a durabilidade dessas tecnologias em longo prazo.

2.9 Métodos para determinar o impacto da sujidade

Saber avaliar e entender no que o acúmulo de sujidades afeta o sistema é necessário para se conseguir determinar os melhores momentos em que se deve fazer a limpeza manual. E isso, levando em consideração o custo que se tem com a operação de limpeza, mas também os benefícios de se ter um sistema produzindo mais eficazmente. (Fotovolt, jul 2021, p.26).

Há diversas formas de quantificar o impacto da sujeira nos sistemas FV, mas a avaliação da taxa de desempenho dos sistemas, em termos percentuais e de produtividade de energia, é a que mais se aproxima do valor real observado. (Fotovolt, jul 2021, p.26).

O método de comparar a produtividade entre *strings* de um mesmo sistema parece fazer muito sentido, sendo indicado por vários autores como o adequado para o objetivo desejado por eles. Basicamente, divide-se os sistemas FV em partes que podem ser acompanhadas suas taxas de desempenho e produtividade, mantendo uma dessas divisões sem realizar limpezas e determinando a periodicidade de limpeza das divisões complementares, assim, sendo possível comparar os resultados de geração de cada um desses setores. É importante se certificar que todos os módulos acompanhados estejam em uma situação similar, de inclinação, azimute e exposição ao ambiente.

O método descrito no parágrafo anterior é utilizado neste trabalho para quantificar o impacto da sujidade, portanto, se avalia os níveis de produção de energia, comparando dois blocos de módulos FV de uma usina instalada nas dependências do IFMG Campus Ipatinga, onde uma parte será mantida sem limpeza e a outra com a limpeza periódica determinada, em geral, uma limpeza a cada mês.

Há outros métodos utilizados para avaliar a perda de conversão através do acúmulo de sujeira nos módulos. Um deles se dá por meio da obtenção da corrente de curto-circuito e da potência máxima, mediante medições de corrente e tensão, coletadas por curvas do tipo IxV. Para a realização deste teste, são necessários equipamentos específicos para a obtenção da irradiância solar no momento das medições, os dados de temperatura e a curva IxV, sendo levado em consideração o percentual de erro de tais equipamentos. Existem medidas para mitigar as incertezas no resultado da avaliação, como, padronizar o

equipamento para obtenção da curva $I \times V$ e a mesma célula em todas as medições; medições com níveis de irradiância próximo a 1.000 W/m^2 ; utilizar sensores de boa precisão para levantamento dos dados de temperatura. (RUTHER et al, 2016).

Heinricha et al. (2020), diz ainda sobre alguns métodos para se medir o impacto da sujidade na geração fotovoltaica, um dos sugeridos para o caso estudado é medir diretamente a taxa de sujidade comparando a corrente de curto-circuito de uma célula FV “suja” com a de uma célula “limpa”.

3 DESENVOLVIMENTO

Com o intuito de caracterizar o impacto da chuva na atenuação das perdas de conversão geradas pelo efeito da sujidade nos módulos fotovoltaicos da usina instalados no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais (IFMG) – Campus Ipatinga, representado nas Figura 5 e Figura 6, é apresentado neste capítulo o encadeamento metodológico do estudo envolvendo os agentes de maior relevância para o conteúdo e os materiais e métodos utilizados para avaliação de forma experimental, por meio de coletas de dados e análise estatística e comparativa entre a perda pela sujidade com os módulos limpos e os módulos sujos e a influência da chuva nesse cenário.

A Figura 5 - Imagem de satélite do Campus proporciona uma visão geral da localização do campus do Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG) em Ipatinga, incluindo uma vista aérea da própria edificação do instituto, localizada nas coordenadas de latitude: -19.471560 e longitude: -42.526949. Posteriormente, será explorada detalhadamente a disposição das estruturas na cobertura do IFMG.

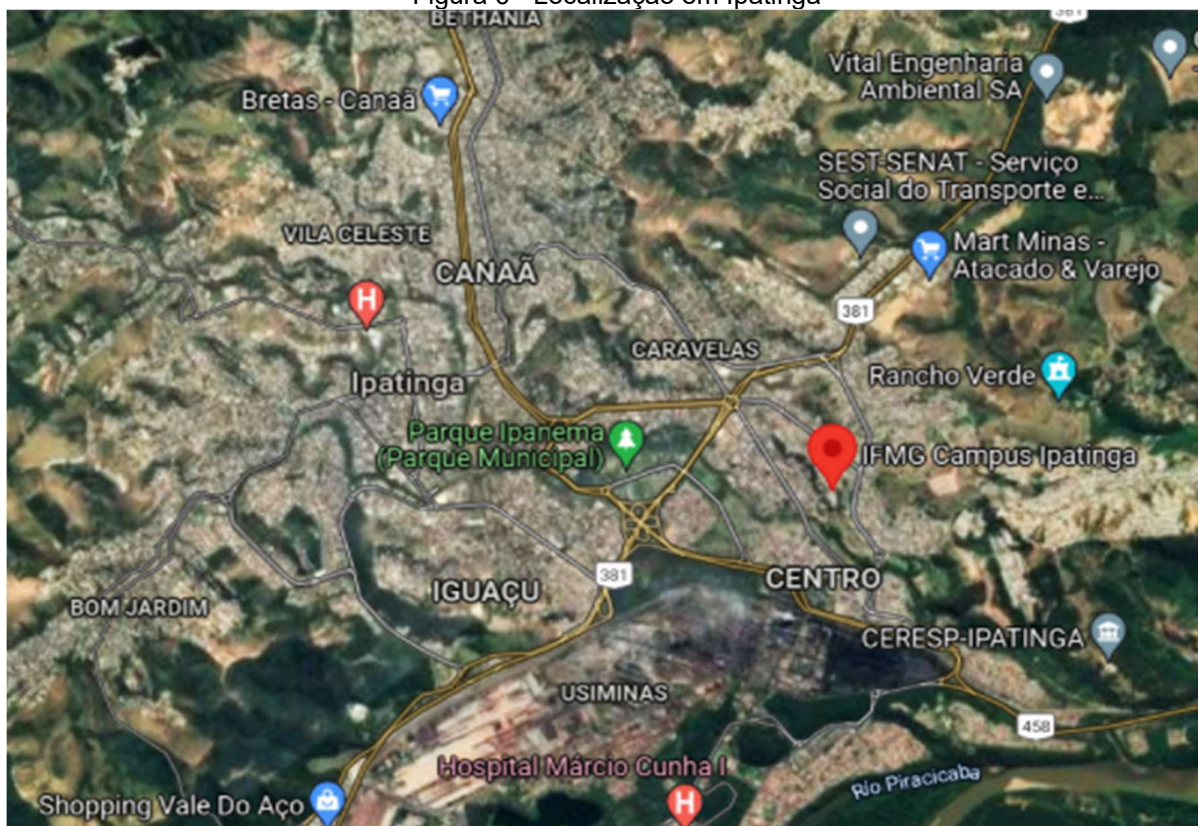
Figura 5 - Imagem de satélite do Campus



Fonte: <https://www.google.com/maps/place/IFMG+Campus+Ipatinga/@-19.4707294,-42.5285812,783m/data=!3m2!1e3!4b1!4m5!3m4!1s0xb00046148350c5:0xb9cfff286f84db8d!8m2!3d-19.4707294!4d-42.526965!5m1!1e4>

A Figura 6 proporciona uma representação abrangente do ambiente circundante ao local de estudo, que está inserido em uma malha urbana extremamente densa. Uma característica importante desse cenário é a presença imponente da USIMINAS, uma renomada empresa siderúrgica local. A USIMINAS não apenas contribui de maneira expressiva para a economia regional, mas também desempenha um papel de considerável importância na dinâmica social e industrial da área, tornando-se um elemento central na identidade e na vida da comunidade local.

Figura 6 - Localização em Ipatinga



Fonte: <https://www.google.com/maps/place/IFMG+Campus+Ipatinga/@-19.4707294,-42.5285812,783m/data=!3m2!1e3!4b1!4m5!3m4!1s0xb00046148350c5:0xb9cfff286f84db8d!8m2!3d-19.4707294!4d-42.526965!5m1!1e4>

3.1 Caracterização da usina do IFMG

A usina foco deste estudo está instalada nas dependências do Campus Avançado do IFMG em Ipatinga, Minas Gerais, como afirma a introdução do capítulo 3. A instalação do sistema foi concluída em 05/11/2019 e começou a operar em pleno funcionamento no dia 14/11/2019 e desde então é monitorada por meio de relatórios mensais obtidos pelo Inversor de frequência correspondente e, junto a este monitoramento do inversor, há uma estação meteorológica para acompanhar as condições climáticas *in loco*. A tabela 1 a seguir apresenta os dados da usina.

Tabela 1 - Dados da usina

Dados da Usina	
Potência instalada	44,88 kWp
Potência nominal dos módulos	340 Wp (Modelo: RSM144-6-340P)
Número de módulos	132 módulos (36 módulos ^[1] + 96 módulos ^[2])
Inversores	2x20 kW (Modelo: Reno-20k com 2 MPPTs)
[1] Módulos posicionados com 237° de azimuth.	
[2] Módulos posicionados com 56° de azimuth.	

Fonte: Autores, com informações obtidas na instituição

Foram instalados 132 painéis no telhado da instituição, concebendo uma capacidade de 44,88 kWp, com previsão de uma geração média mensal de 5.000 kWh, que proporciona assim uma grande economia financeira para a instituição e uma cooperação com a sustentabilidade do município. O sistema conta com dois inversores com potência de 20 kW, sendo possível inversor trabalhar com dois arranjos isolados. A Figura 7 evidencia os inversores utilizados.

Figura 7 - Inversores utilizados no sistema



Fonte: https://www.ifmg.edu.br/ipatinga/noticias/ifmg_ipatinga_instalacao_usina_fotovoltaica/usina4.jpg/@images/d7654bec-48fe-4956-8a0c-616675bcd056.jpeg

Outro fator primordial do inversor é a ferramenta de monitoramento Wi-Fi, que é uma funcionalidade que permite o acompanhamento do desempenho e o *status* de inversor de forma conveniente e remota, geralmente por meio de uma conexão Wi-Fi à internet. Essa capacidade de monitoramento é especialmente útil em sistemas de energia solar, onde os inversores desempenham um papel fundamental na conversão da energia gerada pelos painéis.

Alguns aspectos importantes relacionados ao monitoramento Wi-Fi dos inversores:

- a) Acesso Remoto: o monitoramento Wi-Fi permite que você acesse as informações do inversor, como a produção de energia, a tensão, a corrente e outros dados importantes, de qualquer lugar com uma conexão à internet. Isso é particularmente útil para proprietários de sistemas de energia solar que desejam acompanhar o desempenho de seus sistemas em tempo real;
- b) Dados em Tempo Real: com o monitoramento Wi-Fi, você pode visualizar dados em tempo real sobre a produção de energia do seu sistema. Isso inclui informações sobre quanto é gerado, quanto está sendo consumido e até mesmo quanto está sendo exportado para a rede elétrica, se aplicável;
- c) Alertas e Notificações: o sistema oferece a capacidade de configurar alertas e notificações. Isso permite que o interessado seja informado imediatamente caso haja algum problema com o inversor, como uma falha de funcionamento ou uma queda na produção de energia. Isso ajuda a identificar problemas rapidamente e a tomar medidas corretivas;
- d) Análise de Desempenho: além de dados em tempo real, sistemas de monitoramento Wi-Fi também oferecem análises de desempenho ao longo do tempo. Isso permite que o acompanhamento do desempenho do sistema ao longo dos meses e anos, identificando tendências e variações sazonais.

É crucial destacar que todas as informações obtidas por meio do inversor desempenham um papel fundamental na condução deste estudo. Esses dados são essenciais para permitir uma análise minuciosa e precisa do desempenho do sistema em questão. Tais dados possibilitam a identificação de tendências significativas e a correlacionar os dados pluviométricos, tornando possível a otimização do sistema por meio da identificação e mitigação das perdas causadas pela sujeira e outros fatores.

Essas informações, não apenas fornecem aspectos sobre o funcionamento do sistema, mas também oferecem a base para aprimoramentos práticos. Ao compreender a relação entre a eficiência do sistema e os dados pluviométricos, é possível desenvolver estratégias proativas para reduzir o desperdício de recursos devido à sujidade, contribuindo para um uso mais eficiente e sustentável da tecnologia.

Baseado nos critérios propostos no segundo parágrafo do capítulo 2.9, este estudo irá trabalhar apenas com duas *strings* (PV1 e PV2) que compõe o sistema, pois elas estão instaladas em um mesmo azimuth (i.e., 56°), mesmo plano de inclinação, e em condições idênticas de exposição à natureza. A Tabela 2 e a Figura 8 a seguir apresentam respectivamente os dados efetivamente usados e as *strings* utilizadas.

Tabela 2 - Dados do sistema efetivamente estudado

Dados efetivamente utilizados	
Potência instalada	20,4 kWp
Potência nominal dos módulos	340 Wp (Modelo: RSM144-6-340P)
Número de módulos	60 módulos (30 módulos[1] + 30 módulos[2])
Inversor	1x20 kW (Modelo: Reno-20k com 2 MPPTs)
Todos os módulos com o azimuth 56°	
[1] Módulos pertencentes à String 1 (PV1)	
[2] Módulos pertencentes à String 2 (PV2)	

Fonte: Autores

Figura 8 - Representação das *strings* utilizadas



Fonte: Autores

A importância de trabalhar com duas *strings* é a possibilidade da extração dos dados referente a cada uma isoladamente, dando condições de se comparar esses índices e conseguir um estudo quantitativo sobre o assunto pretendido. Outra importância que deve ser levada em consideração é a similaridade da instalação e do ambiente das duas *strings*, já que se comparam os dados, para serem afetados apenas pela sujidade é essencial que os módulos sofram os mesmos efeitos, tanto em níveis de deposição de sujeira quanto em qualquer outro fator que venha a ocorrer, como sombreamento, chuvas e ventos. Todos estes motivos estão de acordo com o analisado no item 2.8, quando se tratou sobre os métodos existentes para determinar impactos que a sujidade pode trazer.

Dessa forma, a usina que será objeto de estudo se encontra devidamente definida e caracterizada, estando em estado ótimo para ser submetida a um monitoramento e avaliações abrangentes, de acordo com a metodologia escolhida. A seleção e descrição minuciosa da usina estabelecem uma base sólida para a condução da pesquisa. As condições operacionais da usina estão em conformidade com os parâmetros necessários, o que permite a realização de análises precisas e confiáveis.

3.2 Análise da localização da usina

Ipatinga é um município localizado na região leste do estado de Minas Gerais, pertencente à Região Metropolitana do Vale do Aço (RMVA) juntamente com os municípios de Santana do Paraíso, Coronel Fabriciano e Timóteo (IBGE, 2021). Essa região é conhecida por concentrar várias usinas siderúrgicas e metalúrgicas, incluindo a Usiminas, uma das maiores empresas do setor no país.

Devido à intensa atividade industrial, a cidade apresenta uma grande circulação diária de veículos, seja para transporte de mercadorias ou para deslocamento dos trabalhadores, e essa combinação de indústria pesada e tráfego intenso de veículos contribui para o aumento da emissão de poluentes e materiais particulados na atmosfera.

As usinas siderúrgicas são responsáveis pela produção de aço, processo que envolve altas temperaturas e queima de combustíveis fósseis, como carvão mineral, para gerar energia térmica. Esse processo resulta na liberação de gases poluentes, como óxido de enxofre (SO_x), óxidos de nitrogênio (NO_x), monóxido e dióxido de carbono (CO e CO_2), metano (CH_4), etano (C_2H_6), e materiais particulados

como poeira e fuligem, e outros poluentes. (DOUSHANOV, 2004; MILANEZ E PORTO, 2008; CALVO et al., 2013).

Além disso, os veículos que circulam diariamente na região também emitem gases poluentes, como dióxido de carbono (CO_2), óxidos de nitrogênio (NO_x) e material particulado, provenientes da queima de combustíveis fósseis. (NDIOKWERE, 1984; EPE, 1994, AKPOVETA E OSAKWE, 2014; DALLMANN et al., 2014).

Segundo (KUKI et al., 2008; PEREIRA et al., 2009; PRAJAPATI, 2012) a deposição de materiais particulados na atmosfera pode interferir na quantidade de luz incidente sobre a superfície. Quando há uma grande quantidade de materiais particulados suspensos na atmosfera, eles podem interagir com a luz solar de várias maneiras, dispersando a luz, espalhando-a em diferentes direções. Isso pode resultar em um efeito conhecido como espalhamento de Rayleigh, que faz com que o céu proporcione azul durante o dia. A dispersão da luz também pode causar um efeito de bruma ou neblina, que reduz a visibilidade e a quantidade de luz que atinge a superfície.

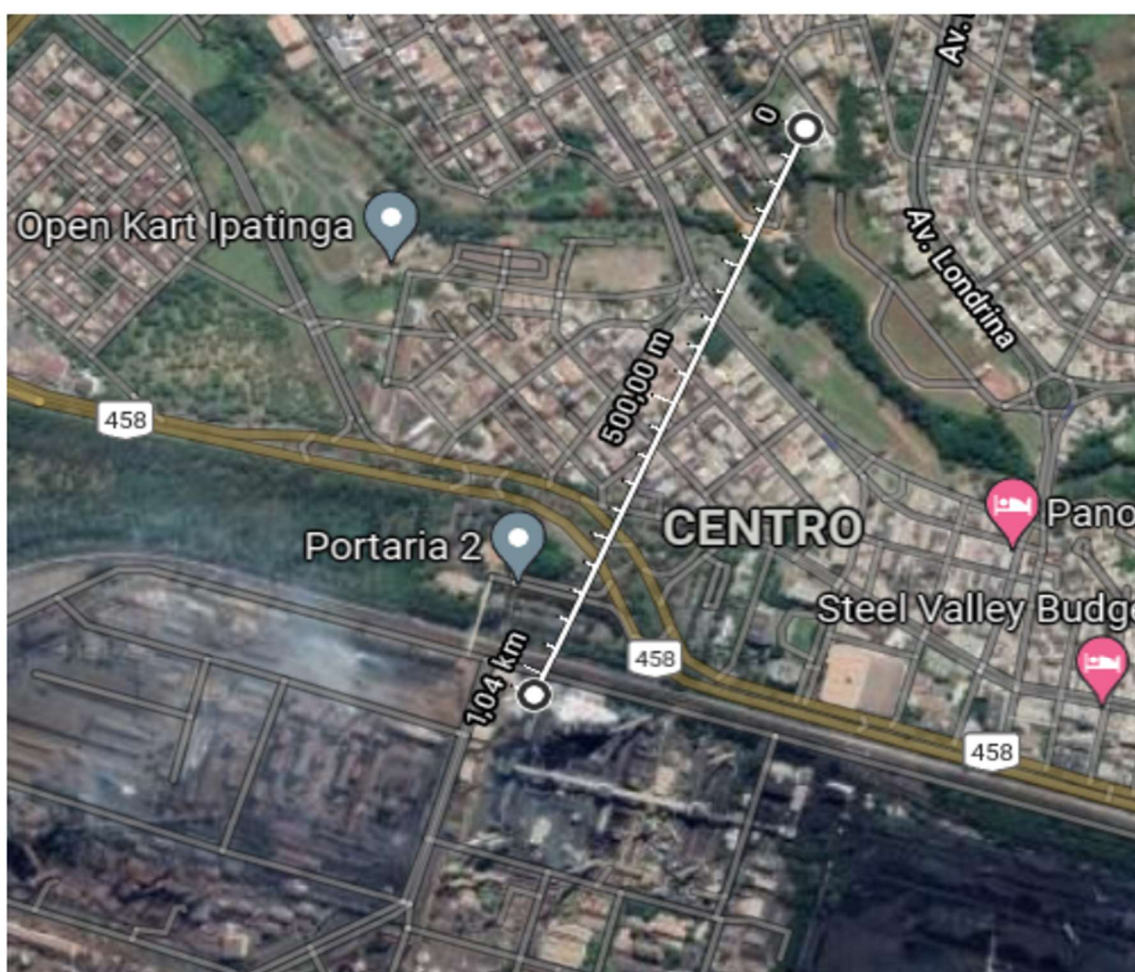
Ademais, os materiais particulados também podem absorver a luz solar, especialmente nas faixas de comprimento de onda visível e ultravioleta. Essa absorção pode causar uma diminuição na intensidade da luz solar, causada em uma redução na quantidade de radiação solar disponível para a fotossíntese das plantas, por exemplo, e esta mesma situação ocorre nos painéis fotovoltaicos.

Os materiais particulados depositados na superfície dos painéis solares podem criar uma camada suja e opaca que diminui a transmissão da luz. Essa camada pode ser composta por poeira, fuligem ou outros poluentes atmosféricos. Essa barreira física reduz ainda mais a quantidade de luz que atinge diretamente as células solares dos módulos fotovoltaicos, gerado em uma diminuição da eficiência de conversão de energia.

A usina selecionada situa-se no pitoresco bairro Veneza. É interessante observar que, de acordo com a pesquisa conduzida por Silva (2015), dentre os diversos bairros do município, o bairro Veneza se destaca por apresentar uma das mais altas médias mensais de partículas totais em suspensão, atingindo a marca de $74 \mu g/m^3$. Essa observação adquire significativa relevância, pois uma das principais causas dessa concentração é a proximidade do bairro Veneza com a empresa siderúrgica de renome na cidade.

Para melhor compreender essa proximidade, a Figura 9 fornece uma representação visual da distância medida em linha reta entre as chaminés que liberam essas impurezas na atmosfera e os módulos fotovoltaicos utilizados neste estudo. Representando uma distância de 1004 metros. Essa análise espacial não apenas realça a complexa interação entre a usina FV e o ambiente industrial circundante, mas também ressalta a necessidade de avaliar o impacto potencial dessas partículas suspensas na eficiência e na manutenção dos módulos fotovoltaicos, destacando a importância de estudos de qualidade do ar na área.

Figura 9 - Distância do Campus IFMG até o pátio da Usiminas



Fonte: <https://www.google.com/maps/@19.4722892,42.5268015,234m/data=!3m1!1e3!5m1!1e4>

É compreensível que a proximidade com a usina siderúrgica resulte em maior acúmulo de sujeira nos painéis solares, uma vez que eles estão expostos ao ar livre e em contato direto com a emissão de gases proveniente da empresa.

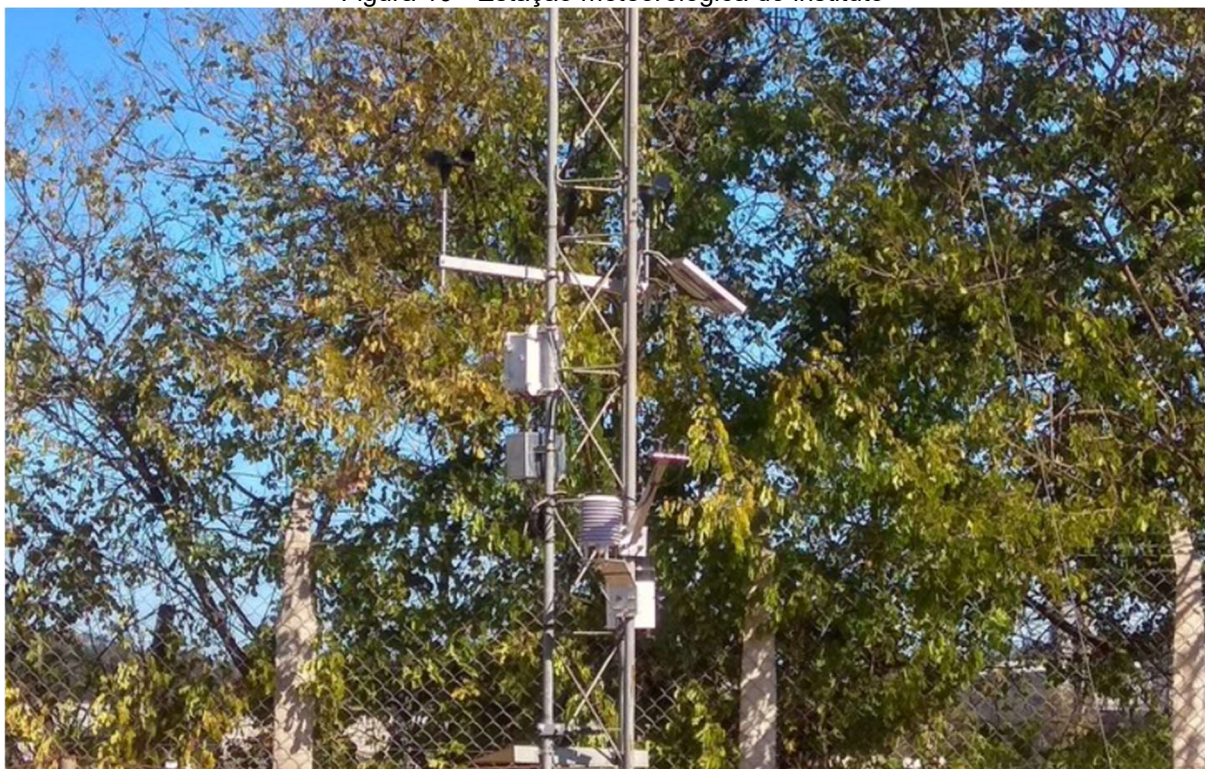
3.3 Análise do índice pluviométrico da região de Ipatinga e estação meteorológica

A cidade de Ipatinga apresenta um clima tropical de altitude, portanto as chuvas não estão restritas a uma estação específica como ocorre em climas mais sazonais, em vez disso, existe a possibilidade de precipitações ao longo de todo o ano, embora haja variações sazonais na quantidade de chuva.

Os meses de dezembro a fevereiro são mais chuvosos, caracterizando o período de verão na região, já os meses entre junho e agosto são os mais secos, correspondendo ao período de inverno.

O IFMG Ipatinga possui em suas dependências uma estação meteorológica para a coleta de dados, que são úteis em diversos estudos e pesquisas que porventura vierem a ser executadas. Assim, é possível utilizar esses dados para se ter uma melhor precisão quando se tratar das condições climáticas da região em que o campus está localizado. A estação estava localizada na coordenada $19^{\circ}28'20.1''\text{S}$ $42^{\circ}31'35.6''\text{W}$, sendo cerca de 40 metros da usina FV. Considera-se uma boa forma de obter dados conclusivos, sendo a forma ideal para se realizar o monitoramento deste tipo. As Figuras 10 e 11 evidenciam a estação meteorológica referida.

Figura 10 - Estação meteorológica do instituto



Fonte: <https://www.ifmg.edu.br/portal/noticias/estacao-meteorologica-e-instalada-no-campus-ipatinga>

Figura 11 - Estação meteorológica do Instituto



Fonte: <https://www.ifmg.edu.br/portal/noticias/estacao-meteorologica-e-instalada-no-campus-ipatinga/estacao-meteorologica-e-instalada-no-campus-ipatinga-1/@@images/7c06d474-3dd9-4a57-952d-0b6a3c90bbf5.jpeg>

Com os dados coletados pela estação é possível visualizar o regime de chuvas de modo mais detalhado. Um acompanhamento diário se faz possível, fornecendo informações suficientes para, ao cruzar os dados com os obtidos pelo inversor da Usina, se determinar se aquele fenômeno natural impactou na geração de energia posterior ao evento.

O período a ser avaliado neste estudo é de março de 2022 a janeiro de 2023, e neste período a cidade teve um índice pluviométrico total de 1001,20 mm de chuva acumulada, sendo o período do dia primeiro de junho até quinze de setembro a época mais seca, não tendo nenhum registro pluviométrico na localidade em que a usina solar está instalada. De outubro/22 a janeiro/23 foi o período mais úmido, registrando ao todo 844,8 mm de chuva neste período. Nos resultados, são apresentados os gráficos que demonstram como foi a pluviosidade diária deste período.

3.4 Identificação do método de estudo

O método escolhido para a identificação e quantização das perdas que tendem a ocorrer nos módulos FV em decorrência da sujidade é através da comparação do índice de produtividade de geração entre um conjunto de painéis que são rotineiramente limpos, e outro conjunto que não é aplicado nenhum processo de limpeza manual, somente possíveis processos de limpezas naturais, como ventos e chuvas, sendo ambos conjuntos similares em todos os quesitos que validam a comparação. Portanto, é parte vital do processo o controle e monitoramento das limpezas realizadas de forma manualmente nos determinados módulos, para que nenhum dado seja perdido e a comparação obtenha todos os parâmetros necessários para caracterização da diferença de geração, no caso, a perda de eficiência do sistema quando é acumulada a sujeira sobre os painéis.

Este método de estudo fornece uma percepção maior do impacto das sujidades. Assim como explicado no último parágrafo do item 2.8, quando se tem um sistema na mesma área, conectado a um mesmo inversor, não se dá margem para interpretar os dados apresentados de maneira diferente. A variação da energia gerada só é causada por interferências nas placas expostas à irradiação solar, no caso, a interferência mais importante são as limpezas periódicas e controladas, ou a relação entre o acúmulo de sujidade e limpeza natural dos fenômenos citados.

3.5 Identificação das realizações das limpezas

As limpezas executadas durante o período de observação foram programadas para serem realizadas dentro de um espaço de tempo para ser possível perceber a diferença de geração entre a *string* que acabará de receber um tratamento e outra que se mantém sem nenhuma intervenção manual. Todos os tratamentos foram realizados por uma equipe, utilizando de água e sabão neutro, além de algum utensílio para esfregar as placas e desgrudar a sujeira que possa estar impregnada. Assim, admite-se que o processo faz uma limpeza satisfatória para os fins deste estudo.

A primeira limpeza referente ao estudo na usina fotovoltaica do IFMG Campus Avançado Ipatinga foi realizada no dia 04/03/2022, nesse primeiro momento foi constatado que os módulos não apresentavam uma grande sujidade perceptível, e analisando os dados fornecidos pela estação meteorológica do próprio instituto, foi constatado que nos meses de janeiro e fevereiro ocorreram elevados índices de

precipitações pluviométricas na região, sendo um potencial fator desse baixo índice de sujeidade encontrado. A Figura 12 evidencia os módulos antes e após a limpeza.

Figura 12 - Módulos antes e após a limpeza



Fonte: Autores, com informações obtidas na instituição

Para se dar início ao estudo, o tratamento foi realizado em toda a usina FV, exceto no conjunto denominado por PV2, visto que é através deste conjunto que as avaliações de perda de geração por sujeidade foram levantadas devido ao período sem manutenção, sendo tal comparação realizada com a *string* PV1 na qual passou pelo processo de limpeza. Após aproximadamente 18 dias, foi realizada a primeira limpeza no conjunto PV2.

Posteriormente, foram realizadas dentre o período de estudo mais outras dez limpezas na PV2, todas realizadas entre períodos de vinte à trinta dias de espaçamento, e mantendo a PV1 intacta sem nenhuma intervenção manual, assim mensurando a queda da eficiência de conversão entre os arranjos. A documentação detalhada de todas as limpezas, suas datas e informações relevantes foram registradas na Tabela 3.

Nela, além dos dias em que cada limpeza foi realizada, é detalhado o responsável por cada procedimento, as condições climáticas durante a manutenção e observações específicas sobre as atividades executadas. Esses detalhes contextualizam as circunstâncias em cada limpeza, proporcionando analisar como fatores externos, variações climáticas podem impactar os resultados da limpeza e, por conseguinte, a eficiência geral dos sistemas fotovoltaicos.

Tabela 3 - Datas das Limpezas acompanhadas

Data da Limpeza	Responsável	Condições Climáticas	Observações
04/03/2022	Lucas	Parcialmente Nublado	A usina não apresentava alta sujidade perceptível PV2-Inv1 não foi limpa
24/03/2022	Lucas	Parcialmente Nublado	Os dados apontam que a limpeza ocorreu na terça feira 22/03/2022 Apenas PV2-Inv1 limpa
27/04/2022	Lucas	Parcialmente Nublado	Apenas PV2-Inv1 limpa
03/06/2022	Lucas	Ensolarado	Apenas PV2-Inv1 limpa
28/06/2022	Lucas	Nublado	Apenas PV2-Inv1 limpa
25/07/2022	Lucas	Parcialmente Nublado	Apenas PV2-Inv1 limpa
29/08/2022	Lucas	Nublado	Apenas PV2-Inv1 limpa
26/09/2022	Farley	Ensolarado	Apenas PV2-Inv1 limpa
01/11/2022	Farley	Ensolarado	Apenas PV2-Inv1 limpa
06/12/2022	Farley	Ensolarado	Apenas PV2-Inv1 limpa
05/01/2022	Farley	Ensolarado	Apenas PV2-Inv1 limpa

Fonte: Autores

3.6 Método de acompanhamento da geração

O inversor da usina em questão é conectado à internet e gera relatórios mensais sobre a geração daquele período. As informações começam a ser registradas assim que os painéis captam energia suficiente para a geração, bem no início do dia, a depender do momento em que nasce o sol, e assim, grava esses dados em intervalos de, em média, 5 minutos, até o final da geração diária. Este relatório fornece os dados essenciais para se conseguir analisar a qualidade do sistema, e se tudo está funcionando como deveria.

Para este estudo foi verificado, principalmente, a energia acumulada da geração de cada dia. Acontece que o inversor fornece esta informação não distinguindo a PV1 da PV2, assim, não é possível utilizar o dado entregue diretamente, sendo necessário calcular a energia gerada por cada PV se beneficiando de outros dados que são fornecidos individualmente, a saber os registros de potência instantânea média, em corrente contínua, vindo de cada PV.

Para se calcular a energia gerada por um dia basta fazer uma integração dessa potência entregue por cada PV durante o tempo em que esteve gerando, como demonstrada na equação 1, onde k é a amostra e Δt é o período de amostragem em horas. A amostragem do sistema é de 5 minutos, ou seja, $83,3 \times 10^{-3}$ horas. No total são 288 amostras, completando um dia inteiro. O P é a potência indicada pelo inversor

para aquela amostra. Assim, foi possível calcular a quantidade de energia gerada por cada PV durante um dia (W_{PV}). O objetivo desta informação é comparar a geração dia a dia com o registro de chuva durante este mesmo período, assim, possibilitando entender como a pluviosidade afetou a geração.

$$W_{PV} = \sum_{K=1}^{K=288} P(k) \cdot \Delta t \quad (1)$$

A expectativa é que nos painéis limpos, a geração não varie tanto após os dias chuvosos, pois, teoricamente, não haveria sujidade sobre as placas e a chuva não seria um evento que influenciaria na limpeza. Sobre os painéis que não estariam sendo limpos manualmente, é de se esperar que a diferença de geração, quando comparada aos painéis limpos, diminua, pois a sujidade que estaria causando esta perda na geração seria limpa pela ação natural da chuva.

Na seção 4.2 são apresentados os resultados coletados. A geração diária e a comparação entre as duas PVs monitoradas, identificando a diferença na geração causada pelo acúmulo de sujidade sob os painéis não limpos regularmente.

3.7 Regime de Chuva Registrado

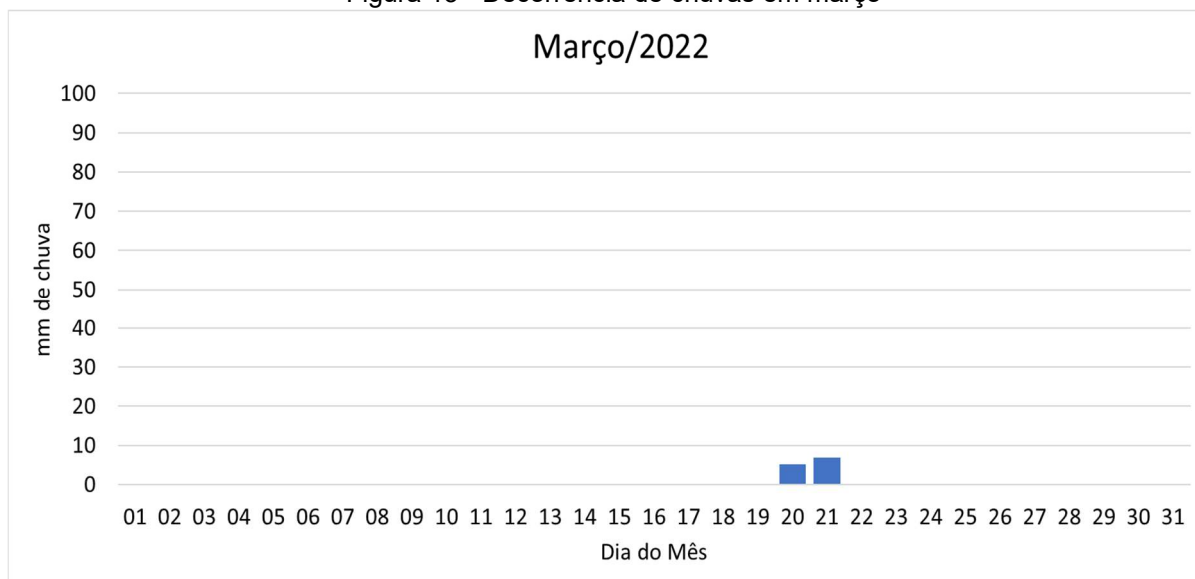
O acompanhamento junto à estação meteorológica do campus do IFMG Ipatinga foi eficaz para se conseguir uma amostra de como foi o regime pluviométrico durante o período acompanhado. Com a observação dos dados percebe-se o período historicamente seco na região, não tendo sido registrado chuvas durante o período de 18/05/2022 até 16/09/2022. É perceptível o período úmido, com chuvas constantes entre novembro e janeiro.

Para uma compreensão mais aprofundada e visual da variação pluviométrica ao longo do período de março/2022 a janeiro/2023, serão apresentados gráficos detalhados. Tais gráficos, representados pelas Figuras 13 a 20, configuram-se como ferramentas essenciais para ilustrar de maneira clara e precisa os níveis de chuvas registrados, proporcionando uma base visual sólida para análises e conclusões a serem desenvolvidas no âmbito desta pesquisa.

Conforme a Figura 13, no mês de março o levantamento do regime pluviométrico revelou a ocorrência de eventos significativos de chuva em dois dias

distintos, nos dias 20 e 21 com chuvas substanciais de 5.2 mm e 6.8 mm respectivamente e um total de 12.2 mm de chuva acumulado no mês.

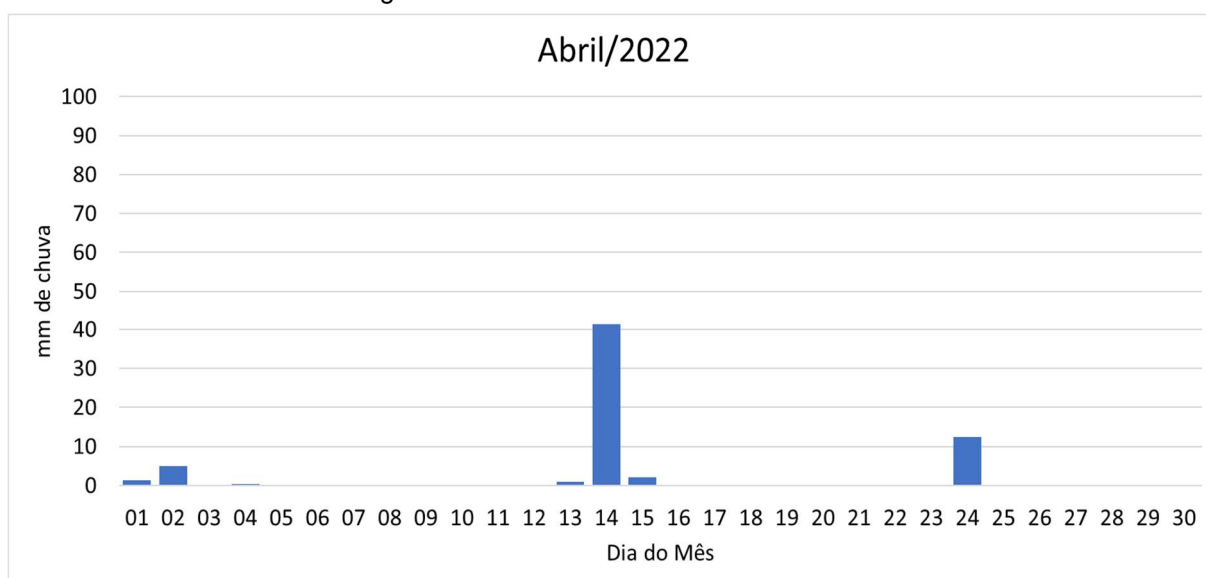
Figura 13 - Decorrência de chuvas em março



Fonte: Autores

No mês de abril, ver Figura 14, o levantamento do regime pluviométrico revelou a ocorrência de precipitações em sete dias distintos, com destaque para as chuvas dos dias 14 e 24 com registros de 41.4 mm e 12.4 mm de chuva, respectivamente, e um total de 63.8 mm acumulados no período.

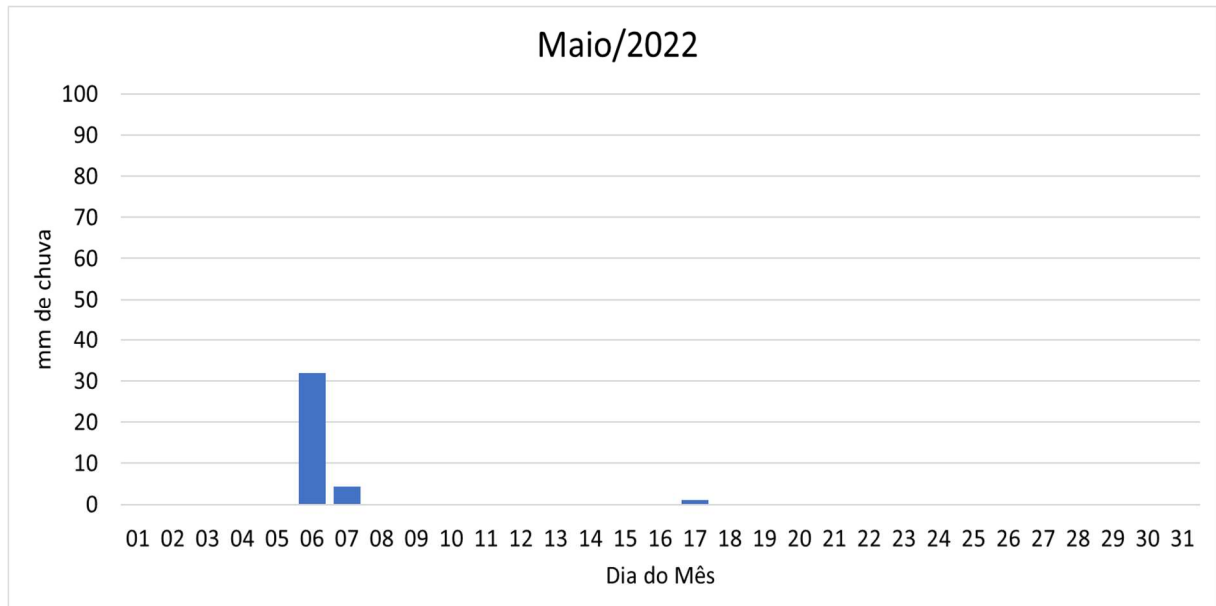
Figura 14 - Decorrência de chuvas em abril



Fonte: Autores

Em maio, ver Figura 15, o levantamento do regime pluviométrico apresentou a ocorrência de chuvas em 3 dias distintos, com destaque para a chuva de 32 mm ocorrida no dia 6 e um total de 37.6 mm acumulados no período.

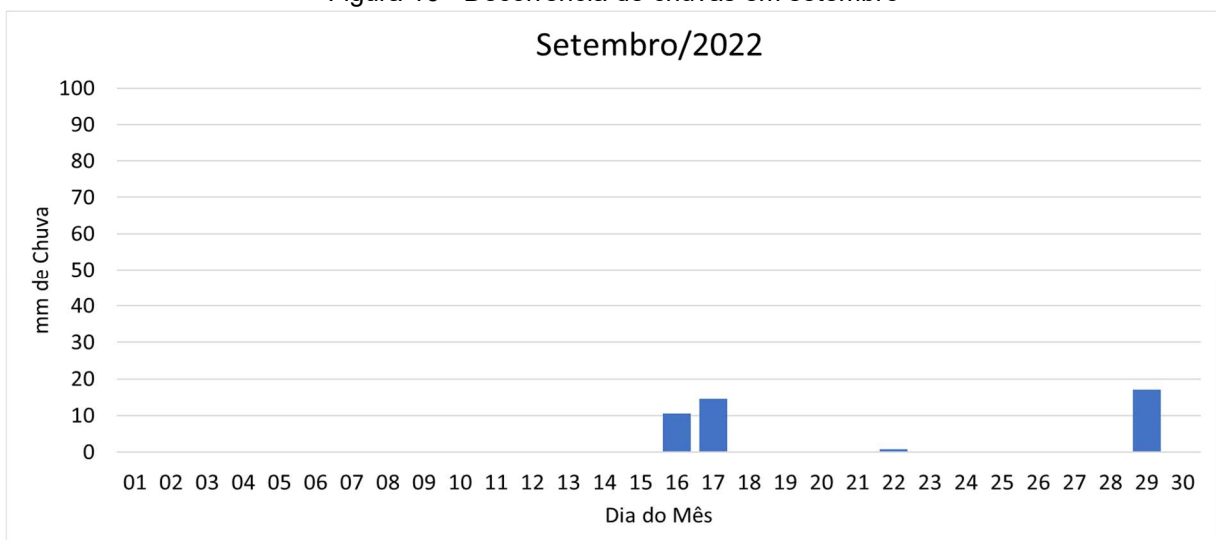
Figura 15 - Decorrência de chuvas em maio



Fonte: Autores

Nos meses de junho a agosto não foi registada chuva. No mês de setembro, segundo a Figura 16, o regime pluviométrico apresentou índices de precipitações nos dias 16, 17, 22 e 29, com registros de 10.6 mm, 14.6 mm, 0.8 mm e 17 mm respectivamente, fechando o mês com um acumulado de 43 mm.

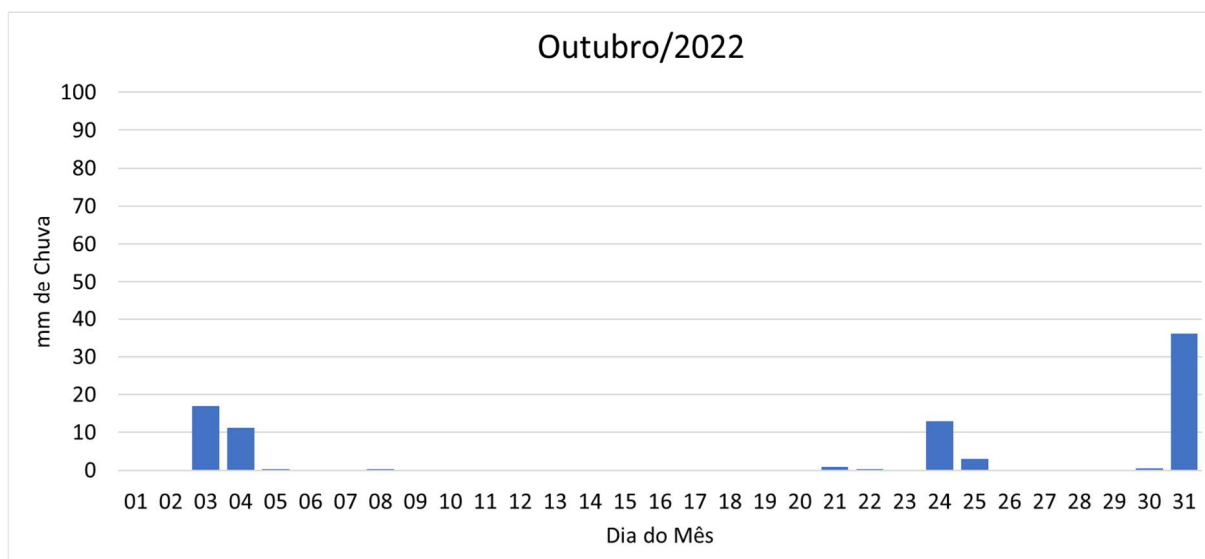
Figura 16 - Decorrência de chuvas em setembro



Fonte: Autores

Em outubro, ver Figura 17, ocorreram chuvas em dias esporádicos apresentando precipitações com níveis acima de 10 mm, destaque para a chuva do dia 31 que apresentou índice de 36 mm. O mês teve um registro de 82 mm de chuva acumulada.

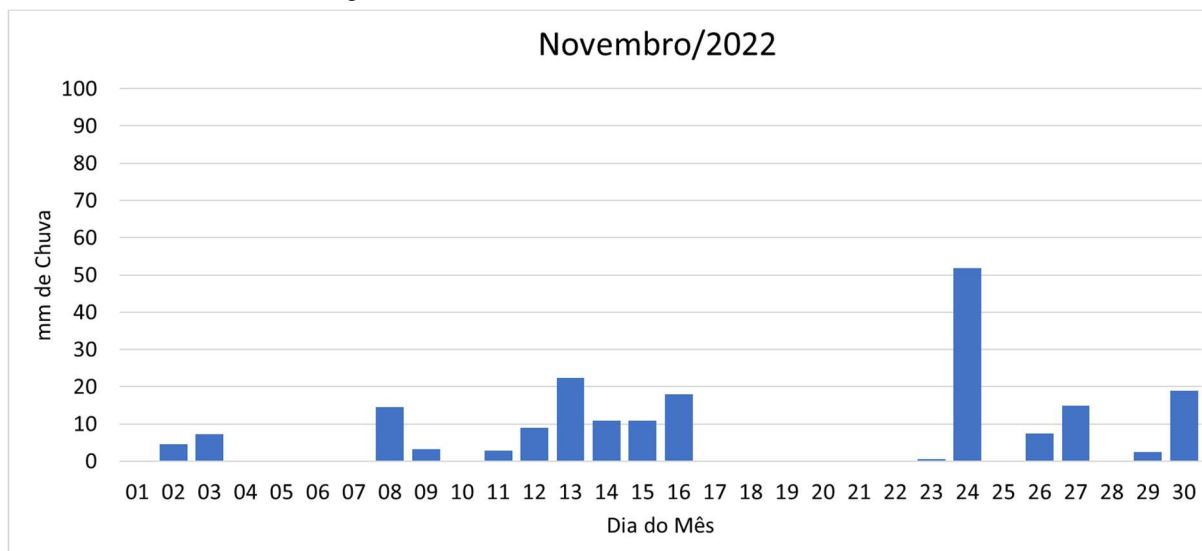
Figura 17 - Decorrência de chuvas em outubro



Fonte: Autores

O mês de novembro, conforme Figura 18, dar-se início ao período chuvoso na região, com o registro de precipitações em quase todos os dias, com várias chuvas acima de 10 mm, com destaque para a chuva do dia 24 com índice de 51,8 mm. O período teve um total acumulado de 200 mm.

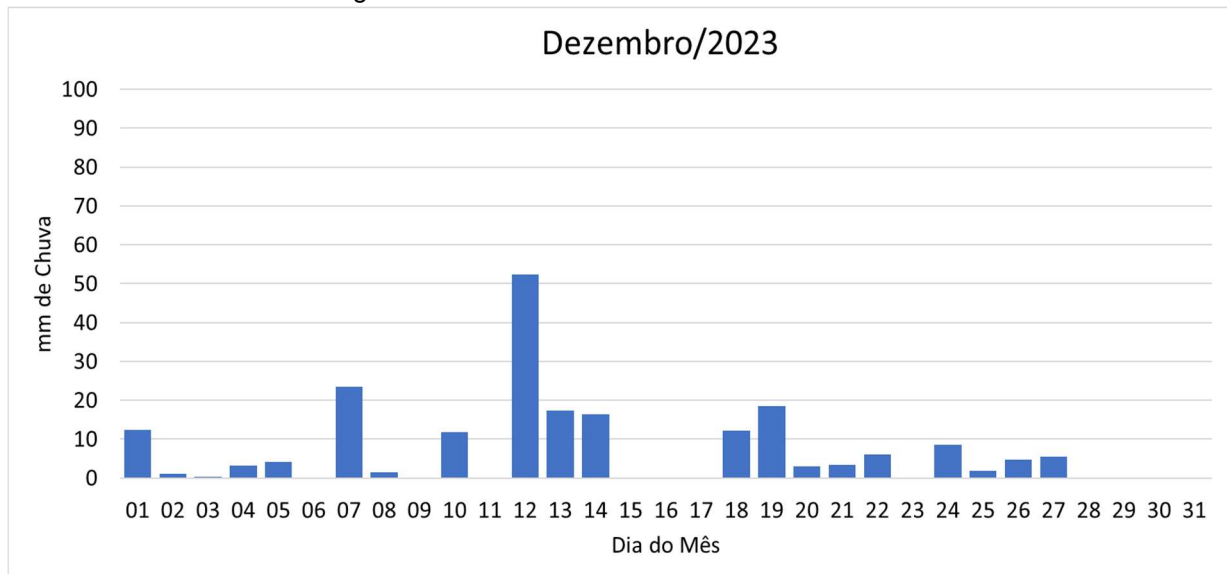
Figura 18 - Decorrência de chuvas em novembro



Fonte: Autores

Dando continuidade ao período úmido, o mês de dezembro, ver Figura 19, apresentou também vários dias de precipitações, com registros acima de 20 mm, com destaque para o dia 12 que apresentou índice de 52,4 mm. O período teve um total acumulado de 232,6 mm.

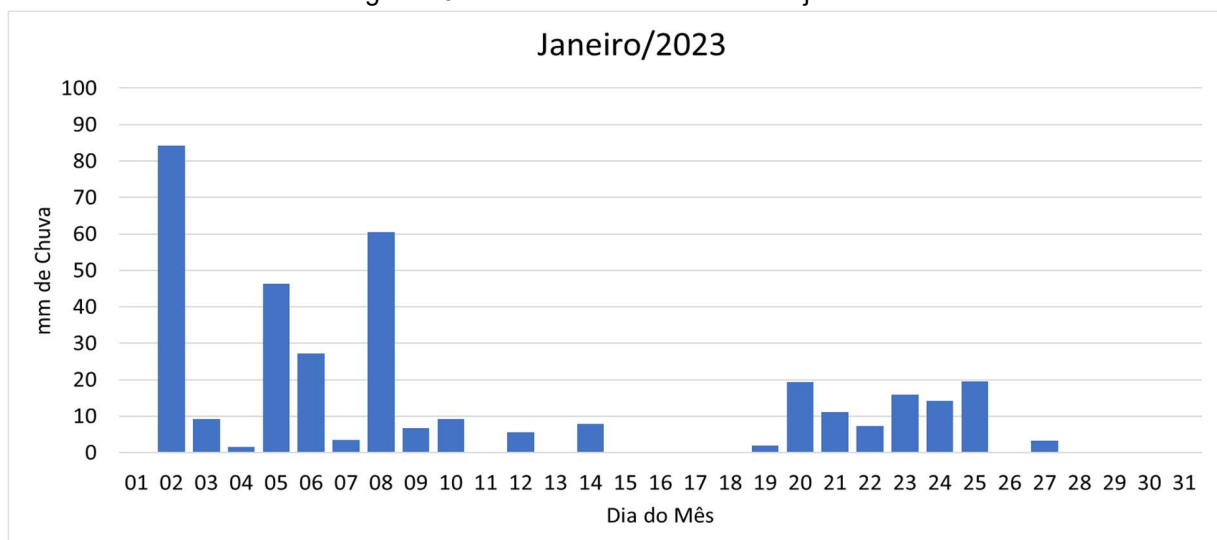
Figura 19 – Decorrência de chuvas em dezembro



Fonte: Autores

Conforme a Figura 20, janeiro caracterizou sendo o mês com maior índice de precipitações registradas, com um total acumulado de 354,8 mm, com chuvas acima dos 80 mm e ocorrências em grande parte do período.

Figura 20 - Decorrência de chuvas em janeiro



Fonte: Autores

3.8 Geração efetiva e comparação entre PVs

Com os dados coletados e os métodos de cálculo da energia acumulada previamente mencionados, torna-se viável quantificar a quantidade de energia gerada por cada painel fotovoltaico (PV) e estabelecer uma relação entre os dois arranjos monitorados. Esse procedimento possibilita a identificação das disparidades na

geração de energia entre os arranjos. A variação na produção energética é presumivelmente influenciada pelo acúmulo de sujeira em cada arranjo, uma vez que ambas estão sujeitas às mesmas condições operacionais.

Tomando PV2 como referência, têm-se a equação 2, onde W_{PV1} é a energia gerada pela PV1, e W_{PV2} é a energia gerada por dia pela PV2:

$$\text{Diferença de Geração (\%)} = \frac{W_{PV1} - W_{PV2}}{W_{PV2}} * 100 \quad (2)$$

As Tabelas 4 a 9 apresentam a geração diária de energia de cada PV, acompanhada do percentual de perdas atribuídas à sujeira. Esse percentual é calculado com base na diferença de produção entre os arranjos, sendo as marcações em verde representando os dias nos quais ocorreu a limpeza dos painéis. Essas tabelas fornecem uma visão detalhada da eficiência de cada *string*, permitindo uma análise minuciosa das influências da sujeira na geração de energia solar.

Tabela 4 – Dados de geração das *strings* nos meses de março e abril

MARÇO/2022				ABRIL/2022			
Data	ENERGIA PV1 (kWh)	ENERGIA PV2 (kWh)	Perdas	Data	ENERGIA PV1 (kWh)	ENERGIA PV2 (kWh)	Perdas
01/03/2022	0,00	0,00	0,00%	01/04/2022	41,44	42,49	-2,47%
02/03/2022	0,00	0,00	0,00%	02/04/2022	48,79	48,74	0,11%
03/03/2022	31,90	33,64	-5,19%	03/04/2022	32,22	32,26	-0,10%
04/03/2022	49,89	46,93	6,30%	04/04/2022	49,07	50,51	-2,85%
05/03/2022	50,13	45,43	10,35%	05/04/2022	37,71	38,09	-1,00%
06/03/2022	46,31	42,27	9,56%	06/04/2022	42,36	42,81	-1,05%
07/03/2022	58,30	53,69	8,59%	07/04/2022	45,73	46,69	-2,04%
08/03/2022	55,53	51,55	7,73%	08/04/2022	35,12	36,51	-3,81%
09/03/2022	53,78	49,18	9,33%	09/04/2022	35,68	36,50	-2,26%
10/03/2022	52,40	48,41	8,26%	10/04/2022	36,94	37,83	-2,36%
11/03/2022	43,52	40,47	7,54%	11/04/2022	34,81	35,31	-1,40%
12/03/2022	48,40	45,19	7,12%	12/04/2022	44,84	45,75	-2,00%
13/03/2022	49,61	45,83	8,25%	13/04/2022	44,65	45,38	-1,60%
14/03/2022	45,24	42,43	6,63%	14/04/2022	38,72	38,84	-0,29%
15/03/2022	54,26	50,19	8,11%	15/04/2022	29,46	30,04	-1,93%
16/03/2022	36,53	33,32	9,65%	16/04/2022	34,63	34,59	0,11%
17/03/2022	48,72	44,95	8,39%	17/04/2022	40,22	41,51	-3,11%
18/03/2022	53,56	50,68	5,68%	18/04/2022	36,39	37,30	-2,45%
19/03/2022	50,91	47,75	6,61%	19/04/2022	46,42	46,78	-0,76%
20/03/2022	47,75	42,82	11,52%	20/04/2022	46,91	47,45	-1,14%
21/03/2022	38,39	37,37	2,73%	21/04/2022	40,20	41,29	-2,63%
22/03/2022	34,51	34,03	1,41%	22/04/2022	46,48	46,95	-1,00%
23/03/2022	39,62	39,90	-0,71%	23/04/2022	47,18	47,89	-1,47%
24/03/2022	2,10	2,08	1,11%	24/04/2022	43,19	43,97	-1,78%
25/03/2022	0,00	0,00	0,00%	25/04/2022	36,41	37,04	-1,70%
26/03/2022	0,00	0,00	0,00%	26/04/2022	39,16	39,67	-1,29%
27/03/2022	0,00	0,00	0,00%	27/04/2022	43,68	43,90	-0,51%
28/03/2022	1,59	1,63	-2,41%	28/04/2022	43,80	46,17	-5,14%
29/03/2022	4,69	4,77	-1,67%	29/04/2022	40,32	41,73	-3,36%
30/03/2022	0,00	0,00	0,00%	30/04/2022	43,98	46,24	-4,90%
31/03/2022	0,00	0,00	0,00%				

Fonte: Autores

Os dados foram inicialmente coletados a partir de 03/03/2022, um dia antes da primeira intervenção de limpeza manual na usina. Neste momento inicial, foi notável que o arranjo PV2 apresentou uma eficiência produtiva superior em relação

ao PV1, gerando uma diferença percentual aproximada de 5%, ver Tabela 4. Essa observação sugere que a *string* PV1 possuía uma acumulação significativamente maior de sujidade em seus painéis, o que resultou nessa disparidade na geração de energia.

No entanto, no dia seguinte, em 04/03/22, após a limpeza manual ter sido realizada, o cenário se inverteu. Com o tratamento recebido, a PV1 demonstrou um desempenho produtivo superior em comparação com a PV2, gerando cerca de 6% a mais. Essa mudança indica o impacto positivo das ações de manutenção na otimização do desempenho dos painéis solares, refletindo o potencial de melhor aproveitamento da energia solar disponível após o procedimento de limpeza

A partir do dia 24 de março de 2022, a PV2 começou a receber regularmente processos de limpezas manuais, enquanto a PV1 permaneceu inalterada desde a última limpeza realizada em 4 de março. Essa discrepância nas práticas de manutenção teve um impacto notável na eficiência energética dos arranjos, levando a um aumento gradual e substancial na diferença de geração entre ambas as *strings*.

Tabela 5 - Dados de geração das *strings* nos meses de maio e junho

MAIO/2022				JUNHO/2022			
Data	ENERGIA PV1 (kWh)	ENERGIA PV2 (kWh)	Perdas	Data	ENERGIA PV1 (kWh)	ENERGIA PV2 (kWh)	Perdas
01/05/2022	42,14	44,47	-5,24%	01/06/2022	24,00	25,33	-5,22%
02/05/2022	44,60	46,48	-4,06%	02/06/2022	35,09	36,49	-3,83%
03/05/2022	43,12	45,15	-4,50%	03/06/2022	33,67	37,51	-10,24%
04/05/2022	39,25	41,07	-4,44%	04/06/2022	15,06	17,40	-13,42%
05/05/2022	20,75	21,22	-2,23%	05/06/2022	31,96	36,26	-11,84%
06/05/2022	28,39	29,33	-3,20%	06/06/2022	37,55	42,64	-11,95%
07/05/2022	20,33	21,19	-4,05%	07/06/2022	33,40	37,74	-11,50%
08/05/2022	35,57	35,98	-1,13%	08/06/2022	34,73	39,24	-11,48%
09/05/2022	39,92	41,15	-2,99%	09/06/2022	33,05	37,57	-12,05%
10/05/2022	38,51	39,39	-2,24%	10/06/2022	30,99	34,81	-10,98%
11/05/2022	36,47	37,71	-3,28%	11/06/2022	30,94	34,98	-11,55%
12/05/2022	29,16	30,16	-3,32%	12/06/2022	12,24	13,73	-10,87%
13/05/2022	25,32	26,31	-3,74%	13/06/2022	25,33	28,43	-10,90%
14/05/2022	38,56	40,02	-3,63%	14/06/2022	26,68	30,68	-13,03%
15/05/2022	29,53	30,33	-2,66%	15/06/2022	18,71	21,18	-11,67%
16/05/2022	23,13	24,11	-4,08%	16/06/2022	27,43	31,09	-11,77%
17/05/2022	31,09	32,41	-4,06%	17/06/2022	33,01	37,32	-11,55%
18/05/2022	35,37	36,81	-3,91%	18/06/2022	30,22	33,90	-10,87%
19/05/2022	42,85	43,89	-2,38%	19/06/2022	22,55	25,87	-12,83%
20/05/2022	40,71	41,74	-2,45%	20/06/2022	25,16	28,64	-12,15%
21/05/2022	37,88	39,28	-3,59%	21/06/2022	20,02	22,82	-12,25%
22/05/2022	37,94	39,26	-3,36%	22/06/2022	20,57	23,71	-13,26%
23/05/2022	35,39	37,17	-4,80%	23/06/2022	28,94	32,51	-10,98%
24/05/2022	38,00	39,49	-3,78%	24/06/2022	29,23	32,94	-11,27%
25/05/2022	25,88	26,92	-3,87%	25/06/2022	29,30	33,23	-11,83%
26/05/2022	27,64	28,52	-3,11%	26/06/2022	24,63	27,96	-11,91%
27/05/2022	35,40	36,80	-3,78%	27/06/2022	12,25	13,71	-10,68%
28/05/2022	20,32	20,98	-3,12%	28/06/2022	30,17	38,32	-21,28%
29/05/2022	29,60	30,65	-3,44%	29/06/2022	30,01	38,20	-21,43%
30/05/2022	31,94	32,90	-2,94%	30/06/2022	28,60	36,33	-21,26%
31/05/2022	34,37	35,54	-3,27%				

Fonte: Autores

A diferença de geração entre as duas *strings* permaneceu praticamente constante ao longo do período analisado, uma vez que ambas estiveram sujeitas às mesmas condições ambientais e à mesma deposição de sujidade. Essa constância sugere uma uniformidade nas condições de exposição, proporcionando um cenário estável para a comparação de desempenho entre as PV1 e PV2.

No mês de junho, conforme Tabela 5, foram realizadas duas limpezas nos dias 08 e 28, respectivamente. Essas intervenções impactaram significativamente a diferença de geração entre as PVs, resultando em um aumento observado de aproximadamente 10% em cada ocorrência de limpeza.

Ao encerrar o mês de junho, observamos um percentual de perda por sujidades na PV1 equivalente a -21,28%. Esse valor representa a magnitude da influência negativa da sujeira na geração de energia solar ao longo desse período específico.

Tabela 6 - Dados de geração das *strings* nos meses de julho e agosto

JULHO/2022				AGOSTO/2022			
Data	ENERGIA PV1 (kWh)	ENERGIA PV2 (kWh)	Perdas	Data	ENERGIA PV1 (kWh)	ENERGIA PV2 (kWh)	Perdas
01/07/2022	14,41	18,66	-22,79%	01/08/2022	19,33	27,56	-29,87%
02/07/2022	28,24	35,46	-20,37%	02/08/2022	26,98	36,99	-27,06%
03/07/2022	27,77	34,69	-19,95%	03/08/2022	26,98	37,54	-28,13%
04/07/2022	29,37	37,08	-20,79%	04/08/2022	20,87	29,17	-28,46%
05/07/2022	17,45	22,31	-21,80%	05/08/2022	30,08	41,56	-27,64%
06/07/2022	26,63	33,95	-21,57%	06/08/2022	24,28	33,09	-26,62%
07/07/2022	25,85	32,58	-20,65%	07/08/2022	0,00	0,00	0,00%
08/07/2022	27,52	34,24	-19,62%	08/08/2022	27,79	37,84	-26,58%
09/07/2022	30,23	38,18	-20,82%	09/08/2022	17,48	24,67	-29,15%
10/07/2022	20,82	25,49	-18,35%	10/08/2022	27,33	37,33	-26,80%
11/07/2022	30,39	37,99	-20,01%	11/08/2022	26,96	36,48	-26,11%
12/07/2022	19,17	23,42	-18,13%	12/08/2022	30,22	40,85	-26,03%
13/07/2022	25,24	31,00	-18,57%	13/08/2022	24,03	33,24	-27,71%
14/07/2022	28,73	35,05	-18,03%	14/08/2022	27,88	37,92	-26,49%
15/07/2022	24,46	30,06	-18,61%	15/08/2022	27,40	38,27	-28,40%
16/07/2022	21,51	26,58	-19,06%	16/08/2022	23,08	30,52	-24,36%
17/07/2022	27,13	32,90	-17,53%	17/08/2022	26,18	35,37	-25,98%
18/07/2022	19,92	24,90	-19,97%	18/08/2022	31,95	43,14	-25,95%
19/07/2022	23,68	28,91	-18,09%	19/08/2022	30,21	40,28	-25,01%
20/07/2022	26,89	32,06	-16,10%	20/08/2022	29,37	38,93	-24,56%
21/07/2022	27,48	31,81	-13,61%	21/08/2022	1,67	2,31	-27,57%
22/07/2022	23,67	28,93	-18,16%	22/08/2022	31,32	41,52	-24,55%
23/07/2022	27,94	33,21	-15,86%	23/08/2022	30,54	40,59	-24,76%
24/07/2022	23,71	29,04	-18,36%	24/08/2022	27,58	36,57	-24,59%
25/07/2022	28,33	35,12	-19,35%	25/08/2022	23,03	31,48	-26,84%
26/07/2022	24,17	34,16	-29,24%	26/08/2022	26,40	36,03	-26,72%
27/07/2022	23,82	33,42	-28,71%	27/08/2022	25,10	33,27	-24,57%
28/07/2022	28,22	39,81	-29,13%	28/08/2022	31,54	42,16	-25,19%
29/07/2022	30,98	42,82	-27,65%	29/08/2022	27,91	40,04	-30,28%
30/07/2022	25,14	35,00	-28,16%	30/08/2022	17,85	27,22	-34,43%
31/07/2022	0,24	0,24	0,03%	31/08/2022	32,03	47,09	-31,98%

Fonte: Autores

Segundo a Tabela 6, no mês de julho ocorreu uma limpeza no dia 25/07, aumentando a diferença de geração que antes era de -19,35% para -29,24%. Já no mês de agosto, a limpeza ocorrida no dia 29 elevou a diferença para -34,43 %.

Tabela 7 - Dados de geração das *strings* nos meses de setembro e outubro

SETEMBRO/2022				OUTUBRO/2022			
Data	ENERGIA PV1 (kWh)	ENERGIA PV2 (kWh)	Perdas	Data	ENERGIA PV1 (kWh)	ENERGIA PV2 (kWh)	Perdas
01/09/2022	27,42	41,24	-33,51%	01/10/2022	33,16	37,92	-12,55%
02/09/2022	28,64	42,42	-32,48%	02/10/2022	36,07	41,63	-13,36%
03/09/2022	30,42	45,25	-32,76%	03/10/2022	28,29	32,46	-12,84%
04/09/2022	32,18	47,91	-32,85%	04/10/2022	41,15	46,50	-11,50%
05/09/2022	14,29	21,97	-34,95%	05/10/2022	37,46	41,92	-10,63%
06/09/2022	21,84	32,73	-33,28%	06/10/2022	29,86	34,33	-13,02%
07/09/2022	28,57	43,11	-33,73%	07/10/2022	22,92	26,34	-12,98%
08/09/2022	26,70	39,21	-31,90%	08/10/2022	34,45	39,19	-12,10%
09/09/2022	24,54	36,85	-33,40%	09/10/2022	0,00	0,00	0,00%
10/09/2022	30,86	45,33	-31,93%	10/10/2022	0,00	0,00	0,00%
11/09/2022	31,76	47,00	-32,44%	11/10/2022	37,52	42,43	-11,56%
12/09/2022	18,15	27,81	-34,75%	12/10/2022	46,34	53,39	-13,20%
13/09/2022	19,74	30,14	-34,53%	13/10/2022	40,34	45,43	-11,20%
14/09/2022	31,39	46,36	-32,29%	14/10/2022	28,39	32,92	-13,75%
15/09/2022	23,84	36,21	-34,17%	15/10/2022	20,04	23,34	-14,14%
16/09/2022	16,04	24,26	-33,91%	16/10/2022	0,00	0,00	0,00%
17/09/2022	0,00	0,00	0,00%	17/10/2022	34,19	40,36	-15,30%
18/09/2022	0,00	0,00	0,00%	18/10/2022	39,91	42,92	-7,00%
19/09/2022	26,59	31,22	-14,83%	19/10/2022	29,31	34,15	-14,16%
20/09/2022	24,72	28,31	-12,70%	20/10/2022	27,50	31,68	-13,20%
21/09/2022	22,57	26,16	-13,72%	21/10/2022	34,55	39,15	-11,75%
22/09/2022	22,91	26,84	-14,63%	22/10/2022	24,81	28,51	-12,98%
23/09/2022	24,33	28,78	-15,45%	23/10/2022	18,28	21,11	-13,40%
24/09/2022	14,90	17,37	-14,25%	24/10/2022	24,07	27,89	-13,68%
25/09/2022	23,88	28,07	-14,95%	25/10/2022	47,38	52,94	-10,49%
26/09/2022	36,88	42,69	-13,62%	26/10/2022	46,12	53,14	-13,21%
27/09/2022	21,29	25,18	-15,44%	27/10/2022	48,52	53,93	-10,03%
28/09/2022	21,72	26,36	-17,62%	28/10/2022	46,99	52,58	-10,64%
29/09/2022	9,71	11,36	-14,51%	29/10/2022	46,44	51,87	-10,47%
30/09/2022	15,92	18,60	-14,43%	30/10/2022	33,67	38,23	-11,92%
				31/10/2022	21,57	23,74	-9,12%

Fonte: Autores

Em setembro ocorreu uma limpeza no dia 26, já no mês de outubro não foram realizadas nenhuma limpeza de forma manual, ver Tabela 7.

Tabela 8 - Dados de geração das *strings* no mês de novembro e janeiro

NOVEMBRO/2022				JANEIRO/2023			
Data	ENERGIA PV1 (kWh)	ENERGIA PV2 (kWh)	Perdas	Data	ENERGIA PV1 (kWh)	ENERGIA PV2 (kWh)	Perdas
01/11/2022	28,87	32,23	-10,43%	01/01/2023	0,00	0,00	0,00%
02/11/2022	15,35	16,80	-8,58%	02/01/2023	0,00	0,00	0,00%
03/11/2022	18,54	19,80	-6,36%	03/01/2023	8,47	8,84	-4,17%
04/11/2022	34,57	37,68	-8,27%	04/01/2023	27,57	29,42	-6,30%
05/11/2022	50,56	54,74	-7,64%	05/01/2023	33,91	36,24	-6,43%
06/11/2022	54,16	59,16	-8,46%	06/01/2023	26,17	28,43	-7,94%
07/11/2022	43,08	47,74	-9,78%	07/01/2023	31,97	34,04	-6,06%
08/11/2022	52,22	57,93	-9,86%	08/01/2023	23,18	25,25	-8,18%
09/11/2022	51,24	55,80	-8,19%	09/01/2023	41,46	44,95	-7,76%
10/11/2022	42,13	45,18	-6,76%	10/01/2023	18,32	19,28	-4,97%
11/11/2022	40,38	44,02	-8,27%	11/01/2023	45,86	49,09	-6,58%
12/11/2022	27,06	29,58	-8,52%	12/01/2023	21,63	23,58	-8,26%
13/11/2022	45,01	48,65	-7,48%	13/01/2023	46,45	50,12	-7,32%
14/11/2022	38,35	40,81	-6,02%	14/01/2023	49,41	53,06	-6,87%
15/11/2022	22,72	24,71	-8,03%	15/01/2023	46,95	50,34	-6,74%
16/11/2022	17,53	19,07	-8,09%	16/01/2023	51,86	55,54	-6,62%
17/11/2022	39,51	42,82	-7,73%	17/01/2023	53,98	57,67	-6,41%
18/11/2022	58,53	62,75	-6,72%	18/01/2023	52,01	55,50	-6,30%
19/11/2022	46,22	48,41	-4,54%	19/01/2023	38,31	40,68	-5,84%
20/11/2022	54,13	58,12	-6,87%	20/01/2023	32,67	35,46	-7,86%
21/11/2022	48,18	51,30	-6,09%	21/01/2023	16,40	17,78	-7,78%
22/11/2022	45,36	48,82	-7,09%	22/01/2023	40,00	42,56	-6,03%
23/11/2022	26,95	29,16	-7,59%	23/01/2023	39,40	42,82	-7,99%
24/11/2022	8,96	9,69	-7,57%	24/01/2023	37,71	40,21	-6,22%
25/11/2022	35,07	36,89	-4,95%	25/01/2023	29,55	31,98	-7,59%
26/11/2022	41,44	45,17	-8,26%	26/01/2023	36,86	40,19	-8,29%
27/11/2022	27,28	29,11	-6,28%	27/01/2023	36,83	39,83	-7,52%
28/11/2022	39,79	42,73	-6,89%	28/01/2023	55,93	60,46	-7,49%
29/11/2022	45,41	47,89	-5,17%	29/01/2023	56,56	61,19	-7,56%
30/11/2022	39,64	41,90	-5,40%	30/01/2023	44,75	48,21	-7,18%
				31/01/2023	2,91	2,92	-0,35%

Fonte: Autores

Conforme a Tabela 8, nos meses de novembro de 2022 e em janeiro de 2023, os níveis de perda de eficiência se mantiveram abaixo dos 10%. Em pleno período úmido é possível perceber a diminuição nas perdas e manutenção deste patamar, onde não aumenta muito, nem continua a melhoria na geração.

Após a PV2 receber regularmente processos de limpeza manual, enquanto a PV1 permaneceu inalterada desde a última limpeza realizada em 4 de março. Essa discrepância nas práticas de manutenção teve um impacto notável na eficiência energética dos arranjos, levando a um aumento gradual e substancial na diferença de geração entre ambas as PVs.

Esse padrão persistiu ao longo da maior parte do período observado, com a PV2 consistentemente apresentando um desempenho superior na geração de energia, com exceção de momentos pontuais em que a disparidade se tornou menos significativa, chegando até mesmo a se anular. É fundamental destacar que esse fenômeno pode ser atribuído às condições climáticas, notadamente a ocorrência de chuvas, que naturalmente contribuem para a limpeza do sistema, reduzindo principalmente o acúmulo de sujeira nos painéis do arranjo PV1.

Durante o período de coleta das amostras, foram enfrentados desafios significativos, uma vez que houve interrupções e perdas de dados de geração devido a falhas na comunicação no inversor. Essas interrupções imprevistas não apenas impactaram na capacidade de acompanhar a geração de energia de forma contínua, mas também destacaram a importância de um monitoramento e manutenção adequados para garantir a confiabilidade dos sistemas de coleta de dados. No mês de dezembro não ocorreram obtenção de dados da geração.

3.9 Relação do impacto das chuvas com a geração e perdas por sujeira

Para uma análise completa da influência das chuvas na limpeza dos painéis solares e, por conseguinte, na redução das perdas, é imperativo estabelecer uma correlação entre a pluviosidade e as variações na diferença de geração de energia. Conforme detalhado anteriormente no tópico 4.1, apresenta-se os dados pluviométricos, enquanto no tópico 4.2 os dados de geração de energia.

De posse de todos os dados, torna-se viável examinar como os dias chuvosos impactaram os dados de geração mencionados anteriormente. Este aspecto é crucial para entender até que ponto as condições climáticas, especificamente as chuvas, desempenharam um papel na melhoria do desempenho dos painéis e na

minimização das perdas. Ao estabelecer essa relação, é possível extrair percepções sobre a eficácia das chuvas como um agente natural de limpeza e sua contribuição para a eficiência dos sistemas de geração de energia solar.

Em relação aos dados de geração, é imprescindível esclarecer que ocorreram falhas no inversor em alguns dias durante o período de coleta de informações. No mês de março, foram observados períodos de falha, com destaque para os dias 01, 02 e o intervalo entre 25 a 27 e 30 a 31, nos quais os dados de geração não puderam ser registrados de maneira conclusiva. Além disso, o dia 31 de julho também apresentou problemas na gravação dos dados pelo inversor. Em agosto, as falhas ocorreram nos dias 07 e 21, em setembro nos dias 17 e 18, e em outubro nos dias 09, 10 e 16. Durante todo o mês de dezembro, não houve registros de dados até o segundo dia de janeiro de 2023, e a última falha registrada ocorreu em 31 de janeiro.

É de suma importância destacar que, apesar dessas ocasionais interrupções na coleta de dados em dias isolados, essas falhas não prejudicaram a análise do impacto das chuvas na acumulação de sujeira nos painéis solares.

Portanto, foram construídos gráficos de barras e linhas das Figuras 21 a 31, sendo os dados das chuvas e das perdas, respectivamente. Serão identificados, também, os dias em que foram realizadas as limpezas na PV2.

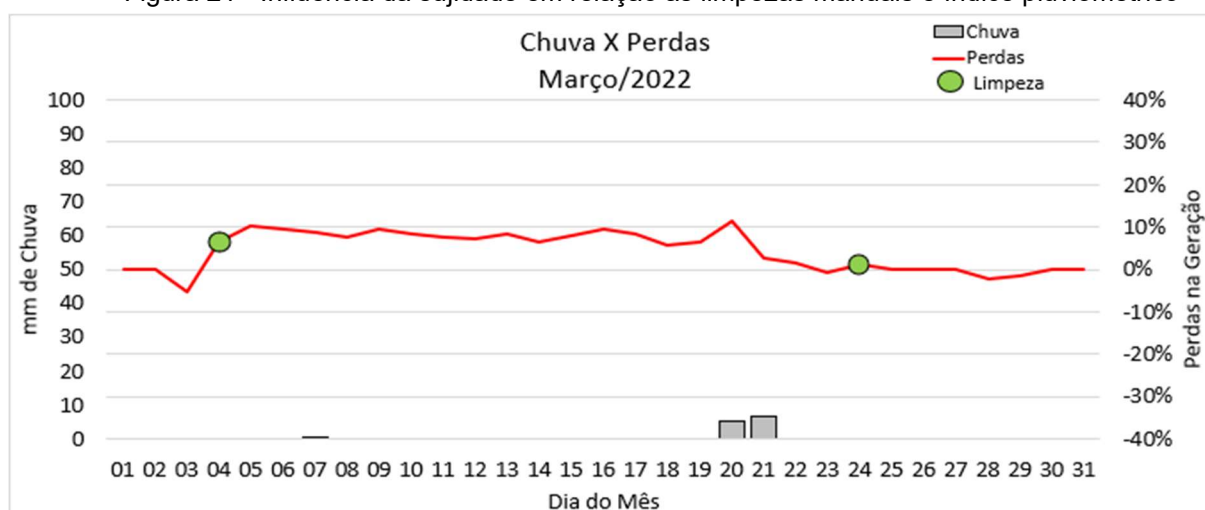
Os resultados deste estudo revelaram-se extremamente esclarecedores, fornecendo insights valiosos sobre a questão em análise. Neste contexto, é fundamental destacar os principais achados, que se destacam como marcos significativos na pesquisa.

Após a implementação das limpezas regulares na PV2, observou-se uma notável mudança no comportamento do sistema. A manutenção periódica se mostrou extremamente eficaz, levando a uma melhoria consistente no desempenho da PV2. Esta melhora é especialmente evidente em termos de geração de energia, onde a PV2 apresentou um aumento substancial em sua produção. No entanto, é importante destacar que, em alguns momentos, a diferença na geração de energia entre PV2 e a PV1 do sistema diminuiu. Essa redução na disparidade pode ser atribuída principalmente à ocorrência de chuvas, que, embora afetem temporariamente a produção, conseguem realizar uma limpeza significativa nos módulos.

No período de 20 e 21 de março, ver Figura 21, o registro pluviométrico apontou precipitações de 5,2 mm e 6,8 mm de chuva, respectivamente. Antes desse intervalo, o sistema apresentava uma perda significativa, estimada em torno de 6,61%. No entanto, a influência da chuva nesses dois dias foi notável, contribuindo para uma notável melhoria. Após essa ocorrência de chuva, a perda diminuiu substancialmente, atingindo aproximadamente 1,41%. Isso equivale a uma recuperação impressionante de cerca de 5% da capacidade de produção da *string* PV1.

No dia 24 de março, a *string* PV2 passou pelo primeiro tratamento de limpeza, o que resultou em um aumento significativo na sua eficiência em comparação com a PV1. Naquele momento, a PV1 já estava há 20 dias acumulando sujeira, o que afetava o seu desempenho.

Figura 21 - Influência da sujeira em relação as limpezas manuais e índice pluviométrico

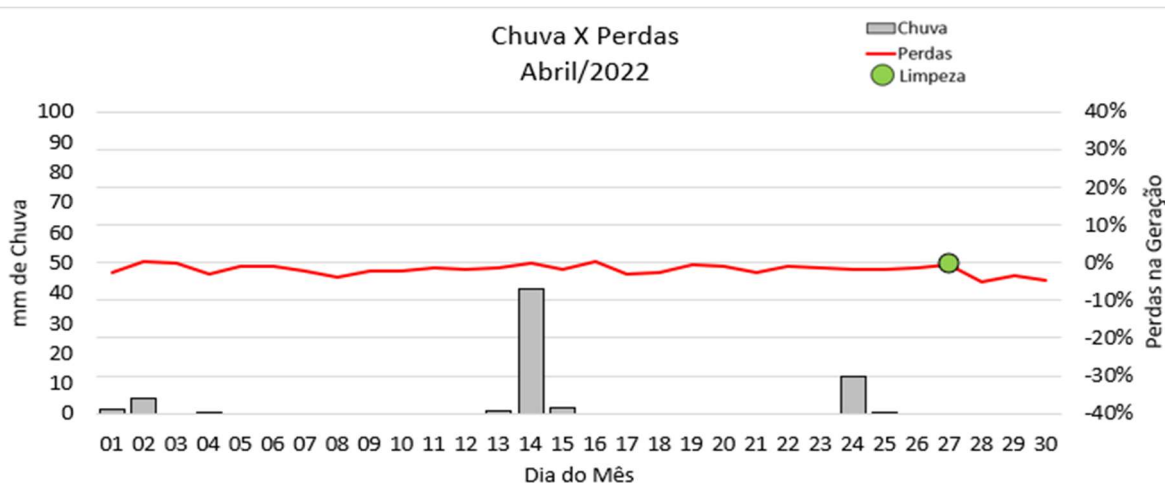


Fonte: Autores

Até o dia 1º de abril, ver Figura 22, o sistema apresentava uma diferença notável, com a PV2 superando a PV1 em termos de rendimento, registrando uma diferença de -2,47%. A limpeza regular da PV2 havia se traduzido em um ganho considerável de produção. No entanto, em 1º de abril, uma reviravolta interessante ocorreu. Nesse dia, houve uma precipitação de 1,4 mm, seguida de outra chuva de 5 mm no dia seguinte. Essas chuvas tiveram um impacto significativo no sistema, já que foram capazes de limpar os módulos da *string* PV1. Como resultado, a PV1 experimentou um notável aumento em seu rendimento, superando a PV2 em 0,11%. A inversão de cenário após a limpeza natural provocada pelas chuvas destaca a complexidade das interações climáticas no desempenho do sistema fotovoltaico. Essa

situação ocorreu também entre os dias 14 e 15, e 24 e 25 desse mesmo mês, com as precipitações reduzindo a diferença de geração entre as duas *strings*.

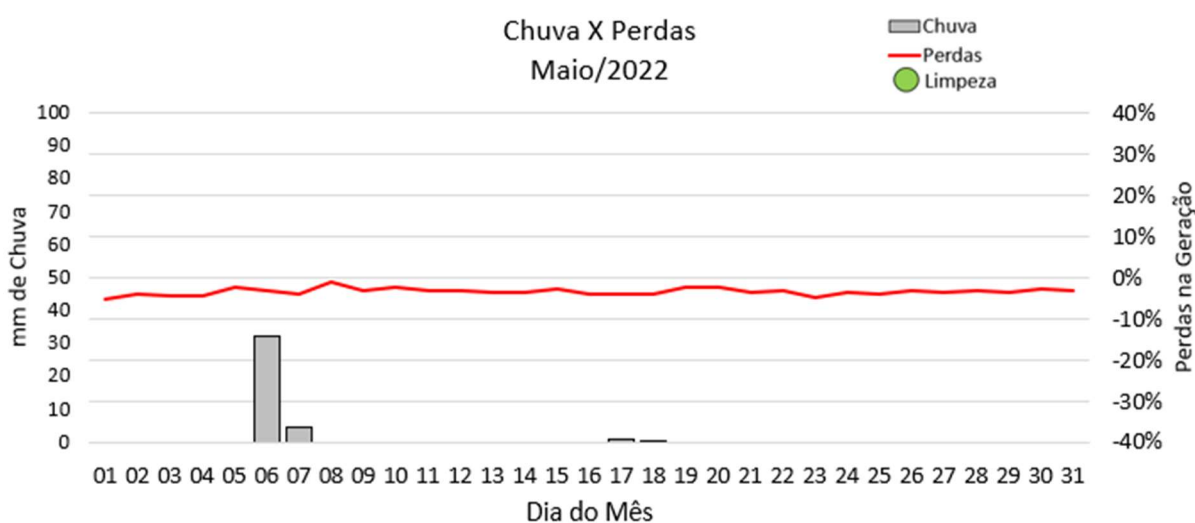
Figura 22 - Influência da sujidade em relação as limpezas manuais e índice pluviométrico



Fonte: Autores

Em maio, ver figura 23, especificamente nos dias 6 e 7, o céu entregou um volume ainda mais substancial de chuva, totalizando 32 mm e 4,4 mm, respectivamente. Essa precipitação também teve um impacto notável na eficiência do sistema. No dia 5 de abril, a diferença registrada era de -2,23%, no entanto, as precipitações dos dias 6 e 7 causaram uma reviravolta nesse cenário, trazendo a diferença de volta para -1,13%, demonstrando uma notável recuperação da eficiência do sistema nesse período.

Figura 23 - Influência da sujidade em relação as limpezas manuais e índice pluviométrico



Fonte: Autores

Um ponto de grande relevância a ser observado nos dois eventos mencionados diz respeito à dinâmica temporal da geração de energia durante a ocorrência de chuva. No primeiro dia de chuva, verifica-se um aumento na discrepância de geração entre os módulos, uma tendência que pode parecer inicialmente contraproducente.

No dia 20 de março, por exemplo, a diferença que estava em 6,61% antes da chuva aumentou para 11,52%. Entretanto, é fundamental notar que o efeito de mitigação das perdas de geração geralmente se manifesta no dia seguinte, quando a diferença volta para 1,41%. Esse fenômeno sugere que a chuva, embora inicialmente possa acentuar a disparidade, tem um impacto benéfico a longo prazo, restaurando a eficiência do sistema.

Outro fator relevante é a eficácia da chuva como agente de limpeza. A chuva tende a limpar de forma mais eficaz os módulos nos quais a sujeira está menos impregnada, contribuindo para a recuperação da eficiência. Esse processo de limpeza ajuda a nivelar o desempenho entre as PVs, demonstrando a complexa interação entre as condições climáticas e a eficiência do sistema fotovoltaico.

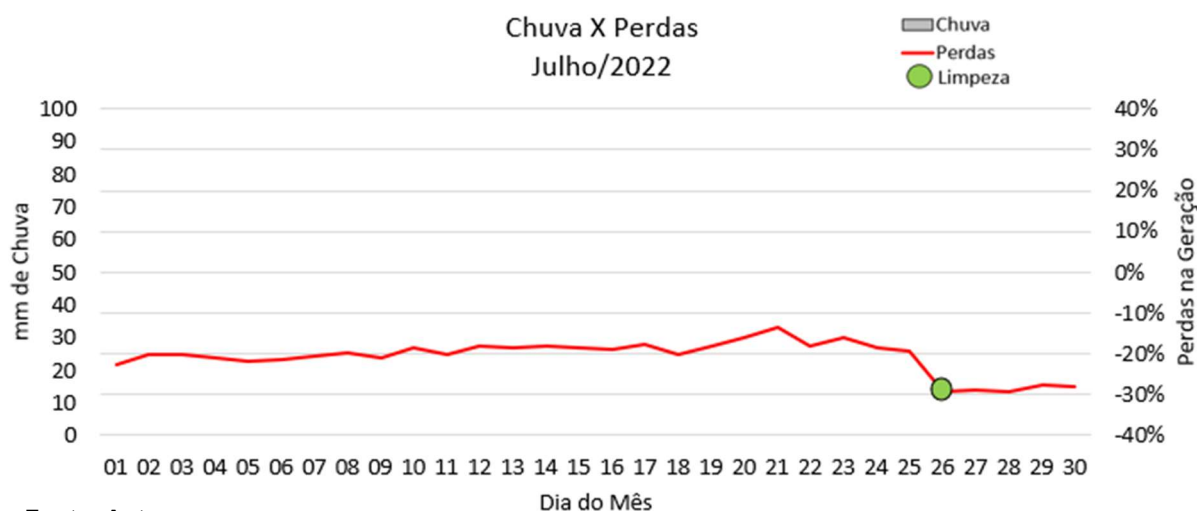
Durante o período de estudo, foi destacado a ausência de chuvas nos meses de junho a agosto, ver Figuras 24 a 26. Esses três meses consecutivos representaram um desafio para a manutenção adequada da *string* PV1, já que a precipitação pluviométrica é uma das principais formas naturais de limpeza dos módulos. Com a falta de chuva, ocorreu um acúmulo significativo de sujeira na PV1, que, ao longo desse período, atingiu um nível alarmante.

Figura 24 - Influência da sujeira em relação as limpezas manuais e índice pluviométrico



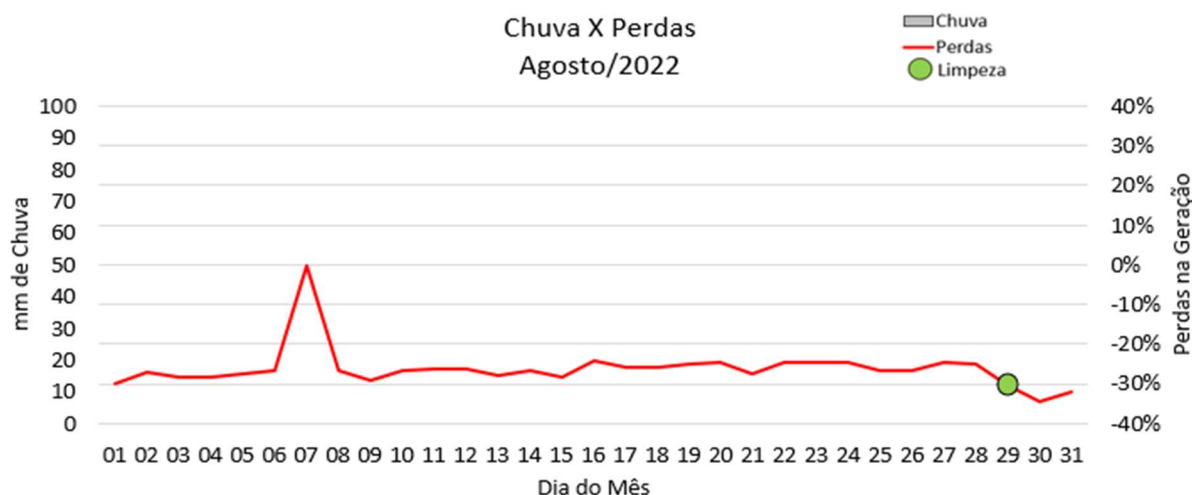
Fonte: Autores

Figura 25 - Influência da sujidade em relação as limpezas manuais e índice pluviométrico



Fonte: Autores

Figura 26 - Influência da sujidade em relação as limpezas manuais e índice pluviométrico



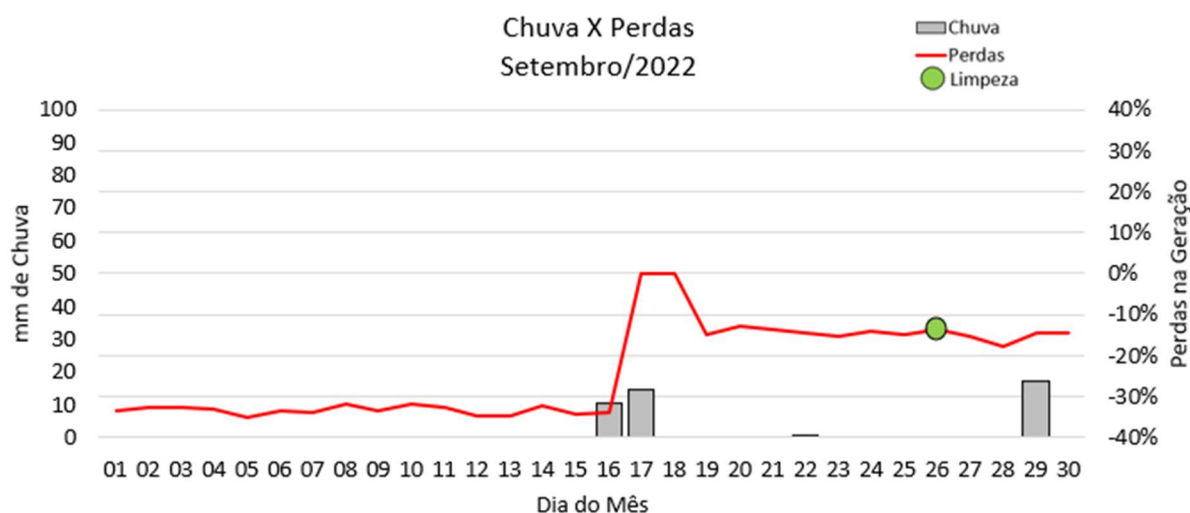
Fonte: Autores

O acúmulo contínuo de sujeira na PV1 durante esses três meses resultou em uma diferença substancial na geração de energia quando comparada com a PV2. A diferença chegou a ultrapassar impressionantes 30%, indicando a influência crítica da manutenção e das condições climáticas na eficiência do sistema. Esse período sem chuvas destaca a importância de estratégias de limpeza regular, especialmente em regiões com longos períodos secos, para garantir a operação eficiente de sistemas fotovoltaicos.

A restauração da ocorrência de chuvas em setembro representou um acontecimento significativo no estudo. Nos dias 16 e 17, ver Figura 27, os índices pluviométricos registraram 10,6 mm e 14,6 mm, respectivamente, sinalizando um

alívio bem-vindo para o sistema. Essa chuva teve um impacto notável na dinâmica do desempenho do sistema fotovoltaico.

Figura 27 - Influência da sujeira em relação as limpezas manuais e índice pluviométrico



Fonte: Autores

Antes do retorno das chuvas, o sistema havia enfrentado uma disparidade notável no rendimento das *strings* PV1 e PV2, que havia atingido uma diferença de -34,17%. No entanto, os eventos de chuva contribuíram significativamente para reverter essa situação.

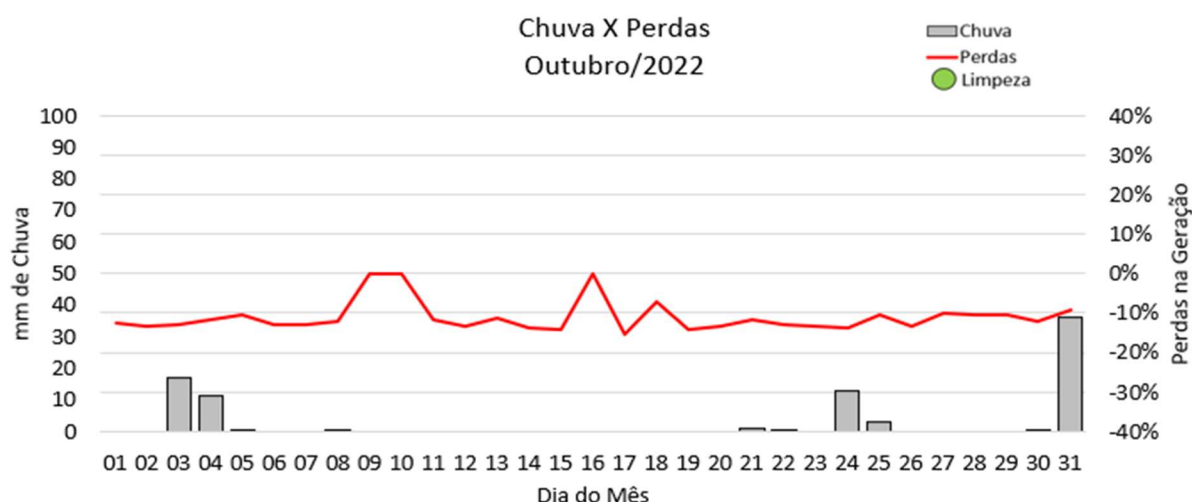
A diferença na geração de energia foi reduzida de forma expressiva, caindo para -14,83%. Esse resultado evidencia a capacidade da chuva de limpar a sujeira acumulada nos módulos, permitindo que ambos os conjuntos de painéis operassem mais eficientemente.

Ainda no mês de setembro, é possível identificar outro acontecimento importante. Dia 26 houve uma limpeza da PV2, o que fez com que a diferença de geração começasse a aumentar, chegando a -17,62%, visto que o acúmulo de sujeira na PV1 ia incrementando a medida que não chovia, porém, dia 29 houve registro de quase 20 mm de chuva, fazendo com que a diferença entre a geração das PVs voltasse ao nível de 14% e se mantendo abaixo disso nos próximos dias de outubro.

No mês de outubro, ver Figura 28, na maior parte do período, observa-se a ocorrência de chuvas esporádicas e pouco relevantes que, embora tenham contribuído para a manutenção das condições gerais, não trouxeram mudanças substanciais no cenário. Durante esse período, a diferença padrão de rendimento entre as *strings* PV1 e PV2 permaneceu relativamente constante, mantendo-se na

faixa de -13%. A chuva, embora bem-vinda para a limpeza dos módulos, não foi suficiente para reverter ou diminuir significativamente essa disparidade. Esse período de estabilidade ressalta a importância de uma manutenção constante e estratégias adicionais para otimizar o rendimento, mesmo em face de condições climáticas favoráveis.

Figura 28 - Influência da sujidade em relação as limpezas manuais e índice pluviométrico

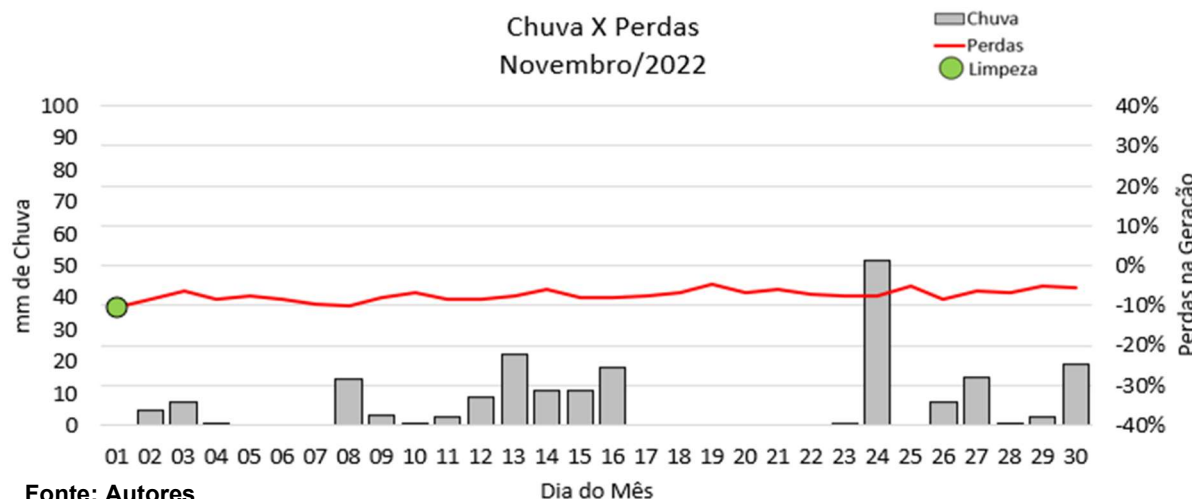


Fonte: Autores

Um ponto a se destacar é o dia 31, onde se registrou 36 mm de chuva, quantidade bem expressiva, que foi capaz de limpar a sujidade de tal modo que a diferença de geração foi menor que 10%, valor que seguiu durante todo o mês de novembro, sendo este extremamente úmido, com chuvas quase todos os dias.

Em novembro, ver Figura 29, o grande volume de chuva auxiliou na mitigação das perdas de eficiência causadas pelas sujidades sob os módulos da PV1.

Figura 29 - Influência da sujidade em relação as limpezas manuais e índice pluviométrico

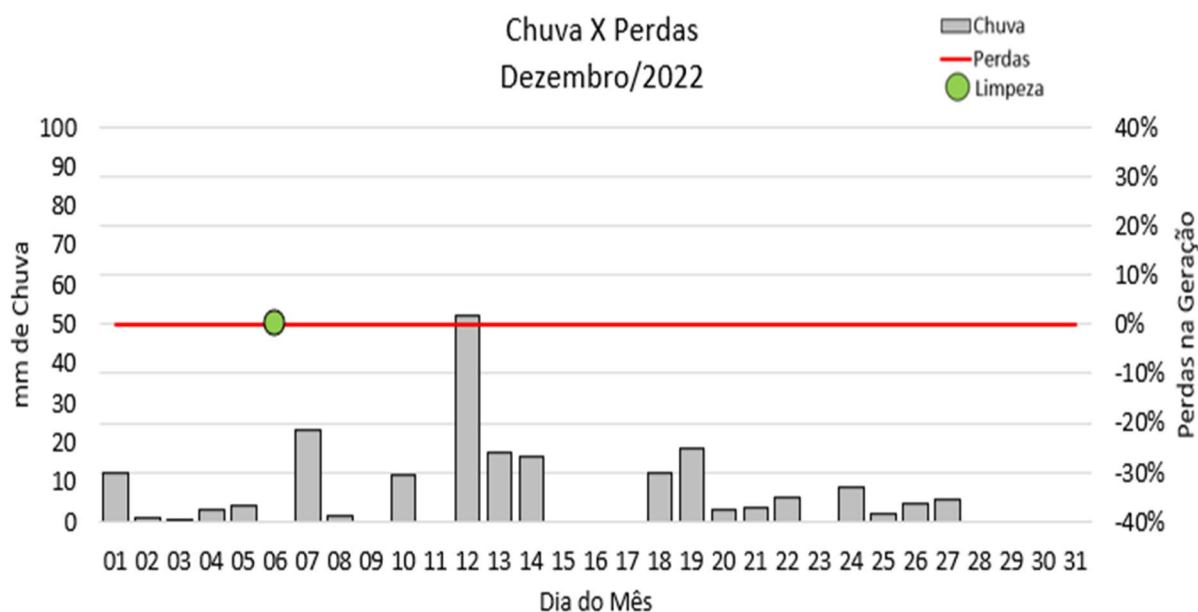


Fonte: Autores

Importante observar o dia 24/11, em que houve uma chuva de 51,8 mm, que resultou numa melhoria de eficiência nos dias seguintes ao evento, chegando a níveis de apenas 4,95% de diferença na geração, comprovando que a pluviosidade auxilia na limpeza natural dos módulos.

Dezembro se destacou como um mês notavelmente chuvoso na região, com ocorrência pluviométrica registrada em quase todos os dias do mês, ver Figura 30. No entanto, como já mencionado, não foram registrados dados de geração de energia para este período. Essa falta de informações impede uma análise completa e detalhada do desempenho do sistema durante o mês de dezembro. A presença consistente de chuvas, embora tenha o potencial de impactar significativamente o sistema fotovoltaico, permanece, infelizmente, sem dados específicos para avaliação.

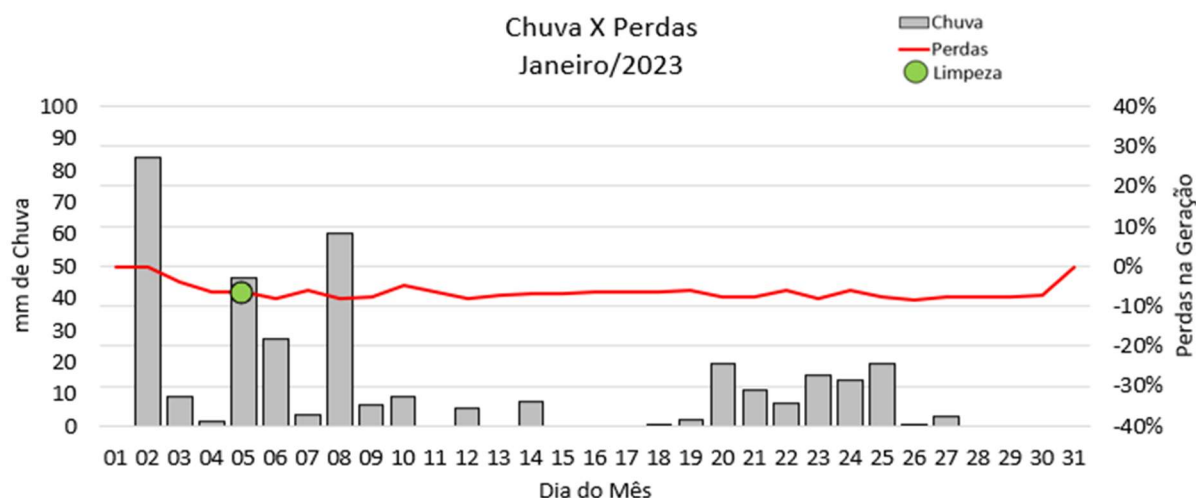
Figura 30 – Mês sem dados de geração devido problema na internet



Fonte: Autores

Semelhante a dezembro, janeiro, ver Figura 31, se caracterizou por apresentar um registro constante de precipitações em quase todos os dias. Além disso, observou-se que essas chuvas foram acompanhadas por volumes notáveis, exemplificados pelo dia 2, que registrou uma precipitação de impressionantes 84,2 mm, e pelo dia 08, que acumulou 60,4 mm de chuva. No entanto, surpreendentemente, mesmo com esse grande acúmulo de chuvas, os resultados das perdas de geração não experimentaram melhorias substanciais. Em vez disso, as chuvas parecem ter mantido a diferença que já estava sendo observada ao longo do período anterior.

Figura 31 - Influência da sujidade em relação as limpezas manuais e índice pluviométrico



Fonte: Autores

Esse cenário ilustra a complexidade da interação entre a sujidade nos módulos e a ação das chuvas. O acúmulo temporal da sujeira torna mais desafiante o trabalho da chuva em realizar uma limpeza eficaz nos módulos. As chuvas, apesar de volumosas, não foram capazes de remover as impurezas que se acumularam profundamente nos painéis solares, resultando na manutenção da diferença na produção de energia. Esse fenômeno ressalta a importância da manutenção preventiva com limpezas manuais e de forma regular dos módulos, a fim de garantir o desempenho ótimo do sistema fotovoltaico.

3.10 Análise Macro Temporal

Com os dados estratificados no item anterior é possível uma visualização de como se relacionou a diferença de geração com a condição climática em cada época do ano. É possível separar os períodos chuvosos e secos, ficando nitidamente marcado pela quantidade de precipitação nestes períodos.

Aqui serão considerados três períodos. O primeiro, de março de 2022 até maio de 2022, pode-se considerar como equilibrado, foi um período que houve chuvas pontuais, não tão intensas, mas não houve grandes períodos sem precipitação neste recorte. O segundo período, este sim, seco, foi de junho de 2022 até meados de setembro de 2022, quando não houve nenhum registro de chuva durante este período. O terceiro e último recorte a ser feito é da segunda metade de setembro, em 2022, até o final do monitoramento, em janeiro de 2023, período de intensas e constantes chuvas, como demonstraram os gráficos.

Naquele primeiro período, pode-se observar que, após as limpezas nas duas PVs monitoradas, as diferenças de geração se mantiveram próximas à linha de 0%, havendo pequenas variações, mas sempre retornando a um patamar inferior a 5%. Importante lembrar que a linha abaixo de 0% significa que a PV1 estava gerando menos energia que a PV2, o que é de se esperar, visto que a PV2 é a padrão e estava sendo limpa manualmente. É possível concluir que a variação baixa se dá pelas várias chuvas que ocorreram durante as semanas, sempre limpando as superfícies das placas, principalmente PV1, e assim, aproximando a capacidade de geração das duas PVs. Não houve um período grande sem estas chuvas, por isso, não se acumularam sujidades sobre as placas que não estavam sendo limpas.

O segundo recorte a ser analisado se inicia num período já com 15 dias sem precipitações, e uma limpeza manual na PV2, a partir deste ponto, já é possível observar a variação de 10% na geração entre as PVs. Diferença esta que se mantém estável, pois o acúmulo de sujidade era o mesmo para as duas PVs, às prejudicando igualmente, até que houvesse uma nova limpeza manual na PV2 no dia 28 de junho, e então retornasse ao nível máximo de geração possível. A limpeza manual ocorreu e a diferença de geração deu um salto, se mantendo em 20% a partir de então. O mesmo padrão se observou até a próxima limpeza em 26 de julho, que levou as perdas à 30%, quando comparada a PV1 com a PV2. A partir de então os níveis de perdas mantiveram entre 25 a 30% de perdas, até a próxima limpeza em 29 de agosto. Analisando todo este recorte é possível constatar que a cada mês sem chuva, ou seja, sem limpeza natural da sujidade nas placas, o acumulado foi aumentando em 10%, portanto, na região de Ipatinga, a cada mês as placas perdem 10% de eficiência na geração de energia por conta de sujeira na superfície. Outro ponto importante foi que após os níveis atingirem 30% de perda na geração de energia eles variaram em torno deste patamar, mas não aumentaram consideravelmente, podendo indicar um limite em que a sujidade desta região afeta a geração das placas.

Iniciando o período chuvoso em exatamente 16 setembro, quando ocorreu a primeira chuva após o período seco, já é possível observar os efeitos que a pluviosidade trouxe para a geração. Após esta primeira chuva, os níveis de diferença de geração entre as PVs caíram para os 15%, e com o passar do tempo, e das novas chuvas, esta perda de geração diminuiu para cerca de 10%, se mantendo menores que este nível até o fim do monitoramento. O que é possível se concluir disso é que a chuva é sim um agente capaz de limpar as superfícies dos módulos fotovoltaicos,

melhorando a eficiência da geração deles, e as chuvas constantes mantêm o nível de limpeza de quando se iniciaram os eventos, porém, apenas a limpeza natural não foi capaz de devolver 100% da capacidade de geração. Cerca de 10% da perda ainda foi observada por conta da sujeira incrustada nas placas, fato este causado pelo longo período de acúmulo de sujeiras que antecedeu à estas chuvas, ou sujidades de partículas oleosas que somente são limpas na presença de sabão.

Portanto, quando se observa e analisa o período monitorado partindo de uma visão mais ampla e temporal, é possível concluir que cada um dos recortes feitos possui características importantes de serem conhecidas para uma boa gestão do sistema de geração fotovoltaico. Entender que os períodos secos acumulam sujeiras capazes de prejudicar muito a geração é importante para programar as limpezas manuais, e perceber que períodos chuvosos mantêm os módulos eficientes pode ajudar a economizar em materiais e mão de obra dessas limpezas.

4 CONCLUSÃO

A geração de energia renovável, especialmente a energia fotovoltaica, desempenha um papel importante na construção de um futuro mais sustentável e na resolução dos desafios ambientais e energéticos da sociedade. A energia solar é reconhecida por ser limpa e disponível em todo o mundo. Ela é praticamente inesgotável, graças à luz do sol, e pode ser capturada em muitos lugares, tornando-se uma opção viável para inúmeras finalidades e regiões do planeta.

A redução dos custos é outro aspecto significativo da energia fotovoltaica. Embora a instalação inicial de sistemas fotovoltaicos possa envolver custos consideráveis, a queda nos preços dos painéis solares e o aumento da eficiência tornam essa fonte de energia cada vez mais acessível. Uma importante contribuição para a manutenção desta eficiência é a pluviosidade, sendo uma grande aliada para a limpeza natural da sujeira que venha a se acumular.

A sujeira e o acúmulo de detritos nos módulos FV podem ter um impacto significativo na eficiência da geração de energia fotovoltaica. Isso ocorre porque a sujeira cria uma barreira física que reduz a quantidade de luz solar que atinge as células fotovoltaicas, diminuindo assim a produção de eletricidade.

Este trabalho conclui que na região observada a diminuição da geração por conta da sujeira chega a 10% por mês, nos períodos em que não há chuvas, e chegando a um limítrofe de 30% na perda de eficiência dos módulos.

Portanto, a limpeza regular dos módulos solares é essencial para manter a eficiência e a longevidade do sistema, principalmente nos períodos secos. A frequência da limpeza depende do ambiente local e das condições climáticas, sendo mais necessária em áreas com altos níveis de poeira ou poluentes atmosféricos, como é em Ipatinga, cidade onde está localizada a usina que foi monitorada neste estudo. A manutenção adequada ajuda a garantir que os painéis solares continuem gerando eletricidade de maneira eficiente e sustentável.

Como foi observado nas análises feitas, a chuva ajuda a remover sujeira, folhas e detritos que podem se acumular nos módulos, garantindo que a superfície dos painéis esteja limpa e capaz de absorver a máxima quantidade de luz solar. Isso é importante para melhorar a produção de eletricidade a partir da energia solar. No entanto, o impacto das chuvas na limpeza dos módulos fotovoltaicos pode variar dependendo da frequência e da intensidade das chuvas em determinados períodos

do ano. Em períodos com chuvas frequentes, os painéis solares podem se manter relativamente limpos de maneira natural. Por outro lado, em momentos com baixos eventos de precipitação, pode ser necessário limpar manualmente os módulos para garantir que permaneçam eficientes.

Portanto, conclui-se que as chuvas desempenham um papel positivo na limpeza dos módulos fotovoltaicos, porém, é importante considerar fatores locais como o regime de chuvas anuais e o tipo de ambiente em que a usina está inserido para então planejar a manutenção de sistemas de geração, a fim de garantir que eles continuem operando de forma eficaz e eficiente.

4.1 Trabalhos futuros

Tendo em vista o estudo realizado e os resultados encontrados, surgem novos desafios a serem explorados, aprofundando ainda mais as tentativas de se melhorar o desempenho de sistemas fotovoltaicos. Uma continuação sobre a ação da natureza na limpeza dos painéis pode ser considerada para estudar como os ventos impactam na remoção dessa sujidade, fator não levado em conta neste estudo.

Algumas outras propostas para futuros trabalhos tendo como ponto de partida este apresentado estão no âmbito de se descobrir os melhores momentos para realização das limpezas manuais nos módulos, visto que o equilíbrio entre o ganho de produtividade e o custo de se fazer a limpeza deve ser levado em conta. Descobrir o momento exato para as limpezas manuais, e a quantidade delas é uma excelente continuação dos resultados aqui obtidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHRENS, C. Donald; HENSON, Robert. **Essentials of meteorology today: an invitation to the atmosphere**. 8. Ed. Cengage Learning, 2018.

ALVES, Felipe Rabelo Rodrigues. **Estudo do efeito da sujidade na eficiência de módulos fotovoltaicos [recurso eletrônico]**. 2018. Dissertação de Mestrado Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Pontifícia Universidade Católica de Goiás, 2018. Disponível em: <http://tede2.pucgoias.edu.br:8080/handle/tede/4010>. Acesso em: 25 Out. 2021.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Sistema de Informações de Geração da ANEEL – SIGA. 2021**. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/siga>. Acesso em 21/10/20217. Acesso em: 10 Out. 2021.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Relação de empreendimentos de geração distribuída**. Disponível em: <https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/relacao-de-empreendimentos-de-geracao-distribuida>. Acesso em 21/10/20217. Acesso em: 10 Out. 2021.

APPELS, R.; LEFEVRE, B.; HERTELEER, B.; GOVERDE, H; BEERTEN, A.; PAESEN, R.; MEDTS, K.; DRIESEN, J.; POORTMANS, J. Effect of soiling on photovoltaic modules. **Solar Energy**. V. 96, p. 283-291, 2013.

BEATTIE, N. S.; MOIR, R. S.; CHACKO, C; BUFFONI, G.; ROBERTS, S. H.; PEARSALL, N. M. **Understanding the effects of sand and dust accumulation on photovoltaic modules**. Renewable Energy. V. 48, p. 448-452, 2012.

CASANOVA, J. Z.; PILIOUGINE, M.; CARRETERO, J.; GALVÁN, P. B.; CARPENA, P.; LÓPEZ, L. M.; CARDONA, M. S. **Losses produced by soiling in the incoming radiation to photovoltaic modules**. Progress in Photovoltaics: Research and Applications. V. 21, p. 790-796, 2013.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (CGEE). **Energia solar fotovoltaica no Brasil: subsídios para tomada de decisão**. Brasília, CGEE, p. 42, 2010.

CINTRA JÚNIOR, Anizio; SOUZA, Igor de Menezes. **Células fotovoltaicas: O futuro da energia alternativa**. TCC, Curso de Engenharia Civil, Faculdade Evangélica de

Goianésia – FACEG, Goianésia, GO, 43p. 2018. Disponível em: http://repositorio.aee.edu.br/bitstream/aee/520/1/2018_1_IGOR_ANIZIO.pdf. Acesso em: 10 Set. 2021.

COSTA, André Luís Crispim. **Diretrizes para operação e manutenção (O&M) de sistemas fotovoltaicos de microgeração distribuída com uso de células de silício cristalino [recurso eletrônico]**. 2021. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2021. Disponível em: https://sig.cefetmg.br/sigaa/public/programa/noticias_desc.jsf?lc=pt_BR&id=303¬icia=2400036. Acesso em: 28 Set. 2021.

COSTAS, S. C. S.; DINIZ, A. S. A. C.; KAZMERSKI, L. L. **Dust soiling issues and impacts relating to solar energy systems: Literature review update for 2012-2015**. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 63. Pp. 33-61. 2016.

CRESESB; **Energia Solar: princípios e aplicações**. Rio de Janeiro, 2006.

DE REZENDE, Vinicius Gouveia Scartezini. **Análise das perdas de produtividade em geradores fotovoltaicos por efeito de sujeidade [recurso eletrônico]**. 2018. Dissertação de Mestrado em Ciência da Energia do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo, 2018. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/181>. Acesso em: 23 Out. 2021.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. 2022. **Balanço Energético Nacional, Séries Histórias Completas**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/BEN-Series-Historicas-Completas>. Acesso em 12 jan. 2022.

Estação meteorológica é instalada no Campus Ipatinga, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – IFMG. Disponível em: <https://www.ifmg.edu.br/portal/noticias/estacao-meteorologica-e-instalada-no-campus-ipatinga>. Acesso em: 15 set. 2023.

FARKAS, K.; FRONTINI, F.; MATAURI, L. **Solar Energy Systems in Architecture – Integration Criteria and Guidelines**. 2012.

FILHO, W. P. B.; FERREIRA, W. R.; AZEVEDO, A. C. S.; COSTA, A. L.; PINHEIRO, R. B. **Expansão da energia solar fotovoltaica no Brasil: impactos ambientais e políticas públicas.** *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*. V. esp, p. 628-642, 2015.

FRAUNHOFER INSTITUTE FOR SOLAR ENERGY SYSTEMS. **World Record Solar Cell with 44.7% Efficiency.** Freiburg, 2013. Disponível em: <<https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2013/world-record-solar-cellwith-44-7-efficiency.html>>. Acesso em: 12 out. 2016.

GREGORY, C. **Solar Energy for Beginners: The Complete Guide to Solar Power Systems, Panels and Cells.** 1ª Ed., Create Space, p. 38, 2015.

HAMMOUD, M. et al. **Effect of dust cleaning on the enhancement of the power generation of a coastal PVpower plant at Zahrani Lebanon.** *Solar Energy*, [s. l.], v. 184, n. april, p. 195-201, 2019.

HEINRICHA, M. et al. **Detection of cleaning interventions on photovoltaic modules with machine learning.** *Applied Energy*, V. 263, p. 1-12, 2020.

HICKEL, B. M.; DESCHAMPS, E. M.; NASCIMENTO, L. R.; SIMÕES, G. C.; RUTHER, R. **Análise da influência do acúmulo de sujeira sobre diferentes tecnologias de módulos FV: Revisão e Medições de Campo.** VI Congresso Brasileiro de Energia Solar. Belo Horizonte. Minas Gerais. Brasil. Abril 2016.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.** Disponível em:<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/mg/ipatinga.html>.

IFMG Campus Ipatinga finaliza a instalação da Usina Fotovoltaica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – IFMG. Disponível em: https://www.ifmg.edu.br/ipatinga/noticias/ifmg_ipatinga_instalacao_usina_fotovoltaica. Acesso em: 15 set. 2023.

INPE; **Atlas brasileiro de energia solar.** São José dos Campos: 2017. 36 p.

INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Vantagens da Fusão.** 2007. São José dos Campos, 2007. Disponível em: <http://www.inpe.br/informativo/08/nota03>; Acesso em 13/02/2023 Acesso em: 15 de ago. 2022.

Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS), LEI Nº 14.300, DE 6 DE JANEIRO DE 2022. Disponível em: [//legislacao.planalto.gov.br/legisla/legislacao.nsf/Viw_Identificacao/lei%2014.3002022?OpenDocument](http://legislacao.planalto.gov.br/legisla/legislacao.nsf/Viw_Identificacao/lei%2014.3002022?OpenDocument). Acesso em: 30/10/2023

ISE - Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems. *Photovoltaics Report*. Freiburg, Novembro 2019. Disponível em: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics_Report.pdf. Acesso em: 25 de fevereiro de 2020.

KIMBER, A.; MITCHELL, A.; NOGRADI, S.; WENGER, H.; **Proceedings of the 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion**. Waikoloa. Hawaii. USA; May 7-12. 2006.

LE MOS, L. O. **Estudo do efeito do acúmulo de sujidade na eficiência de módulos fotovoltaicos**. Dissertação de Mestrado, p. 123, CEFET MG - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2016.

LE MOS, L. O., FERREIRA, A. M., JOTA, P. R. S., SILVA, A. G. V. **“Efeito da Sujidade no Desempenho de Módulos Fotovoltaicos”**, 2016. VI Congresso Brasileiros de Energia Solar (CBENS), Belo Horizonte- Minas Gerais.

MAGHAMI, M. R.; HIZAM, H., GOMES, C.; RADZI, M. A.; REZADAD, M. I.; HAJIGHORBANI, S. **Power loss due to soiling on solar panel: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews**. V. 59, p. 1307-1316, 2016.

MANI, F.; PULIPAKA, S.; KUMAR, R. **Characterization of power losses of a soiled PV panel in Shekhawati region of India**. Solar Energy. V. 131, p. 96-106, 2016.

MARINI, J.A.; ROSSI, L.A. **Suprimento de eletricidade por meio de painel fotovoltaico: Programa computacional para dimensionamento**. São Paulo, Brasil: V CLAGTEF – Congresso Latino-Americano de Geração e Transmissão de Energia Elétrica, 2003.

MEJIA, F.; KLEISSL, J. **Soiling losses for solar photovoltaic systems in California. Solar Energy**. V. 95, p. 357-363, 2013.

MELLO, A. D.; RAMPINELLI, G. A. **Determinação de Índices de Mérito para Avaliar o Desempenho de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede**. In: Anais do VI Congresso Brasileiro de Energia Solar – CBENS. Belo Horizonte, 04 a 07 de abril, 2016.

MUNOZ, M. A. et al. **Early degradation of silicon PV modules and guaranty conditions**. Solar Energy, v.85, p.2264-2274, 2011.

OLIVEIRA, AS de. **Fundamentos de Meteorologia e Climatologia**. Cap XI: Precipitação Pluviométrica, NEAS-UFRB, 2007.

OLIVEIRA, L. D.; TIEPOLO, G. M. **Análise do Desempenho de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede em Função da Temperatura Média no Estado do Paraná**. In: Anais do VII Congresso Brasileiro de Energia Solar – CBENS. Gramado, 17 a 20 de abril, 2018.

PAVAN, A. M.; MELLIT, A.; PIERI, D. **The effect of soiling on energy production for large-scale photovoltaic plants**. Solar Energy. V. 85, p. 1128-1136, 2011.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Grupo de Trabalho de Energia Solar (GTES), CEPEL – CRESESB, edição revisada e atualizada, Rio de Janeiro, 2014

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, CEPEL / CRESESB, p. 529, 2014.

REZA, M. et al. **Power loss due to soiling on solar panel : A review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 59, p. 1307–1316, 2016.

RYAN, C.P.; VIGNOLA, F.; McDANIELS, D.K. **Solar cell arrays: degradation due to dirt**. Am. Sect. Int. Sol. Energy Soc. 1989. Pp. 234-237.

ROSA, Thales Costa Ferreira e SOUTO, Olívio Carlos Nascimento. **A influência da sujeira no desempenho de sistemas fotovoltaicos**. Revista FotoVolt, São Paulo, 2021. v. 39, n. 01, p. 26-31, 2021. Disponível em: <https://www.arandanet.com.br/assets/revistas/fotovolt/2021/julho/index.php#page=26>. Acesso em: 15 Out.2021

SANTHAKUMARI, M.; SAGAR, N. **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.

SARVER, T.; AL-QARAGHULI, A.; KAZMERSKI, L.L. **A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: history, investigations, results, literature, and mitigation approaches.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 22, p. 689-744, 2013.

SAYYAH, A., HORENSTEIN, M. N., MAZUMDER, M. K. **“Energy yield loss caused by dust deposition on photovoltaic panels”** Science Direct, Solar Energy, 2014. Disponível em: <https://goo.gl/n3t9yo>.

SMETS, A. H. M.; JAGER, K.; ISABELLA, O.; VAN SWAAIJ. R.; ZEMAN, M. Solar Energy: **The physics and engineering of photovoltaic conversion, technologies and systems.** 1ª Ed., UIT Cambridge, p. 488, 2016.

TIBA, C.; FRAIDENRANCH, N.; BARBOSA, E. M. **Instalação de sistemas fotovoltaicos para residências rurais e bombeamento de água.** Texto para curso de instalado de sistemas fotovoltaicos. Versão 2.0. novembro de 2001.

VALADARES, L. C. **Memorial Descritivo de Sistema de Microgeração Fotovoltaica Conectado à Rede Elétrica com Potência Instalada de 25 kW no IFMG em Betim, MG.** ALSOL – Energia Renováveis S/A, Uberlândia, 19 de agosto, 2016.

VAREJÃO-SILVA, Mário Adelmo. **Meteorologia e Climatologia.** Instituto Nacional de Meteorologia 463p. (Versão Digital 2). Recife, PE. 2006.

VIANELLO, R.L. e ALVES, A.R. **Meteorologia básica e aplicações.** - Viçosa: UFV, 2000.

VILLALVA, M. G. **Energia Solar Fotovoltaica - Conceitos e Aplicações.** 2ª Ed., São Paulo, Érica / Saraiva, p. 224, 2015.

ZANESCO, I; MOEHLECKE, A. **Mercado, física e processamento de células solares.** Metalurgia e Materiais, v. 61, n. 557, 2011. p. 394-397

ZILLES, R.; MACÊDO, W. N.; GALHARDO, M. A. B.; OLIVEIRA, S. H. F. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica**. São Paulo, Oficina de Textos, p. 208, 2012.