

**IMPACTOS DA SUJIDADE NA EFICIÊNCIA DE
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS: ANÁLISE
QUANTITATIVA APLICADA A UMA USINA DE
ESTRUTURA FIXA NO RIO DE JANEIRO.**

Patrick Anderson de Souza Silva¹
Profª Dra. Cintia Raquel Duarte de Freitas²
Profº Msc. Sebastião Ferreira Baracho Neto³

RESUMO

Nos últimos anos, a geração de energia solar fotovoltaica como alternativa sustentável tem crescido consideravelmente. Essa ampliação reforça a necessidade de manter os sistemas em boas condições de instalação e manutenção. Dentre os desafios que afetam a eficiência dos painéis fotovoltaicos destaca-se a sujeira acumulada, proveniente de poluição, fezes de aves, poeira e outros resíduos. A proposta deste estudo é explorar como a sujeira tem impactado a eficiência das usinas no Brasil, investigando os dados de geração esperada em comparação com a geração real em um projeto localizado no estado do Rio de Janeiro, considerando para isso a disponibilidade dos equipamentos, as variações da irradiação e as práticas de limpeza. A análise será baseada na comparação de parâmetros, como a relação de sujeira (SR) e relação de desempenho (PR). Os resultados obtidos nessa pesquisa têm como objetivo contribuir com o estudo dos efeitos da sujeira nos painéis fotovoltaicos, a interpretação do melhor momento para lavar os painéis e incentivar a adoção de práticas mais eficazes de operação e manutenção.

Palavras-chave: energia solar fotovoltaica, sujeira, eficiência, desempenho, operação e manutenção.

¹ Patrick Anderson de S. Silva - Discente na UFERSA. patrickandersonassu@gmail.com

² Cintia Raquel Duarte de Freitas - Docente na UFERSA. cintia.duarte@ufersa.edu.br

³ Sebastiao Ferreira Baracho Neto - Docente na UFERSA. seseneto15@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

A partir do ano de 2010, observou-se o constante aumento do uso de sistemas fotovoltaicos (FV) para a geração de eletricidade pelo crescente interesse na redução da emissão de dióxido de carbono (CO₂) e a queda dos preços da energia. A energia solar tornou-se o centro da atenção com o advento dos mercados de energias sustentáveis globais em crescimento e, também, pelas políticas de apoio no setor. Segundo a Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA, 2020), houve uma redução significativa no custo da energia solar, tornando-a uma das fontes mais competitivas globalmente.

A utilização de irradiação solar como fonte de geração de energia tem se tornado cada vez mais comum entre os consumidores, motivadas por fatores como a transição energética, a preocupação ambiental, a economia na conta de luz e o apoio regulatório à geração distribuída (GD). No entanto, apesar de ser uma fonte limpa e de baixo custo operacional, os sistemas FV podem ter sua eficiência reduzida pelo acúmulo de sujeira nos módulos, como poeira, poluentes e dejetos.

Segundo Schill et al. (2024), a sujidade representa uma das principais causas de perda de desempenho em sistemas fotovoltaicos, ficando atrás apenas da variação na irradiância. Essa perda de desempenho tem se mostrado um fator relevante no dimensionamento dos sistemas e na escolha das regiões de instalação.

Neste sentido, o presente estudo tem como objetivo analisar e compreender os principais fatores que causam as perdas de geração, o desempenho e a eficiência dos sistemas fotovoltaicos causados pelos impactos da sujidade, promovendo a conscientização, a educação sobre a importância da limpeza e manutenção adequada dos módulos FV. Além disso, contribuir de maneira significativa para o avanço das pesquisas, desenvolvimento de tecnologias e soluções inovadoras para minimizar as perdas de geração acarretadas pela sujidade em módulos fotovoltaicos e auxiliar na tomada de decisão do melhor momento para se lavar os painéis levando em consideração fatores como custo de execução e perdas financeiras.

A presente pesquisa se propõe a analisar os impactos da sujidade em um projeto localizado no estado do Rio de Janeiro, com base na comparação de parâmetros, como a relação de sujidade SR (do inglês, *Soiling Ratio*), e relação de desempenho PR (do inglês, *Performance Ratio*).

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Energia solar fotovoltaica no contexto da transição energética

A utilização das fontes de energias renováveis tem crescido consideravelmente a nível global, principalmente a solar pelo método fotovoltaico, motivado pela redução da emissão de gases de efeito estufa

(CO₂) rumo ao desenvolvimento de práticas mais sustentáveis e o elevado retorno financeiro em curto prazo.

De acordo com o relatório da IRENA (2023), desde 2010, a energia solar tornou-se uma das fontes mais competitivas mundialmente, em função das crescentes quedas nos custos de implantação, ganhos de escala e avanços tecnológicos — como painéis bifaciais e inversores mais eficientes —, tornando o LCOE⁴ de novos projetos solares cerca de 56% inferior ao das fontes fósseis em 2023.

No Brasil, o avanço da geração fotovoltaica, tanto distribuída (GD) quanto centralizada (GC), tem sido impulsionado por políticas públicas, marcos regulatórios — como a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012 e sua atualização pela RN nº 1098/2024, voltadas à GD —, além do crescimento da concorrência no setor, da consolidação de modelos de negócio baseados em arranjos de compensação de energia e do fortalecimento da cadeia produtiva nacional (ABSOLAR, 2023).

2.2. Fundamentos dos sistemas fotovoltaicos

Segundo Fahrenbruch e Bube (1983), o princípio fundamental dos sistemas fotovoltaicos é a conversão direta da radiação solar em energia elétrica por meio de células solares fabricadas com materiais semicondutores, como o silício cristalino ou filmes finos. Usualmente, a obtenção dessa energia é dada pela interligação elétrica (em série, paralelo ou ambos) de vários módulos com capacidade de formar uma unidade geradora preparada para gerar energia elétrica em quantidade suficiente para atender uma carga ou ser conectada à rede elétrica.

A energia transformada da irradiação solar através dos painéis fotovoltaicos é entregue em corrente contínua (DC) e, por isso, se faz necessário o emprego de inversores. De acordo com o Departamento de Energia dos EUA (2024), os inversores são componentes essenciais em sistemas fotovoltaicos pois convertem a energia DC — gerada pelas células solares — em AC, tornando possível a injeção direta dessa energia na rede elétrica das concessionárias.

Além disso, diversas análises técnicas e a verificação de parâmetros são essenciais para garantir que o sistema fotovoltaico opere com desempenho dentro do esperado, como a eficiência — dada pela razão entre a energia gerada e a irradiação incidente —, a curva I–V, e indicadores operacionais a partir dos quais são extraídos o *Performance Ratio* (PR) e o *Soiling Ratio* (SR). Conforme a norma IEC 61724-1 (2021), esses parâmetros são fundamentais para o monitoramento padronizado do desempenho dos sistemas fotovoltaicos, permitindo a identificação de perdas por fatores como temperatura, sombreamento e acúmulo de sujeira nos módulos.

2.3. Fatores que afetam a eficiência dos módulos FV

⁴ O LCOE representa o custo médio de geração de eletricidade ao longo da vida útil de um sistema ou usina de energia, por unidade gerada (geralmente R\$/MWh ou US\$/MWh).

A performance dos sistemas fotovoltaicos é afetada por diversas condições do ambiente e do modo como são operados, como a variação da radiação solar, a temperatura, sombreamento causados por objetos externos, o desgaste natural e, principalmente, o depósito de impurezas nos painéis. Segundo um estudo da IEA-PVPS Task 13 (2023), o depósito de sujeira é o segundo fator que mais prejudica a produção de energia em plantas solares, superado apenas pelas mudanças na quantidade de luz solar.

Nos painéis solares, é comum o acúmulo de uma camada de resíduos, como pó, fezes de pássaros, folhas e restos de processos industriais (OLIVEIRA et al., 2022). A IEA-PVPS (2023) aponta que essa sujeira pode levar a uma diminuição na produção de energia que varia de 3% a 4%, podendo alcançar 5% em certas situações climáticas e conforme o volume de detritos. Tais perdas impactam negativamente a rentabilidade das instalações solares, uma vez que diminuem os ganhos financeiros, com reflexos no retorno do investimento, no orçamento dos projetos e no cronograma das manutenções — preventivas, preditivas e corretivas.

Ademais, o acúmulo de sujeira pode elevar a temperatura das células solares, reduzindo seu tempo de funcionamento e prejudicando ainda mais o desempenho dos painéis (SCHILL et al., 2024). Logo, a higienização regular é indispensável para assegurar uma boa operação e a durabilidade dos sistemas.

2.4. Indicadores de desempenho e métricas de sujeidade

Para garantir que um sistema fotovoltaico seja eficiente é necessário o acompanhamento diário dos indicadores que subsidiam a tomada de decisão das equipes de operação. Quando é falado em sujeidade, o *Soiling Ratio* (SR) — relação entre a geração real do sistema sujo e a geração esperada de um sistema limpo —, serve como métrica para estimar perdas por sujeira (COSTA et al., 2020). Já o *Performance Ratio* (PR) avalia a eficiência global do sistema considerando diversas perdas, incluindo as causadas por sujeidade (MYERS, 2003). A combinação desses parâmetros de análises quantitativas permite monitorar o impacto da sujeira e orientar a programação das limpezas para otimização da geração.

2.5. Estratégias de limpeza e manutenção

A limpeza dos módulos fotovoltaicos pode ser realizada de forma manual, mecanizada ou utilizando tecnologias anti-sujeidade. A definição do método depende da disponibilidade e logística de água, impacto ambiental, frequência necessária — determinada através dos indicadores de performance —, sobretudo, os custos envolvidos na operação. Estudos da EPJ PHOTOVOLTAICS (2022) indicam que limpezas regulares, em intervalos que considerem o acúmulo médio de sujeidade e períodos sem chuva, são eficazes para manter a geração e reduzir custos operacionais. A viabilidade econômica da limpeza deve levar em conta o balanço entre o custo da manutenção da sujeira dos painéis e o aumento da receita por maior eficiência do sistema.

3. METODOLOGIA

3.1. Tipo de pesquisa

Este estudo caracteriza-se como uma pesquisa aplicada e quantitativa, de natureza descritiva e analítica, com o objetivo de avaliar o impacto da sujidade sobre a eficiência e geração dos sistemas fotovoltaicos. A abordagem quantitativa possibilita mensurar as perdas de energia causadas pela sujeira nos módulos, assim como comparar dados reais e esperados de geração em diferentes condições climáticas. De acordo com Gil (2008), a pesquisa aplicada busca soluções práticas para problemas concretos, enquanto a abordagem quantitativa utiliza métodos estatísticos e matemáticos para interpretar os dados de forma objetiva e mensurável.

3.2. Coleta de dados

A pesquisa foi desenvolvida a partir da análise dos dados operacionais referente a 180 dias de geração de uma usina fotovoltaica localizadas no Rio de Janeiro, onde foi extraído informações relativo a energia gerada real, registrada em quilowatt-hora (kWh) pelos sistemas de monitoramento da planta em tempo real, a irradiação real, registrada em quilowatt-hora por metro quadrado (kWh/m²) no local de instalação do projeto através de satélite pela plataforma SolCast⁵ e o registro das limpezas realizadas no mesmo período.

3.3. Análise dos dados

A análise consiste na comparação entre a geração real e a esperada, através da *Performance Ratio* e o *Soling Ratio* (SR), no período avaliado, visando identificar perdas atribuídas à sujidade dos módulos. A metodologia emprega:

- Cálculo do *Performance Ratio* (PR) para verificar a eficiência global do sistema, obtido através da comparação da produção real da planta FV em relação à eletricidade que a planta poderia ter gerado se não houvessem perdas, dado pela Equação 1.

$$PR = \left(\frac{YIELD}{\frac{Irradiação}{Irradiação Referência}} \right) \quad (\text{Equação 1})$$

YIELD = relação entre a energia elétrica (kWh) entregue e a potência instalada (kWp) da planta FV;

Irradiação = irradiação real aferida no plano em campo; e

Irradiação de referência = 1000 W/m².

⁵ Solcast é uma plataforma que fornece dados e previsões de irradiação solar e geração fotovoltaica com alta precisão, utilizando imagens de satélite e modelos avançados. É amplamente usada para monitoramento e planejamento de sistemas solares.

- Cálculo do *Soiling Ratio* (SR) ao longo dos períodos estudados para quantificar as perdas causadas pela sujidade, obtido através da relação entre a potência máxima diária do módulo sujo e a potência máxima diária do módulo limpo, dado pela Equação 2.

$$SR = \left(\frac{P_{\text{máx sujo}}}{P_{\text{máx limpo}}} \right) \quad (\text{Equação 2})$$

$P_{\text{máx sujo}}$ = potência máxima diária do módulo sujo; e
 $P_{\text{máx limpo}}$ = potência máxima diária do módulo limpo.

- Cálculo do GAP que permite analisar as perdas não quantificadas diretamente pela irradiância ou outros parâmetros já modelados, dado pela Equação 3. Quando o GAP é negativo, indica que o sistema está gerando menos do que o esperado.

$$GAP = (PRr - PRe) \quad (\text{Equação 3})$$

PRr = PR realizado; e
 PRE = PR esperado.

- Correlação dos indicadores SR e PR com as variáveis climáticas e registros de limpeza para identificar padrões e efeitos da sujidade.
- Aplicação de análises estatísticas descritivas e testes de correlação, como o coeficiente de Pearson⁶, para validar as relações entre as variáveis.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise do sistema FV foi realizada no período de janeiro a junho de 2025, onde foram avaliados dados de geração relativos a 180 dias de operação do projeto, que revelou variações relevantes nos indicadores operacionais, especialmente o *Performance Ratio* (PR) e o *Soiling Ratio* (SR). Os dados demonstram a influência direta da sujidade acumulada ao longo do tempo e sua correlação com as condições climáticas e as intervenções de limpeza. Nesse contexto, destaca-se que foram realizadas lavagens nos módulos FV nas semanas 11 e 24, o que possibilitou observar os efeitos diretos dessas intervenções sobre o desempenho do sistema.

⁶ A correlação de Pearson (ou coeficiente de correlação de Pearson) é uma medida estatística que indica a força e a direção da relação linear entre duas variáveis quantitativas.

Tabela 1 – Dados e indicadores de desempenho (PR, SR e GAP)

Semana	Irradiação Medida (kWh/m²)	Energia Gerada (kWh)	PR Realizado (%)	PR Esperado (%)	SR (%)	GAP (%)
Sem 01	4,90	2311,17	73,08	73,07	99,46	0,01
Sem 02	2,81	1388,84	76,49	73,07	104,12	3,43
Sem 03	4,86	2251,37	71,75	73,07	97,66	-1,31
Sem 04	4,37	2005,73	71,18	73,07	96,88	-1,88
Sem 05	3,99	1849,40	71,92	73,07	97,89	-1,14
Sem 06	5,19	2385,87	71,28	73,07	97,02	-1,78
Sem 07	5,35	2410,39	69,90	73,07	95,14	-3,17
Sem 08	5,23	2348,38	69,63	73,07	94,77	-3,43
Sem 09	5,15	2257,24	67,96	71,99	92,50	-4,03
Sem 10	4,68	2061,27	68,27	71,18	92,93	-2,90
Sem 11	3,77	1787,37	73,47	71,18	100,00	2,30
Sem 12	3,38	1633,95	74,84	71,18	101,87	3,67
Sem 13	4,14	1979,27	74,14	71,60	100,91	2,54
Sem 14	3,01	1455,85	74,88	74,10	101,91	0,77
Sem 15	3,18	1554,94	75,90	74,10	103,31	1,80
Sem 16	2,45	1212,03	76,74	74,10	104,45	2,64
Sem 17	2,58	1270,52	76,28	74,10	103,83	2,18
Sem 18	3,35	1611,62	74,50	75,24	101,41	-0,73
Sem 19	2,70	1225,86	70,37	75,43	95,79	-5,05
Sem 20	3,32	1349,06	62,94	75,43	85,66	-12,49
Sem 21	2,64	1055,03	61,92	75,43	84,28	-13,51
Sem 22	8,62	3148,89	56,61	75,10	77,05	-18,48
Sem 23	1,86	777,03	64,77	74,76	88,16	-9,99
Sem 24	2,59	1227,79	73,59	74,76	100,17	-1,17
Sem 25	2,45	1181,30	74,86	74,76	101,89	0,10
Sem 26	2,69	1256,13	72,53	74,76	98,72	-2,24

Fonte: Autoria própria (2025)

No decorrer das semanas 1 a 26, o PR Realizado variou entre 56,61% e 76,74%, com média de 71,15%, demonstrando oscilações significativas na performance da planta. No 1º trimestre, compreendido entre as semanas 1 a 13, o PR Realizado oscilou entre 67,96% e 76,49%, com média de aproximadamente 71,84%, enquanto que o PR Esperado manteve-se relativamente estável, em torno de 72,43%.

Durante o 2º trimestre (semanas 14 a 26), o PR Realizado apresentou maior variação, com valores mais baixos atingindo 56,61% na semana 22 e uma tendência de queda geral, especialmente entre as semanas 20 e 23. Nessa fase, o PR Esperado também variou mais, atingindo valores de até 75,43%, o que contribuiu para a ampliação dos valores negativos de GAP.

A Tabela 2 apresenta os indicadores estatísticos descritivos dos valores de PR Realizado, PR Esperado, SR e GAP para todo o período monitorado.

Essa análise permite identificar momentos críticos de perda de desempenho, que podem estar associados a fatores como sujidade, falhas técnicas ou variações climáticas.

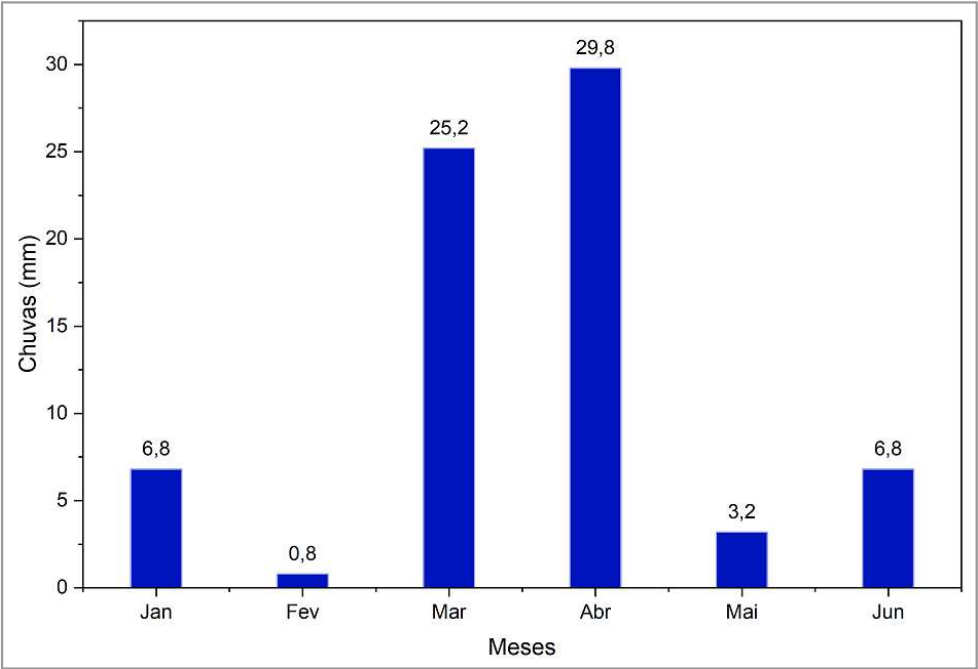
Tabela 2 – Estatísticas do PR Realizado, Previsto e GAP (Semanas 1-26)

Indicadores	PR Realizado (%)	PR Esperado (%)	SR (%)	GAP (%)
Média	71,15	73,60	96,84	-2,46
Mediana	72,22	73,58	97,89	-1,24
Desvio padrão	4,96	1,38	6,84	5,53
Mínimo	56,61	71,18	77,05	-18,48
Máximo	76,74	75,43	104,45	3,67
Amplitude	20,13	4,25	27,40	22,15
Coefficiente de variação	0,07	0,02	0,07	-

Fonte: Autoria própria (2025)

A diferença entre os valores realizados e esperados variou significativamente, com resultados extremos de até -18,48% na semana 22. Observou-se aumento gradual do GAP durante semanas com baixos volumes de precipitação, sobretudo em fevereiro e maio, conforme mostra o gráfico de precipitação mensal.

Gráfico 1 – Precipitação mensal – INMET: Estação [D5042] Saúde/RJ



Fonte: Autoria própria (2025)

A análise da correlação de Pearson entre os principais indicadores demonstra que o PR Realizado e o GAP apresentam uma forte correlação positiva ($r = 0,97$), o que reforça que as variações no desempenho estão diretamente relacionadas às perdas acumuladas. Do mesmo modo, verificou-se uma forte correlação positiva entre o *Soiling Ratio* (SR) e o GAP ($r = 0,97$), sugerindo que a redução no desempenho também pode ser

explicada pela intensidade da sujeira, refletida nos valores de SR abaixo de 100%.

Além disso, existe uma correlação moderada a forte entre o PR Realizado e a precipitação ($r = 0,67$), sugerindo que o aumento das chuvas pode favorecer o desempenho do sistema ao contribuir para a limpeza natural das superfícies dos módulos. Por outro lado, a correlação entre o PR Realizado e o PR Previsto é fraca e negativa ($r = -0,29$), sugerindo que o modelo de previsão utilizado (via PVSyst⁷), não captura adequadamente as variações reais de desempenho, possivelmente por não considerar variáveis operacionais ou ambientais específicas do período estudado.

Tabela 3 – Correlação de Pearson entre variáveis

Correlação	R
PR Realizado vs. PR Previsto	-0,29
PR Realizado vs. GAP	0,97
PR Realizado vs. Precipitação	0,67
SR vs. GAP	0,97

Fonte: Autoria própria (2025)

A execução das lavagens manuais no sistema, registradas na Tabela 4, evidenciou ganhos percentuais significativos nos períodos avaliados, com um aumento de 5,20% na semana 11 e de 8,82% na semana 24. Esses resultados estão diretamente associados à melhoria do desempenho do sistema.. Observa-se ainda que, nas proximidades da semana 11, o GAP que vinha apresentando valores negativos, chegou a registrar +2,30% na semana 11 e +3,67% na semana 12, indicando uma recuperação da performance.

Da mesma forma, após o segundo procedimento de lavagem na semana 24, nota-se uma reversão entre o GAP registrado nas semanas 20 e 22 que atingiu -18,48%, com o GAP apontado nas semanas 24 e 25 com indicador voltando para valores próximos de zero, como +0,10% na semana 25. Esses dados reforçam a efetividade das lavagens manuais na mitigação das perdas de geração do sistema ao longo do tempo.

Tabela 4 – Execução de lavagem manual no sistema

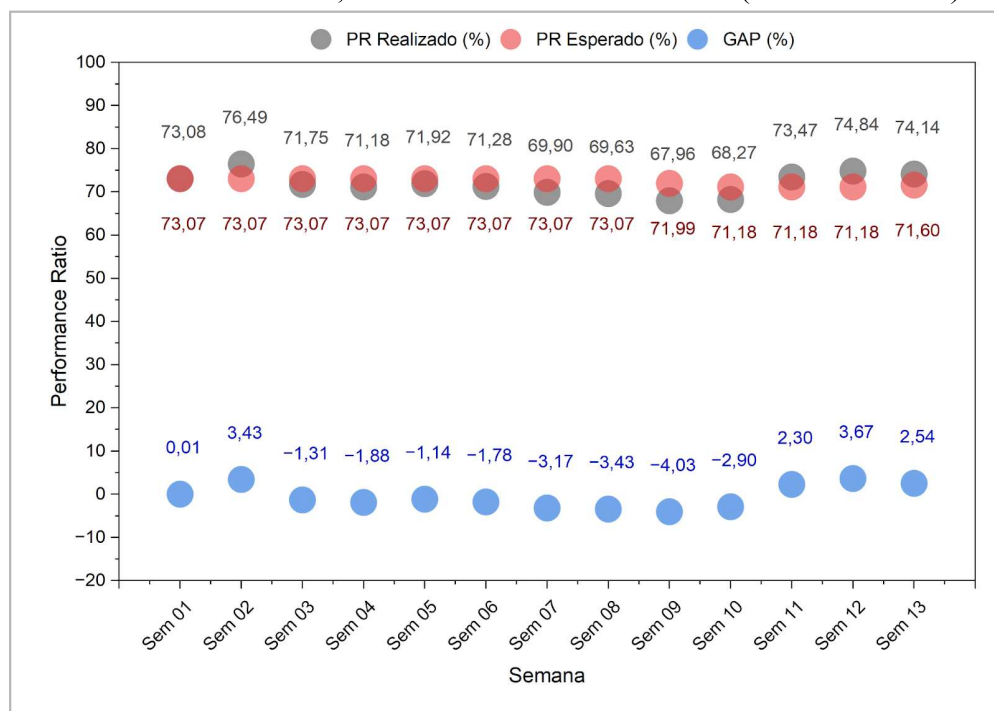
Período	Ganhos [%]
Semana 11	5,20%
Semana 24	8,82%

Fonte: Autoria própria (2025)

O Gráfico 2 detalha o PR Realizado em comparação com o PR Esperado e o seu respectivo GAP ao longo do 1º trimestre, destacando certa estabilidade até a semana 10 com GAP médio de -1,62%, seguida de aumento no GAP e leve recuperação após a limpeza realizada na semana 11.

⁷ PVSyst: software de simulação amplamente utilizado para modelagem e previsão do desempenho de sistemas fotovoltaicos, permitindo estimativas de geração com base em dados climáticos, especificações técnicas e condições de projeto.

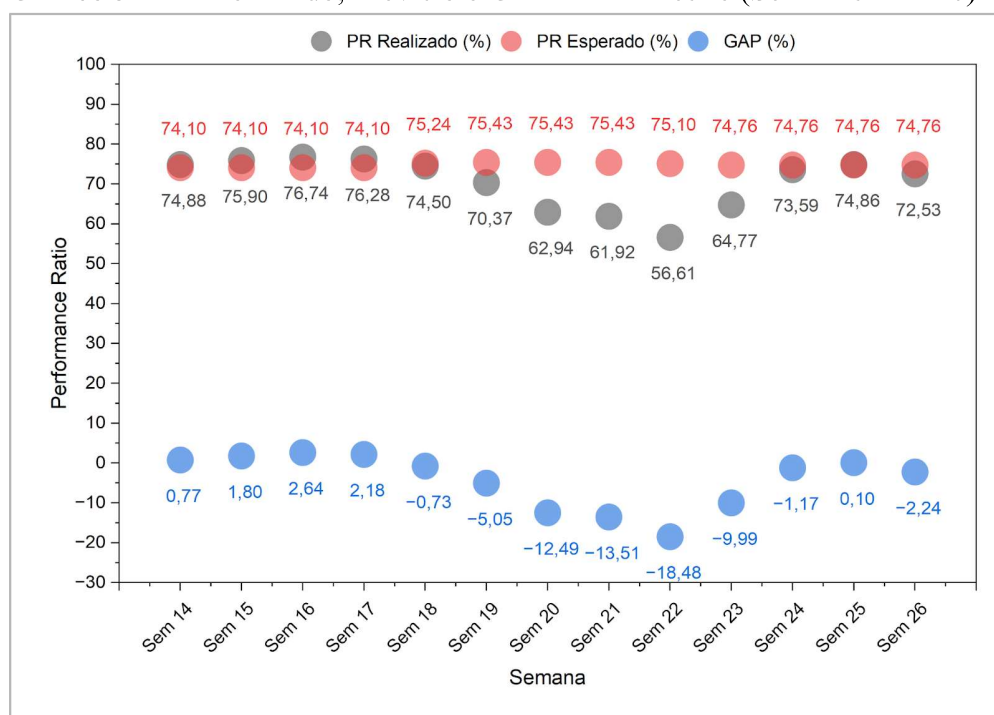
Gráfico 2 – PR Realizado, Previsto e GAP – 1º trimestre (Semanas 1 a 13)



Fonte: Autoria própria (2025)

No 2º trimestre, houve tendência de queda acentuada do PR Realizado nas semanas 19 a 23, coincidente com baixos índices pluviométricos e ausência de limpeza dos módulos. A limpeza realizada na semana 24 promoveu imediata recuperação do PR e redução do GAP.

Gráfico 3 – PR Realizado, Previsto e GAP – 2º trimestre (Semanas 14 a 26)

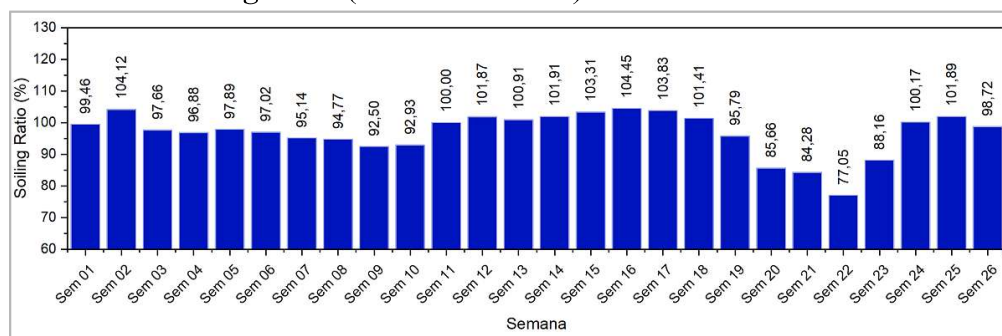


Fonte: Autoria própria (2025)

Apesar da intervenção realizada na semana 24, observa-se que o GAP permaneceu negativo nas semanas seguintes — exceto na semana 25, que atingiu +0,10% —, embora com uma redução significativa em comparação com as semanas 22 e 23. Este comportamento pode estar associado a diversos fatores, como o acúmulo prolongado de sujeira antes da lavagem ou ainda, ao tipo de partícula, considerando que o sistema está instalado próximo de rodovias de alta densidade automotiva e isso, pode ter colaborado com a degradação temporária da performance. Além disso, condições climáticas adversas, eventuais sombreamentos sazonais e realização de lavagens inadequadas também estão diretamente associadas a esse fator de recuperação do sistema.

O Gráfico 4 demonstra a análise do *Soiling Ratio* (SR) ao longo das semanas, que evidencia o impacto direto da sujeira na eficiência dos módulos. Após as limpezas manuais nas semanas 11 e 24, obteve-se um SR superior a 100%, comprovando a eficácia imediata dessas intervenções. Entre as semanas 19 e 22, o SR caiu para até 79%, indicando acúmulo crítico de sujeira que coincidiu com a maior redução do PR e aumento do GAP negativo. Esses resultados reforçam o SR como indicador essencial para orientar a frequência das limpezas e garantir a performance e a rentabilidade dos sistemas fotovoltaicos.

Gráfico 4 – *Soiling Ratio* (Semanas 01 a 26)



Fonte: Autoria própria (2025)

Os resultados deste estudo evidenciaram a forte influência da sujeira sobre o desempenho de sistemas FV, indo de encontro ao que foi destacado no referencial teórico e estudos prévios que apontam o depósito de sujeira como o segundo fator que mais prejudica a geração de energia solar, superado apenas pelas variações na irradiância (IEA-PVPS, 2023). Constatou-se que o PR Realizado variou consideravelmente no período analisado, atingindo valores tão baixos quanto 56,61% na semana 22, momento em que o SR também registrou seu menor índice (78,56%), revelando um acúmulo crítico de sujeira.

A forte correlação positiva entre o GAP e o PR Realizado ($r = 0,97$), bem como entre o SR e o GAP ($r = 0,97$), reforça que a redução na eficiência está diretamente ligada ao acúmulo de impurezas nos módulos. Além disso, o efeito moderadamente forte da precipitação na performance ($r = 0,67$) destaca o papel da chuva na mitigação das perdas por sujeira, ainda que insuficiente para restabelecer completamente o desempenho, sobretudo em locais sujeitos a depósitos persistentes de material particulado, como próximo a rodovias de alto fluxo de veículos automotores. Isso confirma

apontamentos de Schill et al. (2024), que indicam que mesmo com chuvas frequentes, certos tipos de resíduos permanecem aderidos à superfície dos módulos.

A fraca correlação negativa entre o PR Realizado e o PR Previsto ($r = -0,29$) sugere limitações do modelo utilizado (PVSyst) em captar variáveis operacionais e ambientais locais, como a intensidade da poluição por tráfego e fatores microclimáticos não incorporados nos dados de entrada. Este achado está alinhado com as observações de Myers (2005) sobre a importância de calibrar os modelos preditivos da realidade operacional específica de cada planta.

4.1. Recomendações práticas

Com base nos achados deste trabalho e no arcabouço teórico, destacam-se as seguintes recomendações para a gestão e operação eficiente de sistemas FV:

- Implementação de rotinas sistemáticas de limpeza: A programação de limpezas manuais ou mecanizadas deve considerar o histórico do SR e do GAP, além de dados pluviométricos locais, para otimizar custos e evitar perdas prolongadas de performance.
- Monitoramento contínuo de indicadores operacionais: Acompanhar diariamente o PR, SR e GAP permite identificar tendências de degradação, antecipar ações corretivas e justificar intervenções junto aos stakeholders⁸.
- Adoção de sensores ambientais adicionais: Como sensores de poeira em tempo real ou câmeras que detectem sujeira nos módulos, para refinar o diagnóstico do impacto de partículas e auxiliar na tomada de decisão.
- Calibração dos modelos preditivos: Ajustar periodicamente as simulações (por exemplo, no PVSyst) com dados reais do histórico operacional da planta, reduzindo discrepâncias entre o PR previsto e o realizado.
- Priorização de contratos de O&M que incluam cláusulas específicas para sujeira: Estabelecendo SLAs (Service Level Agreements) claros sobre frequência e qualidade das limpezas.

4.2. Futuras linhas de pesquisa

Este estudo também abre espaço para investigações futuras, tais como:

⁸ Stakeholders são todas as partes interessadas que, de alguma forma, influenciam ou são influenciadas pelas atividades, decisões e resultados de um projeto, empresa ou organização.

- Análise do impacto de diferentes tipologias de partículas (orgânicas, minerais, industriais) sobre a absorção e a temperatura dos módulos, quantificando a degradação específica por tipo de poluente.
- Desenvolvimento de algoritmos de machine learning⁹ para previsão do GAP com base em dados climáticos, operacionais e histórico de limpeza, permitindo decisões preditivas mais precisas.
- Estudos comparativos entre métodos de limpeza manual, mecanizado e tecnologias anti-sujidade, avaliando custo-benefício em diferentes regimes pluviométricos e ambientes urbanos vs. rurais.
- Avaliação do efeito de rodovias e corredores de tráfego intenso na taxa de deposição de partículas, para subsidiar políticas de instalação e compensações ambientais em projetos próximos a essas fontes.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise apresentada neste trabalho demonstrou de forma objetiva a importância do monitoramento contínuo e da manutenção adequada para mitigar as perdas por sujeira em sistemas FV. O estudo evidenciou que o acúmulo de sujeira foi responsável por quedas significativas no desempenho do sistema, com GAPs chegando a -18,48%, impactando diretamente a eficiência do projeto. Intervenções pontuais de limpeza manual mostraram-se eficazes para recuperar o desempenho, mas não eliminaram completamente as perdas, especialmente em ambientes expostos a fontes constantes de poluentes, como rodovias de alto fluxo de veículos.

Esses resultados enrijecem a relevância do desenvolvimento e aplicação de políticas de operação e manutenção bem estruturadas, que considerem características ambientais locais e implementação dos indicadores PR, SR e GAP como ferramentas gerenciais. Assim, assegura-se não apenas a sustentabilidade técnica e econômica dos projetos solares, mas também se contribui para o avanço das metas globais de transição energética, alinhadas com o compromisso de redução das emissões de gases de efeito estufa.

⁹ O desenvolvimento de algoritmos de machine learning (aprendizado de máquina) refere-se ao processo de criar, treinar e ajustar modelos matemáticos e computacionais que aprendem padrões a partir de dados históricos, para então fazer previsões ou classificações automáticas.

6. REFERÊNCIAS

ABSOLAR. Panorama da geração distribuída no Brasil. São Paulo: Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica, 2023. Disponível em: <https://absolar.org.br/noticia/absolar-publica-panorama-da-geracao-distribuida-no-brasil-2023/>. Acesso em: 23 jun. 2025.

COSTA, M. et al. Impact of soiling on photovoltaic systems: an experimental study in Brazil. *Renewable Energy*, v. 150, p. 1173–1181, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.025>.

DE SOUZA, F. et al. Dirt on photovoltaic modules and efficient energy generation in the Brazilian semiarid. *Revista Brasileira de Energia e Ambiente*, v. 12, n. 3, p. 45–57, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/2175-623698009>.

A framework of optimum cleaning schedule and its financial impact in a large-scale PV solar plant: a case study in Senegal. *EPJ Photovoltaics*, v. 13, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1051/epjpv/2022035>.

IEA-PVPS. Task 12 – Performance and Reliability of Photovoltaic Systems: Annual Report 2023. Paris: International Energy Agency – Photovoltaic Power Systems Programme, 2023. Disponível em: <https://iea-pvps.org/key-topics/performance-and-reliability-of-pv-systems-task-12/>. Acesso em: 23 jun. 2025.

IRENA – International Renewable Energy Agency. Renewable Power Generation Costs in 2020. Abu Dhabi: IRENA, 2021. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2021/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2020>. Acesso em: 23 jun. 2025.

OLIVEIRA, J. P. et al. Effect of surface contaminants on photovoltaic panel performance. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 235, p. 111428, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.111428>.

SCHILL, J. et al. Soiling effects on photovoltaic systems: impacts and mitigation strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 172, p. 112928, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.112928>.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. Solar Integration: Inverters and Grid Services Basics. 2024. Disponível em: <https://www.energy.gov/eere/solar/solar-integration-inverters-and-grid-services-basics>. Acesso em: 24 jun. 2025.

IEA – International Energy Agency. Soiling of Photovoltaic Panels: Assessment, Mitigation Methods and Impact on Performance. IEA PVPS Task 13, Report T13-18:2023. Paris: IEA, 2023. Disponível em: <https://iea-pvps.org/research-tasks/soiling-of-photovoltaic-panels-assessment-mitigation-methods-and-impact-on-performance/>. Acesso em: 24 jun. 2025.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC

61724-1:2021 – Photovoltaic system performance – Part 1: Monitoring. Genebra: IEC, 2021. Disponível em: <https://www.iec.ch/standard/61584>. Acesso em: 24 jun. 2025.

GIL, Antonio Carlos. Métodos e técnicas de pesquisa social. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

MYERS, D. R. Solar radiation modeling and measurements for renewable energy applications: data and model quality. *Energy*, v. 30, n. 9, p. 1517–1531, jul. 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2004.04.034>. Acesso em: 30 jun. 2025.