

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS
ESCOLA POLITÉCNICA E DE ARTES /
ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO
Projeto Final de Curso

Vinícius Faria do Amaral
Pedro Henrique da Silva Carvalho

ESTUDO DE CASO DO IMPACTO DA SUJIDADE NA EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA
DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE

Trabalho Final de Curso como parte dos requisitos para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Controle e Automação, apresentado à Pontifícia Universidade Católica de Goiás.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Marcos Antônio de Sousa – Orientador. POLI-PUC Goiás.
Prof. Dr. Cássio Hideki Fujisawa – Examinador. POLI-PUC Goiás.
Prof. Msc. Luís Fernando Pagotti – Examinador. POLI-PUC Goiás.

Goiânia, 12 de junho de 2026.

Estudo de Caso do Impacto da Sujidade na Eficiência Energética de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede

Vinícius Faria do Amaral, Pedro Henrique da Silva Carvalho, Marcos A. Sousa

Abstract—This paper presents a study and operational analysis of soiling effects on the energy efficiency of grid-connected distributed photovoltaic generation systems. The study is based on historical generation data obtained from solar companies in the state of Pará, Brazil, aiming to identify operational patterns associated with performance losses caused by dirt accumulation on photovoltaic modules. The proposed methodology applies generation normalization by peak sun hours, moving average filtering, and soiling ratio analysis, implemented in an interface developed with Python, Flask, and React, in which the user uploads the installation generation data to obtain the diagnosis and classification of soiling-related losses. A real validation case is presented using the L A Amaral installation, for which daily generation data and photographs of the modules before and after the cleaning procedure were collected. The results confirm the effectiveness of the approach: a severe deviation of -12,3% was identified in April 2025, and post-cleaning analysis revealed an 15,89% recovery in daily generation, rising from an average of 171,4 kWh to 185,7 kWh, with a calculated baseline of 45,32 kWh/HSP. The findings indicate that continuous operational monitoring can support preventive maintenance planning, reducing energy losses and financial impacts in distributed photovoltaic systems.

Keywords—Soiling; distributed generation; photovoltaic systems; preventive maintenance; energy efficiency; React interface.

Resumo—Este trabalho apresenta um estudo e análise operacional dos efeitos da sujidade na eficiência energética de sistemas fotovoltaicos de geração distribuída conectados à rede. O estudo baseia-se em dados históricos de geração obtidos junto a empresas do setor solar no estado do Pará, buscando identificar padrões operacionais associados às perdas de desempenho causadas pelo acúmulo de sujeira sobre os módulos fotovoltaicos. A metodologia proposta aplica normalização da geração por hora de sol pleno (HSP), filtragem por média móvel e análise da razão de sujidade, implementadas em uma interface desenvolvida com *Python*, *Flask* e *React*, na qual o usuário insere os dados de geração da usina para obter o diagnóstico e a classificação das perdas associadas à sujidade dos módulos. Um caso de validação real é apresentado com a instalação L. A. Amaral, para a qual foram coletados dados diários de geração e registros fotográficos antes e depois do procedimento de limpeza. Os resultados confirmam a eficácia da abordagem: foi identificado desvio severo de -12,3% em abril de 2025, e a análise pós-limpeza evidenciou recuperação de 15,89% na geração diária média, que passou de 171,4 kWh para 185,7 kWh, com linha de base calculada de 45,32 kWh/HSP. Os resultados indicam que o acompanhamento contínuo dos dados operacionais pode auxiliar no planejamento de manutenções preventivas, reduzindo perdas energéticas e impactos financeiros em sistemas fotovoltaicos de geração distribuída.

Palavras-chave—Sujidade; geração distribuída; sistemas fotovoltaicos; manutenção preventiva; eficiência energética; interface *React*.

I. INTRODUÇÃO

A busca por fontes de energia limpa e renovável tem se intensificado nas últimas décadas, impulsionada pelas mudanças climáticas, pelo crescimento da demanda energética e pela necessidade de diversificação da matriz energética mundial. Nesse contexto, a energia solar fotovoltaica destaca-se como uma das alternativas mais promissoras, especialmente em países com elevada incidência solar como o Brasil [1]. A região Norte do país, em particular o estado do Pará, apresenta índices de irradiação solar entre os mais expressivos do território nacional, tornando-a propícia para a expansão da geração distribuída (GD) por meio de sistemas fotovoltaicos.

A simples instalação de painéis solares, contudo, não garante por si só a máxima eficiência energética ou a longevidade dos equipamentos. Fatores ambientais como o acúmulo de poeira, partículas orgânicas, fuligem e outros resíduos sobre a superfície dos módulos fotovoltaicos, fenômeno denominado sujidade, comprometem diretamente a incidência da radiação solar sobre as células semicondutoras, reduzindo a geração de energia de forma progressiva e muitas vezes imperceptível a olho nu [3]. Em regiões tropicais como o estado do Pará, onde a combinação de chuvas intensas, ventos carregando partículas e alta umidade criam condições específicas de deposição de resíduos, esse problema adquire relevância ainda maior para a operação eficiente dos sistemas de GD.

Estudos demonstram que a perda acumulada de geração pode chegar a 7,56% ao longo de cinco meses sem limpeza [7]. Além disso, um estudo de caso realizado em região desértica relatou que a implementação de um sistema de monitoramento inteligente resultou em economia anual de 20% nos custos operacionais e aumento de 12% na produção de energia [9].

O monitoramento contínuo de sistemas fotovoltaicos tem se tornado cada vez mais importante para garantir maior eficiência operacional e reduzir perdas de geração. A análise de dados históricos permite identificar variações anormais no desempenho dos sistemas, auxiliando na detecção de possíveis problemas relacionados à sujidade dos módulos [4].

Apesar dos avanços nas ferramentas de monitoramento fotovoltaico, muitos sistemas ainda dependem de inspeções visuais ou análises manuais para identificar perdas associadas ao acúmulo de sujeira nos painéis. Esse processo pode aumentar os custos de operação e dificultar a identificação precoce de quedas de desempenho, principalmente em instalações de GD.

Dessa forma, este trabalho propõe um estudo e análise operacional do impacto da sujidade em sistemas fotovoltaicos

de geração distribuída conectados à rede, utilizando dados históricos de geração de instalações localizadas no estado do Pará, implementado em uma interface desenvolvida com *Python*, *Flask* e *React* [10],[13]-[14].

Como validação da metodologia proposta, foi utilizada a instalação L. A. Amaral, na qual foram coletados dados reais de geração e fotografias dos módulos antes e depois de realizar a limpeza dos painéis fotovoltaicos.

O restante do artigo está organizado da seguinte forma: a Seção II apresenta a fundamentação teórica referente à sistemas fotovoltaicos e estudos que avaliam o desempenho do sistema com a presença de sujeidade; a Seção III descreve a abordagem metodológica proposta nesse trabalho para avaliar o impacto da sujeidade no sistema fotovoltaico; a Seção IV detalha a avaliação de desempenho conduzida e discute os resultados obtidos; por fim, são apresentadas as conclusões e possíveis direções para trabalhos futuros (Seção V).

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os sistemas fotovoltaicos de geração distribuída vêm apresentando crescimento significativo nos últimos anos, impulsionados pela expansão das fontes renováveis e pela busca por maior eficiência energética. Nesse contexto, fatores relacionados ao desempenho operacional, monitoramento contínuo e perdas associadas à sujeidade dos módulos têm se tornado temas relevantes em estudos voltados à otimização da geração de energia e à manutenção de sistemas fotovoltaicos.

A. Energia Solar Fotovoltaica e Geração Distribuída

A captação de energia solar por módulos fotovoltaicos ocorre quando a radiação solar incide sobre células semicondutoras, geralmente constituídas de silício dopado para formação de uma junção p-n (positivo - negativo), promovendo a liberação de elétrons e com isso a geração de corrente contínua (CC). Posteriormente, essa energia é convertida em corrente alternada (CA) por meio de inversores, possibilitando sua utilização em sistemas conectados à rede elétrica ou em aplicações de consumo local [17].

A geração distribuída consiste na produção de energia elétrica próxima ou no próprio local de consumo, em contraposição ao modelo centralizado de grandes usinas geradoras [5]. A popularização dos painéis solares e a progressiva redução dos custos de instalação transformaram consumidores residenciais, comerciais e industriais também em produtores de energia, contribuindo para a redução das perdas de transmissão e o fortalecimento da resiliência do sistema elétrico [7]. Estudos destacam que o monitoramento e a análise de desempenho das usinas fotovoltaicas são de fundamental importância para garantir a eficiência operacional e evitar o prolongamento do *payback* estimado em projeto [9].

B. Sujidade em Módulos Fotovoltaicos

A sujeidade em sistemas fotovoltaicos está associada ao acúmulo de partículas sólidas ou líquidas sobre a superfície dos módulos, reduzindo a transmitância do vidro frontal e limitando a incidência de irradiação solar nas células fotovoltaicas. Entre os principais agentes causadores de resíduos estão

poeira, areia, fuligem, pólen, excrementos de aves e detritos provenientes da atividade urbana e industrial [3]. Esse acúmulo pode provocar reduções significativas no desempenho energético dos sistemas, especialmente em regiões com elevada concentração de poluentes atmosféricos ou baixa ocorrência de chuvas [7].

Do ponto de vista econômico, é demonstrado que um decaimento adicional de apenas 1% para 5% ao ano na geração, diretamente associado ao acúmulo de sujeidade, já é suficiente para aumentar o *payback* da instalação em cerca de um ano, enquanto decaimentos de 10% a 15% podem prolongar esse período em 37% a 105%, respectivamente [8]. Alguns estudos apontam que, em ambientes com alta concentração de partículas, a sujeidade pode se acumular a taxas de até 7,67 g/m²/dia, e nesse caso, apenas três dias de acúmulo podem reduzir a eficiência em até 25% [9].

C. Acompanhamento do Sistema Fotovoltaico

O monitoramento contínuo de sistemas fotovoltaicos é fundamental para garantir sua operação eficiente e identificar precocemente desvios de desempenho. Parâmetros como corrente elétrica, tensão, potência ativa e energia gerada são acompanhados por meio de plataformas supervisórias, possibilitando a análise do comportamento do sistema ao longo do tempo [5]. Relatórios periódicos de geração, como os demonstrativos mensais e diários utilizados neste trabalho, constituem uma fonte valiosa de dados históricos para análise e diagnóstico automatizado.

O monitoramento baseado em dados pode melhorar a eficiência de usinas solares em até 15% em regiões propensas à sujeidade, conforme resultados apresentados pelo Laboratório Nacional de Energia Renovável (NREL) [9]. A análise preditiva com dados históricos permite prever quando os módulos precisam ser limpos, evitando tanto o desperdício de recursos com limpezas desnecessárias quanto as perdas de geração decorrentes de manutenção tardia. Considerando que o estado do Pará possui uma das tarifas energéticas mais elevadas do Brasil [11]-[12], perdas de desempenho em sistemas fotovoltaicos podem representar impactos financeiros significativos ao longo do tempo, reforçando a importância de estratégias de acompanhamento e manutenção preditiva.

D. Tecnologias Computacionais Aplicadas ao Monitoramento Fotovoltaico

O avanço das tecnologias computacionais tem ampliado as possibilidades de monitoramento e análise operacional em sistemas fotovoltaicos de GD. Ferramentas de análise de dados, sistemas supervisórios e métodos computacionais vêm sendo utilizados para auxiliar na identificação de padrões de desempenho, detecção de anomalias operacionais e apoio à manutenção de sistemas fotovoltaicos [4].

Dessa forma, algumas abordagens baseadas em Inteligência Artificial (IA) e aprendizado de máquina têm sido exploradas em aplicações relacionadas à previsão de geração de energia, monitoramento de desempenho e identificação automatizada de falhas em sistemas fotovoltaicos [5]. Essas técnicas demonstram potencial para contribuir com a otimização operacional e a redução de perdas energéticas.

Embora este trabalho não implemente modelos de IA, os resultados obtidos indicam que a metodologia proposta pode servir como base para futuros aprimoramentos envolvendo técnicas automatizadas de análise de dados e classificação de padrões operacionais associados à sujidade dos módulos fotovoltaicos.

E. Trabalhos Relacionados

A aplicação de técnicas de monitoramento inteligente em sistemas fotovoltaicos tem recebido crescente atenção na literatura, especialmente em estudos voltados à identificação de falhas, previsão de geração e otimização do desempenho operacional. Trabalhos recentes demonstram que a utilização de modelos preditivos associados à análise de dados históricos podem contribuir significativamente para a redução de perdas energéticas e para o aumento da eficiência de sistemas fotovoltaicos [5]-[8].

O trabalho apresentado em [5] propõe o desenvolvimento de um sistema inteligente de monitoramento para usinas solares de GD, utilizando o algoritmo *Random Forest* para identificação e classificação de condições operacionais anômalas. O estudo integrou dados meteorológicos e variáveis elétricas de uma usina fotovoltaica, permitindo a construção de um modelo preditivo capaz de auxiliar na manutenção preditiva e na otimização da geração de energia.

O estudo realizado em [6] propõe uma ferramenta computacional desenvolvida em Python para otimização do intervalo de manutenção preventiva em módulos fotovoltaicos, com o objetivo de minimizar o custo global do sistema. A abordagem modela a perda de potência de saída dos módulos em função dos dias de exposição à sujidade, utilizando dois modelos matemáticos: função linear e função exponencial assintótica. A ferramenta determina o intervalo ótimo de limpeza a partir do ponto de mínimo da função de custo global, composta pela soma do custo da manutenção preventiva e da perda potencial de receita decorrente da redução de geração energética causada pela sujidade. Os resultados demonstraram que o intervalo de manutenção otimizado proporciona ganhos financeiros significativos em relação à adoção de intervalos genéricos, reforçando a importância da análise quantitativa na definição de estratégias de manutenção preventiva em sistemas fotovoltaicos.

O projeto executado em [7] propõe a automatização da manutenção de placas solares por meio da utilização de sensores capacitivos para detecção de sujeira acumulada nos módulos fotovoltaicos. Os autores demonstraram que a realização de limpezas periódicas contribuíram significativamente para a melhoria da eficiência energética e para a redução de perdas operacionais causadas pela sujidade.

A análise apresentada em [8] investiga os efeitos da sujidade em usinas solares durante períodos de seca prolongada, demonstrando que o monitoramento contínuo de dados operacionais é capaz de otimizar o planejamento das limpezas e reduzir perdas de geração.

A partir da análise dos trabalhos correlatos, observa-se que as abordagens existentes exploram técnicas avançadas como *Random Forest* [5], ferramentas computacionais de otimização

do intervalo de manutenção preventiva [6] e sensores capacitivos [7]. Contudo demandam infraestrutura específica ou conhecimento técnico aprofundado para sua operação. O presente trabalho propõe uma abordagem simplificada e acessível, na qual o operador necessita apenas inserir os dados de geração da usina em uma interface desenvolvida em *React* [14] para obter o diagnóstico e a classificação das perdas associadas à sujidade dos módulos fotovoltaicos.

III. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia proposta segue uma abordagem estruturada em oito etapas sequenciais, representadas no fluxograma da Figura 1: coleta dos dados de geração energética; pré-processamento e organização dos dados; verificação da consistência dos dados; análise temporal da geração; cálculo dos desvios operacionais; identificação de padrões de perda; comparação antes e depois da limpeza; e validação operacional dos resultados. Para a implementação computacional, adotou-se a linguagem *Python* [10] no processamento dos dados e o *microframework Flask* [13] para o gerenciamento do *backend*. A comunicação entre o sistema e a interface é realizada por meio de uma API (*Application Programming Interface*), que opera em duas etapas distintas: na primeira, uma requisição *HTTP GET* é utilizada para disponibilizar ao usuário a planilha-modelo para *download*; na segunda, após o preenchimento dos dados, uma requisição *HTTP POST* encaminha o arquivo ao *backend* para processamento e retorna os resultados a interface *frontend* desenvolvida em *React* [14].

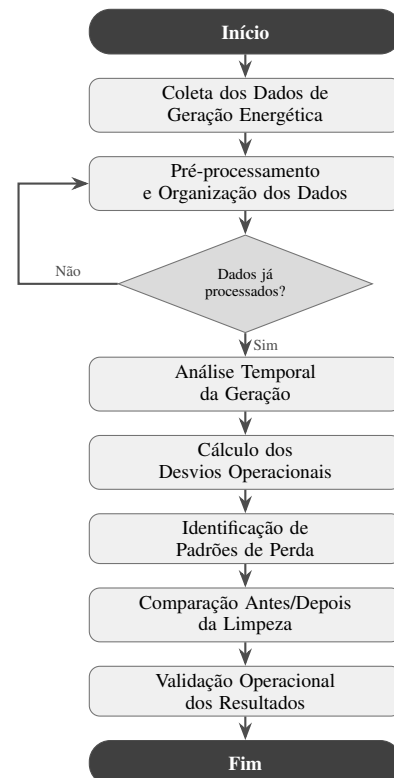


Figura 1. Fluxograma da metodologia utilizada para análise operacional e identificação das perdas associadas à sujidade. Fonte: Autoria própria.

A. Coleta e Estruturação dos Dados de Entrada

Os dados utilizados neste trabalho foram obtidos a partir de relatórios demonstrativos de geração fornecidos por uma empresa do setor solar fotovoltaico localizada no estado do Pará, abrangendo o período de 1º de janeiro de 2025 à 15 de maio de 2026. Além dos relatórios mensais, foram coletados dados diários de geração da instalação L. A. Amaral por meio do sistema de monitoramento da própria usina, cujas credenciais de acesso foram disponibilizadas pela empresa operadora. O procedimento de limpeza dos módulos fotovoltaicos foi realizado nos dias 4 e 5 de abril de 2026, de forma que os dados coletados a partir do dia 6 de abril de 2026 representam o desempenho da instalação em condição de módulos limpos, sendo utilizados como referência para a quantificação das perdas associadas à sujidade no período anterior. O conjunto de dados abrange seis instalações de geração distribuída: L A Amaral, Tabocal, Estrada Nova, Sítio Família Lima, Cristo Rei e Altanet.

Visto que a maioria dos sistemas de monitoramento de usinas fotovoltaicas são capazes de exportar dados em formato de planilha eletrônica, optou-se por adotar esse formato como entrada principal do sistema, visando facilitar a utilização por parte do operador. A aplicação disponibiliza uma planilha-modelo para *download*, estruturada em seis colunas: data, geração e HSP do período sujo e data, geração e HSP do período limpo. Os valores mensais de HSP foram obtidos a partir de dados de irradiação solar referentes às coordenadas geográficas de cada instalação [16]. A Figura 2 ilustra o modelo disponibilizado ao usuário.

Data Sujo	Geracao_Suja_kWh	HSP_Sujo	Data Limpo	Geracao_Limpa_kWh	HSP_Limpo
2025-01-01	8,211	4,85	2026-01-01	8,584	4,89
2025-01-02	8,111	4,66	2026-01-02	8,662	4,8
2025-01-03	8,019	4,89	2026-01-03	9,117	5,06
2025-01-04	8,087	5,16	2026-01-04	8,903	4,82
2025-01-05	7,385	4,63	2026-01-05	8,271	4,72
2025-01-06	6,891	4,63	2026-01-06	8,897	5,29
2025-01-07	7,758	5,17	2026-01-07	8,684	4,95
2025-01-08	6,85	4,93	2026-01-08	8,597	5,01
2025-01-09	6,267	4,56	2026-01-09	8,984	4,72
2025-01-10	6,755	4,86	2026-01-10	9,109	4,89
2025-01-11	6,255	4,56	2026-01-11	9,079	5,02
2025-01-12	5,999	4,56	2026-01-12	8,548	4,77
2025-01-13	6,054	4,77	2026-01-13	8,707	5,08
2025-01-14	5,063	4,13	2026-01-14	8,899	4,88
2025-01-15	4,802	4,18	2026-01-15	9,093	4,94

Figura 2. Modelo de planilha disponibilizado para inserção dos dados de geração. Fonte: Autoria própria.

A Tabela I apresenta os dados consolidados das seis instalações utilizadas como base para a validação e análise do sistema.

Tabela I
GERAÇÃO MENSAL (KWH) DAS INSTALAÇÕES – 2025.

Mês	L A Am.	Taboc.	Est. N.	SFL	C. Rei	Alt.
Jan	5381	10683	11073	9734	11058	6361
Fev	5669	9866	9482	10182	11329	9205
Mar	5374	11208	11667	11557	11014	7646
Abr	4946	11041	11642	10133	10762	10382
Mai	5334	11141	12035	11519	10774	10918
Jun	5618	11121	11342	10378	11003	10652
Jul	5904	11561	12637	12229	13598	11677
Ago	5878	12697	12832	11229	13556	12324
Set	5944	13383	13276	8524	12854	11483
Out	6597	12364	13638	11731	12665	11458
Nov	5785	11573	12785	10137	12250	7814
Dez	5253	—	10699	10423	10998	—

SFL = Sítio Família Lima; Am. = Amaral; Alt. = Altanet.

B. Pré-Processamento e Organização dos Dados

Após o *upload* da planilha pelo operador, o algoritmo de leitura mapeia as colunas utilizando a biblioteca *Pandas* em *Python*, aplicando uma rotina de tratamento que elimina linhas vazias ou registros corrompidos, garantindo a consistência dos cálculos subsequentes. Caso sejam identificadas inconsistências estruturais no arquivo, um alerta é emitido ao usuário indicando o tipo de erro encontrado, e o fluxo retorna à etapa de organização para correção, conforme representado pela ramificação “Não” do nó de decisão na figura 1. Somente após a validação bem-sucedida dos dados o processamento prossegue.

C. Análise Temporal e Cálculo dos Desvios Operacionais

Com os dados validados, o *backend* desenvolvido em *Python* [10] com o *microframework Flask* [13] executa sequencialmente quatro rotinas de processamento:

1) *Normalização por HSP*: Para isolar a perda de geração exclusivamente associada à sujidade e mitigar falsos diagnósticos gerados por sazonalidade, como nebulosidade, sombreamento ou períodos chuvosos, a geração bruta G_t é transformada em geração normalizada $G_{norm,t}$, dividindo o valor pelo HSP do respectivo mês [16], conforme a Equação (1):

$$G_{norm,t} = \frac{G_t}{HSP_t} \quad (1)$$

onde G_t é a geração bruta do dia em kWh e HSP_t é a Hora de Sol Pleno do respectivo dia, eliminando a influência de variações climáticas sazonais e permitindo que a comparação reflita exclusivamente o efeito da sujidade sobre o desempenho do módulo.

2) *Filtro de Tendência por Média Móvel*: Para reduzir ruídos operacionais de curto prazo e evidenciar a tendência real de acúmulo de sujidade, aplica-se uma média móvel simples com janela de sete dias sobre os dados normalizados, conforme a Equação (2):

$$MM_t = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} G_{t-i} \quad (2)$$

em que MM_t representa a média móvel no instante t , G_{t-i} corresponde ao valor de geração registrado nos períodos anteriores e n o tamanho da janela temporal.

3) *Cálculo da Linha de Base*: A linha de base representa a geração esperada do módulo fotovoltaico em condições limpas. Neste trabalho, ela é calculada como a média da geração normalizada de todos os dias do período pós-limpeza, conforme a Equação (3):

$$L_B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n G_{limpo_norm} \quad (3)$$

onde n é o número de dias do período limpo e G_{limpo_norm} é a geração normalizada de cada dia. Esta abordagem adapta a metodologia de [6], que utilizava dois módulos simultâneos, para o contexto de medição temporal em campo, onde o módulo de referência é o próprio painel após a realização da limpeza.

4) *Razão de Sujidade e Perda Percentual*: Para cada dia do período sujo, calcula-se a Razão de Sujidade (RS) comparando a geração normalizada do dia com a linha de base do período limpo, conforme a Equação (4), adaptada de [6]:

$$RS = \frac{G_{sujo_norm}}{L_B} \quad (4)$$

A partir da razão de sujidade, calcula-se a perda de potência percentual diária conforme a Equação (5), definida em [6]:

$$\Delta P = (1 - RS) \times 100\% \quad (5)$$

onde valores de ΔP próximos de zero indicam operação próxima ao desempenho limpo, e valores elevados indicam acúmulo significativo de sujidade sobre os módulos fotovoltaicos.

D. Identificação de Padrões de Perda

Com base nos valores de ΔP calculados, uma estrutura condicional rotula o estado operacional de cada período em tempo de execução, classificando-o em três classes definidas com base nas literaturas técnicas [2],[8]:

- **Classe 0 – Sem sujidade significativa**: desvio negativo inferior a 3% em relação à média móvel. Recomendação: acompanhamento contínuo.
- **Classe 1 – Sujidade moderada**: desvio negativo entre 3% e 10%. Recomendação: programar limpeza preventiva.
- **Classe 2 – Sujidade severa**: desvio negativo superior a 10%. Recomendação: limpeza corretiva urgente.

E. Comparação Antes/Depois e Validação

Na etapa final da metodologia, o algoritmo realiza a consolidação das métricas de geração energética calculadas ao longo do período de monitoramento, permitindo quantificar os impactos operacionais associados ao acúmulo de sujidade nos módulos fotovoltaicos e avaliar a recuperação do desempenho após a realização da limpeza dos painéis.

Para validação da metodologia proposta, foi utilizada a instalação L. A. Amaral, composta por um inversor fotovoltaico

de 50 kW da marca SofarSolar, modelo 50000TL, e por 96 módulos fotovoltaicos de marca QSOLAR, modelo QS(515-550)-144HM8. A escolha dessa instalação ocorreu devido à disponibilidade de registros operacionais históricos e registros fotográficos dos módulos antes e depois do procedimento de limpeza, possibilitando a correlação entre o acúmulo de sujidade e as variações de desempenho energéticas identificadas pelo sistema.

A Figura 3 apresenta os registros visuais das condições dos módulos fotovoltaicos antes e depois da realização de limpeza.



Figura 3. Módulos fotovoltaicos da instalação L. A. Amaral, antes (esquerda) e depois (direita) da execução da limpeza. Fonte: Autoria própria.

F. Camada de Visualização

Após a execução das rotinas de processamento, o *backend* serializa os resultados em um objeto JSON (*JavaScript Object Notation*) e os retorna ao *frontend* como resposta à requisição *HTTP POST* realizada no momento do *upload* da planilha. A interface desenvolvida em *React* [14] com *TypeScript* consome esse objeto e distribui as informações dinamicamente por meio de componentes gráficos modulares, compondo uma *dashboard* reativa e responsiva.

Na interface, as perdas diárias são plotadas com linhas de referência visual fixadas nos limiares de transição entre as classes de sujidade (3% para sujidade moderada e 10% para sujidade severa) permitindo ao operador identificar visualmente o estado operacional da usina e tomar decisões de manutenção de forma dinâmica e interativa. O código-fonte completo da aplicação está disponível no *GitHub* do projeto [15].

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise dos dados operacionais permitiu avaliar o comportamento das instalações fotovoltaicas estudadas sob diferentes condições de funcionamento, possibilitando a identificação de variações de desempenho associadas à sujidade dos módulos. A interpretação conjunta dos dados históricos de geração, desvios operacionais observados e evidências visuais obtidas durante o estudo contribuiu para a validação da metodologia proposta e para a compreensão dos impactos da manutenção preventiva na eficiência energética dos sistemas fotovoltaicos analisados.

A. Desempenho da Metodologia Proposta

A metodologia proposta apresentou resultados satisfatórios na identificação de padrões de perda de desempenho associados à sujidade em sistemas fotovoltaicos de geração distribuída. A partir da análise temporal dos dados históricos

de geração, foi possível identificar desvios operacionais compatíveis com o acúmulo gradual de sujeira sobre os módulos fotovoltaicos.

Para cada instalação, calculou-se a média anual de geração e o desvio percentual mensal em relação a essa média. A Tabela II sintetiza os principais desvios identificados nas seis instalações analisadas.

Tabela II
SÍNTESE DOS DESVIOS DE GERAÇÃO POR INSTALAÇÃO – 2025.

Instalação	Desvio severo ($< -10\%$)	Desvio moderado ($3-10\%$)
L A Amaral	Abr ($-12,3\%$)	Jan, Mar, Mai, Dez
Tabocal	Fev ($-14,3\%$)	Jan, Abr, Mai, Jun
Estrada Nova	Fev ($-20,5\%$), Dez ($-10,3\%$)	Jan, Jun
Sít. Fam. Lima	Set ($-19,9\%$)	Jan, Fev, Abr, Nov
Cristo Rei	—	Jan–Jun, Dez
Altanet	Jan ($-36,3\%$), Mar ($-23,5\%$), Nov ($-21,8\%$)	Fev

Cinco das seis instalações registraram ao menos um desvio severo, com destaque para a Altanet, que apresentou os maiores valores do conjunto ($-36,3\%$ em janeiro). O Cristo Rei foi a única sem desvio severo, porém com perdas moderadas persistentes durante sete meses.

Sendo assim, são identificados dois padrões relevantes: (i) queda isolada, como no Sítio Família Lima (setembro) e Altanet (novembro), indicativa de evento abrupto de acúmulo; e (ii) queda progressiva sustentada, como no Cristo Rei (janeiro a junho), compatível com os efeitos do acúmulo gradual de sujeira descritos na literatura especializada [8].

B. Validação com Caso Real: L. A. Amaral

A instalação L. A. Amaral foi selecionada para validação da metodologia por apresentar dados operacionais históricos consistentes e registros do comportamento do sistema antes e depois da realização da limpeza dos módulos fotovoltaicos.

A Figura 4 ilustra o perfil de geração mensal da instalação ao longo de 2025, evidenciando a queda severa registrada em abril.

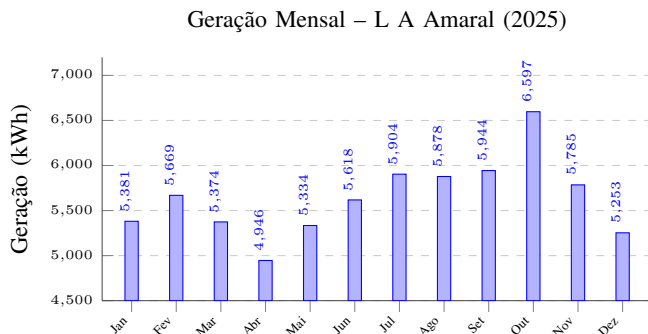


Figura 4. Perfil de geração mensal da instalação L. A. Amaral em 2025. Fonte: Relatório da empresa distribuidora do Pará (2025).

O mês de abril de 2025 registrou geração de 4.946 kWh, valor inferior à média anual da instalação, estimada em 5.640 kWh. Aplicando a Equação (5), obteve-se um desvio negativo aproximado de 13,7%, indicando perda significativa

de desempenho operacional associada ao acúmulo de sujeira sobre os módulos fotovoltaicos. Além de abril, foram observados desvios moderados em janeiro ($-4,6\%$), março ($-4,7\%$), maio ($-5,4\%$) e dezembro ($-6,9\%$), padrão compatível com o acúmulo progressivo de sujeira descrito na literatura em [2].

C. Análise pelo Sistema Desenvolvido

Para complementar a análise dos dados mensais, os dados diários da instalação L. A. Amaral foram processados pelo sistema desenvolvido, permitindo a visualização detalhada do comportamento operacional ao longo do período monitorado. A Figura 5 apresenta a interface do sistema com os resultados obtidos.



Figura 5. Interface do sistema desenvolvido exibindo os resultados do processamento dos dados da instalação L. A. Amaral. Fonte: Autoria própria.

A Figura 5 apresenta a interface desenvolvida para exibição dos resultados do sistema de monitoramento de sujeira em módulos fotovoltaicos. A tela reúne os principais indicadores calculados automaticamente a partir dos dados processados, permitindo uma análise rápida das condições operacionais da usina. O indicador “Perda Média” apresenta a perda percentual média registrada durante o período sujo, enquanto o indicador “Ganho Após Limpeza” mostra o aumento percentual de geração obtido após a realização da limpeza dos módulos. O indicador “Dias de Limpeza Urgente” informa a quantidade de dias classificados como sujeira severa, e o indicador “Referência de Geração Limpa” apresenta a linha de base do sistema em kWh/HSP, utilizada como referência para os cálculos de perda de desempenho ao longo do monitoramento.

A Figura 6 apresenta o comportamento da geração diária bruta no período anterior à limpeza, processada pelo sistema. Observa-se a alta variabilidade diária típica de condições climáticas tropicais, com quedas abruptas associadas a períodos de nebulosidade intensa, especialmente em julho de 2025.

A Figura 7 apresenta a geração diária após a limpeza dos módulos. A linha de base calculada pelo sistema correspondeu a 45,32 kWh/HSP, valor que representa a capacidade de geração do módulo em condições limpas e serve como referência para o cálculo da razão de sujeira conforme descrito na Equação (4).

A Figura 8 apresenta a perda de potência percentual diária (ΔP , em %) calculada pelo sistema ao longo de todo o período monitorado, com a média móvel de sete dias (em %) sobreposta. O cálculo foi realizado a partir da normalização da geração por HSP tanto do período sujo quanto do período limpo, conforme equação (1), seguida da estimativa da linha de base pela equação (3). De posse desses valores, foram

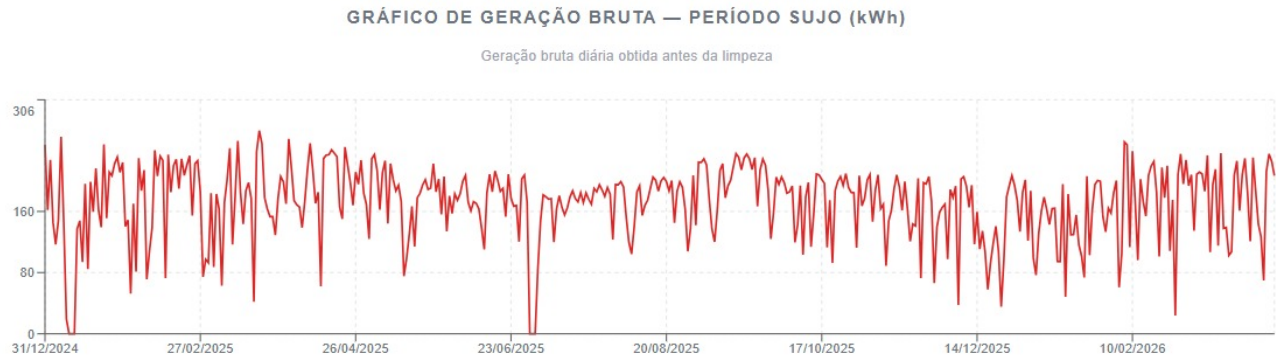


Figura 6. Geração diária bruta do período sujo (jan/2025 a abr/2026) processada pelo sistema desenvolvido. Fonte: Autoria própria.

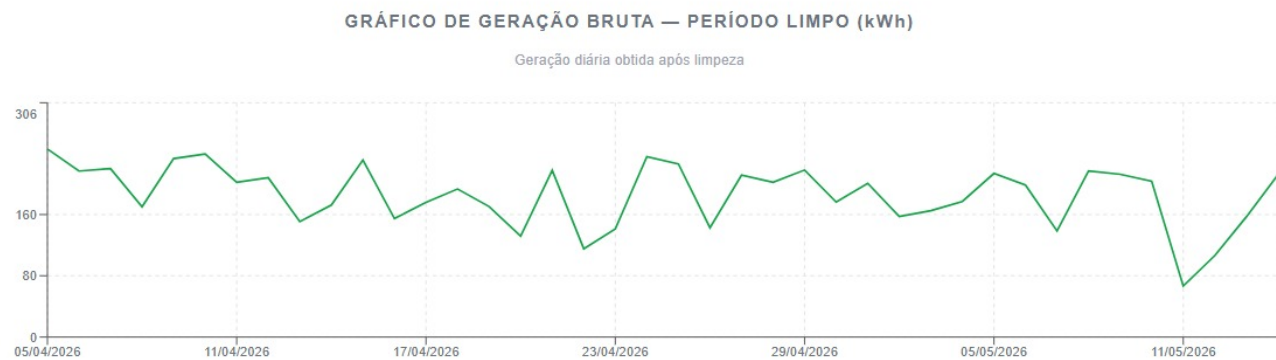


Figura 7. Geração diária do período limpo (abr/2026 a mai/2026) processada pelo sistema desenvolvido. Fonte: Autoria própria.

aplicadas a razão de sujidade, equação (4), e o cálculo da perda de potência, equação (5). Considerando os limiares de classificação adotados neste trabalho, observa-se que a média móvel se mantém predominantemente na faixa de sujidade moderada (entre 3% e 10%), com episódios de sujidade severa (acima de 10%) concentrados nos períodos de menor precipitação, resultado coerente com o padrão de queda progressiva sustentada identificado na análise mensal da instalação L. A. Amaral e sintetizado na Tabela II.

Para validar os resultados obtidos pelo sistema proposto, a Figura 9 apresenta o comportamento comparativo da geração diária real nos períodos sujo e limpo, construído a partir dos dados brutos da instalação. A média diária no período sujo foi de 171,4 kWh, enquanto no período pós-limpeza atingiu 185,7 kWh, representando um ganho estimado de 15,86% com base na geração, consistente com os valores de ΔP estimados pelo sistema, baseando-se nos dados reais obtidos pelos relatórios fornecidos pela empresa, os valores podem ser obtidos pela equação (1).

D. Padrões de Sujidade Identificados

A análise das seis instalações evidenciou dois padrões distintos de sujidade. O padrão de queda isolada foi observado no Sítio Família Lima (setembro, $-19,9\%$) e na Altanet (novembro, $-21,8\%$), com valores normais nos meses adjacentes,

comportamento típico de evento abrupto de acúmulo [9]. Já o padrão de queda progressiva sustentada foi identificado no Cristo Rei, com desvios moderados consecutivos de janeiro a junho, compatível com o acúmulo gradual de sujidade descrito na literatura especializada [8].

Na instalação L. A. Amaral, observou-se comportamento semelhante ao padrão de queda progressiva, com reduções moderadas em meses anteriores ao desvio severo registrado em abril ($-12,3\%$). A recuperação de 15,89% na geração após a limpeza reforça a relação entre a sujidade acumulada e a perda de desempenho operacional do sistema fotovoltaico.

A Altanet merece atenção especial: os desvios severos de janeiro ($-36,3\%$) e março ($-23,5\%$) sugerem que fatores adicionais além da sujidade, como sombreamento ou problema técnico no inversor, contribuíram para as anomalias observadas, o que reforça a importância de um sistema de acompanhamento que auxilie na identificação da causa raiz das anomalias operacionais [8].

E. Impacto Financeiro das Perdas Associadas à Sujidade

Além da redução do desempenho energético, as perdas associadas à sujidade apresentam impacto financeiro relevante para sistemas fotovoltaicos de GD. A diminuição da geração ocasiona redução da compensação energética junto à conces-

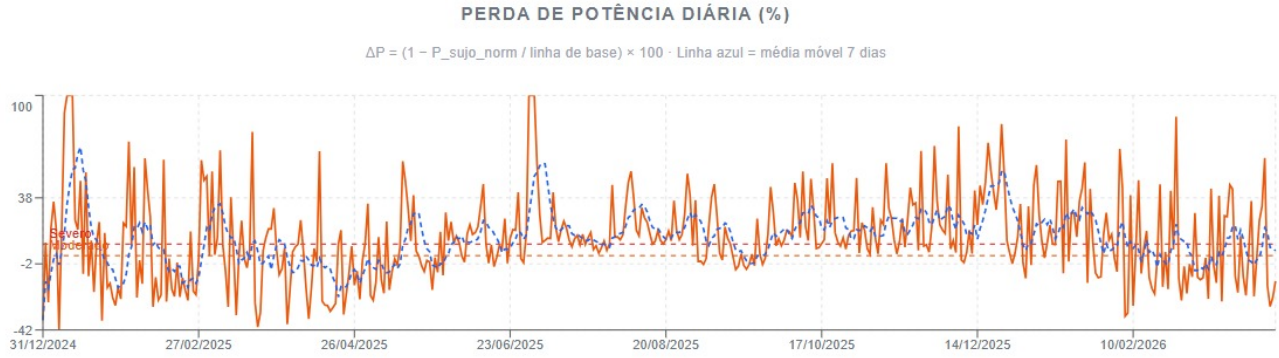


Figura 8. Perda de potência diária (ΔP) estimada pelo sistema para a instalação L. A. Amaral. Fonte: Autoria própria.

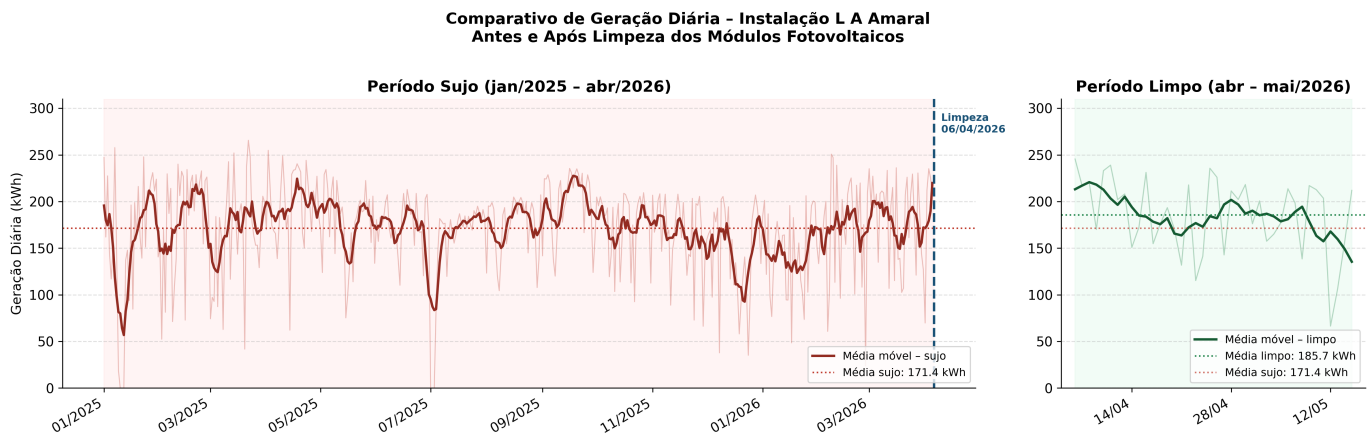


Figura 9. Comportamento comparativo da geração diária real da instalação L. A. Amaral nos períodos sujo (jan/2025 a abr/2026) e limpo (abr/2026 a mai/2026), com média móvel de sete dias. Fonte: Autoria própria.

sionária, resultando em aumento indireto do custo da energia elétrica para o consumidor.

O estado do Pará é historicamente um dos estados com a tarifa de energia elétrica mais elevada do Brasil [12]. A tarifa praticada pela concessionária Equatorial Pará corresponde a aproximadamente R\$ 0,96/kWh sem impostos [11], o que torna as perdas por sujidade financeiramente expressivas mesmo em instalações de pequeno porte.

No caso da instalação L. A. Amaral, a comparação entre os períodos anterior e posterior à limpeza indicou aumento médio de 14,3 kWh/dia na geração. Considerando a tarifa de R\$ 0,96/kWh, sem impostos, praticada pela concessionária Equatorial Pará, esse diferencial corresponde a um ganho financeiro estimado de aproximadamente R\$ 13,73 por dia.

Adotando-se como referência o custo aproximado de R\$ 700,00 para a realização da limpeza dos módulos, obtém-se um tempo de retorno simples de cerca de 51 dias, calculado pela relação entre o custo da intervenção e o ganho financeiro diário proporcionado pela recuperação da geração. Esse resultado indica que, no cenário analisado, a manutenção preventiva apresenta viabilidade econômica, especialmente em situações nas quais o acúmulo de sujidade se prolonga por períodos superiores a esse intervalo.

Cabe destacar que o ganho de 15,89% apresentado neste

trabalho refere-se ao aumento percentual obtido a partir da geração normalizada processada pelo sistema, enquanto a diferença de 14,3 kWh/dia corresponde à variação observada na geração média bruta entre os períodos comparados. Dessa forma, a análise econômica foi fundamentada no ganho absoluto de energia recuperada, expresso em kWh/dia.

Além do aspecto econômico, os resultados reforçam a importância do acompanhamento contínuo e da manutenção preventiva em sistemas fotovoltaicos, contribuindo para a preservação da eficiência operacional e a maximização do retorno financeiro do investimento realizado.

V. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um estudo e análise operacional do impacto da sujidade na eficiência energética de sistemas fotovoltaicos de geração distribuída conectados à rede, implementado em uma interface desenvolvida em React [14]. A partir da análise de dados reais de geração de seis instalações localizadas no estado do Pará, foi possível identificar padrões operacionais compatíveis com reduções progressivas de eficiência causadas pelo acúmulo de sujeira sobre os painéis fotovoltaicos, com desvios severos superiores a 10% registrados em cinco das seis instalações analisadas.

A metodologia proposta, baseada na normalização por HSP, filtragem por média móvel e cálculo da razão de sujidade, demonstrou capacidade de identificar e classificar perdas operacionais de forma automatizada. Os resultados obtidos confirmam essa eficácia: na instalação L. A. Amaral, o sistema identificou corretamente o desvio severo de $-12,3\%$ registrado em abril de 2025, além de desvios moderados em janeiro ($-4,6\%$), março ($-4,7\%$), maio ($-5,4\%$) e dezembro ($-6,9\%$). Após a realização da limpeza o sistema registrou uma recuperação de $15,89\%$ na geração energética, evidenciando a capacidade da metodologia de quantificar o benefício da manutenção preventiva sobre o desempenho operacional do sistema fotovoltaico.

Dentre as instalações avaliadas, a unidade L. A. Amaral destacou-se como principal caso de validação. A comparação entre os períodos anterior e posterior à limpeza evidenciou um ganho médio estimado de $15,89\%$ na geração diária, com a média passando de $171,4$ kWh para $185,7$ kWh após o procedimento. Os resultados sugere uma relação direta entre o acúmulo de sujidade e a redução da eficiência do sistema fotovoltaico. O cálculo de geração esperada do módulo fotovoltaico em condições limpas calculado pelo sistema, equação(3), de $45,32$ kWh/HSP, foi utilizada como referência para quantificar o desempenho operacional do sistema após a limpeza.

Os resultados apresentados reforçam a importância do acompanhamento operacional contínuo em sistemas fotovoltaicos, especialmente em regiões tropicais sujeitas ao acúmulo frequente de partículas. Do ponto de vista financeiro, considerando a tarifa de R\$ $0,96/\text{kWh}$ praticada pela Equatorial Pará [11] e o diferencial de geração identificado, a manutenção preventiva demonstra elevada viabilidade econômica.

Como trabalhos futuros, recomenda-se a ampliação da base de dados analisada, a integração de variáveis meteorológicas em tempo real e o desenvolvimento de modelos automatizados de detecção de anomalias e previsão de desempenho. Nesse contexto, abordagens baseadas em IA e aprendizado de máquina podem ser exploradas para auxiliar na identificação automatizada de padrões operacionais associados à sujidade dos módulos. Além disso, pode-se considerar também a implementação de sistemas embarcados integrados a mecanismos automatizados de limpeza, permitindo que a identificação de perdas seja associada diretamente ao acionamento autônomo de procedimentos de manutenção preventiva.

REFERÊNCIAS

- [1] ABSOLAR – Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. *Relatório de Energia Solar*. 2021. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/energia-solar-fv/>. Acesso em: mar. 2026.
- [2] SOUZA, T. L. S.; LIMA, R. L. F. A.; JÚNIOR, C. L. Dirt on photovoltaic modules and efficient energy generation in the Brazilian semiarid. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v26n5p321-326>.
- [3] KOSMOPOULOS, P. Solar power monitoring and forecasting. In: *Planning and Management of Solar Power from Space*[S.l.]: Elsevier, 2024. cap. 4. 2024. DOI: <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-823390-0.00004-1>.
- [4] WANG, Y.; CHEN, B.; YU, J. Enhancing photovoltaic monitoring: Bridging gaps through IoT integration and comparative analysis. *IEEE*, 2024. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ACPEE60788.2024.10532293>.

- [5] FREITAS JÚNIOR, G. F.; LOPES, W. O. Desenvolvimento de Sistema de Análise e Predição de Riscos para usinas solares utilizando técnicas de Inteligência Artificial. Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Goiânia, 2025.
- [6] NINKE, Andrielle. *Ferramenta Computacional para Otimização do Intervalo de Manutenção Preventiva de Módulos Fotovoltaicos*. Trabalho de Conclusão de Curso — Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, 2024.
- [7] SOUSA, D. D. R.; NETO, A. P. F. Automatização da Manutenção de Placas Solares: Sustentabilidade e Eficiência Energética. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 2024.
- [8] PEREIRA, D. S. Monitoramento e Análise de Desempenho de uma Usina Fotovoltaica de Pequeno Porte em São Miguel do Anta-MG. *Departamento de Engenharia Elétrica*, Universidade Federal de Viçosa, MG, 2024.
- [9] DELFOS ENERGY. Combate à sujidade em usinas solares durante a estação seca: como o monitoramento de dados otimiza as limpezas e aumenta a eficiência. *Blog Delfos Energy*, out. 2024. Disponível em: <https://www.delfos.energy/pt/blog-posts/combating-soiling-in-solar-plants-during-the-dry-season>. Acesso em: mar. 2026.
- [10] PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. *Python Language Reference*, versão 3.x. Disponível em: <https://www.python.org/doc/>. Acesso em: mar. 2026.
- [11] CORREIO PARAENSE. Equatorial Pará explica como a fatura de energia é calculada. 2024. Disponível em: <https://correioparaense.com.br/2024/10/24/equatorial-para-explica-como-a-fatura-de-energia-e-calculada-2/>. Acessado em: maio. 2026.
- [12] PODER360. Pará passa a ter a energia mais cara do país; leia ranking. 2023. Disponível em: <https://www.poder360.com.br/energia/para-passa-a-ter-a-energia-mais-cara-do-pais-leia-ranking/>. Acesso em: maio. 2026.
- [13] FLASK. Flask Documentation. Disponível em: <https://flask.palletsprojects.com/>. Acesso em: mar. 2026.
- [14] META. React Documentation. Disponível em: <https://react.dev/>. Acesso em: mar. 2026.
- [15] CARVALHO, Pedro. *Sistema Monitoramento Solar TCC*. GitHub, 2026. Disponível em: <https://github.com/PedroCarvalho36950/Sistema-Monitoramento-Solar-TCC>. Acesso em: maio 2026.
- [16] CRESESB, Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. *Portal de Dados de Irradiação Solar*. Disponível em: <https://cresesb.cepel.br/>. Acesso em: abril 2026.
- [17] AL-EZZI, A. S.; ANSARI, M. N. M. Photovoltaic Solar Cells: A Review. *Applied System Innovation*, v. 5, n. 4, p. 67, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/asi5040067>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2571-5577/5/4/67>. Acesso em: abril 2026.

Nota:

O título Projeto Final de Curso (PFC) foi alterado

De:

Monitoramento de sujidade de placas fotovoltaicas na geração distribuída utilizando técnicas de inteligência artificial

Para:

ESTUDO DE CASO DO IMPACTO DA SUJIDADE NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE.



**PUC
GOIÁS**

Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Pontifical Catholic University of Goiás
Av. Universitária, 1069, Setor Universitário
Caixa Postal 86 - CEP 74.605-010
Goiânia - Goiás - Brasil

RESOLUÇÃO nº 038/2020 – CEPE

ANEXO I

APÊNDICE ao TCC

Termo de autorização de publicação de produção acadêmica

O estudante PEDRO HENRIQUE DA SILVA CARVALHO do Curso de Engenharia de Controle e Automação, matrícula 2021.1.0118.0032-9, telefone: (66) 99614-1575 e-mail 20211011800329@pucgo.edu.br, na qualidade de titular dos direitos autorais, em consonância com a Lei nº 9.610/98 (Lei dos Direitos do Autor), autoriza a Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC Goiás) a disponibilizar o Trabalho de Conclusão de Curso intitulado Monitoramento de sujidade de placas fotovoltaicas na geração distribuída utilizando técnicas de inteligência artificial, gratuitamente, sem ressarcimento dos direitos autorais, por 5 (cinco) anos, conforme permissões do documento, em meio eletrônico, na rede mundial de computadores, no formato especificado (Texto(PDF); Imagem (GIF ou JPEG); Som (WAVE, MPEG, AIFF, SND); Vídeo (MPEG, MWV, AVI, QT); outros, específicos da área; para fins de leitura e/ou impressão pela internet, a título de divulgação da produção científica gerada nos cursos de graduação da PUC Goiás.

Goiânia, 27 de Março de 2026.

Documento assinado digitalmente
govbr PEDRO HENRIQUE DA SILVA CARVALHO
Data: 31/03/2026 14:49:34-0300
Verifique em <https://validar.jb.gov.br>

Assinatura do autor: _____
Nome completo do autor: PEDRO HENRIQUE DA SILVA CARVALHO

Documento assinado digitalmente
govbr MARCOS ANTONIO DE SOUSA
Data: 31/03/2026 13:26:24-0300
Verifique em <https://validar.jb.gov.br>

Assinatura do professor-orientador: _____
Nome completo do professor-orientador: MARCOS ANTÔNIO DE SOUSA

RESOLUÇÃO nº 038/2020 – CEPE

ANEXO I

APÊNDICE ao TCC

Termo de autorização de publicação de produção acadêmica

O estudante VINICIUS FARIA DO AMARAL do Curso de Engenharia de Controle e Automação, matrícula 2022.1.0118.0006-7, telefone: (93) 98812-0729 e-mail 20221011800067@pucgo.edu.br, na qualidade de titular dos direitos autorais, em consonância com a Lei nº 9.610/98 (Lei dos Direitos do Autor), autoriza a Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC Goiás) a disponibilizar o Trabalho de Conclusão de Curso intitulado Monitoramento de sujidade de placas fotovoltaicas na geração distribuída utilizando técnicas de inteligência artificial, gratuitamente, sem ressarcimento dos direitos autorais, por 5 (cinco) anos, conforme permissões do documento, em meio eletrônico, na rede mundial de computadores, no formato especificado (Texto(PDF); Imagem (GIF ou JPEG); Som (WAVE, MPEG, AIFF, SND); Vídeo (MPEG, MWV, AVI, QT); outros, específicos da área; para fins de leitura e/ou impressão pela internet, a título de divulgação da produção científica gerada nos cursos de graduação da PUC Goiás.

Goiânia, 27 de Março de 2026.

Documento assinado digitalmente
gov.br VINICIUS FARIA DO AMARAL
Data: 31/03/2026 14:39:34 -0300
Verifique em <https://validar.jf.gov.br>

Assinatura do autor: _____
Nome completo do autor: VINICIUS FARIA DO AMARAL

Documento assinado digitalmente
gov.br MARCOS ANTONIO DE SOUSA
Data: 31/03/2026 13:30:26 -0300
Verifique em <https://validar.jf.gov.br>

Assinatura do professor-orientador: _____
Nome completo do professor-orientador: MARCOS ANTÔNIO DE SOUSA