

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CAMPUS GOIÂNIA/DEPARTAMENTO DAS ÁREAS ACADÊMICAS IV
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**ERIKA OLIVEIRA PALHARES
ELIZARDO MARTINS DE SOUZA NETO**

**ANÁLISE DA SUJIDADE NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DAS PLACAS
FOTOVOLTAICAS POR MEIO DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS**

**GOIÂNIA
2024**

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Elizardo Martins de Souza Neto

Matrícula: 20191011060220

Título do Trabalho: Análise da Sujidade na Eficiência Energética das Placas Fotovoltaicas por Meio de Processamento de Imagens

Autorização - Marque uma das opções

1. ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- () O documento está sujeito a registro de patente.
 () O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
 () Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Goiânia, 07/03/2024.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Erika Oliveira Palhares Matrícula:
20191011060343

Título do Trabalho: Análise da Sujidade na Eficiência Energética das Placas Fotovoltaicas por Meio de Processamento de Imagens

Autorização - Marque uma das opções

1. (X) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. () Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. () Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- () O documento está sujeito a registro de patente.
() O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
() Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Goiânia, 07/03/2024.

Erika Oliveira Palhares

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

ERIKA OLIVEIRA PALHARES
ELIZARDO MARTINS DE SOUZA NETO

**ANÁLISE DA SUJIDADE NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DAS PLACAS
FOTOVOLTAICAS POR MEIO DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS**

Trabalho de Conclusão de Curso, submetido à Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Antônio Cardoso

Coorientador: Prof. Me. Paulo Sérgio Zanin Jr.

GOIÂNIA
2024

- P161a Palhares, Erika Oliveira.
Análise da sujidade na eficiência energética das placas fotovoltaicas por meio de processamento de imagens / Erika Oliveira Palhares; Elizardo Martins de Souza Neto. –
Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia, 2024.
52 f.: il.
- Orientador: Prof. Dr. Marcos Antônio Cardoso de Lima.
Coorientador: Prof. Me. Paulo Sérgio Zanin Júnior.
- TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) – Bacharelado em Engenharia Elétrica,
Departamento de Áreas Acadêmicas IV, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de
Goiás, Câmpus Goiânia.
1. Placa solar fotovoltaica - eficiência energética - sujidade. 2. Sistema fotovoltaico. I.
Souza Neto, Elizardo Martins de. II. Lima, Marcos Antônio Cardoso de (orientador). III. Zanin
Júnior, Paulo Sérgio (coorientador). IV. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de
Goiás, Câmpus Goiânia. V. Título.
- CDD 623.3

Ficha catalográfica elaborada pelo Bibliotecário Alisson de Sousa Belthodo Santos CRB1/ 2.266
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS GOIÂNIA

ERIK A OLIVEIRA PALHARES
ELIZARDO MARTINS DE SOUZA NETO

**ANÁLISE DA SUJIDADE NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DAS PLACAS FOTOVOLTAICAS
POR MEIO DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, como parte das exigências para obtenção do Título de Engenheiro Eletricista.

Goiânia, 04 de março de 2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcos Antônio Cardoso de Lima
Orientador - IFG/Goiânia

Prof. Me. Paulo Sérgio Zanin Júnior
Coorientador - IFG/Goiânia

Prof. Dr. Cláudio Afonso Fleury
Membro Interno da Banca Examinadora - IFG/Goiânia

Profa. Dra. Janaina Ferreira
Membro Interno da Banca Examinadora - IFG/Goiânia

Documento assinado eletronicamente por:

- **Claudio Afonso Fleury**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 06/03/2024 18:40:26.
- **Janaina Ferreira**, CHEFE - CD4 - GYN-DAAIV, em 05/03/2024 14:42:31.
- **Paulo Sergio Zanin Junior**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 04/03/2024 19:34:20.
- **Marcos Antonio Cardoso de Lima**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 04/03/2024 16:36:01.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 04/03/2024. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 514893
Código de Autenticação: 1c07bd86dd



RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre a interferência da sujidade na eficiência dos módulos solares por meio de análise de imagens fotográficas no formato RGB. O objetivo principal é quantificar a intensidade de sujeira depositada sobre as placas fotovoltaicas e relacionar ao impacto provocado na redução de eficiência do sistema. A metodologia adotada consiste em avaliar o desempenho das placas solares fotovoltaicas, por meio de testes comparativos com diferentes níveis de sujidade, utilizando imagens fotográficas, associando a eficiência de geração fotovoltaica às respostas dos níveis de intensidade das cores obtidas no padrão RGB. Como resultado, obteve-se uma equação que pode ser aplicada em situações reais de sistemas solares fotovoltaicos, estimando a porcentagem pela qual a sujeira afeta a produção de energia solar. Dessa forma, é possível mitigar sistema e desenvolver planos periódicos de manutenção e limpeza, garantindo a máxima eficiência do sistema e preservando o tempo de vida útil dos módulos solares.

Palavras-chave: sujidade, placa solar fotovoltaica, eficiência, imagens padrão RGB.

ABSTRACT

This work presents a study of the interference of dirty on photovoltaic solar modules efficiency by analyzing photographic images based on RGB format. The main objective is quantify the intensity of dirt deposited on photovoltaic panels and relate it to the impact it has on reducing the system's efficiency. The methodology adopted consists of evaluating the performance of photovoltaic solar panels by means of comparative tests with different levels of dirt, using photographic images, associating the efficiency of photovoltaic generation with the responses of the intensity levels of the colors obtained in the RGB standard. As a result, an equation was obtained that can be applied to real situations in solar photovoltaic systems, estimating the percentage by which dirt affects solar energy production. In this way, it is possible to mitigate damage to the system and develop periodic maintenance and cleaning plans, ensuring maximum system efficiency and preserving the useful life time of the solar modules. keywords: dirty, photovoltaic panels, efficiency, RGB standard, photographic images.

SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	5
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	6
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS.....	7
1 INTRODUÇÃO.....	8
1.1 JUSTIFICATIVA.....	9
1.2 OBJETIVOS GERAIS.....	10
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	10
1.4 METODOLOGIA.....	11
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	11
2 PRINCIPAIS COMPONENTES DO SISTEMA FOTOVOLTAICO.....	12
2.1 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS.....	12
2.2 MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.....	14
2.3 RADIAÇÃO SOLAR.....	18
3 PERDAS NOS SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS.....	19
3.1 PERDAS POR SUJIDADE.....	20
3.2 PERDAS POR SOMBREAMENTO DOS MÓDULOS.....	22
3.3 PERDAS POR SUPERAQUECIMENTO DOS MÓDULOS.....	22
3.4 PERDAS POR DANOS OU AVARIAS NO MÓDULO.....	23
4 METODOLOGIA.....	23
4.1 BANCADA DE TESTES.....	24
4.2 ANÁLISE DE IMAGENS NO FORMATO RGB.....	27
4.3 SOFTWARE RADIASOL.....	29
5 RESULTADOS.....	30
5.1 CORREÇÃO POR MEIO DO SOFTWARE RADIASOL.....	30
5.2 ANÁLISE DE IMAGENS COM O SOFTWARE IMAGEJ.....	33
5.3 ANÁLISE GRÁFICA.....	37
5.4 ANÁLISE ECONÔMICA.....	44
6 CONCLUSÕES.....	48
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Estrutura interna de uma célula Fotovoltaica.....	14
Figura 2 - Curva típica do comportamento da célula.....	16
Figura 3- Representação esquemática de um módulo solar fotovoltaico.....	16
Figura 4 – Tabela de Eficiência Energética.....	17
Figura 5- Células de silício policristalino (à esquerda) e monocristalino (à direita).....	18
Figura 6 - Células Filmes finos.....	19
Figura 7 - Curva de uma célula em relação a variação de radiação.....	20
Figura 8 - Curvas de Módulos Fotovoltaicos: sujos, limpos manualmente e, limpos com pressurização.....	22
Figura 9- Curvas de Módulos Fotovoltaicos: Efeito MPPT.....	23
Figura 10- Curva do efeito do sombreamento.....	24
Figura 11 - Curva do efeito do superaquecimento.....	24
Figura 12- Placa com sujeira residual (S1).....	26
Figura 13- Intensidade S2e S3 de sujeira.....	27
Figura 14- Intensidade S4e S5 de sujeira.....	27
Figura 15- Placas Limpas.....	28
Figura 16 – Irradiação solar média.....	32
Figura 17 – S1 e S2 no ImageJ.....	35
Figura 18 – S3 e S4 no ImageJ.....	35
Figura 19 - S5 e Limpa no ImageJ.....	36
Figura 20 - Valores Médios de RGB para as condições S1 e S2 no Software ImageJ.....	36
Figura 21- Valores Médios de RGB para as condições S3 e S4 no Software ImageJ.....	37
Figura 22 - Valores Médios de RGB para as condições S5 e LIMPO no Software ImageJ.....	37
Figura 23- Gráfico Geral.....	39
Figura 24- Gráfico Vermelho.....	39
Figura 25- Gráfico Azul.....	40
Figura 26- Gráfico Cinza.....	41
Figura 27- Potência x Azul.....	42
Figura 28- Potência x Verde.....	42
Figura 29- Potência x Cinza.....	43
Figura 30 - Potência x Vermelho.....	44
Figura 31- Irradiação Solar Média em Janaúba MG.....	45
Figura 32- Sistema Solar Residencial formado por 15 placas de 560 Wp.....	47
Figura 33 - Irradiação Solar Média em Goiânia GO.....	48

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

EVA	<i>Ethylene Vinyl Acetat</i> – Acetato de Vinil Etileno
CSP	<i>Concentrated Solar Power</i> – Energia Solar Concentrada
HSP	Horas de Sol Pleno
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i> – Comissão Eletrotécnica Internacional
IFG	Instituto Federal de Goiás
MPPT	<i>Maximum Point Power Tracker</i> – Rastreador de Potência de Ponto Máximo
OPV	<i>Organic Photovoltaics</i> – Células Solares Orgânicas
PV	<i>Photovoltaic</i> – Fotovoltaico
PVF	<i>Polyvinyl Fluoride</i> – Fluoreto de Polivinila
RGB	<i>Red, Green, Blue</i> – Vermelho, Verde, Azul

1 INTRODUÇÃO

O sol é uma fonte inesgotável de luz, e sua energia pode ser explorada de várias formas, desde as mais simples, como por meio de placas solares térmicas que aquecem água para uso residencial, até os sistemas de geração de energia solar fotovoltaica constituídos por painéis de células fotovoltaicas capazes converter a energia proveniente da irradiação solar em energia elétrica [1].

Durante décadas, a energia solar fotovoltaica foi considerada uma opção inviável para obtenção de energia elétrica devido ao seu elevado custo. Contudo, nos últimos anos, os desenvolvimentos de novos materiais, de processos de fabricação e tecnologias de projetos, permitiram avanços significativos na eficiência energética das células fotovoltaicas, tornando a energia solar fotovoltaica altamente atrativa [2].

No Brasil, observa-se um crescimento exponencial na capacidade de geração fotovoltaica ao longo dos anos. Em 2012, a capacidade instalada era de apenas 8 MW. Em 2017, a capacidade instalada ultrapassa a marca dos GW. Desde então, o crescimento foi significativo, atingindo 28,9 GW em 2023 [3].

No entanto, mesmo com os progressos obtidos nas tecnologias das placas, as células e módulos fotovoltaicos enfrentam diversas perdas ao longo de sua vida útil, que podem comprometer a sua eficiência. Entre as principais perdas, destacam-se as perdas por sujeira acumulada na superfície dos painéis, as perdas devido à exposição a condições climáticas adversas, devido a manchas e possíveis danos decorrentes de quedas ou erros de montagem.

Esses fatores podem afetar a quantidade de luz solar captada pelas células fotovoltaicas, reduzindo a eficiência do sistema. Nesse contexto, a manutenção e limpeza dos painéis em conjunto com a avaliação da sua eficiência torna-se fundamental para o pleno aproveitamento da capacidade instalada do sistema.

Neste trabalho propõe-se analisar a influência da sujidade nos módulos fotovoltaicos na geração de energia elétrica por meio da análise de imagens fotográficas. A proposta tem como base a análise da intensidade das cores obtidas por meio do formato RGB de imagens fotográficas das placas fotovoltaicas. O objetivo principal é quantificar a intensidade de sujeira depositada sobre as placas fotovoltaicas, associando a eficiência de geração fotovoltaica às respostas dos níveis de intensidade das cores obtidas no padrão RGB.

Como resultado, obteve-se uma equação que pode ser aplicada em situações reais de sistemas solares fotovoltaicos, estimando a porcentagem pela qual a sujeira afeta a produção de energia solar. Dessa forma, é possível mitigar as perdas do sistema e desenvolver planos periódicos de manutenção e limpeza, garantindo a máxima eficiência do sistema e preservando o tempo de vida útil dos módulos solares.

Além disso, este estudo visa fornecer informações relevantes para profissionais do setor fotovoltaico, fabricantes, instaladores e consumidores interessados em entender melhor as perdas que podem ocorrer em decorrência da sujeira nos painéis.

1.1 JUSTIFICATIVA

Os painéis solares fotovoltaicos são essenciais para o funcionamento de todo o sistema fotovoltaico, uma vez que são eles os responsáveis por captar a energia solar e convertê-la em energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico. O acúmulo de sujeira nos painéis, é a principal causa de perda de potência do sistema fotovoltaico. Essa degradação depende de um conjunto de fatores que podem variar de acordo com a localização geográfica da instalação dos painéis [3]- [4].

A norma IEC 60904-1:2020 define os procedimentos para a medição das características de corrente e tensão de dispositivos fotovoltaicos. Tal norma, é fundamental para determinar com precisão e qualidade a eficiência energética do sistema. Adicionalmente, a norma IEC 62446-2:2020 estabelece os requisitos e recomendações básicas de manutenção preventiva e corretiva relacionada ao desempenho de sistemas fotovoltaicos ligados a rede. A correta aplicação dessas normas, é imprescindível para maximizar o desempenho previsto para o sistema.

É importante ressaltar que o bom desempenho do sistema solar fotovoltaico depende diretamente da manutenção preventiva e periódica do próprio sistema. Nesse contexto, a norma IEC 62446-2:2020 determina as fontes de sujeira que podem indicar a necessidade de um regime de limpeza periódico, a saber: i) poeira agrícola, ii) poeira proveniente de construção, iii) pólen, iv) matéria orgânica (fungos ou algas), v) dejetos de aves, vi) fuligem de gásóleo vii) fontes industriais. No entanto, a norma não especifica diretamente qual o regime de manutenção deve ser adotado em cada caso. Para isso, é importante seguir as orientações do fabricante de painéis [4].

Compreendido que todo o sistema solar fotovoltaico, bem como o seu correto funcionamento e máxima eficiência dependem da correta manutenção preventiva e periódica e que, a norma IEC 62446-2:2020 define as fontes de sujeira que influenciam em todo esse

processo, o estudo do impacto da correta manutenção desse sistema é completamente justificado.

Pode-se destacar também, situações que não se enquadram nas sujidades especificadas pela norma que afetam o correto funcionamento do sistema solar fotovoltaico e devem ser analisadas e consideradas.

Diante do exposto, a problemática enfrentada neste trabalho, é justamente a falta de normas nacionais que regulamentem as limpezas periódicas do sistema, devido sua crítica importância para o funcionamento do sistema, além da falta de especificidade das normas internacionais no âmbito da problemática exposta no parágrafo anterior.

Portanto, como hipótese para este trabalho tem-se: o estudo da interferência da sujeira na eficiência dos painéis por meio de análise de imagens a fim de mitigar as perdas do sistema e maximizar o rendimento e vida útil.

1.2 OBJETIVOS GERAIS

O objetivo geral deste trabalho é analisar sob a perspectiva das normas existentes, a interferência da sujidade na eficiência do sistema fotovoltaico. Resultando em um estudo de caso comparativo com análise do sistema com sujidade e após a correta limpeza, a fim de determinar o ganho de eficiência do sistema além da perspectiva financeira. Essas medições e testes serão realizados no Instituto Federal de Goiás – Campus Goiânia.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para esta proposta de trabalho, tem-se como objetivos específicos:

- Realizar o estudo de artigos científicos relacionados a perda de eficiência energética por sujidade;
- Avaliar as normas existentes de modo a analisar as insciências acerca da manutenção periódica dos painéis;
- Analisar os métodos existentes de medição de sujidade nos módulos;
- Utilizar os painéis solares do Campus Goiânia do IFG, como estudo de caso para estimar as interferências da sujidade na eficiência do sistema;

1.4 METODOLOGIA

Este trabalho propõe uma investigação quantitativa da análise da interferência da sujidade na eficiência de um sistema solar fotovoltaico.

O experimento consiste em avaliar o desempenho de uma placa solar, submetida a diferentes níveis de sujidade. Para cada nível de sujidade é obtida uma imagem fotográfica e analisado a intensidade das cores no formato RGB. Para a análise de imagens propõe-se o software *ImageJ*, devido à fácil interface do programa na análise de regiões em imagens fotográficas e na apresentação dos resultados.

Os experimentos práticos foram realizados no Câmpus Goiânia do Instituto Federal de Goiás. Devido ao tempo necessário para realização do experimento, propõe-se o uso do *Software Radasol* para correção da variação da radiação solar ocorrida ao longo do experimento.

A estrutura deste trabalho é dividida em duas etapas distintas. Na primeira fase de testes, será determinada a abordagem necessária para quantificar a intensidade da sujeira aplicada nos módulos em cada medição. Na segunda fase serão validados o modelo e a precisão do método de análise de imagens. Com isso, pretende-se obter os seguintes resultados:

- Determinar a curva representativa da relação entre sujidade e energia gerada;
- Avaliar a viabilidade de manutenção e limpeza periódica;
- Realizar o dimensionamento da economia financeira relacionada ao estudo;

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura deste trabalho é dividida em seis capítulos. O primeiro capítulo consiste na introdução, onde é apresentado a contextualização e os objetivos deste estudo. Além disso, é descrito a metodologia utilizada e uma visão geral da organização do trabalho.

No segundo capítulo, é abordado a primeira parte da fundamentação teórica deste estudo, abordando alguns conceitos básicos do sistema solar fotovoltaico. É explorado os componentes do sistema fotovoltaico, descrição dos tipos de células e módulos fotovoltaicos. Além disso, discute-se a captação da radiação dos módulos bem como, a utilização e funcionamento do *Software Radasol*.

O terceiro capítulo, aborda algumas das diversas perdas que podem ocorrer em um sistema solar fotovoltaico bem como, o modo com que elas afetam a eficiência e a produção de energia dos módulos solares.

O quarto capítulo, tem como foco detalhar a metodologia do teste realizado. Nele, serão apresentados os materiais utilizados durante o experimento, bem como a sequência de procedimentos desde a montagem da bancada até a aplicação de diferentes intensidades de sujeira. Assim, explorando a teoria subjacente à correlação entre a análise de imagem e o formato RGB, este conhecimento teórico é para compreender e aplicar as técnicas de análise de intensidade de cor na avaliação da sujidade nos módulos. Aprofundando nos próximos capítulos de como a teoria se traduz em prática, fornecendo uma base para as análises subsequentes.

O quinto capítulo concentra-se em detalhar os resultados, explorando uma análise gráfica de cada uma das cores a fim de determinar qual seria a mais adequada para estimar quantitativamente a interferência da sujeira depositada nos painéis. Além de realizar a análise financeira deste trabalho com os resultados obtidos implementados em um exemplo prático real.

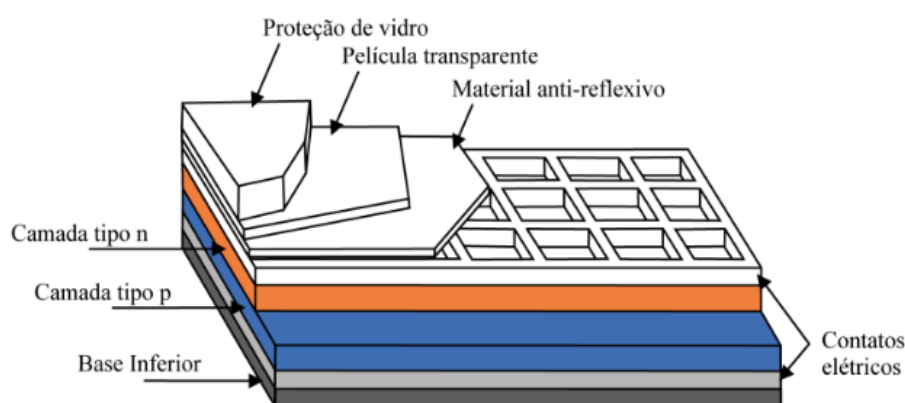
Por fim, o sexto e último capítulo encerra este trabalho com as conclusões encontradas, apresentando as descobertas provenientes do teste prático, análise de dados e avaliação financeira, com destaque para a solução de cada um dos objetivos propostos. Além de sugestões de continuidade deste estudo em trabalhos futuros.

2 PRINCIPAIS COMPONENTES DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

2.1 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

As células solares fotovoltaicas são compostas por várias camadas de materiais semicondutores projetados para converter a energia da luz solar em eletricidade. A estrutura interna de uma célula solar fotovoltaica está ilustrada na Figura 1.

Figura 1 – Estrutura interna de uma célula fotovoltaica.



Fonte: [5].

Uma célula solar fotovoltaica é a unidade fundamental de um painel fotovoltaico. Ela pode ser considerada como um dispositivo de dois terminais que age como um diodo quando não está exposta à luz, permitindo a passagem de corrente elétrica, ou gera uma diferença de potencial quando iluminada. Sua superfície é tratada para reduzir a reflexão da luz visível e apresenta uma aparência escura. Uma rede de contatos metálicos é aplicada na superfície para permitir a conexão elétrica [5].

As células fotovoltaicas produzem energia elétrica por meio do deslocamento dos elétrons da camada tipo N para camada tipo P quando recebem fótons originalmente presentes na luz solar que influenciam na excitação dos elétrons da camada de valência para a banda de condução. Como resultado, devido ao movimento de recombinações de lacunas (buracos deixados pelos elétrons) para a camada P da junção PN, é gerado um campo elétrico na zona de depleção, que por sua vez, produz uma diferença de potencial.

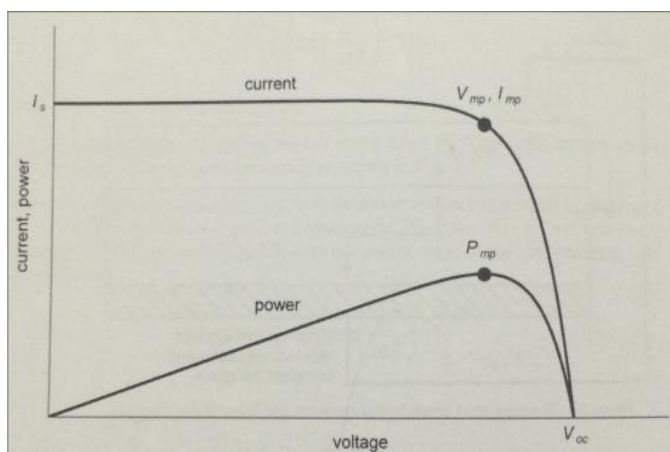
De modo isolado, as células solares fotovoltaicas possuem uma tensão muito baixa, não sendo possível atingir o valor esperado de tensão e corrente necessários para atender aos requisitos do sistema solar fotovoltaico [5].

Nessa perspectiva, as células solares são encapsuladas e colocadas em série a fim de atingir o nível de tensão necessário para alimentação do sistema. Além desse fator, colocar as células solares em módulos também maximizam a área de superfície disponível para captação de luz solar além de serem projetados para minimizar as perdas [5].

A curva I-V, também conhecida como curva corrente-tensão, é uma representação gráfica que descreve a relação entre a corrente elétrica gerada e a tensão aplicada a uma célula fotovoltaica. Essa curva é de extrema importância para analisar o desempenho e as características elétricas de uma célula fotovoltaica. A curva I-V é obtida através de testes experimentais nos quais a célula é submetida a diferentes níveis de tensão, enquanto a corrente gerada é medida. O resultado é uma curva que mostra como a corrente varia em resposta à tensão aplicada [5].

A curva I-V característica de uma célula fotovoltaica em relação à sua corrente, potência e tensão está apresentada na Figura 2.

Figura 2 – Curva típica do comportamento da corrente e da potência em função da tensão em uma célula fotovoltaica.



Fonte: [5].

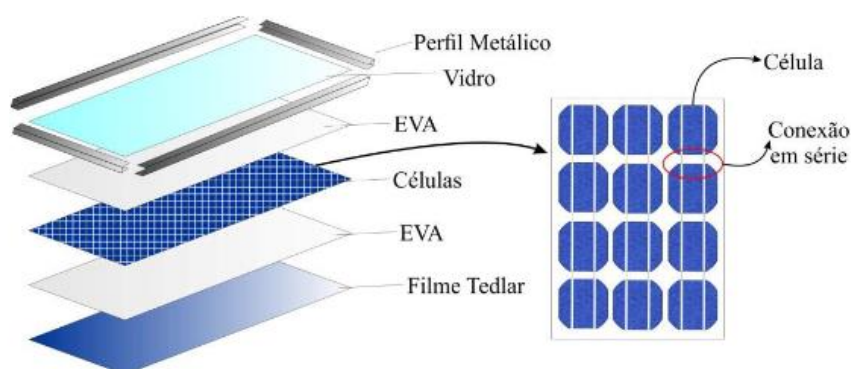
2.2 MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Apesar do avanço tecnológico constante das células fotovoltaicas, elas geralmente não excedem a potência de 3W por si só, o que não é suficiente para aplicações usuais. Por essa razão, é necessário agrupar as células em série para formar módulos fotovoltaicos.

Os módulos, por sua vez, quando agrupados, podem ser usados em diversos tipos de aplicações, sejam elas residenciais, comerciais de pequeno porte e comerciais em grande escala como nas usinas solares. Além disso, podemos citar aplicações em áreas agrícolas, iluminação pública e a utilização da energia solar nas telecomunicações [6] [7].

Para produzir módulos fotovoltaicos comercializáveis, as células são conectadas em série por filamentos condutores e encapsuladas em folhas de acetato de vinil etileno (EVA). Em seguida, elas recebem uma cobertura frontal de vidro temperado e uma proteção na parte posterior de um filme de fluoreto de polivinila (PVF), conhecido como Tedlar®. Esse conjunto laminado é montado em um perfil metálico, geralmente de alumínio. A representação esquemática de um módulo solar fotovoltaico está ilustrada na Figura 3 [8].

Figura 3 – Representação esquemática de um módulo solar fotovoltaico.



Fonte: [8].

O INMETRO é o órgão responsável por estabelecer os requisitos e ensaios aos quais os módulos fotovoltaicos devem ser submetidos para receber a homologação e o respectivo selo de conformidade. Essa homologação é necessária para que os módulos possam ser utilizados em sistemas de geração de energia elétrica fotovoltaica. A certificação indicada na Figura 4 é regulamentada pela portaria 004/2011 do INMETRO, que estabelece os requisitos mínimos de desempenho e segurança dos sistemas e equipamentos para energia fotovoltaica.

Os módulos fotovoltaicos e os inversores de até 10 kW devem ter o selo do INMETRO para serem comercializados no Brasil [10] [11].

Figura 4 – Tabela de Eficiência Energética do INMETRO.

CLASSES	ÍNDICE DE MÓDULO		EFICIÊNCIA ENERGÉTICA
	SILÍCIO CRISTALINO	FILMES FINO	
A	EE > 13,5	EE > 9,5	Mais eficiente ↓ Menos eficiente
B	13,5 ≥ EE > 13,0	9,5 ≥ EE > 7,5	
C	13,0 ≥ EE > 12,0	7,5 ≥ EE > 6,5	
D	12,0 ≥ EE > 11,0	6,5 ≥ EE > 5,5	
E	EE < 11,0	EE < 5,5	

Fonte: [11].

A eficiência energética dos módulos fotovoltaicas são garantidas e fiscalizadas no ato de fabricação. No entanto, vários fatores podem atenuar essa eficiência ao longo da vida útil desses equipamentos, desde a sua instalação os módulos estão sujeitos a perdas de eficiência caso não sejam instalados corretamente. Dentre os problemas dessa instalação podemos citar o mal posicionamento dos módulos, a ligação incorreta dos conectores ou o seu mal isolamento.

As tecnologias presentes em painéis solares fotovoltaicos são divididas em três gerações. A primeira geração que é dominante no mercado, trata-se das células de silício cristalino. A segunda geração surgiu na tentativa de diminuir custos, utilizando matérias primas como silício amorfo e telúrio de cádmio para produzir células solares de Filmes Finos. Finalmente, a terceira geração, inclui as células solares fotovoltaicas feitas a partir de materiais orgânicos (OPV) [12]. Estas tecnologias serão brevemente comentadas, nos tópicos seguintes.

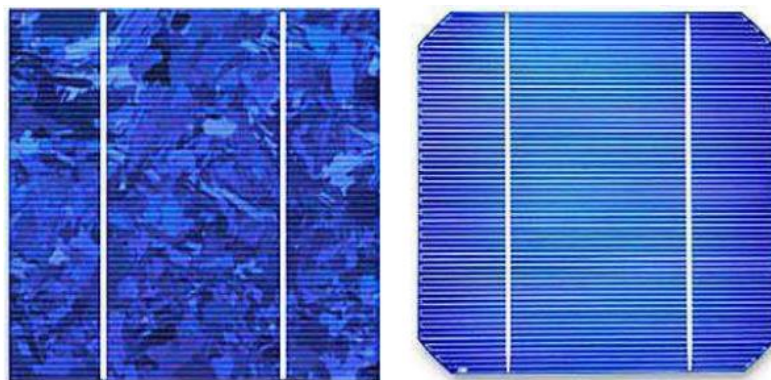
2.2.1 SILÍCIO CRISTALINO

O silício cristalino é o material mais usado nas células e módulos fotovoltaicos, dominando o mercado desde o começo da indústria fotovoltaica. Mesmo com o surgimento e avanço de outras tecnologias, é altamente provável que continuem a liderar o mercado por um longo período. Esse constante avanço tem contribuído para tornar o mercado altamente competitivo e cada vez mais acessível para uma ampla gama de consumidores [13].

O silício utilizado na fabricação das células fotovoltaicas pode ser de estrutura cristalina monocristalina ou policristalina. O silício monocristalino, indicado na Figura 5, é produzido a partir de um único cristal de silício, o que resulta em uma estrutura altamente uniforme e de alta eficiência energética. Esse processo de produção é mais complexo e requer um maior custo, mas é capaz de oferecer uma maior eficiência de conversão de luz solar em eletricidade. Já o silício policristalino, também indicado na Figura 5, é obtido a partir de vários cristais de silício fundidos juntos. Esse processo é menos complexo e mais econômico em termos de custo de produção.

Embora as células de silício policristalino possam ter uma eficiência ligeiramente inferior às células monocristalinas, elas ainda são amplamente utilizadas e oferecem um bom desempenho em aplicações fotovoltaicas [13].

Figura 5 – Células de silício policristalino (à esquerda) e monocristalino (à direita).



Fonte: [13].

A melhoria das células de silício policristalino no desempenho, na confiabilidade e no rendimento, tem contribuído para maior representação no mercado fotovoltaico, entretanto as células de silício monocristalino ainda são as mais comercializadas. Isso se deve ao seu altíssimo grau de pureza e às melhorias subsequentes no desempenho e rendimento. [13]

A eficiência das células de silício policristalino é afetada pela presença de interfaces entre os vários cristais presentes na estrutura, o que resulta em eficiências variando entre 14,5% e 16,2%. Por outro lado, as células de silício monocristalino produzidas industrialmente pela técnica CZ (Si-CZ) têm eficiências em torno de 16,5%. [13]

2.2.2 FILMES FINOS

Filmes finos são camadas de material depositadas sobre um substrato com espessura muito reduzida. Na tecnologia fotovoltaica, os filmes finos são utilizados para fabricar células solares de filmes finos, também conhecidas como células solares de película fina. Existem diferentes tipos de materiais que podem ser utilizados na fabricação de filmes finos para células solares [12].

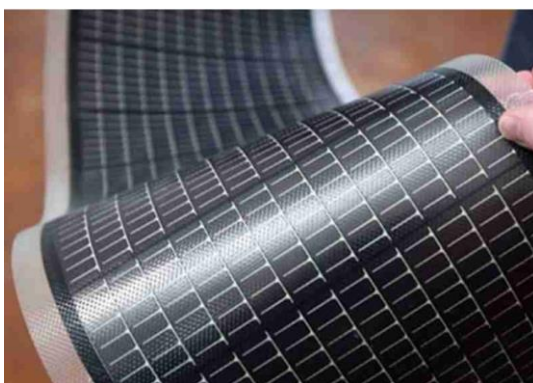
Alguns dos materiais mais comuns incluem telureto de cádmio (CdTe), disseleneto de cobre e índio (CIS ou CIGS) e silício amorfo (a-Si). Cada um desses materiais tem propriedades e características distintas, afetando o desempenho e a eficiência das células solares de filmes finos [9].

Uma das vantagens das células solares de filmes finos é a sua flexibilidade. Devido à sua estrutura fina e maleável, essas células podem ser fabricadas em substratos flexíveis, como

plásticos, o que permite sua aplicação em superfícies curvas ou flexíveis. Além disso, a fabricação de células solares de filmes finos requer menos material em comparação com as células de silício cristalino, o que pode resultar em custos de produção mais baixos [9]

No entanto, as células solares de filmes finos representada na Figura 6, geralmente apresentam uma eficiência de conversão menor em comparação com as células de silício cristalino. Isso ocorre porque a espessura reduzida dos filmes finos resulta em uma menor absorção da luz solar, o que limita a quantidade de energia que pode ser convertida em eletricidade. Apesar disso, avanços tecnológicos estão sendo feitos para melhorar a eficiência dessas células e torná-las mais competitivas no mercado.

Figura 6 – Células Filmes finos.



Fonte: [13].

2.2.3 CÉLULAS ORGÂNICAS OPV

Células solares de perovskitas (PSCs) baseadas em haletos orgânico-inorgânicos têm chamado a atenção da comunidade científica nos últimos anos por chegar à eficiência superior a 20% com apenas meia década de estudos. Além de terem alta eficiência, as PSCs podem ser preparadas com materiais e técnicas de baixo custo, tornando-se extremamente interessantes para comercialização em larga escala [12].

As células fotovoltaicas de perovskita, utilizam um composto mineral chamado perovskita em sua estrutura. Essas células apresentam um grande potencial para a produção de energia solar devido a sua alta eficiência e facilidade de fabricação. Além disso, as células de perovskita são mais baratas e mais fáceis de produzir do que as células de silício monocristalino, pois podem ser fabricadas a partir de materiais abundantes e de baixo custo [12].

2.3 RADIAÇÃO SOLAR

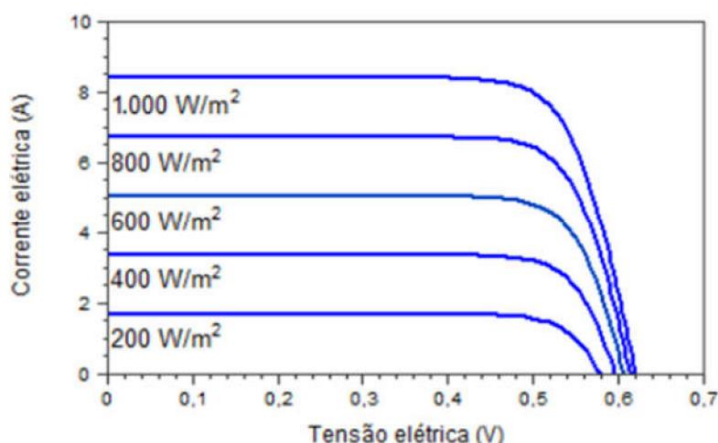
A radiação solar é fundamental e imprescindível para o funcionamento do sistema solar fotovoltaico. Dessa forma, torna-se indispensável a devida análise dos seus efeitos sobre a eficiência do sistema fotovoltaico.

Ao longo do dia, há muita variação da incidência dos raios solares nos painéis o que interfere diretamente no aproveitamento dessa energia. Devido à forma geométrica e a inclinação da Terra, o sol incide em cada local de maneira distinta com isso, a captação do nível de insolação de cada local é única e variável ao longo do dia [14].

As horas de sol pleno são um fator determinante para a produção de energia solar. A energia solar é gerada quando a luz do sol é convertida em eletricidade, seja diretamente usando fotovoltaicos (PV), ou indiretamente usando energia solar concentrada (CSP). O sol pleno, que se refere à luz solar direta e não obstruída, é ideal para essa conversão de energia. Quanto mais horas de sol pleno uma região recebe, maior é o potencial para a geração de energia solar. Portanto, a eficiência dos sistemas de energia solar depende em grande parte das horas de sol pleno. Em regiões com alta incidência de sol pleno, a energia solar pode ser uma fonte de energia renovável altamente eficaz e sustentável [14].

A influência da radiação solar na curva **I-V** de uma célula de silício mantido a temperatura de 25°C está ilustrada na Figura 7 [10] e [15]. Observa-se o aumento da corrente elétrica produzida na placa fotovoltaica conforme aumenta-se a intensidade de irradiação.

Figura 7 – Influência da irradiância solar na curva I-V de uma célula PV de silício cristalino a 25 °C.



Fonte: [10].

Diversos fatores podem interferir no aproveitamento eficiente dos raios solares, especialmente as condições atmosféricas. Por exemplo, em dias nublados ou chuvosos, a incidência de raios solares na superfície da Terra é bastante reduzida, o que compromete a geração de energia solar.

3 PERDAS NOS SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS

As perdas nas gerações solares fotovoltaicos iniciam no processo de fabricação das células solares. O agrupamento das células nos painéis requer o corte retangular, o que resulta em um desperdício significativo de material.

Além das perdas inerentes ao processo de fabricação dos painéis, existem outras perdas que ocorrem ao longo do funcionamento do sistema. Uma delas é causada pelos próprios equipamentos do sistema, como cabos, conectores e inversores, que possuem uma resistência elétrica e resultam em perdas de energia na forma de calor durante a transmissão da corrente elétrica.

Outra fonte de perdas é o processo de montagem do sistema. Devido ao fator humano, podem ocorrer erros na instalação, como conexões mal feitas ou posicionamento inadequado dos painéis solares, resultando em perdas de eficiência. Além disso, existem as perdas inerentes ao próprio sistema de conversão de energia solar em energia elétrica. Nem toda a energia captada dos raios solares pode ser transformada em energia elétrica útil. Essa diferença entre a energia captada e a energia efetivamente convertida em energia elétrica utilizável é o que chamamos de perdas elétricas.

De acordo com Pinho e Galdinho [10], a popularização da energia solar fotovoltaica, acompanhada da intensa concorrência entre os fabricantes, resultou em uma significativa redução no custo de aquisição dos sistemas fotovoltaicos, tornando-os mais acessíveis. No entanto, também se ressalta que essa disseminação da tecnologia levou ao surgimento de equipamentos com baixa eficiência e qualidade no mercado, o que resulta em uma geração de energia elétrica aquém das expectativas. Essa redução na eficiência pode ser atribuída a vários fatores, como temperaturas elevadas, sombreamento, acúmulo de sujeira e degradação dos módulos.

3.1 PERDAS POR SUJIDADE

A maior parte dos equipamentos do sistema solar fotovoltaico são alocados em ambientes externos, o que torna mais propício o acúmulo de sujeira nesses equipamentos.

O acúmulo natural de sujeira nas placas, geram diversos prejuízos ao sistema fotovoltaico, entre os quais destacam-se:

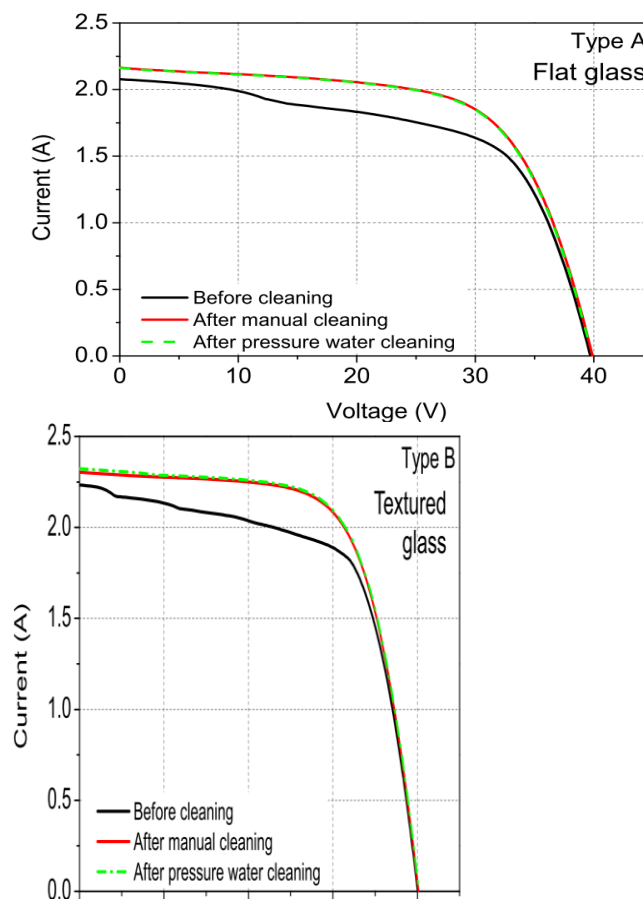
- Perdas por *mismatch*
- Redução da capacidade de captação de luz solar
- Sombreamento dos módulos
- Superaquecimento dos módulos
- Redução da vida útil dos painéis.

Todos esses fatores, contribuem para a redução da eficiência energética do sistema e, podem ser mitigados com manutenção e limpeza.

O acúmulo de sujeira na superfície dos módulos fotovoltaicos gera um efeito de barreira que prejudica a passagem dos fótons, impactando negativamente a eficiência do sistema ao longo do tempo [15].

A Figura 8 ilustra as curvas de desempenho de dois módulos distintos, antes de qualquer limpeza, após a limpeza manual e após a limpeza com água pressurizada. Infere-se desses gráficos, a eficácia da limpeza manual dos módulos para manter sua eficiência [16].

Figura 8 - Curvas de Módulos Fotovoltaicos: sujos, limpos manualmente e, limpos com pressurização



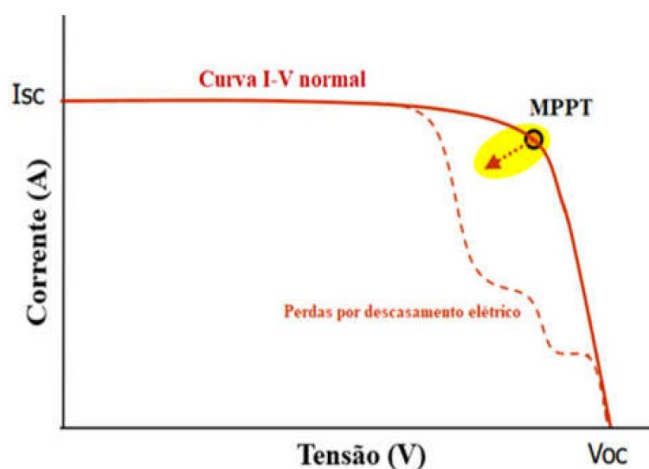
Fonte: [16].

Outro aspecto relacionado às perdas por sujidade em sistemas solares é o efeito da sujidade não uniforme nos painéis, que pode ocasionar descasamentos elétricos, conhecidos como *mismatch*.

O resultado é observado por meio da diferença de tensão gerada entre os módulos limpos e sujos, que além de reduzir o tempo de vida útil dos módulos, diminui também a eficiência do sistema fotovoltaico e, degradação desigual dos módulos.

A diminuição do MPPT (Maximum Power Point Tracker) da curva de potência em função dos descasamentos elétricos (*mismatch*) está ilustrada na Figura 9 [15].

Figura 9- Efeito da não-uniformidade da sujidade na curva I-V dos Módulos Fotovoltaicos:



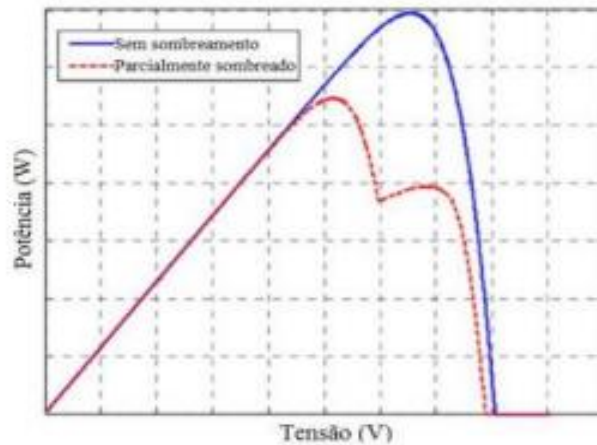
Fonte: [15].

3.2 PERDAS POR SOMBREAMENTO DOS MÓDULOS

A completa exposição aos raios solares é parte vital para o pleno funcionamento do sistema solar fotovoltaico. Desse modo, questões relacionadas a sombreamentos são de extrema importância desde o projeto de implantação do sistema. Os módulos fotovoltaicos são compostos por células ligadas em série.

Em condições normais, a curva Potência x Tensão de um painel solar, deve apresentar apenas um ponto de MPPT. No entanto, um painel solar parcialmente sombreado, apresenta mais de um MPPT, já que as células sombreadas vão apresentar redução na voltagem dessas células conforme ilustrado na Figura 10 [17].

Figura 10 - Curva do efeito do sombreamento.

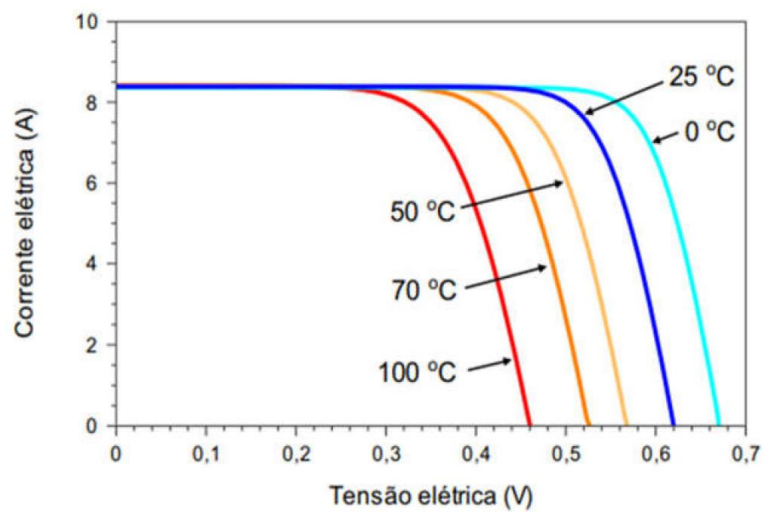


Fonte: [17].

3.3 PERDAS POR SUPERAQUECIMENTO DOS MÓDULOS

A temperatura dos módulos solares é variável de acordo com o local da instalação do parque solar e, influencia diretamente na eficiência do sistema fotovoltaico. O superaquecimento reduz consideravelmente a capacidade de geração dos módulos solares. Observa-se que a tensão diminui consideravelmente quando o módulo não está em condições adequadas de funcionamento, conforme ilustrado na Figura 11 [15].

Figura 11 - Influência da temperatura da célula fotovoltaica na curva I-V.



Fonte: [15].

3.4 PERDAS POR DANOS OU AVARIAS NO MÓDULO

Danos ou avarias no módulo fotovoltaico podem resultar em perdas significativas de desempenho. Esses danos podem ser causados por vários fatores, como condições climáticas adversas, impactos físicos, deterioração de componentes ou instalação inadequada.

Impactos físicos, como quedas, colisões ou manuseio inadequado durante o transporte ou instalação, podem danificar o módulo, resultando em quebras, trincados ou deformações. Esses danos afetam a capacidade do módulo de capturar a luz solar de forma eficiente e reduzem sua vida útil.

4 METODOLOGIA

A manutenção e a limpeza dos painéis solares são elementos cruciais na avaliação da eficiência dos sistemas fotovoltaicos. Com o objetivo de simular uma situação de acúmulo de sujeira em um painel fotovoltaico, empregamos uma bancada de teste específica para sistemas fotovoltaicos. Este sistema era composto por um inversor integrado a uma bancada, conectado a dois módulos fotovoltaicos.

O principal objetivo deste experimento é investigar e caracterizar a perda de eficiência em função do acúmulo de sujeira nos módulos fotovoltaicos. A análise pretende avaliar como o nível de sujeira acumulada se relaciona com a potência gerada, tendo como etapas:

1) caracterizar o desempenho do painel. Na primeira etapa, será avaliado a eficiência energética do painel isento de sujeiras.

2) investigar a perda de eficiência. Esta etapa envolve a simulação de uma situação de acúmulo de sujeira e a observação do impacto no desempenho do painel fotovoltaico.

3) análise de imagens no formato RGB para avaliar o impacto da sujidade na eficiência dos módulos fotovoltaicos.

A análise RGB permite uma avaliação da intensidade de sujeira acumulada, onde as componentes primárias (vermelho, verde e azul) podem revelar diferentes aspectos da sujeira. Assim, pode-se incluir a captura e análise de imagens dos painéis ao longo do experimento para quantificar o acúmulo de sujeira e correlacioná-lo com a perda de eficiência observada.

4.1 BANCADA DE TESTES

A primeira etapa de testes deste trabalho foi realizada utilizando uma bancada de Testes do IFG Campus Goiânia. A bancada é constituída por duas placas solares que são ligadas em série no inversor de modelo SUNNY BOY SB2.5-1VL-40.

Dessa forma, o estágio inicial dos testes consistiu em posicionar a bancada em ambiente exposto à luz solar e analisar a geração energética do sistema com a sujeira residual acumulada devido ao armazenamento.

Inicialmente, verificou-se a geração energética do sistema em seu estado atual ilustrada na Figura 12, apenas com a sujeira residual devido armazenamento. Posteriormente, foi depositado sujeira proveniente de construção civil e terra vermelha além de folhas das árvores do pátio a fim de avaliar o impacto da sujeira na geração de energia elétrica.

Figura 12 - Placa com sujeira residual (S1).

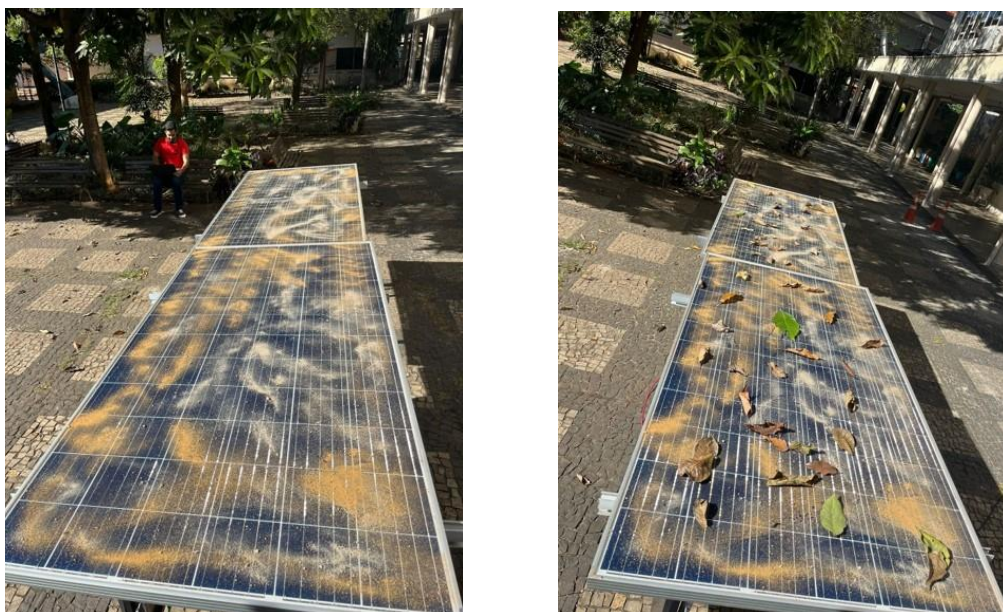


Fonte: Autoria Própria.

Após analisar os resultados da medição, foram realizados novos acréscimos de sujeira de forma gradual, conseguindo, dessa forma, ter embasamento experimental de quanto a sujeira interferiria na geração energética. Nesse contexto, foram realizadas quatro medições de diferentes acúmulos de sujeira e registrando respectivas potências de geração.

Assim, pôde-se inferir que, a sujeira interfere negativamente no funcionamento e geração dos módulos solares fotovoltaicos. Além disso, notou-se que é necessária uma quantidade significativa de sujeira nos módulos para conseguir reduzir expressivamente a capacidade de geração do sistema, conforme ilustrado nas figuras 13 e 14.

Figura 13 - Intensidade S2 e S3 de sujeira.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 14 - Intensidade S4 e S5 de sujeira.



Fonte: Autoria Própria.

Nesse contexto, a realização das primeiras medições até a intensidade de sujeira S3 representados pela Figura 13 tiveram como objetivo analisar o impacto na geração com detritos finos. Em seguida, o tipo de sujeira implementado é modificado, para uma terra grossa e, com

cor mais característica conforme ilustrado na Figura 14. Dessa forma, pode-se estudar diferentes tipos e intensidades de sujeira.

Para realizar a última medição foi realizado uma limpeza precisa nas placas fotovoltaicas. O processo de limpeza envolve o uso de água de uma mangueira disponibilizada pelo departamento de limpeza do IFG. A água foi cuidadosamente pulverizada sobre as placas para remover a sujeira superficial. O resultado da limpeza é expresso na Figura 15.

Figura 15- Placas Limpas



Fonte: Autoria Própria.

Com esta limpeza foi permitido maximizar a potência da placa fotovoltaica, com as placas agora limpas, tornou-se possível fazer uma comparação efetiva com as imagens obtidas em medições anteriores, quando as placas estavam sujas, e analisar a diferença nas potências medidas.

4.2 ANÁLISE DE IMAGENS NO FORMATO RGB

A análise de imagens é uma disciplina que se concentra na extração de informações significativas de imagens por meio de várias técnicas e algoritmos. Uma das formas de representar imagens digitalmente é por meio do formato RGB (*Red, Green, Blue*). O RGB é amplamente utilizado devido à sua capacidade de representar uma vasta gama de cores através da combinação dessas três cores primárias [18].

O formato RGB é um modelo de cores aditivo no qual as cores vermelha, verde e azul são combinadas em várias maneiras para reproduzir uma ampla gama de cores. Cada pixel de uma imagem RGB possui um valor para cada um dos três canais, variando de 0 a 255. A cor final é determinada pela combinação intensidade de cada um desses três componentes [18].

As imagens no espaço de cores RGB envolvem a manipulação e interpretação dos valores de cada canal de cor. Por exemplo, uma imagem pode ser segmentada com base na intensidade de um determinado canal de cor, permitindo a identificação de objetos de uma cor específica. Além disso, a análise de imagens RGB pode ser usada para realçar certas características de uma imagem, como áreas de inflamação ou doença em imagens médicas [18].

A análise de imagens RGB tem uma ampla gama de aplicações, desde a melhoria da qualidade de imagem até a detecção de objetos e a análise de tendências. Em outras áreas, como a visão por computador, a análise RGB pode ser usada para identificar objetos em uma imagem, rastrear movimentos ou reconhecer padrões [19].

No entanto, é importante ressaltar que a análise de imagens é apenas tão boa quanto os dados que ela analisa. Portanto, a qualidade da imagem e a precisão das cores no formato RGB são fatores críticos para a eficácia da análise de imagens. Além disso, a análise de imagens pode ser afetada por vários fatores, como a iluminação da cena, a presença de ruído na imagem e a qualidade da câmera.

A análise de imagens é uma ferramenta poderosa que, quando combinada com o formato RGB, pode fornecer detalhes significativos sobre uma imagem. Portanto, a qualidade da imagem e a precisão das cores no formato RGB são fatores críticos para a eficácia da análise de imagens, sendo a parte computacional de grande importância para verificar e analisar os dados inseridos [19].

Análise de imagem computacional consiste em tratar imagens, por meio de operações de matrizes de maneira que as regiões de interesse para um estudo sejam evidenciadas. O tratamento de imagem é feito alterando o valor dos pixels, elementos da imagem que possuem valor de brilho definido e, formam uma matriz com esse valor. Essa matriz, corresponde a

imagem analisada.

Diversas áreas utilizam a análise de imagem como alternativa para diminuir o tempo de alguma tarefa ou identificar erros. Dentre os diversos programas disponíveis no mercado, o ImageJ tem seu destaque por ser um programa de domínio público o que possibilita livre desenvolvimento de complementos pela comunidade. Além disso, o programa é desenvolvido por um órgão de renome internacional o *National Institute of Health*, NIH, Estados Unidos [19].

Neste trabalho, utilizaremos uma das diversas ferramentas disponíveis no software: a análise RGB. Esta análise, permite uma avaliação mais precisa da sujeira, pois cada componente (vermelho, verde e azul) pode revelar diferentes aspectos da sujeira. Assim, pode incluir a captura e análise de imagens dos painéis ao longo do experimento para quantificar o acúmulo de sujeira e correlaciona-lo com a perda de eficiência observada.

4.3 SOFTWARE RADIASOL

O *Software Radasol* é um programa computacional desenvolvido no Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Através de ensaios e testes de radiação solar foi desenvolvido o software, baseado em modelos matemáticos da literatura referente a esse assunto. Esse software tem como objetivo o cálculo da radiação incidente em superfícies planas, horizontais e inclinadas. O programa permite determinar a radiação incidente em diversas orientações e localidades do Brasil [17].

O software possui diversas aplicações na análise e aplicação da radiação solar. Dentre essas aplicações, pode-se destacar o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos. Por meio do Software Radasol é possível calcular a quantidade ideal de painéis solares necessários para atender determinada demanda. Com base nos dados de radiação solar em determinado período do ano, o Radasol permite prever a quantidade de energia que um sistema pode gerar. Além disso, permite estudar a viabilidade de um projeto de sistema fotovoltaico e, também, pode ser aplicado em pesquisas acadêmicas e desenvolvimento de tecnologias [17].

Para a realização deste trabalho, o *Software Radasol* será utilizado como meio de referência para determinar o índice de radiação solar durante a realização do experimento. O software fornece os valores de irradiância média ao longo de cada mês de acordo com uma localização inserida. Desse modo, tendo como base esses valores, será possível estimar a porcentagem em que a potência gerada pelo sistema é aumentada em decorrência da alteração dos níveis de radiação a medida em que o teste era realizado.

5 RESULTADOS

Como resultado dessas medições, obteve-se a Tabela 1 com os valores de potência médio em cada uma das medições. Esses valores serviram de comparação para a medição subsequente realizada após a devida limpeza dos módulos.

Tabela 1 - Resultado dos testes

Análise da Interferência da Sujidade nos Módulos		
Horário	Estados	Potência Ativa (W)
09:25	S ₁	317,50
09:29	S ₂	248,90
09:35	S ₃	239,10
09:40	S ₄	91,05
09:44	S ₅	34,15
10:03	LIMPO	392,2

Fonte: Autoria Própria.

Vários fatores são determinantes para a análise da eficiência energética dos sistemas solares fotovoltaicos. Para essa análise ter alta precisão, é imprescindível que os dados a serem comparados sejam resultado de testes com as mesmas condições. Nesse sentido, a intensidade dos raios solares conforme o teste era realizado aumentava assim, os resultados expressos na tabela acima têm influência não só da sujidade, mas também, deste fator.

Devido à quantidade limitada dos equipamentos disponíveis para o teste, os ensaios foram realizados em horários distintos. Nessas condições, é fato que houve variações na intensidade dos raios solares incidente sobre os módulos fotovoltaicos durante a realização dos testes, influenciando nos resultados obtidos apresentados na Tabela 1.

Para corrigir esse incremento de potência devido à variação da irradiação solar será inserido um fator de correção nos resultados. Pretende-se com este fator, obter resultados similares aos de medições realizadas e coletadas simultaneamente.

5.1 CORREÇÃO POR MEIO DO SOFTWARE RADIASOL

O RadiaSol permite a partir da escolha da data e localidade a análise da irradiância em diferentes tipos de radiação a saber: Global Horizontal, Inclinação, Difusa Inclinação e Direta Inclinação. Compreende-se que a análise mais próxima do realizado no teste é a Radiação Solar Inclinação fornecida pelo software a qual foi utilizada. A interface do software Radiasol para se obter a irradiação solar média no território nacional está ilustrada na Figura 16 [17].

Figura 16 – Interface do Software RadiaSol 2 para se obter a irradiação solar média no Brasil.



Fonte: Software RadiaSol 2.

Os dados obtidos no software foram exportados em formato de tabela eletrônica para tratamento servindo de referencial solar como fator de correção para a potência encontrada no teste realizado. Dessa forma, foi utilizado a interpolação linear para estimar valores intermediários entre os pontos conhecidos em um conjunto de dados, esta técnica assume que existe uma relação linear entre os pontos observados.

Assim, pressupondo que os valores da irradiância média permanecem constantes ao longo do intervalo, avalia-se o valor da irradiância no determinado momento de medição e aplicando sua correção utilizando a interpolação linear citada no parágrafo acima. Os valores de irradiação solar média em Goiânia (Latitude -16,68 – Longitude -49,25), no mês de julho do ano de 2023, obtidos por meio do software RadiaSol2, estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Irradiância no momento do teste

Mês	Horas	Global (W/m ²)	Direta (W/m ²)	Difusa (W/m ²)	Inclinada (W/m ²)
7	9:00	509	479	167	660
7	10:00	667	644	178	841

Fonte: Autoria Própria.

A irradiação inclinada refere-se à quantidade de energia solar que incide em uma superfície inclinada em relação à posição horizontal. Este tipo de irradiação foi a escolhida para realizar o cálculo de correção, com o valor de 660 W/m² de média no momento das 09:00 e o outro ponto conhecido é 841 W/m² de média, assim considerando estes pontos em porcentagem e o valor das 09h como 100%, é possível calcular a diferença destes dois horários na Equação 1:

$$\frac{841}{660} = 127\% \quad \text{Eq. 1}$$

Com uma variação de 27% na irradiância observada em uma hora, surge a oportunidade de calcular a média de irradiância para cada minuto dentro deste intervalo de tempo. Este cálculo é realizado conforme demonstrado na Equação 2:

$$\frac{100\% - 127\%}{60} = 0,46\% \quad \text{Eq. 2}$$

Através dos valores apresentados na Tabela 1, é possível efetuar a correção da potência ativa, levando em consideração a variável de irradiação para o horário exato no qual a medição foi registrada. Além disso, utilizando o valor de 0,46% para cada minuto de diferença. A seguir, a tabela de correção da potência ativa:

Tabela 3- Correção da Potência pela Irradiância

Horário	Estados	Potência Ativa (W)	Potência (pu)	Irradiação (pu)	Potência corrigida (W)	Potência corrigida (pu)
10:03	LIMPO	392,20	1,0000	1,28	305,520	1,000
09:25	S1	317,50	0,8095	1,11	284,940	0,933
09:29	S2	248,90	0,6346	1,13	219,769	0,719
09:35	S3	239,10	0,6096	1,16	206,125	0,675
09:40	S4	91,05	0,2322	1,18	76,976	0,252
09:44	S5	34,15	0,0871	1,20	28,432	0,093

Fonte: Autoria Própria.

5.2 ANÁLISE DE IMAGENS COM O SOFTWARE IMAGEJ

Com a potência corrigida, é possível estabelecer uma correlação com as imagens registradas, utilizando a análise de imagens no formato RGB. Isso permite comparar a sujeira presente com as intensidades e a potência medida. Nesse contexto, o software serviu como meio analisador das imagens obtidas no teste prático.

Este ensaio no software se fundamenta na análise de dados coletados durante testes em placas, nos quais o nível de sujeira foi variado para avaliar seu impacto na eficiência energética. A análise foi conduzida utilizando o *Software ImageJ* para interpretar as imagens obtidas. Este método possibilitou a comparação das imagens em diferentes níveis de sujeira, levando em consideração seu formato no espaço de cores RGB.

A abordagem adotada tem como objetivo identificar uma possível correlação entre a eficiência energética das placas e o processamento de imagens. Assim, será possível estabelecer uma relação entre o grau de sujeira e as características dos *pixels* na imagem. Isso permite explorar como a presença de impurezas pode influenciar não apenas a eficiência energética, mas também o comportamento dos pixels durante o processamento de imagens.

A ferramenta *plugin RGB Measure* disponível no *Software ImageJ* permite analisar as imagens obtidas das placas fotovoltaicas. Esta análise utiliza a média dos valores dos *pixels* no formato RGB em uma região específica, demarcada por um polígono selecionado dentro da imagem.

Esta metodologia permite observar a variação nos componentes de cor vermelha (R), verde (G) e azul (B) em resposta aos diferentes níveis de sujeira presentes nas placas. Ao concentrar a análise em uma área delimitada, buscamos entender de maneira mais precisa e detalhada como a sujeira impacta a variação do formato RGB.

Na análise das imagens no *Software ImageJ* foram utilizadas as imagens das placas fotovoltaicas nas diferentes condições de sujeira ilustradas nas figuras 12 a 15.

A partir desta análise, foram obtidos os valores médios das componentes para as cores vermelha, verde e azul (RGB) para cada *pixel* da placa fotovoltaica. Essa análise permite destacar os valores médios de cada componente de cor. Adicionalmente, a cor cinza foi calculada como a média aritmética dos valores RGB.

Figura 17 - Valores Médios de RGB para as condições S1 e S2 no Software ImageJ.

Results			
File	Edit	Font	Results
	Label	Mean	
1	Red	62.687	
2	Green	78.953	
3	Blue	104.568	
4	(R+G+B)/3	82.066	
5	0.299R+0.587G+0.114B	77.004	
6	Red	138.238	
7	Green	128.649	
8	Blue	114.580	
9	(R+G+B)/3	127.155	
10	0.299R+0.587G+0.114B	129.915	

Fonte: Software ImageJ.

Figura 18- Valores Médios de RGB para as condições S3 e S4 no Software ImageJ.

11	Red	140.152
12	Green	130.873
13	Blue	115.740
14	(R+G+B)/3	128.921
15	0.299R+0.587G+0.114B	131.924
16	Red	181.925
17	Green	139.282
18	Blue	106.904
19	(R+G+B)/3	142.702
20	0.299R+0.587G+0.114B	148.354

Fonte: Software ImageJ.

Figura 19 - Valores Médios de RGB para as condições S5 e LIMPO no Software ImageJ.

21	Red	189.660
22	Green	137.396
23	Blue	100.226
24	(R+G+B)/3	142.416
25	0.299R+0.587G+0.114B	148.799
26	Red	60.979
27	Green	80.329
28	Blue	110.818
29	(R+G+B)/3	84.074
30	0.299R+0.587G+0.114B	78.027

Fonte: Software ImageJ.

Com base nos valores médios obtidos no formato RGB, elaborou-se a Tabela 4 detalhada para facilitar a análise e compreensão dos valores correspondentes a cada pixel. Para simplificar a interpretação dos dados, as unidades de medidas foram convertidas para a base pu (*per unit*). Isso permite comparar efetivamente os valores em pu para cada componente de cor (vermelho, verde e azul) ao longo das medições.

Tabela 4 - Análise no formato RGB.

Estados	Vermelho	Verde	Azul	Cinza	Vermelho (pu)	Verde (pu)	Azul (pu)	Cinza (pu)
LIMPO	60,919	80,254	110,751	77,957	0,321	0,576	0,954	0,524
S ₁	62,687	78,953	104,568	77,004	0,331	0,566	0,901	0,518
S ₂	138,238	128,649	114,580	129,915	0,729	0,923	0,987	0,874
S ₃	140,653	131,304	116,049	132,362	0,742	0,942	1,000	0,890
S ₄	182,070	139,391	106,941	148,466	0,961	1,000	0,922	0,998
S ₅	189,508	137,311	100,254	148,707	1,000	0,985	0,864	1,000

Fonte: Autoria Própria.

Para cada valor RGB foi normalizado em relação ao maior valor correspondente à sua cor, resultando em um valor em ‘pu’. Esta abordagem de normalização, ajusta os valores para uma escala comum variando de 0 a 1, facilitando a interpretação e comparação dos resultados.

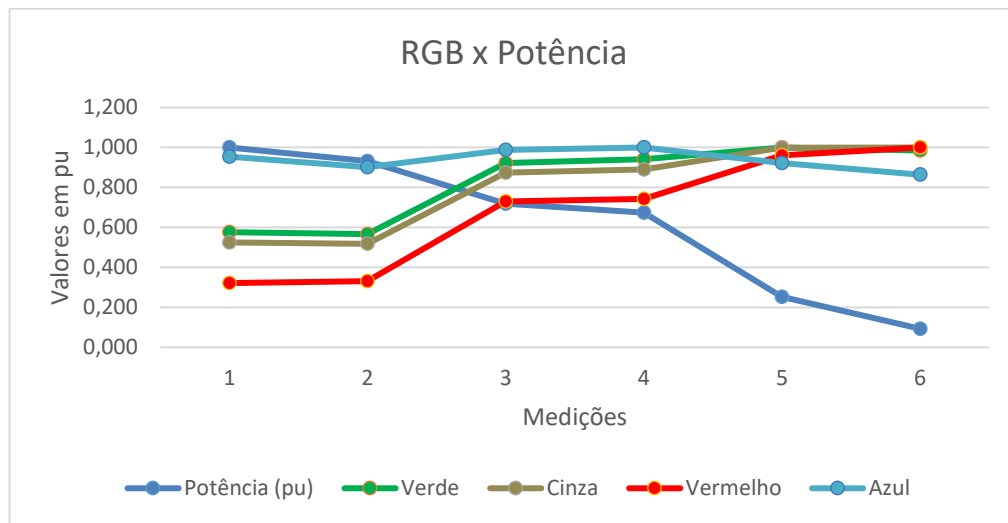
5.3 ANÁLISE GRÁFICA

Esta análise gráfica apresenta a correlação entre a potência medida e os dados coletados das placas fotovoltaicas, baseados nos dados adquiridos pelo *Software ImageJ*.

Utilizando os dados das Tabelas 3 e 4, é possível destacar a correlação entre a cor e a potência, conforme as medições das placas. Para facilitar o entendimento, será apresentada uma representação gráfica dividida por cores. Esta estratégia permite analisar a correlação para cada componente de cor (RGB) de maneira individualizada.

Os gráficos foram estruturados com base em seis medições distintas. A última medição realizada denominada Limpa, serviu como referência para as condições ideais. As demais medições, rotuladas de S1 a S5, representam diferentes níveis de sujeidade. O gráfico ilustrado na Figura 20 apresenta os resultados para todas as cores analisadas.

Figura 20- RGB x Potência



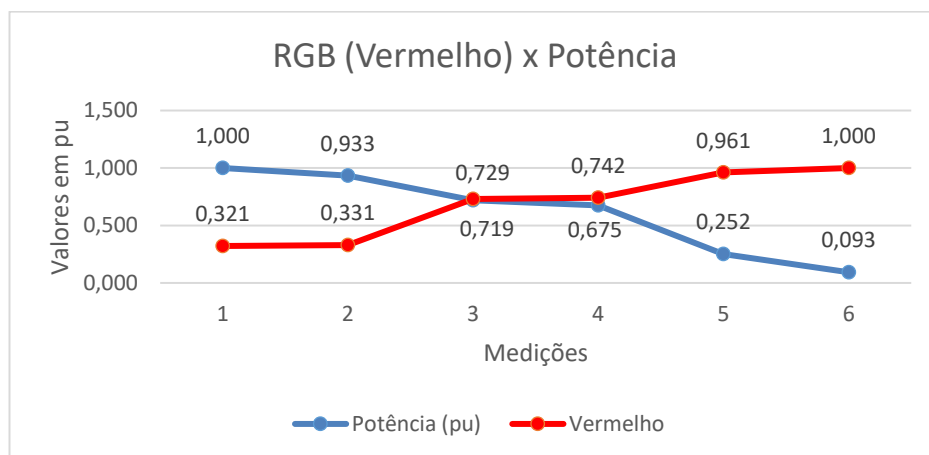
Fonte: Autoria própria.

Nos gráficos seguintes, as cores serão analisadas individualmente para um melhor entendimento e visualização para correlacionar as suas diferenças para cada formato do RGB.

5.3.1 Cor Vermelha

A análise demonstrou que a cor vermelha é particularmente reveladora da correlação entre a potência e sujidade. Foi observado que, com o aumento da sujidade, a concentração da cor vermelha também aumenta. No entanto, este aumento na concentração de vermelho é acompanhado por uma diminuição correspondente na potência. A potência e a concentração da cor vermelha aparentam ter uma relação inversa, conforme ilustrado na Figura 21.

Figura 21- Gráfico Vermelho

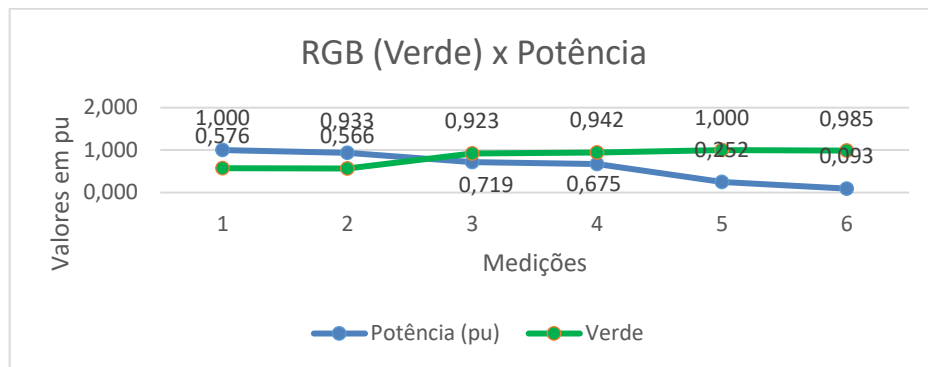


Fonte: Autoria própria

5.3.2 Cor Verde

Em relação à cor verde, a correlação entre a potência e a sujeidade não se manifesta de forma tão evidente quanto na cor vermelha. Embora ainda exista uma relação inversa, os dados apresentam menor precisão, resultando em uma diferença menos perceptível entre a diminuição da potência e o aumento da sujeidade; conforme ilustrado na Figura 22. Isso sugere que a cor verde pode não ser um indicador tão robusto da sujeidade e do seu impacto na potência das placas fotovoltaicas.

Figura 22- Gráfico Verde

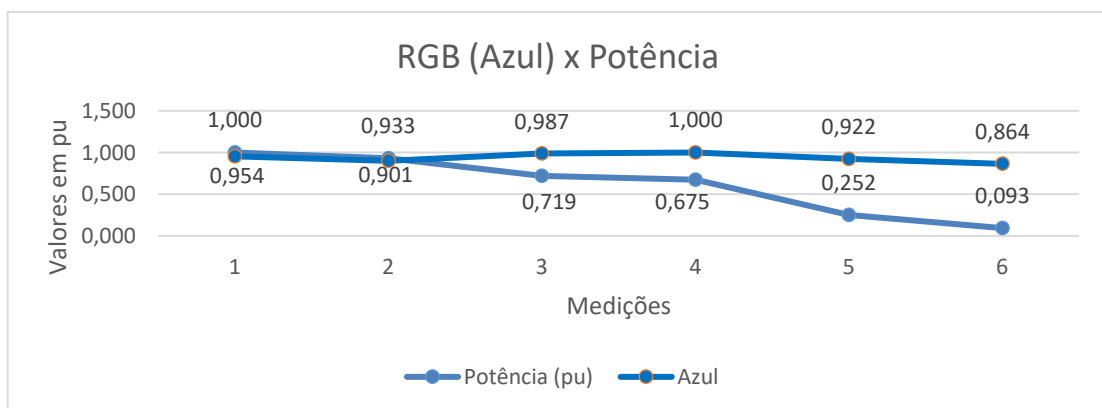


Fonte: Autoria própria.

5.3.3 Cor Azul

Na análise da cor azul, constatou que esta cor demonstrou a menor correlação inversa entre a potência e a sujeidade, ilustrado na Figura 23. Isso pode ser devido ao fato de que o azul não é uma cor predominante na análise de imagens voltada para a detecção de sujeidade. Portanto, a cor azul pode não ser o indicador mais eficaz para destacar a correlação entre a sujeidade e a potência dos módulos.

Figura 23- Gráfico Azul

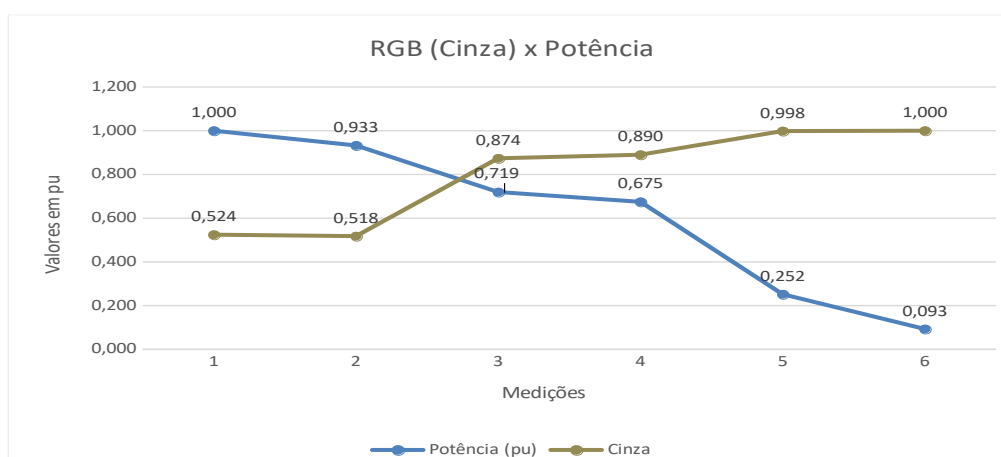


Fonte: Autoria própria.

5.3.4 Cor Cinza

A cor cinza, interpretada pelo *Software ImageJ*, é uma combinação dos valores em pu das cores azul, verde e vermelho. Como resultado, o gráfico correspondente acaba sendo uma média dos gráficos dessas três cores. No entanto, essa representação pode não ser visualmente ideal para estabelecer uma correlação clara com a potência. Os resultados para a cor Cinza estão ilustrados na Figura 24.

Figura 24- Gráfico Cinza



Fonte: Autoria própria.

5.3.5 Linha de Tendência

Para análise da eficiência dos painéis fotovoltaicos, um aspecto considerado foi a correlação entre a potência gerada pelos módulos e as variações de cor da sujeira que se acumulava na superfície do painel.

As duas variáveis são a potência gerada pelo painel fotovoltaico e a intensidade da cor da sujeira. Os resultados anteriores, demonstram uma relação inversa entre intensidade da cor vermelha e a potência do painel, conforme apresentado na Tabela 5.

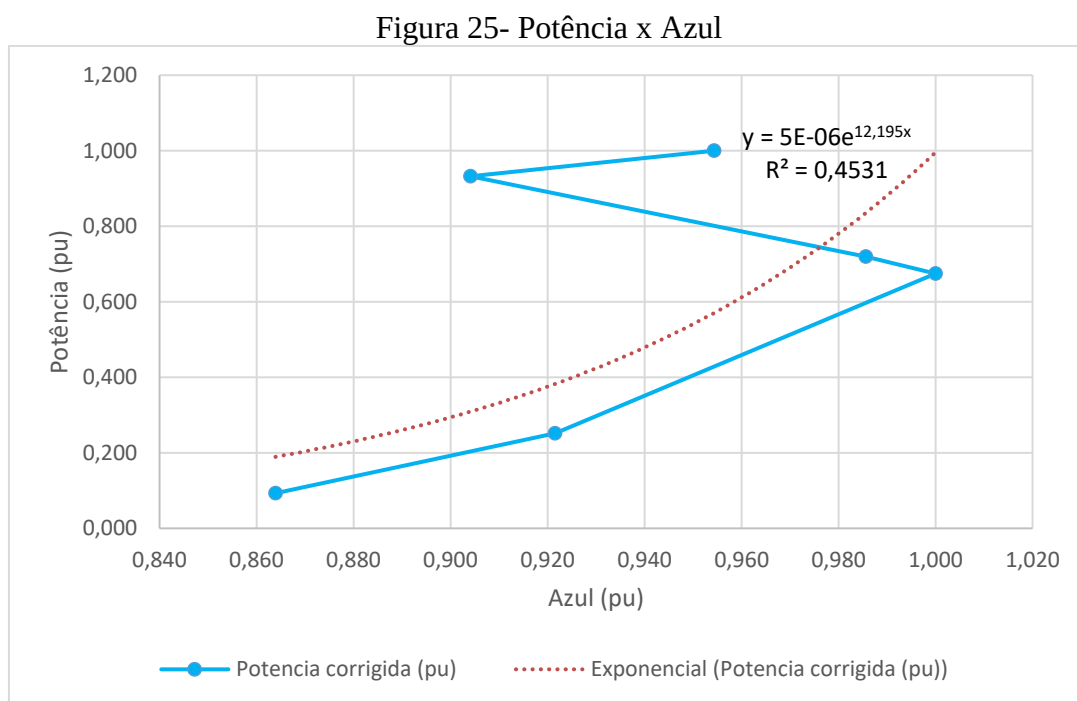
Tabela 5 - Relação intensidade x potência para a cor vermelha

Estados	Vermelho (pu)	Potência corrigida (pu)
LIMPO	0,321	1,000
S ₁	0,334	0,933
S ₂	0,728	0,719
S ₃	0,742	0,675
S ₄	0,961	0,252
S ₅	1,000	0,093

Fonte: Autoria própria.

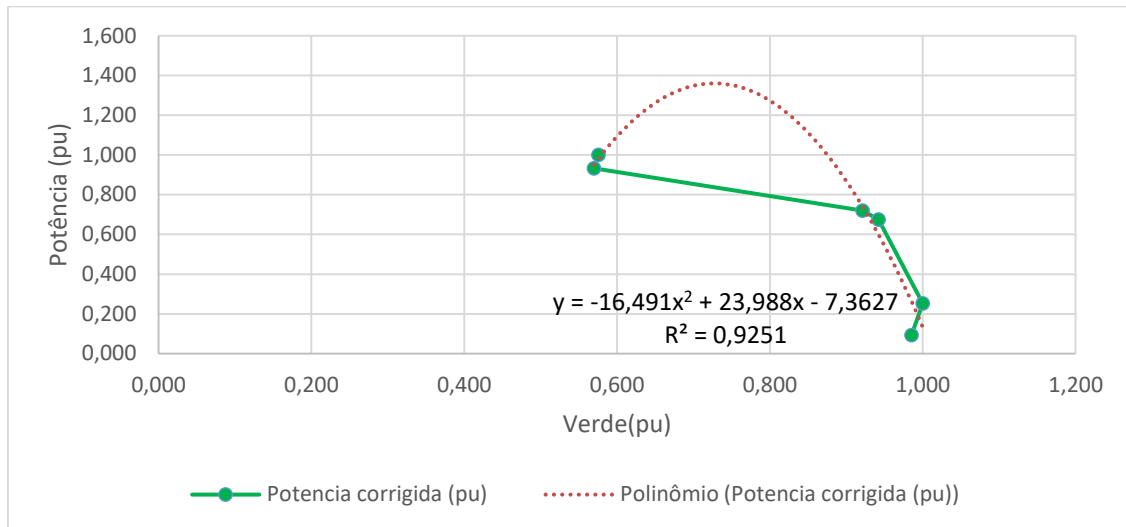
Analisando a relação entre a variável azul e a potência corrigida, representando-a graficamente para destacar a significativa variação observada nesta cor. A linha de tendência que melhor se ajustou ao gráfico e minimizou o erro, foi a de modelo exponencial. O coeficiente de determinação (R^2), é utilizado como métrica para avaliar a precisão entre os valores estimados e os valores reais. O valor R^2 igual a um indica que as curvas para os valores estimados e reais são sobrepostas.

Para a curva selecionada, modelo exponencial, foi obtido $R^2 = 0,4531$ para a cor azul, conforme ilustrado na Figura 25.



Ao examinar a cor verde e a potência, nota-se uma linha de tendência mais apropriada ao aplicar um modelo polinomial de segundo grau. Este modelo revelou um vale no início do gráfico, como evidenciado na Figura 26, indicando uma variação também para esta cor, no entanto, o coeficiente de determinação (R^2) para este modelo foi de 0,9251, aumentando significativamente a confiabilidade dos dados em comparação com o modelo anterior.

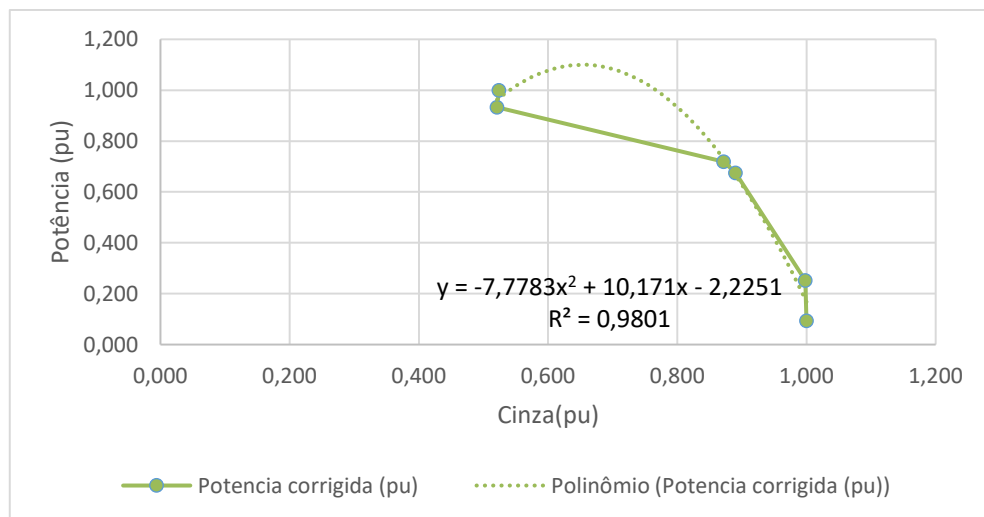
Figura 26- Potência x Verde



Fonte: Autoria própria.

Para a cor cinza, o gráfico apresentou características similares ao observado anteriormente para a cor verde, incluindo um vale no início do gráfico que indica uma variação neste ponto. O resultado está ilustrado na Figura 27. No entanto, o coeficiente de determinação (R^2) para a cor cinza foi de 0,9801, sugerindo uma maior confiabilidade dos dados em comparação com as cores verde e azul.

Figura 27- Potência x Cinza

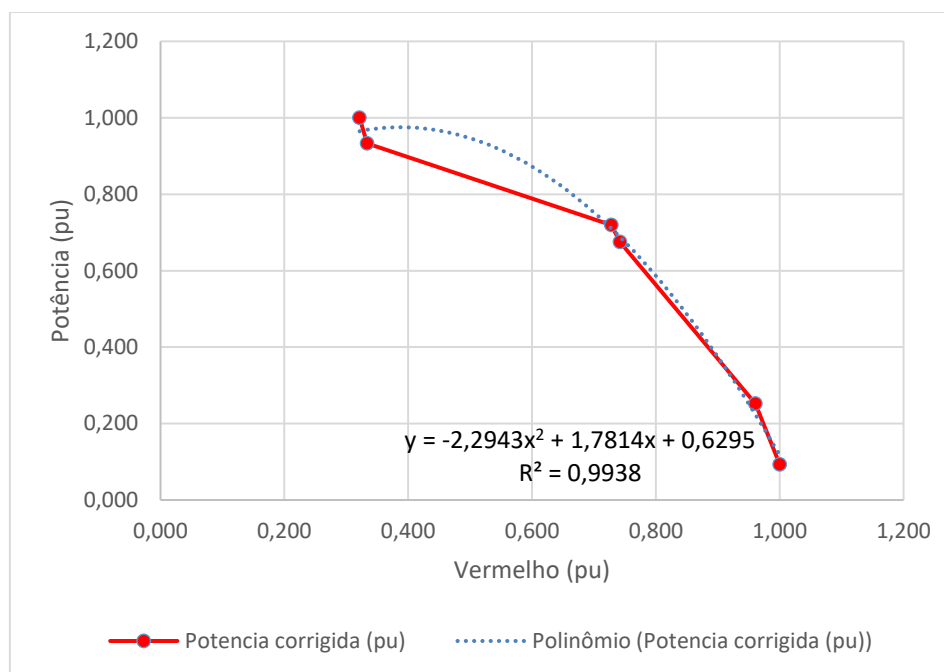


Fonte: Autoria própria.

Para essa análise, optou-se por focar na cor vermelha, uma das componentes do espectro RGB. Esta escolha foi baseada nos resultados anteriores que a cor demonstrou em comparação com as outras cores. A medida que a cor vermelha se torna mais intensa, a potência do painel tende a diminuir. Para ilustrar essa relação com a linha de tendência, criamos um gráfico utilizando os dados apresentados na Tabela 5.

O gráfico correspondente, com a linha de tendência, demonstrando a cor vermelha e sua potência corrigida, conforme a Tabela 5 está ilustrado na Figura 28.

Figura 28 - Potência x Vermelho



Fonte: Autoria própria.

O comportamento das duas variáveis permite a análise por meio de um modelo de regressão. A melhor aproximação foi obtida com a linha de tendência polinomial. A função matemática obtida entre a intensidade da cor vermelha e a potência gerada permite estimar a potência que o painel fotovoltaico será capaz de gerar, para uma dada a intensidade da cor vermelha na superfície do painel.

$$y = -2,2943x^2 + 1,7814x + 0,6295 \quad \text{Eq. 3}$$

Especificamente para o painel fotovoltaico utilizado, a fórmula apresentada permite obter os valores de potência em função da intensidade da cor vermelha. Assim, utilizando-se de uma imagem poderão ser definidos o nível de eficiência e a necessidade de manutenção, em função da sujidade acumulada no painel fotovoltaico.

5.4 ANÁLISE ECONÔMICA

A análise de imagens proposta neste trabalho indicam que a cor vermelha, obtida por meio do padrão RGB, pode ser utilizada como indicador-chave para estimar a perda na potência em um sistema fotovoltaico.

Neste tópico serão analisadas as perdas devido à sujidade das placas fotovoltaicas em dois sistemas: um sistema residencial e uma usina solar denominada Complexo Solar Janaúba.

5.4.1 Sistema Solar Residencial

A análise será aplicada a um sistema fotovoltaico residencial formado por 15 placas solares de 560 Wp, modelo Tsun, conforme ilustrado na Figura 29.

Baseado nos resultados obtidos, será estimado um nível de sujidade para as placas, sendo considerado o valor de 0,4 pu para a cor vermelha. Este valor representa um padrão de sujeira nas placas ligeiramente superior à sujidade residual considerada neste trabalho.

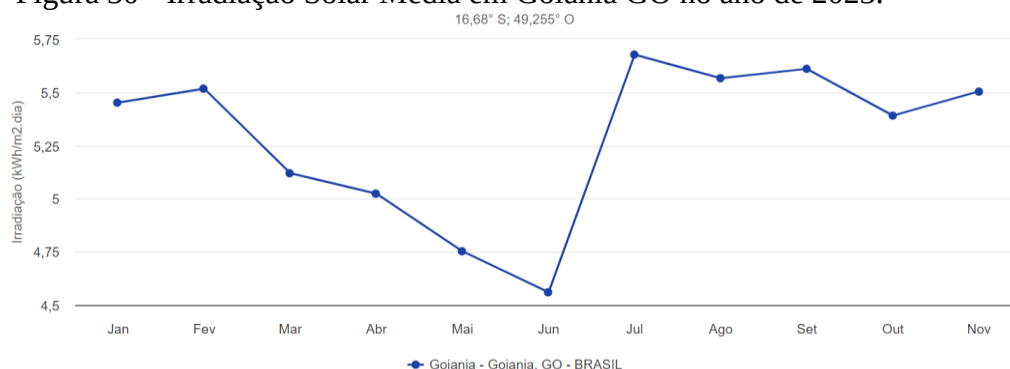
Figura 29 - Sistema Solar Residencial formado por 15 placas de 560 Wp.



Fonte: Empresa - Rodrigues Silva Projetos LTDA.

A residência em questão possui uma potência de pico instalada de 8,4 kWp. A produção diária de energia da usina em kWh é calculada de forma estimada por meio da verificação da irradiância do local analisado, baseado nas informações do HSP (Horas de Sol Pleno) da região onde a residência está localizada. Este dado, obtido a partir da CRESESB, é de 5,27 kW/m².dia, conforme ilustrado na Figura 30.

Figura 30 - Irradiação Solar Média em Goiânia GO no ano de 2023.



FONTE: [21]

Esta análise permite obter a eficiência energética da instalação solar na residência. Dividindo-se da média anual de 5,27 kWh/m².dia por 1000 W/m², calcula-se a HSP (Horas de Sol Pleno) específica para a residência em estudo. O resultado representa uma irradiância solar constante durante 5,27 horas ao dia. Utilizando os valores apresentados, determina-se a produção diária de energia da usina solar da residência:

$$EnergiaDiária = (8,4 * 10^3 \times 5,27)/1000 = 44,27(kWh) \quad Eq. 4$$

A produção mensal de energia da residência, expressa em kWh, será:

$$EnergiaMensal = (44,27 \times 30) = 1328(kWh) \quad Eq. 5$$

Com base no valor da produção mensal de energia, pode-se estimar e analisar a receita potencial que essa residência poderia gerar com a instalação dessas placas solares. Levando em conta uma tarifa de R\$ 0,71 por kWh e considerando que a instalação foi realizada antes de 2023, a nova Lei 14300/2022 não se aplica. Em vez disso, utiliza-se a Resolução Homologatória ANEEL N° 3279/2023, adotada pela Equatorial Energia Goiás [26]:

$$Energia = 1328 * 0,71 = R\$942,88 \quad Eq. 6$$

Considerando o valor da sujeira residual, e substituindo os valores na Equação 3, resulta uma perda na geração de energia de 2,5%. Isso se traduz em uma perda de receita mensal de R\$ 23,57. Ao longo de um ano, essa perda acumula-se para um total de R\$ 282,86.

O valor de investimento total desta obra foi de R\$ 22.000,00. Considerando o custo de manutenção equivalente a 1% deste investimento, o custo anual destinado para manutenção seria de R\$220,00 [21]. Recomenda-se para esta usina a realização de uma limpeza na época de escassez de chuvas. O custo estimado para a limpeza varia de R\$150,00 a R\$250,00.

Para o caso analisado, observa-se que mesmo para níveis de sujeira menos intensas, demonstra-se a viabilidade da realização de uma manutenção anual.

5.4.2 Complexo Solar Janaúba

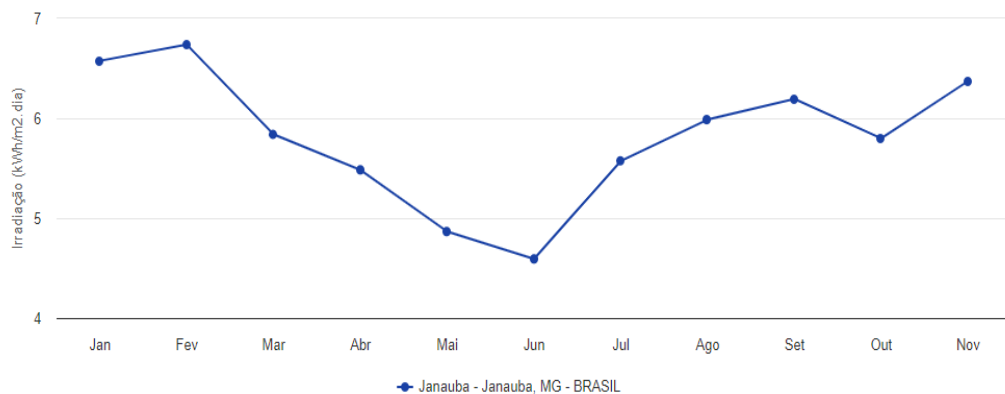
A usina do complexo solar Janaúba está situada no norte de Minas Gerais. Esta usina, possui uma capacidade de geração de 1,2 GWp e está equipada com 2,2 milhões de módulos solares [20].

Neste sistema será considerado o mesmo nível de sujidade para as placas do caso anterior, sendo considerado o valor de 0,4 pu para a cor vermelha. Substituindo os valores na Equação 3, obtêm-se a potência estimada igual a 0,975 pu, conforme apresentado:

$$y = -2,2943x^2 + 1,7814x + 0,6295 = 0,975 \text{ pu} \quad \text{Eq. 7}$$

Com capacidade de geração de 1,2 GWp, a produção diária de energia da usina em kWh é calculada de forma estimada por meio da verificação da irradiância do local analisado. Para o valor será utilizado o dado médio diário fornecido pela CRESESB (Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sergio de Brito) que é de 5,74 kW/m².dia, conforme a Figura 31.

Figura 31- Irradiação Solar Média em Janaúba MG (2023)



Fonte: [21].

Com a divisão da média anual de 5,74 kW/m².dia por 1000 W/m², é possível calcular a HSP (Horas de Sol Pleno) para a região de Janaúba. Este cálculo resulta em 5,7 horas de irradiância constante. Utilizando os valores apresentados, determina-se a energia diária gerada pela usina solar em questão.

$$EnergiaDiária = (1,2 * 10^9 \times 5,7)/1000 = 6,8(GWh) \quad \text{Eq. 8}$$

A produção mensal de energia da usina, expressa em GWh

$$EnergiaMensal = (6,8 \times 30) = 20,52(GWh) \quad \text{Eq. 9}$$

Considerando o valor de R\$ 0,41 por kWh, estimado pela CEMIG para o ano de 2024,

a receita mensal projetada para esta usina é de aproximadamente 8 milhões de reais.

Considerando a sujidade média, cuja potência estimada será de 0,975 pu, calcula-se a porcentagem de perda:

$$Perda = 1 - Potência(pu) = 1 - 0,975 = 0,025 \quad \text{Eq. 10}$$

A perda de receita mensal será da ordem de:

$$PerdaReceita = 0,025 \times 8 \times 10^6 = R\$200.000,00 \quad \text{Eq. 11}$$

Neste contexto, com base no cálculo de perda de receita estimada, torna-se possível definir um plano de manutenção e limpeza para esta usina. Deste modo, essa receita pode ser destinada a manutenção e limpeza dos painéis, garantindo pleno funcionamento do sistema solar fotovoltaico durante todo o ano.

É usual no mercado de energia solar, considerar os gastos de Operação e manutenção como 2% do total do investimento da usina. O valor total divulgado de investimento dessa usina é R\$ 4 bilhões. Considerando um gasto médio anual com uma equipe de limpeza como sendo 1% do valor total do investimento da obra para este exemplo, seria um custo equivalente a R\$ 40 milhões.

É importante ressaltar que a sujidade é um fator que pode afetar significativamente a eficiência de uma instalação solar. Trata-se de detritos ou sujeira que se acumulam nas placas solares e podem reduzir a quantidade de luz solar que atinge as células fotovoltaicas, diminuindo assim a quantidade de energia que elas podem gerar. Destaca-se também que quando devidamente limpos observa-se o aumento na vida útil dos painéis.

6 CONCLUSÕES

Com base na análise realizada, observa-se que a sujeira acumulada na superfície dos painéis fotovoltaicos tem um impacto significativo na potência gerada.

A análise RGB apresenta uma correlação inversa entre a intensidade da cor vermelha e a potência dos painéis. Isso significa que à medida que a intensidade vermelha aumente, a potência do painel tende a diminuir. Este fator pode ser utilizado para definir a necessidade de manutenção dos painéis fotovoltaicos.

Por outro lado, a cor azul apresentou a pior correlação significativa para análise. Isso sugere que a intensidade da cor azul não é um bom indicador da potência do painel fotovoltaico.

A análise da linha de tendência revelou que diferentes cores têm impactos variados na potência. A cor azul, por exemplo, apresentou o resultado menos satisfatório, representando apenas 45,31% (ou 0,4531) da variabilidade dos dados. As cores verde e cinza exibiram índices mais elevados, porém, com maior variação e apresentando vales em seus gráficos, o que as torna menos ideais para um sistema de energia. Em contraste, a cor vermelha se destacou por sua proximidade ao valor ideal de 1 para o coeficiente de determinação, alcançando impressionantes 98,01% (ou 0,9801) de confiabilidade dos dados. Portanto, a cor vermelha demonstrou ser a mais eficaz.

Em relação aos aspectos financeiros, pode-se concluir que é economicamente viável a devida manutenção e limpeza de grandes usinas solares. Desta forma, é possível maximizar o rendimento da usina ao longo de todo o ano, além de promover melhoria da vida útil dos módulos. No que se refere a usinas de pequeno porte, notou-se que também é viável economicamente o investimento em limpezas periódicas, visto que mesmo com pouca diferença entre o valor de perda e o valor da manutenção, é preciso levar em consideração que quando o sistema está sujo não funciona plenamente. Sendo assim, o sistema teria outras perdas por conta da sujeira acumulada e, com o passar dos anos, o tempo de vida útil seria reduzido.

Os estudos conduzidos nesta pesquisa inicial, se mostraram bastante desafiadores, pois pode-se compreender a complexidade de analisar apenas a interferência da sujeira na análise de eficiência dos painéis. Nesta perspectiva, para estabelecer um plano de manutenção para cada usina de diferentes potenciais energéticos, seria necessária análise prévia do local de instalação de acordo com a incidência de chuvas para aquela região.

Todavia, há várias interferências que precisam ser analisadas em estudos futuros para aprimorar a eficiência dos testes. Fatores como a angulação da imagem do módulo fotovoltaico sujo, a luminosidade do ambiente no momento da captura da imagem e a posição da câmera podem influenciar a análise de imagem e, conseqüentemente, os resultados dos testes.

Inferese-se, portanto, que a sujeira interfere no funcionamento do sistema, mas, para poder quantificar de maneira precisa esse impacto, é necessário a realização de outro teste em ambiente controlado, o que inviabilizaria a continuação deste trabalho, uma vez que os parques solares, fonte de estudo deste trabalho, se encontram expostos ao ambiente em situações não controláveis.

Essas variáveis podem afetar a precisão da correlação entre a intensidade da cor vermelha e potência do painel fotovoltaico. Portanto, é essencial que estudos futuros considerem essas interferências e busquem maneiras de minimizar seus efeitos. Ao fazer isso, podemos melhorar a qualidade da linha de tendência e, conseqüentemente, a precisão da função aplicada para prever a potência estimada do painel fotovoltaico com base na cor da sujeira.

Como continuidade deste estudo, baseado na análise de imagens, pode-se elaborar planos periódicos de manutenção e limpeza das placas fotovoltaicas, garantindo a máxima eficiência do sistema e preservando o tempo de vida útil dos módulos solares.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. JÚNIOR, M. **Aproveitamento Fotovoltaico, Análise Comparativa entre Brasil e Alemanha.** Campo Grande: [s.n.], v. 21, 2020. p. 379-387.
2. BRAGA, R. P. **Energia Solar Fotovoltaica.** Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 1. 2008.
3. ABSOLAR. **Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica.** Site da ABSOLAR, 2023. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>. Acesso em: 22 Abril 2023.
4. VALLÊRA, A. M. **Meio Século de História Fotovoltaica.** [S.l.]: Gazeta de Física, v. 1, 2006.
5. OLIVATI, C. D. A. **Efeito Fotovoltaico e Fotocondutividade em Dispositivos Poliméricos.** Universidade de São Paulo. São Paulo. 2001.
6. CARNEIRO, J. A. **Módulos Fotovoltaicos: características e associações.** [S.l.]. 2010.
7. NREAL. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/pv/applications.html>>. Acesso em: 10 Dezembro 2023.
8. MACHADO, C. T.; MIRANDA, F. S. **Energia Solar Fotovoltaica: uma breve revisão.** [S.l.], p. 126-143. 2015.
9. MURPHY, E. E. A. **Measuring Dirt on Photovoltaic Modules.** Massachusetts Institute of Technology. Lexington, p. 9-15.
10. PINHO, J. T.; GALDINHO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos.** Rio de Janeiro: CEPEL, 2014.
11. GOV. INMETRO GOV. Disponível em: <<https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/avaliacao-da-conformidade/programa-brasileiro-de-etiquetagem/tabelas-de-eficiencia-energetica/sistema-de-energia-fotovoltaica>>. Acesso em: 12 Dezembro 2023.
12. SCALON, L. E. A. **Improving the Stability and Efficiency of Pervoskite Solar Cells by a Bidentate Anillium Salt.** [S.l.]: [s.n.], v. 2, 2022.
13. RAMPINELLI, G. A. **Estudo de Características Elétricas e Térmicas de Inversores para Sistemas Fotovoltaicos.** [S.l.]. 2010.
14. CAMPOS, M. S.; ALCANTARA, L. D. **Interpretação dos Efeitos de Tempo Nublado e Chuvoso Sobre a Radiação Solar em Belém/PA.** Revista Brasileira de Meteorologia, v. 31, p. p. 570-579, 2016.
15. CHAVES, M.P. **Estudo sobre sombreamento em planta fotovoltaica localizada em zona urbana de Fortaleza-CE.** 2018. 79 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

16. SAMPLE, T. E. A. **Long-Term Soiling in a Moderate Subtropical Climate**. Institute for Energy and Transport. Ispra. 2014.
17. RIBEIRO, G. F. **Sistema Computacional para Geração de Dados Horários de Radiação Solar**. UFRGS. Porto Alegre, RS. 2005.
18. GONZALES, W. **Digital Image Processing**. Pretince Hall. 2^a ed. [S.l.]: [s.n.], 2022.
19. RUSS, J. C. **Digital Color Imaging Handbook**. 7^a ed. [S.l.]: [s.n.], 2016.
20. CRESESB. **Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sergio Brito**. Site da CRESESB. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata&>>. Acesso em: 10 Fevereiro 2024.
21. SHIMURA, S. **Estimativa do Custo de Geração de Usinas Fotovoltaicas**. Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS. [S.l.]: [s.n.]. 2016. p. 1-8.
22. ELERA. **Elera Renováveis, 2023**. Disponível em: <<https://www.elera.com/nossos-ativos/janauba/>>. Acesso em: 31 Janeiro 2024.
23. MORAES, C. **Eletronica de Potência, 2020**. Disponível em: <<https://eletronicadepotencia.com/celula-fotovoltaica/>>. Acesso em: 22 Abril 2023.
24. DANTAS, J. C. **Análise de perdas por mismatch em sistemas fotovoltaicos**. [S.l.]. 2020.
25. CASANOVA, J. E. A. **Analysis of Dust Losses in Photovoltaic Modules**. Universidade de Málaga. Málaga, p. 3-9. 2011.
26. EQUATORIAL ENERGIA. **Equatorial Energia Goiás, 2023**. Disponível em: <<https://go.equatorialenergia.com.br/valor-de-tarifas-e-servicos/#residencial-normal>>. Acesso em: 31 janeiro 2024.
27. CEMIG. **CEMIG Atendimento, 2024**. Disponível em: <<https://www.cemig.com.br/atendimento/valores-de-tarifas-e-servicos/>>. Acesso em: 31 janeiro 2024.