

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES
CAMPUS PATOS DE MINAS

MARCUS VINÍCIUS FONSECA DO AMARAL

**ANÁLISE NA PERDA DE EFICIÊNCIA DE PRODUÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA EM USINAS FOTOVOLTAICAS POR
EFEITO DE SUJIDADE**

Patos de Minas - MG

2025

MARCUS VINÍCIUS FONSECA DO AMARAL

**ANÁLISE NA PERDA DE EFICIÊNCIA DE PRODUÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA EM USINAS FOTOVOLTAICAS POR
EFEITO DE SUJIDADE**

Projeto Final de Curso apresentado à banca examinadora como requisito parcial de avaliação da disciplina de PFC2 da graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações, da Faculdade de Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Uberlândia, Campus Patos de Minas.

Orientadora: Profa. Dra. Elise Saraiva

MARCUS VINÍCIUS FONSECA DO AMARAL

**ANÁLISE NA PERDA DE EFICIÊNCIA DE PRODUÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA EM USINAS FOTOVOLTAICAS POR
EFEITO DE SUJIDADE**

Projeto Final de Curso apresentado à banca examinadora como requisito parcial de avaliação da disciplina de PFC2 da graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações, da Faculdade de Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Uberlândia, Campus Patos de Minas.

Orientadora: Profa. Dra. Elise Saraiva

Patos de Minas, 10 de dezembro de 2025.

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Elise Saraiva – FEELT/UFU (Orientadora)

Me. Daniel de Oliveira Ferreira– FEELT/UFU (Coorientador)

Prof. Dr. Diego de Brito Piau – FEELT/UFU (Banca Examinadora)

Prof. Dr. Rafael Augusto da Silva – FEELT/UFU (Banca Examinadora)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me guiado e dado o discernimento necessário para a conclusão deste Projeto Final de Curso.

Expresso também minha profunda gratidão a todos os envolvidos que me proporcionaram a força e a energia indispensáveis para concluir este PFC. Em especial, desejo destacar minha orientadora, Dra. Elise Saraiva e o meu coorientador Me. Daniel de Oliveira Ferreira, cuja dedicação e apoio foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho e para o enriquecimento das minhas experiências, consolidando minha formação como futuro engenheiro.

À minha família, que é a minha fonte inesgotável de amor e apoio. A meu pai, Ivan, minha mãe, Cleonice, minhas irmãs, Mirelly e Melyssa, meu avô, José Cristino, meus tios, Gilberto e Ivaldo, e tias, Conceição e Ivonete, expresso todo meu amor e gratidão pelo suporte que me ofereceram ao longo deste percurso desafiador. Sem o amor e o apoio de vocês, não teria sido possível alcançar esta conquista. Quero estender meu agradecimento a todos os amigos que estiveram ao meu lado, compartilhando risadas, conselhos e momentos de descontração.

À minha amada companheira, Júlia Maciel. Sou eternamente grato por me apoiar e sempre estar ao meu lado nos momentos felizes e desafiadores. Em cada sorriso, em cada abraço, em cada gesto de apoio, encontrei a força e a inspiração para seguir em frente, mesmo nos momentos mais difíceis. Sua presença iluminou meus dias e tornou minha graduação uma experiência repleta de amor e significado. Obrigado por ser minha rocha, minha inspiração e minha maior bênção. Te amo além das palavras.

Por fim, dedico este Projeto de Conclusão de Curso a duas pessoas que ocupam um lugar especial em meu coração, minha querida vó Dirce e meu amado primo Lucas. Mesmo ausentes fisicamente, seu amor e seu apoio continuam a iluminar meu caminho. Em cada estrela no céu, em cada brisa suave, sinto sua presença e sua proteção, incentivando-me a alcançar meus sonhos e a nunca desistir. Este trabalho é uma homenagem ao amor e à memória de vocês, que serão eternamente lembrados e amados.

*"A natureza usa a energia solar
há milhares de anos, e a raça humana
ainda não conseguiu usá-la em toda a
sua capacidade" (CELLO VIEIRA)*

RESUMO

O presente Projeto Final de Curso (PFC) tem como foco a análise da perda de eficiência na produção de energia elétrica em usinas fotovoltaicas devido ao efeito de sujidade. O estudo compreende a avaliação de três usinas fotovoltaicas reais e operantes, antes e após a limpeza, visando compreender o impacto da sujeira na eficiência da geração de energia solar. A pesquisa busca identificar e quantificar as perdas de eficiência causadas pela sujidade acumulada nos painéis solares das usinas fotovoltaicas selecionadas. Por meio de análises comparativas entre os dados de produção de energia elétrica antes e após a limpeza dos painéis, estimou-se a magnitude do impacto da sujeira na eficiência do sistema fotovoltaico. O estudo envolveu a coleta de dados sobre os sistemas fotovoltaicos, os históricos de produção de energia elétrica e de manutenções preventivas de limpeza. Utilizando modelos de regressão linear, foram avaliadas as diferenças de desempenho das usinas antes e depois da limpeza, permitindo uma compreensão mais aprofundada dos efeitos da sujidade na eficiência da geração fotovoltaica. Além disso, coeficientes de Pearson e de determinação (R^2) foram calculados para verificar a existência de relação linear e a capacidade de adequação do modelo aos pontos de dados. Para uma das usinas analisadas, obteve-se uma estimativa de aumento de geração expressiva de 1538 kWh e R\$ 1630,65, devido à limpeza. Assim, este trabalho lança bases para análises mais avançadas a respeito da sujidade em módulos fotovoltaicos, unindo conteúdos teóricos e práticos, e fornecendo *insights* relevantes sobre a importância da manutenção e limpeza adequadas dos módulos para garantir a máxima eficiência na geração de energia elétrica.

Palavras-chaves: Energia fotovoltaica; energia solar; efeito de sujidade.

ABSTRACT

This Final Course Project (PFC) focuses on analyzing the efficiency loss in electric power production in photovoltaic power plants due to the soiling effect. The study involves the evaluation of three real, operational photovoltaic plants, both before and after cleaning, aimed at understanding the impact of dirt on solar energy generation efficiency. The research seeks to identify and quantify the efficiency losses caused by soiling accumulated on the solar panels of the selected photovoltaic plants. Through comparative analyses of electric power production data before and after panel cleaning, the magnitude of the impact of soiling on the photovoltaic system's efficiency was estimated. The study involved collecting data on the photovoltaic systems, as well as records of electric power production and preventive cleaning maintenance. Using linear regression models, performance differences in the plants before and after cleaning were evaluated, allowing for a deeper understanding of the effects of soiling on photovoltaic generation efficiency. Furthermore, Pearson and determination (R^2) coefficients were calculated to verify the existence of a linear relationship and the model's goodness of fit to the data points. For one of the analyzed plants, a significant estimated increase in generation of 1538 kWh and R\$ 1630,65 was obtained due to cleaning. Thus, this work lays the foundation for more advanced analyses regarding soiling on photovoltaic modules, combining theoretical and practical content, and providing relevant insights into the importance of proper module maintenance and cleaning to ensure maximum efficiency in electric power generation.

Keywords: Photovoltaic energy; solar energy; dirtiness effect.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Extrato da patente da primeira célula solar registrada em março de 1954.....	18
Figura 2 – Estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício cristalino.	20
Figura 3 – Encapsulamento da célula fotovoltaica.....	21
Figura 4 – Associação de baterias em série, paralelo e série/paralelo.....	22
Figura 5 – Placa fotovoltaica excesso de sujeidade.	24
Figura 6 – Agentes de Limpeza de Painéis Fotovoltaicos.....	26
Figura 7 – Máquina para Limpeza de Painéis Solares Fotovoltaicos.....	28
Figura 8 – Fluxograma da metodologia implementada.....	29
Figura 9 – Estações meteorológicas do INMET.	30
Figura 10 – Estações meteorológicas mais próximas das usinas.	31
Figura 11 – Usina A	32
Figura 12 – Usina B	33
Figura 13 – Usina C	34
Figura 14 - Exemplos de diagramas de dispersão e dependência entre as variáveis.....	35
Figura 15 – Radiação incidente nas estações e energia gerada pela usina A, 10 dias antes e após a limpeza.	40
Figura 16 – Radiação incidente nas estações e energia gerada pela usina A, 20 dias antes e após a limpeza.	42
Figura 17 – Radiação incidente nas estações e energia gerada pela usina A, 30 dias antes e após a limpeza.	43
Figura 18 – Radiação incidente nas estações meteorológicas próximas e energia gerada pela Usina B, 10 dias antes e após a limpeza.....	46
Figura 19 – Radiação incidente nas estações meteorológicas próximas e energia gerada pela Usina B, 20 dias antes e após a limpeza.....	47
Figura 20 – Radiação incidente nas estações meteorológicas próximas e energia gerada pela Usina B, 30 dias antes e após a limpeza.....	48
Figura 21 – Radiação incidente nas estações meteorológicas próximas e energia gerada pela Usina C, 10 dias antes e após a limpeza.....	51
Figura 22 – Radiação incidente nas estações meteorológicas próximas e energia gerada pela Usina C, 20 dias antes e após a limpeza.....	52
Figura 23 – Radiação incidente nas estações meteorológicas próximas e energia gerada pela Usina C, 30 dias antes e após a limpeza.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficientes angulares e de determinação antes e após a limpeza para a usina A.	44
Tabela 2 – Coeficientes angulares e de determinação antes e após a limpeza para a usina B.	50
Tabela 3 – Coeficientes angulares e de determinação antes e após a limpeza para a usina C.	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
MLPS	Máquina para Limpeza de Painéis Solares Fotovoltaicos
MMQ	Método dos Mínimos Quadrados Ordinários
PFC	Projeto Final de Curso
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

E_{GN}	Energia gerada normalizada pela área da usina
E_{EM}	Radiação média das estações meteorológicas próximas
r	Coefficiente de Correlação de Pearson
Y	Variável dependente
X	Variável independente
B	Coefficiente de intercepto
A	Coefficiente angular
ϵ	Termo de erro estocástico
R^2	Coefficiente de determinação
y'	Estimativa de variável dependente
A_L	Coefficiente angular da reta para o sistema após a limpeza
A_S	Coefficiente angular da reta para o sistema antes da limpeza
f_E	Fator de eficiência
$\bar{f}_E$	Fator de eficiência médio
$\Delta\%$	Variação do coeficiente angular percentual
Δ	Variação do coeficiente angular

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	15
1. INTRODUÇÃO	15
1.1 PROBLEMATIZAÇÃO.....	16
1.2 TEMA DO PROJETO.....	16
1.3 OBJETIVOS	16
1.3.1 Objetivo Geral.....	16
1.3.2 Objetivos Específicos.....	17
1.4 JUSTIFICATIVAS.....	17
CAPÍTULO 2	18
2. REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1 HISTÓRICO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	18
2.2 SISTEMA FOTOVOLTAICO E SEUS COMPONENTES	19
2.2.1 Célula Fotovoltaica	19
2.2.2 Módulo Fotovoltaico	20
2.2.3 Estrutura de Suporte	21
2.2.4 Baterias.....	21
2.2.5 Banco de Baterias.....	21
2.2.6 Inversor.....	22
2.3 FATORES SOLARES QUE INFLUENCIAM A EFICIÊNCIA DO SISTEMA FOTOVOLTAICO.....	23
2.4 EFEITO DA SUJEIRA SOBRE OS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.....	24
2.5 HORÁRIOS DE LIMPEZA.....	24
2.6 TÉCNICAS DE LIMPEZA DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS	25
2.6.1 Limpeza Manual.....	26
2.6.2 Limpeza Natural	26
2.6.3 Tratamento de Superfície	27
2.6.4 Limpeza Automatizada	27
CAPÍTULO 3	29

3.	MATERIAL E MÉTODOS	29
3.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	29
3.2	RECURSOS NECESSÁRIOS	29
3.3	ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS	30
3.4	EMPRESA DE ENERGIA FOTOVOLTAICA.....	31
3.5	INFORMAÇÕES TÉCNICAS DAS USINAS	32
3.5.1	Usina A.....	32
3.5.2	Usina B.....	32
3.5.3	Usina C.....	33
3.6	ANÁLISE DOS DADOS	34
3.6.1	Coeficiente de Correlação de Pearson.....	34
3.6.2	Regressão Linear	36
3.6.3	Coeficiente de determinação R^2	37
3.6.4	Visualização dos dados	37
3.6.5	Análise dos coeficientes de inclinação	37
3.6.6	Estimativa da energia gerada e do impacto financeiro com a limpeza.....	38
3.6.7	Remoção de <i>outliers</i>	38
3.6.8	Implementação de Script.....	39
	CAPÍTULO 4	40
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
4.1	USINA A.....	40
4.1.1	Análise de 10 dias	40
4.1.2	Análise de 20 dias	41
4.1.3	Análise de 30 dias	43
4.2	USINA B.....	45
4.2.1	Análise de 10 dias	45
4.2.2	Análise de 20 dias	47
4.2.3	Análise de 30 dias	48
4.3	USINA C.....	50

4.3.1	Análise de 10 dias	50
4.3.2	Análise de 20 dias	51
4.3.3	Análise de 30 dias	52
CAPÍTULO 5		55
5.	CONCLUSÃO, TRABALHOS FUTUROS E CONTRIBUIÇÕES	55
REFERÊNCIAS		57
APÊNDICE A – CÓDIGO PRINCIPAL DO <i>SCRIPT</i>		60

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

A emissão em excesso de gases na atmosfera é um dos grandes problemas da atualidade. Ela prejudica e interfere diretamente nas condições climáticas, afetando não somente o ser humano, mas também toda fauna e flora do planeta. Um de seus agravamentos, é o aumento da temperatura terrestre pelo efeito estufa, um fenômeno natural que ocorre quando gases na atmosfera retêm parte do calor do sol, aquecendo assim, a superfície da terra (1).

Uma das alternativas para evitar o avanço do efeito estufa, é aumentar o percentual de fontes renováveis no planeta, diminuindo, portanto, a quantidade de gás emitido para a atmosfera proveniente da queima de combustíveis e de outras fontes não renováveis. A energia solar, também conhecida como energia fotovoltaica, é uma forma de energia limpa, não poluente da atmosfera, e que está em ascensão no mundo inteiro. Sua implementação está caminhando a passos largos, contribuindo de forma exponencial para tal problemática, sendo uma fonte sustentável que consegue transformar a radiação solar em energia elétrica (1).

O Sol é a principal fonte de energia da terra, sendo classificado como uma fonte de energia inesgotável. Sem dúvidas, é uma das principais alternativas energéticas mais promissoras para se enfrentar os desafios do novo milênio, incluindo as fontes de energias sustentáveis.

Com o decorrer dos anos, as tecnologias evoluíram constantemente e a tecnologia fotovoltaica ganha uma maior eficácia, possibilitando transformar a radiação solar em energia elétrica de forma sustentável. Para que toda essa transformação seja possível, é necessária a implementação de um sistema fotovoltaico completo, que consiste em: módulos fotovoltaicos, inversor, baterias, estrutura de suporte, cabos, entre outros. Após a implementação de todos esses componentes necessários, essa estrutura pode ser denominada como uma usina fotovoltaica, pois estará apta para captar a radiação solar e produzir energia elétrica (1).

Uma usina fotovoltaica, assim como qualquer outro tipo de usina, necessita de monitoramento e manutenções constantes, sendo necessário uma atenção especial aos módulos solares, também chamados de placas fotovoltaicas, pois qualquer material ou sujeira em sua superfície será prejudicial e afetará diretamente na produção de energia. Seu bom funcionamento, irá depender da radiação solar incidir diretamente sobre a superfície do módulo, permitindo a absorção da radiação pelas células fotovoltaicas. Caso contrário, a produção de energia diminuirá, não atendendo às expectativas para suprir a demanda onde a energia fotovoltaica foi implementada.

1.1 PROBLEMATIZAÇÃO

As placas fotovoltaicas são peças essenciais em sistemas de energia solar, convertendo a luz solar em eletricidade de forma limpa e sustentável. No entanto, o acúmulo de sujeira nessas placas pode representar uma ameaça significativa para a eficiência de produção e desempenho dos sistemas fotovoltaicos. Empresas com alto consumo de energia podem sofrer prejuízos financeiros significativos com a presença de sujeira, principalmente porque a usina apresentará um baixo rendimento na produção de energia elétrica provenientes de suas placas fotovoltaicas durante esse período que a sujeira estiver concentrada nos módulos.

Portanto, o principal aspecto a ser considerado, é o impacto direto da sujeira na capacidade de geração de energia das placas fotovoltaicas, tanto no meio urbano quanto no meio rural. A camada de sujeira acumulada sobre a superfície das células solares bloqueia parcialmente a luz solar, reduzindo a quantidade de energia convertida em eletricidade e a eficiência energética do sistema como um todo.

1.2 TEMA DO PROJETO

Este Projeto Final de Curso (PFC) concentra-se na análise da eficiência na geração de energia elétrica em três usinas fotovoltaicas. Essas usinas estão situadas em ambientes rurais e urbanos, enfrentando problemas de sujeira em seus módulos solares. Desse modo, a pesquisa aborda usinas monitoradas e que seus devidos módulos foram limpos, a fim de que se possa fazer o estudo pré e pós limpeza.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Este PFC tem como objetivo analisar e estudar a produção da energia elétrica antes e depois da realização da limpeza das placas fotovoltaicas em três usinas, tanto no meio urbano quanto no meio rural. A comparação dos desempenhos energéticos ajudará na análise para determinar a importância e possíveis benefícios da limpeza preventiva nos módulos fotovoltaicos.

O resultado dessa análise visa evitar possíveis prejuízos financeiros acarretados pela redução na produção de energia elétrica interferida pela sujeira ou semelhantes, e amenizar consequências da baixa produção de energia elétrica em usinas fotovoltaicas.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos propostos para alcançar o objetivo geral deste trabalho, foram divididos e estão descritos abaixo:

- a) Estudar conceitos básicos sobre usinas e sistemas fotovoltaicos;
- b) Estudar conceitos de como fatores externos como a sujeira podem afetar na eficácia da produção de energia elétrica em usinas fotovoltaicas no meio urbano e rural.

1.4 JUSTIFICATIVAS

Como mostrado posteriormente, fatores como a localização da planta instalada afetam diretamente no plano de manutenção preventiva do sistema fotovoltaico. Isso permite mensurar o quanto a falta de limpeza é prejudicial e como o tipo de meio interfere na produção de uma usina fotovoltaica.

Com o objetivo de comparar como a sujeira afeta a produção de energia em usinas fotovoltaicas, foram escolhidas usinas em diferentes meios (urbanos e rurais). Os dados de perda de produção causada pela sujeira foram analisados, resultando em uma estimativa da porcentagem de perda em cada meio.

Com as análises realizadas neste trabalho, espera-se contribuir para o melhor entendimento das diferentes perdas de produção em cada meio devido a sujeira, além de mostrar resultados reais de como a manutenção preventiva é essencial.

CAPÍTULO 2

2. REFERENCIAL TEÓRICO

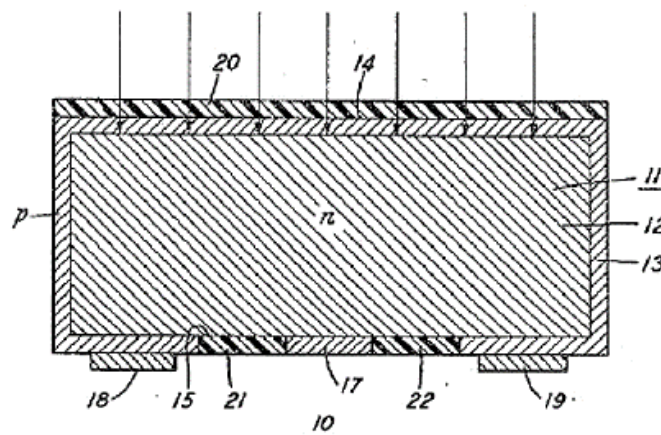
Este capítulo traz uma explicação sobre todos os aspectos gerais que compõem uma usina fotovoltaica, incluindo o histórico da energia solar fotovoltaica e todos os elementos que compõem um sistema fotovoltaico, juntamente com seus respectivos componentes. O intuito é fornecer uma base teórica abrangente para a compreensão e realização do projeto final de curso.

2.1 HISTÓRICO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A energia solar fotovoltaica tem como princípio básico converter a luz do sol em eletricidade, utilizando células fotovoltaicas. Essas células são compostas por materiais semicondutores, como o silício, que, ao serem expostos à luz solar, geram corrente elétrica por meio do efeito fotovoltaico (2).

O princípio básico da energia fotovoltaica foi inicialmente observado pelo francês Alexandre Edmond Becquerel em 1839, quando ele descobriu que certos materiais geravam pequenas quantidades de eletricidade quando expostos à luz solar (2);(3). Um avanço muito importante ocorreu em 1954, quando o cientista Russell Shoemaker Ohl, desenvolveu a primeira célula solar eficiente o suficiente para gerar eletricidade de maneira prática (Figura 1). Além disso, também foi responsável por ser o primeiro pesquisador a patentear o sistema fotovoltaico moderno, bem semelhante ao que conhecemos hoje em dia (2);(3).

Figura 1 – Extrato da patente da primeira célula solar registrada em março de 1954.



Fonte: Brito (4)

2.2 SISTEMA FOTOVOLTAICO E SEUS COMPONENTES

A tecnologia solar fotovoltaica começou nos anos 50, quando os painéis solares tinham uma eficiência modesta de apenas 4,5%, gerando somente 13 Wp/m². Desde então, houve um progresso notável e a eficiência média global atingiu cerca de 15%, o que equivale a 143 Wp/m², enquanto os custos foram consideravelmente reduzidos (4).

A abordagem mais adotada na tecnologia fotovoltaica envolve o uso de células de silício, que têm uma eficiência na faixa de 13% a 17%. Essas células agora dominam o mercado, respondendo por mais de 95% da participação. O constante aprimoramento dessas células tem contribuído significativamente para a eficiência geral dos painéis solares (4).

Além disso, os avanços notáveis na tecnologia solar fotovoltaica não apenas tornaram a energia solar mais eficiente, mas também mais acessível. Os custos mais baixos têm desempenhado um papel crucial na expansão global da adoção dessa fonte de energia, promovendo assim uma transição muito importante para fontes energéticas mais limpas e sustentáveis em todo o mundo. Esses progressos destacam a importância da energia solar no cenário global das soluções energéticas renováveis (4).

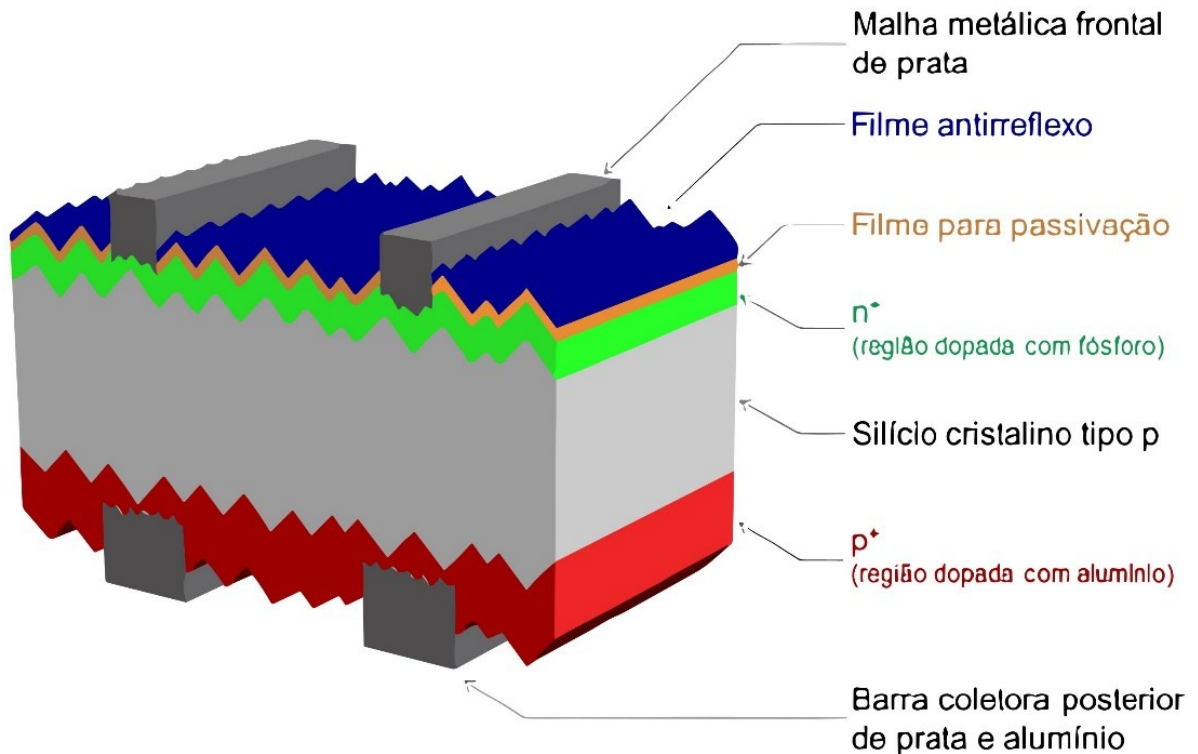
2.2.1 Célula Fotovoltaica

A célula solar, ou também conhecida como célula fotovoltaica, é um dispositivo extremamente fundamental nos sistemas de energia solar fotovoltaico, tendo a função de converter a luz do sol diretamente em eletricidade por meio de um fenômeno chamado de efeito fotovoltaico (5).

A estrutura básica de uma célula fotovoltaica é composta por camadas de materiais semicondutores, que podem ser de diferentes tipos, no entanto, frequentemente são feitos de silício. O silício é escolhido por ter propriedades semicondutoras e por ser abundante na natureza. Geralmente nas células fotovoltaicas são utilizadas as células de silício monocristalino e as células de silício policristalino de acordo com a Figura 2 (5).

No horário de maior insolação, é quando se obtém um maior aproveitamento e eficiência das células fotovoltaicas. Como as células fotovoltaicas não armazenam energia elétrica, o fluxo de corrente elétrica será interrompido quando não obtiver incidência solar nas respectivas células, sendo necessário um banco de baterias, o consumo imediato ou injetar a carga na rede fornecedora de energia (6).

Figura 2 – Estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício cristalino.



Fonte: Manual de engenharia de sistemas fotovoltaico (1)

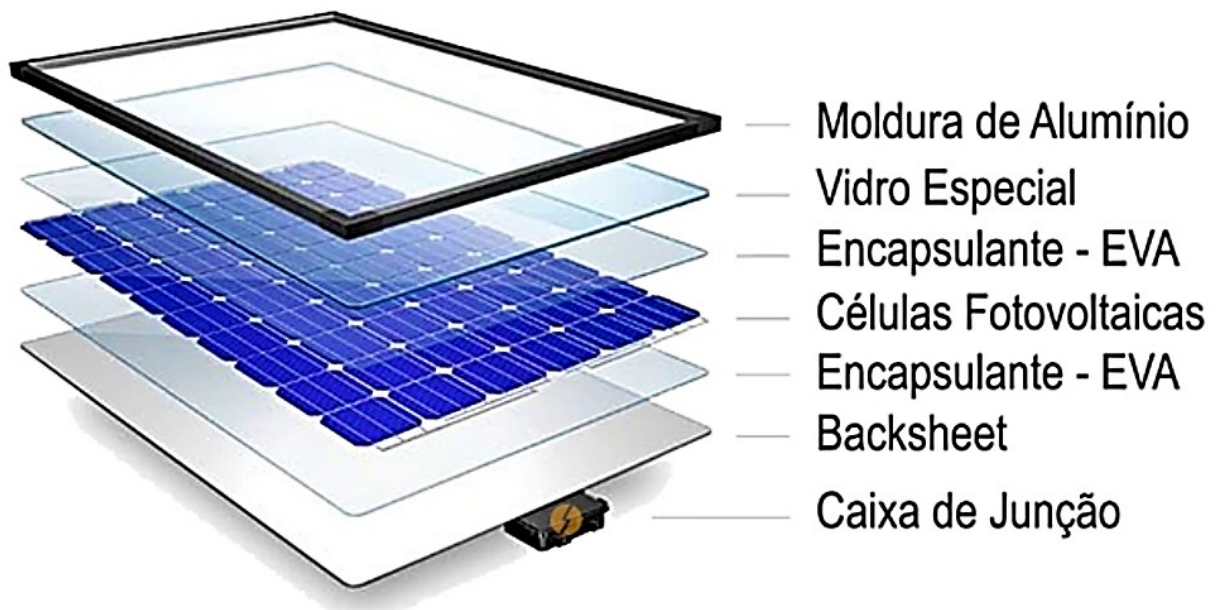
2.2.2 Módulo Fotovoltaico

O módulo fotovoltaico, também conhecido como painel solar ou placa solar, é um dispositivo que capta a radiação solar para convertê-la em energia elétrica (7). É constituído por um conjunto de células conectadas em série e/ou paralelo, que tem como função primordial produzir corrente e tensão maiores.

Normalmente, os módulos são montados em estruturas acima do solo, como em bases elevadas metálicas ou em telhados de casas, condomínios e prédios, com o intuito de terem a melhor angulação de incidência da radiação solar e por proporcionarem uma maior proteção contra furtos e sujeira.

O módulo fotovoltaico é composto por um conjunto de células fotovoltaicas interligadas eletricamente e encapsuladas por uma estrutura que proporciona uma rigidez e resistência física, garantindo sua estabilidade no suporte. A Figura 3 representa um módulo fotovoltaico e seus respectivos componentes de um módulo de silício cristalino.

Figura 3 – Encapsulamento da célula fotovoltaica.



Fonte: Portal Solar (17).

2.2.3 Estrutura de Suporte

A principal função da estrutura de suporte é servir como apoio aos painéis solares. Para definir qual o melhor tipo de estrutura a se utilizar, é necessário realizar uma análise prévia do local. Existem vários tipos de estruturas de suporte para módulos fotovoltaicos, incluindo montagem em telhado, em solo, estacionamentos solares e soluções alternativas, sendo estas estruturas normalmente feitas com metal inoxidável (8).

2.2.4 Baterias

Existem vários motivos que podem afetar a geração de energia e interromper uma constância de geração. Os principais motivos são os dias chuvosos, nublados e o período noturno. Devido a necessidade de fornecimento constante, as baterias servem para armazenar a energia gerada pelas placas e suprir os períodos que possam ser afetados por meios externos (8).

2.2.5 Banco de Baterias

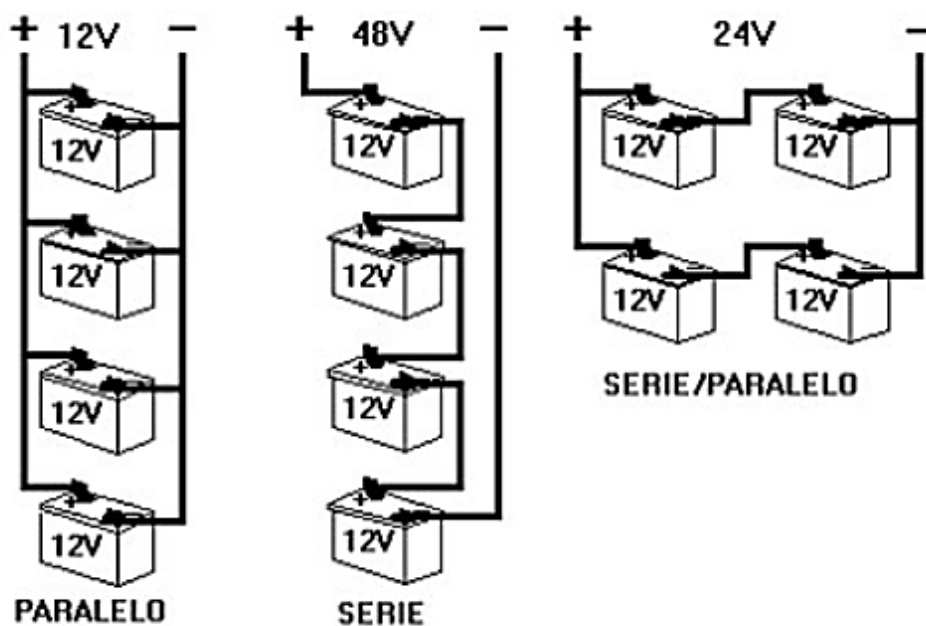
Os bancos de baterias podem ser formados de três formas: unindo as baterias em série, paralelo ou em série/paralelo. A ligação em série possibilita maiores tensões, pois a tensão final

é a adição da tensão de cada bateria. A corrente disponibilizada pelo conjunto é a mesma que a de uma bateria.

A ligação em paralelo permite um maior fornecimento de corrente elétrica com a mesma tensão. A tensão do grupo é a mesma que a de uma bateria, mas as correntes de cada bateria são adicionadas. Esse tipo de configuração é usado quando se quer manter um nível de tensão baixo e ainda assim oferecer maior capacidade de corrente.

A ligação em série/paralelo tem como intuito conseguir juntar as duas características citadas anteriormente: aumento da tensão e maior capacidade de corrente. Primeiro são unidas baterias em série para ter uma maior tensão e depois são adicionados os grupos em paralelo para ter uma maior corrente de saída. Esse tipo de arranjo é utilizado quando se precisa de uma tensão mais alta e uma corrente mais forte. A Figura 4 mostra uma associação de baterias e seus diferentes tipos de ligação (8).

Figura 4 – Associação de baterias em série, paralelo e série/paralelo.



Fonte: Umpro (18).

2.2.6 Inversor

Grande parte dos equipamentos domésticos e industriais atuais utilizam a energia elétrica em corrente alternada para serem alimentados. No entanto, as usinas fotovoltaicas fornecem a energia somente em corrente contínua. O inversor é um componente muito

importante em uma usina fotovoltaica, pois é através dele que é realizado todo o processo de conversão da corrente contínua (CC) para a corrente alternada (CA) (1).

Atualmente, no mercado fotovoltaico, existem diversos tipos e características técnicas de inversores, pois isso pode variar muito de acordo com a necessidade e o tamanho do projeto do cliente. O custo e a qualidade dos inversores podem variar bastante dependendo da sua forma de onda e eficiência. As características principais de um inversor para uma usina fotovoltaica são: dissipação mínima de potência, forma de onda e distorção harmônica, eficiência na conversão de potência, potência nominal de saída, potência de surto, taxa de utilização, tensão de entrada, tensão de saída, regulação de saída, frequência da tensão de saída, fator de potência, consumo de potência sem carga, modularidade, temperatura e umidade do ambiente, compatibilidade eletromagnética, grau de proteção e proteções (6).

Uma usina fotovoltaica interligada a rede necessita de uma dissipação mínima de potência para evitar perdas e de uma produção de tensão com baixo teor de harmônicos e em sincronismo com a rede elétrica. É muito comum utilizar filtros para minimizar o conteúdo de harmônicos (1).

2.3 FATORES SOLARES QUE INFLUENCIAM A EFICIÊNCIA DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

Para produzir energia solar, é necessário levar em consideração diversos fatores que estão relacionados tanto ao sol quanto ao sistema fotovoltaico. O sol é uma fonte de energia que não se esgota e que pode ser renovada, mas sua radiação não é constante e muda de acordo com o tempo (dia ou noite) e com a intensidade da luz que ele emite (6).

O sistema fotovoltaico, que é o conjunto de equipamentos que converte a radiação solar em energia elétrica, também possui características que influenciam no seu rendimento, como o modo como ele é posicionado, a altura em que ele está, o ângulo em que ele recebe a luz solar e a capacidade de se adaptar às variações climáticas que ocorrem durante o ano. Outro fator que interfere na quantidade de radiação solar que chega até o sistema fotovoltaico é o estado da atmosfera, que pode estar mais ou menos nublada (6).

2.4 EFEITO DA SUJEIRA SOBRE OS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Quando superfícies ópticas ficam sujas por partículas de poluição ou poeira em geral, elas sofrem um efeito chamado de “*soiling*”, conhecido no Brasil como sujeira. Esse efeito reduz bastante o desempenho energético dessas superfícies dos módulos fotovoltaicos, pois elas fazem com que a placa perca parte da luz que recebeu por causa da absorção e da dispersão dessas partículas (9).

Os sistemas fotovoltaicos podem ter seu desempenho prejudicado por fatores naturais e ambientais como: sujeira, salinidade, fezes de animais, neve, sombreamento, entre outros. Por isso, é importante manter as placas fotovoltaicas limpas para obter o máximo de eficiência dos módulos e de energia possível (10).

A Figura 5 mostra um exemplo de um módulo fotovoltaico com um pouco de sujeira.

Figura 5 – Placa fotovoltaica excesso de sujeira.



Fonte: Canal Solar (15).

2.5 HORÁRIOS DE LIMPEZA

É recomendável que a limpeza dos painéis fotovoltaicos ocorra em horários específicos, para não atrapalhar a produção de energia elétrica da usina, priorizando a captação de energia nos horários de maior incidência de radiação solar (11).

Os melhores horários para a limpeza são os horários em que haja pouca ou nenhuma incidência de radiação solar nos painéis como no início da parte da manhã, final da parte da tarde, noites e dias chuvosos. Esses horários são os mais indicados, pois é exatamente quando a temperatura das superfícies normalmente estará baixa, reduzindo o perigo de choques térmicos, que podem danificar drasticamente o vidro dos módulos fotovoltaicos (11).

De acordo com (12) as usinas fotovoltaicas que possuem potências altas geralmente têm uma maior quantidade de módulos solares, sendo necessário ter um planejamento prévio do período da limpeza e dividir a área onde está localizado a planta em subdivisões de acordo com as circunstâncias específicas do *layout* da estrutura elétrica da usina.

2.6 TÉCNICAS DE LIMPEZA DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

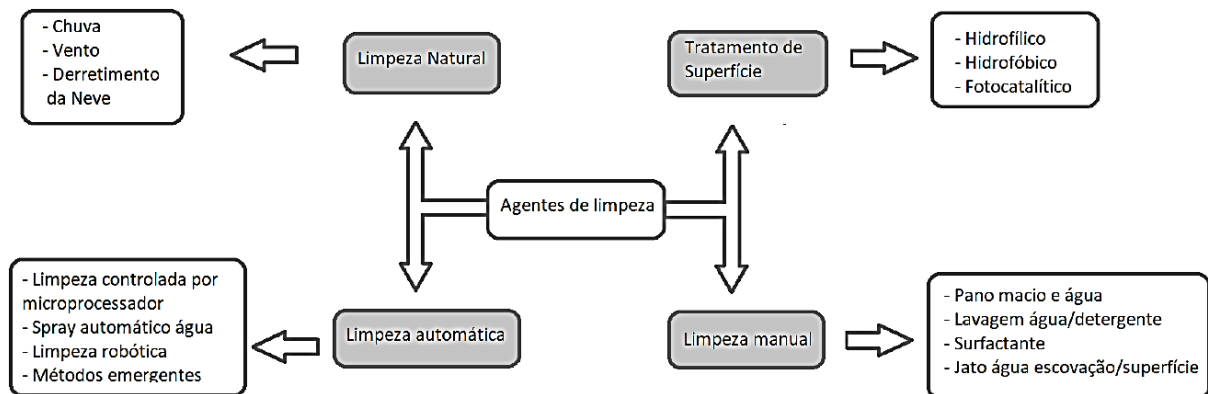
Um ponto crucial para uma boa performance de produção de energia elétrica em uma usina fotovoltaica, é uma excelente limpeza e manutenção preventiva dos módulos solares, evitando o acúmulo excessivo da sujeira que poderia prejudicar a produção de energia da planta em questão com interferências (13).

A sujeira nas placas de uma usina fotovoltaica depende de vários fatores, como a região em que a planta foi instalada, tráfego intenso de veículos, tráfego intenso de animais, árvores (que podem ocasionar a queda e acúmulo de folhas sobre a superfície dos módulos), e até mesmo dejetos de pássaros (13).

Segundo (13), se uma planta for instalada em um local empoeirado, é necessário considerar uma perda de aproximadamente 20% sobre a potência total gerada na usina fotovoltaica. É de grande importância que, nessas circunstâncias, seja realizada a manutenção preventiva mensalmente, sempre tomando muito cuidado para não danificar os módulos no processo de limpeza (1).

A Figura 6 representa algumas técnicas utilizadas de limpeza.

Figura 6 – Agentes de Limpeza de Painéis Fotovoltaicos



Fonte: Sayyah (9).

2.6.1 Limpeza Manual

O processo de limpeza manual é feito nas placas fotovoltaicas por pessoas, geralmente utilizando escovas com cerdas macias para evitar arranhões na superfície do painel fotovoltaico. Essas escovas percorrem toda a superfície da placa e, juntamente com a água, eliminam grande parte da sujeira. Algumas escovas têm uma mangueira de água acoplada para facilitar a limpeza e o enxágue das placas simultaneamente.

A forma mais utilizada de limpeza manual para os painéis fotovoltaicos é com água da torneira, frequentemente misturada com detergente neutro. Após essa etapa, um pano macio é passado para remover toda a sujeira e o excesso de água dos módulos (10).

2.6.2 Limpeza Natural

Muitas vezes, as placas fotovoltaicas são limpas pela ação da chuva. A chuva limpa as superfícies das placas removendo a poeira, resíduos e partículas que possam estar sobre elas. A água, ao escorrer pelas placas, auxilia na remoção da sujeira e das impurezas, deixando as superfícies mais limpas. Isso permite que as células fotovoltaicas otimizem a absorção da luz solar (9).

Porém, a eficácia desse método de limpeza natural pode variar conforme diversos fatores, como a frequência e a intensidade das chuvas, o tipo de sujeira presente e a inclinação das placas. Em áreas onde as chuvas são escassas ou irregulares, as placas fotovoltaicas podem acumular sujeira com o tempo, reduzindo sua capacidade de gerar energia (14).

Alguns outros fatores ambientais também contribuem na limpeza das placas fotovoltaicas. Assim como a chuva, o vento pode influenciar o rendimento dos painéis

fotovoltaicos. O vento transporta as partículas de poeira pelo ar, fazendo com que elas se depositem sobre o painel. No entanto, o mesmo também pode diminuir a sujeira dos painéis ao remover algumas partículas maiores de sujeira (14).

2.6.3 Tratamento de Superfície

O tratamento de superfície tem como função diminuir a aderência de diversas partículas que se acumulam na superfície das placas fotovoltaicas. O tratamento modifica a superfície de cobertura transparente dos painéis fotovoltaicos, criando uma camada hidrofóbica que facilita a limpeza manual e além de aumentar a durabilidade da célula fotovoltaica (8).

2.6.4 Limpeza Automatizada

A limpeza automatizada dos painéis fotovoltaicos utiliza uma tecnologia em que computadores gerenciam dispositivos mecânicos controlados, responsáveis por limpar as superfícies dos painéis fotovoltaicos. Isso melhora a eficiência das placas, otimizando o tempo de limpeza e diminuindo o uso de água e mão de obra (15).

Um desses dispositivos automatizados, é a Máquina para Limpeza de Painéis Solares Fotovoltaicos (MLPS). Esse equipamento utiliza uma escova giratória para limpar a superfície dos painéis solares, permitindo que a luz penetre nas células e produza eletricidade. Com a ajuda da água pressurizada, ele desagrega e enxagua os painéis, podendo utilizar sabão neutro com ou sem cera protetora. A MLPS se movimenta sobre a estrutura dos painéis solares com um suporte de rodas, podendo ser movida por transmissão ou pelo próprio atrito da escova no painel (16).

A MLPS opera com um motor elétrico ou hidráulico, fornecendo a potência necessária para fazer a escova girar e, se necessário ele também pode operar por transmissão. O toque da escova ou a energia aplicada na transmissão faz o equipamento avançar, permitindo a limpeza da superfície. O toque da escova esfolia a sujeira existente, eliminando-a e higienizando o comprimento do painel. As rodas de suporte facilitam a movimentação da máquina, e com o auxílio das rodas guias localizadas em uma ou ambas as pontas da máquina, asseguram essa ação, garantindo assim o alinhamento e ótimo desempenho da MLPS.

Na Figura 7 podemos ver um exemplo da Máquina de Limpeza de Painéis Solares Fotovoltaicos (16).

Figura 7 – Máquina para Limpeza de Painéis Solares Fotovoltaicos.



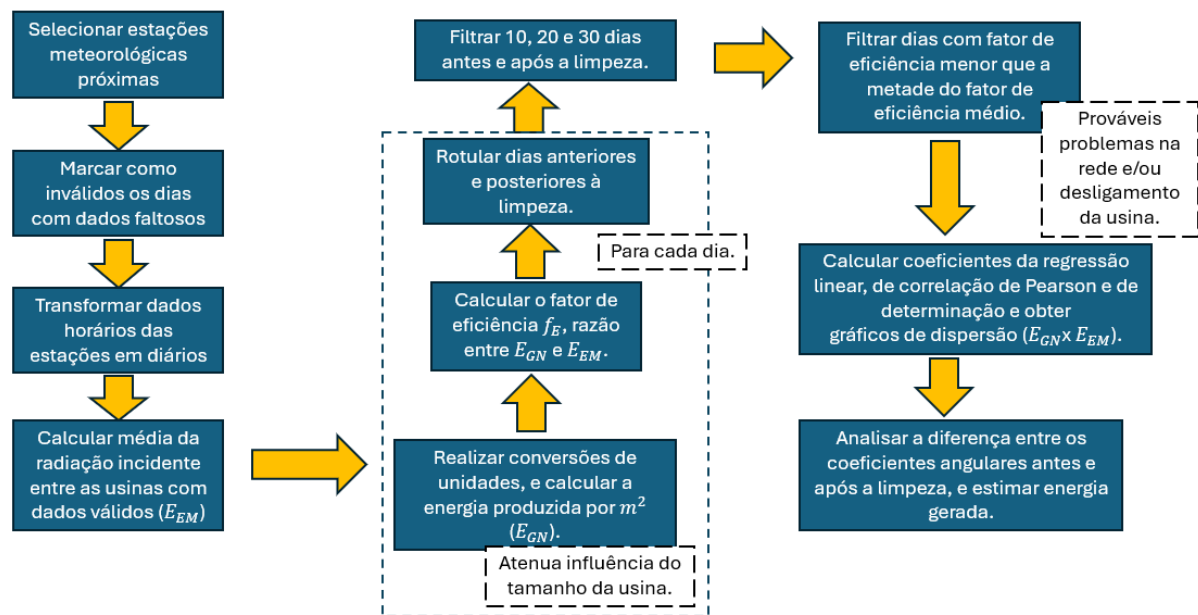
Fonte: Solar clean facilities (16).

CAPÍTULO 3

3. MATERIAL E MÉTODOS

Nesta seção são apresentados os recursos e métodos utilizados para analisar o desempenho de usinas fotovoltaicas submetidos ao efeito de sujidade. Para isso, foram executados diversos procedimentos, descritos na Figura 8.

Figura 8 – Fluxograma da metodologia implementada.



Fonte: o autor.

O projeto foi estruturado com uma metodologia baseada em estudos teóricos e análises da geração de energia elétrica antes e após a limpeza dos módulos fotovoltaicos. Os resultados obtidos possibilitam analisar a perda de produção de energia elétrica devido ao efeito de sujidade, além de analisar a importância da manutenção preventiva regular em usinas fotovoltaicas em cada cenário testado.

3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- Levantamento de trabalhos previamente realizados na área de limpeza de usinas fotovoltaicas;
- Estudos de técnicas para análises de produção de energia elétrica em *softwares*.

3.2 RECURSOS NECESSÁRIOS

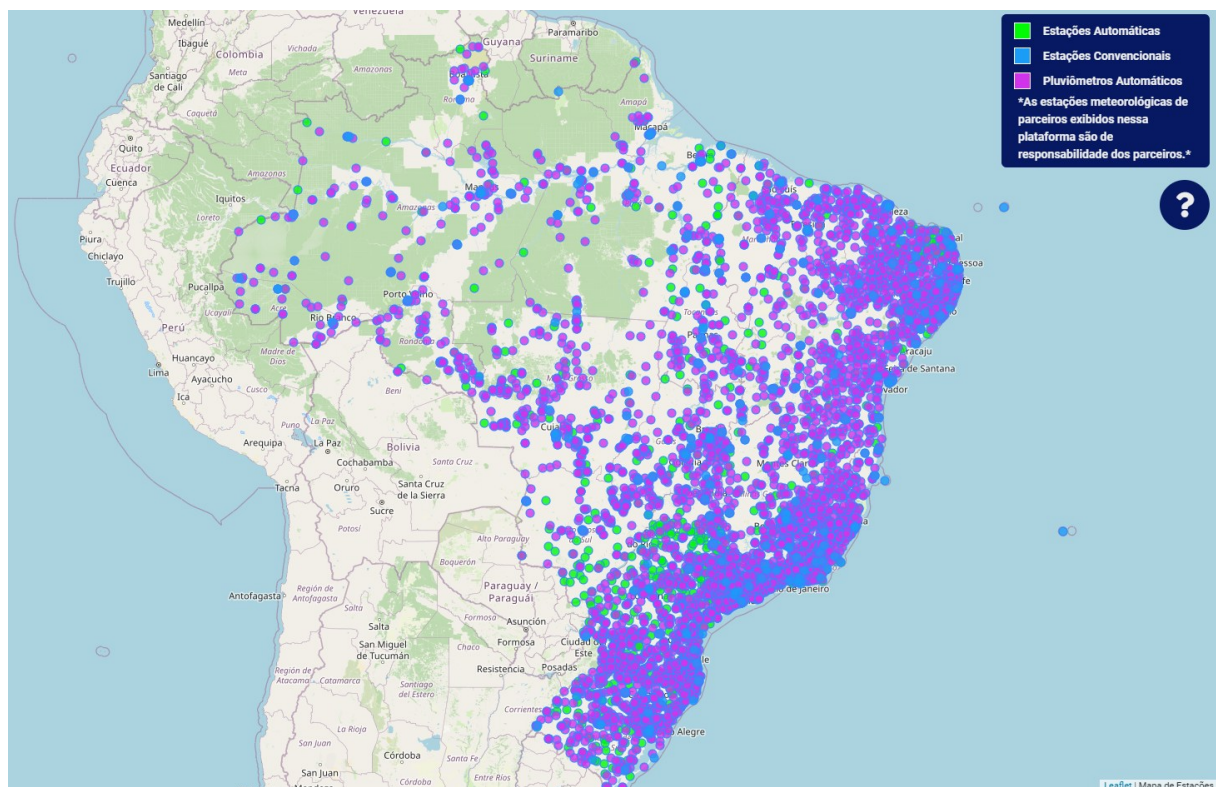
Para executar as etapas descritas na seção 1.3 foram necessários os seguintes recursos:

- Computador com *software* de monitoramento em tempo real capaz de acessar o histórico de produção de energia de usinas fotovoltaicas;
- Acesso à biblioteca digital IEEE Xplore® para pesquisa e estudo de materiais referentes ao tema;
- Tabelas de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) de estações meteorológicas próximas às usinas analisadas (20);
- *Software* SciDAVis para confecção de gráficos;
- Editor de código Visual Studio Code;
- *Runtime* JavaScript Node.js.

3.3 ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS

Para obter dados de radiação incidente, consultou-se uma base de dados do INMET (20), que possui informações coletadas por diversas estações espalhadas pelo Brasil, como representado na imagem abaixo.

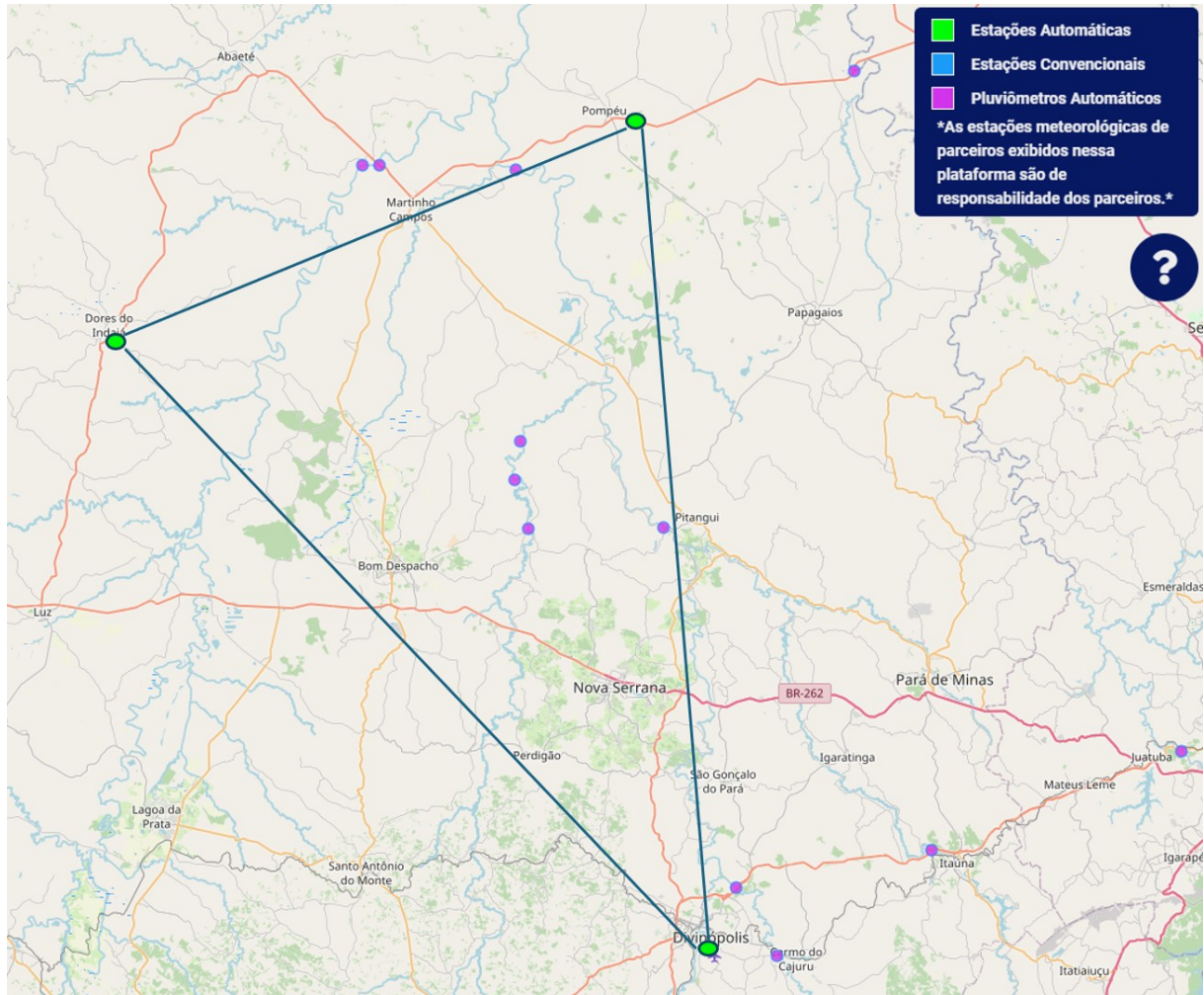
Figura 9 – Estações meteorológicas do INMET.



Fonte: INMET (20).

Para estimar as radiações incidentes nas usinas, utilizou-se a média da radiação diária entre as estações mais próximas considerando a localização das usinas. Estas estações estão destacadas na figura abaixo, indicadas pelos pontos verdes.

Figura 10 – Estações meteorológicas mais próximas das usinas.



Fonte: adaptado de INMET (20).

3.4 EMPRESA DE ENERGIA FOTOVOLTAICA

Para realizar a análise do efeito de sujidade é necessário possuir, além dos dados de radiação incidente e energia gerada, a data em que foi realizada a limpeza da usina. Dessa forma, foi contatada uma empresa com o *software* de monitoramento de usinas fotovoltaicas em modo operante, sendo elas em meio urbano e rural.

Além de possuir os dados de geração de energia diária, a empresa em questão também realizava serviços de limpeza e manutenção dos painéis fotovoltaicos. Assim, foi possível obter a data exata da limpeza. Com esta data, verificou-se a presença de dados do histórico de geração

de produção de energia elétrica no banco de dados da empresa, tanto antes quanto depois da limpeza das respectivas usinas monitoradas. Informações sobre as usinas, como a área ocupada pelos módulos fotovoltaicos e o local de instalação também foram importantes para análise.

3.5 INFORMAÇÕES TÉCNICAS DAS USINAS

3.5.1 Usina A

Esta usina foi instalada sobre o telhado numa área rural, como mostrado na Figura 11, e possui as seguintes especificações:

- **Potência Total Instalada:** 12,24 kWp;
- **Produção Média Mensal de Energia:** 1.500 kWh;
- **Área:** 60 m²;
- **Valor médio cobrado por kWh:** R\$1,06.

Figura 11 – Usina A



Fonte: o autor.

3.5.2 Usina B

Esta usina foi instalada sobre o telhado numa área urbana, como mostrado na Figura 12, e possui as seguintes especificações:

- **Potência Total Instalada:** 39,78 kWp;
- **Produção Média Mensal de Energia:** 4.752 kWh;
- **Área:** 195 m²;
- **Valor médio cobrado por kWh:** R\$1,06.

Figura 12 – Usina B



Fonte: o autor.

3.5.3 Usina C

Esta usina foi instalada diretamente sobre o solo, numa área rural, e está próxima a uma estrada de terra, como mostrado na Figura 13. Dessa forma, é uma usina altamente suscetível ao efeito da sujeidade e possui as seguintes especificações:

- **Potência Total Instalada:** 93,6 kWp;
- **Produção Média Mensal de Energia:** 11.000 kWh;
- **Área:** 780 m²;
- **Valor médio cobrado por kWh:** R\$0,58.

Figura 13 – Usina C



Fonte: o autor.

3.6 ANÁLISE DOS DADOS

Para analisar a influência da sujidade na energia gerada, utilizou-se uma análise baseada em regressões lineares, para comparar o desempenho das usinas antes e depois da limpeza, de forma semelhante ao que foi feito na referência (22). Além disso, para reforçar a validade da metodologia utilizada, calculou-se alguns coeficientes apresentados nas próximas subseções.

3.6.1 Coeficiente de Correlação de Pearson

O Coeficiente de Correlação de Pearson (r) é uma medida estatística quem tem como função quantificar a força e a direção de uma determinada relação linear entre duas variáveis contínuas, ou seja, ele entrega um número que mostra quão bem duas variáveis se movem juntas em um determinado padrão de linha reta (21).

$$r = \frac{n \cdot \sum xy - \sum x \sum y}{\sqrt{[n \sum x^2 - (\sum x)^2] \cdot [n \sum y^2 - (\sum y)^2]}} \quad (1)$$

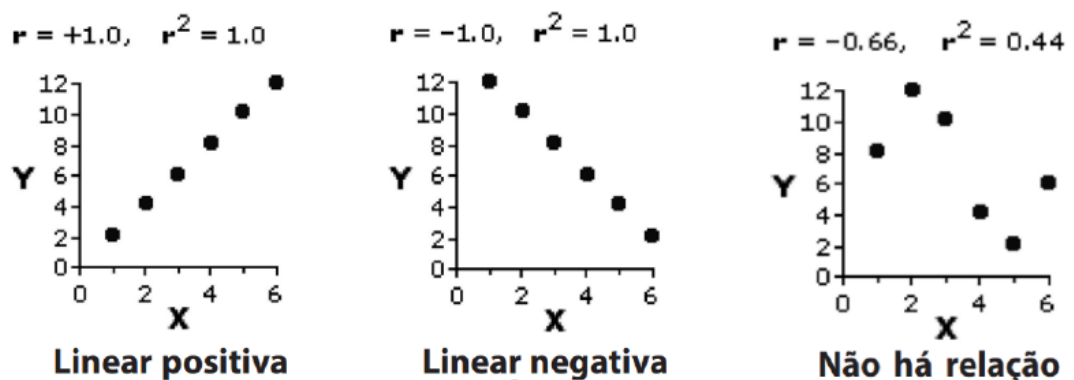
O valor de r sempre irá variar entre -1 e +1. Quando for +1, isso indica uma correlação linear positiva perfeita, pois quando o valor de uma variável aumenta, o valor da outra variável aumentará na mesma proporção, formando assim, uma linha reta ascendente perfeita. Quando o r for -1, isso indica correlação linear negativa perfeita, ou seja, o valor irá diminuir na mesma proporção, fazendo com que se forme uma linha reta descendente perfeita. Já quando o r for 0, isso indica uma correlação linear negativa perfeita, ou seja, quando o valor de uma variável

aumenta, o valor da outra diminui na mesma proporção, formando uma linha reta descendente. Valores intermediários, como +0,8 ou -0,5, indicam a força da relação, que nos diz que quanto mais próximo de 1 (ou -1), mais forte será a correlação linear. O valor de r pode ser qualitativamente avaliado da seguinte forma (21):

- $0 < |r| < 0,3$ indica correlação linear fraca;
- $0,30 < |r| < 0,60$ indica correlação linear moderada;
- $0,60 < |r| < 0,90$ indica correlação linear forte;
- $0,90 < |r| < 1,00$ indica correlação linear muito forte.

Diferentemente da correlação, que se limita a quantificar a intensidade do vínculo entre duas variáveis, a regressão se aprofunda ao formular a equação que expressa matematicamente esse vínculo. A análise de regressão, portanto, é um método de modelagem estatística empregado para examinar o devido impacto que uma ou mais variáveis explicativas ($X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$) exercem sobre uma variável de resultado (Y). O objetivo principal é criar um modelo capaz de estimar o valor que a variável de resultado (Y) assumirá, com base em um determinado valor da variável explicativa (X). A natureza dessa função matemática, $f(X)$, é flexível, podendo ser descrita por um modelo linear (uma reta), polinomial (uma curva) ou outras funções de caráter não linear (21).

Figura 14 - Exemplos de diagramas de dispersão e dependência entre as variáveis



Fonte: TRAMONTIN (22).

3.6.2 Regressão Linear

Dentro do campo da análise quantitativa de dados, a regressão linear se estabelece como uma ferramenta estatística de fundamental importância para a investigação de relações entre variáveis. O propósito central desta técnica é desenvolver um modelo matemático que descreva como uma variável de interesse, denominada variável dependente (Y), é influenciada por uma ou mais variáveis explicativas, conhecidas como variáveis independentes (X). A aplicação deste método possibilita não apenas a predição de valores para a variável dependente com base em novos dados, mas também, e de forma crucial para a pesquisa, a quantificação da magnitude e da direção do impacto que cada variável independente exerce sobre a variável dependente (21).

A relação funcional entre as variáveis é representada por uma equação linear, que busca traçar a linha que melhor se ajusta à dispersão dos dados observados. Na sua forma mais fundamental, o modelo é expresso da seguinte maneira (21):

$$Y = B + AX + \varepsilon \quad (2)$$

Nesta equação, cada componente possui uma interpretação específica: Y é o valor observado da variável dependente que se pretende explicar; X é o valor da variável independente utilizada para a explicação; B é o coeficiente de intercepto, que representa o valor esperado de Y quando X é igual a zero; A é o coeficiente angular, que mede a variação esperada em Y para cada alteração de uma unidade em X ; por fim, ε (épsilon) é o termo de erro estocástico, que abarca a variabilidade em Y não explicada pelo modelo linear, incluindo a influência de outras variáveis não consideradas e a aleatoriedade inerente aos dados (21).

Para a estimação dos parâmetros do modelo (B e A), o procedimento padrão é o Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MMQ). Este método consiste em encontrar os valores dos coeficientes que minimizam a soma dos quadrados das diferenças entre os valores reais observados da variável dependente e os valores previstos pelo modelo. Em outras palavras, busca-se a linha que produz os menores resíduos quadrados possíveis, garantindo assim o melhor ajuste linear aos dados (21).

É fundamental destacar que o modelo de regressão pode ser categorizado em duas modalidades. A regressão linear simples analisa a relação entre a variável dependente e apenas uma única variável independente. Contudo, para investigações mais complexas e realistas, emprega-se a regressão linear múltipla, que permite incorporar duas ou mais variáveis independentes no modelo. A grande vantagem da análise múltipla reside na sua capacidade de avaliar o efeito isolado de cada variável independente sobre a variável dependente, mantendo o efeito das demais variáveis controlado estatisticamente, o que resulta em uma análise mais

robusta e com maior poder explicativo. Dessa forma, a aplicação da análise de regressão neste trabalho permitirá examinar as relações propostas de forma sistemática e objetiva, fornecendo uma base empírica sólida para as conclusões a serem apresentadas (21).

3.6.3 Coeficiente de determinação R^2

Esse coeficiente é uma medida estatística que indica o quão bem um modelo consegue explicar uma determinada variação de um conjunto de dados. Esta medida deve ser utilizada com cuidado, principalmente em modelos com muitos parâmetros, que podem se aderir perfeitamente ao conjunto de dados, mas que não traduzem o comportamento do conjunto (23). Este coeficiente pode ser calculado por:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(y - y')^2}{\sum(y - \bar{y})^2} \quad (3)$$

onde y é o valor da variável dependente uma amostra, e y' é o valor estimado para essa variável por meio do modelo.

3.6.4 Visualização dos dados

Para visualizar como as variáveis de interesse, isto é, radiação incidente nas estações meteorológicas e energia gerada pela usina fotovoltaica, se relacionam, utilizou-se o *software* SciDAVis para gerar os gráficos de dispersão. Além disso, esta ferramenta também permitiu mostrar as retas encontradas ao realizar a regressão linear da energia gerada em função da radiação incidente.

É importante mencionar que a radiação incidente considerada não é a que incidiu nas usinas, mas a médias da radiação das estações meteorológicas mais próximas. Isto insere uma incerteza na relação analisada entre radiação incidente e energia gerada, mas só poderia ser mitigado se houvesse medidores de radiação nas usinas.

3.6.5 Análise dos coeficientes de inclinação

Considerando uma regressão linear, com a variável independente sendo a radiação incidente, e a variável dependente sendo a energia gerada, o coeficiente de inclinação representaria a taxa de conversão de radiação em energia. Dessa forma, ao realizar a regressão com os dados pós-limpeza, o coeficiente de inclinação tenderia a aumentar, e a diferença em relação ao coeficiente de inclinação encontrado com os dados pré-limpeza é um indicativo de melhoria na conversão de energia. É possível calcular um ganho percentual nesse coeficiente, por meio da equação abaixo.

$$\Delta\% = \frac{A_L - A_S}{A_S} \quad (4)$$

3.6.6 Estimativa da energia gerada e do impacto financeiro com a limpeza

Para caracterizar o ganho com a limpeza, optou-se por fazer uma estimativa do valor em reais, obtido com o procedimento, a partir do aumento da energia gerada com a limpeza. Para isso, estimou-se qual seria a energia gerada nos dias que sucederam a limpeza, mas utilizando o modelo linear obtido com os dados pré-limpeza. Além disso, para calcular o valor em reais, utilizou-se o valor do kWh médio para cada usina, que foi indicado na seção 3.5. Esse parâmetro é obtido na fase de dimensionamento da usina, e consta nas propostas comerciais.

3.6.7 Remoção de outliers

A razão entre a energia gerada e a radiação incidente no sistema fotovoltaico, com a mesma unidade de medida (kWh/m^2), representa a porcentagem da energia solar convertida em elétrica, sendo, portanto, um indicativo da eficiência do sistema. Neste trabalho, não se teve acesso aos dados de radiação incidente nos sistemas fotovoltaicos, mas uma estimativa dessa grandeza utilizando a média da radiação incidente nas estações meteorológicas mais próximas.

Além da diferença de localização, a diferença de inclinação e azimute das usinas em relação as estações meteorológicas do INMET, onde foram feitas as medidas de radiação incidente, também insere um grau de incerteza na estimativa de eficiência, utilizando a razão entre energia gerada e radiação incidente. Por este motivo, a terminologia utilizada para esta razão será de coeficiente de eficiência, com o intuito de diferenciar esta medida da eficiência real do sistema.

Este coeficiente desempenha um papel importante nas análises realizadas, visto que permitiu identificar e retirar alguns outliers. Pontos com baixo coeficiente de eficiência podem representar dias em que a usina fotovoltaica foi desconectada da rede elétrica, seja por problemas internos ou externos à usina. Estes pontos podem ainda, representar problemas no sistema de monitoramento dos inversores devido, por exemplo, à falta de conectividade momentânea da rede Wi-Fi do local da usina. Por isso, foi estabelecido que amostras com coeficiente de eficiência menor do que metade da média do conjunto de dados analisado seriam descartadas da análise.

3.6.8 Implementação de *Script*

Grande parte das etapas necessárias para as análises, destacadas no fluxograma da Figura 8, foram realizadas por meio de um *script* de código, que está inserido no Apêndice A. Isso permite que os cálculos sejam realizados de forma rápida e possam ser facilmente utilizados para diferentes usinas. Além disso, permite manipular diversas fontes de dados com formatos diferentes, como por exemplo, tabelas de estações meteorológicas em resolução horária e planilhas das usinas com dados de geração de energia em resolução diária.

O código foi implementado em *JavaScript* e executou, dentre outras tarefas:

- Leitura das tabelas de dados das três estações meteorológicas mais próximas das usinas;
- Sinalização de dias com dados faltosos para filtrá-los;
- Cálculo dos dados diários por meio dos dados horários;
- Cálculo dos valores médios de radiação, das estações com dados válidos para cada dia analisado;
- Conversão da radiação em kJ/m^2 para kWh/m^2 ;
- Cálculo da energia gerada pela usina, por unidade de área (kWh/m^2) – etapa importante para diminuir a influência do tamanho da usina nos coeficientes de inclinação;
- Rotulação de dias antes e após a limpeza;
- Cálculo do fator de eficiência f_E , razão entre a energia gerada e a estimativa da radiação incidente, para filtrar os pontos com baixa eficiência ($f_E < \bar{f}_E/2$);
- Seleção de 10, 20 e 30 dias antes e após a limpeza;
- Cálculo dos coeficientes da regressão linear, de correlação de Pearson e de determinação;
- Estimativa do ganho financeiro com a limpeza dos módulos fotovoltaicos.

CAPÍTULO 4

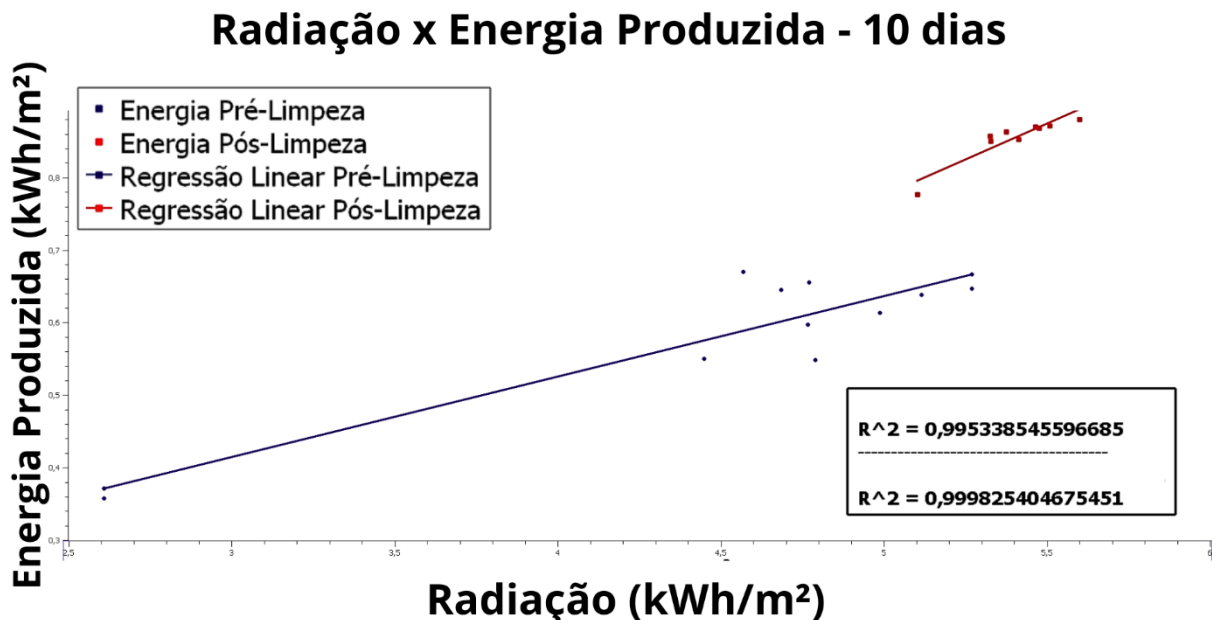
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 USINA A

4.1.1 Análise de 10 dias

A Figura 15 mostra o gráfico de dispersão da radiação incidente e da energia gerada para o sistema fotovoltaico A ao longo de um intervalo de 10 dias anteriores e 10 dias posteriores à limpeza dos módulos.

Figura 15 – Radiação incidente nas estações e energia gerada pela usina A, 10 dias antes e após a limpeza.



Fonte: o autor.

Uma das observações mais evidentes, é a visível separação entre os dois conjuntos de dados. Os pontos em azul, que representam o período pré-limpeza, posicionam-se em um patamar de produção de energia consistentemente inferior comparada aos pontos em vermelho, que ilustram o desempenho pós-limpeza. Este "salto" vertical na produção, para níveis de radiação solar semelhantes, nos mostra de forma clara que a extrema sujidade acumulada nos painéis fotovoltaicos atuava como uma barreira, limitando a absorção de radiação solar e, consequentemente, diminuindo drasticamente a eficiência global de conversão energética do sistema da usina A.

Os coeficientes de Pearson encontrados para os conjuntos de dados pré e pós-limpeza foram de 0,8860 e 0,9200 respectivamente, indicando forte correlação linear. Outro ponto a se

notar, é que ambos os cenários nos mostram uma correlação linear positiva, indicando que, como esperado, a energia produzida irá aumentar de acordo com o aumento da radiação solar. Essa relação é validada pelos altos valores do coeficiente de determinação (R^2). No período pré-limpeza, o R^2 de aproximadamente 0,9953 nos mostra que 99,53% da variação na energia gerada poderá ser explicada pela variação na radiação. Após a limpeza, este indicador melhora para um R^2 de 0,9998, mostrando um ajuste muito bom e bem significativo do modelo linear aos dados da usina A, evidenciando que a produção se tornou mais previsível e diretamente dependente da radiação disponível.

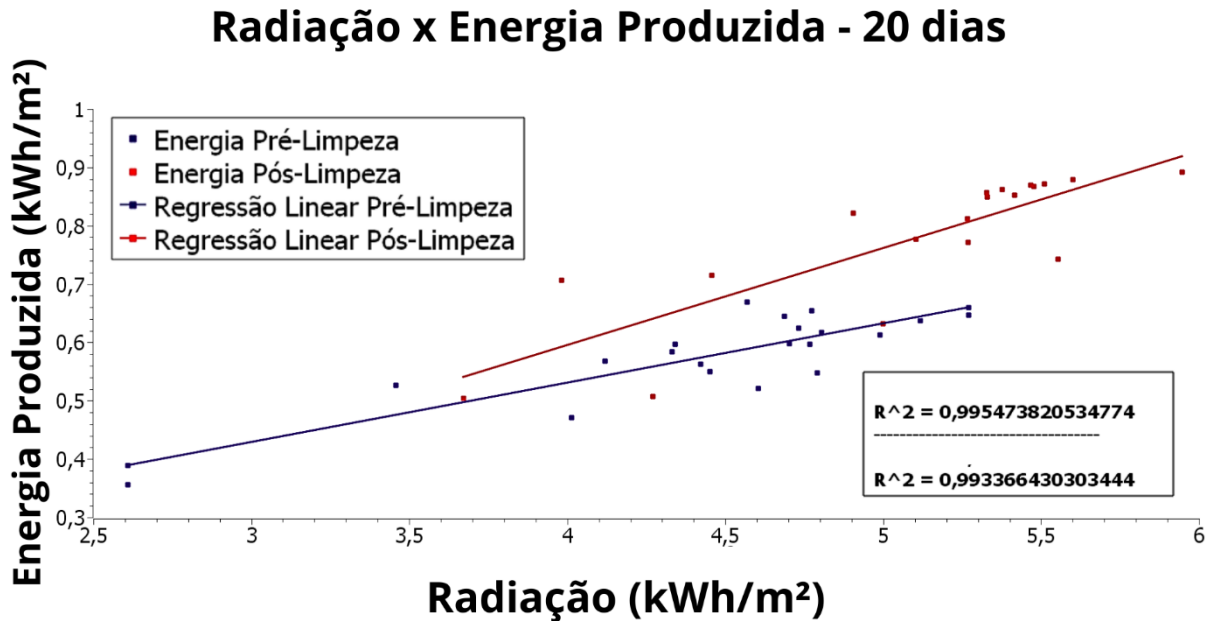
Podemos ver que as linhas de regressão linear traçadas para cada conjunto de dados reforçam essa conclusão. A linha vermelha (pós-limpeza) possui uma inclinação visivelmente mais acentuada do que a linha azul (pré-limpeza). Essa maior inclinação representa uma taxa de conversão mais alta, ou seja, uma maior eficiência. Para cada unidade de radiação (kWh/m^2), o sistema passou a gerar uma quantidade maior de energia elétrica após a remoção da sujidade.

É importante mencionar que os níveis de radiação antes e após a limpeza variaram de forma significativa, o que pode prejudicar a comparação e a determinação do efeito da limpeza. O ideal é que os níveis de radiação fossem próximos, representando dias similares, ensolarados ou nublados por exemplo, em ambos os cenários, para que a comparação pré e pós-limpeza fosse feita em condições análogas. No entanto, é importante destacar que a análise realizada com a regressão linear permite estimar uma tendência para cada grupo de dados, e comparar tais grupos, mesmo com diferentes níveis de radiação.

4.1.2 Análise de 20 dias

A Figura 16 mostra o gráfico de dispersão da radiação incidente e da energia gerada para o sistema fotovoltaico ao longo de um intervalo de 20 dias anteriores e 20 dias posteriores à limpeza dos módulos.

Figura 16 – Radiação incidente nas estações e energia gerada pela usina A, 20 dias antes e após a limpeza.



Fonte: o autor.

O segundo gráfico, que amplia o período de observação dos dados para 20 dias, mostra de maneira ainda mais robusta as conclusões sobre a eficácia da limpeza dos módulos na usina A. Afinal, há mais pontos com níveis de radiação similares nos dois grupos de dados.

O primeiro ponto a se notar é, novamente, o impacto significativo da limpeza. Os dados do período pós-limpeza (pontos vermelhos) se encontram em um patamar de produção de energia nitidamente superior aos dados do período pré-limpeza (pontos azuis). Essa separação gráfica indica um ganho de geração obtido pela remoção da camada de sujeidade que impedia a captação plena da irradiância solar.

Os coeficientes de Pearson encontrados para os conjuntos de dados pré e pós-limpeza foram de 0,8339 e 0,8331 respectivamente, indicando forte correlação linear. Neste gráfico, é notório que a relação entre a radiação e a energia produzida é linear e positiva em ambos os cenários. Os coeficientes de determinação (R^2) mostram um bom ajuste do modelo linear aos dados. Tanto o R^2 pré-limpeza ($\approx 0,9954$) quanto o pós-limpeza ($\approx 0,9933$) são bem altos, o que indica e mostra que mais de 99% da variação na energia gerada é explicada pela quantidade de radiação solar. Isso demonstra a forte correlação da performance da usina com a disponibilidade de sol, um resultado satisfatório que valida a qualidade dos dados utilizados.

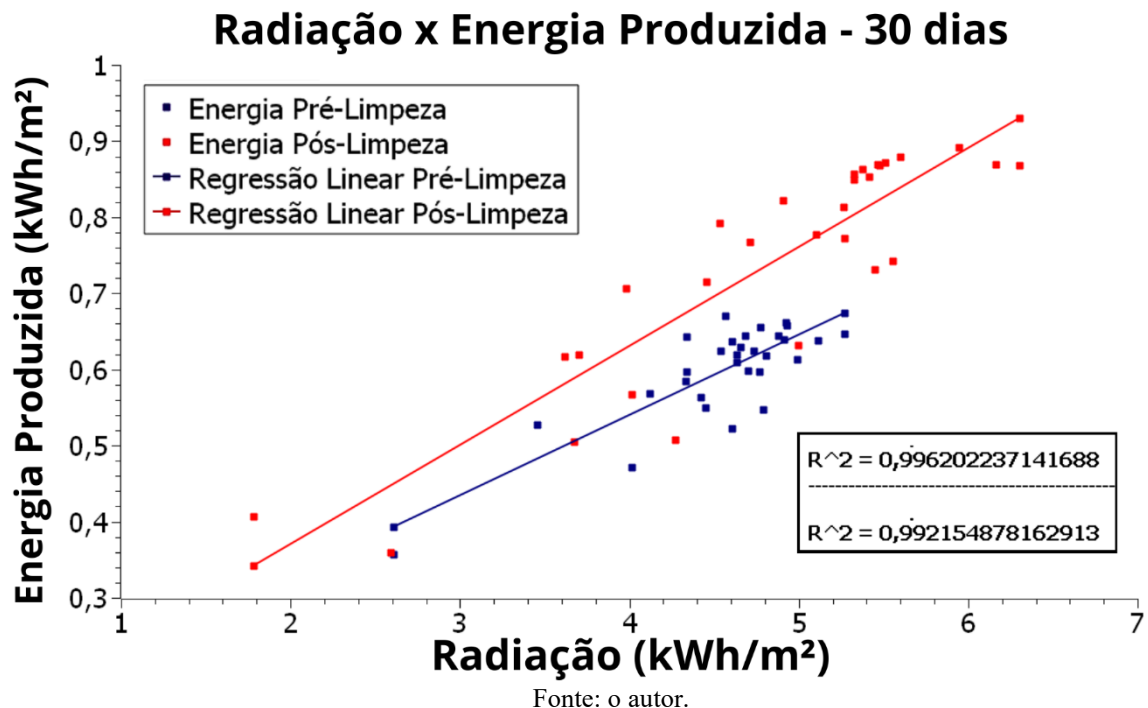
O ponto principal a se notar da análise está nas linhas de regressão. A linha vermelha, que representa o desempenho pós-limpeza, está posicionada acima e possui uma inclinação mais acentuada que a linha azul. Essa inclinação maior demonstra a maior eficiência do sistema.

O gráfico de 20 dias, por cobrir um período mais longo e com uma maior variabilidade a respeito dos valores de radiação, demonstra com mais solidez esta afirmação.

4.1.3 Análise de 30 dias

A Figura 17 mostra o gráfico de dispersão da radiação incidente e da energia gerada para o sistema fotovoltaico ao longo de um intervalo de 30 dias anteriores e 30 dias posteriores à limpeza dos módulos.

Figura 17 – Radiação incidente nas estações e energia gerada pela usina A, 30 dias antes e após a limpeza.



Já neste gráfico, ao estender o período de análise para 30 dias antes e 30 dias depois da limpeza, tem-se resultados ainda mais robustos e conclusivos sobre o impacto positivo da manutenção na usina A. A maior densidade de pontos de dados e a maior variedade de condições de radiação solar resulta em um grau mais elevado de confiabilidade às conclusões.

Em primeira observação, consistente com os gráficos anteriores, é visível o ganho de performance. Os dados pós-limpeza (pontos vermelhos) formam um agrupamento distinto e superior aos dados pré-limpeza (pontos azuis). Para níveis de radiação semelhantes (eixo X), a energia produzida correspondente (eixo Y) é, para a maior parte dos pontos, maior após a limpeza. Este deslocamento vertical da nuvem de pontos nos mostra de forma clara o aumento da geração de energia, que estava sendo perdida por conta do alto acúmulo de sujeira nos painéis fotovoltaicos da usina A.

Os coeficientes de Pearson encontrados para os conjuntos de dados pré e pós-limpeza foram de 0,8191 e 0,8930 respectivamente, indicando forte correlação linear. A relação entre radiação e produção de energia mantém-se novamente como os gráficos anteriores, de forma linear e positiva, como seria de se esperar para um sistema fotovoltaico funcional. Os coeficientes de determinação (R^2) de 0,9962 para o período pré-limpeza e de 0,9921 para o pós-limpeza também são considerados satisfatórios. Esses valores indicam que mais de 99% da variabilidade na geração de energia é explicada pela intensidade da radiação solar, utilizando o modelo linear, o que valida a alta qualidade e consistência dos dados coletados ao longo de todo o período.

Para os dados apresentados nos gráficos acima, encontrou-se os coeficientes angulares e de determinação mostrados na Tabela 1, encontrados para as regressões lineares antes (A_S) e após a limpeza (A_L), considerando 10, 20 e 30 dias. A análise dos dados coletados através dos cálculos para a usina A, nos permite quantificar com precisão o impacto da limpeza na melhoria da produção do sistema fotovoltaico, representando os dados visuais observados nos gráficos de 10, 20 e 30 dias, em resultados numéricos.

Tabela 1 – Coeficientes angulares e de determinação antes e após a limpeza para a usina A.

Período	A_S	$R^2 (A_S)$	A_L	$R^2 (A_L)$	$\Delta\%$	Δ
30 dias	$0,1059 \pm 0,0140$	0,9962	$0,1301 \pm 0,0126$	0,9921	22,85%	0,0242
20 dias	$0,1018 \pm 0,0159$	0,9954	$0,1664 \pm 0,0268$	0,9933	63,46%	0,0646
10 dias	$0,1106 \pm 0,0205$	0,9953	$0,1978 \pm 0,0318$	0,9998	78,84%	0,0872

Fonte: o autor.

Um dos pontos principais desta análise, está focado nos coeficientes angulares (A_S e A_L), que representam a inclinação das retas de regressão e, em termos físicos, a taxa de conversão de energia da usina A. Eles são uma estimativa da eficiência do sistema, indicando quantos kWh/m² de eletricidade são gerados para cada kWh/m² de radiação solar incidente. Podemos observar que, em todos os períodos, o coeficiente pós-limpeza (A_L) é significativamente maior que o pré-limpeza (A_S). No recorte de 30 dias, por exemplo, a eficiência de conversão saltou de 0,1059 para 0,1301, mostrando que a usina A se tornou mais eficiente após a manutenção da mesma.

Conseguimos reforçar tal argumento pelos coeficientes de determinação (R^2). Com valores que variam entre 0,9921 e 0,9998, indicam que o modelo de regressão linear descreve a relação entre radiação e energia produzida com desempenho satisfatório. Um R^2 tão próximo

de 1, significa que o modelo é, portanto, os coeficientes angulares calculados, são uma representação aceitável da melhoria da performance do sistema fotovoltaico.

Com a validade do modelo estabelecida, a quantificação do impacto da limpeza é expressa pelas métricas de ganho de performance ($\Delta\%$ e Δ). A métrica de maior impacto, o ganho percentual de eficiência ($\Delta\%$), revelou um aumento de aproximadamente 79% na análise de 10 dias, 63% na de 20 dias, e 23% na de 30 dias.

É possível observar também, a variação no ganho percentual. Nesse sentido, é interessante destacar que, períodos de análise mais longos fornecem parâmetros mais estáveis e confiáveis em relação ao ganho de performance. No entanto, a usina também está sujeita a um efeito maior de sujidade conforme o tempo passa, após a limpeza.

O período de 10 dias, pelo fato de ser mais curto, é mais suscetível a flutuações e condições climáticas específicas que podem maximizar o ganho aparente. Em contrapartida, o período de 30 dias abrange uma gama muito maior de condições meteorológicas, diluindo picos de performance e oferecendo um indicador mais conservador e confiável. Portanto, o valor de 22,85% tende a ser o mais representativo do ganho de eficiência que pode ser esperado da limpeza em projeções de longo prazo.

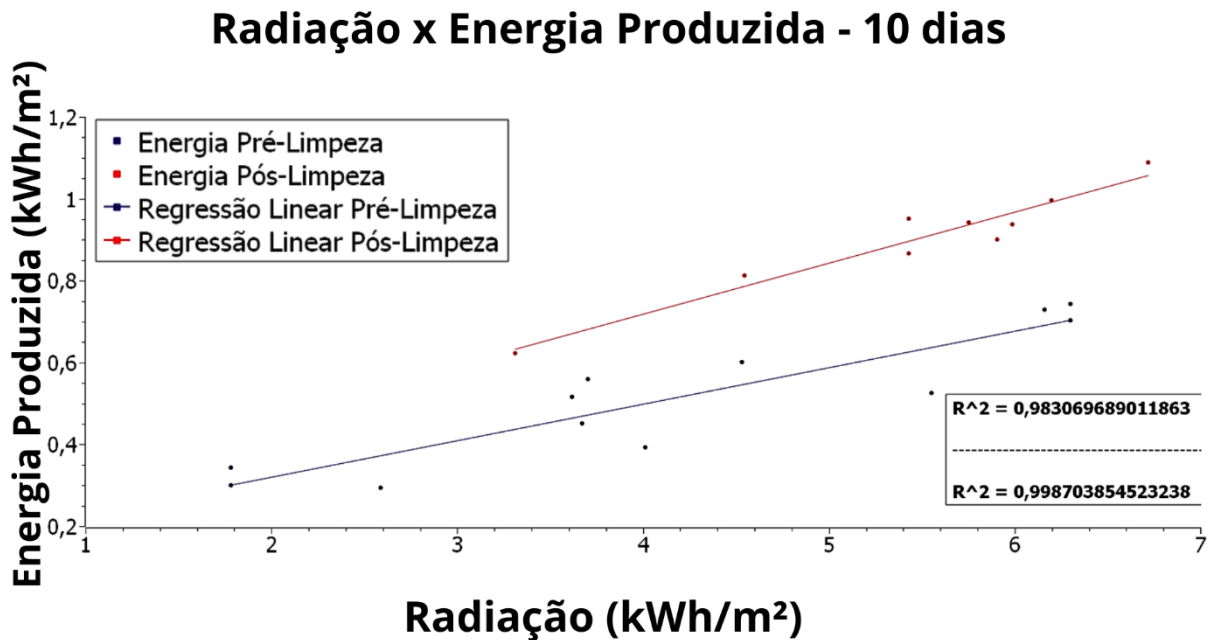
Considerando a metodologia apresentada na seção 3.7.6, obteve-se as estimativas de ganho obtidos com a limpeza em kWh e em reais: para 10 dias 94 kWh e R\$ 99,64, para 20 dias 154 kWh e R\$ 163,75, e para 30 dias 192 kWh e R\$ 204,31. É importante destacar que esses valores foram obtidos com dados diários de geração, e com a estimativa da radiação incidente na usina por meio de média das estações meteorológicas mais próximas. Além disso, considera apenas o ganho em 30 dias. Assim, não deve ser analisado como o ganho financeiro total com a limpeza.

4.2 USINA B

4.2.1 Análise de 10 dias

A Figura 18 mostra o gráfico de dispersão da radiação incidente e da energia gerada para o sistema fotovoltaico B ao longo de um intervalo de 10 dias anteriores e 10 dias posteriores à limpeza dos módulos.

Figura 18 – Radiação incidente nas estações meteorológicas próximas e energia gerada pela Usina B, 10 dias antes e após a limpeza.



Fonte: o autor.

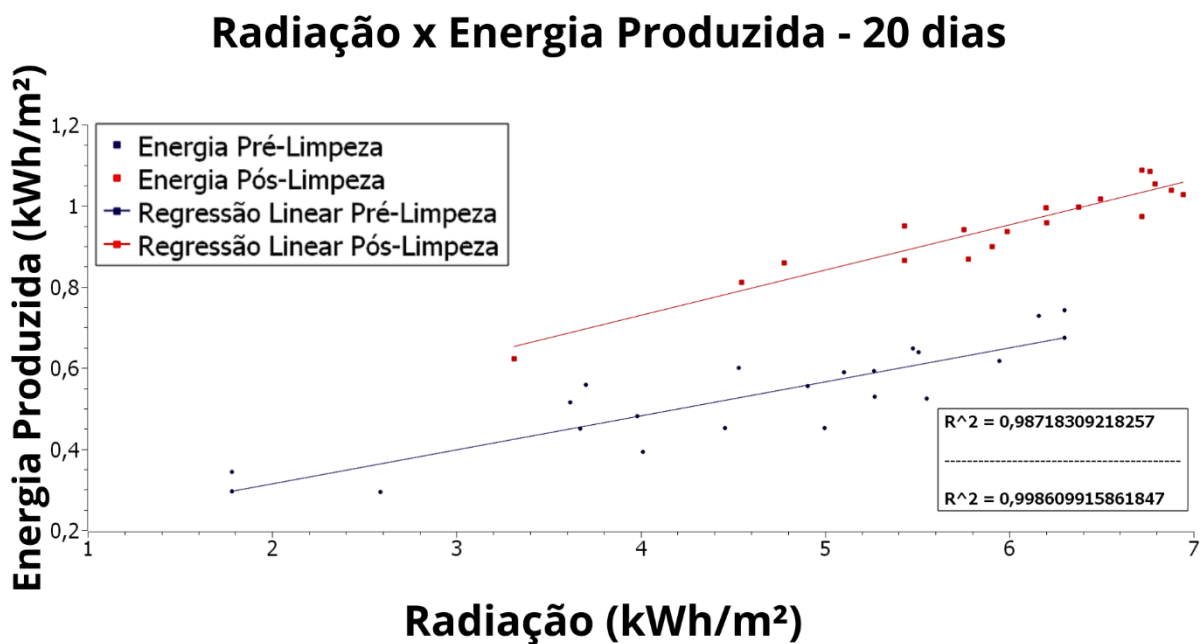
A inspeção visual desse gráfico demonstra, de forma clara, uma segregação distinta entre os dois conjuntos de dados. Os pontos que representam o período pós-limpeza (vermelhos) apresentam-se em um patamar de geração de energia bem superior aos do período de pré-limpeza (azuis). Este deslocamento vertical nos mostra que, para níveis de radiação solar equivalentes, a usina produziu significativamente mais energia após a remoção da sujidade, que atuava como uma barreira à captação da irradiância solar da mesma.

Os coeficientes de Pearson encontrados para os conjuntos de dados pré e pós-limpeza foram de 0,8734 e 0,9641 respectivamente, indicando forte correlação linear. Através da análise por meio das regressões lineares, conseguimos reiterar essa observação. Um dos pontos principais da análise, está na comparação das inclinações das duas retas de regressão. A reta vermelha (pós-limpeza) apresenta uma inclinação visivelmente mais acentuada que a azul (pré-limpeza). Como a inclinação da reta está relacionada a eficiência de conversão do sistema da Usina B, essa diferença indica que a conversão de energia solar em energia elétrica após o procedimento de limpeza da mesma se tornou mais eficiente.

4.2.2 Análise de 20 dias

A Figura 19 mostra o gráfico de dispersão da radiação incidente e da energia gerada para o sistema fotovoltaico B ao longo de um intervalo de 20 dias anteriores e 20 dias posteriores à limpeza dos módulos.

Figura 19 – Radiação incidente nas estações meteorológicas próximas e energia gerada pela Usina B, 20 dias antes e após a limpeza.



Fonte: o autor.

Na análise do gráfico de desempenho da Usina B, ao aumentarmos o período de observação da usina para 20 dias, reforça-se as conclusões iniciais, nos dando evidências ainda mais robustas sobre o ganho de performance resultantes da limpeza dos módulos fotovoltaicos. A segregação visual entre os conjuntos de dados pré e pós-limpeza torna-se mais evidente.

Além disso, os pontos que representam o período pré-limpeza (azuis) não apenas se situam em um patamar de produção inferior, mas também exibem uma dispersão consideravelmente maior em torno da sua linha de tendência. Em forte contraste, os dados pós-limpeza (vermelhos) formam um agrupamento coeso e linear em um nível de produção mais elevado, ilustrando a imediata recuperação da capacidade de geração da usina após a limpeza dos seus módulos.

Os coeficientes de Pearson encontrados para os conjuntos de dados pré e pós-limpeza foram de 0,8402 e 0,9446 respectivamente, indicando forte correlação linear. A análise do

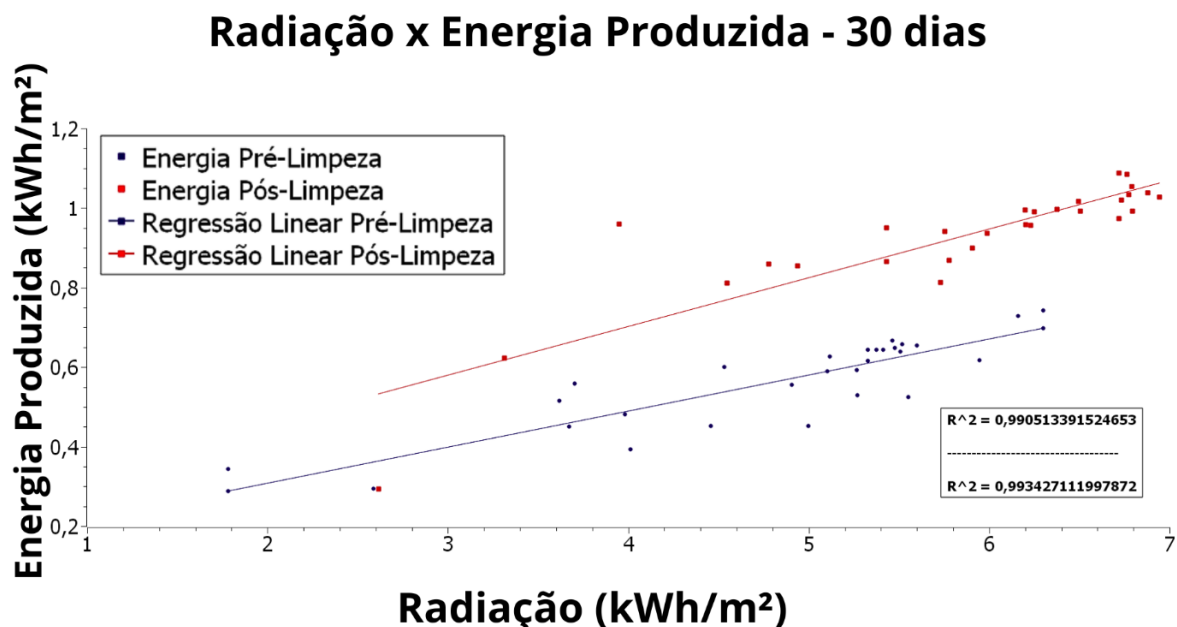
coeficiente de determinação (R^2) pré-limpeza, de aproximadamente 0,9871, indica que o modelo conseguiu ter boa aderência aos dados, e é acompanhado por uma pequena dispersão visual. Após a limpeza, o R^2 atinge cerca de 0,9986, um valor que se aproxima ainda mais da unidade. Isso indica que o modelo linear obtido, conseguiu representar a relação da radiação e da energia, o que pode ser confirmado visualmente pela menor dispersão dos pontos vermelhos em relação à sua reta.

O ganho de eficiência é quantificado pela inclinação das retas de regressão. A reta vermelha (pós-limpeza) possui uma inclinação maior que a reta azul (pré-limpeza), nos mostrando que a taxa de conversão de energia solar em energia elétrica aumentou de forma significativa na usina.

4.2.3 Análise de 30 dias

A Figura 20 mostra o gráfico de dispersão da radiação incidente e da energia gerada para o sistema fotovoltaico B ao longo de um intervalo de 30 dias anteriores e 30 dias posteriores à limpeza dos módulos.

Figura 20 – Radiação incidente nas estações meteorológicas próximas e energia gerada pela Usina B, 30 dias antes e após a limpeza.



Fonte: o autor.

A análise do desempenho da Usina B considerando intervalos de 30 dias, permite observar o impacto da limpeza dos módulos num horizonte temporal maior, consolidando as tendências observadas nos períodos mais curtos, em um conjunto de dados maior e

estatisticamente significativo. No entanto, é importante mencionar que os módulos podem sofrer com o efeito de sujidade conforme aumenta-se o período de análise.

A inspeção visual do gráfico nos mostra de uma forma mais clara, a ampla separação entre o desempenho pré e pós-manutenção. Os dados de energia produzida antes da limpeza (pontos azuis) estão concentrados em uma faixa de geração inferior e apresentam uma dispersão notável, indicando uma performance abaixo do esperado devido a sujeira nos módulos. Em contrapartida, os dados pós-limpeza (pontos vermelhos) formam um agrupamento linear coeso em um patamar de produção visivelmente superior, demonstrando a recuperação imediata e sustentada da capacidade de geração da usina.

Os coeficientes de Pearson encontrados para os conjuntos de dados pré e pós-limpeza foram de 0,8559 e 0,8682 respectivamente, indicando forte correlação linear. Já a análise dos coeficientes de determinação (R^2), complementa tal observação. O valor de R^2 para o período pré-limpeza, de aproximadamente 0,9905, confirma que o modelo conseguiu representar a relação entre radiação e energia. O mesmo ocorre no período pós-limpeza, com o valor de 0,9934.

O ganho de eficiência é demonstrado pela comparação das retas de regressão. A reta vermelha (pós-limpeza) possui uma inclinação maior que a azul (pré-limpeza), o que, igualmente aos gráficos de 10 e 20 dias anteriores da Usina B, representa uma taxa de conversão energética superior. Ao abranger 30 dias, o que inclui mais condições climáticas, este resultado demonstra que a limpeza proporcionou um aumento de eficiência significativo e consistente.

Podemos concluir que o gráfico de 30 dias para a Usina B reforça o argumento de que a limpeza é uma intervenção de manutenção importante. A análise demonstra que o procedimento não apenas eleva substancialmente a produção de energia, mas também aprimora a previsibilidade e a estabilidade operacional do sistema a longo prazo.

Na Tabela 2, apresentamos os coeficientes angulares e de determinação para a Usina B, que serve como uma consolidação matemática das tendências visuais que podemos observar nos gráficos de 10, 20 e 30 dias, permitindo uma análise quantitativa mais precisa do impacto da limpeza na performance da usina.

Um dos pontos importantes da análise está nos coeficientes angulares (A_s e A_l), que representam a taxa de conversão de energia e, portanto, um indicativo da eficiência do sistema. A tabela nos mostra numericamente o que os gráficos indicam visualmente: em todos os três períodos, o coeficiente angular pós-limpeza (A_l) é significativamente maior que o coeficiente pré-limpeza (A_s). Observamos que no período de 30 dias, por exemplo, a eficiência de conversão aumentou de 0,0885 para 0,1226. Esta diferença é a razão pela qual a reta de

regressão pós-limpeza (vermelha) é mais inclinada, confirmando que a usina se tornou mais eficiente após a limpeza de seus respectivos módulos.

As colunas de ganho de performance ($\Delta\%$) quantificam o impacto direto da intervenção. A limpeza dos módulos gerou um aumento do coeficiente de inclinação de aproximadamente 68% na análise de 10 dias, 50% na de 20 dias, e 39% na de 30 dias. A diminuição do ganho percentual conforme o período de análise se alonga, sugere que períodos mais longos nos entregam uma média mais estável. O período de 30 dias, ao abranger uma maior quantidade de dados de condições climáticas, diminui variações de curto prazo e nos oferece um indicador mais completo.

Consequentemente, o ganho de 38,53% deve ser considerado o valor mais conservador do aumento de eficiência médio obtido com a limpeza dos módulos. No entanto, é válido ressaltar que a queda do ganho percentual também pode estar relacionada ao efeito de sujidade, que aumenta com o passar do tempo. Através da análise dos gráficos e da tabela para a Usina B, concluímos que a limpeza dos módulos resultou em um ganho de performance significativo.

Tabela 2 – Coeficientes angulares e de determinação antes e após a limpeza para a usina B.

Período	A_s	$R^2 (A_s)$	A_L	$R^2 (A_L)$	$\Delta\%$	Δ
30 dias	0,0885 +/- 0,0174	0,9905	0,1226 +/- 0,0135	0,9934	38,53%	0,0341
20 dias	0,0745 +/- 0,0216	0,9871	0,1116 +/- 0,0094	0,9986	49,80%	0,0371
10 dias	0,07414 +/- 0,0312	0,9831	0,1247 +/- 0,0130	0,9987	68,20%	0,05056

Fonte: o autor.

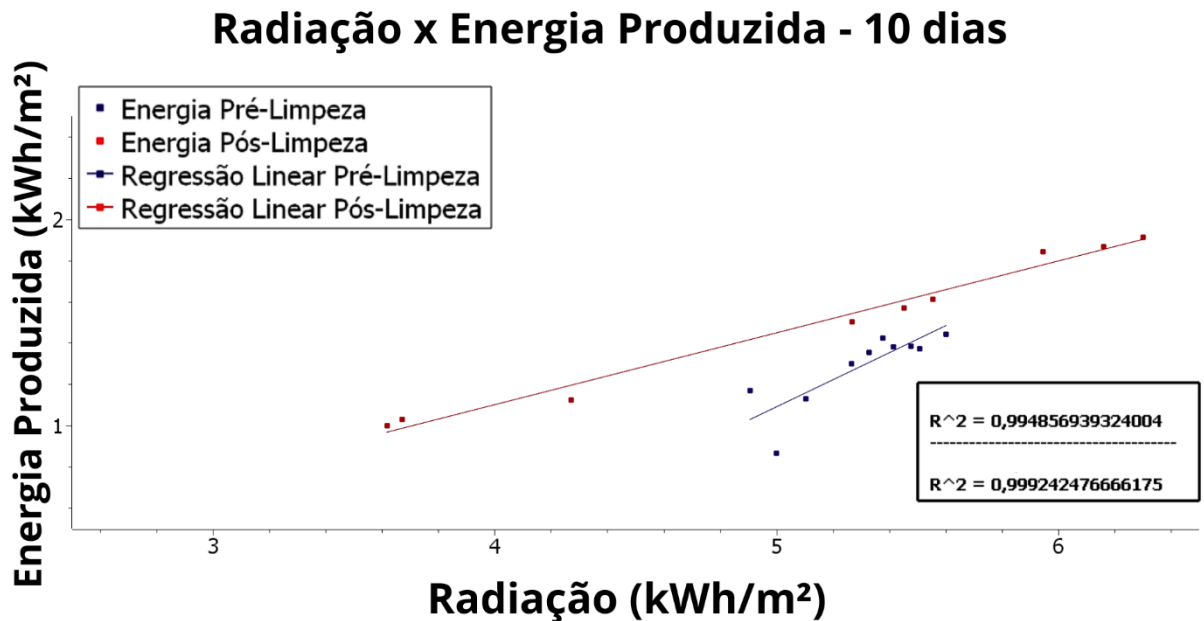
Com intuito de caracterizar o ganho obtido em reais, utilizou-se a metodologia apresentada na seção 3.7.6, obtendo-se as seguintes estimativas: para 10 dias 472 kWh e R\$ 505,00, para 20 dias 1120 kWh e R\$ 1187,08, e para 30 dias 1538 kWh e R\$ 1630,65. Portanto, os resultados nos mostram que a limpeza como uma prática de manutenção foi muito importante na otimização da Usina B.

4.3 USINA C

4.3.1 Análise de 10 dias

A Figura 21 representa a análise do rendimento do sistema fotovoltaico ao longo de um intervalo de 10 dias anteriores e 10 dias posteriores à limpeza dos módulos.

Figura 21 – Radiação incidente nas estações meteorológicas próximas e energia gerada pela Usina C, 10 dias antes e após a limpeza.



Fonte: o autor.

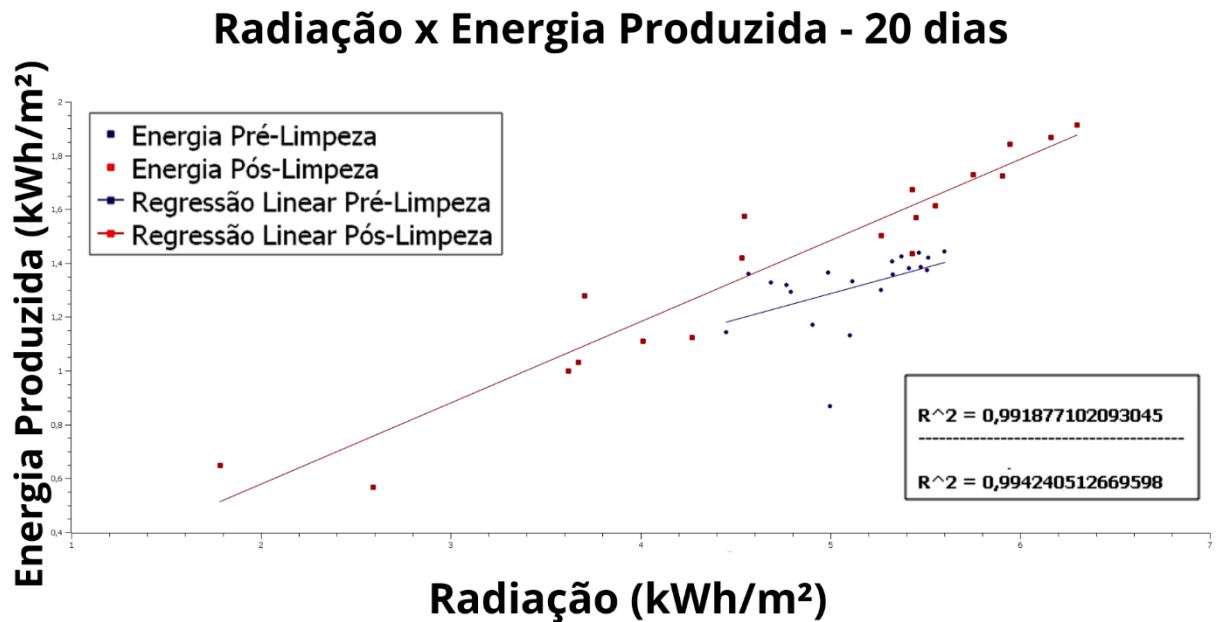
Neste gráfico, é possível verificar que apesar da reta pós-limpeza (vermelho) estar acima da reta pré-limpeza (azul), a inclinação do modelo pré-limpeza é maior que a inclinação do pós-limpeza. Analisando a tendência da reta azul, observa-se que ela cruzaria a reta vermelha, o que caracteriza um modelo linear pré-limpeza com possibilidade de maior energia gerada, comparado ao modelo linear pós-limpeza para dados com elevada radiação incidente. Este comportamento é contraditório em relação aos resultados obtidos para as outras usinas.

Os coeficientes de Pearson encontrados para os conjuntos de dados pré e pós-limpeza foram de 0,8360 e 0,9923 respectivamente, indicando forte correlação linear. Nesse cenário, é importante destacar que os pontos azuis estão aglomerados em um pequeno intervalo de radiação, entre 4,8 e 5,8 kWh/m^2 . Isto faz com que o modelo obtido para os dados pré-limpeza não seja adequado para estimar a energia gerada em cenários com baixa ou elevada radiação. Isto acontece porque nos 10 dias anteriores à limpeza os níveis de radiação incidente variaram pouco, diferentemente dos dias pós-limpeza, o que dificulta a comparação.

4.3.2 Análise de 20 dias

A Figura 22 representa a análise do rendimento do sistema fotovoltaico ao longo de um intervalo de 20 dias anteriores e 20 dias posteriores à limpeza dos módulos.

Figura 22 – Radiação incidente nas estações meteorológicas próximas e energia gerada pela Usina C, 20 dias antes e após a limpeza.



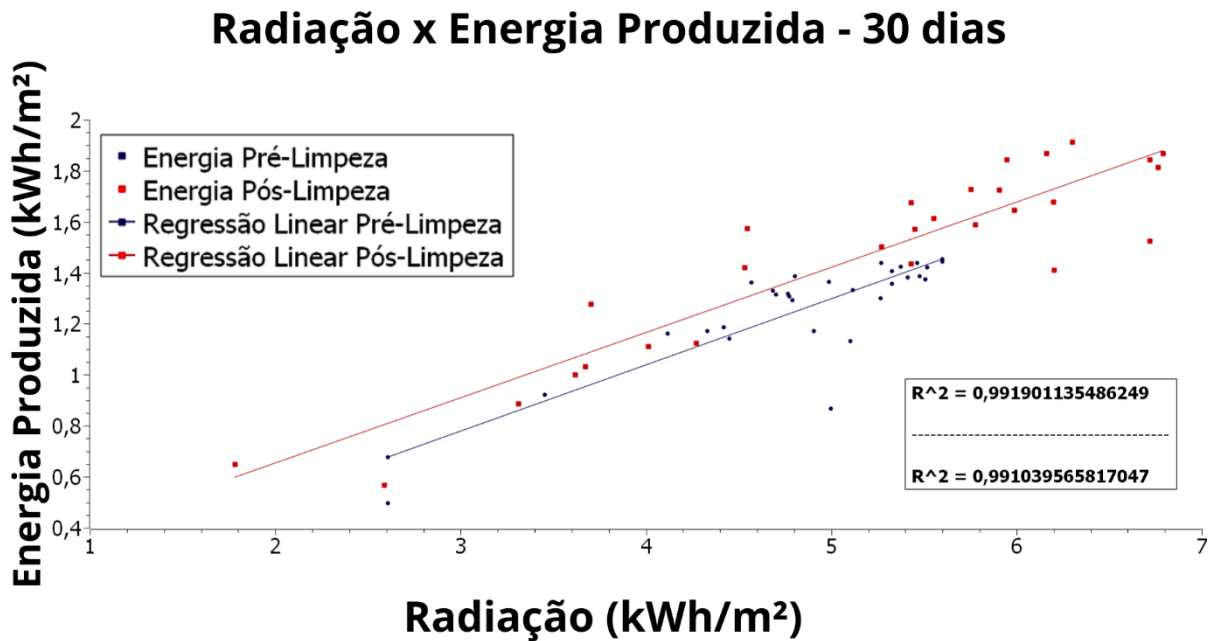
Fonte: o autor.

Nesse gráfico, o comportamento da inclinação das retas pré e pós-limpeza foi mais alinhado com o resultado esperado: a reta pós-limpeza possui inclinação maior. A diferença entre as duas retas não é tão expressiva, e os pontos azuis continuam aglomerados, dificultando a comparação. Os coeficientes de Pearson encontrados para os conjuntos de dados pré e pós-limpeza foram de 0,4809 e 0,9580 respectivamente. O baixo coeficiente encontrado para os dados pré-limpeza mostra que, neste cenário, a correlação linear é moderada. Já para os dados pós-limpeza o coeficiente uma correlação linear muito forte.

4.3.3 Análise de 30 dias

A Figura 23 representa a análise do rendimento do sistema fotovoltaico ao longo de um intervalo de 30 dias anteriores e 30 dias posteriores à limpeza dos módulos.

Figura 23 – Radiação incidente nas estações meteorológicas próximas e energia gerada pela Usina C, 30 dias antes e após a limpeza.



Fonte: o autor.

Nesse gráfico, é possível observar que a diferença entre as duas retas, pré e pós-limpeza, é pequena, com o modelo pós-limpeza, superando com pequena vantagem. Os pontos azuis estão menos aglomerados, mas ainda assim, pouco distribuídos em relação à radiação incidente. Os coeficientes de Pearson encontrados para os conjuntos de dados pré e pós-limpeza foram de 0,8240 e 0,9210 respectivamente, indicando forte correlação linear.

A Tabela 3 mostra os coeficientes de inclinação pré e pós-limpeza para os diferentes intervalos de tempo analisados. Para 30 dias, a variação percentual do coeficiente de inclinação pequena, mas positiva. Isto mostra que, analisando o coeficiente de inclinação, não há diferença significativa de desempenho do sistema pré e pós-limpeza. No cenário de 20 dias, a diferença percentual foi de 56%, o que representa um ganho de desempenho considerável.

No entanto, ao analisar o cenário de 10 dias, a diferença percentual foi negativa, isto é, neste cenário, o coeficiente de inclinação antes da limpeza foi menor que o coeficiente pós limpeza. Isso pode ter acontecido por causa da aglomeração dos pontos pré-limpeza em um pequeno intervalo de radiação, o que inviabilizou a utilização do modelo para prever a energia gerada em outros intervalos de radiação. Ademais, conforme a Figura 13, a usina está um local com elevado nível de poeira, próximo a uma estrada de terra, o que pode influenciar negativamente no efeito da limpeza. A própria umidade residual após a limpeza pode resultar em um maior acúmulo de sujeira.

Tabela 3 – Coeficientes angulares e de determinação antes e após a limpeza para a usina C.

Período	A_s	$R^2 (A_s)$	A_L	$R^2 (A_L)$	$\Delta\%$	Δ
30 dias	$0,2547 \pm 0,0339$	0,9919	$0,2619 \pm 0,0300$	0,9910	2,83%	0,0072
20 dias	$0,1923 \pm 0,0827$	0,9918	$0,3015 \pm 0,0219$	0,9942	56,79%	0,1092
10 dias	$0,6541 \pm 0,1512$	0,9948	$0,3480 \pm 0,0163$	0,9992	-46,80%	-0,3061

Fonte: o autor.

Considerando a metodologia apresentada na seção 3.7.6, obteve-se as seguintes estimativas para o ganho em reais, devido à limpeza: para 10 dias 799 kWh e R\$ 463,85, para 20 dias 887 kWh e R\$ 514,47, e para 30 dias 959 kWh e R\$ 556,43. É importante destacar que apesar da variação negativa do coeficiente de inclinação, a variação em financeira em reais, foi positiva. Isto acontece porque mesmo tendo inclinação maior, a reta azul ainda fornece valores de energia gerada menores que os pontos vermelhos, para a maior parte desses pontos pós-limpeza.

Para as usinas A e B, foram encontradas variações positivas e significativas do coeficiente angular para as regressões lineares comparando antes e depois da limpeza. Para a usina A obteve-se um aumento no coeficiente angular de 22,85% considerando o intervalo de 30 dias. A usina B obteve um resultado ainda mais considerável, de 38% de aumento. A usina C, teve um resultado de apenas 2,83% considerando o mesmo intervalo de tempo.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSÃO, TRABALHOS FUTUROS E CONTRIBUIÇÕES

Os objetivos deste trabalho foram alcançados satisfatoriamente. A revisão bibliográfica a respeito de tópicos sobre a energia fotovoltaica foi realizada e deu base para a execução do trabalho. Os impactos da sujidade foram estudados na literatura e observados nos resultados encontrados. É válido mencionar que a abordagem utilizada para analisar os efeitos da sujidade possui algumas limitações. Além disso, os dados utilizados também são limitados e possuem influência de fatores não considerados na análise.

Neste sentido, apesar de na análise da usina C encontrarmos dados que dificultaram a análise da sujidade via regressão linear, nas usinas A e B foram encontrados resultados satisfatórios. A variação negativa no coeficiente angular, ao analisar o intervalo de 10 dias para a usina C é um exemplo da limitação da metodologia utilizada perante dados de radiação muito diferentes antes e após a limpeza. Neste ponto, é interessante destacar que metodologias baseadas em regressão linear simples dependem fundamentalmente da variância dos dados de entrada. Como os dados pré-limpeza da usina C ficaram aglomerados em um único ponto de radiação, neste caso, dias de sol parecidos, o modelo matemático falha em criar uma reta confiável. Isso demonstra que, para validar essa análise, é recomendável ter dados de dias nublados e ensolarados tanto antes quanto depois da limpeza.

É válido destacar que os dados também possuem influência de fatores como problemas na rede elétrica, que podem levar à queda do disjuntor da usina. Além disso, a usina C se encontra em meio rural, instalada próximo ao solo e ao lado de uma estrada de terra. Destaca-se ainda, que a análise do aumento de energia gerada após a limpeza trouxe resultados com baixa relevância financeira, mas positivos.

As variações dos coeficientes angulares para as usinas A e B foram maiores que as encontradas para a maior parte das usinas analisadas na dissertação da referência (22) por exemplo. Porém, é válido destacar que esta referência apresenta apenas algumas análises de dados com resolução diária, e outras com resolução horária, o que difere do cenário apresentado neste trabalho, em que foram realizadas apenas análises com resolução diária. Outro diferencial do presente trabalho é a apresentação de valores, em reais, de ganhos obtidos com a limpeza.

Além disso, o ganho financeiro estimado para a usina B foi significativo. Neste ponto é interessante destacar que a usina B está em um ambiente urbano, bem diferente do ambiente da

usina C. Também é válido destacar que o ganho em produção de energia elétrica devido a limpeza deve-se manter por vários meses, principalmente em um ambiente urbano. Ademais, a importância da limpeza não se resume ao ganho financeiro pontual, visto que a sujeira no longo prazo pode se tornar cada vez mais difícil de limpar e resultar em uma perda de energia gerada contínua.

Assim, o estudo realizado sobre o impacto da sujeira nas usinas fotovoltaicas operantes oferece uma compreensão mais aprofundada dos desafios enfrentados na manutenção e otimização da eficiência na geração de energia solar, e fornece algumas contribuições que podem ser base para pesquisas e modelagens mais aprofundadas. Verificou-se por exemplo, uma diferença de desempenho mais considerável devido à limpeza, na usina localizada em área urbana sobre o telhado, e um baixo retorno na usina montada próximo ao solo, em área rural.

A quantidade de dados disponíveis para a análise foi um fator limitante, uma vez que inviabiliza o uso de modelos muito complexos, que estes estariam sujeitos ao problema do *overfitting*. Dessa forma, como trabalhos futuros, sugere-se a realização de estudos mais abrangentes, isto é, em diferentes condições climáticas e geográficas, para entender melhor os padrões de acumulação de sujeira e seus efeitos na eficiência das usinas fotovoltaicas. O uso de dados com resolução horária e a utilização de regressão linear com parâmetro de intercepto nulo também podem ser aperfeiçoamentos válidos.

Sugere-se também realizar uma avaliação do impacto econômico da sujeira mais profunda, considerando um horizonte de tempo maior, antes e após a limpeza, a fim de verificar, por exemplo, por quanto tempo os ganhos de energia gerada com a limpeza se mantêm e, portanto, qual o impacto no longo prazo. Sugere-se avaliar ainda, os problemas causados pela sujeira caso esta não seja retirada com frequência. Ademais, a investigação de novas tecnologias e métodos de limpeza automatizada que possam otimizar o processo de manutenção das usinas fotovoltaicas também é relevante.

REFERÊNCIAS

- 1 CEPEL-CRESESB. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2014. Acesso em: 18 fev. 2024.
- 2 PORTAL SOLAR. **História da energia solar: quem criou a energia solar?** Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/historia-e-origem-da-energia-solar>. Acesso em: 18 fev. 2024.
- 3 BRITO, Miguel Centeno. **Meio Século de História Fotovoltaica**. 2006. Disponível em: <http://solar.fc.ul.pt/gazeta2006.pdf>. Acesso em: 22 jan. 2023.
- 4 SILVA, Tiago de Lima. **PROTÓTIPO PARA UM SISTEMA DE CAPTAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA COM CONTROLE PID E MPPT**. 2018. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Centro Universitário Augusto Motta, Rio de Janeiro, 2018.
- 5 PORTAL SOLAR. **Célula fotovoltaica: o que é? Como funciona?** Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/celula-fotovoltaica.html>. Acesso em: 18 fev. 2024.
- 6 REZENDE, Lorrane Alves Antunes. **Emprego da Energia Fotovoltaica Voltada para Casas Populares**. 2018. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações, Universidade Federal de Uberlândia, Patos de Minas, 2018.
- 7 CORDEIRO, A. **O que é, tipos e como funciona um módulo fotovoltaico**. Disponível em: <https://www.cordeiro.com.br/o-que-e-tipos-e-como-funciona-um-modulo-fotovoltaico/>. Acesso em: 18 fev. 2024.
- 8 PEREIRA, Luis Fernando Segala. **Processo Automático para Limpeza de Sistema Fotovoltaico**. 2019. TCC (Graduação) – Universidade do Sul de Santa Catarina, 2019.
- 9 SAYYAH, Arash; HORENSTEIN, Mark N.; MAZUMDER, Malay K.. **Energy yield loss caused by dust deposition on photovoltaic panels**. Solar Energy, [s.l.], v. 107, p.576-604, set. 2014. Elsevier BV. [http: dx.doi.org/10.1016/j.solener.2014.05.030](http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2014.05.030). Acesso em: 18 fev. 2024.
- 10 MAGHAMI, Mohammad Reza et al. **Power loss due to soiling on solar panel: A review**. Renewable And Sustainable Energy Reviews, [s.l.], v. 59, p.1307-1316, jun. 2016. Elsevier BV. [http: dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.044](http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.044). Acesso em: 18 fev. 2024.
- 11 LIMPA SOLAR. **Manual da limpeza de placas solares fotovoltaicas: tudo para o seu painel solar**. Disponível em: <https://www.limpasolar.com/post/manual-da-limpeza-de-placas-solares-fotovoltaicas-tudo-para-o-seu-painel-solar>. Acesso em: 19 fev. 2024.

- 12 LONGI SOLAR. **Manual de limpeza de módulos fotovoltaicos**. Disponível em: <https://genyx.com.br/novo-site/wp-content/uploads/2022/10/MANUAL-LIMPEZA-DE-MODULOS-PORTUGUES-MODULO-FOTOVOLTAICO-LONGI.pdf>. Acesso em: 19 fev. 2024.
- 13 MESSENGER, R.; VENTRE, J.; **Photovoltaic Systems Engineering**. 2. ed. Boca Raton, London, New York, Washington, D.C.: CRC Press, 435 p., 2005. Acesso em: 18 fev. 2024.
- 14 GAIO, João Nicolau; APOLINÁRIO, Kleverson Moisés. **Determinação Do Tempo Ótimo Para Limpeza De Painéis Fotovoltaicos Para Obtenção Da Melhor Produtividade** - Estudo De Caso Dos SFVCR's Implantados Na UTFPR. 2017. 85 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017.
- 15 SOLFÁCIL. **Conheça a tecnologia na limpeza dos módulos fotovoltaicos**. Blog Solfácil, [Belo Horizonte], 18 nov. 2019. Disponível em: <https://blog.solfacil.com.br/energia-solar/conheca-a-tecnologia-na-limpeza-dos-modulos-fotovoltaicos/>. Acesso em: 20 fev. 2024.
- 16 SOLAR CLEAN FACILITIES. **Equipamento**. Disponível em: <https://solarcleanfacilities.com.br/equipamento/>. Acesso em: 20 fev. 2024.
- 17 PORTAL SOLAR. **Passo a passo da fabricação do painel solar**. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/passa-a-passo-da-fabricacao-do-painel-solar.html>. Acesso em: 18 fev. 2024.
- 18 UNIVERSIDADE METODISTA. **Bateria Lition**. Disponível em: http://www.um.pro.br/arduino/index.php?c=Bateria_Lition. Acesso em: 18 fev. 2024.
- 19 CANAL SOLAR COMUNICAÇÃO LTDA. **Saiba os efeitos da sujeira nos módulos fotovoltaicos. Canal Solar**. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/saiba-os-efeitos-da-sujeira-nos-modulos-fotovoltaicos/>. Acesso em: 18 fev. 2024.
- 20 BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. Instituto Nacional de Meteorologia. **Dados Históricos Anuais**. Brasília, 2025. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>. Acesso em: 21 nov. 2025.
- 21 PORTELLA, Augustus Caeser Franke; NASCIMENTO, Ildon Rodrigues do; ALVES, Anatércia Ferreira; SCHEIDT, Gessiel Newton. **Estatística básica para os cursos de ciências exatas e tecnológicas**. Palmas: Universidade Federal do Tocantins, EDUFT, 2015.
- 22 TRAMONTIN, Letícia Recco. **Estudo e modelagem do impacto da sujeira no desempenho energético de sistemas fotovoltaicos**. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Energia) – Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade, Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2024.

- 23 MONTGOMERY, Douglas C.; PECK, Elizabeth A.; VINING, G. Geoffrey.
Introduction to linear regression analysis. 6. ed. Hoboken: John Wiley & Sons,
2021.

APÊNDICE A – CÓDIGO PRINCIPAL DO *SCRIPT*

```

const fs = require('fs');
const readline = require('readline');
const iconv = require('iconv-lite');
const linearRegression = require('./linear-regression')

const dateCol = 'Data';
const timeCol = 'Hora UTC';
const energyCol = 'ENERGIA PRODUZIDA (kWh)';
const normalizedEnergyCol = 'ENERGIA PRODUZIDA (kWh/m²)';
const precipitationCol = 'PRECIPITAÇÃO TOTAL, HORÁRIO (mm)';
const radiationCol = 'RADIACAO GLOBAL (Kj/m²)';
const normalizedRadiationCol = 'RADIACAO GLOBAL (KWh/m²)';
const umidadeCol = 'UMIDADE RELATIVA DO AR, HORARIA (%)';
// const temperaturaCol = 'TEMPERATURA DO AR - BULBO SECO, HORARIA (°C)';
// const ventoCol = 'TEMPERATURA DO AR - BULBO SECO, HORARIA (°C)';
const efficiencyCol = 'EFICIÊNCIA';
const limpezaCol = 'LIMPEZA';
const equalCol = 'ENERGIA IGUAL';
const numberOfStationsCol = 'N. ESTAÇÕES INMET';

const withoutCleanEstimatedEnergyCol = 'ENERGIA ESTIMADA SEM LIMPEZA (kWh/m²)';
const withCleanEstimatedEnergyCol = 'ENERGIA ESTIMADA COM LIMPEZA (kWh/m²)';
const realAndEstimatedEnergyDiffCol = 'DIFERENÇA ENTRE ENERGIA ESTIMADA E REAL (kWh/m²)' //! MULTIPLICAR PELA ÁREA
const estimatedMoneyCol = 'ESTIMATIVA DE GERAÇÃO COM LIMPEZA (R$)'

const usinas = [
  {
    arquivo: "xxxxx.csv", //A
    nomeFantasia: 'A',
    area: 60,
    dataLimpeza: "02/08/2023" ,
    precokWh: 1.06
  },
  {
    arquivo: "xxxxx.csv", //B
    nomeFantasia: 'B',
    area: 195,
    dataLimpeza: "31/08/2023",
    precokWh: 1.06
  },
  {
    arquivo: "xxxxx.csv", //C
    nomeFantasia: 'C',
    area: 280,
    dataLimpeza: "16/08/2023",
    precokWh: 0.58
  }
]
//! ESCOLHENDO USINA
const usina = usinas[2]

```

```

console.log(" ----- USINA " + usina.nomeFantasia)

function inverterDateString(date) {
  const [ano, mes, dia] = date.split('/');
  return `${dia}/${mes}/${ano}`;
}
function convertToNumber(string) {
  if(string == '') return 0;
  return parseFloat(string.replace(',', '.'));
}
function convertToNumberNoEmpty(string) {
  if(string == '') return '';
  return parseFloat(string.replace(',', '.'));
}
function convertNumberToStr(num) {
  // Format the float to a string with a maximum of three decimal places
  if(!num.toFixed()){
    console.log(num);
  }
  let formattedValue = num.toFixed(3);
  // Replace the decimal separator from '.' to ','
  return formattedValue.replace('.', ',');
}
const readingColumnFunctions = {
  'Data': inverterDateString,
  'Hora UTC': null,
  'PRECIPITAÇÃO TOTAL, HORÁRIO (mm)': convertToNumber,
  'RADIACAO GLOBAL (Kj/m²)': convertToNumber,
  'ENERGIA PRODUZIDA (kWh)': convertToNumber,
  'UMIDADE RELATIVA DO AR, HORARIA (%)': convertToNumberNoEmpty,
  // 'TEMPERATURA DO AR - BULBO SECO, HORARIA (°C)': convertToNumberNoEmpty,
  // 'VENTO, VELOCIDADE HORARIA (m/s)': convertToNumberNoEmpty
}
const writingColumnFunctions = {
  'Data': null,
  'Hora UTC': null,
  'PRECIPITAÇÃO TOTAL, HORÁRIO (mm)': convertNumberToStr,
  'RADIACAO GLOBAL (Kj/m²)': convertNumberToStr,
  'RADIACAO GLOBAL (KWh/m²)': convertNumberToStr,
  'ENERGIA PRODUZIDA (kWh)': convertNumberToStr,
  'ENERGIA PRODUZIDA (kWh/m²)': convertNumberToStr,
  'UMIDADE RELATIVA DO AR, HORARIA (%)': convertNumberToStr,
  // 'TEMPERATURA DO AR - BULBO SECO, HORARIA (°C)': convertNumberToStr,
  // 'VENTO, VELOCIDADE HORARIA (m/s)': convertNumberToStr,
  'EFICIÊNCIA': convertNumberToStr
}

async function readLargeFile(filePath, encoding = 'utf8') {
  const lines = [];

  // Crie um fluxo de leitura e decodificação do arquivo
  const readStream =
    fs.createReadStream(filePath).pipe(iconv.decodeStream(encoding));

```

```

    const rl = readline.createInterface({
      input: readStream,
      crlfDelay: Infinity
    });

    for await (const line of rl) {
      lines.push(line);
    }

    return lines;
  }

function writeFileWithBOM(filePath, next) {
  const BOM = '\uFEFF'; // BOM character
  const stream = fs.createWriteStream(filePath, { encoding: 'utf8' });

  // Write BOM character at the beginning
  stream.write(BOM);

  let line;
  while ((line = next()) !== null) {
    stream.write(line + '\n');
  }

  stream.end();
}

function writeCSV(filePath, separator, objects, header = null) {
  const BOM = '\uFEFF'; // BOM character
  const stream = fs.createWriteStream(filePath, { encoding: 'utf8' });
  if (header == null) header = Object.keys(objects[0])
  // Write BOM character at the beginning
  stream.write(BOM);
  stream.write(header.join(separator)+"\n")
  let line;
  for (o of objects) {
    line = transformarObjEmString(o,header,separator)
    stream.write(line + '\n');
  }

  stream.end();
}

// Definindo a função transformarEmString
function transformarObjEmString(objeto, atributos, separador) {
  const valores = atributos.map(atributo =>{
    const writingFunction = writingColumnFunctions[atributo]
    const value = objeto[atributo]
    if(writingFunction){
      return writingFunction(value)
    }
    else{
      return value
    }
  })

```

```

});
return valores.join(separador);
}

function getObjectsFromCSV(lines, headerLine, verifyNoEmpty = null) {

  const SEPARATOR = ";";
  const data = [];
  const headers = lines[headerLine].split(SEPARATOR); // Primeira linha são os
  cabeçalhos

  for (let i = headerLine + 1; i < lines.length; i++) {
    let obj = {};
    let currentLineVec = lines[i].split(SEPARATOR);
    let empty = verifyNoEmpty ? true : false;
    for (let j = 0; j < headers.length; j++) {
      const header = headers[j]
      let func = readingColumnFunctions[header];
      let colValue = currentLineVec[j].trim();
      if(verifyNoEmpty)
        if(verifyNoEmpty.includes(header) && colValue !== "") empty = false;

      obj[headers[j].trim()] = func ? func(colValue) : colValue;
    }

    if(empty)
    {
      obj.empty = true;
    }

    data.push(obj);
  }
  return data;
}

function calcDayData(data){
  let currentDate = '';
  let obj = {};
  dayData = [];
  let empty = false;
  let counterHour = 0;
  for (const datum of data) {
    if(currentDate !== datum[dateCol]){
      currentDate = datum[dateCol];
      if(counterHour !== 0){
        obj.umidade = obj.umidade/counterHour;
        // obj.temperatura = obj.temperatura/counterHour;
        // obj.vento = obj.vento/counterHour;
      }
      obj = {
        date: currentDate,
        radiation: datum[radiationCol],
        precipitation: datum[precipitationCol],

```

```

        umidade: datum[umidadeCol],
        // temperatura: datum[temperaturaCol],
        // vento: datum[ventoCol],
        empty: datum.empty ? true : false
    };
    counterHour = 1;
    dayData.push(obj)
}
else{// SE A DATA É IGUAL, SOMAR A RADIAÇÃO
    if(datum.empty === true)
        obj.empty = true;
    // TODO - CONSERTAR UTC TIME PARA BRASÍLIA
    obj.radiation += datum[radiationCol];
    obj.precipitation += datum[precipitationCol];
    obj.umidade = obj.umidade + datum[umidadeCol];
    // obj.temperatura = obj.temperatura + datum[temperaturaCol];
    // obj.vento = obj.vento + datum[ventoCol];
    counterHour++;
}
}
return dayData;
//Exemplo do que queremos
// [
//   {date:'2023/01/01', radiation: '17000', precipitation: '50'},
//   {date:'2023/01/01', radiation: '17000', precipitation: '50'},
//   {date:'2023/01/01', radiation: '17000', precipitation: '50'}
// ]
}

function preencherDadosUsina(dadosUsina, dadosMetereologicos){
    let statusLimpeza = "ANTES";
    for (const diaUsina of dadosUsina) {
        const diaEstacao = dadosMetereologicos.get(diaUsina["DATA"])
        if(diaUsina["DATA"] === usina.dataLimpeza) statusLimpeza = 'LIMPEZA';
        if(diaEstacao && !diaEstacao.empty)
        {
            const area = usina.area
            diaUsina[radiationCol] = diaEstacao.radiation
            diaUsina[normalizedRadiationCol] = diaEstacao.radiation/3600 // kJ/m2 -> kWh/m2
            diaUsina[normalizedEnergyCol] = diaUsina[energyCol]/area
            diaUsina[precipitationCol] = diaEstacao.precipitation
            diaUsina[umidadeCol] = diaEstacao.umidade
            diaUsina[efficiencyCol] = calcEficiencia(area, diaEstacao.radiation,
diaUsina[energyCol])
            diaUsina[limpezaCol] = statusLimpeza;
            diaUsina[numberOfStationsCol] = diaEstacao.numberOfStations
        }else{
            diaUsina.invalid = true;
        }
        if(statusLimpeza === 'LIMPEZA') statusLimpeza = "DEPOIS";
    }
}
}

```

```

function mapPorAtributo(lista, atributo) {
  const resultado = new Map();
  for (const element of lista) {
    const chave = element[atributo];
    if (!resultado.has(chave)) {
      resultado.set(chave, element);
    }
    else console.warn("Chave repetida: " + chave)
  }
  return resultado;
}

// razão da energia produzida na usina e da energia (radiação) que chega nas estações
meteorológicas, em cada dia
function calcEficiencia(area, radiation, energiaProduzida){
  const energiaEstacoes_kJ = radiation * area; // transformando radiação em energia
  kJ/m^2 m^2
  const energiaEstacoes_kWh = energiaEstacoes_kJ * 0.000277778;
  const eficiencia = energiaProduzida/energiaEstacoes_kWh;
  return eficiencia;
}

function calcularMediaComCallback(array, obterNumero) {
  if (array.length === 0) {
    return 0; // Retorna 0 se o array estiver vazio.
  }
  const soma = array.reduce((acumulador, elemento) => acumulador +
    obterNumero(elemento), 0);
  return soma / array.length;
}

function countEqual(dados) {
  let counter = 0;
  let anterior = null;
  for (const element of dados) {
    if (anterior !== null && Math.abs(element[energyCol] - anterior[energyCol]) <
    0.01){
      counter++;
      element[equalCol] = true;
      anterior[equalCol] = true;
    }
    else{
      element[equalCol] = false;
    }
    anterior = element;
  }
}

function filterDaysAroundCleaning(array, nDays){
  for (let i = 0; i < array.length; i++) {
    if (array[i][limpezaCol] === "LIMPEZA"){
      const start = i-nDays;
      const end = i+nDays;
      return array.slice(start, end);
    }
  }
}

```

```

    }
  }
}

function divideBeforeAfterCleaning(data){
  const beforeCleaningData = []
  const afterCleaningData = []

  for (const element of data) {
    if(element[limpezaCol] === "ANTES") beforeCleaningData.push(element)
    if(element[limpezaCol] === "DEPOIS") afterCleaningData.push(element)
  }

  return {beforeCleaningData, afterCleaningData}
}

function diffBetweenCols(data, col1, col2, resultCol){
  for (const element of data) {
    element[resultCol] = element[col1] - element[col2]
  }
}

function normalizedEnergyToMoney(data, energyCol, moneyCol){
  for (const element of data) {
    element[moneyCol] = element[energyCol] * usina.area * usina.precokWh
  }
}

function calcularCoeficientePearson(x, y) {
  if (x.length !== y.length) {
    throw new Error("As duas listas precisam ter o mesmo tamanho.");
  }

  const n = x.length;

  const somaX = x.reduce((acc, val) => acc + val, 0);
  const somaY = y.reduce((acc, val) => acc + val, 0);
  const somaXY = x.reduce((acc, val, i) => acc + val * y[i], 0);
  const somaX2 = x.reduce((acc, val) => acc + val * val, 0);
  const somaY2 = y.reduce((acc, val) => acc + val * val, 0);

  const numerador = (n * somaXY) - (somaX * somaY);
  const denominador = Math.sqrt(
    (n * somaX2 - somaX * somaX) * (n * somaY2 - somaY * somaY)
  );

  if (denominador === 0) {
    throw new Error("Divisão por zero detectada.");
  }

  return numerador / denominador;
}

```

```

function coeficienteRadiationEnergy(dadosUsina, context) {
  const listaX = dadosUsina.map(d=>d[radiationCol]);
  const listaY = dadosUsina.map(d=>d[energyCol]);

  const coeficiente = calcularCoeficientePearson(listaX, listaY);
  console.log("Coeficiente de Pearson "+ context+ ": ", formatNumD2(coeficiente));
  return coeficiente;
}

function formatNumD2(number) {
  return Number(number).toFixed(4).replace(".",",");
}

function calculateLrCoefficientsAndMoney(dadosUsina) {
  let {beforeCleaningData, afterCleaningData} = divideBeforeAfterCleaning(dadosUsina)
  coeficienteRadiationEnergy(beforeCleaningData, "antes")
  coeficienteRadiationEnergy(afterCleaningData, "depois")
  let beforeCoefficients =
linearRegression.completeLinearRegression(beforeCleaningData, normalizedRadiationCol,
normalizedEnergyCol);
  let afterCoefficients = linearRegression.completeLinearRegression(afterCleaningData,
normalizedRadiationCol, normalizedEnergyCol);

  console.warn("Coeficientes regressão linear antes\n a: " +
formatNumD2(beforeCoefficients.a) + " b: " + formatNumD2(beforeCoefficients.b))
  console.warn("Coeficientes regressão linear depois\n a: " +
formatNumD2(afterCoefficients.a) + " b: " + formatNumD2(afterCoefficients.b))

  linearRegression.estimate(beforeCoefficients.a, beforeCoefficients.b,
afterCleaningData, normalizedRadiationCol, withoutCleanEstimatedEnergyCol)
  diffBetweenCols(afterCleaningData, normalizedEnergyCol,
withoutCleanEstimatedEnergyCol, realAndEstimatedEnergyDiffCol)
  normalizedEnergyToMoney(afterCleaningData, realAndEstimatedEnergyDiffCol,
estimatedMoneyCol)
  let totalMoney =
afterCleaningData.reduce((a,element)=>a+element[estimatedMoneyCol],0);
  let totalDiffEnergy = usina.area *
afterCleaningData.reduce((a,element)=>a+element[realAndEstimatedEnergyDiffCol],0);
  console.warn("Estimativa de perda com sujeidade em reais caso limpeza não fosse
realizada: ", totalMoney)
  console.warn("Diferença de Energia após a limpeza(kWh): ", totalDiffEnergy)
}

async function lerDadosEstação(pastaTabelasEstacoes, arquivoEstacao) {
  const headerLine = 9 - 1;
  let lines = await readLargeFile(pastaTabelasEstacoes + arquivoEstacao, "win1252");
  const dadosEstacao = getObjectsFromCSV(lines, headerLine, [radiationCol,
precipitationCol, umidadeCol]);
  const dadosMetereologicosPorDia = calcDayData(dadosEstacao);
  return dadosMetereologicosPorDia;
}

async function main() {
  // LER O ARQUIVO DAS TRÊS CIDADES

```

```

// CALCULAR AS GRANDEZAS DIÁRIAS (SOMAR A RADIAÇÃO E A PRECIPITAÇÃO E MÉDIA DA
UMIDADE)
const pastaTabelasEstacoes = "assets/tables/estações/"
const arquivoEstacoes = [
  "INMET_SE_MG_A564_DIVINOPOLIS_01-01-2023_A_31-12-2023.csv",
  "INMET_SE_MG_A536_DORES DO INDAIA_01-01-2023_A_31-12-2023.csv",
  "INMET_SE_MG_A560_POMPEU_01-01-2023_A_31-12-2023.csv"
];

const dadosEstacoes = []
for (const arquivo of arquivoEstacoes) {
  const dadosMetereologicosPorDia = await lerDadosEstação(pastaTabelasEstacoes,
arquivo);
  dadosEstacoes.push(dadosMetereologicosPorDia)
}

// contar quantos dias do ano as estações tem dados de radiação próximos (menor que
2000 kJ/m2 de diferença)
const estacao1 = dadosEstacoes[0];
const estacao2 = dadosEstacoes[1];
const estacao3 = dadosEstacoes[2];
let counter = 0;
const dadosSimilares = [];
for (let dia = 0; dia < 365; dia++) {
  if(estacao1[dia].date !== estacao2[dia].date || estacao3[dia].date !==
estacao2[dia].date) console.warn("DIA DIFERENTE SENDO COMPARADO");

  // if(!estacao1[dia].empty && !estacao2[dia].empty && !estacao3[dia].empty)
counter++
  /// ANALISANDO SÓ SE NÃO TIVESSE NENHUMA ESTAÇÃO COM DADOS AUSENTES E SE AS TRÊS
ESTIVESSEM COM VALORES PRÓXIMOS DE IRRADIAÇÃO
  // FAZER A MÉDIA DAS ESTAÇÕES QUE TEM DADOS
  const estacoesValidas = dadosEstacoes.filter(estacao=>!estacao[dia].empty)
  if( estacoesValidas.length !== 0
    // !estacao1[dia].empty && !estacao2[dia].empty && !estacao3[dia].empty
    // && Math.abs(estacao1[dia].radiation - estacao2[dia].radiation) < 2000 &&
    // Math.abs(estacao1[dia].radiation - estacao3[dia].radiation) < 2000 &&
    // Math.abs(estacao2[dia].radiation - estacao3[dia].radiation) < 2000
  ) {
    counter++;
    const mediaDasEstacoes = {
      date: estacao1[dia].date,
      radiation: calcularMediaComCallback(estacoesValidas, item =>
item[dia].radiation),
      precipitation: calcularMediaComCallback(estacoesValidas, item =>
item[dia].precipitation),
      umidade: calcularMediaComCallback(estacoesValidas, item => item[dia].umidade),
      // empty: datum.empty ? true : false
      numberOfStations: estacoesValidas.length
    }
    dadosSimilares.push(mediaDasEstacoes)
  }
}
}

```

```

console.log(counter)
const pastaTabelasUsinas = "assets/tables/usinas/"
const pastaTabelasResultados = "assets/tables/resultados/"
const arquivoUsina = usina.arquivo
headerLine = 5-1;
lines = await readLargeFile(pastaTabelasUsinas + arquivoUsina)
let dadosUsina = getObjectsFromCSV(lines, headerLine)
countEqual(dadosUsina);
const dadosPorData = mapPorAtributo(dadosSimilares, "date")

preencherDadosUsina(dadosUsina, dadosPorData)
dadosUsina = dadosUsina.filter(d=>!d.invalid)

let nDays = 30;
console.log("----- NÚMERO DE DIAS DE ANÁLISE: " + nDays + "-----
---")

dadosUsina = filterDaysAroundCleaning(dadosUsina, nDays);

const beforeFilter = dadosUsina.length
const efficiencyMean = calcularMediaComCallback(dadosUsina, d=>d[efficiencyCol])
console.info("Eficiência média " + efficiencyMean)
//! ESCOLHENDO EFICIÊNCIA
// dadosUsina = dadosUsina.filter(d=>d[efficiencyCol]>0.08) //! Filtrando dias com
eficiência menor que 8%
dadosUsina = dadosUsina.filter(d=>{
  if(d[efficiencyCol]>efficiencyMean/2){
    return true;
  }
  else{
    console.warn("Ponto filtrado " + d[normalizedRadiationCol] +", " +
d[normalizedEnergyCol])
  }
}) //! Filtrando dias com eficiência menor que metade da eficiência média

const afterFilter = dadosUsina.length
const diffFilter = beforeFilter - afterFilter;
console.info("Foram filtrados " + diffFilter + " dia por eficiência")

calculateLrCoefficientsAndMoney(dadosUsina);
writeCSV(pastaTabelasResultados + `output apenas ${nDays} dias` + arquivoUsina, ";",
dadosUsina);

nDays = 20;
console.log("----- NÚMERO DE DIAS DE ANÁLISE: " + nDays + "-----
---")

dadosUsina = filterDaysAroundCleaning(dadosUsina, nDays);
calculateLrCoefficientsAndMoney(dadosUsina);
writeCSV(pastaTabelasResultados + `output apenas ${nDays} dias` + arquivoUsina, ";",
dadosUsina);

nDays = 10;

```

```

    console.log("----- NÚMERO DE DIAS DE ANÁLISE: " + nDays + "-----
    ---")

    dadosUsina = filterDaysAroundCleaning(dadosUsina, nDays);
    calculateLrCoefficientsAndMoney(dadosUsina);
    writeCSV(pastaTabelasResultados + `output apenas ${nDays} dias` + arquivoUsina, ";",
    dadosUsina);

    console.log("fim")
}

main().then(() => {
    console.log("Main executada!")
})
.catch((error) => {
    console.error('Erro in main function!', error);
});

```