

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

PEDRO LUÍS BATISTA FELTRIN

**PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO DE REMOÇÃO DE SUJIDADES DE USINA
FOTOVOLTAICA**

GOIÂNIA

2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio do Repositório Institucional (RI/UFG), regulamentado pela Resolução CEPEC no 1240/2014, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei no 9.610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo dos Trabalhos de Conclusão dos Cursos de Graduação disponibilizado no RI/UFG é de responsabilidade exclusiva dos autores. Ao encaminhar(em) o produto final, o(s) autor(a)(es)(as) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (TCCG)

Autor: PEDRO LUIS BATISTA FELTRIN

Título do trabalho: Planejamento Estratégico de Remoção de Sujidades de Usina Fotovoltaica

2. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador) Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante: a) consulta ao(à)(s) autor(a)(es)(as) e ao(à) orientador(a); b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo do TCCG. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro.

Obs.: Este termo deve ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Ademyr Goncalves De Oliveira, Professor do Magistério Superior**, em 06/08/2024, às 11:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Pedro Luís Batista Feltrin, Discente**, em 06/08/2024, às 22:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4721506** e o código CRC **13E37EC4**.

PEDRO LUÍS BATISTA FELTRIN

**PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO DE REMOÇÃO DE SUJIDADES DE USINA
FOTOVOLTAICA**

Trabalho de Final de Curso, apresentado como exigência para obtenção de grau de bacharel em Engenharia Mecânica, à Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e Computação - EMC, da Universidade Federal de Goiás.

Orientador: Prof. Dr. Ademyr Gonçalves de Oliveira.

GOIÂNIA

2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Feltrin, Pedro Luís Batista
PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO DE REMOÇÃO DE SUJIDADES
DE USINA FOTOVOLTAICA [manuscrito] / Pedro Luís Batista Feltrin.
2024.
69 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Ademyr Gonçalves de Oliveira.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade
Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de
Computação (EMC), Engenharia Mecânica, Goiânia, 2024.
Bibliografia.
Inclui gráfico.

1. manutenção. 2. sujidade. 3. placa fotovoltaica. I. Oliveira, Ademyr
Gonçalves de, orient. II. Título.

CDU 621



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Ao primeiro dia do mês de agosto do ano de 2024 iniciou-se a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado “Planejamento Estratégico de Remoção de Sujidades de Usina Fotovoltaica”, de autoria de Pedro Luis Batista Feltrin, do curso de Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da UFG. Os trabalhos foram instalados pelo Prof. Dr. Ademyr Gonçalves de Oliveira - orientador - EMC/UFG com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Prof. Dr Kleber Mendes de Figueiredo - EMC/UFG, Prof. Dr. Daniel Fernandes Cunha- EMC/UFG e Eng. Leandro Borges Resende - Otimiza Gestão Empresarial LTDA. Após a apresentação, a banca examinadora realizou a arguição do(a) estudante. Posteriormente, de forma reservada, a Banca Examinadora atribuiu a nota final de 9,2 , tendo sido o TCC considerado aprovado.

Proclamados os resultados, os trabalhos foram encerrados e, para constar, lavrou-se a presente ata que segue assinada pelos Membros da Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Ademyr Goncalves De Oliveira, Professor do Magistério Superior**, em 06/08/2024, às 08:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Kleber Mendes De Figueiredo, Professor do Magistério Superior**, em 06/08/2024, às 15:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Daniel Fernandes Da Cunha, Professor do Magistério Superior**, em 08/08/2024, às 21:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4721387** e o código CRC **46A1C868**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por Sua imensa bondade, por cada providência divina e por tantas bênçãos ao longo de toda a minha formação acadêmica.

Agradeço à Universidade Federal de Goiás e ao corpo docente da Engenharia Mecânica pelas oportunidades, pelos ensinamentos e por todo o apoio que obtive para a realização deste curso tão sonhado por mim.

Ao professor orientador, Dr. Ademyr Gonçalves de Oliveira, pela orientação e pelos conhecimentos partilhados durante a elaboração deste trabalho.

Ao meu pai, Luiz Roberto Carvalho Feltrin, e à minha mãe, Evani Batista dos Santos Feltrin, por todo o amor, incentivo e suporte todos os dias. Às minhas irmãs, Jéssica e Gabriela, pelo apoio e carinho mútuos. À toda a minha família, obrigado por serem meu alicerce e minha fonte de esperança.

À minha amada, Juliana Roque, agradeço pelo seu amor, companheirismo e por sua dedicação por mim. Obrigado por me fortalecer para que eu possa alcançar nossas metas.

Aos meus amigos, pela convivência, amizade e incentivo.

A todos os envolvidos na realização deste estudo pela confiança depositada em mim.

RESUMO

O propósito deste estudo é apresentar uma metodologia detalhada para analisar a eficiência de usinas fotovoltaicas, evidenciando como essa análise pode ser instrumental na otimização dos ciclos de limpeza e na quantificação das perdas decorrentes do acúmulo de sujeira nos painéis, o que diretamente impacta na produção de energia. A partir de dados de geração diária, foram examinados quatro casos distintos na cidade de Goiânia, comparando os dados de radiação solar medida por uma estação automática do INMET com a energia efetivamente gerada. Este estudo proporciona uma compreensão aprofundada dos fatores que influenciam na geração de energia na cidade, apresentando uma metodologia capaz de ser aplicável em diversas localidades. Além disso, avalia a eficiência dos painéis em relação às especificações fornecidas pelo fabricante, permitindo uma análise crítica da qualidade da instalação e do seu desempenho em relação ao potencial ideal de geração. Um aspecto relevante abordado neste trabalho é a recomendação do uso de equipamentos de medição como piranômetros, os quais são essenciais para monitorar a radiação solar incidente diretamente na usina, oferecendo discernimento crítico para a gestão eficaz e a tomada de decisões estratégicas relacionadas à manutenção e ao aprimoramento das instalações.

ABSTRACT

The purpose of this study is to present a detailed methodology to analyze the efficiency of photovoltaic plants, highlighting how this analysis can be used to optimizing cleaning cycles and in quantifying losses resulting from the accumulation of dirt on panels, which directly impacts the energy production. Using daily generation data, four different cases were examined in the city of Goiânia, comparing solar radiation data measured by an automatic INMET's station with the energy actually generated. This study provides an in-depth understanding of the factors that influence energy generation in the city, presenting a methodology capable of being applicable in different locations. Furthermore, it evaluates the efficiency of the panels in relation to the specifications provided by the manufacturer, allowing a critical analysis of the quality of the installation and its performance in relation to the ideal generation potential. A relevant aspect addressed in this work is the recommendation of the use of measuring equipment such as pyranometers, which are essential for monitoring solar radiation incident directly on the plant, offering crucial insights for effective management and strategic decision-making related to maintenance and improvement of the facilities.

Keywords: Efficiency; Panels efficiency; Power generation; Panels cleaning; Photovoltaic plant.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Infográfico da matriz elétrica brasileira do ano de 2024	16
Figura 2 – Limpeza de painéis solares na Escola de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Goiás (UFG) – Campus Samambaia, junho/2024	19
Figura 3 – Variação da potência de geração em função da irradiância global	20
Figura 4 – Fontes de iluminação em relevo variável: (1) Irradiância direta, (2) Irradiância difusa, (3) Irradiância refletida de terrenos vizinhos, (θ_0) ângulo de incidência dos raios solares com a normal à superfície, (θ_s) ângulo zenital solar ...	22
Figura 5 – Irradiação média calculada em diferentes ângulos	23
Figura 6 – Diagrama Boxplot	26
Figura 7 – Visão de satélite da cidade de Goiânia	32
Figura 8 – Inclinação terrestre com relação ao equador solar.....	33
Figura 9 – Radiação registrada de 14/07/2022 a 26/02/2024 na Estação A002	35
Figura 10 – Geração elétrica registrada de 14/07/2022 a 26/02/2024 na Usina 1	35
Figura 11 – Diagrama Boxplot da Usina 1	36
Figura 12 – Regressão linear dos melhores dados de eficiência para Usina 1	36
Figura 13 – Geração de energia acumulada no período avaliado para Usina 1.....	37
Figura 14 – Perda monetária acumulada no período avaliado para Usina 1	38
Figura 15 – Gráfico de controle baseado na eficiência declarada pelo fabricante para Usina 1	39
Figura 16 – Gráfico de controle baseado na eficiência histórica dos melhores dados para Usina 1	39
Figura 17 – Radiação registrada de 13/04/2023 a 12/03/2024 na Estação A002	41
Figura 18 – Geração elétrica registrada de 13/04/2023 a 12/03/2024 na Usina 2	41
Figura 19 – Diagrama Boxplot da Usina 2	42
Figura 20 – Regressão linear dos melhores dados de eficiência da Usina 2	42
Figura 21 – Geração de energia acumulada no período avaliado para Usina 2.....	43
Figura 22 – Perda monetária acumulada no período avaliado para Usina 2	44
Figura 23 – Gráfico de controle baseado na eficiência declarada pelo fabricante para Usina 2	45
Figura 24 – Gráfico de controle baseado na eficiência histórica dos melhores dados para Usina 2	45
Figura 25 – Radiação registrada de 16/12/2021 a 12/03/2024 na Estação A002	47

Figura 26 – Geração elétrica registrada de 16/12/2021 a 12/03/2024 na Usina 3	47
Figura 27 – Diagrama Boxplot da Usina 3	48
Figura 28 – Regressão linear dos melhores dados de eficiência da Usina 3	48
Figura 29 – Geração de energia acumulada no período avaliado para Usina 3.....	49
Figura 30 – Perda monetária acumulada no período avaliado para Usina 3	50
Figura 31 – Gráfico de controle baseado na eficiência declarada pelo fabricante para Usina 3	51
Figura 32 – Gráfico de controle baseado na eficiência histórica dos melhores dados para Usina 3	51
Figura 33 – Radiação registrada de 01/01/2023 a 31/12/2023 na Estação A002	53
Figura 34 – Geração elétrica registrada de 01/01/2023 a 31/12/2023 na Usina 4	53
Figura 35 – Diagrama Boxplot da Usina 4	54
Figura 36 – Regressão linear dos melhores dados de eficiência da Usina 4	39
Figura 37 – Geração de energia acumulada no período avaliado para Usina 4.....	55
Figura 38 – Perda monetária acumulada no período avaliado para Usina 4	56
Figura 39 – Gráfico de controle baseado na eficiência declarada pelo fabricante para Usina 4	57
Figura 40 – Gráfico de controle baseado na eficiência histórica dos melhores dados para Usina 4	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Intensidade de correlação entre duas variáveis aleatórias	21
Tabela 2 – Relação entre usinas e estação referência	33
Tabela 3 – Compilado de informações da Usina 1	34
Tabela 4 – Limites de eficiência para o gráfico de controle para Usina 1	38
Tabela 5 – Desempenho Geral da Usina 1	40
Tabela 6 – Compilado de informações da Usina 2	40
Tabela 7 – Limites de eficiência para o gráfico de controle para Usina 2	44
Tabela 8 – Desempenho Geral da Usina 2	46
Tabela 9 – Compilado de informações da Usina 3	46
Tabela 10 – Limites de eficiência para o gráfico de controle para Usina 3	50
Tabela 11 – Desempenho Geral da Usina 3	52
Tabela 12 – Compilado de informações da Usina 4	52
Tabela 13 – Limites de eficiência para o gráfico de controle para Usina 4	56
Tabela 14 – Desempenho Geral da Usina 4	58

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Correlação linear de Pearson	20
Equação 2 – Cálculo da área total da usina	23
Equação 3 – Forma padrão equação do primeiro grau	27
Equação 4 – Cálculo do coeficiente linear pelo método dos mínimos quadrados	28
Equação 5 – Cálculo do coeficiente angular pelo método dos mínimos quadrados.	28
Equação 6 – Cálculo do coeficiente de dispersão R^2	28
Equação 7 – Cálculo da geração ideal com base nos parâmetros de eficiência do fabricante.....	29
Equação 8 – Cálculo da geração ideal baseada na regressão linear dos melhores dados de eficiência no histórico	29
Equação 9 – Cálculo da eficiência baseada na geração pela radiação	30
Equação 10 – Custo de limpeza da usina	31
Equação 11 – Prejuízo acumulado no período.....	31

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. MAIS ABUNDANTE FONTE ENERGÉTICA RENOVÁVEL	15
1.2. PRINCIPAIS INFLUÊNCIAS NA GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA NA ATUALIDADE	16
1.3. DESAFIOS DA ENERGIA FOTOVOLTAICA	17
2. OBJETIVO	18
3. MÉTODO DE ANÁLISE	19
3.1. ESTABELEECER QUAL A GERAÇÃO IDEAL DE ENERGIA	21
3.1.1. RADIAÇÃO SOLAR	21
3.1.2. ÁREA TOTAL DE GERAÇÃO	23
3.1.3. EFICIÊNCIA DOS PAINÉIS	23
3.1.3.1. DADOS DE EFICIÊNCIA FORNECIDO PELO FABRICANTE	24
3.1.3.2. EFICIÊNCIA GLOBAL DAS INSTALAÇÕES	24
3.1.3.3. UTILIZANDO O HISTÓRICO PARA CALCULAR A EFICIÊNCIA	25
3.1.3.3.1. DETECÇÃO DE OUTLIERS: MÉTODO BOXPLOT	26
3.1.3.3.2. MELHORES VALORES DE EFICIÊNCIA	27
3.1.3.3.3. REGRESSÃO LINEAR DOS DADOS DE GERAÇÃO E RADIAÇÃO	27
3.1.4. GERAÇÃO IDEAL FABRICANTE	29
3.1.5. GERAÇÃO IDEAL HISTÓRICA	29
3.2. ESTIMAR A EFICIÊNCIA REAL DIÁRIA	29
3.3. DEFINIR ESTRATÉGIAS DE MANUTENÇÃO DAS PLACAS	30
3.3.1. ESTRATÉGIA DO PREJUÍZO ACUMULADO	30
3.3.2. ESTRATÉGIA DO GRÁFICO DE CONTROLE	31
4. CASOS ESTUDADOS E RESULTADOS	32
4.1. USINA 1	34

4.1.1. DADOS DE RADIAÇÃO E GERAÇÃO REGISTRADOS NO PERÍODO	34
4.1.2. OUTLIERS DOS DADOS DE EFICIÊNCIA	35
4.1.3. REGRESSÃO LINEAR DOS MELHORES DADOS DE EFICIÊNCIA	36
4.1.4. GRÁFICOS DE GERAÇÃO E PREJUÍZO ACUMULADOS	37
4.1.5. GRÁFICO DE CONTROLE BASEADO NO FABRICANTE E HISTÓRICO	38
4.1.6. PERFORMANCE MÉDIA ENCONTRADA NO PERÍODO	39
4.2. USINA 2	40
4.2.1. DADOS DE RADIAÇÃO E GERAÇÃO REGISTRADOS NO PERÍODO	40
4.2.2. OUTLIERS DOS DADOS DE EFICIÊNCIA	41
4.2.3. REGRESSÃO LINEAR DOS MELHORES DADOS DE EFICIÊNCIA	42
4.2.4. GRÁFICOS DE GERAÇÃO E PREJUÍZO ACUMULADOS	42
4.2.5. GRÁFICO DE CONTROLE BASEADO NO FABRICANTE E HISTÓRICO	44
4.2.6. PERFORMANCE MÉDIA ENCONTRADA NO PERÍODO	45
4.3. USINA 3	46
4.3.1. DADOS DE RADIAÇÃO E GERAÇÃO REGISTRADOS NO PERÍODO	46
4.3.2. OUTLIERS DOS DADOS DE EFICIÊNCIA	47
4.3.3. REGRESSÃO LINEAR DOS MELHORES DADOS DE EFICIÊNCIA	48
4.3.4. GRÁFICOS DE GERAÇÃO E PREJUÍZO ACUMULADOS	48
4.3.5. GRÁFICO DE CONTROLE BASEADO NO FABRICANTE E HISTÓRICO	50
4.3.6. PERFORMANCE MÉDIA ENCONTRADA NO PERÍODO	51
4.4. USINA 4	52
4.4.1. DADOS DE RADIAÇÃO E GERAÇÃO REGISTRADOS NO PERÍODO	52
4.4.2. OUTLIERS DOS DADOS DE EFICIÊNCIA	53
4.4.3. REGRESSÃO LINEAR DOS MELHORES DADOS DE EFICIÊNCIA	54
4.4.4. GRÁFICOS DE GERAÇÃO E PREJUÍZO ACUMULADOS	54
4.4.5. GRÁFICO DE CONTROLE BASEADO NO FABRICANTE E HISTÓRICO	56
4.4.6. PERFORMANCE MÉDIA ENCONTRADA NO PERÍODO	57

5. DISCUSSÃO	58
5.1. INTERPRETAÇÃO DOS DADOS GERADOS ACERCA DA USINA 1	58
5.2. INTERPRETAÇÃO DOS DADOS GERADOS ACERCA DA USINA 2	60
5.3. INTERPRETAÇÃO DOS DADOS GERADOS ACERCA DA USINA 3	61
5.4. INTERPRETAÇÃO DOS DADOS GERADOS ACERCA DA USINA 4	62
6. CONCLUSÃO	64
REFERÊNCIAS	66

1. INTRODUÇÃO

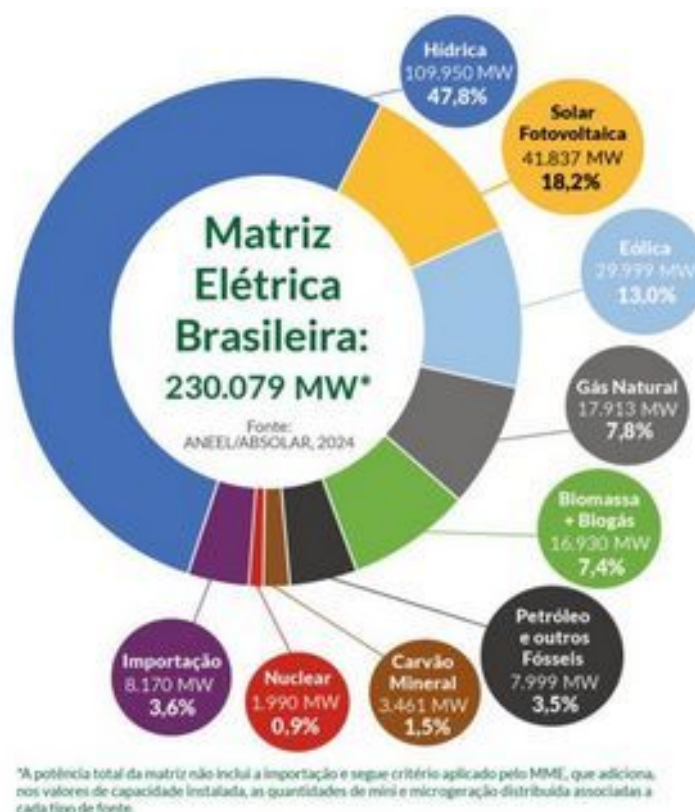
1.1. MAIS ABUNDANTE FONTE ENERGÉTICA RENOVÁVEL

As energias renováveis estão na vanguarda da transição para um futuro energético sustentável. Assim, entre as várias formas de energias renováveis, a energia fotovoltaica é uma das mais promissoras, sendo essencial para superar os desafios energéticos do novo milênio (MONTALVÃO; FARIA, 2012). Destarte, através da utilização de células solares para converter diretamente a luz do sol em eletricidade, a energia fotovoltaica é uma fonte limpa, inesgotável e cada vez mais acessível de energia. Ainda, com os avanços tecnológicos e a redução dos custos, a energia solar fotovoltaica está se tornando uma escolha cada vez mais viável para indivíduos e empresas que buscam reduzir sua pegada de carbono e promover a sustentabilidade energética (XIN; AHMAD; MURSHED, 2022).

O cenário atual da energia fotovoltaica no Brasil é bastante promissor. Em 2024, segundo a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (Absolar), o mercado brasileiro de energia solar testemunhou uma redução significativa nos custos dos kits fotovoltaicos, o que resultou em uma diminuição do tempo necessário para recuperar o investimento inicial (payback). Assim sendo, a energia solar se tornou mais acessível e econômica para os consumidores, impulsionando sua adoção em todo o país.

Segundo a Absolar (2024) a capacidade de geração solar instalada total no Brasil ultrapassou 38 GW, incluindo grandes usinas e sistemas de autogeração em telhados, fachadas e pequenos terrenos. Em comparação com outras formas de energia, a energia solar representou 18,2% da matriz elétrica do país, conforme observado na Figura 1.

Figura 1 – Infográfico da matriz elétrica brasileira do ano de 2024



Fonte: ABSOLAR - Associação Brasileira de Energia Solar.

Esses avanços são impulsionados por condições climáticas favoráveis para a energia solar, demanda crescente por eletricidade e alto custo de expansão da rede elétrica, além do surgimento de edifícios com zero consumo de energia.

1.2. PRINCIPAIS INFLUÊNCIAS NA GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA NA ATUALIDADE

A eficiência e a geração de energia em usinas fotovoltaicas são afetadas por diversos fatores. Na literatura contemporânea, destacam-se a irradiação solar, a tecnologia das células fotovoltaicas, a temperatura, o ângulo de inclinação dos painéis, o acúmulo de poeira e sujeira, o sombreamento e a manutenção (IQBAL, 1983).

Dessa forma, a energia gerada por uma usina fotovoltaica é diretamente proporcional à quantidade de radiação solar que incide sobre os painéis, sendo que, regiões com maior exposição solar tendem a ter uma produção energética mais elevada.

Ainda, de acordo com a tecnologia das células fotovoltaicas, existem diferentes tipos de células fotovoltaicas, como as de silício monocristalino, policristalino e filmes finos, sendo que cada uma possui sua eficiência característica. Assim, a escolha da tecnologia impacta diretamente na eficiência da conversão da energia solar em elétrica.

Em relação à temperatura, a eficiência dos painéis solares diminui com o aumento da temperatura. Portanto, condições climáticas mais frescas são mais propícias para uma maior eficiência energética.

Ainda, o ângulo em que os painéis são instalados deve ser otimizado para capturar o máximo de radiação solar ao longo do ano. Além disso, a sujeira acumulada nos painéis pode obstruir a entrada de luz, reduzindo a eficiência da geração de energia.

Concomitantemente, objetos próximos que projetam sombras sobre os painéis podem causar uma redução significativa na produção de energia. Por fim, uma manutenção regular é necessária para garantir que os painéis operem com a máxima eficiência possível.

Dessa forma, esses fatores devem ser cuidadosamente avaliados durante o planejamento, instalação e operação de usinas fotovoltaicas para assegurar o aproveitamento ótimo da energia solar.

1.3. DESAFIOS DA ENERGIA FOTOVOLTAICA

A energia fotovoltaica, apesar de suas vantagens, enfrenta desafios que são cruciais para sua expansão e integração efetiva no mix energético global. A eficiência das células solares permanece como um dos principais obstáculos, com pesquisas em andamento para aumentar a capacidade de conversão da luz solar em eletricidade.

Paralelamente, a redução dos custos dos materiais constituintes, especialmente o silício, é fundamental para tornar os painéis solares mais competitivos economicamente. Ainda, questões ambientais associadas à produção e ao descarte dos painéis também demandam atenção, visando minimizar o impacto ecológico. Ademais, a integração estética dos painéis em ambientes urbanos e construções requer soluções inovadoras de design que aliem funcionalidade e apelo visual. A durabilidade e a longevidade dos sistemas são essenciais para assegurar um retorno sobre o investimento ao longo do tempo. Por fim, o desenvolvimento de

um mercado robusto para a energia fotovoltaica, apoiado por políticas de incentivo e opções de financiamento adequadas, é vital para estimular a adoção desta tecnologia renovável.

2. OBJETIVO

É notável que a energia fotovoltaica tem um enorme potencial, ainda mais em um país de clima tropical como o Brasil. No entanto, os painéis fotovoltaicos, assim como qualquer outro equipamento, requerem manutenção periódica. O propósito deste trabalho é desenvolver uma metodologia para avaliar a geração de energia e implementar um plano de manutenção eficaz, garantindo que a usina opere nas condições ótimas. Desse modo, será analisado o impacto da sujeira acumulada na superfície dos painéis, que é a principal causa de redução na eficiência e na geração de energia. Para isso, será determinada a geração de energia ideal baseando-nos no histórico de produção da planta; será comparado o desempenho atual das usinas com as especificações técnicas do fabricante; serão quantificadas as perdas financeiras em relação à produção ideal; e, ainda, será identificado o ponto em que o custo da limpeza dos painéis é superado pelas perdas na geração de energia elétrica.

Destaca-se a existência de diversos trabalhos no âmbito das energias de fonte renovável, sobretudo, a energia fotovoltaica. Estudos detalhados como o de Liu e Jordan (1962) e o de Iqbal (1983) ajudaram a compreender melhor a radiação solar e os fenômenos físicos relacionados a ela. Os trabalhos realizados por Vitti e Alvares (2006) e Silva (2019) detalham parâmetros de desempenho e tratam dados meteorológicos para realizar extensos estudos de caso sobre usinas fotovoltaicas. Além disso, revisões de artigos e literaturas sobre o assunto, como o realizado por Montalvão e Faria (2012), inspiraram o desenvolvimento desse trabalho.

Contudo, diferentemente dos estudos citados anteriormente, o escopo desse trabalho visa trazer um método de análise sucinto capaz de tratar a complexidade da geração de energia relacionada a radiação solar. Esse método visa auxiliar no processo de tomada de decisão quanto a manutenção de painéis solares devido ao acúmulo de sujeira, e quantificar a perda monetária no período estudado para um correto planejamento e controle de manutenção de usinas.

Figura 2 – Limpeza de painéis solares na Escola de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Goiás (UFG) – Campus Samambaia, junho/2024



Fonte: próprio autor.

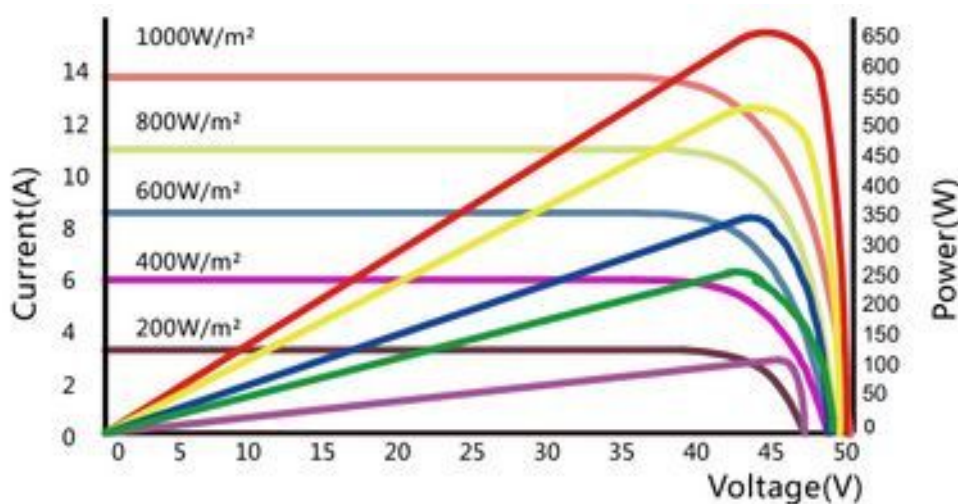
3. MÉTODO DE ANÁLISE

Toda a análise desse trabalho se baseia na comparação dos dados meteorológicos e de radiação solar registrados por uma estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) com os dados de geração de energia elétrica no local de instalação da usina em análise. Assim sendo, primeiramente, é essencial estabelecer qual o nível de correlação entre esses dados, de forma a ponderar sobre a qualidade e a viabilidade da análise.

É possível perceber, através da especificação técnica dos painéis, que a geração de energia depende direta e linearmente da quantidade de luz solar incidida sobre o painel na faixa de utilização dos painéis conforme pode ser visto na Figura 3, retirada das especificações dos módulos LP210*210-M-66-MH-650W, cuja faixa de operação é de 0 a 34,86 volts e 0 a 14,09 amperes. Não obstante, a produção elétrica também está condicionada a variação provocada por fatores ambientais, tais como a velocidade do vento afetando diretamente a temperatura dos painéis, a localização geográfica afetando a sazonalidade e o sombreamento dos painéis, e o índice de partículas suspensas e a poluição atmosférica afetando diretamente a taxa de

deposição de partículas e sujidades na superfície dos painéis, conforme analisado por Silva (2019).

Figura 3 – Variação da potência de geração em função da irradiância global



Fonte: Leapton Energy Co., Ltd.

Assim sendo, o cálculo da correlação amostral, ou coeficiente de correlação de Pearson, permitirá inferir se os dados são suficientemente correlacionados para uma boa análise, dado que, devido a fatores como a distância ou instabilidade no registro da geração de energia a amostra pode não ter qualidade suficiente para uma análise assertiva, levando a resultados e interpretações errôneas.

A correlação amostral pode ser calculada como demonstrado por Hinkle, Wiersma e Jurs (2003) e exibido na Equação 1:

Equação 1 – Correlação linear de Pearson

$$\text{Correl}(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

No qual $\bar{y} = (\frac{1}{n}) \sum_{i=1}^n \bar{y}_i$ e $\bar{x} = (\frac{1}{n}) \sum_{i=1}^n \bar{x}_i$. Ou seja, os valores médios de y e de x.

Quanto mais próximo o valor da correlação entre a geração de energia e a radiação solar estiver de um, que indica uma relação de linearidade perfeita, mais adequada será a análise dos dados, podendo ser interpretados conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Intensidade de correlação entre duas variáveis aleatórias

Coeficiente de correlação	Interpretação
0,90 a 1,00 (ou -0,90 a -1,00)	Altíssima correlação positiva (ou negativa)
0,70 a 0,90 (ou -0,70 a -0,90)	Alta correlação positiva (ou negativa)
0,50 a 0,70 (ou -0,50 a -0,70)	Moderada correlação positiva (ou negativa)
0,30 a 0,50 (ou -0,30 a -0,50)	Baixa correlação positiva (ou negativa)
0,00 a 0,30 (ou 0,00 a -0,30)	Correlação insignificante

Fonte: HINKLE, D.E.; WIERSMA W.; JURIS S.G., 2003.

3.1. ESTABELEECER QUAL A GERAÇÃO IDEAL DE ENERGIA

3.1.1. RADIAÇÃO SOLAR

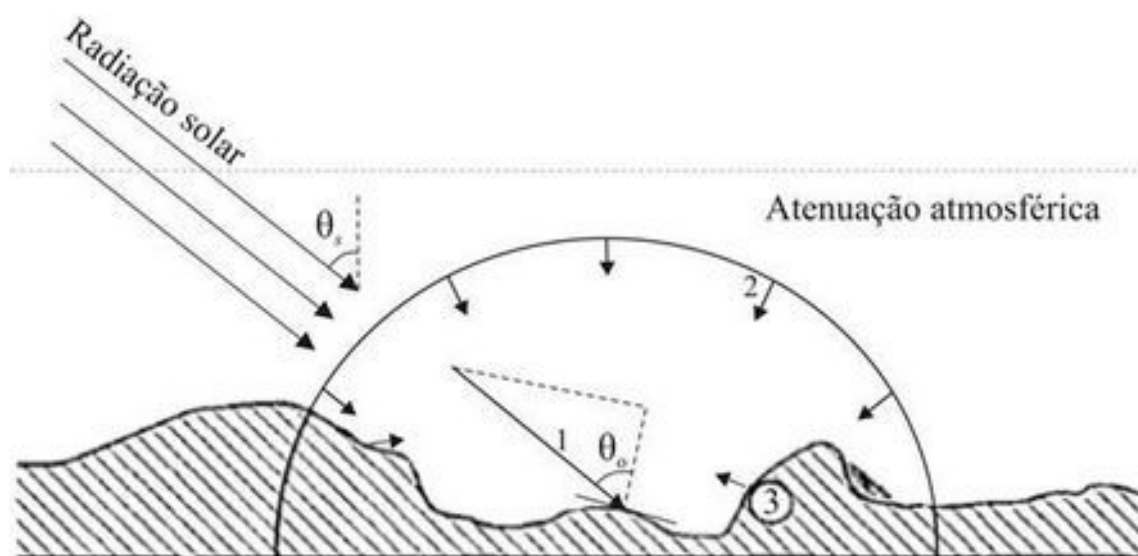
A geração de energia elétrica em usinas fotovoltaicas está diretamente associada à sua fonte de geração, a radiação solar que incide sobre os painéis. Dessa maneira, para mensurar essa quantidade de radiação pode-se utilizar dispositivos conhecidos como piranômetros. Os piranômetros transformam a radiação solar captada pelo dispositivo em um sinal elétrico, são altamente sensíveis e precisos, podendo utilizar de vários fenômenos físicos para ter seu funcionamento. Os dois principais tipos de piranômetro são os piranômetros termopilha e os fotovoltaicos. À vista disso, os piranômetros termopilha usam sensores termoelétricos para converter a radiação solar em um sinal elétrico, enquanto os piranômetros fotovoltaicos utilizam células fotovoltaicas para medir a radiação solar, convertendo-a diretamente em corrente elétrica (IQBAL,1983).

Esses dispositivos podem ser instalados especificamente para a usina ou podem ser encontrados em estações meteorológicas próximas, muitas das vezes com dados públicos. Esse trabalho utilizou os dados disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Os dados foram fornecidos através de solicitação pelo site oficial, a estação escolhida foi a A002 que fornece dados horários sobre a quantidade de radiação incidida na última hora em $[kJ/m^2]$. Ainda, esses dados de radiação foram transformados para unidade que as usinas utilizam, $[kWh/m^2]$, e somadas para ter a radiação global diária.

A radiação global captada por esses dispositivos se refere a radiação que atinge o plano horizontal. A irradiância total, ou radiação global, ou ainda, potência radiante solar total, é dada pela combinação de três componentes: a irradiância direta, difusa e o albedo como pode ser visto na Figura 4. Assim sendo, a radiação direta é

a radiação solar que chega diretamente até a superfície terrestre, sem sofrer reflexões ou dispersão, e a radiação difusa é a energia solar proveniente de reflexões provocadas pela atmosfera e é distribuída em todas as direções. Há ainda uma outra componente denominada albedo, que é a reflexão solar provocada pelo ambiente, tais como solo, vegetação, edificações e outros (LUCIANO, 2015).

Figura 4 – Fontes de iluminação em relevo variável: (1) Irradiância direta, (2) Irradiância difusa, (3) Irradiância refletida de terrenos vizinhos, (θ_0) ângulo de incidência dos raios solares com a normal à superfície, (θ_s) ângulo zenital solar



Fonte: LUCIANO, 2015.

Costumeiramente, os painéis solares são instalados angulados para um melhor aproveitamento da luz solar. Normalmente o ângulo utilizado para a inclinação dos painéis é igual a latitude em que se encontram, sendo que, os painéis devem ser orientados para o norte. Isso pois, esse ângulo é a compensação da inclinação provocada pela circunferência terrestre para que os raios solares atinjam os painéis tendo o melhor aproveitamento com a menor reflexão. Mas também existem ângulos que fornecem um maior pico de produção, em detrimento de mínimas menores que se instalado plano ou com ângulo igual a latitude. Além disso, há ângulos mais conservadores que tem como objetivo manter uma geração estável e mínimas previsíveis em detrimento de uma menor geração global. Um exemplo disso pode ser observado na Figura 5 com estimativas feitas a partir de dados históricos e com a conversão dos valores de irradiação no plano horizontal para os planos inclinados

calculada segundo o método de Liu e Jordan (1962), isotrópico estendido por Klein (1977).

Figura 5 – Irradiação média calculada em diferentes ângulos

Estação: Goiânia
Município: Goiânia, GO - BRASIL
Latitude: 16,701° S
Longitude: 49,249° O
Distância do ponto de ref. (16.6789° S; 48.258° O): 2,4 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]													
			Jan	Feb	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média	Delta
<input checked="" type="checkbox"/>	Plano Horizontal	0° N	5,45	5,52	5,12	5,02	4,75	4,58	4,78	5,68	5,57	5,05	5,39	5,51	5,28	1,12
<input checked="" type="checkbox"/>	Ângulo igual a latitude	17° N	5,02	5,28	5,17	5,45	5,53	5,51	5,70	6,42	5,80	5,46	5,01	5,01	5,45	1,40
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior média anual	18° N	4,99	5,26	5,17	5,47	5,56	5,55	5,74	6,45	5,80	5,44	4,96	4,96	5,45	1,47
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior mínimo mensal	11° N	5,20	5,40	5,19	5,34	5,30	5,21	5,42	6,21	5,76	5,55	5,18	5,22	5,42	1,03

Fonte: CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica (cepel.br).

Existem diversos modelos para estimar a radiação em um plano inclinado a partir da radiação global horizontal, radiação global difusa e albedo, como o modelo adotado por Liu e Jordan (1962), citado anteriormente, o modelo adotado por Revfeim (1978), o adotado por Iqbal (1983), Koronakis (1986), dentre outros.

Contudo, esse trabalho se limitou a fazer uma análise utilizando os dados de radiação global no plano horizontal diretamente, visto que esse é o caso de menor eficiência esperada para os painéis, logo, mais conservador em relação à geração ideal esperada. Outrossim, o intuito desse estudo é trazer uma metodologia concisa que auxilie na tomada de decisão quanto ao momento de limpeza dos painéis e permita uma estimativa de perdas para um correto controle e planejamento de manutenção de usinas fotovoltaicas.

3.1.2. ÁREA TOTAL DE GERAÇÃO

Como a radiação global horizontal medida é dada em termos de energia por área, é necessário saber a área total dos painéis para encontrar a quantidade de energia solar que atinge a usina. Esse dado pode ser obtido pelas informações técnicas dos painéis utilizados e o número de painéis utilizados na instalação, o fabricante fornece os dados de altura e largura das placas, logo, a área total pode ser calculada pela Equação 2:

Equação 2 – Cálculo da área total da usina

$$\text{Altura [m]} \times \text{Largura[m]} \times N^{\circ} \text{ de Painéis} = \text{Área Total de Geração[m}^2\text{]}$$

3.1.3. EFICIÊNCIA DOS PAINÉIS

3.1.3.1. DADOS DE EFICIÊNCIA FORNECIDO PELO FABRICANTE

Os painéis solares não são capazes de transformar toda radiação solar em energia elétrica, isso ocorre por diversos fatores ambientais, mas também pela própria natureza física de seu funcionamento. Dessa forma, eles são limitados a eficiências típicas entre 17%-24% em condições ideais de funcionamento estabelecidas pelos fabricantes (Normalmente são condições padrão de teste: Irradiação de 1000 W/m^2 , espectro AM 1.5 e temperatura das células de $25 \text{ }^\circ\text{C}$).

Novas tecnologias na área de geração solar vêm sendo desenvolvidas para aumentar essa eficiência, desde o estudo de novos materiais supercondutores até utilização de fenômenos quânticos, como o efeito fotoelétrico, na geração de energia. Contudo, a tecnologia atual dos painéis ainda utiliza do efeito fotovoltaico produzido quando semicondutores são atingidos por fótons, sendo esse o maior fator limitante para a eficiência desses dispositivos.

A informação da eficiência do painel, bem como outras características, pode ser encontrada na documentação técnica dos painéis fornecida pelo fabricante.

3.1.3.2. EFICIÊNCIA GLOBAL DAS INSTALAÇÕES

Além da eficiência dos painéis, outro fator muito impactante para geração de energia elétrica por fonte fotovoltaica é o correto dimensionamento dos componentes elétricos e eletrônicos, como conectores, cabos, inversores de frequência e módulos de controle. Desse modo, tais componentes são os responsáveis por conduzir e transformar a eletricidade gerada em cada painel em uma faixa de corrente e tensão utilizável.

Estudos sugerem que as perdas aceitáveis para inversores estão em torno de 2% a 5%, dependendo das condições operacionais específicas e do dimensionamento correto dos inversores em relação aos painéis solares. Os conectores, que ligam os módulos fotovoltaicos entre si e aos dispositivos de nível de módulo, também contribuem para as perdas de energia. Destarte, essas perdas são causadas pela resistência interna dos materiais e imperfeições nas superfícies de contato estimadas em cerca de 0,5%. As perdas em cabos submetidos a corrente direta são resultado da resistência elétrica, que causa uma queda de tensão e perda de potência na forma de calor. Posto isso, essas perdas são dimensionadas, através da bitola dos cabos,

para serem menores que 1% da produção de pico do sistema, embora valores de até 2% sejam aceitáveis em algumas situações (LILLO-BRAVO *et al.*, 2018).

Neste trabalho foi considerada uma perda geral de 5% ($\text{Eficiência}_{\text{Global}} = 95\%$) com relação a geração ideal, calculada para contemplar essa diminuição, ao tornar aproveitável a energia gerada nas células fotovoltaicas.

3.1.3.3. UTILIZANDO O HISTÓRICO PARA CALCULAR A EFICIÊNCIA

Ademais, outra forma de encontrar a eficiência da usina é comparar diretamente a geração diária com a radiação total incidida sobre a usina utilizando-se instrumentos de medição. A razão entre a geração diária e radiação total diária resultará em um valor de eficiência, sendo que, utilizando-se os melhores valores, é possível perceber qual a performance da usina nas melhores condições de funcionamento.

Para realizar o cálculo da eficiência dessa forma é importante realizar um tratamento adicional dos dados para estudar e remover outliers. Isso pois, dados falseados de eficiência podem ser gerados ao comparar alta geração com baixa radiação, assim como, baixa geração com alta radiação.

Dado que pode ocorrer incidências diferentes de luz solar quanto mais distante estiver localizada a usina com relação a instrumentação de medição da radiação solar, um sombreamento na região da instrumentação enquanto não há sombreamento na região de geração leva a falsos valores altos de eficiência. Enquanto que, no caso inverso, com sombreamento na região de geração e sem sombreamento na região dos instrumentos de medição gera-se falsos valores baixos de eficiência.

Outra possibilidade é a interrupção momentânea ou total da geração devido a inspeções, manutenções ou necessidades das instalações da usina. Os dados de geração também podem ser comprometidos se o sistema não for capaz de registrar os dados de geração no período.

O presente trabalho utilizou-se de técnicas de Análise Exploratória de Dados e Estatística Descritiva para realizar a análise das informações coletadas sobre a geração elétrica em usinas fotovoltaicas. Ainda, para detectar e tratar as ocorrências de outliers na avaliação dos dados de eficiência, utilizou-se da técnica de boxplot. Finalmente, para selecionar os melhores valores de eficiência, foi utilizada a compreensão de quartis e regressão linear e dispersão que serão descritas a frente.

Outras inferências e noções foram obtidas através de análise gráfica e normalização dos valores de geração e radiação.

3.1.3.3.1. DETECÇÃO DE OUTLIERS: MÉTODO BOXPLOT

O boxplot, também conhecido como diagrama de caixa, é uma ferramenta gráfica que nos permite visualizar a distribuição, variabilidade e valores atípicos (outliers) de um conjunto de dados, esses valores serão desconsiderados para o cálculo da eficiência histórica como justificado na seção anterior. Um exemplo desse diagrama pode ser visto na Figura 6 e sua construção é realizada a partir dos seguintes elementos:

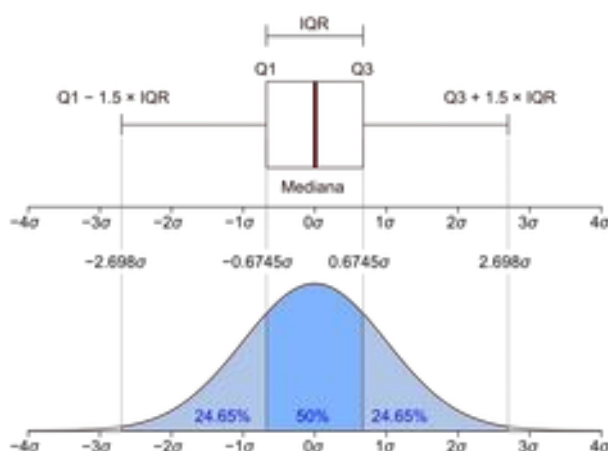
Quartis: Os quartis dividem os dados em quatro partes iguais. O primeiro quartil (Q1), ou quartil inferior, é o valor abaixo do qual 25% dos dados estão, o segundo quartil (Q2) é a mediana (ou percentil 50), e o terceiro quartil (Q3), ou quartil superior, é o valor abaixo do qual 75% dos dados estão.

Caixa ou Intervalo Interquartil (IQR): A caixa do boxplot representa o intervalo entre Q1 e Q3. Ela contém 50% dos dados.

Whiskers (ou “bigodes”): São as linhas que se estendem a partir da caixa. O limite inferior (whisker inferior) é o menor valor dentro de 1,5 vezes o IQR abaixo de Q1. O limite superior (whisker superior) é o maior valor dentro de 1,5 vezes o IQR acima de Q3.

Outliers: São pontos fora dos limites dos whiskers.

Figura 6 - Diagrama Boxplot



Fonte: Diagrama de caixa – Wikipédia, a enciclopédia livre (wikipedia.org).

3.1.3.3.2. MELHORES VALORES DE EFICIÊNCIA

Com a remoção dos valores atípicos ou falseados de eficiência com base na comparação da radiação solar e da geração de energia elétrica pode-se finalmente separar os melhores valores de eficiência.

Para isso, será utilizado como base o conceito de quartil e serão utilizados todos os valores de eficiência superiores a ele para calcular a eficiência ideal histórica. Ao calcular o terceiro quartil (quartil superior) divide-se o intervalo amostral em duas partes, os 25% dos valores da amostra que são maiores e os 75% menores ou iguais ao terceiro quartil. Esses 25% são tomados pela literatura como melhores valores em um análise de controle de qualidade ou na estatística descritiva.

A utilização do quartil como parâmetro de divisão da amostra é vantajoso, afinal, essa é uma medida capaz de assimilar o crescimento da amostra com o passar do tempo pela mudança do tamanho do intervalo dos 25% maiores valores da amostra devido a variação de amplitude do terceiro quartil que serão considerados na regressão linear dos dados ótimos de eficiência.

3.1.3.3.3. REGRESSÃO LINEAR DOS DADOS DE GERAÇÃO E RADIAÇÃO

Para avaliar a linearidade das medições de radiação solar em relação a geração de energia elétrica, realizou-se a regressão linear simples dos dados, evidentemente considerando a radiação solar como variável independente (x) e a geração de energia elétrica como variável dependente (y).

O modelo de regressão linear está descrito pela Equação 3:

Equação 3 – Forma padrão equação do primeiro grau

$$\bar{y} = a\bar{x} + b$$

Sendo:

y – Geração de energia elétrica

x – Radiação solar total registrada

a – Coeficiente angular de regressão

b – Coeficiente linear de regressão

Os coeficientes angular e linear foram estimados pelo método dos mínimos quadrados utilizando a Equação 4 e 5:

Equação 4 – Cálculo do coeficiente linear pelo método dos mínimos quadrados

$$b = \bar{y} - a\bar{x}$$

e

Equação 5 – Cálculo do coeficiente angular pelo método dos mínimos quadrados

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{y}_i \bar{x}_i - \frac{(\sum_{i=1}^n \bar{y}_i)(\sum_{i=1}^n \bar{x}_i)}{n}}{\sum_{i=1}^n \bar{x}_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n \bar{x}_i)^2}{n}}$$

No qual $\bar{y} = (\frac{1}{n}) \sum_{i=1}^n \bar{y}_i$ e $\bar{x} = (\frac{1}{n}) \sum_{i=1}^n \bar{x}_i$. Ou seja, os valores médios de y e de x.

Outro valor de interesse ao realizar a regressão linear simples é a medida de dispersão dos dados com relação a reta de regressão, o parâmetro R^2 . Quanto mais próximo da unidade for o parâmetro R^2 mais ajustada está a reta de regressão com relação aos dados coletados, isto é, mais adequada está a análise de regressão linear dos dados com relação a amostra.

O valor de R^2 pode ser calculado a partir da Equação 6:

Equação 6 – Cálculo do coeficiente de dispersão R^2

$$R^2 = 1 - \frac{SQ_E}{SQ_T} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_G)^2}{\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n y_i)^2}{n}}$$

No qual:

y_i – É o valor experimental de y dado um x.

y_G – É o valor de y previsto pela regressão linear dado um x.

n – Número de observações.

SQ_E – Soma dos quadrados dos resíduos (erros).

SQ_T – Soma total dos quadrados.

A regressão linear de todos os valores de radiação solar com relação a geração de energia apresenta a eficiência geral a qual se encontra a usina, sendo que a medida de dispersão R^2 nos dá a noção de quão representativo é essa regressão.

Já para os melhores valores de geração e radiação separados a partir dos melhores valores de eficiência, sendo superiores ao terceiro quartil, a reta de regressão significa o parâmetro ideal de produção dado um valor de radiação com base no histórico. O valor de R^2 nesse caso demonstra além da dispersão com relação a reta de regressão, o quão bem linearmente relacionados estão os dados ótimo de geração e radiação solar.

3.1.4. GERAÇÃO IDEAL FABRICANTE

A geração ideal estipulada a partir dos dados fornecidos pelo fabricante pode ser obtida através da multiplicação da radiação solar no local da usina, da área total coberta pelos painéis e pela eficiência dada pelas especificações técnicas fornecidas pelo fabricante.

É importante salientar que esse parâmetro de geração é o mais ideal possível, sendo dificilmente alcançado na prática; afinal, condições ambientais não controláveis tendem a diminuir consideravelmente essa eficiência. Assim, destacam-se como principais fatores a temperatura do ambiente e dos painéis, a quantidade de partículas em suspensão na atmosfera, o nível de deposição de sujidades nas placas e a perda de eficiência devido ao envelhecimento dos componentes semicondutores.

Contudo, esse parâmetro é a melhor forma de estipular a geração para usinas que não possuam histórico prévio ou que não tenham passado por manutenção adequada ao longo do tempo, servindo também como *benchmark* para as instalações.

A geração ideal baseada nos parâmetros do fabricante pode ser calculada pela Equação 7:

Equação 7 – Cálculo da geração ideal com base nos parâmetros de eficiência do fabricante

$$\text{Radiação}_{\text{Total Diária}} [\text{kWh/m}^2] \times \text{Área}_{\text{Total}} [\text{m}^2] \times \text{Eficiência}_{\text{Fabricante}} [\%] \\ \times \text{Eficiência}_{\text{Global}} [\%] = \text{Geração Diária Ideal}_{\text{Fabricante}} [\text{kWh}]$$

3.1.5. GERAÇÃO IDEAL HISTÓRICA

A geração ideal estipulada a partir dos dados de eficiência baseada no histórico pode ser obtida através da aplicação da radiação solar no local da usina, a radiação global horizontal diária, na equação de regressão obtida através dos dados de geração e radiação registrados nos melhores pontos de eficiência da amostra ao longo do tempo como demonstrado na Equação 8.

Equação 8 – Cálculo da geração ideal baseada na regressão linear dos melhores dados de eficiência no histórico

$$(\text{Radiação}_{\text{Total Diária}} [\text{kWh/m}^2] \times a_{\text{Coef.Angular}}) + b_{\text{Coef.Linear}} = \\ \text{Geração Diária Ideal}_{\text{Histórica}} [\text{kWh}]$$

3.2. ESTIMAR A EFICIÊNCIA REAL DIÁRIA

Após estimar com base no histórico, ou pelos dados técnicos dos painéis, a eficiência ideal para os painéis deve-se calcular também a eficiência real diária. Esse parâmetro demonstrará a saúde operacional da usina em determinado dia, sendo que, ao ser comparada com o valor ideal esperado, será utilizada para tomada de decisão.

Esse valor é estimado pela Equação 9:

Equação 9 - Cálculo da eficiência baseada na geração pela radiação

$$\text{Eficiência}_{\text{Real}} [\] = \left(\frac{\text{Geração Diária} [\text{kWh}]}{\text{Radiação Global Horizontal Diária} [\text{kWh/m}^2]} \right) / \text{Área}_{\text{Total}} [\text{m}^2]$$

3.3. DEFINIR ESTRATÉGIAS DE MANUTENÇÃO DAS PLACAS

3.3.1. ESTRATÉGIA DO PREJUÍZO ACUMULADO

Comparando os valores de geração real e ideal, tanto baseando-se pelo histórico quanto pelas informações do fabricante, é possível calcular a diferença entre a geração ideal e a geração real de energia elétrica. Esse valor pode ser convertido em quantidades monetárias conhecendo-se a tarifa praticada na região.

A tarifa de energia é composta pelo valor base da tarifa, que pode variar de acordo com o tipo de enquadramento (residencial, comercial, baixa renda) e com a modalidade da tarifa (convencional, tarifa branca), devido ao custeio do transporte e distribuição de energia, e também, devido aos tributos estadual (Custeio do Serviço de Iluminação Pública – CIP), municipal (Imposto sobre a Circulação de Mercadorias e Serviços – ICMS) e federal (Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social – COFINS, Programas de Integração Social – PIS).

Na região de Goiânia, por sua vez, a concessão da distribuição de energia elétrica é dada pela Equatorial Energia, sendo a tarifa para energia residencial comum, tarifa convencional, de R\$0,71063 (EQUATORIAL ENERGIA, 2024).

O valor de limpeza para usinas solares foi verificado junto a empresas que prestam esse serviço e por relatos de proprietários dos painéis no ano de 2024. O valor praticado varia de acordo com a quantidade de painéis (quanto maior o número de painéis menor o valor por painel) e com o nível de dificuldade de execução (se a usina está localizada em solo, telhado, inclinação e tipo de cobertura, dentre outros fatores). Dessa forma, esse valor varia de 5 a 15 reais por painel, sendo assim, é possível saber quando exatamente o valor de perdas se torna superior ao valor de limpeza e, através de uma previsão de perda de eficiência, estimar o tempo necessário

para que uma limpeza seja mais vantajosa que a perda de geração de energia. O custo de limpeza é calculado a partir a Equação 10:

Equação 10 – Custo de limpeza da usina

$$\text{Custo de Limpeza} = n^{\circ} \text{ de paineis} \times \text{custo de limpeza/painel}$$

Enquanto que o valor de perda acumulado pode ser estimado pelo somatório das diferenças entre geração real e geração esperada (ideal) multiplicado pelo valor da tarifa, como pode ser visto na Equação 11:

Equação 11 – Prejuízo acumulado no período

$$P_{Acumulado} [\text{\$}] = \sum_{i=1}^n (G_{Ideal} [\text{kWh}] - G_{Real} [\text{kWh}]) * V_{Tarifa} \left[\frac{\text{\$}}{\text{kWh}} \right]$$

Sendo:

$P_{Acumulado}$ – Prejuízo acumulado em reais,

$G_{Ideal} [\text{kWh}]$ – Geração ideal em quilowatts hora,

$G_{Real} [\text{kWh}]$ – Geração real em quilowatts hora,

V_{Tarifa} – Valor da tarifa de energia em reais por em quilowatts hora,

n – Número de dias avaliados.

3.3.2. ESTRATÉGIA DO GRÁFICO DE CONTROLE

Uma interessante estratégia é estabelecer um gráfico de controle de processo, tanto comparando a eficiência diária da usina com a estipulada pelo fabricante, quanto com a eficiência baseada na análise estatística do histórico. Nesse gráfico é possível acompanhar a evolução da variação de eficiência ao longo do tempo e estabelecer limites para que seja realizada a limpeza. Essa estratégia e a estratégia de prejuízo acumulado não são excludentes, e sim, complementares, uma vez que ao utilizar o gráfico de controle é possível perceber a redução persistente da eficiência antes que se tenha uma perda monetária significativa, podendo-se agir com antecedência. Assim, através do cálculo de prejuízo acumulado, tem-se de forma quantificada o custo passivo no período avaliado.

Com base nos estudos de caso, que serão tratados no presente trabalho, foi possível perceber que uma variação de 15% no valor da geração esperada com base na eficiência estipulada pelo fabricante é uma boa base para intervenção. Já no caso de eficiência histórica foi considerada uma variação de 7,5% para mais e para menos

do coeficiente angular da reta de regressão. Essas margens de tolerância são subjetivas e devem levar em consideração a realidade de instalação e utilização da usina fotovoltaica, plantas comerciais maiores e mais competitivas devem possuir parâmetros mais estreitos e rigorosos. Por fim, plantas residenciais, que buscam apenas a autossuficiência energética, podem possuir tolerâncias brandas.

4. CASOS ESTUDADOS E RESULTADOS

Para estabelecer a metodologia de análise foram utilizados os dados de geração de quatro usinas fotovoltaicas localizadas na cidade de Goiânia. As usinas foram selecionadas em diferentes direções e distâncias da estação meteorológica A002, usada como referência, conforme visto na Figura 7. Os dados fornecidos pelos proprietários foram utilizados para a análise estatística e percepção do panorama de funcionamento das usinas.

Figura 7 – Visão de satélite da cidade da cidade de Goiânia



Fonte: Google Earth.

Os dados coletados foram de geração diária em quilowatt-hora, datas de geração, quantidade de painéis, fabricante e modelo dos painéis, frequência de

limpeza e endereço. Desse modo, foi possível buscar junto ao fabricante as características técnicas dos painéis e, assim, calcular tanto a área total das usinas como a eficiência declarada em ambiente controlado. Algumas dessas informações podem ser encontradas na Tabela 2.

Tabela 2 – Relação entre usinas e estação referência

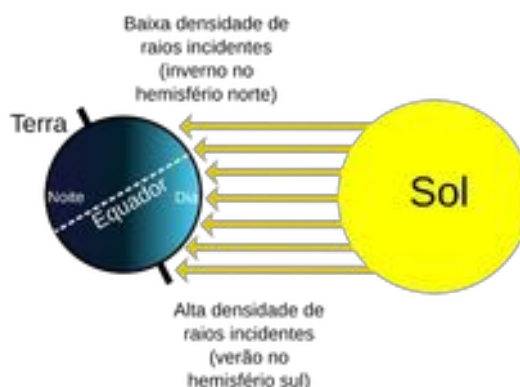
	Direção em relação a Estação A002	Distância até a Estação A002	Área Total	Frequência de Limpeza Declarada
Usina 1	Nordeste	3,48 km	51,12 m ²	Nunca
Usina 2	Sul	11,87 km	171,76 m ²	~2 em 11 meses
Usina 3	Sudeste	5,35 km	47,2 m ²	~4 em 27 meses
Usina 4	Sudoeste	3,21 km	206,23 m ²	~2 em 12 meses

Fonte: próprio autor.

Os dados de radiação solar registrados pela estação meteorológica A002 foram compilados de forma gráfica nesse trabalho. Os dados foram fornecidos em tabelas, contendo o total de radiação registrado por hora em kJ/m^2 . Assim sendo, as medidas de radiação registradas ao longo do dia foram somadas e convertidas em kWh/m^2 , uma vez que a geração registrada pelas usinas fotovoltaicas é dada em kWh.

Nos gráficos de radiação é possível perceber uma oscilação cíclica dos valores e a dispersão dos dados registrados. Isso ocorre devido a inclinação que o planeta possui, de aproximadamente 23,5 graus, com relação ao sol; dessa forma, durante a translação (que possui um período de um ano), os raios solares atingem a superfície da Terra de forma heterogênea, isso é, com diferente intensidade em cada latitude. Tal fenômeno está demonstrado na Figura 8.

Figura 8 – Inclinação terrestre com relação ao equador solar



Fonte: Estação do ano – Wikipédia, a enciclopédia livre (wikipedia.org).

Essa variação na radiação solar recebida em cada ponto do planeta é responsável pela variação das estações do ano, sendo que, devido a cidade de Goiânia estar localizada a uma latitude próxima a linha do equador (cerca de $-16,6799^\circ$) não possui estações bem definidas. O clima da região centro-oeste brasileira é essencialmente tropical, de forma que o ano possui períodos de seca e chuva bem evidentes. No contexto analisado, esses períodos podem ser observados através da dispersão dos dados registrados de radiação, sendo que, durante os períodos de seca os dados possuem baixa dispersão devido a disponibilidade constante de radiação solar. E, nos períodos de chuva, os dados sofrem dispersão devido ao bloqueio dos raios solares provocado pelas nuvens.

4.1. USINA 1

Na Tabela 3 temos algumas informações mais detalhadas sobre a Usina 1, que servirão de auxílio para as análises seguintes.

Tabela 3 – Compilado de informações da Usina 1

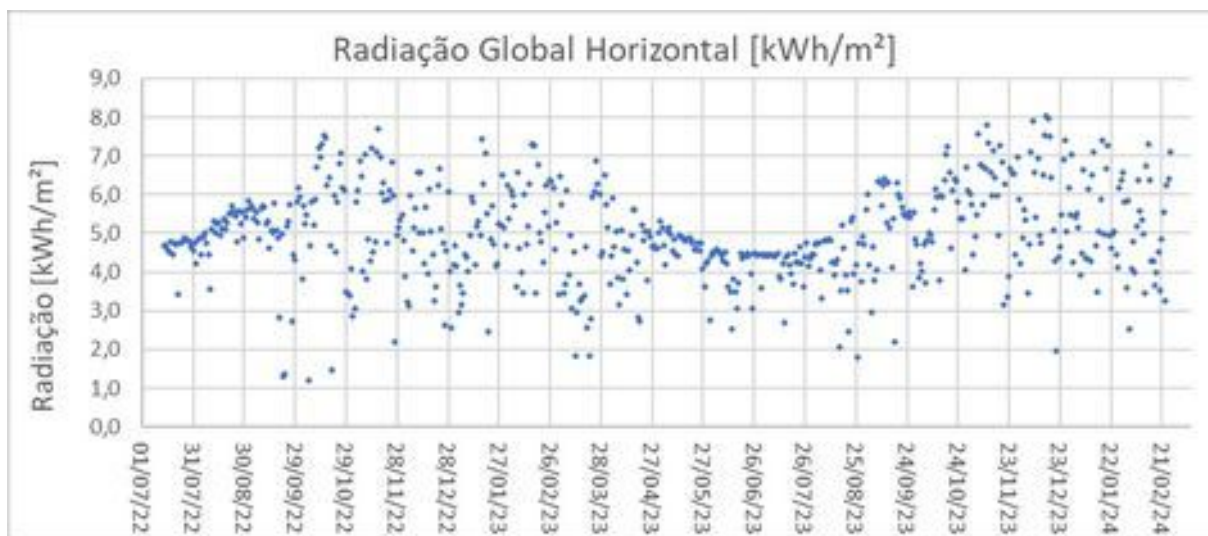
Usina 1	
Endereço	Rua Alam. das Delêneas, Esq. Com R. dos Sombrieros, Q. QR-04, LT. 1-A, Aldeia do Vale, 74680150, Goiânia-GO
Distância até a estação referência	3,48 km
Quantidade e modelo dos painéis	20 x VSUN 545W
Frequência qualitativa de limpeza	Nunca foi realizada limpeza.
Eficiência declarada pelo fabricante	21,32%
Custo de limpeza (R\$10/painel)	R\$200,00
Área total da usina	51,12 m ²
Período analisado	14/07/2022 a 26/02/2024
Correlação de Pearson	0,85149 (Positiva Muito Alta)

Fonte: próprio autor.

4.1.1. DADOS DE RADIAÇÃO E GERAÇÃO REGISTRADOS NO PERÍODO

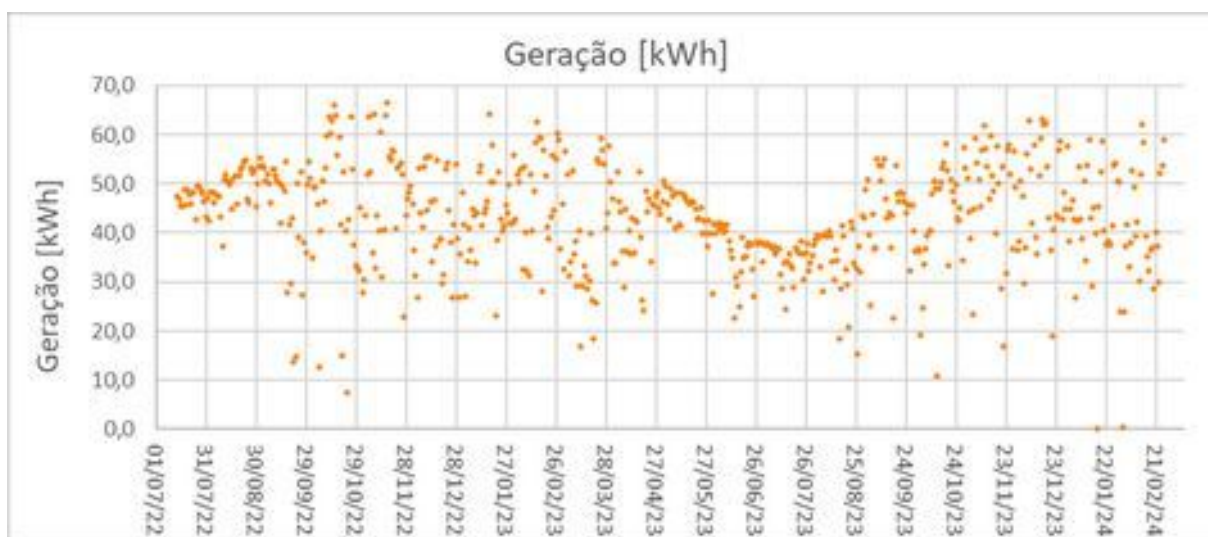
A radiação solar registrada no período pela estação meteorológica A002 pode ser observada na Figura 9. Ela oscila de forma cíclica, tendo valores elevados no final de agosto até o final de fevereiro, e valores baixos do final de abril ao final de julho. Os dados de geração elétrica da Usina 1, por sua vez, estão compilados Figura 10.

Figura 9 – Radiação registrada de 14/07/2022 a 26/02/2024 na Estação A002



Fonte: próprio autor.

Figura 10 – Geração elétrica registrada de 14/07/2022 a 26/02/2024 na Usina 1

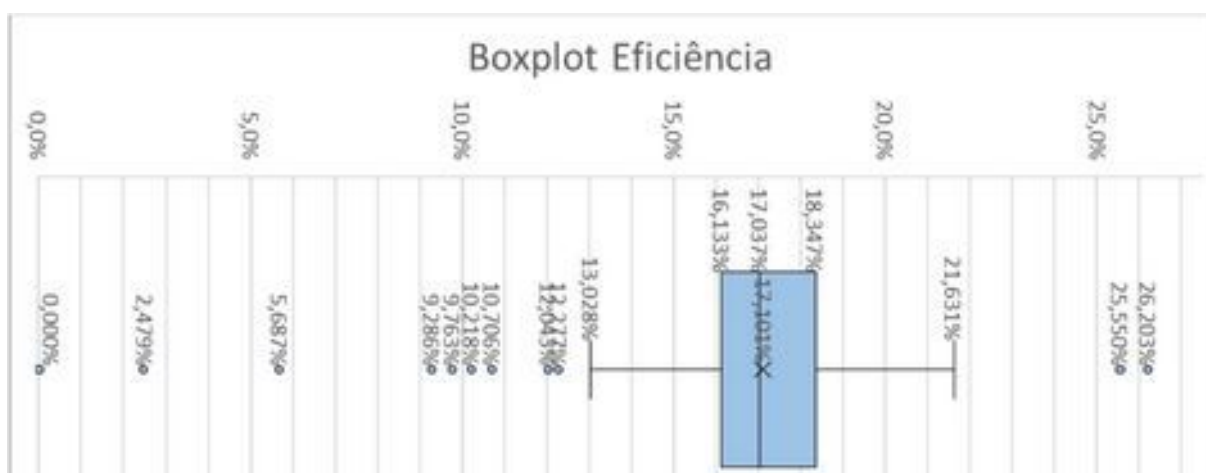


Fonte: próprio autor.

4.1.2. OUTLIERS DOS DADOS DE EFICIÊNCIA

No diagrama a seguir (Figura 11) é possível perceber a presença de dois outliers superiores e nove inferiores. Os dados de geração e radiação, relacionados a essas eficiências, foram removidos das próximas análises como justificado anteriormente.

Figura 11 – Diagrama Boxplot da Usina 1



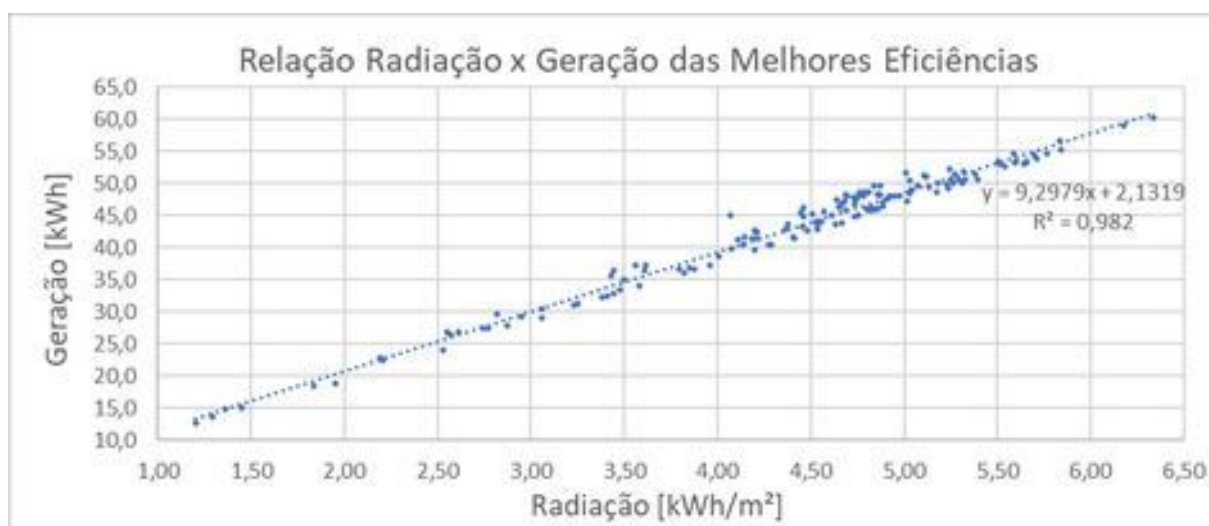
Fonte: próprio autor.

4.1.3. REGRESSÃO LINEAR DOS MELHORES DADOS DE EFICIÊNCIA

Na Figura 12, a seguir, é demonstrada a regressão linear dos dados de geração e radiação referentes as eficiências superiores ao terceiro quartil, consideradas pontos ótimos do histórico registrado.

A equação encontrada a partir da regressão foi $Geração [kWh] = 9,2979 [m^2] \cdot Radiação [\frac{kWh}{m^2}] + 2,1319[kWh]$. O coeficiente R^2 encontrado foi de 0,9820, indicando um ótimo ajuste da reta de regressão com relação aos dados.

Figura 12 – Regressão linear dos melhores dados de eficiência para Usina 1

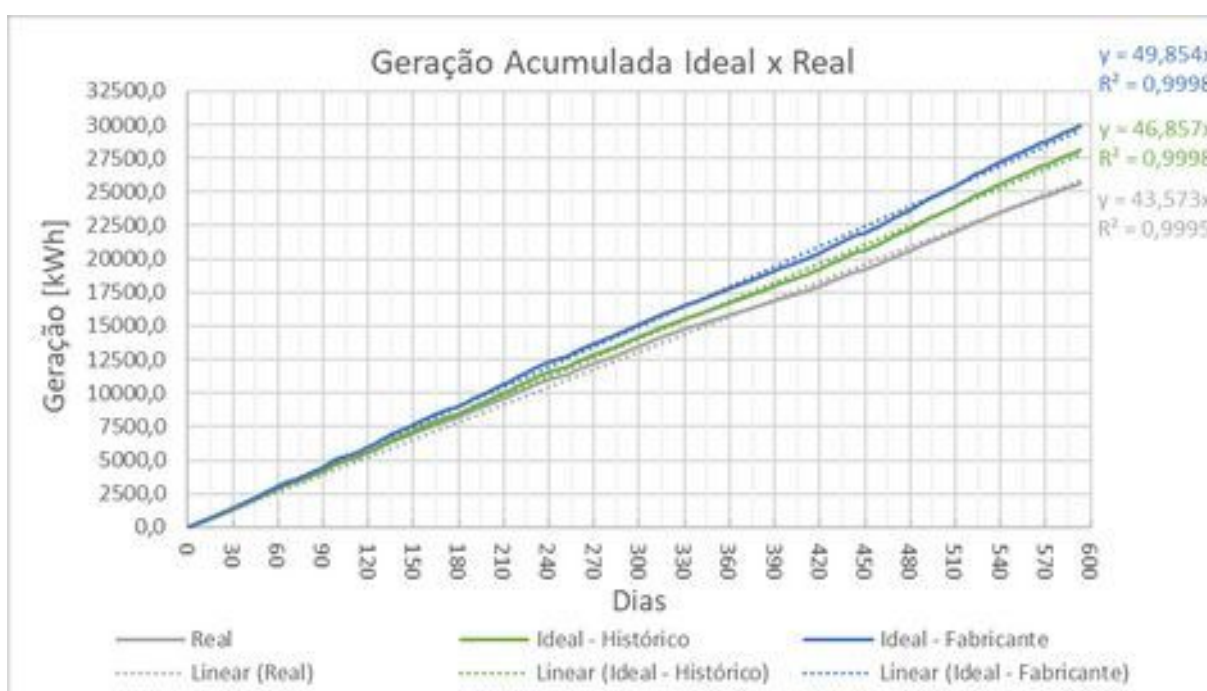


Fonte: próprio autor.

4.1.4. GRÁFICOS DE GERAÇÃO E PREJUÍZO ACUMULADOS

Na Figura 13 está representado o somatório da geração de energia registrada no período, o elevado valor de R^2 se deve ao grande número de pontos avaliados, ainda sim é possível perceber a forte tendência linear dos dados que sofre uma pequena alteração cíclica devido a variação de radiação sazonal. A taxa de geração diária pode ser observada através do coeficiente angular da reta de regressão, sendo que o ponto 0 kWh e 0 dias foi tomado como intersecção para a regressão linear, dessa forma, $b = 0$.

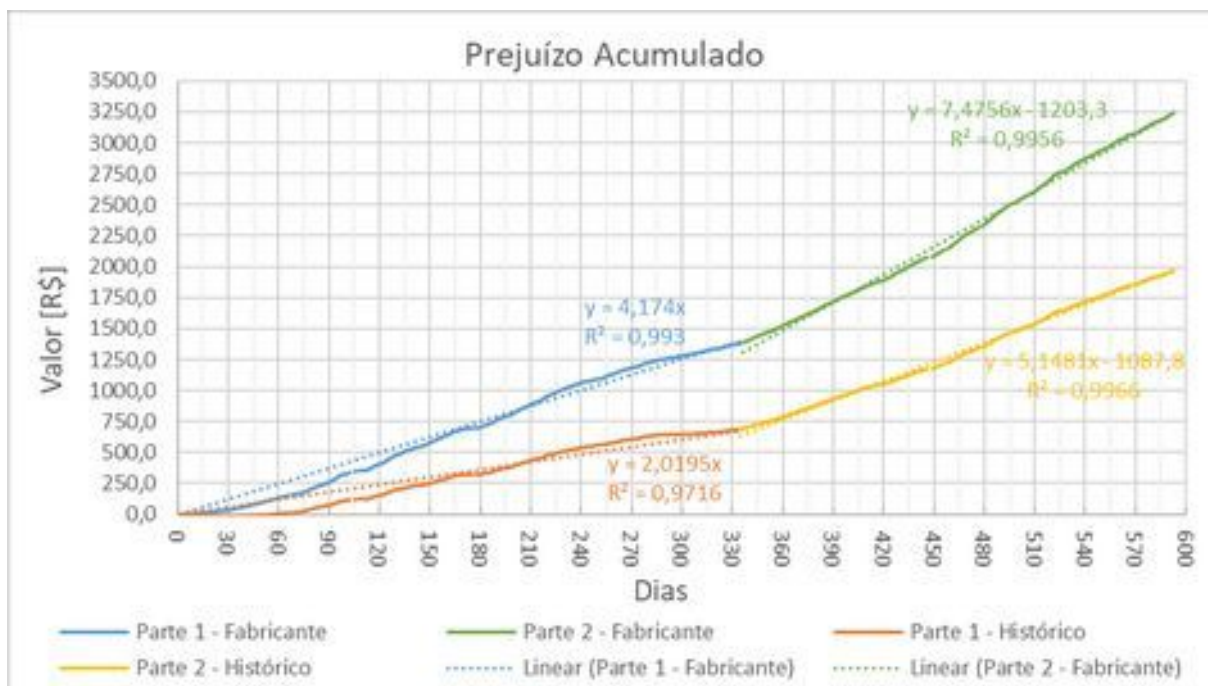
Figura 13 – Geração de energia acumulada no período avaliado para Usina 1



Fonte: próprio autor.

Na Figura 14 está demonstrado o somatório do prejuízo calculado a partir da diferença entre a geração ideal esperada e a geração real. Ao perceber graficamente uma abrupta mudança de inclinação na tendência de perda monetária diária, optou-se por dividir o intervalo e realizar a regressão linear de cada conjunto de dados separadamente, pois, dessa forma é possível estimar a taxa de perda diária em cada momento.

Figura 14 – Perda monetária acumulada no período avaliado para Usina 1



Fonte: próprio autor.

4.1.5. GRÁFICO DE CONTROLE BASEADO NO FABRICANTE E HISTÓRICO

Para a análise do controle baseado na eficiência declarada pelo fabricante e da eficiência obtida através da regressão linear dos dados históricos foi considerada uma margem de 15% com relação a eficiência da usina, dada a eficiência de geração declarada pelo fabricante, e uma variação de $\pm 7,5\%$ na eficiência histórica.

Os limites estabelecidos podem ser observados na tabela 4 a seguir:

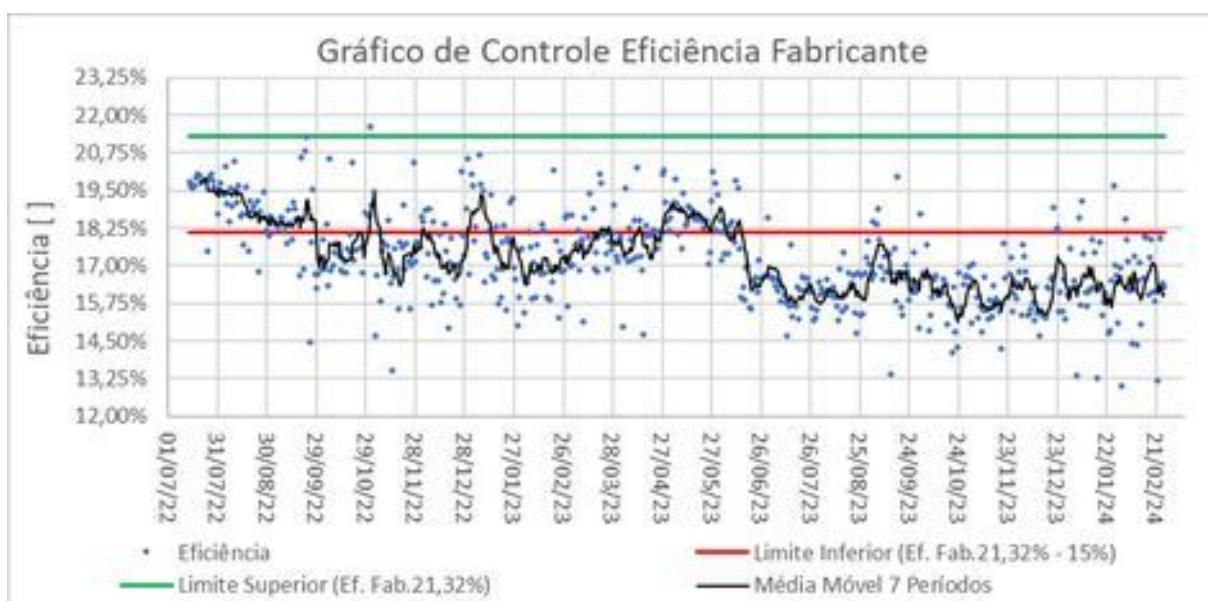
Tabela 4 – Limites de eficiência para o gráfico de controle para Usina 1

	Eficiência Fabricante []	Eficiência Histórica []
Eficiência Esperada (Limite Superior)	21,32%	$\left(\frac{9,3\text{m}^2}{51,12\text{m}^2}\right) \cdot 107,5\% \cong 19,55\%$
Eficiência Aceitável (Limite Inferior)	$21,32\% \cdot 85\% \cong 18,122\%$	$\left(\frac{9,3\text{m}^2}{51,12\text{m}^2}\right) \cdot 92,5\% \cong 16,823\%$

Fonte: próprio autor.

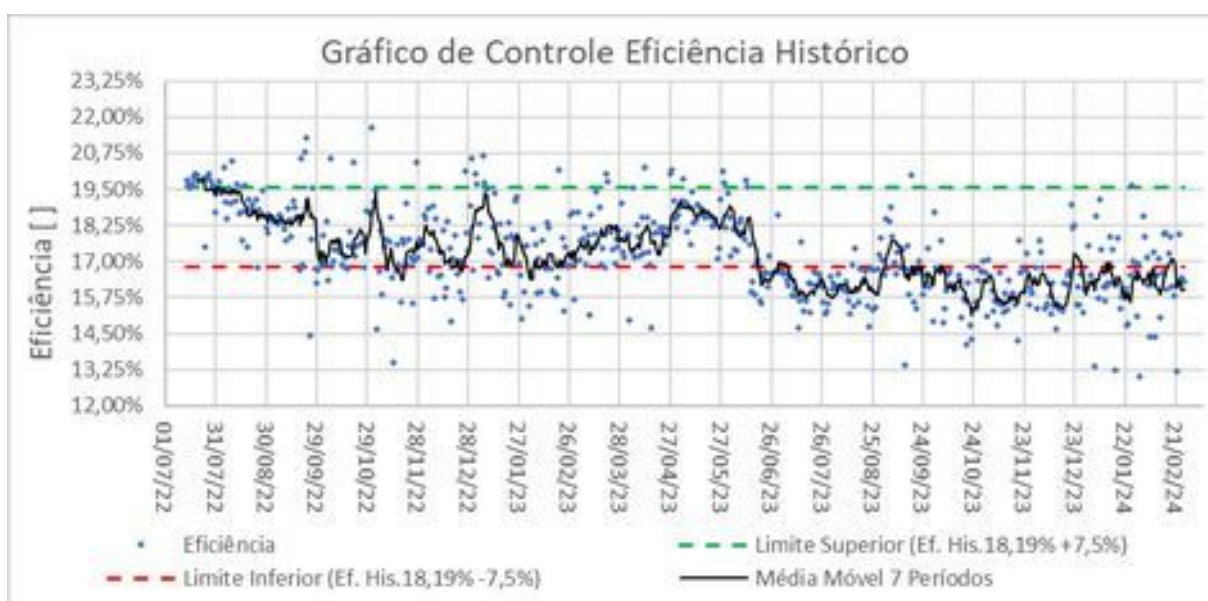
Em seguida, tem-se os gráficos resultantes da análise realizada, nos quais traçou-se a média móvel referente aos 7 dias anteriores para ajudar na visualização de tendências em meio a dispersão dos dados (Figura 15 e Figura 16):

Figura 15 – Gráfico de controle baseado na eficiência declarada pelo fabricante para Usina 1



Fonte: próprio autor.

Figura 16 – Gráfico de controle baseado na eficiência histórica dos melhores dados para Usina 1



Fonte: próprio autor.

4.1.6. PERFORMANCE MÉDIA ENCONTRADA NO PERÍODO

Na tabela 5, a seguir, estão a somatória dos dados diários registrados e estimados no período.

Tabela 5 – Desempenho Geral da Usina 1

Usina 1	Registrado Real	Estimado Histórico	Estimado Fabricante
Geração Total [kWh]	25601,90	28116,95	29933,80
Valor Monetário Gerado [R\$]	18193,48	19980,75	21271,85
Diferenças entre Registrado e Estimado [R\$]	0	1787,26	3078,37
Diferenças Percentuais entre Registrado e Estimado	(0%)	(8,945%)	(14,472%)
Eficiência de Geração	16,945%	18,610%	19,813%

Fonte: próprio autor.

4.2. USINA 2

A Tabela 6 fornece detalhes adicionais sobre a Usina 2, os quais serão úteis para as análises subsequentes.

Tabela 6 – Compilado de informações da Usina 2

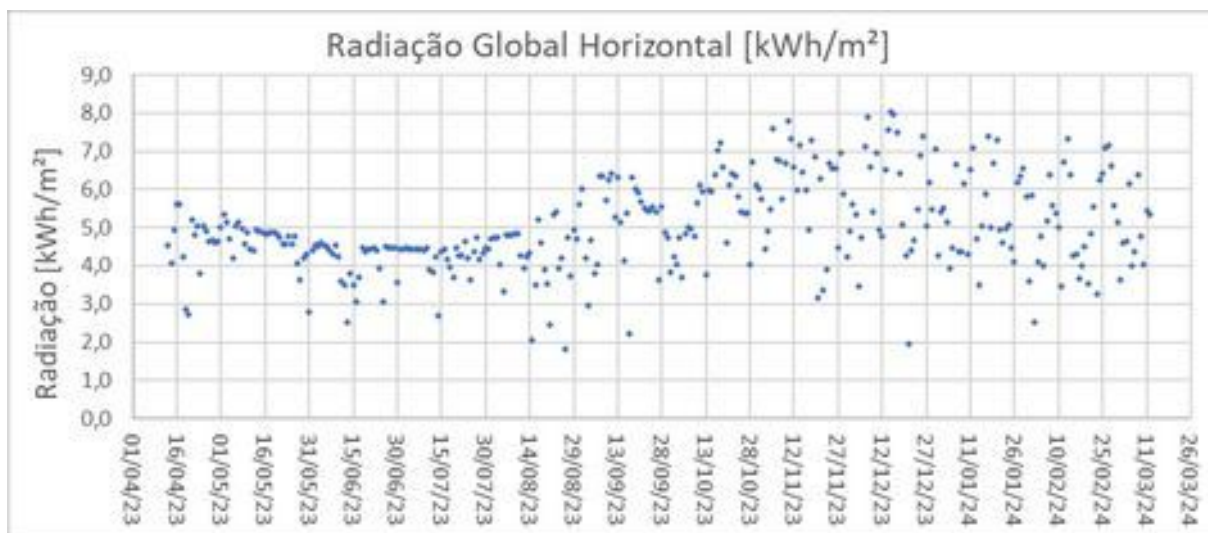
Usina 2	
Endereço	AV Walkiria, esquina com rua das Orquídeas, qd.E, It.01. Vila Santos Dumont, Aparecida de Goiânia, Goiás
Distância até a estação referência	11,87 km
Quantidade e modelo dos painéis	62 x Lepton 590W
Frequência qualitativa de limpeza	Baixa (~2 por ano)
Eficiência declarada pelo fabricante	21,30%
Custo de limpeza (R\$10/painel)	R\$620,00
Área total da usina	171,76 m ²
Período analisado	13/04/2023 a 12/03/2024
Correlação de Pearson	0,71290 (Positiva Alta)

Fonte: próprio autor.

4.2.1. DADOS DE RADIAÇÃO E GERAÇÃO REGISTRADOS NO PERÍODO

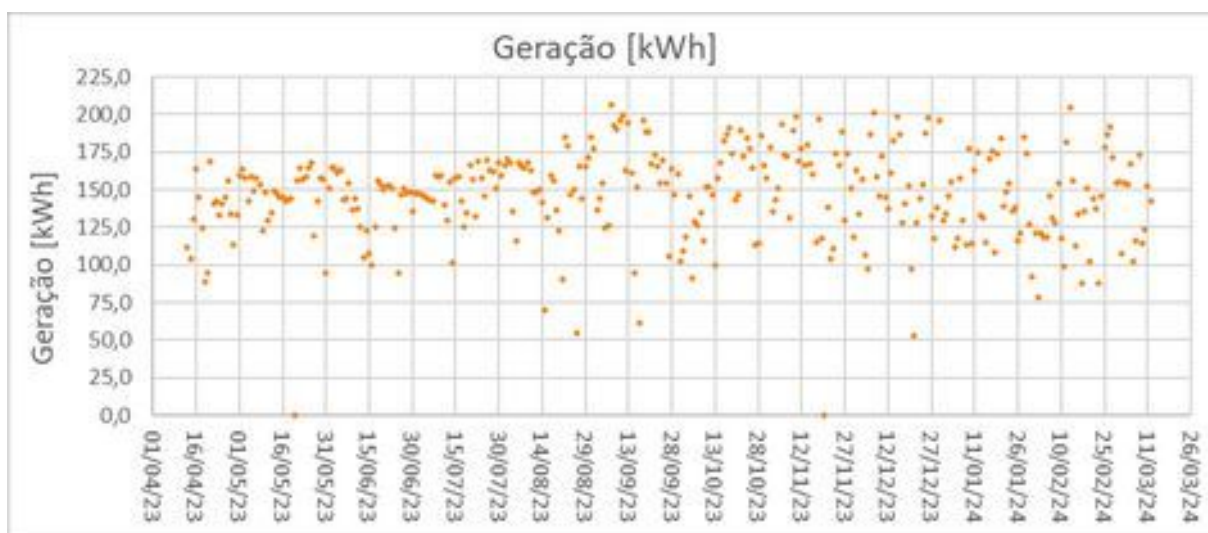
A radiação solar medida pela estação meteorológica A002 durante o período pode ser vista na Figura 17. Ela oscila de forma cíclica, tendo valores elevados no final de agosto até o final de fevereiro, e valores baixos do final de abril ao final de julho. Já os dados de geração elétrica da Usina 2 estão apresentados na Figura 18.

Figura 17 – Radiação registrada de 13/04/2023 a 12/03/2024 na Estação A002



Fonte: próprio autor.

Figura 18 – Geração elétrica registrada de 13/04/2023 a 12/03/2024 na Usina 2

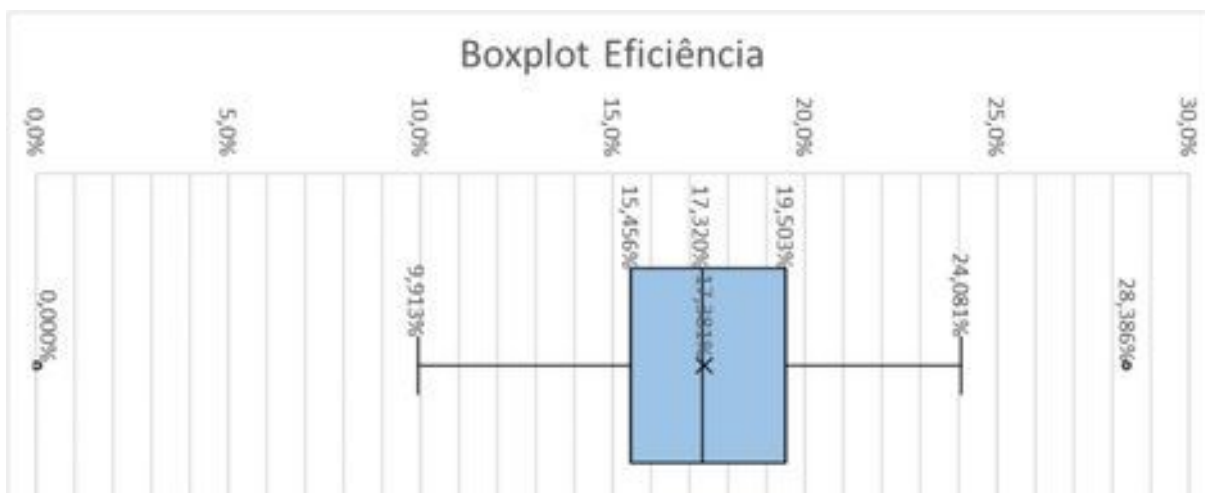


Fonte: próprio autor.

4.2.2. OUTLIERS DOS DADOS DE EFICIÊNCIA

No diagrama a seguir (Figura 19) é possível perceber a presença de um outlier superior e dois inferiores. Os dados de geração e radiação, referentes a essas eficiências, foram excluídos das análises seguintes conforme justificado anteriormente.

Figura 19 – Diagrama Boxplot da Usina 2



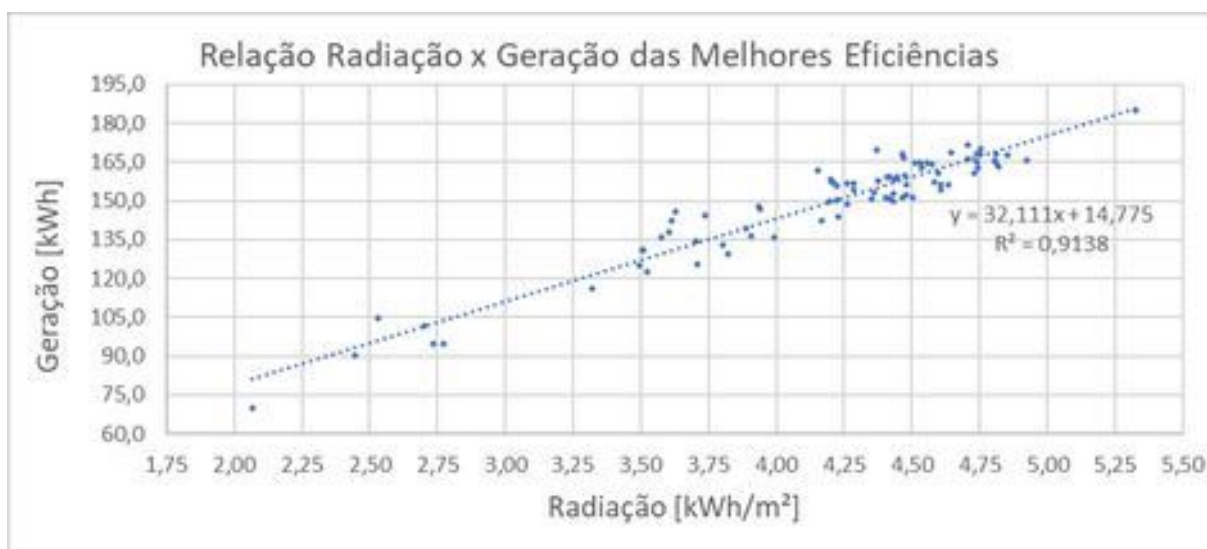
Fonte: próprio autor.

4.2.3. REGRESSÃO LINEAR DOS MELHORES DADOS DE EFICIÊNCIA

A Figura 20, a seguir, ilustra a regressão linear dos dados de geração e radiação para eficiências superiores ao terceiro quartil, consideradas como pontos ótimos do histórico registrado.

A equação encontrada a partir da regressão foi $\text{Geração [kWh]} = 32,111 [\text{m}^2] \cdot \text{Radiação} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \right] + 14,775 [\text{kWh}]$. O coeficiente R^2 encontrado foi de 0,9138, indicando um ótimo ajuste da reta de regressão com relação aos dados.

Figura 20 – Regressão linear dos melhores dados de eficiência da Usina 2



Fonte: próprio autor.

4.2.4. GRÁFICOS DE GERAÇÃO E PREJUÍZO ACUMULADOS

A Figura 21 apresenta o somatório da geração de energia registrada durante o período. O elevado valor de R^2 deve-se ao grande número de pontos avaliados, mas é possível notar uma forte tendência linear nos dados, com uma pequena variação cíclica devido à sazonalidade da radiação. A taxa de geração diária é indicada pelo coeficiente angular da reta de regressão, tomando 0 kWh e 0 dias como interseção, resultando em $b = 0$.

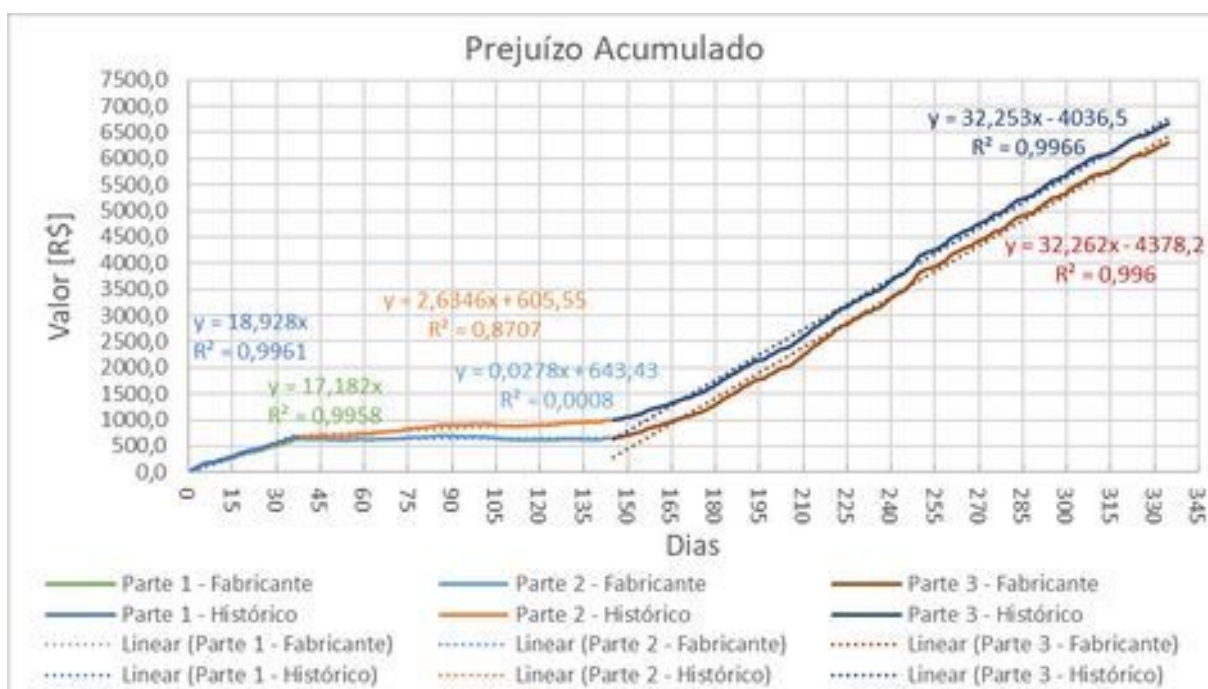
Figura 21 – Geração de energia acumulada no período avaliado para Usina 2.



Fonte: próprio autor.

A Figura 22, por sua vez, mostra o somatório do prejuízo calculado a partir da diferença entre a geração ideal esperada e a geração real. Ao observar graficamente uma mudança abrupta na inclinação da tendência de perda monetária diária, optou-se por dividir o intervalo e realizar a regressão linear separadamente para cada conjunto de dados, permitindo assim estimar a taxa de perda diária em cada momento.

Figura 22 – Perda monetária acumulada no período avaliado para Usina 2



Fonte: próprio autor.

4.2.5. GRÁFICO DE CONTROLE BASEADO NO FABRICANTE E HISTÓRICO

Para a análise do controle baseado na eficiência declarada pelo fabricante e na eficiência obtida através da regressão linear dos dados históricos, foi considerada uma margem de 15% em relação à eficiência da usina, com base na eficiência de geração declarada pelo fabricante, e uma variação de $\pm 7,5\%$ na eficiência histórica.

Os limites estabelecidos podem ser observados na Tabela 7 a seguir:

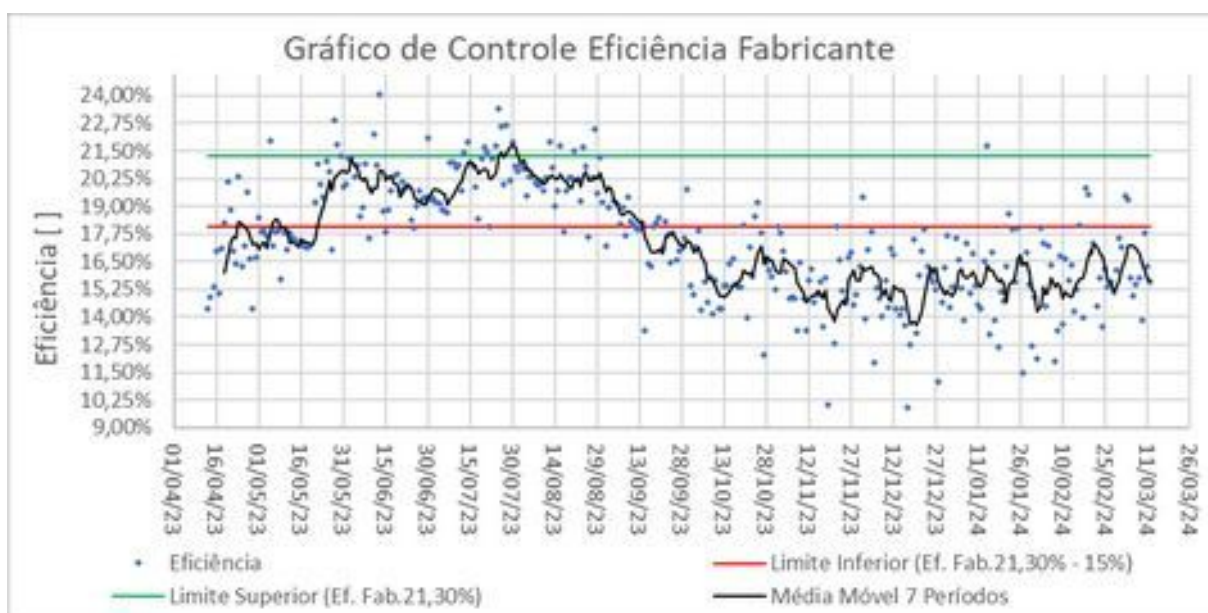
Tabela 7 – Limites de eficiência para o gráfico de controle para Usina 2

	Eficiência Fabricante []	Eficiência Histórica []
Eficiência Esperada (Limite Superior)	21,30%	$\left(\frac{32,111\text{m}^2}{171,76\text{m}^2}\right) \cdot 107,5\% \cong 20,01\%$
Eficiência Aceitável (Limite Inferior)	$21,30\% \cdot 85\% \cong 18,105\%$	$\left(\frac{32,111\text{m}^2}{171,76\text{m}^2}\right) \cdot 92,5\% \cong 17,29\%$

Fonte: próprio autor.

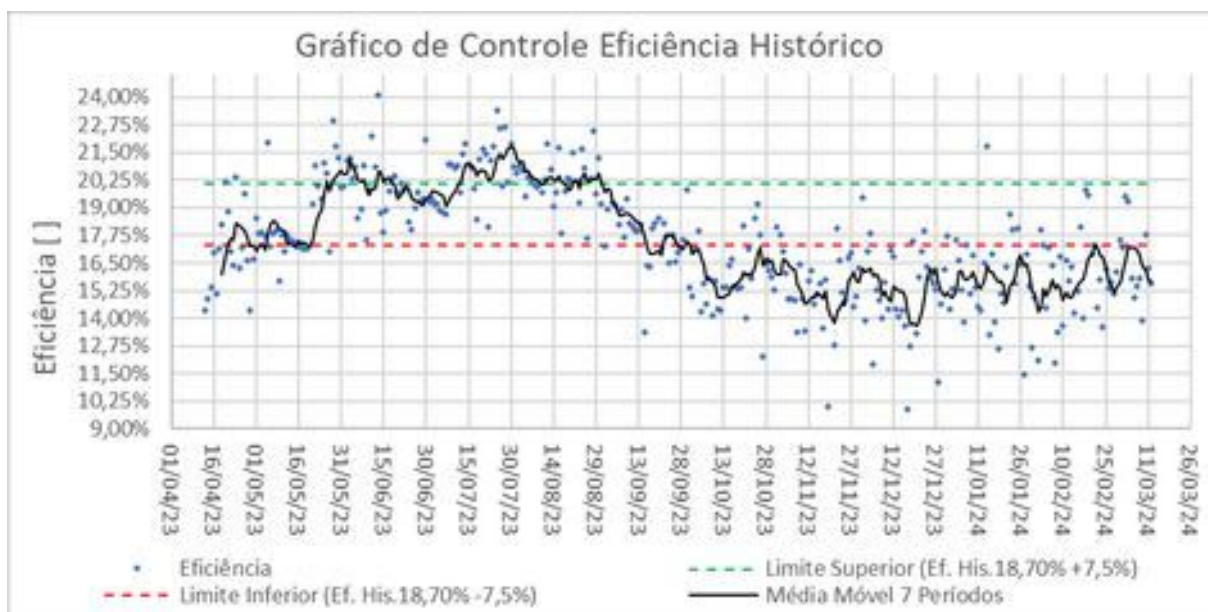
Em seguida, são apresentados os gráficos resultantes da análise realizada, nos quais foi traçada a média móvel dos 7 dias anteriores para auxiliar na visualização de tendências em meio à dispersão dos dados (Figura 23 e Figura 24):

Figura 23 – Gráfico de controle baseado na eficiência declarada pelo fabricante para Usina 2



Fonte: próprio autor.

Figura 24 – Gráfico de controle baseado na eficiência histórica dos melhores dados para Usina 2



Fonte: próprio autor.

4.2.6. PERFORMANCE MÉDIA ENCONTRADA NO PERÍODO

Na Tabela 8, a seguir, estão a somatória dos dados diários registrados e estimados no período.

Tabela 8 – Desempenho Geral da Usina 2

Usina 2	Registrado Real	Estimado Histórico	Estimado Fabricante
Geração Total [kWh]	48920,70	58155,56	57635,84
Valor Monetário Gerado [R\$]	34764,52	41327,09	40957,76
Diferenças entre Registrado e Estimado [R\$]	0	6562,57	6193,24
Diferenças Percentuais entre Registrado e Estimado	0%	15,880%	15,121%
Eficiência de Geração	17,063%	20,284%	20,102%

Fonte: próprio autor.

4.3. USINA 3

Na Tabela 9, encontram-se informações mais específicas da Usina 3, que serão utilizadas nas análises posteriores.

Tabela 9 – Compilado de informações da Usina 3

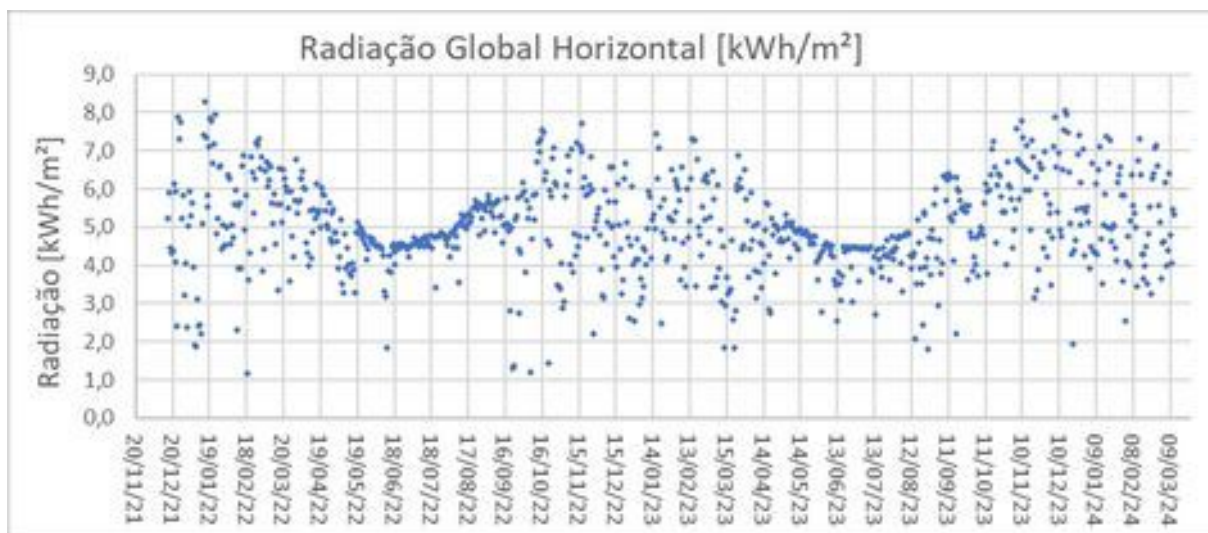
Usina 3	
Endereço	Rua Perimetral, Quadra 07, Lote 12, Conjunto Sonho Verde, Goiânia, Goiás, Cep 74730525
Distância até a estação referência	5,35 km
Quantidade e modelo dos painéis	20 x HIKU 490W
Frequência qualitativa de limpeza	Baixa (~2 por ano)
Eficiência declarada pelo fabricante	20,8%
Custo de limpeza (R\$10/painel)	R\$200,00
Área total da usina	47,20 m ²
Período analisado	16/12/2021 a 12/03/2024
Correlação de Pearson	0,82489 (Positiva Muito Alta)

Fonte: próprio autor.

4.3.1. DADOS DE RADIAÇÃO E GERAÇÃO REGISTRADOS NO PERÍODO

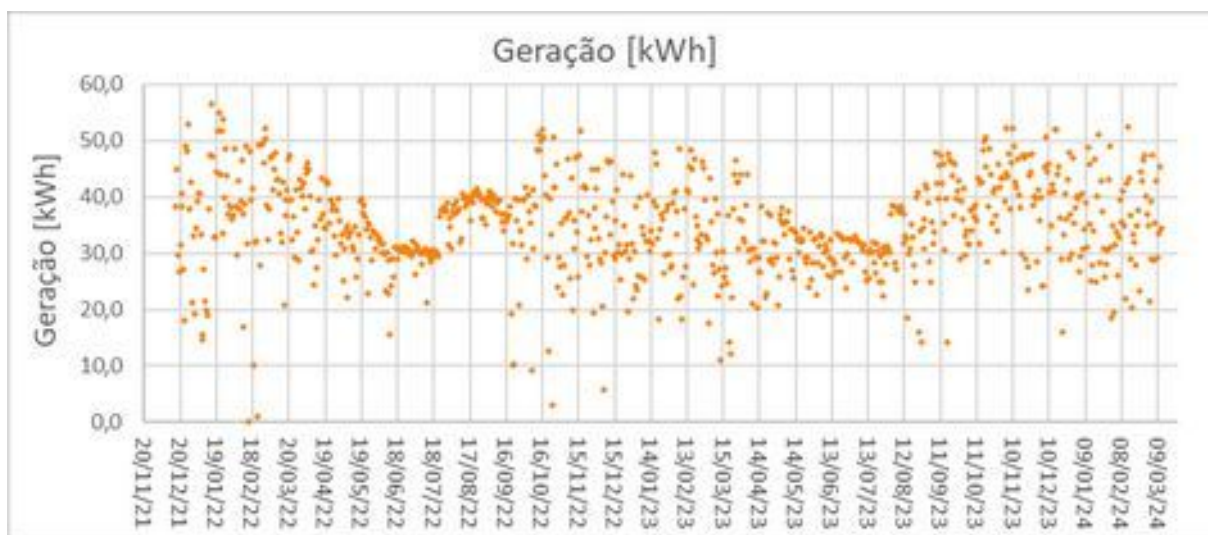
A Figura 25 mostra a radiação solar registrada no período pela estação meteorológica A002. Ela oscila de forma cíclica, tendo valores elevados no final de agosto até o final de fevereiro, e valores baixos do final de abril ao final de julho. Em contrapartida, os dados de geração elétrica da Usina 3 estão reunidos na Figura 26.

Figura 25 – Radiação registrada de 16/12/2021 a 12/03/2024 na Estação A002



Fonte: próprio autor.

Figura 26 – Geração elétrica registrada de 16/12/2021 a 12/03/2024 na Usina 3

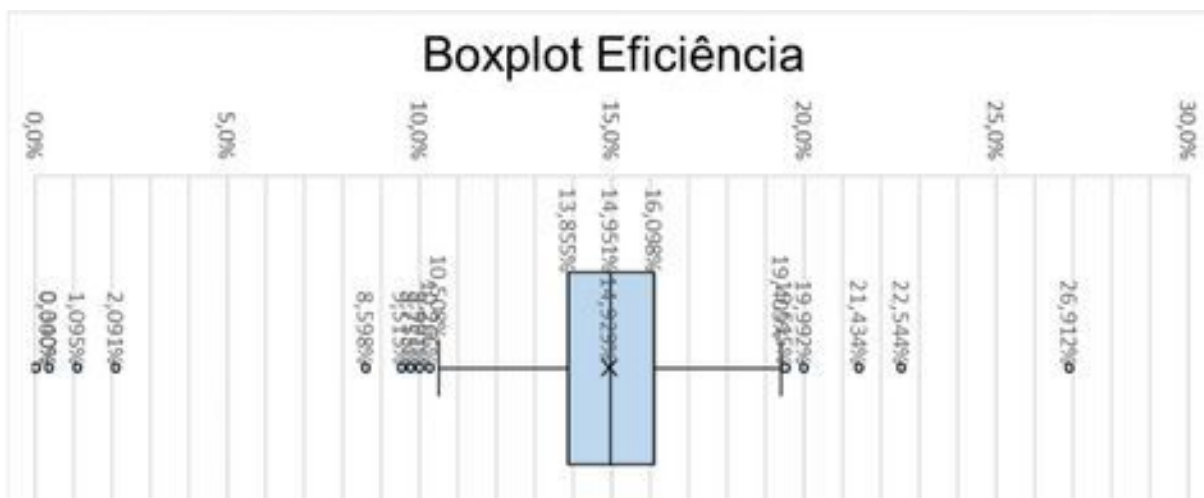


Fonte: próprio autor.

4.3.2. OUTLIERS DOS DADOS DE EFICIÊNCIA

No diagrama a seguir (Figura 27) é possível perceber a presença de onze outliers superiores e treze inferiores. Conforme explicado anteriormente, os dados de geração e radiação associados a essas eficiências foram retiradas das próximas análises.

Figura 27 – Diagrama Boxplot da Usina 3



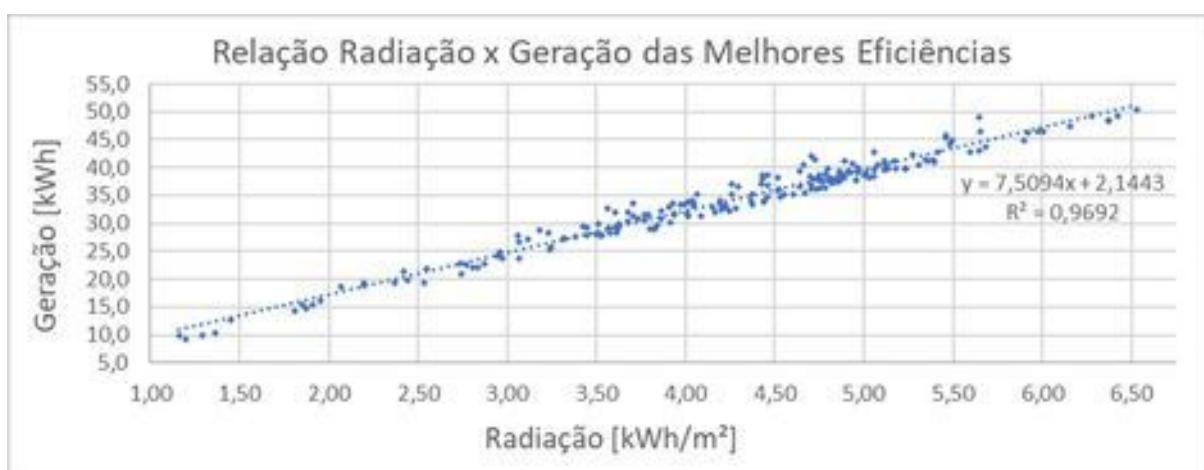
Fonte: próprio autor.

4.3.3. REGRESSÃO LINEAR DOS MELHORES DADOS DE EFICIÊNCIA

Na Figura 28, a seguir, apresenta-se a regressão linear dos dados de geração e radiação que correspondem às eficiências acima do terceiro quartil, tidas como pontos ótimos no histórico registrado.

A equação encontrada a partir da regressão foi $\text{Geração [kWh]} = 7,5094 \text{ [m}^2\text{]} \cdot \text{Radiação [} \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}\text{]} + 2,1443[\text{kWh}]$. O coeficiente R^2 encontrado foi de 0,9692, indicando um ótimo ajuste da reta de regressão com relação aos dados.

Figura 28 – Regressão linear dos melhores dados de eficiência da Usina 3



Fonte: próprio autor.

4.3.4. GRÁFICOS DE GERAÇÃO E PREJUÍZO ACUMULADOS

Na Figura 29, está representado o total da geração de energia registrada no período. O alto valor de R^2 é atribuído ao grande número de pontos avaliados, mas ainda é possível observar uma forte tendência linear nos dados, que sofre uma pequena variação cíclica devido à variação sazonal da radiação. A taxa de geração diária pode ser vista através do coeficiente angular da reta de regressão, onde o ponto 0 kWh e 0 dias foi considerado como interseção, resultando em $b = 0$.

Figura 29 – Geração de energia acumulada no período avaliado para Usina 3



Fonte: próprio autor.

Na Figura 30, está representado o somatório do prejuízo, calculado pela diferença entre a geração ideal esperada e a geração real. Ao notar graficamente uma mudança abrupta na inclinação da tendência de perda monetária diária, decidiu-se dividir o intervalo e realizar regressões lineares em cada conjunto de dados separadamente, possibilitando a estimativa da taxa de perda diária em cada fase.

Figura 30 – Perda monetária acumulada no período avaliado para Usina 3



Fonte: próprio autor.

4.3.5. GRÁFICO DE CONTROLE BASEADO NO FABRICANTE E HISTÓRICO

Na análise do controle fundamentado na eficiência declarada pelo fabricante e na eficiência obtida por regressão linear dos dados históricos, considerou-se uma margem de 15% em relação à eficiência da usina, conforme a eficiência de geração declarada pelo fabricante, e uma variação de $\pm 7,5\%$ na eficiência histórica.

Os limites estabelecidos podem ser observados na Tabela 10 a seguir:

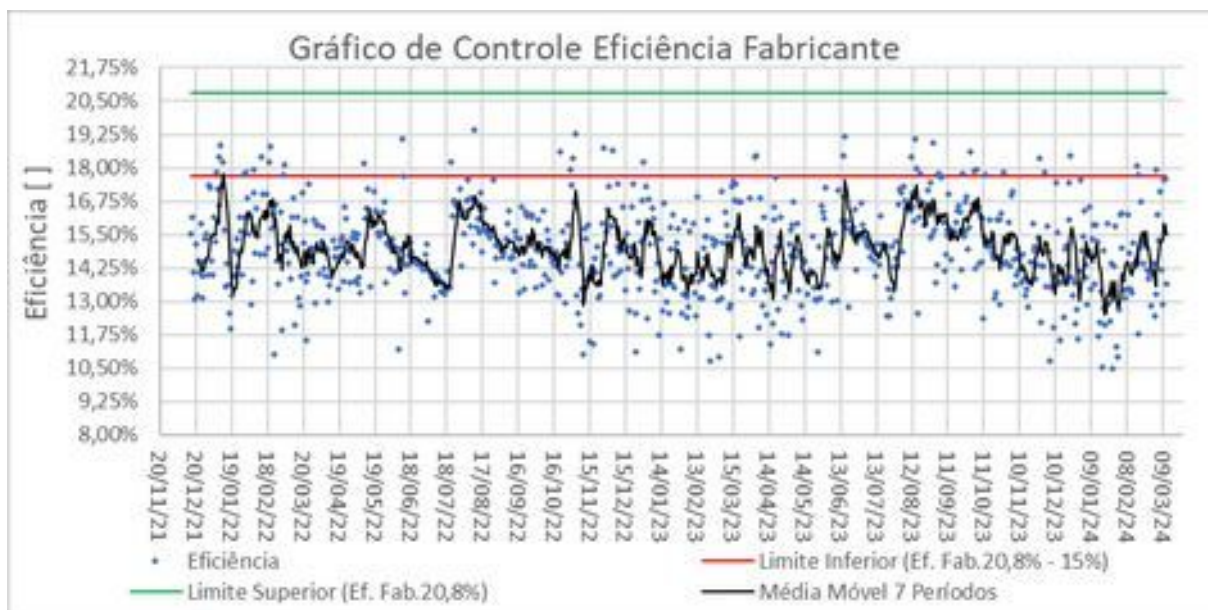
Tabela 10 – Limites de eficiência para o gráfico de controle para Usina 3

	Eficiência Fabricante []	Eficiência Histórica []
Eficiência Esperada (Limite Superior)	20,80%	$\left(\frac{7,5094\text{m}^2}{47,20\text{m}^2}\right) \cdot 107,5\% \cong 17,10\%$
Eficiência Aceitável (Limite Inferior)	$20,80\% \cdot 85\% \cong 17,68\%$	$\left(\frac{7,5094\text{m}^2}{47,20\text{m}^2}\right) \cdot 92,5\% \cong 14,71\%$

Fonte: próprio autor.

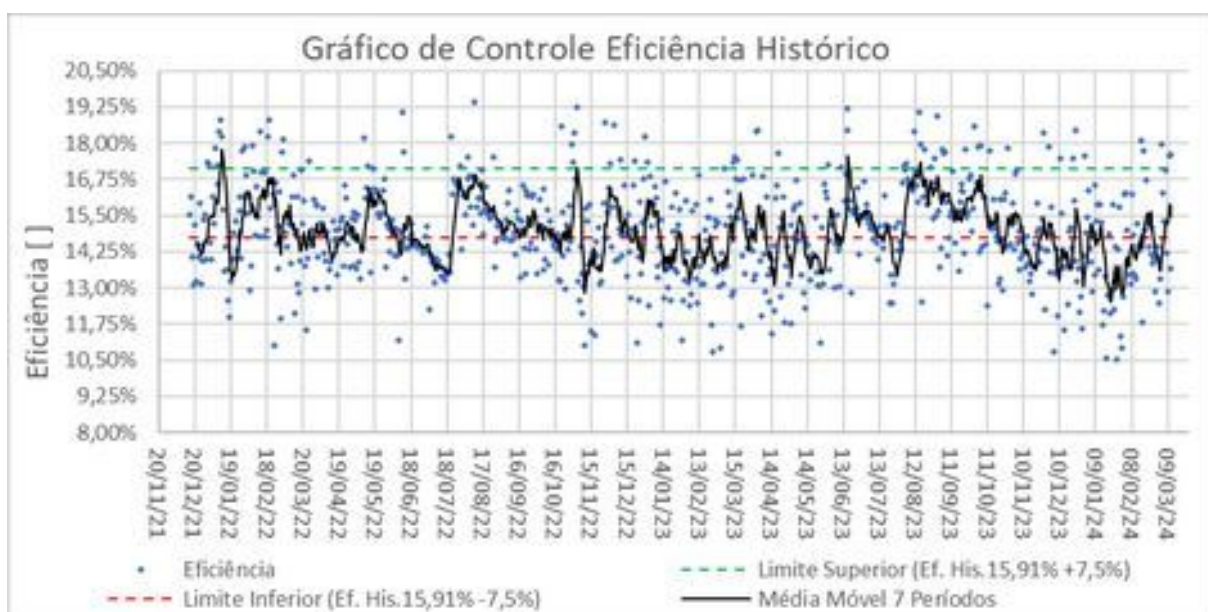
A seguir, encontram-se os gráficos resultantes da análise, onde foi traçada a média móvel dos 7 dias anteriores para facilitar a visualização das tendências em meio à dispersão dos dados (Figura 31 e Figura 32):

Figura 31 – Gráfico de controle baseado na eficiência declarada pelo fabricante para Usina 3



Fonte: próprio autor.

Figura 32 – Gráfico de controle baseado na eficiência histórica dos melhores dados para Usina 3



Fonte: próprio autor.

4.3.6. PERFORMANCE MÉDIA ENCONTRADA NO PERÍODO

Na Tabela 11, a seguir, estão a somatória dos dados diários registrados e estimados no período.

Tabela 11 – Desempenho Geral da Usina 3

Usina 3	Registrado Real	Estimado Histórico	Estimado Fabricante
Geração Total [kWh]	28462,1	31607,83	38036,96
Valor Monetário Gerado [R\$]	20226,02	22461,47	27030,21
Diferenças entre Registrado e Estimado [R\$]	0	2235,449	6804,185
Diferenças Percentuais entre Registrado e Estimado	0%	9,952%	25,173
Eficiência de Geração	14,844%	16,485%	19,838%

Fonte: próprio autor.

4.4. USINA 4

A Tabela 12 apresenta dados mais detalhados da Usina 4, que auxiliarão nas próximas análises.

Tabela 12 – Compilado de informações da Usina 4

Usina 4	
Endereço	Av. Independência, n° 2656, Quadra E1, Lote 04, Set Leste Vila Nova, Goiânia, GO, CEP 74.645-010
Distância até a estação referência	3,21 km
Quantidade e modelo dos painéis	80 x Trina 355W + 20 x Leapton 590W
Frequência qualitativa de limpeza	Baixa (~2 por ano)
Eficiência declarada pelo fabricante	*18,9%
Custo de limpeza (R\$10/painel)	R\$1000,00
Área total da usina	206,25 m ²
Período analisado	01/01/2023 a 31/12/2023
Correlação de Pearson	0,86326 (Positiva Muito Alta)

*estimada a partir da média ponderada entre a eficiência declarada pelo fabricante e o n° de painéis.

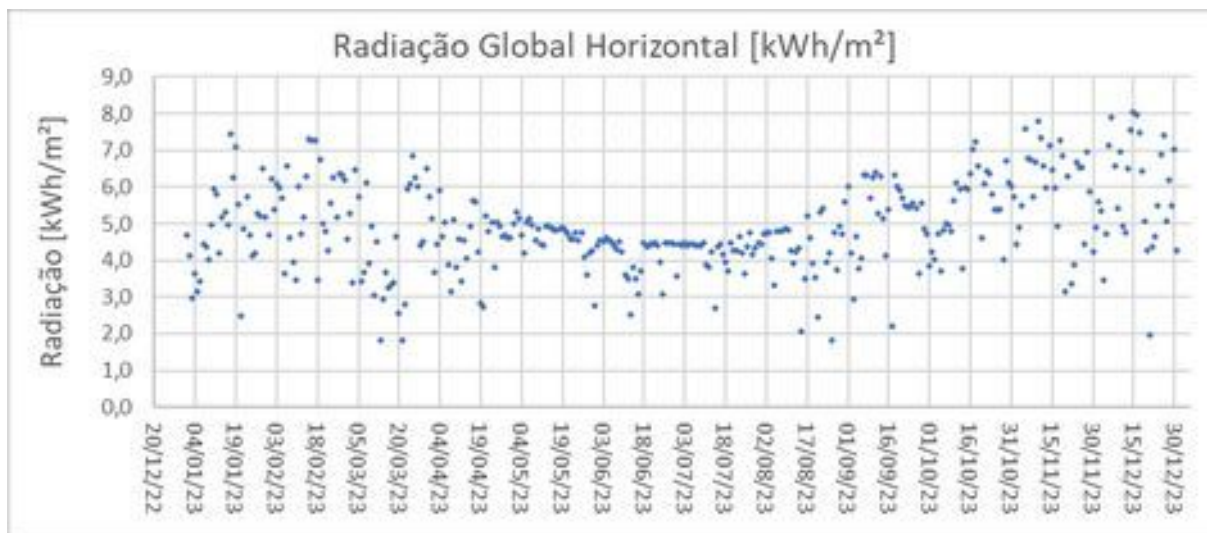
Fonte: próprio autor.

4.4.1. DADOS DE RADIAÇÃO E GERAÇÃO REGISTRADOS NO PERÍODO

Na Figura 33, é possível observar a radiação solar capturada pela estação meteorológica A002 no período mencionado. Ela oscila de forma cíclica, tendo valores elevados no final de agosto até o final de fevereiro, e valores baixos do final de abril

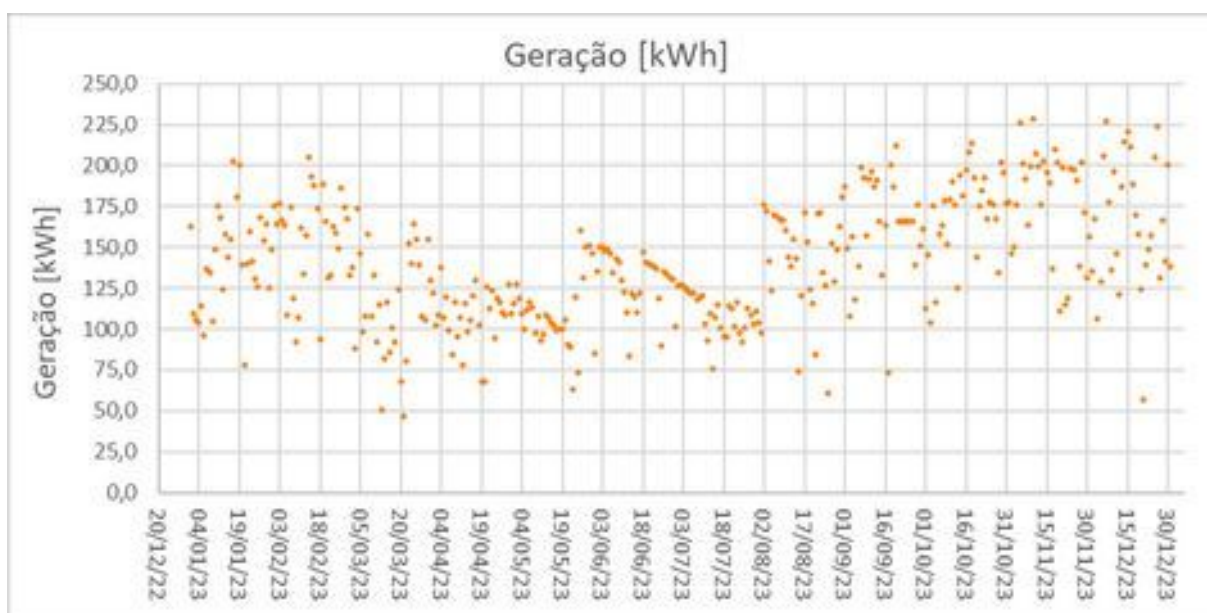
ao final de julho. Enquanto isso, a Figura 34 compila os dados de geração elétrica da Usina 4.

Figura 33 – Radiação registrada de 01/01/2023 a 31/12/2023 na Estação A002



Fonte: próprio autor.

Figura 34 – Geração elétrica registrada de 01/01/2023 a 31/12/2023 na Usina 4

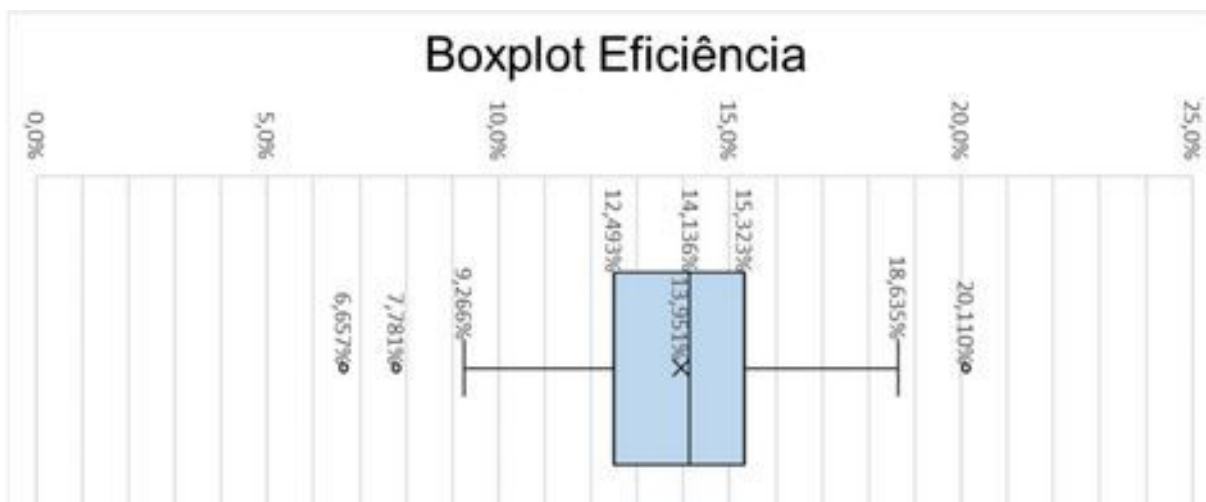


Fonte: próprio autor.

4.4.2. OUTLIERS DOS DADOS DE EFICIÊNCIA

No diagrama a seguir (Figura 35) é possível perceber a presença de um outlier superior e dois inferiores. Em conformidade com a justificativa já apresentada, os dados de geração e radiação relativos a essas eficiências foram removidos das análises subsequentes.

Figura 35 – Diagrama Boxplot da Usina 4



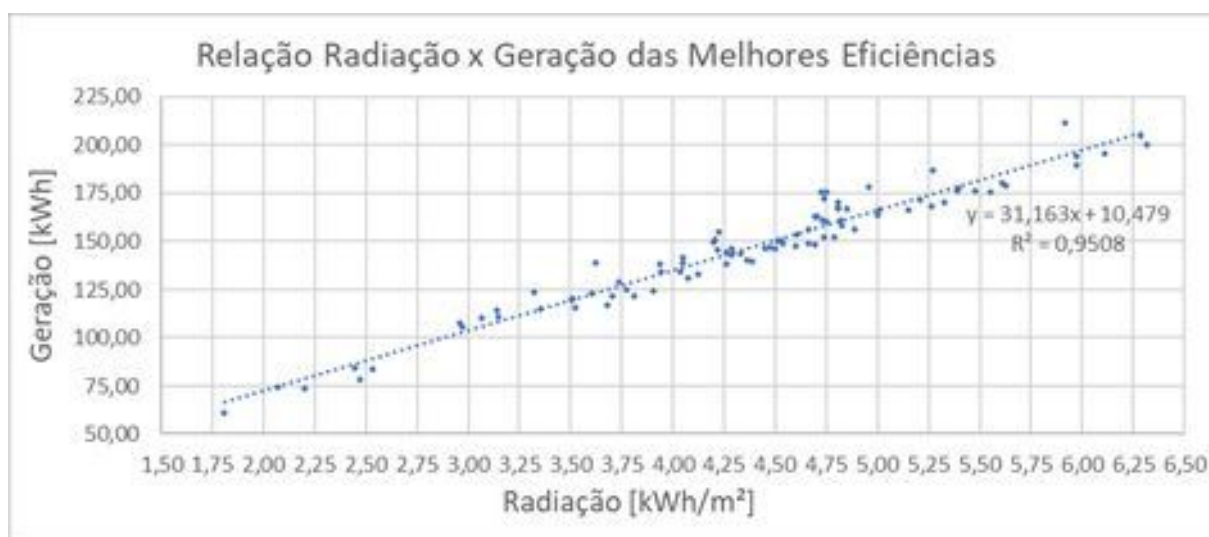
Fonte: próprio autor.

4.4.3. REGRESSÃO LINEAR DOS MELHORES DADOS DE EFICIÊNCIA

A Figura 36, a seguir, mostra a regressão linear dos dados de geração e radiação relacionados às eficiências acima do terceiro quartil, considerados os pontos ótimos do histórico registrado.

A equação encontrada a partir da regressão foi $Geração [kWh] = 31,1632 [m^2] \cdot Radiação [\frac{kWh}{m^2}] + 10,4787[kWh]$. O coeficiente R^2 encontrado foi de 0,9508, indicando um ótimo ajuste da reta de regressão com relação aos dados.

Figura 36 – Regressão linear dos melhores dados de eficiência da Usina 4



Fonte: próprio autor.

4.4.4. GRÁFICOS DE GERAÇÃO E PREJUÍZO ACUMULADOS

A Figura 37 ilustra o somatório da geração de energia durante o período registrado. O elevado valor de R^2 é devido ao grande número de pontos avaliados, contudo, é possível perceber uma forte tendência linear nos dados, com uma leve variação cíclica causada pela sazonalidade da radiação. A taxa de geração diária é indicada pelo coeficiente angular da linha de regressão, com 0 kWh e 0 dias sendo a interseção, resultando em $b = 0$.

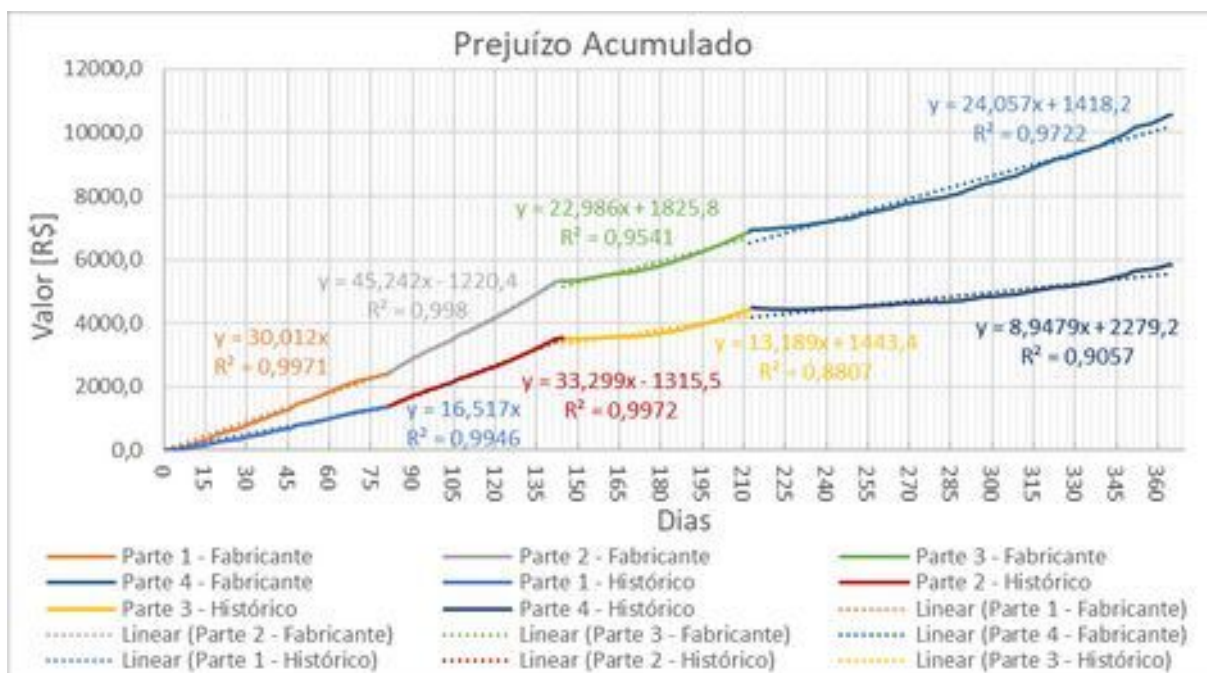
Figura 37 – Geração de energia acumulada no período avaliado para Usina 4



Fonte: próprio autor.

A Figura 38 ilustra o somatório do prejuízo, resultante da diferença entre a geração ideal esperada e a geração real. Diante de uma mudança abrupta na inclinação da tendência de perda monetária diária observada graficamente, decidiu-se dividir o intervalo e aplicar a regressão linear separadamente em cada conjunto de dados, permitindo estimar a taxa de perda diária em diferentes momentos.

Figura 38 – Perda monetária acumulada no período avaliado para Usina 4



Fonte: próprio autor.

4.4.5. GRÁFICO DE CONTROLE BASEADO NO FABRICANTE E HISTÓRICO

Para a análise do controle com base na eficiência declarada pelo fabricante e na eficiência obtida via regressão linear dos dados históricos, foi adotada uma margem de 15% em relação à eficiência da usina, considerando a eficiência de geração declarada pelo fabricante, e uma variação de $\pm 7,5\%$ na eficiência histórica.

Os limites estabelecidos podem ser observados na Tabela 6 a seguir:

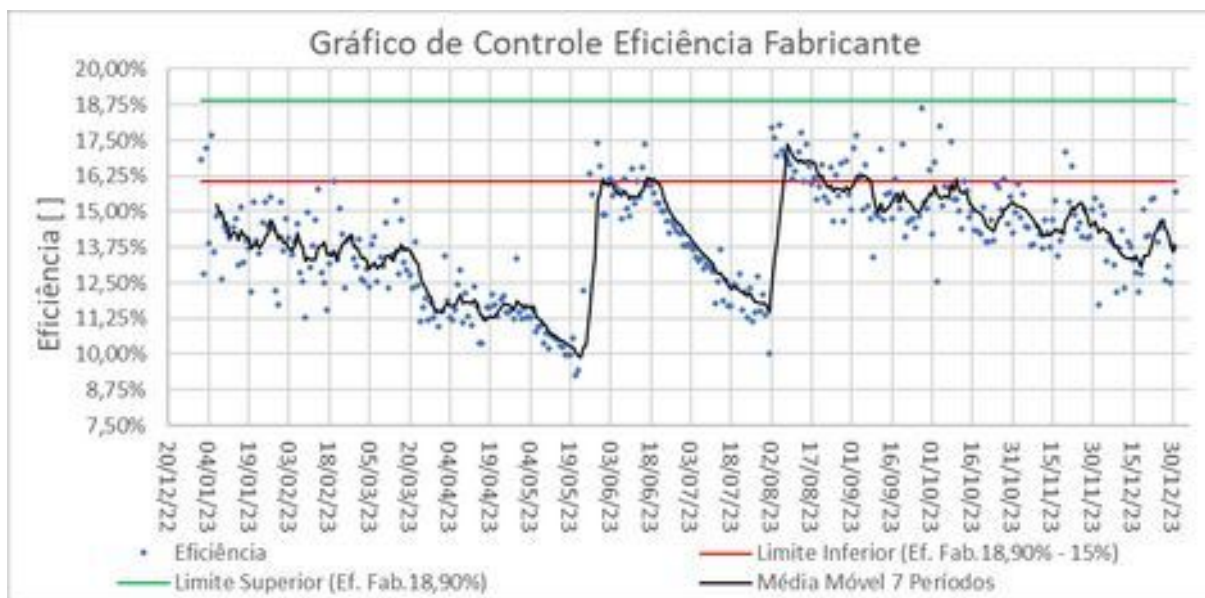
Tabela 13 – Limites de eficiência para o gráfico de controle para Usina 4

	Eficiência Fabricante []	Eficiência Histórica []
Eficiência Esperada (Limite Superior)	20,80%	$\left(\frac{31,163\text{m}^2}{206,25\text{m}^2}\right) \cdot 107,5\% \cong 17,10\%$
Eficiência Aceitável (Limite Inferior)	$20,80\% \cdot 85\% \cong 17,68\%$	$\left(\frac{31,163\text{m}^2}{206,25\text{m}^2}\right) \cdot 92,5\% \cong 14,71\%$

Fonte: próprio autor.

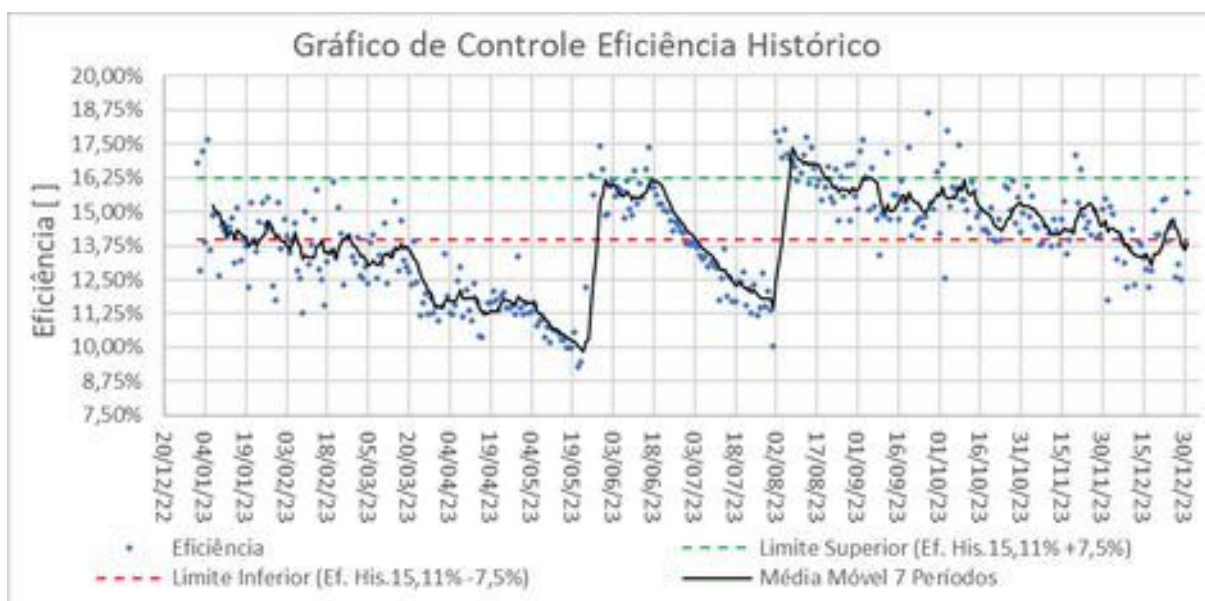
Em seguida, tem-se os gráficos resultantes da análise, nos quais a média móvel referente aos 7 dias anteriores foi traçada para ajudar na visualização das tendências em meio à dispersão dos dados (Figura 39 e Figura 40):

Figura 39 – Gráfico de controle baseado na eficiência declarada pelo fabricante para Usina 4



Fonte: próprio autor.

Figura 40 – Gráfico de controle baseado na eficiência histórica dos melhores dados para Usina 4



Fonte: próprio autor.

4.4.6. PERFORMANCE MÉDIA ENCONTRADA NO PERÍODO

Na Tabela 5, a seguir, estão a somatória dos dados diários registrados e estimados no período.

Tabela 14 – Desempenho Geral da Usina 4

Usina 4	Registrado Real	Estimado Histórico	Estimado Fabricante
Geração Total [kWh]	51323,95	59240,34	65889,15
Valor Monetário Gerado [R\$]	36472,34	42097,96	46822,81
Diferenças entre Registrado e Estimado [R\$]	0	5625,626	10350,47
Diferenças Percentuais entre Registrado e Estimado	0%	13,363%	22,106%
Eficiência de Geração	13,879%	16,019%	17,817%

Fonte: próprio autor.

5. DISCUSSÃO

Após realizada a análise pela metodologia proposta é necessário partir para a interpretação dos resultados e, apenas então, traçar um plano de ação.

Visto que o acúmulo de sujidade não é o único parâmetro que influencia na eficiência global da usina, faz-se necessário perceber se a variação é persistente ou esporádica, já que, para ser consequência do acúmulo de sujidades, as mudanças percebidas na eficiência de geração elétrica devem ocorrer de forma progressiva e persistente. Além disso, é necessário entender qual estratégia e referência utilizar, já que muitas instalações não estão necessariamente nas melhores condições de funcionamento, devendo ser ponderado qual o potencial real de eficiência e geração caso a caso.

Outro fator a ser avaliado na tomada de decisão para o planejamento e controle de manutenção das usinas, visando a otimização na geração de energia, é a significância dos dados obtidos e das relações estabelecidas. Históricos de geração com dados enviesados ou com falhas na aquisição de dados e usinas muito distantes da estação meteorológica utilizada como referência são fatores que levariam a uma análise equivocada sobre o estado de eficiência da usina e sobre as decisões a serem tomadas.

5.1. INTERPRETAÇÃO DOS DADOS GERADOS ACERCA DA USINA 1

Ao analisar a viabilidade do método proposto, observa-se uma forte correlação entre a radiação global horizontal e a geração de energia, com um coeficiente de correlação de 0,85149. Esta alta correlação, resultante da proximidade entre a usina e a estação meteorológica, assegura a precisão da análise. Existem poucos outliers (nove inferiores e dois superiores), conforme visto na Figura 11, indicando dias de baixíssima eficiência e a necessidade de verificar a estrutura e o sistema de aquisição de dados.

Nunca foi realizada uma limpeza na usina, e o gráfico de geração (Figura 10) segue exatamente o perfil da radiação global horizontal (Figura 9). Inicialmente, a usina funcionava adequadamente, mas após dois meses, a eficiência caiu abaixo do mínimo aceitável estipulado para o gráfico de controle baseado nos dados do fabricante (Figura 15), permanecendo assim até o final do período avaliado. Já no gráfico de controle baseado no histórico, a usina manteve-se aceitável por cerca de um ano (Figura 16), indicando que a falta de limpezas compromete a análise, pois os dados de eficiência usados na regressão linear estão subestimados (Figura 12).

Nos gráficos de controle e no gráfico de prejuízo acumulado (Figura 14), percebe-se uma queda acentuada na eficiência das placas solares no início de junho de 2023, com um aumento na taxa de prejuízo diário. Isso provavelmente se deve a um aumento repentino na sujidade das placas por algum fenômeno, que persistiram sujas até o fim do período analisado.

A geração acumulada no período e a taxa de geração diária real e estimadas são mostradas na Figura 13, servindo como base para previsões. A Tabela 4 mostra a diferença entre a geração real e as estimadas. Com a diferença monetária gerada e o custo de limpeza de R\$ 200,00, seria possível realizar quinze limpezas com base na eficiência informada pelo fabricante e oito com base na eficiência histórica, resultando em aumentos de 14,472% e 8,945% na geração total, respectivamente. Essas limpezas não gerariam custos adicionais, pois seriam realizadas com base no custo de oportunidade da geração excedente, ou seja, do prejuízo evitado pelo aumento da eficiência de geração. Caso não sejam necessárias tantas limpezas, já que as usinas tendem a manter um bom desempenho por trinta a sessenta dias após limpas, a manutenção seria mais econômica que a falta de limpeza. Desse modo, as limpezas poderiam ser programadas conforme o gráfico de controle ao atingir o limite mínimo aceitável.

Portanto, a usina deve usar os dados do fabricante como base para análise. A limpeza deveria ter sido feita desde o final de setembro de 2022, já que a usina permaneceu abaixo do seu potencial de geração até o final do estudo.

5.2. INTERPRETAÇÃO DOS DADOS GERADOS ACERCA DA USINA 2

Ao analisar a viabilidade da metodologia proposta na Usina 2, percebe-se uma forte correlação entre a geração de energia e a radiação global horizontal, com um coeficiente de 0,71290. Esse valor, o mais baixo entre as usinas analisadas, deve-se à essa ser a mais distante em relação à estação meteorológica de referência. Foram encontrados poucos outliers, um superior e dois inferiores nulos (Figura 19), indicando um comportamento não tendencioso, com pontos nulos resultantes de possíveis falhas na aquisição de dados ou desligamento do sistema.

Com algumas limpezas realizadas, o gráfico de geração (Figura 18) mostra comportamento similar ao de radiação global horizontal (Figura 17), com maior estabilidade no período de seca, de maio a julho. Pequenos saltos na geração de energia nesse período provêm das limpezas dos painéis no final de maio e junho. Isso é evidente nos gráficos de controle, que possuem limites máximos e mínimos semelhantes, devido a boas instalações e manutenção da usina, resultando em dados de eficiência confiáveis para a regressão linear histórica (Figura 20).

A eficiência inicial estava abaixo da calculada, mas após a primeira limpeza no final de maio, atingiu os valores esperados, decaindo lentamente ao longo de um mês (Figura 23 e Figura 24). Antes de atingir o limite mínimo aceitável, uma nova limpeza no final de junho elevou a eficiência para valores esperados e acima do esperado por dois meses. Após esse período, a eficiência caiu abaixo do mínimo aceitável sem novas limpezas, permanecendo assim até o fim do período. Esse comportamento também é observado no gráfico de prejuízo acumulado (Figura 22), onde a taxa de perda monetária diária começou alta, permaneceu baixa por cento e vinte dias, e voltou a subir, mantendo-se alta até o final do período analisado.

A geração acumulada e a taxa de geração diária estimada real e ideais (Figura 21) servem como parâmetro para previsões de capacidade de geração. Nota-se o distanciamento progressivo entre a geração real e a estimada após cento e cinquenta dias devido à falta de limpezas. A Tabela 8 mostra a diferença entre a geração real e as estimativas baseadas nas informações do fabricante e no histórico das melhores eficiências. Considerando a diferença monetária gerada e um custo de limpeza de 620

reais, seria possível realizar aproximadamente dez limpezas a mais, resultando em um aumento na geração total de cerca de 15%. Essas limpezas não gerariam custos adicionais, pois seriam realizadas com base no custo de oportunidade da geração excedente, ou seja, do prejuízo evitado pelo aumento da eficiência de geração. Se menos limpezas forem necessárias, a manutenção com limpezas seria mais econômica do que a ausência de manutenção. Dessa forma, as limpezas poderiam ser programadas conforme o gráfico de controle atingisse o limite mínimo aceitável.

Assim, é indicado que a usina utilize os dados de melhor eficiência no histórico para a análise. A segunda limpeza poderia ter ocorrido mais tardiamente para melhor aproveitamento da primeira limpeza, e uma nova limpeza deveria ter sido realizada em setembro para manter a eficiência dentro dos limites estabelecidos. Afinal, a usina permaneceu abaixo do seu potencial de geração desde então até o final do período analisado.

5.3. INTERPRETAÇÃO DOS DADOS GERADOS ACERCA DA USINA 3

Ao analisar a aplicação da metodologia na Usina 3, observa-se uma forte correlação entre a geração de energia e a radiação solar global horizontal, com coeficiente de 0,82489, devido à curta distância entre a usina e a estação meteorológica de referência. Isso garante resultados confiáveis para a análise. Foram encontrados treze outliers inferiores e onze superiores, justificáveis pelo tamanho da amostra de oitocentos e dezoito dias (Figura 27).

Algumas limpezas foram feitas, visíveis no gráfico de geração (Figura 26), que segue o perfil da radiação global horizontal (Figura 25), com saltos de desempenho após as limpezas e estabilidade durante os períodos de seca. Apesar disso, o gráfico de controle baseado nas informações do fabricante (Figura 31) mostra a usina abaixo do limite de eficiência mínima durante todo o período analisado, sugerindo problemas de instalação ou dimensionamento.

A análise deve então ser baseada no histórico das melhores eficiências e no respectivo gráfico de controle (Figura 32). Este gráfico mostra que a eficiência estava no limite mínimo no início do período, melhorou após a limpeza em maio de 2022, decaiu após dois meses e melhorou novamente após limpeza em agosto de 2022. A eficiência caiu abaixo dos valores mínimos em novembro de 2022 e permaneceu assim até junho de 2023, melhorando após uma nova limpeza em agosto e se

mantendo acima do limite mínimo até outubro de 2023. Ademais, não houve mais limpezas até o final do período.

A visualização do gráfico de prejuízo acumulado (Figura 30) fica limitada devido ao longo período avaliado e ao baixo valor de geração da usina, contudo é possível perceber leves variações após as limpezas nos dias cento e cinquenta e duzentos e quinze, sendo as mudanças mais expressivas separadas e destacadas. O gráfico de geração acumulada (Figura 29) destaca o potencial de geração baseado no fabricante e no histórico além da geração real no período. A Tabela 11 mostra que a usina está subaproveitada com relação ao potencial baseado nas informações do fabricante dos painéis, com uma geração 25,173% maior possível se as instalações e manutenção fossem adequadas, resultando em um prejuízo de R\$ 6804,00 em dois anos e três meses. Com base no histórico, onze limpezas a mais poderiam aumentar a geração em 9,952%, sem custos adicionais, uma vez que essas limpezas seriam financiadas pela melhora na capacidade de geração não desperdiçada. Se menos limpezas forem necessárias, a manutenção com limpezas seria mais econômica do que a não realização das limpezas.

Recomenda-se um estudo para identificar os fatores que limitam a eficiência dos painéis e seguir a análise com base nos melhores dados históricos de eficiência. A segunda limpeza foi tardia e poderia ter sido melhor programada. Uma nova limpeza deveria ter sido feita desde o final de outubro para evitar perdas substanciais na geração. A terceira limpeza melhorou a eficiência, mas a usina terminou o período avaliado abaixo da eficiência mínima aceitável.

5.4. INTERPRETAÇÃO DOS DADOS GERADOS ACERCA DA USINA 4

Ao avaliar a viabilidade da aplicação da metodologia proposta na Usina 4, constatou-se a mais alta correlação entre as usinas estudadas, com um coeficiente de correlação de 0,86326, sendo essa a usina mais próxima à estação de referência. Essa forte correlação garante que a análise será adequada e precisa. Foram identificados dois outliers inferiores e um superior, demonstrando que a usina não apresenta tendências significativas em relação à eficiência de geração estipulada pela radiação global horizontal (Figura 35).

Algumas limpezas foram registradas ao longo do período avaliado, sendo possível perceber que o gráfico de geração (Figura 34) segue o perfil do gráfico de radiação global horizontal (Figura 33) na maior parte do tempo. Houve saltos de

performance quanto a geração nas limpezas realizadas no começo de junho e no final de julho. É interessante notar que, devido à quantidade de painéis, não foi possível realizar a limpeza total da usina em um único dia em junho, resultando em um comportamento de platô entre as etapas da primeira limpeza. Essa variação é evidenciada nos gráficos de controle, contudo, a eficiência permanece abaixo do limite mínimo aceitável conforme as especificações dos fabricantes (Figura 39) durante o período analisado, apesar das limpezas. Isso indica uma limitação relacionada ao dimensionamento ou instalação, não provocada pelo acúmulo de sujeira. Essa percepção é crucial para decisões assertivas no controle e planejamento de manutenção da usina.

Dessa forma, fica evidente que não é possível utilizar os dados do fabricante como parâmetro ideal de funcionamento, restando recorrer à realidade de geração da usina descrita pelo gráfico de controle baseado no histórico (Figura 40) e nas melhores eficiências (Figura 36). Observa-se que a primeira limpeza foi realizada tardiamente, após aproximadamente quatro meses de eficiência abaixo do limite mínimo aceitável. Após a primeira limpeza, a eficiência voltou aos patamares esperados, mas rapidamente decaiu. Aproximadamente um mês depois, a eficiência estava novamente abaixo do limite mínimo aceitável, provavelmente devido à grande quantidade de partículas suspensas na atmosfera durante os meses de seca. A segunda limpeza foi realizada tardiamente novamente, no início de agosto; contudo, devido ao início das chuvas, a eficiência se manteve dentro dos limites do gráfico de controle por aproximadamente quatro meses, ultrapassando o limite mínimo novamente no final do período avaliado. Esse comportamento também é refletido nos gráficos de prejuízo acumulado e geração acumulada (Figuras 38 e 37).

A Tabela 14 evidencia que a usina está sendo subaproveitada, sendo possível gerar, com a eficiência declarada pelos fabricantes, 22,106% mais energia, resultando em uma perda de R\$ 10.350,00 no período de um ano. Considerando os dados históricos, poderiam ser realizadas cinco limpezas a mais no período estudado, resultando em uma geração 13,363% maior. Essas limpezas não acarretariam custos adicionais para as instalações, pois seriam efetuadas com base no custo de oportunidade da geração excedente, ou seja, na perda que a usina evitaria ao alcançar seu pleno potencial de geração. Além disso, se não for necessário realizar tantas limpezas, já que as usinas geralmente mantêm um bom desempenho por trinta a sessenta dias após a eliminação das sujidades, a manutenção da usina poderia ser

mais econômica do que a falta de limpeza dos painéis. Para isso, as limpezas poderiam ser programadas conforme o gráfico de controle, sempre que este atingisse o limite mínimo aceitável.

Portanto, o mais indicado para essa usina é realizar um estudo para compreender quais fatores têm limitado a eficiência dos painéis tão abaixo do especificado pelo fabricante. Além disso, deve-se seguir com a análise utilizando os melhores dados de eficiência histórica. A primeira e a segunda limpeza foram tardias em relação ao limite mínimo de eficiência aceitável e poderiam ter sido melhor programadas. Não obstante, uma nova limpeza deveria ter sido realizada no final de dezembro. Assim sendo, a usina encerra o período de estudo no limite mínimo de eficiência aceitável.

6. CONCLUSÃO

A metodologia proposta para o planejamento estratégico na remoção das sujidades em usinas fotovoltaicas se mostrou satisfatória dentro da proposta a qual se destina. Isto posto, seu uso como uma ferramenta para otimização da geração colabora na tomada de decisão quanto ao controle e planejamento de manutenção das usinas fotovoltaicas.

Ficou evidente, através da análise de quatro casos distintos, que a importância da programação de limpeza e controle dos níveis de eficiência das usinas estudadas foi negligenciada. Além disso, foi visto que as limpezas ocorrem preferencialmente durante os períodos de seca, quando é notável o grande acúmulo de sujidades nos painéis devido a elevada quantidade de partículas suspensas na atmosfera. Ainda, pode-se observar que nesse período o decaimento da eficiência após as limpezas é muito mais rápido que nos períodos de chuva.

Não obstante, identificou-se que algumas usinas estavam com potencial de geração muito inferior ao esperado, podendo indicar problemas mais sérios de projeto, estrutura ou dimensionamento, resultando em uma subutilização do potencial de geração das células fotovoltaicas. Assim, através da utilização do método proposto, as limpezas podem ser realizadas com mais assertividade, garantindo a redução de prejuízos. Afinal, nos casos estudados, a perda com relação ao potencial de geração chegou milhares de reais por ano.

Pontos de melhoria para futuros estudos poderiam ser propostos a partir de uma melhor modelagem para a radiação, utilizando estimativas de irradiação no plano

de inclinação dos painéis caso a caso. Ainda, fazem-se necessários estudos de outros parâmetros que afetam a eficiência em paralelo com o acúmulo de sujidades, como a temperatura média dos painéis, a velocidade do vento e a pluviosidade.

Uma recomendação relevante, após os resultados apresentados pelo presente estudo, é a aquisição de dispositivos de medição da radiação, piranômetros, para instalação na localização da usina. A captação desses dados de radiação in loco pode trazer melhorias quanto a avaliação da eficiência decorrente da relação entre geração, radiação e área da usina.

REFERÊNCIAS

- ABSOLAR - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA. **Panorama da solar fotovoltaica no Brasil e no mundo. Energia Solar Fotovoltaica no Brasil - Infográfico ABSOLAR.** São Paulo, 2024. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>. Acesso em: 24 de julho de 2024.
- EQUATORIAL ENERGIA. **Valor de Tarifas e Serviços.** Disponível em: <<https://go.equatorialenergia.com.br/valor-de-tarifas-e-servicos/#residencial-normal>>. Acesso em: 18 de julho de 2024.
- HINKLE, D. E.; WIERSMA W.; JURIS S. G. **Applied Statistics for the Behavioral Sciences.** 5. ed. Boston: Houghton Mifflin, 2003.
- INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA DO BRASIL. **Banco de Dados Meteorológicos.** Brasília, 2024. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>>. Acesso em: 20 de julho de 2024.
- IQBAL, M. **An Introduction to solar radiation.** Toronto: Academic Press, 1983.
- KLEIN, S. A. **Calculation of Monthly Average Insolation on Tilted Surfaces.** Solar Energy, v. 19, p. 325-329, 1977.
- KORONAKIS, P. S. **On the choice of the angle of tilt for south facing solar collectors in the Athens basin area.** Solar Energy, v. 36, p. 217-225, 1986.
- LILLO-BRAVO, I. et al. **Impact of Energy Losses Due to Failures on Photovoltaic Plant Energy Balance.** Energies, v. 11, n. 2, p. 363, 2018.
- LIU, B. Y. H.; JORDAN, R. C. **The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation.** Solar Energy, v.4, p.1-19, 1960.
- LUCIANO, A. C. S. **Modelagem da distribuição da radiação solar incidente na superfície do terreno a partir de dados SRTM.** 2015. 88 f. Dissertação (Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015.
- MONTALVÃO, E.; FARIA, I. D. Energia Sustentável para Todos. **Boletim do Legislativo Nº 16, DE 2012.** Senado Federal. Disponível em: <<https://www2.senado.leg.br/bdsf/bitstream/handle/id/242648/Boletim2012.16.pdf?sequ%20ence=1>>. Acesso em: 25 de julho de 2024.
- REVFEIM, K. J. A. **A simple procedure for estimating global daily radiation on any surface.** Journal of Applied Meteorology, v.17, p.1126-1131, 1978.
- SILVA, J. A. A. **Tratamento de dados meteorológicos e análise de desempenho do sistema fotovoltaico da EMC/UFG.** 2019. 188 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e da Computação) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2019.

VITTI, D. C.; ALVARES, L. M. **Avaliação da eficiência de sistemas fotovoltaicos**. 2006. 111 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

XIN, L.; AHMAD, M.; MURSHED, M. **Toward next-generation green solar cells and environmental sustainability: impact of innovation in photovoltaic energy generation, distribution, or transmission-related technologies on environmental sustainability in the United States**. Environ Sci Pollut Res Int., v. 29, n. 59, p. 89662–89680, 2022.