UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA AFRO-BRASILEIRA
INSTITUTO DE ENGENHARIAS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL
CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIAS

FRANCISCO DAS CHAGAS LIMA FILHO

ESTRATÉGIAS DE MANUTENÇÃO EM SISTEMAS DE MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA

REDENÇÃO
2026

FRANCISCO DAS CHAGAS LIMA FILHO

ESTRATÉGIAS DE MANUTENÇÃO EM SISTEMAS DE MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Energias da UNILAB como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energias.

Orientador: Profª. Drª. Janaina Barbosa Almada (IEDS/UNILAB)

REDENÇÃO

2026

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Sistema de Bibliotecas da UNILAB
Catalogação de Publicação na Fonte.

Lima Filho, Francisco Das Chagas.

L732e

Estratégias de manutenção em sistemas de microgeração fotovoltaica / Francisco Das Chagas Lima Filho. - Redenção, 2026.
54f: il.

Monografia - Curso de Engenharia De Energias, Instituto De Engenharias E Desenvolvimento Sustentável, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2026.

Orientador: Profª. Drª. Janaina Barbosa Almada.

1. Energia solar fotovoltaica. 2. Microgeração fotovoltaica. 3. Energia solar - Manutenção preventiva. 4. Energia solar - Viabilidade econômica. I. Título

CE/UF/BSCA CDD 621.31244

FRANCISCO DAS CHAGAS LIMA FILHO

ESTRATÉGIAS DE MANUTENÇÃO EM SISTEMAS DE MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Energias da UNILAB como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energias.

Aprovado em: 15/06/2026.

BANCA EXAMINADORA

_____
Profª. Drª. Janaina Barbosa Almada (Orientador)
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (Unilab)

_____
Prof. Dr. Hermínio Miguel de Oliveira Filho
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (Unilab)

_____
Prof. Dr. Francisco Olimpio Moura Carneiro
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (Unilab)

A Deus.
Aos meus pais, minha esposa e familiares.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todas as pessoas que tornaram possível a realização deste projeto:

A professora Janaina, por sua orientação sábia, conselhos valiosos e apoio inabalável ao longo deste caminho acadêmico.

Aos meus familiares, Jheniffer, Francisco, Elisângela, Laryssa, Leidyanne e Sílvia, pelo amor incondicional, encorajamento constante e apoio emocional durante os momentos desafiadores.

Aos amigos, por estarem sempre presentes, oferecendo suporte moral, compartilhando ideias e tornando esta jornada mais leve e divertida.

À instituição de ensino UNILAB, pela oportunidade de aprendizado, acesso aos recursos e ambiente propício para o desenvolvimento deste projeto.

A todos que de alguma forma contribuíram, meu mais sincero agradecimento. Este projeto não seria possível sem vocês. Obrigado!

RESUMO

Este trabalho analisa a influência das estratégias de manutenção no desempenho técnico e na viabilidade econômica de sistemas de microgeração fotovoltaica. Apoiado em conceitos normativos e de gestão de ativos, o estudo fundamenta-se em uma pesquisa de natureza aplicada e descritiva, utilizando três estudos de caso com perfis distintos: um sistema residencial operando sob manutenção preventiva, um comercial sob manutenção preditiva e um rural sob manutenção corretiva por omissão. Os resultados demonstraram que o sistema residencial obteve o desempenho mais consistente, com retorno do investimento (*payback*) em 31 meses. No sistema comercial, que operava sem contrato formal de manutenção preventiva e era monitorado pelo próprio usuário, a demora na intervenção preditiva resultou em uma perda financeira por subgeração de R$ 1.339,88, devido ao acúmulo de sujidade. O cenário mais crítico foi observado no sistema rural, no qual a falta de monitoramento e de manutenção preventiva resultou em uma falha grave, perda da garantia de fábrica e um prejuízo total de R$ 18.448,00, entre custos de reparo e lucro cessante. Conclui-se que o monitoramento ativo e a transição para uma cultura de manutenção preventiva são essenciais para assegurar a rentabilidade e a proteção do capital investido em sistemas de microgeração.

Palavras-chave: Energia Solar. Microgeração Fotovoltaica. Manutenção Preventiva. Viabilidade Econômica.

ABSTRACT

This study analyzes the influence of maintenance strategies on the technical performance and economic viability of photovoltaic microgeneration systems. Supported by normative concepts and asset management, the study is based on an applied and descriptive research approach, utilizing three case studies with distinct profiles: a residential system operating under preventive maintenance, a commercial system under predictive maintenance, and a rural system operating under corrective maintenance by omission. The results demonstrated that the residential system achieved the most consistent performance, with a return on investment (payback) in 31 months. In the commercial system, which operated without a formal preventive maintenance contract and was monitored by the user himself, the delay in the predictive intervention resulted in a financial loss of R$ 1,339.88 due to undergeneration caused by the accumulation of soiling. The most critical scenario was observed in the rural system, where the lack of monitoring and preventive maintenance resulted in a severe failure, loss of the factory warranty, and a total financial loss of R$ 18,448.00, accounting for repair costs and lost revenue. It is concluded that active monitoring and the transition to a preventive maintenance culture are essential to ensure the profitability and protect the capital invested in microgeneration systems.

Keywords: Solar Energy. Photovoltaic Microgeneration. Preventive Maintenance. Economic Viability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Termograma de um módulo fotovoltaico com *mismatch* causado por sombreamento.....19
Figura 2 – Sujidades na entrada do cooler do inversor fotovoltaico 21
Figura 3 – Estrutura de suporte metálica instalada em telhado de telha cerâmica durante o processo de montagem dos módulos fotovoltaicos 23
Figura 4 – Interface digital da plataforma de monitoramento livoltek exibindo dados de geração fotovoltaica.....24
Figura 5 – Fluxograma das etapas metodológicas da pesquisa 30
Figura 6 – Módulos fotovoltaicos de 575 W instalados na residência.....34
Figura 7 – Inversor string de 3 kW do sistema residencial 34
Figura 8 – Vista superior da planta fotovoltaica de 17,55 kWp em Aquiraz-CE.....38
Figura 9 – Módulos fotovoltaicos apresentando alto índice de sujidade antes da manutenção preditiva.....39
Figura 10 – Etapa de lavagem e remoção de resíduos com jato de água e materiais complementares.....40
Figura 11 – Verificação da face inferior dos módulos e estrutura após limpeza 40
Figura 12 – Inspeção dos dispositivos de proteção e aperto das conexões elétricas.....41
Figura 13 – Inversor RENAC limpo e operando após a intervenção de dezembro de 2023 41
Figura 14 – Vista aérea da planta fotovoltaica de 23,435 kWp integrada aos tanques de piscicultura em Ocara-CE.....44
Figura 15 – Interface do inversor exibindo o status de erro "GRID-INTF" identificado durante a visita de diagnóstico 46
Figura 16 – Inversor Canadian Solar de 15 kW restabelecido e operando em regime pleno após manutenção corretiva 47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo das características dos sistemas analisados 31
Tabela 2 – Comparativo de geração do sistema residencial.....36
Tabela 3 – Comparativo de geração do sistema comercial 42
Tabela 4 – Comparativo de geração do sistema rural.....47
Tabela 5 – Síntese Comparativa de Rentabilidade e Payback.....50

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Evolução mensal da geração de energia (Caso 1) 37
Gráfico 2 – Evolução mensal da geração de energia (Caso 2) 43
Gráfico 3 – Evolução mensal da geração de energia (Caso 3) 48

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14
1.1 OBJETIVOS 16
1.1.1 Objetivo geral 16
1.1.2 Objetivos específicos 16
1.2 JUSTIFICATIVA 16
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO 17
2 SISTEMAS DE MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA E ESTRATÉGIAS DE MANUTENÇÃO 18
2.1 COMPONENTES DO SISTEMA FOTOVOLTAICO 18
2.1.1 Módulos fotovoltaicos 18
2.1.2 Inversores para conexão à rede 20
2.1.3 Dispositivos de proteção e seccionamento 21
2.1.4 Estruturas de suporte e fixação 22
2.1.5 Sistemas de monitoramento e supervisão 23
2.2 ESTRATÉGIAS DE MANUTENÇÃO APLICADAS AO SETOR FOTOVOLTAICO 25
2.2.1 Manutenção preventiva 25
2.2.2 Manutenção preditiva 26
2.2.3 Manutenção corretiva 27
2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS 28
3 METODOLOGIA 29
3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA 29
3.2 OBJETO DE ESTUDO 30
3.3 PROCEDIMENTOS DE COLETA E ANÁLISE DE DADOS 31
3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS 32
4 ESTUDOS DE CASO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS 33
4.1 SISTEMA FOTOVOLTAICO RESIDENCIAL 33
4.1.1 Descrição do sistema 33
4.1.2 Estratégias de manutenção 35
4.1.3 Desempenho e resultados 35
4.2 SISTEMA FOTOVOLTAICO COMERCIAL 38
4.2.1 Descrição do sistema 38

4.2.2 Estratégias de manutenção 38
4.2.3 Desempenho e resultados 42
4.3 SISTEMA FOTOVOLTAICO RURAL 44
4.3.1 Descrição do sistema 44
4.3.2 Estratégias de manutenção 44
4.3.3 Desempenho e resultados 47
4.4 COMPARATIVO DAS ESTRATÉGIAS DE MANUTENÇÃO 49
4.5 SÍNTESE DOS RESULTADOS FINANCEIROS 50
4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS 51
5 CONCLUSÃO 52
REFERÊNCIAS 53

1 INTRODUÇÃO

No cenário contemporâneo, a crescente demanda global por energia elétrica tem gerado uma série de desafios, incluindo a busca por fontes de geração mais eficientes, sustentáveis e de menor impacto ambiental. A dependência de combustíveis fósseis tem levantado preocupações quanto às emissões de gases de efeito estufa e à finitude desses recursos, impulsionando a exploração de alternativas que possam atender às necessidades energéticas presentes e futuras sem comprometer o meio ambiente (Tolmasquim, 2016; Villalva, 2015).

Nesse contexto, a energia solar fotovoltaica ganha proeminência como uma solução inovadora e promissora. A capacidade de converter diretamente a radiação solar em eletricidade por meio de células fotovoltaicas tem colocado essa tecnologia na vanguarda da revolução energética (Villalva, 2015). Além disso, a ampla distribuição geográfica dessa fonte de energia a torna aplicável em diversas regiões do globo. A implantação de sistemas de microgeração fotovoltaica oferece a oportunidade de descentralizar a produção de energia, diminuir a dependência de fontes não renováveis e contribuir para a mitigação das mudanças climáticas (Costa, 2021; Villalva, 2015).

A busca por maior eficiência energética, autossuficiência e a possibilidade de participação ativa na geração de eletricidade levaram ao desenvolvimento de sistemas de microgeração distribuída. Esta modalidade refere-se especificamente a centrais geradoras de energia elétrica, como a fotovoltaica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW, distinguindo-se da minigeração, que abrange sistemas de maior porte (acima de 75 kW até 5 MW), conforme os critérios estabelecidos pela Lei nº 14.300/2022 e pela Resolução Normativa ANEEL nº 1.000/2021 (Brasil, 2022; Aneel, 2021). A microgeração contrasta fundamentalmente com os sistemas tradicionais de geração centralizada (GC): enquanto na GC a energia é produzida em grandes usinas para ser comercializada no Mercado Regulado ou Livre, na microgeração a produção ocorre junto ao ponto de consumo, sendo destinada prioritariamente ao uso próprio e à compensação de créditos, e não à venda de energia (Aneel, 2025; Portal Solar, 2025).

A microgeração fotovoltaica opera em um paradigma descentralizado, em que os sistemas são implantados nas próprias unidades consumidoras, como residências e pequenos comércios. Essa abordagem apresenta vantagens significativas: além de gerar energia no mesmo local de consumo, evitando a necessidade de grandes linhas de transmissão, ela permite que os proprietários injetem o excedente na rede elétrica da

distribuidora. Diferente do modelo comercial, esse excedente é convertido em créditos de energia para abatimento em faturas futuras ou em outras unidades do mesmo titular, promovendo economia financeira e proteção contra a inflação energética (Aneel, 2025; Pinho; Galdino, 2014).

A integração da microgeração fotovoltaica promove uma descentralização produtiva que auxilia tecnicamente no alívio das infraestruturas de transmissão e na redução de perdas elétricas, visto que a energia é produzida junto aos centros de carga. No entanto, a variabilidade inerente ao recurso solar impõe desafios significativos à estabilidade operativa e à qualidade da energia, podendo causar flutuações de tensão e harmônicas que afetam a rede de distribuição local (Pinho; Galdino, 2014; Tolmasquim, 2016).

Conforme destaca Villalva (2015), essa intermitência exige que a microgeração atue de forma complementar a outras fontes estáveis para mitigar riscos ao sistema. Por esse motivo, o sistema elétrico como um todo tem avançado na sua modernização, através de redes inteligentes (*smart grids*), e na implementação de sistemas de armazenamento de energia (como as baterias), garantindo a integração segura dessas fontes intermitentes à matriz energética sem comprometer a segurança operativa do Sistema Interligado Nacional (Tolmasquim, 2016).

Para além dos benefícios e desafios sistêmicos, a microgeração fotovoltaica não apenas atende às necessidades individuais de economia, mas também colabora para a modernização e sustentabilidade do setor, sendo uma fonte livre de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). No entanto, para que esses sistemas atinjam seu máximo potencial e garantam o retorno sobre o investimento previsto, a eficácia e a confiabilidade das estratégias de manutenção são fundamentais. A negligência com a manutenção preventiva pode resultar em perdas significativas de rendimento energético e até riscos à segurança das instalações (Costa, 2021; Souza, 2021).

Os sistemas fotovoltaicos são compostos por diversos componentes, como painéis solares, inversores, estruturas de montagem, cabos e dispositivos de proteção. Esses componentes estão sujeitos a uma variedade de desafios, como degradação natural, variações climáticas, desgaste mecânico e mau funcionamento eletrônico. A falta de manutenção ou a adoção de abordagens inadequadas representa um desafio significativo que pode comprometer tanto a eficiência energética quanto os benefícios econômicos e ambientais associados a esses sistemas. A compreensão das estratégias de manutenção

existentes e a proposição de recomendações embasadas em evidências tornam-se, portanto, fundamentais para superar tais obstáculos, atuando como ferramentas essenciais para assegurar a proteção do capital investido e garantir a viabilidade econômica do sistema por meio do retorno financeiro esperado (Portal Solar, 2025).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Analisar a influência das estratégias de manutenção preventiva, preditiva e corretiva no desempenho técnico e na viabilidade econômica de sistemas de microgeração fotovoltaica, fundamentando-se em estudos de caso reais.

1.1.2 Objetivos específicos

- Fundamentar teoricamente os conceitos de energia solar fotovoltaica e as tipologias de manutenção (preventiva, preditiva e corretiva) aplicadas à microgeração distribuída;
- Avaliar o desempenho técnico dos sistemas em estudo, correlacionando a geração mensal de energia com as práticas de manutenção adotadas em cada cenário;
- Analisar a viabilidade econômica de cada abordagem, mensurando custos operacionais (O&M), perdas financeiras por subgeração ou inatividade e o tempo de retorno do investimento (*payback*);
- Indicar diretrizes práticas para a gestão da manutenção em sistemas de microgeração, visando a maximização da performance técnica e a proteção do capital investido.

1.2 JUSTIFICATIVA

Embora a energia solar fotovoltaica tenha demonstrado um potencial significativo para a geração de energia limpa e renovável, além de suas vantagens inegáveis, sua eficiência e durabilidade estão diretamente ligadas à qualidade da manutenção, que muitas vezes é negligenciada ou tratada de maneira insuficiente.

Este estudo busca analisar como diferentes estratégias de manutenção afetam o desempenho e a vida útil dos sistemas de microgeração fotovoltaica, tomando como base os indicadores técnicos e financeiros comparativos. Ao analisar como as manutenções preventiva, preditiva e corretiva impactam a produção de energia e os custos operacionais, busca-se assegurar a viabilidade e o retorno do investimento realizado. O resultado desse estudo pode oferecer orientações valiosas para melhorar a qualidade e confiabilidade dos sistemas de microgeração, garantindo a proteção do capital aplicado e a eficiência energética a longo prazo.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este capítulo introdutório fornece uma visão clara sobre o tema e ressalta o papel significativo da manutenção eficaz para garantir o desempenho operacional e a viabilidade econômica dos sistemas fotovoltaicos.

No segundo capítulo, é realizada a revisão de literatura, abordando a composição dos sistemas fotovoltaicos, os fatores que influenciam sua eficiência e as diferentes estratégias de manutenção (preventiva, preditiva e corretiva) aplicáveis para preservar e otimizar a operação de seus componentes vitais.

O terceiro capítulo descreve a metodologia adotada, detalhando a classificação da pesquisa, os procedimentos de coleta de dados nos portais de monitoramento e os critérios utilizados para a análise técnica e financeira dos estudos de caso.

No quarto capítulo, são apresentados e analisados os estudos de caso de forma detalhada, promovendo a discussão e a análise comparativa das práticas de manutenção aplicadas com os resultados de geração de energia e o retorno do capital investido.

Por fim, no quinto capítulo, são apresentadas as conclusões a partir dos resultados obtidos, destacando as considerações finais e recomendações práticas para a gestão proativa dos ativos.

2 SISTEMAS DE MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA E ESTRATÉGIAS DE MANUTENÇÃO

A inserção e a expansão da microgeração distribuída no cenário energético brasileiro impulsionaram-se a partir de regulamentações específicas que permitiram ao consumidor gerar sua própria energia, ambiente que foi recentemente consolidado pelo marco legal instituído por meio da Lei nº 14.300/2022 (Brasil, 2022). Nesse contexto de transição para fontes renováveis, os sistemas fotovoltaicos ganham destaque por sua viabilidade técnica e modularidade, operando de forma a converter diretamente a radiação solar em energia elétrica utilizável (Pinho; Galdino, 2014).

Contudo, para que seja possível analisar as falhas operacionais e os impactos econômicos decorrentes da falta de gerenciamento eficiente desses ativos, faz-se necessário, primeiramente, compreender a função de cada componente físico que integra o sistema, bem como as diretrizes e modalidades de manutenção aplicáveis.

2.1 COMPONENTES DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

Conhecidos comercialmente como sistemas *on-grid*, os sistemas de microgeração fotovoltaica conectados à rede operam em constante paralelismo com a infraestrutura da concessionária local. A viabilidade técnica dessa tecnologia fundamenta-se na integração de um conjunto de equipamentos projetados com funções bastante específicas: a captação da radiação solar, a conversão da energia e a proteção dos circuitos (Villalva, 2015). Entender o papel de cada um desses elementos é fundamental, pois é o seu funcionamento harmônico que garante a máxima eficiência energética do arranjo e o atendimento aos rigorosos critérios de segurança estabelecidos pelas normas técnicas brasileiras (Pinho; Galdino, 2014).

2.1.1 Módulos fotovoltaicos

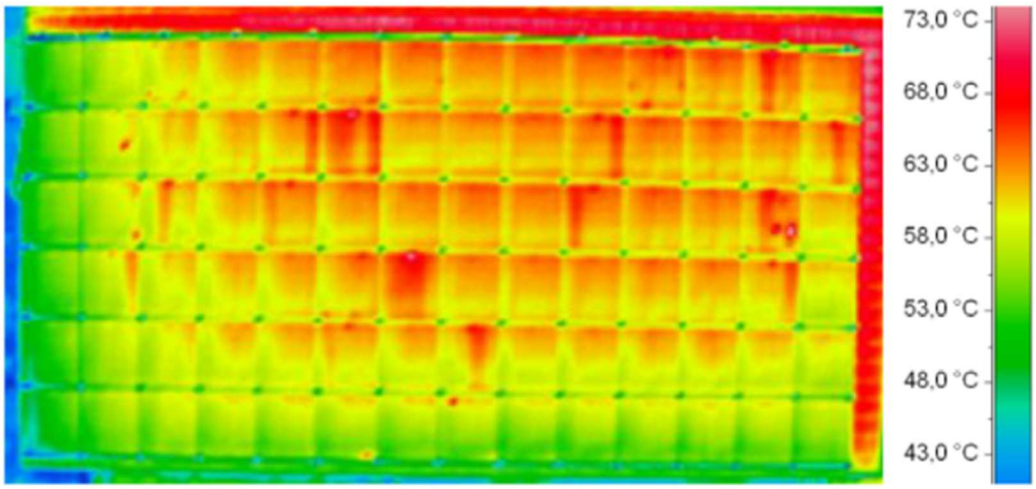
Os módulos fotovoltaicos são os componentes responsáveis pela conversão direta da energia luminosa proveniente do Sol em energia elétrica em corrente contínua (CC). Essa conversão ocorre no interior das células fotovoltaicas, que são dispositivos semicondutores — majoritariamente produzidos a partir do silício purificado — que operam com base no efeito fotovoltaico (Villalva, 2015). Quando expostas à radiação,

essas células geram uma diferença de potencial elétrico, permitindo a circulação de elétrons e a consequente geração de corrente (Pinho; Galdino, 2014).

O panorama tecnológico desses equipamentos passou por uma rápida evolução voltada ao aumento da eficiência de conversão. Atualmente, além das estruturas monocristalinas convencionais, viabilizou-se a aplicação em larga escala de tecnologias de alta eficiência, como os módulos bifaciais. Esses dispositivos são projetados para absorver a radiação solar direta em sua face superior e, simultaneamente, captar a radiação refletida pelas superfícies adjacentes (albedo) em sua face inferior, elevando o rendimento energético global do sistema (Ferruzzi, 2023).

Apesar dessa robustez tecnológica, as células operam conectadas em série e sofrem interferência direta das condições ambientais. Dessa forma, a ocorrência de sombreamentos ou o acúmulo de sujidade, como poeira e salitre, atua como uma barreira óptica que bloqueia a passagem da luz e reduz a tensão elétrica. Segundo Souza (2021), a obstrução parcial gera uma diferença de corrente entre as células, fenômeno conhecido como *mismatch*. Essa condição força o desvio da corrente para a célula obstruída, que passa a operar de forma reversa, dissipando a energia não produzida em forma de calor. O aumento severo dessa temperatura localizada resulta na formação dos chamados *hot spots* (pontos quentes), conforme ilustrado na Figura 1, uma anomalia que, além de comprometer a geração de energia, eleva o risco de ruptura do vidro de proteção e degradação prematura do módulo.

Figura 1 – Termograma de um módulo fotovoltaico com *mismatch* causado por sombreamento



Fonte: Ecori Energia Solar (2019 apud Souza, 2021, p. 29)

2.1.2 Inversores para conexão à rede

A energia elétrica gerada pelos módulos fotovoltaicos flui na forma de corrente contínua (CC), impossibilitando o seu uso direto ou a sua injeção na infraestrutura da concessionária. Para realizar essa adequação, o sistema depende do inversor, equipamento que atua como o elemento central de controle nas plantas de microgeração fotovoltaica. A sua função primária consiste em converter a energia em corrente alternada (CA) senoidal, equalizando tensão e frequência para torná-la síncrona com a rede local. Além disso, o equipamento tem integrado o algoritmo de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (do inglês, *Maximum Power Point Tracking* - MPPT), um mecanismo que ajusta continuamente a impedância de entrada para extrair a máxima potência do arranjo fotovoltaico, mitigando perdas por variações de irradiância e temperatura (Villalva, 2015).

No âmbito comercial, destacam-se os inversores de *string* (cadeia), que concentram a potência de múltiplos arranjos de módulos conectados em série (Souza, 2021). Esse equipamento desempenha um papel inegociável na segurança operativa. Ele realiza a varredura contínua dos parâmetros da rede de distribuição. Diante de distúrbios de qualidade de energia por parte da concessionária — como flutuações de frequência ou sobretensões transitórias (surtos) —, os mecanismos de proteção do inversor cessam imediatamente a injeção de potência. O equipamento se desconecta por segurança, registrando eventos de falhas operacionais em sua interface com a rede (Pinho; Galdino, 2014).

Além da vulnerabilidade elétrica às oscilações da concessionária, o inversor é o componente mais sensível às intempéries ambientais. A operação contínua em altas potências gera calor que precisa ser rigorosamente dissipado. O acúmulo de sujidade em suas estruturas de ventilação, conforme exemplificado na Figura 2, atua como um isolante térmico, elevando a temperatura interna. Para se proteger, o equipamento entra em estado de *derating*, que significa a redução da potência de saída visando manter a temperatura interna dos componentes (Souza, 2021). Ademais, a submissão prolongada do inversor a níveis críticos de temperatura não apenas gera perdas diretas na eficiência de conversão, mas acelera a degradação de seus componentes internos, reduzindo a vida útil do equipamento e comprometendo a viabilidade financeira do projeto (Silva; Barbosa; Melo, 2024).

Figura 2 – Sujidades na entrada do cooler do inversor fotovoltaico



Fonte: Todeschini (2017 apud Souza, 2021, p. 35)

2.1.3 Dispositivos de proteção e seccionamento

Para salvaguardar a integridade física dos equipamentos e das instalações contra curtos-circuitos e sobretensões, bem como garantir a segurança das pessoas e animais a choques elétricos, a infraestrutura do sistema exige o uso de quadros de proteção rigorosamente divididos entre os estágios de corrente contínua (CC) e corrente alternada (CA).

No estágio CC, posicionado entre os módulos e o inversor, utiliza-se a caixa de junção, comercialmente conhecida como *string box*. Esse invólucro centraliza a conexão das fileiras de painéis e abriga chaves seccionadoras e fusíveis rápidos, dimensionados para interromper o fluxo em caso de anomalias. Já no estágio CA, a jusante do inversor, utilizam-se quadros de proteção contendo disjuntores termomagnéticos para o seccionamento do circuito que interliga a geração à rede da concessionária (Villalva, 2015).

Dentre os componentes de segurança abrigados nesses quadros, o Dispositivo de Proteção contra Surtos (DPS) atua como o principal mecanismo de proteção contra picos anormais de tensão. A sua função é servir como uma barreira de sacrifício: ao detectar sobretensões transitórias — decorrentes de descargas atmosféricas ou distúrbios severos na rede de distribuição —, o DPS desvia a alta corrente de surto diretamente para o sistema de aterramento, impedindo que ela atinja e destrua as placas eletrônicas sensíveis do inversor (Pinho; Galdino, 2014).

A eficácia desse mecanismo, contudo, é estritamente dependente de rotinas operacionais. Por atuar absorvendo os impactos, o DPS possui uma vida útil limitada, dispondo de um indicador visual frontal que altera sua coloração quando o componente entra em estado de queima e perde sua capacidade protetiva. Conforme as diretrizes de Souza (2021), a inspeção visual periódica e a substituição imediata dos dispositivos atuados são ações de manutenção preventiva indispensáveis. A negligência na troca de um DPS inoperante anula a segurança da planta, deixando o inversor completamente vulnerável a surtos subsequentes, cenário que invariavelmente resulta na queima de seus componentes internos e em perdas financeiras expressivas.

2.1.4 Estruturas de suporte e fixação

As estruturas de suporte e fixação, conforme ilustrado na Figura 3, constituem a base mecânica indispensável para o arranjo fotovoltaico. A sua função primária consiste em garantir a rigidez de todo o conjunto contra esforços mecânicos externos, predominantemente as cargas dinâmicas exercidas pela ação dos ventos (Pinho; Galdino, 2014). Adicionalmente, as estruturas desempenham um papel geométrico crucial: elas determinam o ângulo de inclinação e a orientação azimutal dos painéis — idealmente direcionada ao Norte geográfico no hemisfério Sul —, maximizando a captação da radiação solar e favorecendo o escoamento natural de água pluvial para a autolimpeza dos vidros (Villalva, 2015).

Os materiais empregados na fabricação dessas estruturas variam conforme o local de instalação, destacando-se o alumínio anodizado e o aço galvanizado devido à elevada resistência mecânica. Essa robustez material é especialmente crítica em projetos instalados em regiões litorâneas, onde a alta deposição de névoa salina (*salitre*) atua como um agente altamente corrosivo, capaz de acelerar a oxidação e degradar as interfaces metálicas (Pinho; Galdino, 2014).

Sob a ótica da manutenção preventiva e preditiva, a intervenção humana torna-se obrigatória para garantir a segurança da planta diante desse desgaste ambiental contínuo. Conforme as diretrizes de Souza (2021), o plano de manutenção exige vistorias periódicas focadas na identificação de corrosão e no reaperto do torque de conexões mecânicas (grampos e parafusos). A negligência dessa rotina resulta no afrouxamento e na trepidação dos módulos, elevando os riscos de microfissuras. Além do reaperto mecânico,

faz-se imperativa a aferição da continuidade do sistema de aterramento interligado à estrutura de alumínio, em conformidade com os ensaios estipulados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2009), ação fundamental para mitigar acidentes por falhas de isolamento elétrico.

Figura 3 – Estrutura de suporte metálica instalada em telhado de telha cerâmica durante o processo de montagem dos módulos fotovoltaicos



Fonte: Elaboração própria (2025)

2.1.5 Sistemas de monitoramento e supervisão

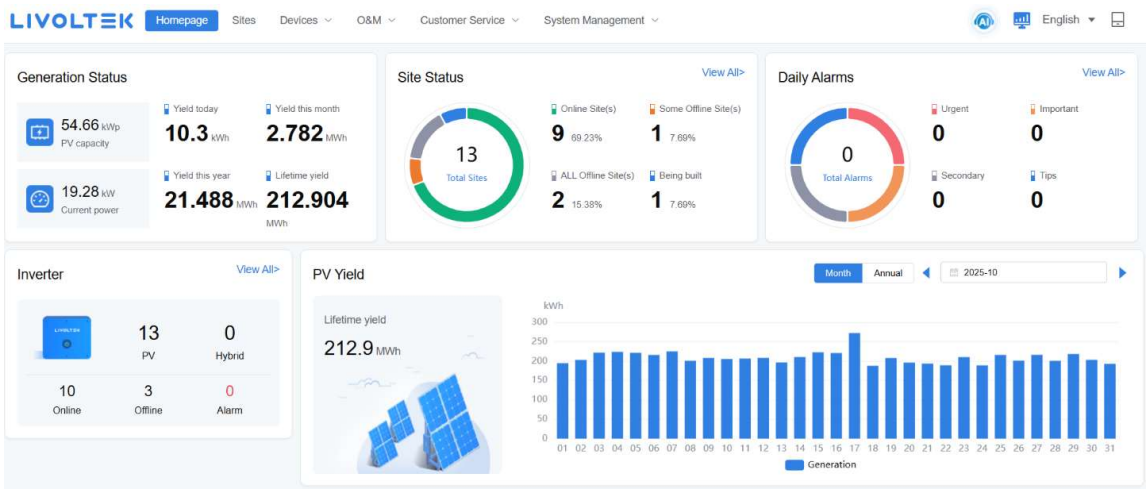
Os sistemas de monitoramento e supervisão constituem a inteligência de controle da planta fotovoltaica, atuando na aquisição, processamento e disponibilização contínua dos dados operacionais. A estrutura básica de telemetria baseia-se na capacidade eletrônica do próprio inversor de mensurar e registrar, em tempo real, as variáveis elétricas fundamentais, como a tensão e corrente em corrente contínua (CC), a potência ativa injetada em corrente alternada (CA), a frequência da rede e o fator de potência (Villalva, 2015). Em usinas de maior complexidade, esse ecossistema de *hardware* pode ser complementado por estações meteorológicas locais contendo piranômetros para

medição da irradiância solar e sensores de temperatura acoplados à face inferior dos módulos (Pinho; Galdino, 2014).

Os dados coletados localmente são transmitidos para servidores de armazenamento em nuvem por meio de interfaces de comunicação integradas, utilizando protocolos de rede via conexões sem fio (Wi-Fi), cabeadas (Ethernet) ou redes móveis (4G). Uma vez processadas, essas informações são consolidadas em plataformas de supervisão e aplicativos dedicados, que convertem os registros brutos em curvas de carga e gráficos históricos de desempenho (Villalva, 2015). Essa interface digital, conforme exemplificado na Figura 4, permite que o operador acompanhe a produção da usina em tempo real, facilitando a visualização de indicadores como a Taxa de Desempenho (*Performance Ratio*), que compara a geração real com a produtividade teórica estimada para as condições do local (Pinho; Galdino, 2014).

Sob a perspectiva da gestão de ativos e da engenharia de manutenção, o monitoramento ativo atua como uma ferramenta preditiva primordial. Conforme as diretrizes de Souza (2021), a identificação remota de anomalias abruptas — como códigos de erro de interface de rede — ou desvios graduais na curva de potência causados pelo acúmulo de sujidade possibilita a rápida tomada de decisão pelo gestor. A integração de alarmes e notificações automáticas minimiza o tempo de inatividade da planta (*downtime*), sendo um fator decisivo para mitigar perdas financeiras severas decorrentes de falhas que, sem a devida supervisão, poderiam passar despercebidas por longos períodos.

Figura 4 – Interface digital da plataforma de monitoramento livoltek exibindo dados de geração fotovoltaica



Fonte: Elaboração própria (2025)

2.2 ESTRATÉGIAS DE MANUTENÇÃO APLICADAS AO SETOR FOTOVOLTAICO

A viabilidade técnica e o retorno econômico de projetos de microgeração fotovoltaica dependem estritamente da garantia de sua integridade operativa ao longo do horizonte de planejamento, estimado em 25 anos. Embora esses sistemas operem de forma estática e automatizada, a exposição contínua a intempéries e a estresses elétricos severos impõe a necessidade de uma gestão estruturada de ativos. Nesse contexto, a manutenção é compreendida como o conjunto de atividades essenciais para preservar ou restaurar a capacidade operacional, deixando de ser vista como um centro de custos inevitável para se tornar uma função estratégica destinada a maximizar a disponibilidade dos equipamentos, garantir a segurança das instalações e assegurar a qualidade do desempenho energético, resultando diretamente na redução de custos operacionais e na maximização do lucro financeiro da organização (Kardec; Nascif, 2009).

Para o setor solar, a definição da melhor intervenção técnica deve ser fundamentada nas recomendações dos fabricantes, na agressividade ambiental do local e no impacto econômico da subgeração de energia. A aplicação de um plano de manutenção estruturado atua como uma ferramenta de engenharia essencial para otimizar o índice de desempenho global (*Performance Ratio*) e garantir que a receita gerada cubra o capital investido. Dentro dessa perspectiva de gestão, a literatura técnica categoriza as ações de intervenção em três tipologias principais, que serão detalhadas a seguir: preventiva, preditiva e corretiva (Souza, 2021).

2.2.1 Manutenção preventiva

A manutenção preventiva caracteriza-se como o conjunto de intervenções técnicas planejadas, sistemáticas e executadas em intervalos de tempo predeterminados, com o objetivo fundamental de reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do desempenho de um equipamento (ABNT, 1994; Kardec; Nascif, 2009). Diferente das ações reativas, essa abordagem baseia-se em um cronograma estrito de atividades que opera de forma proativa para estender a vida útil dos componentes eletrônicos e mecânicos. No setor fotovoltaico, Souza (2021) destaca que a elaboração do plano de manutenção deve harmonizar as diretrizes dos fabricantes com o histórico operativo da planta, mitigando

os efeitos do desgaste natural e das intempéries antes que estes evoluam para uma interrupção forçada do sistema.

Na engenharia de usinas solares, as principais atividades de caráter preventivo compreendem a lavagem periódica dos módulos para a remoção de poeira e dejetos, além do controle da vegetação no entorno para evitar o sombreamento parcial das células (Souza, 2021). Sob o aspecto eletromecânico, a preventiva engloba a inspeção do torque de parafusos nas estruturas de fixação e a verificação visual da integridade dos cabos expostos à radiação ultravioleta. Conforme orientam Pinho e Galdino (2014), o reaperto das conexões elétricas nos quadros de proteção é vital para mitigar o surgimento de resistências de contato, as quais provocam perdas por efeito Joule e riscos de incêndio.

A eficácia dessa modalidade está diretamente ligada à regularidade de sua execução e à adequação da frequência de intervenção à agressividade do ambiente de instalação. De acordo com as prescrições de segurança da ABNT (2004), as rotinas preventivas devem ser conduzidas de forma que toda verificação, ensaio ou reparo ocorra de maneira fácil e segura, assegurando a confiabilidade dos componentes ao longo de décadas. A adoção rigorosa dessa estratégia garante que o índice de desempenho da planta permaneça próximo às condições nominais de projeto, sendo o caminho mais eficiente para buscar estabilidade produtiva e previsibilidade orçamentária (Souza, 2021).

2.2.2 Manutenção preditiva

A manutenção preditiva, também denominada manutenção baseada no estado ou na condição, diferencia-se por fundamentar-se no acompanhamento contínuo e sistemático dos parâmetros operacionais para prever o momento exato em que uma falha pode ocorrer (Kardec; Nascif, 2009). Diferente da abordagem preventiva, que atua com base em cronogramas fixos de tempo, a estratégia preditiva utiliza o monitoramento de dados em tempo real e técnicas de inspeção não destrutivas para avaliar a degradação real do ativo. Segundo Souza (2021), esse modelo visa maximizar a disponibilidade da planta e reduzir custos operacionais, permitindo que as intervenções técnicas ocorram apenas quando os indicadores apontarem uma tendência de desvio, trocando-se componentes somente no limite de sua capacidade operativa.

No cenário da microgeração fotovoltaica, a engenharia preditiva apoia-se fortemente na telemetria para a análise da Taxa de Desempenho (*Performance Ratio*), que compara a geração real com a produtividade teórica estimada para as condições

climáticas do local. Conforme apontam Pinho e Galdino (2014), a identificação remota de desvios graduais na curva de carga, causados frequentemente por acúmulo de sujidade ou sombreamentos, permite ao gestor diagnosticar perdas precocemente e planejar a limpeza técnica no momento exato em que o custo da intervenção é compensado pelo ganho energético recuperado.

Complementarmente ao monitoramento de dados, a termografia infravermelha desponta como um ensaio tecnológico indispensável nesta tipologia de manutenção. A realização de inspeções termográficas possibilita a identificação de gradientes anômalos de temperatura na superfície dos módulos fotovoltaicos, revelando a presença de células em curto-circuito (*hot spots*) oriundas do efeito *mismatch* (Souza, 2021). Além dos painéis, o uso de câmeras térmicas estende-se aos quadros elétricos e inversores para detectar conexões frouxas ou sobrecargas antes que provoquem falhas catastróficas ou incêndios, atuando como uma ferramenta estratégica que protege o capital investido de forma proativa e altamente tecnológica (Souza, 2021).

2.2.3 Manutenção corretiva

A manutenção corretiva caracteriza-se pelo conjunto de ações técnicas executadas com o intuito de restaurar a capacidade operacional de um equipamento ou sistema que já se encontra em estado de pane, falha ou colapso funcional (ABNT, 1994). Por definição, trata-se de uma abordagem reativa e, na maioria dos cenários práticos, emergencial. Na gestão de ativos, a dependência exclusiva dessa estratégia é considerada economicamente desvantajosa, visto que as intervenções ocorrem sob condições de urgência, resultando em custos elevados com sobressalentes, mobilização técnica e indisponibilidade prolongada da planta (Viana, 2006 apud Souza, 2021).

No contexto da geração fotovoltaica, Souza (2021) destaca que esta metodologia pode ser subdividida em duas categorias: a planejada e a não-planejada. A corretiva planejada ocorre quando se opta estrategicamente por operar um equipamento de baixo custo (como fusíveis de *string box*) até a sua falha total, mantendo peças em estoque para um reparo rápido. Já a corretiva não-planejada manifesta-se na necessidade de substituição de componentes severamente danificados por eventos externos ou negligência técnica, tais como inversores com placas eletrônicas internas queimadas por surtos elétricos, módulos trincados por impactos mecânicos ou quadros com Dispositivos de Proteção Contra Surtos (DPS) inutilizados após a atuação.

A ocorrência frequente de intervenções emergenciais em uma usina solar é um indicador direto de falhas ou omissões nos planos de manutenção preventiva. A gravidade dessa reatividade não se limita ao custo direto do reparo, sendo severamente agravada pelo lucro cessante durante o *downtime* (tempo de inatividade). Esse período representa energia que deixa de ser injetada na rede e créditos financeiros que cessam sua compensação, expondo o proprietário a prejuízos substanciais. Ademais, conforme as diretrizes de segurança da ABNT (2004) para instalações elétricas, qualquer parte do sistema que apresente anomalias ou coloque em risco a operação deve ser imediatamente desenergizada e submetida à reparação satisfatória antes de retornar ao serviço.

2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo demonstrou que o desempenho e a longevidade dos sistemas de microgeração fotovoltaica estão diretamente ligados à compreensão rigorosa de sua arquitetura e das variáveis externas que afetam sua eficiência operacional.

A fundamentação teórica demonstrou que a transição de um modelo de atuação puramente corretivo para abordagens preventivas e preditivas é crucial para mitigar perdas geradas por falhas de componentes, acúmulo de sujidade ou anomalias térmicas.

Dessa forma, consolida-se o entendimento de que a gestão estratégica da manutenção deixou de ser um custo acessório para se tornar o pilar central na proteção do ativo, fornecendo o embasamento teórico necessário para as análises práticas que serão conduzidas a seguir.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo, são apresentados os procedimentos metodológicos adotados para a realização deste trabalho. A pesquisa caracteriza-se como um estudo de caso múltiplo, com abordagem quantitativa e qualitativa, focado na análise do impacto das estratégias de manutenção no desempenho de sistemas fotovoltaicos reais (Gil, 2002; Yin, 2015).

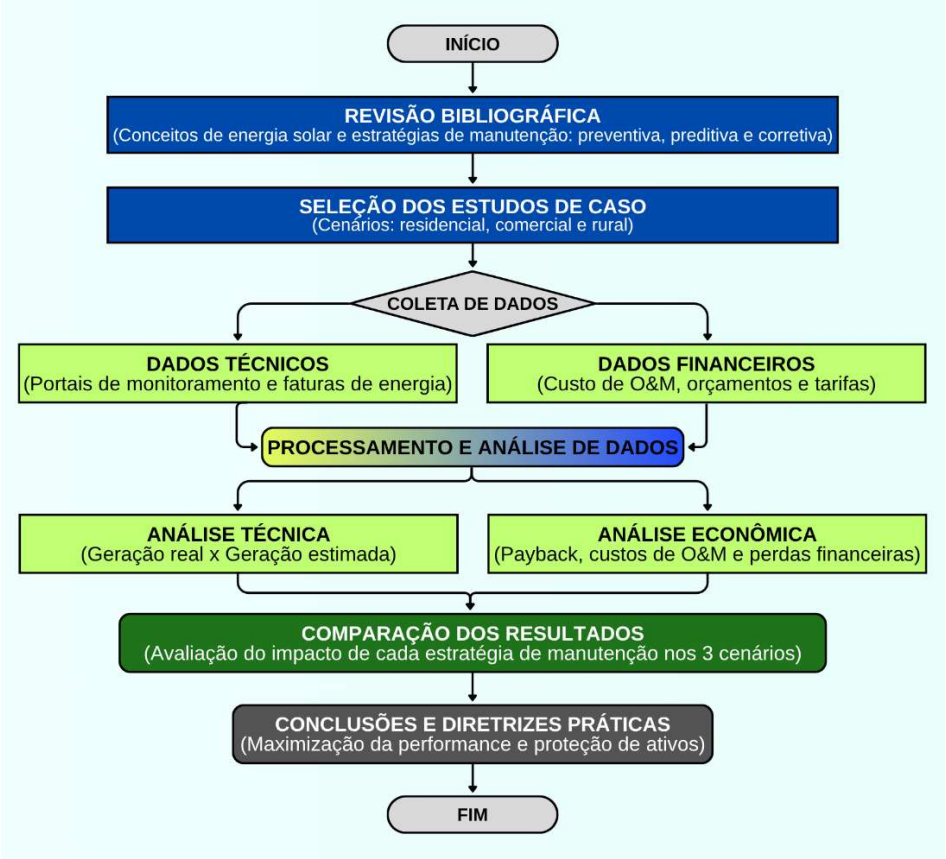
3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Quanto à sua natureza, esta pesquisa classifica-se como aplicada, pois objetiva gerar conhecimentos para a solução de problemas específicos na gestão de ativos fotovoltaicos. Do ponto de vista dos objetivos, é definida como uma pesquisa descritiva, uma vez que expõe as características e os resultados de desempenho dos sistemas analisados (Gil, 2002).

A estratégia principal é o estudo de caso, que, segundo Yin (2015), é o método indicado para investigar fenômenos contemporâneos em seu contexto real, permitindo uma análise profunda de eventos em que o pesquisador tem pouco controle sobre as variáveis.

Para permitir uma visualização clara do percurso científico adotado nesta investigação, a Figura 5 apresenta o fluxograma das etapas metodológicas. O processo inicia-se com a fundamentação teórica, avança para a coleta de dados nos portais de monitoramento de cada inversor e encerra-se com a análise comparativa entre o desempenho técnico e a viabilidade econômica dos casos selecionados.

Figura 5 – Fluxograma das etapas metodológicas da pesquisa



Fonte: Elaboração própria (2025)

3.2 OBJETO DE ESTUDO

Para a realização das análises, foram selecionados três sistemas de microgeração fotovoltaica com perfis de consumo e estratégias de manutenção distintos:

- **Caso 1 (Residencial):** Sistema operando sob manutenção preventiva sistemática;
- **Caso 2 (Comercial):** Sistema monitorado sob a ótica da manutenção preditiva;
- **Caso 3 (Rural):** Sistema que apresentou falhas devido à manutenção corretiva não planejada.

A Tabela 1 sintetiza as principais características dos sistemas que compõem o escopo desta pesquisa. Esta organização permite uma visão comparativa inicial sobre a localização, o perfil de carga e a estratégia de manutenção predominante em cada cenário,

fornecendo a base necessária para o detalhamento dos indicadores de desempenho apresentados nos capítulos subsequentes.

Tabela 1 – Resumo das características dos sistemas analisados

Identificação	Perfil de consumo	Localização	Estratégia de manutenção
Caso 1	Residencial	Maracanaú-CE	Preventiva
Caso 2	Comercial	Aquiraz-CE	Preditiva
Caso 3	Rural	Ocara-CE	Corretiva

Fonte – Elaboração própria (2025)

3.3 PROCEDIMENTOS DE COLETA E ANÁLISE DE DADOS

A escolha dos três sistemas que compõem os estudos de caso ocorreu por conveniência e acessibilidade aos dados operacionais, visando representar os cenários mais comuns de estratégias de manutenção (preventiva, preditiva e corretiva) aplicadas em diferentes perfis de consumo (residencial, comercial e rural).

A coleta de dados referentes à geração mensal de energia foi realizada de forma remota, extraindo-se as informações diretamente dos portais de monitoramento oficiais dos fabricantes dos inversores. O período de monitoramento variou de acordo com a data de comissionamento de cada instalação e a disponibilidade do histórico. Dessa forma, o Caso 1 (Residencial) foi monitorado ao longo de 36 meses (janeiro de 2022 a dezembro de 2024); o Caso 2 (Comercial) foi avaliado por um período de 29 meses (agosto de 2022 a dezembro de 2024); e o Caso 3 (Rural) teve seu histórico de dados extraído durante 30 meses (julho de 2022 a dezembro de 2024). Para a análise técnica, avaliou-se o desempenho contínuo e as quedas de eficiência ocasionadas por sujeira ou falhas operacionais, utilizando os dados de geração consolidados mês a mês.

Para a análise de viabilidade econômica e o cálculo do tempo de retorno do investimento inicial para a implantação do sistema fotovoltaico (*payback*), adotou-se o critério de economia gerada na fatura de energia. Utilizou-se como base uma tarifa média compensada estipulada em R$ 0,80 por kWh. Esse valor referencial empírico foi obtido a partir da média aritmética dos valores de compensação do kWh solar registrados nas faturas da concessionária local (Enel CE) emitidas para as unidades consumidoras durante

os anos monitorados, que variaram de R$ 0,74 em 2022 a R$ 0,84 em 2024. A economia bruta foi calculada conforme a Equação (1):

$$EB = Eg \times T \quad (1)$$

em que:
EB = Economia Bruta (R$);
Eg = Energia total gerada no período (kWh);
T = Tarifa compensada média de energia (R$/kWh).

Por fim, o impacto financeiro real das diferentes estratégias de manutenção foi mensurado subtraindo-se os custos diretos das intervenções operacionais da economia bruta gerada, resultando na economia líquida, conforme a (2):

$$EL = EB - C \quad (2)$$

em que:
EL = Economia Líquida (R$);
EB = Economia Bruta (R$);
C = Custos diretos de Operação e Manutenção (O&M) e reparos (R$).

Nos cenários de manutenção preditiva tardia e corretiva por omissão, também foi calculado o "lucro cessante", estimado a partir da diferença entre o potencial de geração do sistema e a energia efetivamente gerada (ou não gerada) durante os períodos de inatividade e perda de eficiência.

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A estrutura metodológica delineada neste capítulo estabeleceu o rigor científico e técnico necessário para a avaliação das estratégias de manutenção nos sistemas propostos.

A definição de uma pesquisa ancorada em estudos de caso reais, aliada à coleta sistemática de dados de geração diretamente nos portais de monitoramento dos inversores, garantiu a construção de um cenário empírico sólido.

Com os parâmetros de análise técnica e os critérios de viabilidade financeira devidamente estabelecidos, a metodologia fornece as métricas adequadas para a correlação exata entre as práticas de manutenção e a rentabilidade, resultados estes que serão apresentados e discutidos detalhadamente no capítulo subsequente.

4 ESTUDOS DE CASO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

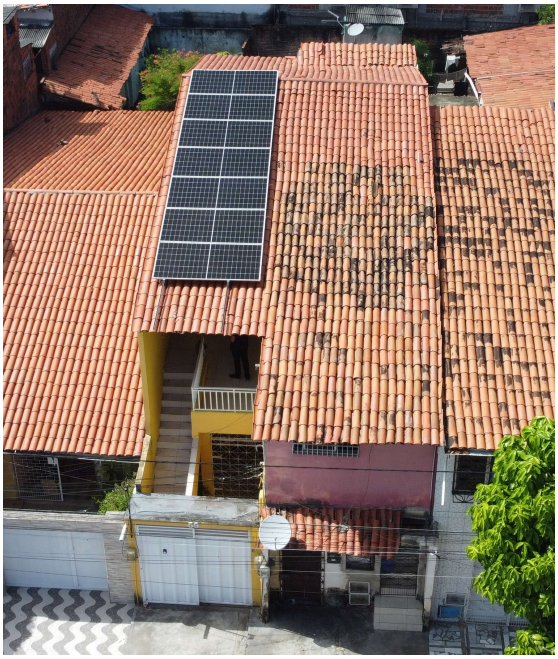
Neste capítulo, são apresentados os estudos de caso que motivaram a realização deste trabalho. A apresentação de cada caso foi estruturada em três subseções principais: a primeira descreve as especificidades do sistema, incluindo informações sobre a localização e a capacidade instalada; a segunda aborda as estratégias de manutenção adotadas; e a terceira discute o desempenho técnico a partir dos dados mensais de geração de energia. Após a exposição individual dos três cenários, é apresentada uma análise comparativa global das práticas de manutenção e uma síntese da viabilidade econômica, avaliando o impacto financeiro e o tempo de retorno do investimento (*payback*) em cada abordagem. Por fim, o capítulo é encerrado com as considerações finais, que consolidam os principais achados da discussão.

4.1 SISTEMA FOTOVOLTAICO RESIDENCIAL

4.1.1 Descrição do sistema

O sistema fotovoltaico residencial analisado está instalado em uma residência localizada em Maracanaú, Ceará. Este sistema é composto por 7 módulos fotovoltaicos de 575 W cada, conforme ilustrado na Figura 6, totalizando uma capacidade instalada de 4,025 kWp. O sistema também conta com um inversor string de 3 kW da marca livoltek (Figura 7), que é responsável por converter a energia gerada pelos painéis solares em energia elétrica utilizável para a residência.

Figura 6 – Módulos fotovoltaicos de 575 W instalados na residência



Fonte: Elaboração própria (2025)

Figura 7 – Inversor string de 3 kW do sistema residencial



Fonte: Elaboração própria (2025)

A instalação do sistema foi realizada em janeiro de 2022, e desde então, ele tem contribuído significativamente para a economia na conta de energia elétrica na residência.

O projeto foi dimensionado para atender o consumo energético do imóvel, aproveitando a alta irradiação solar da região, que é favorável para a geração de energia solar fotovoltaica.

4.1.2 Estratégias de manutenção

Para garantir a eficiência e a longevidade do sistema fotovoltaico residencial em Maracanaú-CE, foram realizadas três manutenções preventivas ao longo do período de operação do sistema, em setembro de 2022, setembro de 2023 e julho de 2024. A definição dessa periodicidade foi estabelecida de acordo com as orientações técnicas da empresa contratada, com o objetivo de assegurar o máximo ganho de eficiência energética e a proteção do ativo. As atividades realizadas durante essas manutenções incluíram: limpeza dos módulos e do inversor e verificação da integridade dos cabos.

A limpeza dos módulos fotovoltaicos foi realizada para remover sujeira, poeira e detritos que poderiam obstruir a captação de luz solar. Essa atividade foi feita com água destilada e materiais não abrasivos, assegurando que a superfície dos painéis permanecesse intacta e eficiente na conversão da luz solar em energia elétrica.

O inversor também passou por uma limpeza cuidadosa para remover poeira acumulada em sua superfície. Além disso, foram verificados as luzes indicadoras e os parâmetros de funcionamento do equipamento, assegurando que estivesse operando dentro das especificações recomendadas pelo fabricante.

Durante as manutenções, foi feita uma inspeção minuciosa dos cabeamentos de corrente contínua (CC) e corrente alternada (CA). Essa verificação incluiu a checagem de conexões, isolamento e integridade dos cabos para garantir que não houvesse danos ou desgastes que pudessem comprometer a eficiência do sistema ou causar falhas elétricas.

4.1.3 Desempenho e resultados

O desempenho do sistema fotovoltaico residencial em Maracanaú-CE foi monitorado desde sua instalação em janeiro de 2022. Os resultados obtidos ao longo dos 36 meses de operação demonstram a eficiência e a eficácia do sistema na geração de energia elétrica.

A Tabela 2 apresenta a geração mensal de energia (em kWh) desde a instalação do sistema até dezembro de 2024:

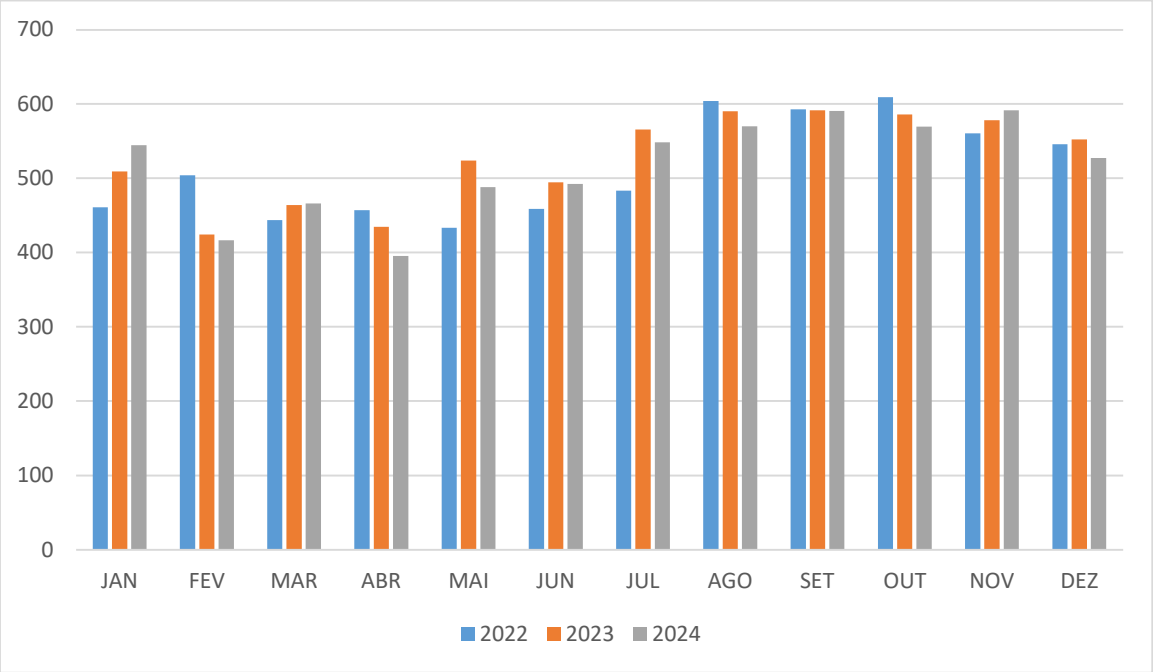
Tabela 2 – Comparativo de geração do sistema residencial

Mês/Ano	Geração (kWh) 2022	Geração (kWh) 2023	Geração (kWh) 2024
Jan	460,9	509,3	544,4
Fev	504,2	424,4	416,7
Mar	443,6	464	465,9
Abr	457,2	434,5	395,6
Mai	433,5	523,9	488,1
Jun	458,9	494,5	492,4
Jul	483,2	565,5	548,4
Ago	603,9	590,4	569,8
Set	592,9	591,4	590,5
Out	609,2	586	569,5
Nov	560,6	578,3	591,7
Dez	546	552,1	527,2

Fonte – Elaboração própria (2025)

Para facilitar a compreensão do comportamento energético, o Gráfico 1 ilustra a curva de geração mensal do sistema. É possível notar visualmente a constância e a estabilidade da produção, reflexo direto do rigor na aplicação da manutenção preventiva, que evitou quedas abruptas de desempenho ao longo do período analisado.

Gráfico 1 – Evolução mensal da geração de energia (Caso 1)



Fonte – Elaboração própria (2025)

Com base nos dados consolidados do período, compreendido entre janeiro de 2022 e dezembro de 2024, o sistema gerou um total acumulado de 18.668,6 kWh durante os 36 meses de operação. Esse volume corresponde a uma média de geração de 518,6 kWh/mês, demonstrando um desempenho técnico notavelmente consistente.

Para a análise do impacto financeiro e do tempo de retorno (*payback*), considerou-se a tarifa média de energia estabelecida na metodologia. Nesse cenário, a energia total gerada equivale a uma economia bruta de R$ 14.934,88 na fatura. Em relação aos custos, o investimento inicial (CAPEX) do sistema foi de R$ 12.000,00. Conforme detalhado na seção 4.1.2, foram realizadas três manutenções preventivas (setembro de 2022, setembro de 2023 e julho de 2024). Com um valor de R$ 450,00 por intervenção, as despesas operacionais (O&M) totalizaram R$ 1.350,00, elevando o custo total de propriedade (Investimento + O&M) nos três anos para R$ 13.350,00.

Ao descontar os custos de manutenção da economia bruta, constata-se que a economia líquida gerada pelo sistema no período foi de R$ 13.584,88 (R$ 14.934,88 subtraído de R$ 1.350,00). Essa análise demonstra que o retorno do investimento foi alcançado integralmente dentro da janela de estudo. Uma vez que a economia líquida superou o investimento inicial (R$ 12.000,00), atesta-se que o sistema quitou o seu próprio custo e já opera entregando um saldo financeiro positivo ao proprietário.

4.2 SISTEMA FOTOVOLTAICO COMERCIAL

4.2.1 Descrição do sistema

O segundo caso de estudo refere-se a um sistema de microgeração comercial instalado em uma barraca de praia no município de Aquiraz, Ceará. A usina entrou em operação em agosto de 2022 e possui uma potência instalada de 17,55 kWp, composta por 39 módulos bifaciais de 450 W. A conversão da energia é realizada por um inversor trifásico de 15 kW da marca RENAC, instalado em conjunto com uma estrutura de solo em madeira tratada. A disposição do sistema pode ser visualizada na Figura 8.

Figura 8 – Vista superior da planta fotovoltaica de 17,55 kWp em Aquiraz-CE



Fonte: Elaboração própria (2025)

4.2.2 Estratégias de manutenção

Neste estudo de caso, a estratégia adotada consistiu em uma adaptação prática do conceito de manutenção preditiva para a realidade da microgeração. Conforme definido por Souza (2021), a manutenção preditiva clássica requer o acompanhamento em tempo real por meio de sensores ou instrumentos de medição física acoplados aos equipamentos.

No entanto, devido à escala desta instalação, a abordagem baseou-se apenas na telemetria do monitoramento remoto, utilizando a análise das curvas de geração no portal do inversor como indicador principal, dispensando sensores físicos adicionais.

A operação da usina ocorreu de agosto de 2022 a dezembro de 2024, sem a contratação de uma empresa especializada para ações preventivas. Como o sistema não possuía mecanismos de alerta automático, o acompanhamento dependia da disciplina do próprio usuário. Essa dependência de uma observação manual do portal on-line, aliada à ausência de um acompanhamento diário profissional, fez com que a identificação da queda de eficiência fosse tardia. Consequentemente, as intervenções técnicas foram programadas apenas quando os indicadores já apontavam um declínio acentuado na geração, resultante do acúmulo de salitre e areia.

O gatilho para a manutenção ocorreu em dezembro de 2023, quando o monitoramento indicava uma geração abaixo da expectativa para o período de alta irradiância no Ceará. Visualmente, conforme a Figura 9, os módulos apresentavam uma camada densa de sujidade.

Figura 9 – Módulos fotovoltaicos apresentando alto índice de sujidade antes da manutenção preditiva



Fonte: Elaboração própria (2025)

A limpeza técnica, apresentada na Figura 10, foi realizada utilizando jato de água para a remoção inicial de resíduos sólidos, complementada por outros materiais específicos e não abrasivos para garantir a completa desobstrução das células sem danificar o vidro. A técnica visou recuperar o ganho bifacial, essencial para este projeto.

Figura 10 – Etapa de lavagem e remoção de resíduos com jato de água e materiais complementares



Fonte: Elaboração própria (2025)

Após a higienização, como demonstrado na Figura 11, verificou-se a integridade da face inferior dos módulos e da estrutura de suporte, garantindo que não houvesse depósitos de salitre ocultos que pudessem causar corrosão ou perda de albedo. Paralelamente à limpeza, foi realizada a manutenção preventiva nos componentes elétricos. Utilizou-se as ferramentas apropriadas (Figura 12) para verificar o aperto das conexões e a integridade dos cabos no quadro de disjuntores e DPS, prevenindo falhas por oxidação salina.

Figura 11 – Verificação da face inferior dos módulos e estrutura após limpeza



Fonte: Elaboração própria (2025)

Figura 12 – Inspeção dos dispositivos de proteção e aperto das conexões elétricas



Fonte: Elaboração própria (2025)

Com a conclusão dos serviços, sistema limpo e revisado, o inversor foi reativado (Figura 13). A limpeza do gabinete do inversor também foi realizada para garantir a troca térmica adequada do equipamento.

Figura 13 – Inversor RENAC limpo e operando após a intervenção de dezembro de 2023



Fonte: Elaboração própria (2025)

4.2.3 Desempenho e resultados

A análise do desempenho do sistema comercial em Aquiraz-CE compreende o período de agosto de 2022 a dezembro de 2024. A Tabela 3 sintetiza a produção energética mensal, demonstrando o impacto da sujidade e o efeito da intervenção técnica realizada em dezembro de 2023.

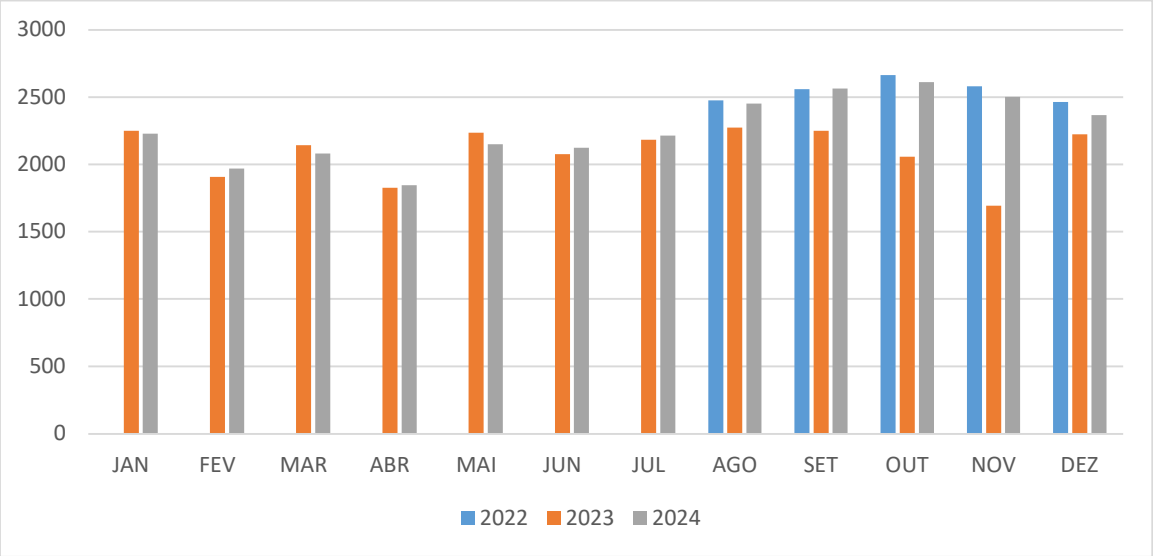
Tabela 3 – Comparativo de geração do sistema comercial

Mês/Ano	Geração (kWh) 2022	Geração (kWh) 2023	Geração (kWh) 2024
Jan	-	2.249,55	2.228,13
Fev	-	1.907,78	1.968,03
Mar	-	2.143,14	2.081,32
Abr	-	1.826,17	1.844,23
Mai	-	2.234,53	2.150,29
Jun	-	2.076,20	2.122,95
Jul	-	2.182,91	2.214,55
Ago	2.476,19	2.273,14	2.451,43
Set	2.557,17	2.250,31	2.563,24
Out	2.662,70	2.056,13	2.609,45
Nov	2.579,26	1.693,28	2.501,88
Dez	2.463,92	2.222,70	2.365,36

Fonte – Elaboração própria (2025)

O impacto do acúmulo de sujidade e a posterior recuperação do sistema após a intervenção preditiva pode ser observado no Gráfico 2. A representação gráfica ilustra o declínio gradativo da curva de geração nos meses que antecederam a limpeza técnica e a retomada do potencial de produção logo após a ação de manutenção.

Gráfico 2 – Evolução mensal da geração de energia (Caso 2)



Fonte – Elaboração própria (2025)

O investimento inicial (CAPEX) para o sistema de 17,55 kWp foi de R$ 68.000,00. Em termos de desempenho, a geração total acumulada no período foi de 64.995,94 kWh, o que proporcionou uma economia bruta de R$ 51.964,75. Ao reduzir os custos de Operação e Manutenção (O&M), que totalizaram R$ 2.340,00 referentes à manutenção preditiva realizada em dezembro de 2023, o sistema alcançou uma economia líquida de R$ 49.624,75.

A análise indica que o acúmulo de sujeira impactou diretamente a receita. No trimestre anterior à manutenção (set/out/nov de 2023), a subgeração em relação ao potencial demonstrado em 2024, ocasionada pela identificação tardia da queda de eficiência por parte do usuário, gerou uma perda financeira de aproximadamente R$ 1.339,88. Somada ao custo direto da intervenção (R$ 2.340,00), o impacto total da degradação de performance foi de R$ 3.679,88.

A recuperação da geração após a manutenção técnica demonstra a eficácia da intervenção para restabelecer a eficiência nominal do sistema, garantindo a continuidade do fluxo de caixa previsto para a amortização do investimento.

4.3 SISTEMA FOTOVOLTAICO RURAL

4.3.1 Descrição do sistema

O terceiro estudo de caso analisa uma unidade de microgeração fotovoltaica instalada em uma propriedade rural no município de Ocara, Ceará, voltada para a atividade de piscicultura. O sistema foi projetado com o objetivo de reduzir os elevados custos operacionais com energia elétrica, uma vez que a criação de peixes em tanques elevados exige o funcionamento ininterrupto de equipamentos de alta demanda energética, como aeradores e bombas de recirculação de água.

A usina possui uma potência instalada de 23,435 kWp, composta por 43 módulos fotovoltaicos de 545 W e um inversor da marca Canadian Solar de 15 kW. Conforme ilustrado na Figura 14, o sistema utiliza uma estrutura fixa de solo, tendo sido instalado em junho de 2022, com o monitoramento da geração iniciado a partir de julho do mesmo ano.

Figura 14 – Vista aérea da planta fotovoltaica de 23,435 kWp integrada aos tanques de piscicultura em Ocara-CE



Fonte: Elaboração própria (2025)

4.3.2 Estratégias de manutenção

Neste sistema, a gestão de ativos não seguiu um planejamento estruturado. A adoção de uma manutenção corretiva não ocorreu por uma decisão técnica deliberada, mas sim como uma consequência direta da ausência de um plano de manutenção

preventiva. Ao optar por não realizar intervenções periódicas e limpezas sistemáticas, o proprietário expôs o sistema a um estado de vulnerabilidade operacional.

Este cenário foi significativamente agravado pela omissão no monitoramento remoto. Embora o sistema possua ferramentas de acompanhamento de dados, a falta de verificação periódica impediu a detecção precoce da falha, resultando em um longo período de inatividade. O histórico do evento e o processo de reparo são detalhados a seguir:

- **Ocorrência e Omissão:** O sistema interrompeu a produção de energia no dia 24 de agosto de 2023. Por falta de acompanhamento do monitoramento por parte do proprietário, o mesmo só identificou a interrupção em dezembro de 2023, após o esgotamento total dos créditos acumulados e o retorno de faturas com valores elevados;
- **Diagnóstico e Trâmite de Garantia:** Em visita técnica realizada no dia 13 de dezembro de 2023, constatou-se o erro "GRID-INTF" (*Grid Interference* / Interferência da Rede) no inversor (Figura 15). Nesta etapa, foi realizado o diagnóstico inicial e todos os testes de campo solicitados pelo fabricante, gerando um custo de R$ 1.000,00 referente à visita técnica e gestão do processo logístico. Concluiu-se que o equipamento precisaria ser enviado para análise profunda no laboratório do fabricante, sendo então coletado pela assistência autorizada;

Figura 15 – Interface do inversor exibindo o status de erro "GRID-INTF" identificado durante a visita de diagnóstico



Fonte: Elaboração própria (2025)

- **Análise Técnica e Reprovação da Garantia:** Durante os testes na fábrica, o suporte informou que a falha foi causada por fatores externos, caracterizando mau uso por falta de proteção adequada. Identificou-se que surtos repetitivos na rede da concessionária danificaram internamente a placa CA do inversor, fato corroborado pela constatação de que os Dispositivos de Proteção contra Surtos (DPS) do sistema já estavam atuados (queimados), deixando o inversor vulnerável. Diante disso, a garantia foi reprovada, sendo cobrado o valor de R$ 1.500,00 para o reparo da placa e reenvio do equipamento;
- **Restauração:** O inversor reparado foi devolvido e reinstalado (Figura 16) no dia 06 de fevereiro de 2024. Na ocasião, realizou-se uma limpeza técnica nos módulos para remover a sujidade acumulada durante os meses de paralisação. O custo desta etapa final (reinstalação e limpeza) foi de R$ 2.500,00.

Figura 16 – Inversor Canadian Solar de 15 kW restabelecido e operando em regime pleno após manutenção corretiva



Fonte: Elaboração própria (2025)

4.3.3 Desempenho e resultados

O desempenho do sistema foi analisado de julho de 2022 a dezembro de 2024. A Tabela 4 apresenta o impacto financeiro da interrupção produtiva, indicando como a falta de uma rotina mínima de inspeção pode comprometer os benefícios do sistema.

Tabela 4 – Comparativo de geração do sistema rural

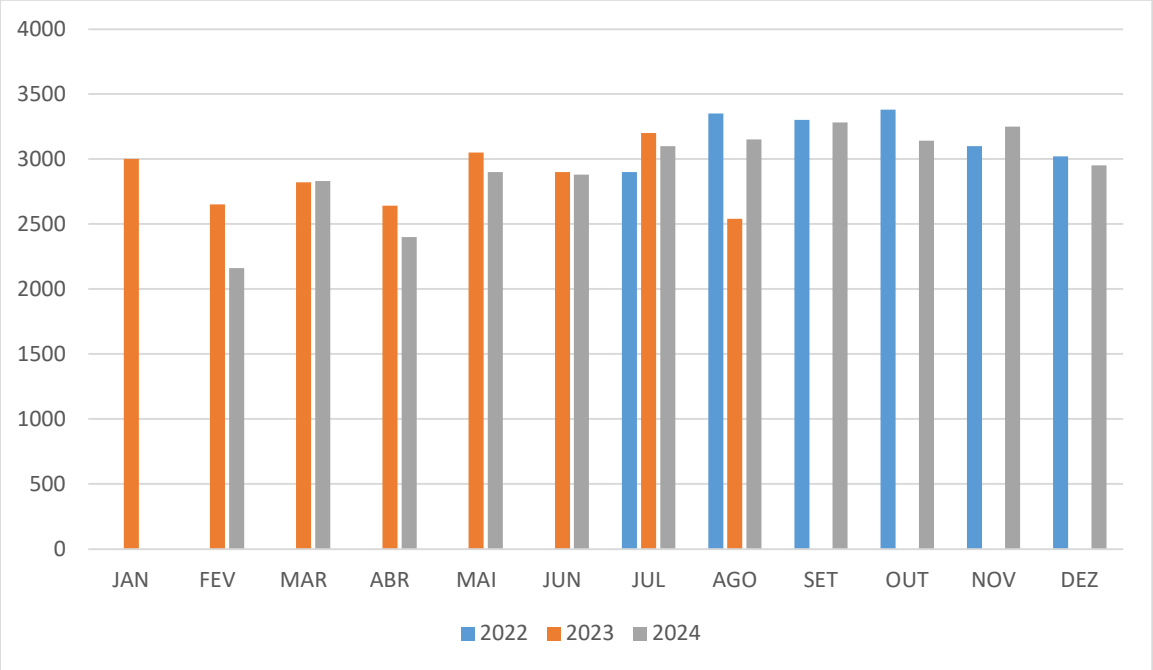
Mês/Ano	Geração (kWh) 2022	Geração (kWh) 2023	Geração (kWh) 2024
Jan	-	3.000	0,00 (Falha)
Fev	-	2.650	2.160*
Mar	-	2.820	2.830
Abr	-	2.640	2.400
Mai	-	3.050	2.900
Jun	-	2.900	2.880
Jul	2.900	3.200	3.100

Mês/Ano	Geração (kWh) 2022	Geração (kWh) 2023	Geração (kWh) 2024
Ago	3.350	2.540*	3.150
Set	3.300	0,00 (Falha)	3.280
Out	3.380	0,00 (Falha)	3.140
Nov	3.100	0,00 (Falha)	3.250
Dez	3.020	0,00 (Falha)	2.950
*Valores proporcionais aos dias operados.			

Fonte – Elaboração própria (2025)

O impacto da falha operacional motivada pela adoção de uma postura estritamente corretiva pode ser observado no Gráfico 3. A ausência de barras de geração entre os meses de agosto de 2023 e fevereiro de 2024 demonstra a inoperância do sistema, indicando a origem do prejuízo financeiro por lucro cessante discutido neste estudo.

Gráfico 3 – Evolução mensal da geração de energia (Caso 3)



Fonte – Elaboração própria (2025)

Considerando o investimento inicial (CAPEX) de R$ 97.790,00, os resultados obtidos indicam uma economia bruta gerada de R$ 58.312,00, referente aos 72.890 kWh

gerados. Em contrapartida, os custos diretos de manutenção (O&M) totalizaram R$ 5.000,00. Adicionalmente, verificou-se um lucro cessante (prejuízo) decorrente da inatividade do sistema entre agosto de 2023 e fevereiro de 2024, o qual resultou em uma perda energética de aproximadamente 16.810 kWh, totalizando um prejuízo direto de R$ 13.448,00

Os resultados indicam que a viabilidade econômica do sistema rural foi severamente comprometida pela ausência de uma cultura de manutenção preventiva. Se o sistema tivesse recebido uma inspeção periódica, os DPS atuados teriam sido identificados e substituídos a um baixo custo, evitando o dano interno ao inversor e a consequente perda de garantia. O impacto total (O&M + Lucro Cessante) somou R$ 18.448,00, valor que representa quase 19% do investimento inicial. Conclui-se que o monitoramento ativo e a manutenção preventiva são garantias essenciais para a proteção do capital investido em sistemas de microgeração.

4.4 COMPARATIVO DAS ESTRATÉGIAS DE MANUTENÇÃO

A análise comparativa entre os sistemas residencial, comercial e rural permitiu identificar que a eficácia de um sistema fotovoltaico não reside apenas na qualidade tecnológica de seus componentes, mas está diretamente ligada à estratégia de manutenção e à cultura de monitoramento adotada pelo proprietário. Para demonstrar essa relação, a síntese dos resultados financeiros e operacionais de cada abordagem encontra-se consolidada a seguir.

- **Manutenção Preventiva (Caso 1 - Maracanaú/CE):** Demonstrou ser a estratégia de maior previsibilidade e segurança. Ao realizar intervenções periódicas com custo total de O&M de R$ 1.350,00, o sistema manteve um desempenho consistente, garantindo o retorno do investimento (payback) dentro do período de 36 meses. A prevenção regular provou ser o caminho mais eficiente para sistemas de pequeno porte que buscam estabilidade a longo prazo.
- **Manutenção Preditiva (Caso 2 - Aquiraz/CE):** Revelou-se uma abordagem técnica que busca o equilíbrio entre custos e performance. Embora tenha reduzido a frequência de intervenções, a demora no acionamento do "gatilho" de limpeza em um ambiente de alta salinidade resultou em uma perda

financeira estimada em R$ 1.339,88 devido à subgeração por sujidade acumulada. A eficácia desta estratégia mostrou-se altamente dependente da disciplina do próprio usuário na observação ágil dos dados de monitoramento, evidenciando os riscos financeiros de não se possuir um contrato profissional de manutenção.

- **Manutenção Corretiva por Omissão (Caso 3 - Ocara/CE):** Representou o cenário de maior vulnerabilidade econômica. A ausência de um plano preventivo e a omissão no monitoramento transformaram uma falha técnica (erro GRID-INTF) em um prejuízo financeiro severo. Devido a surtos na rede que danificaram a placa CA interna e à constatação de DPS já atuados, a garantia de fábrica foi negada, elevando os custos diretos para R$ 5.000,00. O impacto mais crítico, contudo, foi o lucro cessante de aproximadamente R$ 13.448,00 decorrente dos 165 dias de inatividade.

4.5 SÍNTESE DOS RESULTADOS FINANCEIROS

A Tabela 5 resume a relação entre os custos de manutenção e as perdas financeiras em cada modalidade.

Tabela 5 – Síntese Comparativa de Rentabilidade e Payback

Característica	Caso 1 (Preventiva)	Caso 2 (Preditiva)	Caso 3 (Corretiva)
Capacidade Instalada	4,025 kWp	17,55 kWp	23,435 kWp
Investimento (CAPEX)	R$ 12.000,00	R$ 68.000,00	R$ 97.790,00
Custo Direto O&M	R$ 1.350,00	R$ 2.340,00	R$ 5.000,00
Perda por Inatividade	Desprezível	R$ 1.339,88	R$ 13.448,00
Impacto Total O&M	R$ 1.350,00	R$ 3.679,88	R$ 18.448,00
Economia Líquida (Lucro)	R$ 13.584,88	R$ 49.624,75	R$ 53.312,00
Tempo de Payback Estimado	31 meses	39 meses	48 meses

Fonte – Elaboração própria (2025)

Em síntese, os dados consolidados na Tabela 5 demonstram quantitativamente o impacto financeiro de cada estratégia adotada. Constata-se que a economia líquida e o tempo de retorno do investimento não são ditados apenas pela qualidade dos equipamentos ou pela radiação solar, mas dependem diretamente do rigor aplicado à

operação e à manutenção da usina, consolidando as discussões técnicas apresentadas nestes estudos de caso.

4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo demonstrou, por meio da análise técnica e financeira dos três estudos de caso, que o desempenho de sistemas fotovoltaicos está diretamente atrelado às práticas de operação e manutenção (O&M).

A síntese dos dados consolidados demonstrou quantitativamente que a economia líquida e o tempo de retorno do investimento (*payback*) não são ditados apenas pela qualidade tecnológica dos equipamentos ou pela radiação solar disponível.

Constata-se que a omissão e a adoção de posturas estritamente corretivas resultam em perdas significativas por lucro cessante. Portanto, os resultados aqui discutidos indicam que a gestão proativa é essencial para assegurar a viabilidade a longo prazo e a proteção do capital investido.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho analisou a influência das estratégias de manutenção no desempenho técnico e na viabilidade econômica de sistemas de microgeração fotovoltaica. A partir da fundamentação teórica e da análise dos três estudos de caso, constatou-se que a gestão de ativos não é um custo secundário, mas sim essencial para garantir a rentabilidade e o tempo de retorno do investimento (CAPEX).

Os resultados demonstraram que a transição de um modelo de atuação corretivo para uma cultura de manutenção preventiva e preditiva é a única forma para mitigar perdas financeiras severas e assegurar a longevidade dos equipamentos. Dessa forma, os dados indicam que a manutenção não deve ser tratada como um custo operacional evitável, mas como uma verdadeira ferramenta de proteção de ativos.

Dos três estudos de caso apresentados, sendo eles o residencial sob manutenção preventiva, o comercial com gestão preditiva e o rural operando sob manutenção corretiva por omissão, o Caso 3 revelou-se o mais relevante para as conclusões deste trabalho. Os resultados demonstraram que o custo da omissão na manutenção preventiva e no monitoramento é significativamente superior ao investimento em uma gestão proativa. Conclui-se, portanto, que o monitoramento ativo é o mecanismo primário de prevenção contra prejuízos financeiros.

Para sistemas fotovoltaicos, especialmente em escalas comerciais e rurais, a transição de uma postura reativa para uma cultura de prevenção é fundamental para assegurar que a economia projetada se concretize, protegendo o capital investido contra falhas que poderiam ser mitigadas com inspeções básicas de rotina. Em última análise, este estudo demonstra que a viabilidade financeira e a longevidade operacional na microgeração solar são o resultado direto e indissociável da excelência na engenharia de manutenção.

Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de estudos longitudinais para avaliar o impacto das diferentes estratégias de manutenção na degradação dos equipamentos a longo prazo (5 a 10 anos). Adicionalmente, sugere-se o desenvolvimento de planilhas automatizadas ou modelos econômicos que cruzem os dados de geração com os custos operacionais, facilitando o cálculo do lucro cessante e a tomada de decisão pelo próprio proprietário. Por fim, a análise do custo-benefício de diferentes métodos e periodicidades de limpeza pode aprimorar de forma ainda mais específica os protocolos de manutenção preditiva aplicados à microgeração.

REFERÊNCIAS

ABNT. **ABNT NBR 5462**: confiabilidade e mantenabilidade. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

ANEEL. **Micro e minigeração distribuída de energia elétrica cresceu 8,85 GW em 2024**. [S. l.], 2025. Disponível em: https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2025/micro-e-minigeracao-distribuida-de-energia-eletrica-cresceu-8-84-gw-em-2024. Acesso em: 17 out. 2025.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 1.000, de 7 de dezembro de 2021**. Estabelece as Regras de Prestação do Serviço Público de Distribuição de Energia Elétrica. Brasília, DF: ANEEL, 2021. Disponível em: https://leis.org/institucionais/br/aneel/lei/resolucao-normativa/2021/1000/resolucao-normativa-n-1000-2021-estabelece-as-regras-de-prestacao-do-servico-publico-de-distribuicao-de-energia-eletrica-revoga-as-resolucoes-normativas-aneel-n-414-de-9-de-setembro-de-2010-n-470-de-13-de-dezembro-de-2011-n-901-de-8-de-dezembro-de-2020-e-da-outras-providencias. Acesso em: 20 abr. 2026.

BARBOSA, I. O. Proposta de um modelo sistemático de planejamento da manutenção para empresa que não possua sistema integrado de manutenção. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 26., 2016, João Pessoa. **Anais** [...]. João Pessoa: ABEPRO, 2016. p. 1-19.

BORGES, M. C. *et al*. **Implantação de sistema informatizado para planejamento e controle da manutenção**. [S. l.]: Universidade Vale do Rio Doce, 2009.

BRASIL. **Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022**. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS). Brasília, DF: Presidência da República, 2022. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/lei/l14300.htm. Acesso em: 20 abr. 2026.

COSTA, A. L. C. **Diretrizes para operação e manutenção (O&M) de sistemas fotovoltaicos de microgeração distribuída com uso de células de silício cristalino**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção**: função estratégica. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio (org.). **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL - CRESESB, 2014.

PORTAL SOLAR. **Microgeração de energia solar**. [S. l.], 2025. Disponível em: https://www.portalsolar.com.br/microgeracao-de-energia-solar.html. Acesso em: 17 out. 2025.

PORTAL SOLAR. **Tudo sobre a manutenção do painel solar e do sistema fotovoltaico**. [S. l.], 2023. Disponível em: https://www.portalsolar.com.br/tudo-sobre-a-manutencao-do-painel-solar. Acesso em: 17 out. 2025.

SOUZA, T. M. **Estudo de técnicas de manutenção preventiva em instalações fotovoltaicas**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Energia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2021.

TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno (coord.). **Energia renovável**: hidráulica, biomassa, eólica, solar, oceânica. Rio de Janeiro: EPE, 2016.

VILLALVA, Marcelo Gradella. **Energia solar fotovoltaica**: conceitos e aplicações. 2. ed. rev. e atual. São Paulo: Érica, 2015.

YIN, Robert K. **Estudo de caso**: planejamento e métodos. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.