



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Brasília (IFB)

Campus Samambaia

Especialização em Gerenciamento Ambiental

JONAS SILVA ARAUJO

**IMPACTO DO MATERIAL PARTICULADO NO DESEMPENHO DE SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS NO DISTRITO FEDERAL**

Distrito Federal

2025

JONAS SILVA ARAUJO

**IMPACTO DO MATERIAL PARTICULADO NO DESEMPENHO DE SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS NO DISTRITO FEDERAL**

Monografia apresentada ao curso de Pós-graduação *Lato Sensu* em Gerenciamento Ambiental do Campus Samambaia do Instituto Federal de Brasília como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Gerenciamento Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Fernandes de Lima Lira

Co Orientadora: Prof^a. Dr^a. Jackeline do Socorro Benassuly Barbosa

Distrito Federal

2025

JONAS SILVA ARAUJO

**IMPACTO DO MATERIAL PARTICULADO NO DESEMPENHO DE SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS NO DISTRITO FEDERAL**

Monografia apresentada ao curso de Pós-graduação Lato Sensu em Gerenciamento Ambiental do Campus Samambaia do Instituto Federal de Brasília como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Gerenciamento Ambiental.

Aprovado em 02 de dezembro de 2025

BANCA EXAMINADORA

Lucas Fernandes de Lima Lira (Orientador)

Paulo Henrique Silva Ribeiro (Membro)

Genilda Maria de Oliveira (Membro)

Distrito Federal

2025

RESUMO

A presente pesquisa teve como objetivo avaliar a influência de material particulado (MP_{10}), da radiação solar e da sazonalidade climática sobre a eficiência de geração de um sistema fotovoltaico urbano instalado no Instituto Federal de Brasília (IFB), Campus Samambaia. O estudo foi conduzido entre janeiro e dezembro de 2024, totalizando 52 semanas de monitoramento contínuo. Foram analisadas variáveis como concentração de MP_{10} , precipitação pluviométrica e irradiância solar, correlacionando-as com a diferença percentual de geração entre módulos limpos e sujos. Os resultados demonstraram perdas médias anuais de 9,82%, com picos de até 27,44% durante o período seco (maio a setembro), quando as concentrações de MP_{10} ultrapassaram $35,20 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Durante a estação chuvosa, as perdas permaneceram inferiores a 5%, evidenciando o efeito de autolimpeza natural promovido pela chuva. O estudo conclui que a sujidade é o principal fator de degradação da performance fotovoltaica e recomenda uma frequência de limpeza de 30 dias no período seco e de 3 a 4 meses no período chuvoso, com base em limites críticos de MP_{10} e radiação acumulada. Os achados reforçam a necessidade de estratégias integradas de gestão ambiental e manutenção preventiva, bem como de políticas públicas que incentivem o monitoramento atmosférico e a operação sustentável de sistemas solares urbanos. A pesquisa contribui com dados inéditos para o Distrito Federal, fortalecendo a compreensão sobre os impactos locais da poluição atmosférica na geração fotovoltaica e oferecendo subsídios técnicos para futuras investigações e práticas de eficiência energética.

Palavras-chave: Energia solar fotovoltaica; MP_{10} ; Sazonalidade; Eficiência energética; Gestão ambiental.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the influence of particulate matter PM_{10} solar radiation, and climate seasonality on the generation efficiency of an urban photovoltaic system installed at the Federal Institute of Brasília (IFB), Samambaia Campus. The research was conducted between January and December 2024, totaling 52 weeks of continuous monitoring. Variables such as PM_{10} concentration, rainfall, and solar irradiance were analyzed and correlated with the percentage difference in generation between clean and soiled modules. The results demonstrated average annual losses of 9.82%, with peaks reaching 27.44% during the dry season (May to September), when PM_{10} concentrations exceeded $35.20 \mu\text{g}/\text{m}^3$. During the rainy season, losses remained below 5%, highlighting the natural self-cleaning effect provided by rainfall. The study concludes that soiling is the primary factor in photovoltaic performance degradation and recommends a cleaning frequency of 30 days during the dry season and every 3 to 4 months during the rainy season, based on critical PM_{10} limits and cumulative radiation. These findings reinforce the need for integrated environmental management and preventive maintenance strategies, as well as public policies that encourage atmospheric monitoring and the sustainable operation of urban solar systems. This research provides unprecedented data for the Federal District, strengthening the understanding of the local impacts of air pollution on photovoltaic generation and offering technical support for future investigations and energy efficiency practices.

Keywords: Photovoltaic solar energy; PM_{10} ; Seasonality; Energy efficiency; Environmental management.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Imagem em perspectiva horizontal das camadas que compõem uma placa solar.

Figura 2 - Classificação e distribuição granulométrica de aerossóis e partículas em suspensão atmosférica.

Figura 3 - Área do estudo.

Figura 4 - Limpeza do grupo de controle das placas.

Figura 5 - Estação meteorológica e AGV MP10 IBRAM/IFB.

Figura 6 – Comparativo semanal entre radiação solar e percentuais de diferença (Janeiro a Dezembro de 2024).

Figura 7 – Correlação anual entre radiação solar, desvios de eficiência e sazonalidade climática (2024).

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Diferença percentual de eficiência após a limpeza dos módulos do string A.

Tabela 02 - Frequência de limpeza recomendada para os módulos instalados no telhado do Campus.

Tabela A.2 – Dados semanais de diferença na geração, radiação solar e concentração de MP10 em 2024.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGV – Amostrador de Grandes Volumes.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica.

Aw – Classificação climática tropical com estação seca no inverno, segundo Köppen-Geiger

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente.

COP – Conference of the Parties (Conferência das Partes).

DF – Distrito Federal.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética.

EPI – Equipamento de Proteção Individual.

GW – Gigawatts.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

IBRAM – Instituto Brasília Ambiental.

IEMA – Instituto de Energia e Meio Ambiente.

IFB – Instituto Federal de Brasília.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas).

KJ/m² – Quilojoules por metro quadrado.

kWp – Quilowatt-pico.

MP10 – Material Particulado com diâmetro aerodinâmico menor ou igual a 10 micrômetros (μm).

MPPT – Maximum Power Point Tracker (Rastreador do Ponto de Máxima Potência).

MW – Megawatt.

NREL – National Renewable Energy Laboratory (Laboratório Nacional de Energia Renovável dos Estados Unidos).

ODS – Objetivos do Desenvolvimento Sustentável.

ONU – Organização das Nações Unidas.

PM10 – Particulate Matter 10 (Material Particulado inalável com diâmetro aerodinâmico ≤ 10 micrômetros).

PRONAR – Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar.

SOLARMAN – Plataforma digital de monitoramento de usinas fotovoltaicas.

TWh – Terawatt-hora.

Wp – Watt-pico (potência nominal de pico de um módulo fotovoltaico).

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ – Microgramas por metro cúbico.

μm – Micrômetro (micrômetro = 10^{-6} metros).

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
2. OBJETIVOS.....	11
2.1 Objetivos específicos.....	11
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	11
3.1 Mudanças climáticas.....	11
3.2 Energias livres de carbono no combate às mudanças climáticas.....	12
3.3 Sistemas fotovoltaicos.....	13
3.4 Influência do MP nos sistemas fotovoltaicos.....	15
3.5 Contexto global.....	17
3.6 Contexto brasileiro.....	18
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	19
4.1 Área de estudo e caracterização do sistema.....	20
4.2 Procedimentos de limpeza (manutenções preditivas).....	21
4.3 Coleta e análise dos dados de geração.....	22
4.4 Monitoramento ambiental.....	23
A. Preparação e Instalação do Filtro.....	23
B. Coleta de Dados In Loco.....	23
C. Determinação da Concentração (Gravimetria).....	24
5. ANÁLISE DE DADOS.....	25
5.1 Geração de energia e eficiência relativa.....	27
5.2 Acúmulo de sujeira e MP10.....	27
5.3 Efeitos das limpezas realizadas.....	28
5.4 Sazonalidade e período crítico.....	29
5.5 Análise técnica sobre a difusividade da radiação e sua influência no desempenho fotovoltaico de módulos limpos e sujos.....	29
6. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	30
7. CONCLUSÃO.....	33
REFERÊNCIAS:.....	35
APÊNDICE A – DADOS SEMANAIS DE EFICIÊNCIA FOTOVOLTAICA.....	39

1. INTRODUÇÃO

O Brasil destaca-se internacionalmente por possuir uma matriz elétrica majoritariamente renovável. Em 2023, aproximadamente 87,9% da eletricidade produzida no país teve origem em fontes renováveis, contrastando com os índices significativamente inferiores observados globalmente. Dentre essas fontes, a energia hidrelétrica representou 68,1% da geração elétrica total, conforme dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2025).

Apesar das vantagens associadas à energia hidrelétrica, sua expansão enfrenta desafios significativos. Grande parte do potencial remanescente está localizado em regiões distantes dos principais centros de consumo, como as bacias Amazônica e Tocantins-Araguaia, o que implica em maiores custos de transmissão e riscos socioambientais (EPE, 2025).

A forte dependência de uma única fonte torna o sistema elétrico brasileiro vulnerável a variações climáticas. Períodos de estiagem severa, como os registrados em 2024, reduziram os níveis dos reservatórios, resultando no aumento das tarifas de energia e na necessidade de acionamento de usinas termelétricas mais caras e poluentes (O GLOBO, 2024). Para mitigar esses riscos, o Brasil tem investido na diversificação de sua matriz elétrica, ampliando a participação de fontes como a eólica e a solar. Em 2023, a geração solar fotovoltaica cresceu 68,1%, atingindo 50,6 TWh, com capacidade instalada de 37.843 MW — um crescimento de 54,8% em relação ao ano anterior (EPE, 2024).

No entanto, a integração dessas fontes intermitentes exige infraestrutura adequada e soluções de armazenamento de energia, a fim de garantir a estabilidade do fornecimento. Adicionalmente, eventos climáticos extremos, possivelmente associados às mudanças climáticas, têm impactado a disponibilidade hídrica, reforçando a importância de políticas energéticas pautadas na sustentabilidade e na resiliência do sistema elétrico brasileiro (REUTERS, 2024).

Portanto, considerando a carência de dados e o déficit de informações na região de Brasília, Distrito Federal (DF), quanto à interferência da poluição atmosférica na geração fotovoltaica, especialmente considerando o crescimento desse tipo de sistema na matriz energética brasileira, torna-se necessário avaliar o resultado prático dessas instalações em espaços geográficos especificamente delimitados.

2. OBJETIVOS

O presente estudo teve como objetivo geral quantificar o impacto que fatores climáticos locais exercem na eficiência da conversão energética.

2.1 Objetivos específicos

Para o alcance desse objetivo, foram propostas metas específicas:

- Quantificar as variações na radiação solar efetivamente convertida em energia elétrica decorrente da interferência do acúmulo de material particulado nos módulos fotovoltaicos;
- Avaliar a influência da sazonalidade local na conversão energética, otimizando as intervenções de limpeza em períodos ótimos;
- Avaliar o ganho financeiro das intervenções de limpeza durante todos os meses do ano;
- Auxiliar a otimização dos protocolos de manutenções preventivas em sistemas fotovoltaicos na região;

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Mudanças climáticas

Com economias baseadas na dependência de carbono, a temperatura atmosférica mundial elevou 1,1°C nos últimos anos (IPCC, 2022), gerando perturbações nos processos físico/químicos naturais, com possíveis implicações severas aos ecossistemas e as pessoas em todo mundo, atingindo desproporcionalmente comunidades mais vulneráveis IPCC (2022).

Com o intuito de controlar as emissões de poluentes e na busca por reversão dos processos de degradação planetária, a comunidade internacional tem se reunido para discutir o assunto. Programas como (Agenda 30) acatado pela resolução A/RES70/1 da Organização das Nações Unidas (ONU) em 2015. Teve como principal objetivo a implementação de 17 metas a nível mundial para um planeta mais equilibrado, conhecido como “Os 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS)”. E posteriormente aceito por 193 países.

Ainda em 2015, na 21ª Conferência das Nações Unidas Sobre as Mudanças Climáticas (*Conference of the Parties 21*) a COP21, outro acordo mundial

envolvendo 196 países foi firmado. O Acordo de Paris, tem como objetivo principal limitar o aquecimento global em até 2°C tendo como base as métricas da era pré-industrial.

O Brasil por sua vez, tem experimentado protagonismo mundial no que se refere a tentativa de minimização dos danos causados pelo aquecimento global. Em 1992, o país sediou no estado do Rio de Janeiro a Conferência das Nações Unidas Sobre Meio Ambiente e o Desenvolvimento (Rio 92). Já no ano de 2012, novamente o estado do Rio de Janeiro sediou um evento da ONU de relevância ambiental, a Conferência das Nações Unidas Sobre Desenvolvimento Sustentável (Rio+20). E já confirmada para o ano de 2025 no estado brasileiro do Pará, a previsão é de que ocorra a realização da 30ª Conferência das Partes, (*Conference of the Parties 30*) a COP 30.

Além de programas para o financiamento de políticas públicas para a proteção ambiental a nível nacional, como o Fundo Amazônia, instituído pelo Decreto nº 6.527/08, que tem por objetivo financiar projetos sustentáveis garantindo a manutenção da Amazônia legal e o desenvolvimento das comunidades locais.

3.2 Energias livres de carbono no combate às mudanças climáticas

As energias renováveis são fundamentais no processo de descarbonização econômica e social. E mais uma vez, o Brasil se destaca no cenário internacional, políticas de incentivo podem ser acessadas através de um conjunto de legislações próprias ao tema. Como é o caso das resoluções normativas da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). A Resolução Normativa 482 da ANEEL, por exemplo, trata de normas gerais para energia solar. Enquanto a Resolução 685 da ANEEL trata de novas modalidades para geração distribuída. É natural e esperado que as legislações sejam alteradas e aperfeiçoadas com o passar do tempo, entretanto, a estabilidade jurídica é fundamental para dar previsibilidade e segurança à transição energética nacional.

No Brasil, apesar de ser considerada recente, a transição energética para fontes solares pode observar o maior crescimento anual da energia solar em 2023 com um incremento de 3 Gigawatts (GW) nos nove primeiros meses deste ano. No ano anterior em 2022 o incremento seguia a ordem dos 2,5 GW. Quando somados com a energia eólica o acréscimo total nos nove primeiros meses deste ano foi de 7

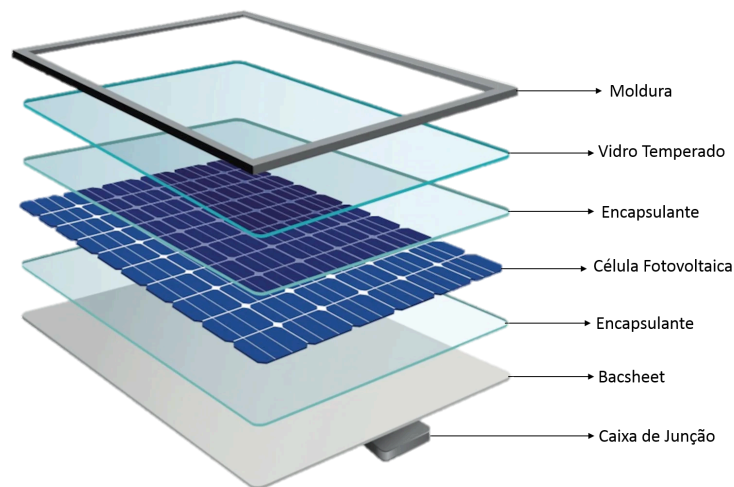
GW. Quando analisado de forma macro, 83,79 % da energia gerada no país advém de fontes renováveis, Ministério de Minas e Energia (2023). Vale ressaltar que, grande parte advém da matriz hídrica o que pode gerar dificuldades de acesso à essa geração em tempos de alta sazonalidade hídrica.

O mapeamento das condições meteorológicas para geração de energia solar no Brasil interessa diversos atores nacionais, incluindo instituições públicas. O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) elabora e divulga esses dados, através do Atlas Brasileiro de Energia Solar. Disponibilizado a segunda edição no ano de 2017 pelo Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia (LABREN). O documento traz informações pertinentes a nível municipal sobre dados, que podem ser utilizados para estudos de viabilidade na incrementação de empreendimentos solares, ou até mesmo no subsídio de políticas públicas

3.3 Sistemas fotovoltaicos

O conceito que explica o funcionamento de um painel solar é relativamente simples, cria-se um diferencial de potencial através da excitação gerada pela radiação solar nas células fotovoltaicas, para tal as células que compõem o painel são feitas de materiais semicondutores (SINGH; GOYAL; KUMAR, 2021). Essa ação é conhecida como efeito fotovoltaico, gerando assim energia elétrica, Figura 1.

Figura 1 - Imagem em perspectiva horizontal das camadas que compõem uma placa solar.



Fonte: MINHA CASA SOLAR (2023).

Problemas na geração de energia a partir de sistemas fotovoltaicos podem ocorrer quando por algum motivo a radiação solar é impedida de acessar as células, seja por fatores induzidos de forma artificial ou em decorrência de efeitos naturais (KAZEM, 2023).

Nesse sentido, a poluição atmosférica pode ser capaz de interferir no processo do efeito fotovoltaico sobre as placas. Portanto, entender a composição atmosférica, a forma como os poluentes se dispersam na mesma e a interferência desses fatores sobre a produção de energia solar, tem se mostrado um desafio devido à heterogeneidade das regiões onde estão instalados esses sistemas.

Diversos fatores implicam no tipo de sujidade e poluição depositadas sobre os painéis, bem como sua frequência e quantidade (NEHER et al., 2019). Fatores como a sazonalidade climática, a morfologia local, o tipo de uso e ocupação do solo podem diferir significativamente de região para região. A composição da precipitação hídrica no local, como por exemplo, o nível de acidez da chuva é outro fator relevante e pouco estudado na deterioração das instalações geradoras de energia fotovoltaica (DEBONO et al. 2024).

3.4 Influência do MP nos sistemas fotovoltaicos

Um dos desafios observados na implementação de sistema fotovoltaicos, são as condições ocasionadas pela poluição atmosférica, por conta do bloqueio da irradiância gerada pelo material particulado. O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) observando a escalada na deterioração da qualidade do ar, instituiu no ano de 1989 a resolução Nº 005, criando o Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar (PRONAR). Com o objetivo além de, controle da qualidade do ar, orientar sobre limites máximos de emissões.

A característica física das partículas de poeira facilita sua deposição sobre as placas. Uma vez que, as partículas menores se agregam às maiores por serem carregadas eletrostaticamente, principalmente no litoral, criando uma maior capacidade de deslocamento do material particulado (YILBAS, 2019). Processo esse que pode favorecer o depósito de poeira nos módulos em locais distantes das fontes de poluição atmosférica.

Estudos sobre como enfrentar a problemática da sujidade sobre as placas fotovoltaicas, incluindo material particulado proveniente de meios naturais ou mesmo causados pela ação antrópica, vem sendo desenvolvidos, He *et al.* (2023) trás uma revisão sobre o tema. Demonstrando em artigos em aproximadamente 14 países os impactos sobre os sistemas, além de fatores que influenciam a agregação da poeira, como, fatores ambientais, fatores do módulo fotovoltaico e fatores da poeira.

Diante deste cenário global, se faz necessário entender a dinâmica envolvida, tanto no acúmulo como na retirada desse material sobre as placas. A deposição de poeira, por sua vez, pode ser influenciada por dois fatores, o ambiente e as características da poeira (Maghami *et al.*, 2016).

Para Jamil *et al.* (2017) existem duas formas de se limpar os painéis fotovoltaicos. A forma manual, método com bons resultados para sujeira dura, porém, com desvantagens como o custo da mão de obra e em algumas ocasiões a inacessibilidade. E a limpeza automática, método desenvolvido a fim de solucionar as dificuldades geradas na limpeza manual. A limpeza natural, por sua vez, tem uma série de especificações que podem não ser aplicáveis a uma parte das áreas de gerações, como o grau de inclinação e a precipitação média local.

Outras formas para a limpeza dos módulos fotovoltaicos é apresentado por Olorunfemi *et al.* (2022), sendo algumas delas, a limpeza com ar comprimido, a limpeza por vibração, a limpeza eletrostática, a limpeza de revestimento (essa utiliza materiais com capacidade de repelência da sujeira), limpeza robótica entre outras. Entretanto, todo esse esforço seria desperdiçado sem o efetivo monitoramento, que no caso do trabalho de Olorunfemi foi caracterizado em 3 principais etapas: 1. detecção; 2. processamento e 3. Exibição.

Boa parte dos métodos desenvolvidos para limpezas são à base de água. Deb *et al.* (2018) evidência em outra revisão de estudos sobre o ganho na geração de energia através do controle da sujeira, uma proposta para limpeza sem utilização de água, de forma automatizada. Medida essa que pode baratear os custos envolvidos na atividade periódica de manutenção dos sistemas, beneficiando o consumo moderado de água nas atividades de limpeza, principalmente de grandes parques solares.

A poluição gerada pelo consumo não renovável de energias, acaba afetando a penetração de radiação solar através da atmosfera, que por sua vez, afeta a geração de energia dependente dos raios solares, interferindo diretamente no consumo de energias não renováveis. Tornando o vício do ciclo uma barreira à superação da problemática. A importância de entender localmente como esses processos são dinamizadas através das especificidades de cada região, é fundamental para a maximização dos resultados esperados, bem como da superação total de energias não renováveis e da descarbonização econômica e social.

A distribuição granulométrica de aerossóis e partículas em suspensão na atmosfera, gases são moléculas com tamanhos variando entre 0,0001 a 0,001 μm como por exemplo: O_2 , CO_2 , H_2 , CH_4 , N_2 , H_2O , SO_2 , Cl_2 , com fontes que incluem processos naturais e industriais, emissões de veículos e outras formas de queima de combustíveis fósseis. Esses gases impactam nos módulos fotovoltaicos formando partículas secundárias como sulfatos e nitratos se acumulando nas placas ao reagirem com o meio atmosférico. Alguns vírus com tamanho entre 0,01 a 0,1 μm oriundos de processos biológicos também servem de base para a formação de partículas maiores que podem sedimentar sobre os módulos (Figura 2).

Fumaças e fumos metálicos de 0,01 a 1 μm como pigmentos de tinta e fumaça de carbono geradas a partir de queima incompleta de combustíveis e

processos industriais são altamente aderentes e difíceis de remover somente com a chuva, essas partículas podem ainda bloquear a incidência de raios solares reduzindo assim a eficiência dos módulos, mesmo com pouca espessura depositada.

As névoas, poeiras finas e partículas atmosféricas de 0,1 a 5 μm , a exemplo, as névoas atmosféricas, esporos de fungos e núcleos de poluição urbana, que tem suas origens nos processos de urbanização, erosão do solo, tráfego de veículos e através do meio biológico de plantas, tem capacidade de obstruir a passagem da luz solar mesmo em pequenas quantidades, apesar de serem removíveis com a chuva, tem a capacidade de acumular sobre os módulos em ângulos de baixa inclinação.

Já os bioaerossóis, bactérias, pólen e poeira grossa de 5 a 50 μm , como as bactérias, esporos, pólen, poeiras de estradas ou plantas, com suas fontes provenientes da vegetação, meio natural, queima de biomassa, e em decorrências dos ventos de áreas expostas, tende a formar camadas orgânicas ou arenosas, absorvendo umidade e favorecendo o crescimento de biofilmes e fungos interferindo a geração de energia pelos módulos

3.5 Contexto global

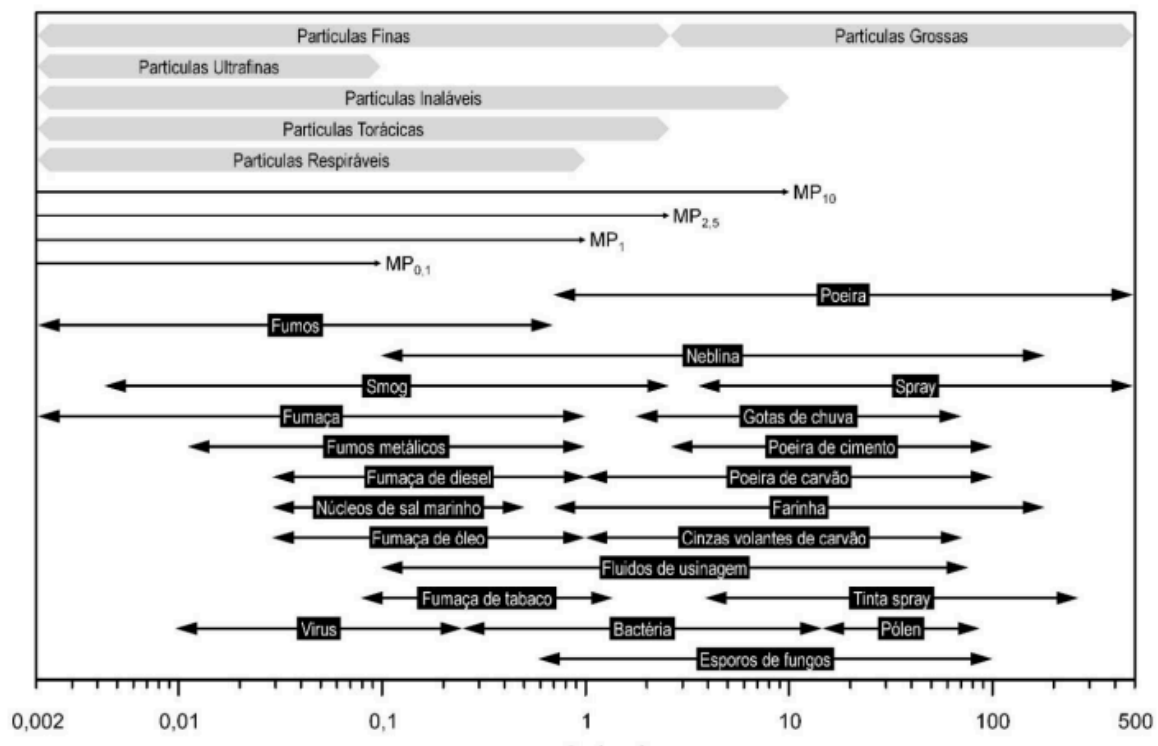
A necessidade de se identificar potenciais interferências no processo de geração de energia fotovoltaica e nesse caso específico, a limitação pelo transporte e sedimentação de sujidade, em especial partículas de até 10 μm , Maghami et al. (2016), (para maior detalhamento consultar Figura 2), fez com que estudos relacionados ao tema se tornassem destaque em determinadas regiões geográficas, como por exemplo, em países de clima desértico e de clima temperado.

Em países de clima desértico fatores como baixa precipitação e umidade do ar podem interferir na geração de energia. Nos países de clima temperado, por sua vez, a área territorial limitada e baixos índices de radiação podem ser aspectos limitantes na produção de energia a partir de sistemas fotovoltaicos.

Estima-se que a queda na produção de energia por sujidade possa alcançar 7 % em território estadunidense, e 50 %, ao ano, em países do oriente médio, segundo dados do Laboratório Nacional de Energia Renovável dos Estados Unidos (NREL, 2021). Ademais, a queda na produção de energia em regiões temperadas, que por vezes contam com uma precipitação média local não semelhante às áreas

desérticas, se dá pelo fenômeno de cimentação da sujeira ocasionado pelo orvalho concentrando sobre as placas durante a noite e aquecido pelo o sol no período diurno do dia, levando a uma incapacidade de auto limpeza natural, seja pela chuva ou pelos ventos locais.

Figura 2 - Classificação e distribuição granulométrica de aerossóis e partículas em suspensão atmosférica.



Fonte: Brito, G. F. S. et al. (2018).

3.6 Contexto brasileiro

Dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) indicam que o Brasil possuía em 2022 uma área total de 8.510.417,771 km², mantendo-se assim como o quinto maior país do mundo. Os extremos de leste a oeste em sua largura máxima chegam a 4.319,4 km² e o comprimento de norte a sul com uma distância máxima de 4.394,7 km² (BRASIL, 2023). Os extremos de altitude se aproximam dos 3 mil metros.

Todos esses fatores tornam o clima heterogêneo nos 6 biomas brasileiros, sendo observado diferentes influências de eventos meteorológicos. No entanto, as projeções para áreas com potencial elevado de radiação se concentram em dois biomas principais, o Cerrado e a Caatinga (INPE, 2017). Portanto, regiões marcadas por relevante sazonalidade hídrica, como as dos biomas Cerrado e Caatinga,

contribuem para a geração de energia solar, uma vez que recebem mais radiação solar, porém, podem ter interferência direta do material particulado, facilmente propagado pela baixa umidade atmosférica.

Estudos sobre a interferência da poluição atmosférica na geração de energia fotovoltaica são desenvolvidos a mais tempo em países de clima árido e em regiões do hemisfério norte como Europa e Estados Unidos (Sarver, T., Al-Qaraghuli, A., & Kazmerski, L. L., 2013).

Já em países emergentes, especialmente os da faixa tropical, esse conhecimento ainda é incipiente. Isso pode estar relacionado, em parte, à falta de investimento em pesquisas de monitoramento da qualidade do ar, como acontece no Brasil, onde poucos estados dispõem de uma rede de monitoramento de poluentes atmosféricos (IEMA, 2024).

Os benefícios da compreensão sobre os fatores de perdas na geração de energia fotovoltaica local, vão além do ganho energético, significa menos incerteza e maior previsibilidade econômica e logística na manutenção dos sistemas. Fatores como o tipo de material particulado, uso e ocupação do solo, avifauna local, relevo e condições climáticas influenciam na geração de energia e geralmente não são levados em consideração pelo gestor do sistema fotovoltaico.

Portanto, entender os fatores já mencionados, contribuirão para um maior retorno e a maximização de logística de manutenções periódicas e previsibilidade na geração final de energia elétrica.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo, que teve como objetivo avaliar o impacto da deposição de material particulado (MP10), da radiação solar e da sazonalidade climática sobre a eficiência de geração de energia em um sistema fotovoltaico urbano foi desenvolvido entre os dias 01 de janeiro e 31 de dezembro de 2024, totalizando 52 semanas consecutivas de monitoramento no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Brasília (IFB), Campus Samambaia.

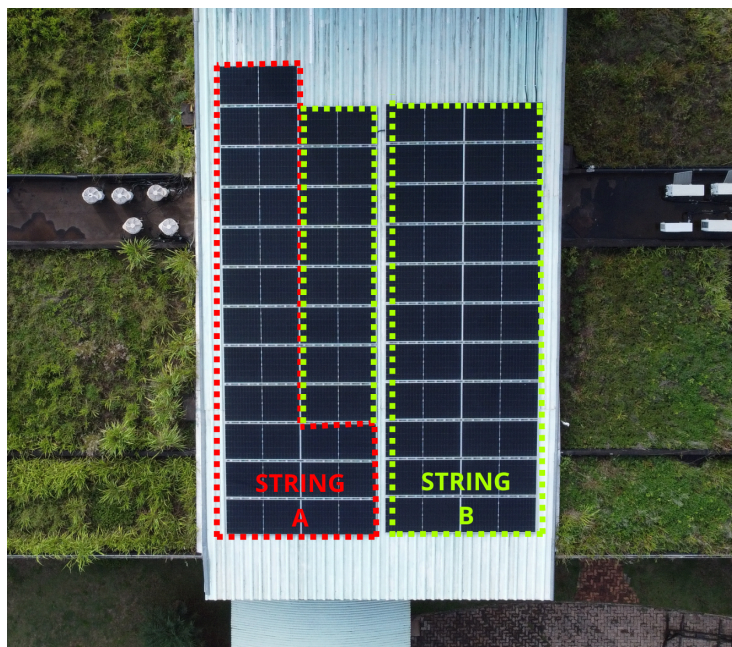
O Distrito Federal apresenta clima tropical sazonal do tipo Aw segundo a classificação de Köppen-Geiger, com duas estações bem definidas: uma seca, entre maio e setembro, e outra chuvosa, entre outubro e abril. A combinação entre precipitação pluviométrica, concentração de material particulado e radiação solar

afeta diretamente a performance dos módulos fotovoltaicos. Por isso, elementos como MP10, precipitação e irradiância foram monitorados semanalmente. Os dados ambientais foram, então, contrastados com os valores de geração elétrica dos módulos, permitindo inferir a influência das condições climáticas e atmosféricas locais na eficiência de conversão energética.

4.1 Área de estudo e caracterização do sistema

O sistema fotovoltaico objeto deste estudo está instalado na cobertura do bloco administrativo do IFB Samambaia, aproximadamente 10 metros de altura. A usina possui capacidade instalada de 25 kWp, composta por 45 módulos de 550 Wp cada. Os módulos estão divididos em dois grupos (Figura 3): 15 conectados ao *stringbox* A (com limpezas regulares) e 30 ao *stringbox* B (sem intervenção). A orientação dos módulos é voltada para o norte, sob as mesmas condições de ventilação e irradiação. A distinção entre os strings foi realizada com base em um teste prático de sombreamento parcial, realizado entre outubro e novembro de 2023, com uso de carpetes para simular obstruções de radiação e identificar os pares de módulos por sua resposta elétrica.

Figura 3 - Área do estudo.



Fonte: Raulino, V. 2024. Modificada pelo autor.

4.2 Procedimentos de limpeza (manutenções preditivas)

Os procedimentos de limpeza foram realizados em cinco momentos: 09/01, 11/03, 09/05, 27/07 e 28/09 de 2024. Esse intervalo de tempo entre as limpezas foi essencial para observar como as condições climáticas sazonais da região influenciam o acúmulo de sujeira além das perdas econômicas e de geração fotovoltaica. Entre janeiro e abril, constatou-se a presença de chuvas regulares atuando como uma limpeza natural dos módulos, mantendo baixos os níveis de sujeira e as perdas mínimas. Já no início da seca (maio, semana 19 em diante), a transição climática permitiu acompanhar o início do acúmulo real de poeira, na área urbana de Samambaia. As perdas começaram a aumentar gradualmente. A partir de junho e setembro, semanas 26–37 observou-se o período mais crítico, com ausência de chuvas e acúmulo contínuo de sujeira.

As perdas ultrapassam 20 % por várias semanas seguidas, evidenciando o impacto direto da sazonalidade na eficiência dos módulos. Ao espaçar as limpezas nesse intervalo foi possível quantificar o ganho energético real após cada intervenção, além de a análise comprovar que, sem chuvas, a sujeira se acumula de forma mais agressiva e compromete significativamente a performance. A variação climática observada neste intervalo fornece base técnica concreta para definir uma frequência mínima de limpeza preventiva durante o período seco. E demonstra a inutilidade de limpezas excessivas no período chuvoso, otimizando custos operacionais.

O procedimento seguiu protocolo de segurança com uso de EPIs e ferramentas adequadas, como corda de ancoragem, cinturão tipo paraquedista, capacete, vassoura de cerdas macias, esponja não abrasiva, mangueira de 30 metros e detergente neutro. O string A recebeu a limpeza, enquanto o B permaneceu exposto, servindo como controle (Figuras 4a e 4b).

Figura 4 - Limpeza do grupo de controle das placas.

Imagem A - Limpeza realizada em período chuvoso.



Fonte: Raulino, V. (2024)

Imagem B - Limpeza realizada em período de seca.



Fonte: Raulino, V. (2024)

4.3 Coleta e análise dos dados de geração

Os dados foram obtidos via software SOLARMAN Smart Web, com acesso concedido pela empresa responsável pela instalação da usina. O sistema registra valores com passos aleatórios de até 6 minutos, dependendo da variação de radiação. Para esta pesquisa, os dados foram consolidados comparando a diferença entre os módulos limpos e sujos semanalmente.

Para a análise dos dados de geração da pesquisa, inicialmente foi examinada a diferença de desempenho entre dois strings fotovoltaicos operando em condições semelhantes de orientação (norte), inclinação, sombreamento e especificações técnicas. Essa comparação inicial teve como objetivo identificar uma diferença (offset) natural entre os strings, ou seja, um desvio sistemático mesmo na ausência de sujeira ou intervenções externas.

A diferença de geração observada nesse cenário inicial foi então adotada como offset de referência. Esse valor foi fundamental para corrigir análises posteriores, garantindo que as variações medidas refletissem apenas fatores externos, como o acúmulo de sujeira, e não desigualdades estruturais entre os sistemas. Com essa diferença definida, as comparações posteriores passaram a considerar a diferença real de geração.

Dessa forma, foi possível isolar o impacto da sujeira sobre a eficiência do sistema fotovoltaico, estabelecendo uma análise precisa do efeito das condições

ambientais e do cronograma de limpeza ao longo do tempo. A Tabela A.2 de resultados foi estruturada com colunas para: diferença de geração semanal, radiação solar semanal (KJ/m²), concentração de MP10 (µg/m³) e registro de limpeza. A Tabela A.2 encontra-se no apêndice A.

4.4 Monitoramento ambiental

A radiação solar foi medida pela Estação BRASILIA A001 do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e o índice pluviométrico foi medido por uma estação meteorológica automática instalada no IFB Samambaia. A concentração de MP10 foi obtida por meio de parceria com o Instituto Brasília Ambiental (IBRAM), utilizando um Amostrador de Grandes Volumes (AGV) para material particulado até 10 µM (Figura 5a e 5b).

A obtenção dos dados de MP10 (partículas com diâmetro aerodinâmico menor que 10 micrômetros) segue um rigoroso protocolo normatizado. O processo ocorre em três etapas principais:

A. Preparação e Instalação do Filtro

Antes de levar o material para o campo no IFB, filtros de fibra de vidro ou quartzo são pesados em laboratório sob condições controladas de umidade e temperatura. Este é o "peso inicial". O filtro é então instalado na parte superior do AGV, que possui uma cabeça seletora projetada para deixar passar apenas partículas de até 10 µm.

B. Coleta de Dados *In Loco*

O AGV é acionado e opera por um período padrão (geralmente 24 horas contínuas).

- **Sucção de Ar:** Um motor de alta potência succiona o ar ambiente através da cabeça seletora.
- **Separação Inercial:** As partículas maiores que 10 µm ficam retidas ou são descartadas pelo design do bocal, enquanto o MP10 é depositado na superfície do filtro.
- **Medição de Vazão:** O equipamento registra o volume total de ar que passou pelo filtro durante o período. Esse dado é fundamental, pois a concentração é uma relação entre a massa coletada e o volume de ar aspirado.

C. Determinação da Concentração (Gravimetria)

Após as 24 horas, o filtro é retirado do equipamento no IFB e levado novamente ao laboratório para condicionamento e nova pesagem ("peso final"). A diferença entre o peso final e o peso inicial revela a massa total de poluentes retidos.

É importante destacar que, embora o IBRAM forneça o equipamento e a expertise por meio da parceria, toda a logística operacional é executada dentro do campus:

- Instalação Fixa: O AGV está posicionado em local estratégico dentro do próprio IFB para captar a realidade atmosférica local.
- Operação Técnica: A troca de filtros, a calibração do fluxo e a coleta dos dados primários são realizadas diretamente no local.
- Manutenção de Campo: Como o equipamento depende de energia estabilizada e proteção contra intempéries, a infraestrutura do IFB garante a continuidade das leituras sem a necessidade de deslocamento para estações externas do IBRAM.

Dessa forma, os dados gerados refletem com precisão a qualidade do ar da região específica onde o instituto está inserido.

Figura 5 - Estação meteorológica e AGV MP10 IBRAM/IFB.

Imagem A - Estação meteorologia IBRAM/IFB.



Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Imagem B - Amostrador de grande volume para MP10. IBRAM/IFB.



Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

5. ANÁLISE DE DADOS

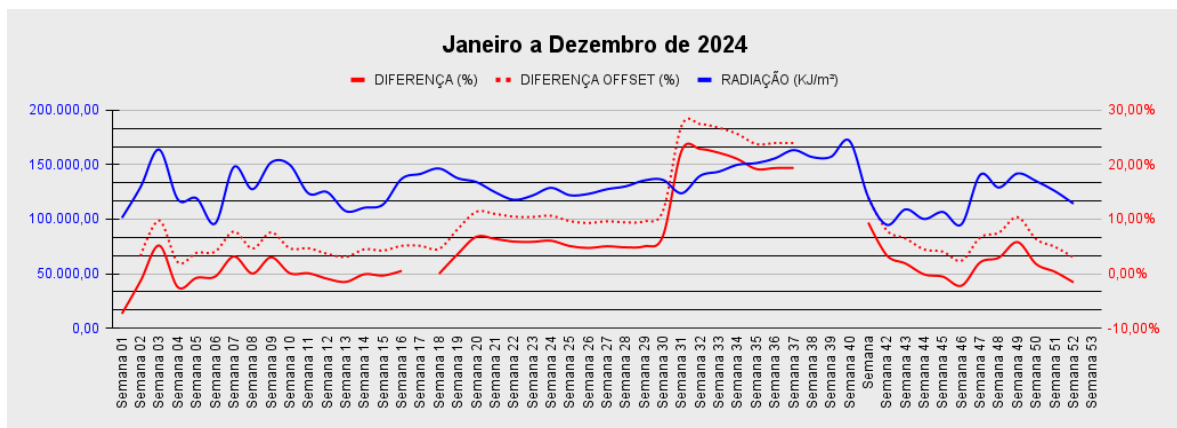
Os dados de geração elétrica foram organizados em planilhas no Microsoft Excel. Análises estatísticas descritivas foram utilizadas para comparar a performance dos dois *strings* ao longo das semanas. Também foram elaborados gráficos multiparâmetros (Figura 6 e 7) para correlacionar os indicadores climáticos com a eficiência dos módulos. Além da comparação semanal, os dados foram agrupados por estação seca e estação chuvosa, permitindo avaliar o impacto sazonal sobre a geração fotovoltaica.

Como complemento, foi criado um índice de radiação solar relativo semanal, definido como o valor de radiação semanal dividido pelo maior valor de radiação do ano. Esses procedimentos permitiram analisar com profundidade a influência de fatores climáticos e atmosféricos na eficiência de sistemas solares urbanos ao longo de um ano típico do Cerrado brasileiro.

A análise de desempenho do sistema fotovoltaico instalado no IFB Campus Samambaia ao longo de 2024 foi estruturada em três eixos: eficiência energética, acúmulo de poeira/sujeira e impacto da limpeza dos módulos. Os dados analisados

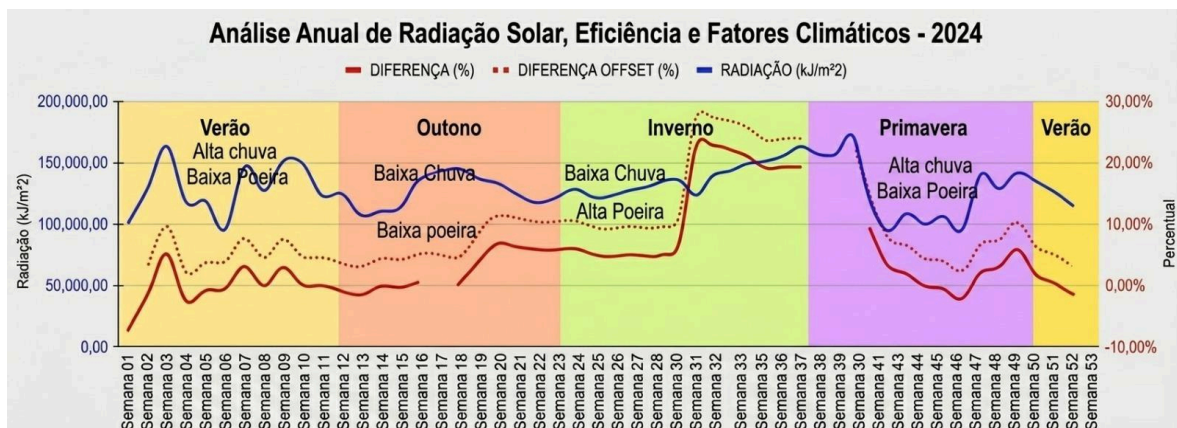
foram obtidos semanalmente, integrando variáveis como geração de energia (MPPT1 e MPPT2), radiação solar (KJ/m^2) e concentração de material particulado fino (PM_{10} , $\mu\text{g/m}^3$).

Figura 6 – Comparativo semanal entre radiação solar e percentuais de diferença (Janeiro a Dezembro de 2024).



Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Figura 7 – Correlação anual entre radiação solar, desvios de eficiência e sazonalidade climática (2024).



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

5.1 Geração de energia e eficiência relativa

Ao longo das 52 semanas monitoradas, observou-se que a diferença percentual de eficiência entre o *string* limpo (A) e o sujo (B) variou significativamente, com valores de até 27,44% nas semanas mais críticas, especialmente no inverno. Essa diferença representa a perda energética do sistema que não recebeu limpeza, em comparação ao sistema mantido limpo. Durante a estação chuvosa (jan-mar), a diferença manteve-se relativamente baixa, com valores oscilando entre 2% e 5%, como observado nas semanas 4 (2,09%), 5 (3,82%) e 6 (4,05%). Já no período seco (maio-setembro), as perdas aumentaram de forma progressiva, atingindo picos entre semana 31 (27,16%) e semana 34 (25,60%), demonstrando o impacto cumulativo da sujeira sobre a performance dos módulos. A média de diferença anual foi de 9,82%, e em 64% das semanas do ano (34 semanas) os valores superaram o limite técnico de 10%.

O NREL, laboratório do Departamento de Energia dos EUA, é a maior autoridade mundial em pesquisas sobre o tema. Seus estudos de campo em regiões áridas e semiáridas validaram que, em muitos cenários, perdas acima de 10% indicam uma falha na manutenção preventiva e começam a colocar em risco o ROI (Retorno sobre o Investimento) do projeto o que reforça a necessidade de manutenção periódica ao longo de todo o ano.

5.2 Acúmulo de sujeira e MP10

A concentração de material particulado (MP10) teve papel determinante no desempenho do sistema. Durante a estiagem de 2024, especialmente entre as semanas 26 e 36, observou-se o acúmulo mais severo de poeira, com registros de MP10 acima de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ em várias semanas — como nas semanas 26 (16,35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 32 (16,67 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 33 (15,98 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 34 (13,12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) e o pico na semana 35 (35,20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Essas concentrações coincidiram com os maiores valores de perdas energéticas, demonstrando correlação direta entre MP10 e perdas de geração. Ou seja, à medida que o material particulado aumentava, o desempenho dos módulos sujos caía acentuadamente. Nas semanas 35 a 37, as diferenças permaneceram

consistentemente acima de 23%, mesmo com alta irradiância, o que indica que a sujeira é o fator preponderante nas perdas energéticas.

5.3 Efeitos das limpezas realizadas

As limpezas nos módulos do *string* A ocorreram nas semanas 2, 11, 19, 30 e 39, conforme o cronograma de manutenção. A comparação entre a semana da limpeza e as semanas seguintes revelou ganhos imediatos de eficiência:

Tabela 1 – Diferença percentual de eficiência após a limpeza dos módulos do string A.

Semana	Diferença (%)
19	8,19
20	11,36
21	10,96
30	11,53
31	27,16

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

Essa resposta demonstra que a eficiência do sistema limpo não apenas se recupera, mas supera em muito o sistema sujo em condições adversas, especialmente quando há radiação solar elevada. Contudo, os dados da semana 30 (MP10: -885,44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) e da semana 49 (-5198 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) apontam falhas instrumentais, exigindo revisão na calibração e manutenção dos sensores. Tais anomalias não foram utilizadas nas análises críticas.

5.4 Sazonalidade e período crítico

O comportamento das variáveis confirma a forte influência da sazonalidade climática do Distrito Federal sobre a performance dos módulos:

- I. Durante o verão e outono (semanas 1 a 18), o acúmulo de sujeira foi contido por precipitações regulares.
- II. A partir de maio (semana 19), com o início da seca, as perdas aumentaram progressivamente.
- III. No inverno (semanas 26 a 37), as perdas atingiram valores acima de 20% em sete semanas consecutivas, superando o dobro do limite técnico recomendável.

Esse padrão deixa claro que o período crítico para manutenção vai de maio a dezembro, e que limpezas com frequência inferior a 2 meses seriam mais eficazes para preservar o rendimento do sistema. A diferença média de eficiência neste período foi de 15,95%, o que representa perda econômica significativa se não for mitigada.

5.5 Análise técnica sobre a difusividade da radiação e sua influência no desempenho fotovoltaico de módulos limpos e sujos

A tentativa de correlacionar a difusividade da radiação com o desempenho relativo entre módulos limpos e sujos esbarra em limitações técnicas da metodologia empregada. A difusividade refere-se à fração da radiação solar global que atinge os módulos de forma difusa, ou seja, dispersa por partículas atmosféricas e nuvens. Em condições nubladas, por exemplo, a proporção de radiação difusa aumenta significativamente, enquanto a radiação direta é reduzida. Estudos na literatura indicam que a radiação difusa pode penetrar camadas finas de sujeira com menor perda ótica do que a radiação direta, potencialmente reduzindo a diferença de desempenho entre módulos limpos e sujos.

Contudo, o presente estudo não dispunha de sensores específicos para separação entre radiação direta e difusa, limitando a análise ao valor total de irradiância global acumulada semanalmente. Sem esta discriminação, não foi

possível estabelecer um modelo confiável para avaliar se, durante períodos de maior nebulosidade (alta difusividade), o offset entre *strings* convergia. Adicionalmente, o uso de médias semanais suaviza variações subdiárias importantes, como eventos pontuais de cobertura de nuvens ou temporais, que impactam diretamente a composição espectral da radiação. Outro fator limitante foi a ausência de índice de nebulosidade ou cobertura de nuvens registrado em paralelo ao monitoramento da geração. Isso inviabilizou o cruzamento de dados climáticos com a performance relativa dos módulos em diferentes condições de céu.

Portanto, não se pode afirmar tecnicamente, com base nos dados disponíveis, se a radiação difusa influenciou positivamente ou negativamente o offset entre os módulos limpos e sujos. Para investigações futuras, recomenda-se a inclusão de piranômetros sombreados e não sombreados para distinguir entre radiação difusa e direta, além da adoção de sensores de cobertura de nuvens (como ceilômetros ou câmeras hemisféricas) e medições horárias ou sub-horárias, que permitiriam modelagens mais robustas sobre o comportamento óptico da sujeira sob diferentes espectros de radiação.

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A pesquisa demonstrou que a eficiência dos sistemas fotovoltaicos instalados em ambiente urbano está diretamente relacionada a variáveis ambientais como material particulado (MP10), radiação solar incidente e à frequência das limpezas dos módulos. A partir do monitoramento semanal ao longo das 52 semanas de 2024, observou-se que a diferença percentual de geração entre os módulos limpos e sujos variou entre 2,09% (semana 4) e 27,44% (semana 32). A radiação solar média oscilou entre 94.738,80 KJ/m² (semana 42) e 171.696,40 KJ/m² (semana 40). Concentrações de MP10 acima de 10 µg/m³ estiveram frequentemente associadas a diferenças superiores a 9%, evidenciando uma correlação positiva entre os dois parâmetros.

Durante o período seco, entre as semanas 26 e 36 (junho a setembro), os valores de diferenças entre os dois grupos de módulos se mantiveram consistentemente elevados, com média superior a 20%. Nas semanas 31 a 33, as diferenças foram de 27,16%, 27,44% e 26,75%, mesmo com radiações entre 123.758,70 e 143.587,20 KJ/m². As concentrações de MP10 nessas semanas foram de 7,22; 16,67 e 15,98 µg/m³, respectivamente, o que reforça a hipótese de que a

perda de desempenho é significativamente agravada pela presença de particulado atmosférico. A semana 35 apresentou MP10 de 35,20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, com diferenças entre os *strings* de 23,78% e radiação de 151.408,20 KJ/m^2 . Mesmo em semanas com radiação superior a 150.000 KJ/m^2 , como a semana 36 (155.745,20 KJ/m^2), a diferença permaneceu elevada (23,96%), demonstrando que o acúmulo de sujeira tem impacto mais relevante que a irradiância isolada.

Esses resultados se alinham às características climáticas típicas do Distrito Federal, que apresenta duas estações bem definidas: uma chuvosa, de outubro a abril, e outra seca, de maio a setembro. Dados de 2024 fornecidos pelo INMET e pela Defesa Civil do DF confirmam a manutenção do regime climático típico da região. No período seco (maio a setembro), a umidade relativa do ar caiu a níveis críticos, inferiores a 15% em diversas ocasiões, especialmente em julho e agosto, com diversos alertas de risco à saúde pública. Além disso, a ausência quase total de precipitação entre as semanas 23 e 37 favoreceu a deposição contínua de poeira e material particulado. Por outro lado, no trimestre úmido (janeiro a março), foram registrados acumulados pluviométricos superiores a 250 mm/mês, com dias consecutivos de chuvas intensas, promovendo a auto limpeza natural dos módulos.

Nos meses com maior índice pluviométrico (janeiro a março e novembro a dezembro), as diferenças variaram geralmente entre 2% e 7%. Por exemplo, nas semanas 4 a 10, variou entre 2,09% e 7,73%, com concentrações de MP10 entre 0,00 e 7,77 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. A limpeza realizada na semana 2 gerou uma diferença de 3,23%, que saltou para 9,75% na semana seguinte, sem nova intervenção. Já na semana 30, após limpeza, a diferença foi de 11,53%, saltando para 27,16% na semana 31. Esses resultados indicam que os efeitos da limpeza são imediatos, mas temporários, com redução progressiva de eficiência nas semanas subsequentes.

Em semanas com MP10 acima de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e radiação entre 124.000 e 135.000 KJ/m^2 (ex: semanas 20 a 25), as diferenças oscilaram entre 9,30% e 11,36%, mesmo sem o fator limpeza, evidenciando perdas acumuladas relevantes. Por outro lado, entre as semanas 13 a 17, com MP10 entre 4,22 e 6,23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e radiação variando de 107.336,40 a 141.487,80 KJ/m^2 , as diferenças ficaram entre 3,07% e 5,11%. Essa diferença evidencia o papel mitigador, porém não permanente, das chuvas na eficiência fotovoltaica, permitindo intervalos mais longos entre limpezas nos períodos úmidos.

Conclui-se que a eficiência dos sistemas fotovoltaicos monitorados está fortemente condicionada à presença de material particulado em suspensão e à frequência das limpezas. A diferença de geração entre módulos limpos e não limpos superou 25% em momentos críticos, indicando perdas energéticas e econômicas substanciais. As limpezas pontuais demonstraram impacto imediato, sendo recomendável a adoção de protocolos de manutenção baseados em níveis de MP10 superiores a $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e radiação acumulada acima de $140.000 \text{ KJ}/\text{m}^2$. Para a realização dessa pesquisa foram utilizados de sensores do IBRAM operados pelos Campus para previsão climática incluindo as medições pluviométricas integrando a gestão de limpeza para maximizar a eficiência dos sistemas, reduzindo perdas e otimizando recursos operacionais em cenários urbanos, fatores que claramente surgem como boas práticas a serem replicadas a fim de melhora na eficiência dos processos de geração de energia fotovoltaica.

Tabela 02 - Frequência de limpeza recomendada para os módulos instalados no telhado do Campus.

Período	Frequência recomendada	Justificativa
Período Chuvoso (Primavera-Verão)	3 a 4 meses	As perdas ficaram entre 0% e 5%, controláveis pela ação da chuva.
Período Seco (Outono-Inverno)	A cada 30 dias (mensal)	Dados mostram perdas superiores a 10%, chegando a 27%, tornando necessária uma limpeza mais frequente.
Períodos críticos (PM10 elevado)	Pode ser necessário limpeza a cada 15 a 20 dias, se identificado crescimento acelerado nas perdas ou em inspeção visual.	Especialmente se houver canteiros de obras, reformas ou trânsito intenso nas proximidades.

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

7. CONCLUSÃO

O presente estudo avaliou o impacto do material particulado (MP_{10}), da radiação solar e da sazonalidade climática na eficiência de geração de sistemas fotovoltaicos instalados no Distrito Federal, utilizando como área experimental o sistema do Instituto Federal de Brasília, Campus Samambaia. O monitoramento realizado ao longo de 52 semanas em 2024 demonstrou que a eficiência dos módulos está fortemente condicionada às variações atmosféricas e à frequência das limpezas, evidenciando a importância da manutenção preventiva e do acompanhamento ambiental contínuo.

Os resultados apontaram perdas superiores a 25% na geração de energia durante o período seco (semanas 26 a 36), coincidindo com os picos de concentração de MP_{10} ($35,20 \mu\text{g}/\text{m}^3$) e ausência de chuvas. Por outro lado, durante o período chuvoso, as perdas foram reduzidas a valores médios inferiores a 5%, devido à autolimpeza natural promovida pelas precipitações. Essa diferença confirma que o acúmulo de poeira é o principal fator responsável pela degradação da performance fotovoltaica em ambientes urbanos do Cerrado.

A pesquisa também demonstrou que a sazonalidade climática é determinante no planejamento das ações de manutenção. Recomenda-se, portanto, que as limpezas sejam realizadas a cada 30 dias durante o período seco (maio a setembro) e a cada 3 a 4 meses no período chuvoso, de modo a garantir o equilíbrio entre custo operacional e rendimento energético. Essa periodicidade deve ser ajustada com base em índices de MP_{10} superiores a $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e radiação acumulada acima de $140.000 \text{ kJ}/\text{m}^2$.

Do ponto de vista ambiental e econômico, a correlação direta entre material particulado e perdas de geração reforça a necessidade de políticas públicas integradas de controle da poluição atmosférica urbana e incentivo à manutenção de sistemas solares. A aplicação de protocolos padronizados de limpeza e monitoramento pode reduzir significativamente as perdas energéticas, contribuindo para a ampliação da eficiência e da confiabilidade da matriz elétrica nacional.

Por fim, o estudo evidencia a carência de dados regionais sobre o tema e a necessidade de investigações futuras que incorporem sensores de radiação direta e difusa, medições sub-horárias e índices de nebulosidade, permitindo análises mais detalhadas sobre a interação entre material particulado, difusividade da radiação e

desempenho fotovoltaico. Tais aprimoramentos poderão subsidiar políticas de gestão energética sustentável e fortalecer o papel do Distrito Federal como referência em inovação e eficiência no setor solar brasileiro.

REFERÊNCIAS:

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. *Resolução CONAMA nº 005, de 15 de junho de 1989*. Dispõe sobre o Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar - PRONAR. *Diário Oficial da União: seção 1*, Brasília, DF, ano 127, n. 163, p. 14713-14714, 25 ago. 1989.

DEB, Dipankar; BRAHMBHATT, Nisarg L. Review of yield increase of solar panels through soiling prevention, and a proposed water-free automated cleaning solution. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, v. 82, p. 3306-3313, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117312091>. Acesso em: 5 abr. 2025.

DEBONO, Adèle; FICREE, Noor; JULIEN, Arthur; VOLOVITCH, Polina. Impact of agricultural atmospheric pollutants on the opto-electrical performance of CIGS solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 32, n. 5, p. 1-12, 2024. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/pip.3834>. Acesso em: 5 abr. 2025.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Expansão da geração*. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/areas-de-atuacao/energia-eletrica/expansao-da-geracao>. Acesso em: 5 abr. 2025.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *EPE publica o Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional 2024*. 19 mar. 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/epe-publica-o-relatorio-sintese-do-balanco-energetico-nacional-2024>. Acesso em: 5 abr. 2025.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Matriz energética e elétrica*. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 5 abr. 2025.

HE, Beihua et al. Characteristics and cleaning methods of dust deposition on solar photovoltaic modules - A review. *Energy (Oxford)*, v. 263, 2023. DOI: 10.1016/j.energy.2022.126083.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Área territorial brasileira: 2022*. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/15761-area-dos-municipios.html>. Acesso em: 23 jul. 2025.

IPCC. *Climate change 2022: impacts, adaptation, and vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. PÖRTNER, H.-O. et al. (eds.). Cambridge: Cambridge University Press, 2022. 3056 p. DOI: 10.1017/9781009325844.

JAMIL, Wan Juzaili et al. Performance degradation of photovoltaic power system: review on mitigation methods. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, v. 67, p. 876-891, 2017.

KAZEM, Hussein A. Dust impact on the performance of solar photovoltaic module: a new prospect. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, v. 45, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/15567036.2023.2171924>.

MAGHAMI, Mohammad Reza et al. Power loss due to soiling on solar panel: a review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, v. 59, p. 1307-1316, 2016.

MAGHAMI, Mohammad Reza; HIZAM, Hashim; GOMES, Chandima; RADZI, Mohd Amran; REZADAD, Mohammad Ismael; HAJIGHORBANI, Shahrooz. Power loss due to soiling on solar panel: a review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, v. 59, p. 1307–1316, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116000745>. Acesso em: 6 maio 2025.

MINHA CASA SOLAR. Como é feito um painel solar? *Blog Minha Casa Solar*, [s.l.], 19 maio 2023. Disponível em: <https://blog.minhacasasolar.com.br/como-e-feito-um-painel-solar/>. Acesso em: 23 jul. 2025.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (NREL). *Scientists studying solar try solving a dusty problem*. 2021. Disponível em:

<https://www.nrel.gov/news/features/2021/scientists-studying-solar-try-solving-a-dusty-problem.html>. Acesso em: 5 abr. 2025.

NEHER, Ina et al. Impact of atmospheric aerosols on solar power. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 28, n. 4, p. 333-347, 2019. Disponível em: https://www.schweizerbart.de/papers/metz/detail/28/91765/Impact_of_atmospheric_aerosols_on_solar_power. Acesso em: 5 abr. 2025.

OLORUNFEMI, Benjamin Oluwamuyiwa; OGBOLUMANI, Omolola A.; NWULU, Nnamdi. Solar panels dirt monitoring and cleaning for performance improvement: a systematic review on smart systems. *Sustainability (Basel, Switzerland)*, v. 14, n. 17, p. 10920, 2022.

O GLOBO. Seca deve fazer conta de luz subir a partir de setembro, com bandeira amarela. *O Globo*, 26 ago. 2024. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/economia/noticia/2024/08/26/seca-deve-fazer-conta-de-luz-subir-a-partir-de-setembro-com-bandeira-amarela.ghtml>. Acesso em: 5 abr. 2025.

PEREIRA, E. B. et al. *Atlas brasileiro de energia solar*. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 80 p. Disponível em: <http://doi.org/10.34024/978851700089>. Acesso em: 5 abr. 2025.

REUTERS. Brazil's hydropower faces risk from drying river basins. *Reuters*, 11 set. 2024. Disponível em: <https://www.reuters.com/business/energy/brazils-hydropower-faces-risk-drying-river-basins-2024-09-11>. Acesso em: 5 abr. 2025.

SINGH, Bhuwan Pratap; GOYAL, Sunil Kumar; KUMAR, Prakash. Solar PV cell materials and technologies: analyzing the recent developments. *Materials Today: Proceedings*, v. 43, parte 5, p. 2843-2849, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785321000146>. Acesso em: 5 abr. 2025.

YILBAS, Bekir Sami. Why environmental dust influences solar energy harvesting. *International Journal of Energy Research*, v. 43, n. 1, p. 4-8, 2019.

GABRIEL, Gabriel Ferreira da Silva Brito, Fernando Fabriz Sodré, Fernanda Vasconcelos de Almeida. *O Impacto do Material Particulado na Qualidade do Ar*. **Revista Virtual de Química**, [S.l.], no prelo. Disponível em: <http://static.sites.sbq.org.br/rvq.sbq.org.br/pdf/GabrielNoPrelo.pdf>. Acesso em: 04 ago. 2025.

APÊNDICE A – DADOS SEMANAIS DE EFICIÊNCIA FOTOVOLTAICA

Tabela A.2 – Dados semanais de diferença na geração, radiação solar e concentração de MP10 em 2024.

SEMANA	LIMPEZA	DIFERENÇA	RADIAÇÃO (KJ/m²)	Conc. PM10 (µg/m3)
Semana 01	-	-	101.175,90	Sem dados
Semana 02	X	3,23%	129.415,80	Sem dados
Semana 03	-	9,75%	163.772,20	Sem dados
Semana 04	-	2,09%	118.079,50	2.31
Semana 05	-	3,82%	119.114,70	0.00 (falha no motor)
Semana 06	-	4,05%	96.021,50	0.00 (falha no motor)
Semana 07	-	7,73%	147.876,00	55.95
Semana 08	-	4,62%	127.463,50	2.43
Semana 09	-	7,58%	152.069,70	7.77
Semana 10	-	4,66%	149.831,30	2.32
Semana 11	X	4,66%	123.613,20	4.73 (2ª. 3.60)
Semana 12	-	3,65%	124.816,60	3.72
Semana 13	-	3,07%	107.336,40	5.30
Semana 14	-	4,48%	110.512,00	6.23
Semana 15	-	4,24%	113.447,80	5.90
Semana 16	-	5,11%	137.125,70	4.22
Semana 17	-	5,11%	141.487,80	4.80 (2ª. 5.28)
Semana 18	-	4,56%	146.486,20	5.99
Semana 19	X	8,19%	137.542,90	8.64
Semana 20	-	11,36%	134.026,40	9.28
Semana 21	-	10,96%	124.718,30	10.56
Semana 22	-	10,46%	117.790,00	2.66 (medição incompleta)
Semana 23	-	10,41%	121.615,70	Sem dados
Semana 24	-	10,62%	128.736,60	7.60
Semana 25	-	9,65%	121.957,90	9.74
Semana 26	-	9,30%	123.156,50	16.35
Semana 27	-	9,61%	127.478,00	10.10
Semana 28	-	9,41%	130.089,70	9.96
Semana 29	-	9,60%	135.500,30	6.80 (2ª. 6.17)
Semana 30	X	11,53%	136.017,80	-885.44
Semana 31	-	27,16%	123.758,70	7.22
Semana 32	-	27,44%	139.859,80	16.67

Semana 33	-	26,75%	143.587,20	15.98
Semana 34	-	25,60%	149.923,30	13.12
Semana 35	-	23,78%	151.408,20	35.20 (2ª. 1.52)
Semana 36	-	23,96%	155.745,20	4.35
Semana 37	-	23,97%	163.337,60	-151.45
Semana 38	-	...	156.932,60	3.10
Semana 39	X	...	157.130,30	4.11
Semana 40	-	...	171.696,40	4.42
Semana 41*	-	13,96%	120.081,30	3.70
Semana 42	-	7,91%	94.738,80	3.23
Semana 43	-	6,44%	109.002,20	1.94 (2ª. 1.72)
Semana 44	-	4,44%	100.107,30	2.64
Semana 45	-	4,03%	106.605,50	1.44
Semana 46	-	2,39%	95.351,80	1.04
Semana 47	-	6,66%	140.684,40	0.75
Semana 48	-	7,52%	129.004,30	0.69
Semana 49	-	10,37%	141.940,20	-5198 (2ª 1.19)
Semana 50	-	6,34%	134.858,80	01.01
Semana 51	-	4,93%	125.827,30	Sem dados
Semana 52	-	2,98%	114.154,70	Sem dados

Fonte: Elaborado pelo autor, com base nos dados de monitoramento de campo (2024).