



Inspeção Termográfica Aérea de Usinas Fotovoltaicas com utilização de Inteligência Artificial

Tema: Novos modelos de negócio

Autores: João Batista Cordeiro Dantas; Antonio Renato de Freitas; Iago Batista Oliveira

Co-Autores: Thamyris Severo de Medeiros; Clayton Santos da Silva

Empresa: Energisa Paraíba - Distribuidora de Energia S/A

Resumo

Este estudo foi realizado em uma usina solar em São João do Rio do Peixe, na Paraíba, adotando uma abordagem híbrida que combinou metodologias tradicionais e ágeis. Seu objetivo foi investigar como o uso de inteligência artificial na identificação de anomalias através do processamento de imagens termográficas de módulos fotovoltaicos pode contribuir para a redução de custos ligados a O&M. A inspeção de 100% dos 132 mil painéis foi realizada em cinco dias úteis, resultando em uma produtividade de 14 MWp/dia, superando a meta inicial. A assertividade foi de 100% quando comparado a indicação da IA com a conferência manual, confirmando a eficácia da tecnologia. A implementação da solução levou a uma redução de 30% nos custos operacionais, ultrapassando a meta de 20%, evidenciando a viabilidade econômica e o potencial para aumentar a competitividade comercial na prestação de serviços às usinas. Estes resultados demonstram que a integração de drones, inteligência artificial e termografia, associada a uma gestão adaptativa, pode proporcionar avanços significativos em eficiência operacional e sustentabilidade econômica, sendo um modelo aplicável em outras usinas solares e em setores de energias renováveis.

1. Introdução

A inspeção termográfica aérea tem se consolidado como uma ferramenta essencial para a manutenção de usinas fotovoltaicas, devido à sua capacidade de detectar rapidamente anomalias térmicas e aprimorar a eficiência do processo de monitoramento. Equipadas com câmeras infravermelhas, as plataformas aéreas, como drones, possibilitam a realização de medições de temperatura de superfície sem contato direto, oferecendo uma cobertura abrangente e eficaz de grandes áreas em tempo reduzido (Möller et al., 2019; Eicker et al., 2021). Essa abordagem tem se mostrado superior às inspeções tradicionais, realizadas de forma terrestre, pois proporciona um mapeamento preciso e a identificação de problemas como pontos quentes, desconexões e falhas estruturais nos módulos fotovoltaicos (Schmid et al., 2020; Santamaria et al., 2022). O uso de estratégias de inspeção combinadas, que unem a análise aérea com verificações no campo, tem se destacado por aumentar a acurácia dos diagnósticos. Nesse contexto, a inspeção inicial via drones detecta anomalias de forma abrangente, enquanto a inspeção terrestre confirma e detalha as falhas, o que permite um planejamento mais preciso das intervenções necessárias (Bazzano et al., 2020; Li et al., 2023). Além disso, a integração de algoritmos de aprendizado profundo para análise automatizada dos dados termográficos tem ganhado relevância. Esses sistemas de IA são capazes de classificar defeitos

com alta precisão e contornar dificuldades como a escassez de dados, o ruído na imagem e problemas de calibração, elevando o nível de eficiência na identificação de falhas (Wang et al., 2021; Martinez et al., 2022).

A adoção da termografia para a manutenção preditiva também contribui para prolongar a vida útil dos sistemas fotovoltaicos, já que possibilita a detecção precoce de problemas e a realização de reparos antes que esses possam afetar a performance do sistema (Zhao et al., 2018; Zhang et al., 2021). Com isso, a inspeção termográfica aérea se destaca como uma solução promissora para melhorar o desempenho e reduzir custos operacionais em plantas solares, alinhando-se a práticas de manutenção mais modernas e eficientes.

Dessa forma, a adoção da inspeção termográfica aérea em usinas fotovoltaicas ressalta sua relevância não apenas como uma ferramenta de diagnóstico preciso, mas também como um catalisador para o aumento da eficiência e da confiabilidade dos sistemas solares. No entanto, a implementação desse método enfrenta desafios significativos que afetam diretamente sua efetividade. A terceirização do serviço, por exemplo, pode elevar os custos operacionais, frequentemente ultrapassando a média de mercado, além de introduzir variações imprevisíveis nos preços devido a fatores como complexidade técnica e condições climáticas adversas.

Adicionalmente, a ausência de padronização nos relatórios termográficos de fornecedores compromete a qualidade e a utilidade dos dados coletados, limitando análises aprofundadas. A falta de integração digital nas plantas e de conexão geoelétrica dos ativos também dificulta a gestão eficiente dos sistemas. Por fim, a indisponibilidade de ferramentas analíticas para correlação de informações restringe a capacidade de extrair insights estratégicos a partir dos dados, subutilizando o potencial da termografia aérea como uma solução avançada para manutenção e monitoramento no setor fotovoltaico.

Este trabalho visa investigar como a aplicação de inteligência artificial no processamento de imagens termográficas pode impactar a identificação de anomalias em usinas fotovoltaicas, com o objetivo de reduzir os custos relacionados aos serviços de operação e manutenção (O&M). A análise busca entender como essa abordagem tecnológica pode contribuir para a melhoria da eficiência operacional e, consequentemente, para o aumento da competitividade comercial na prestação de serviço às usinas.

2. Desenvolvimento

Este trabalho foi desenvolvido com o cenário de aplicação e metodologia expostos a seguir. Os resultados são demonstrados na última subseção.

Cenário de aplicação

O trabalho foi realizado em uma usina fotovoltaica de geração centralizada situada em São João do Rio do Peixe, no sertão da Paraíba, uma região conhecida por suas condições climáticas desafiadoras, caracterizadas por altas temperaturas e baixa pluviometria. A usina, com uma potência instalada de 70 MWp, é composta por mais de 132 mil módulos fotovoltaicos, configurando-se como uma significativa fonte de geração de energia solar na região. Essa localização e escala impõem exigências específicas para a manutenção e monitoramento dos equipamentos, tornando a aplicação de técnicas como a inspeção termográfica essencial para a identificação de falhas e a manutenção da eficiência do sistema. A cidade está destacada na imagem 1.

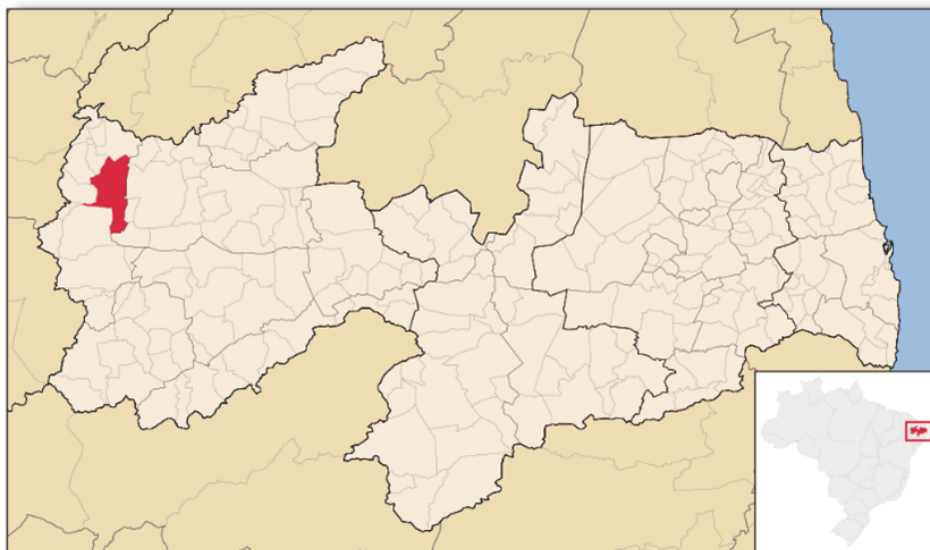


Imagem 01 - Cidade de São João do Rio do Peixe, Paraíba

Metodologia e fases

A abordagem metodológica de gerenciamento de projetos adotada para o desenvolvimento deste trabalho foi híbrida, combinando elementos de metodologias tradicionais e ágeis para garantir um gerenciamento robusto e adaptativo. O macroplanejamento foi estruturado com base na divisão em quatro fases distintas, cada uma com um marco de conclusão e um *gate* de avaliação, seguindo a lógica da metodologia de “Cas-cata” para assegurar a organização sequencial e o cumprimento dos objetivos. Essa estruturação permitiu uma visão clara do progresso e facilitou a adaptação do processo em resposta a desafios emergentes. Dentro de cada fase, foram aplicados ritos de metodologias ágeis para monitoramento contínuo, permitindo ajustes rápidos durante a execução e mantendo a flexibilidade necessária para um controle adaptativo. Além disso, técnicas de gestão da qualidade foram integradas ao planejamento e ao acompanhamento para garantir a excelência dos resultados em cada etapa do trabalho. As fases e os *gates* são apresentados a seguir e estão relacionados na figura 2.



Imagem 02 - Desencadeamento de fases na gestão do trabalho

Fase 01 – Documentação e Georreferenciamento dos Ativos A primeira fase teve como objetivo a digitalização do layout da usina fotovoltaica localizada em São João do Rio do Peixe, na Paraíba, integrando informações georreferenciadas das placas solares. O marco desta fase foi a inserção da planta digitalizada na plataforma de inteligência artificial (IA), enquanto o gate envolveu a avaliação da conformidade da digitalização com o layout técnico estabelecido, conforme imagem 3.

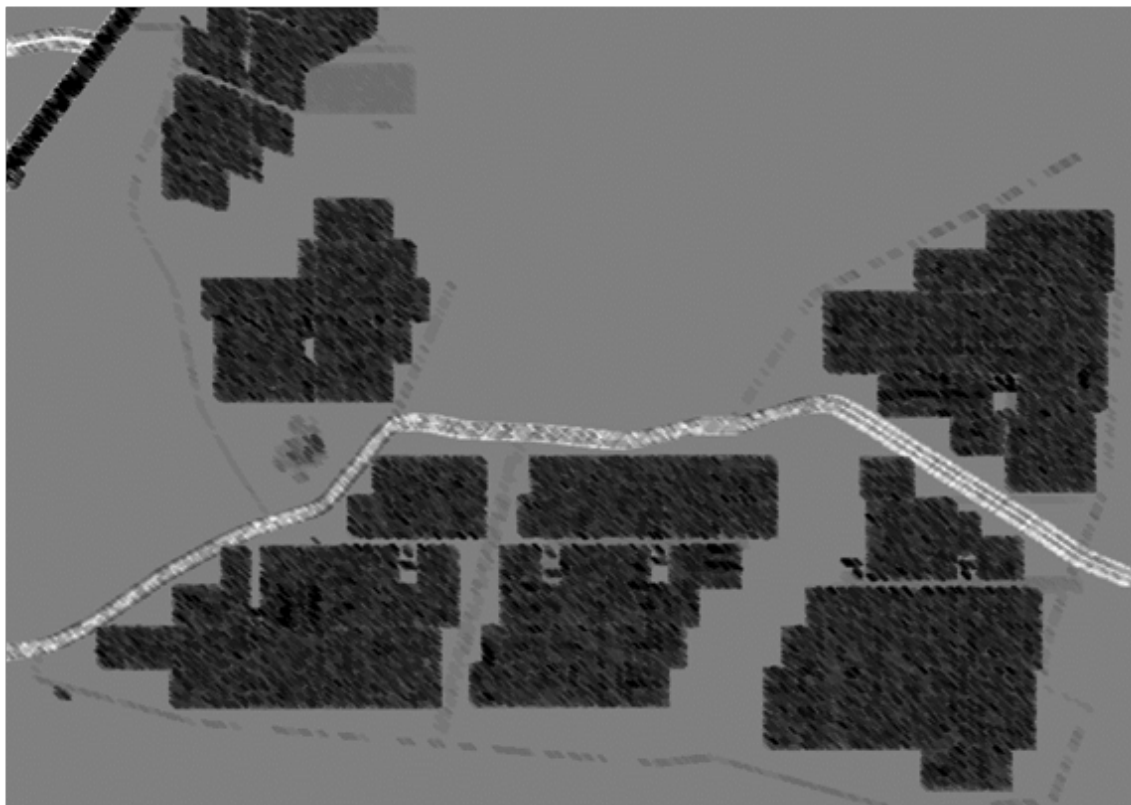


Imagem 3 - Planta digitalizada na plataforma

Fase 02 – Planejamento de Voo e Coleta de Dados O objetivo da segunda fase foi a elaboração do plano de voo específico para a usina e a coleta de imagens termográficas com drones para análise das condições das placas solares. O marco dessa fase foi o conjunto de imagens termográficas obtidas, e o gate consistiu na avaliação da qualidade dessas imagens e na verificação da cobertura completa da área da usina. No conjunto de imagens 04 e 05, são mostrados um voo executado sob a usina e sua imagem termográfica.



Imagem 04 - Drone com câmera termográfica sob usina fotovoltaica



Imagem 05 - Imagem termográfica sob usina na cidade de São João do Rio do Peixe-PB

Fase 03 – Processamento dos Dados e Geração de Relatórios Na terceira fase, o foco foi o processamento das imagens termográficas coletadas, a identificação e o georreferenciamento de anomalias, e o desenvolvimento de um plano de ação para a resolução das anomalias prioritárias. O marco foi a produção de relatórios detalhados com as anomalias identificadas e suas respectivas localizações, enquanto o *gate* envolveu a comparação de amostras de imagens RGB com imagens termográficas para validar a precisão da detecção de anomalias. A imagem 06 mostra toda a planta digitalizada as anomalias georreferenciadas, com alguns destaques. Um exemplo é mostrado na imagem 07, onde em um módulo havia uma sujeira é possível vê-lo por diferença de temperatura na imagem termográfica.

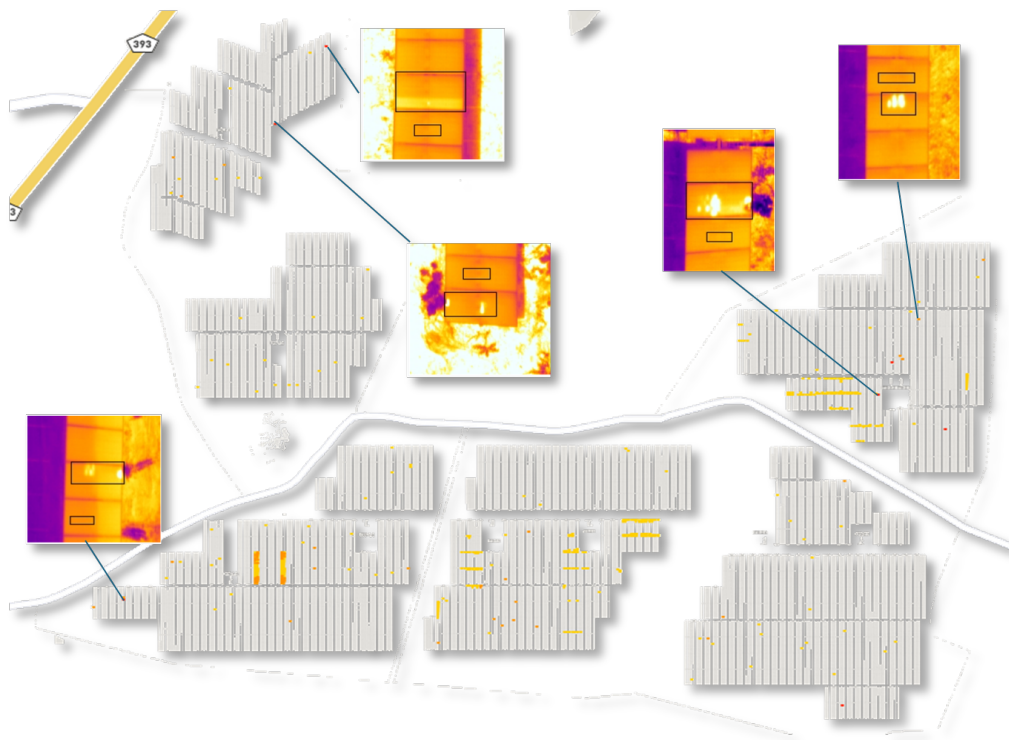


Imagem 06 - Planta digitalizada com as anomalias georreferenciadas por diferença de temperatura

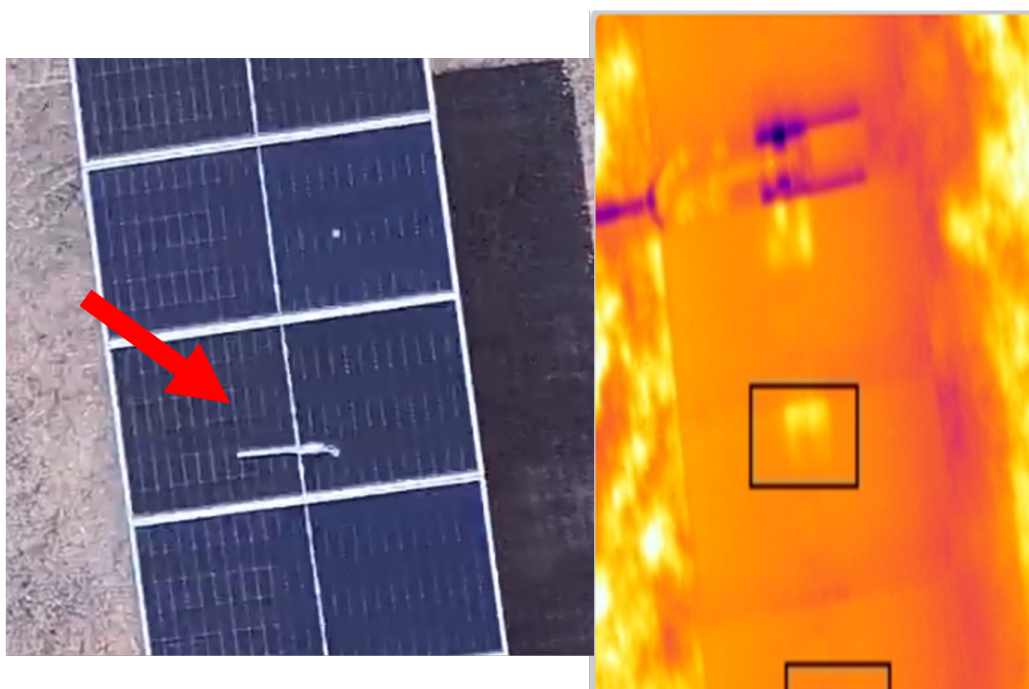


Imagem 07 - Anomalia de "sujeidade" detectada por diferença de temperatura através de processamento de imagens

Fase 04 – Validação de Anomalias e Cálculo de Indicadores de Sucesso A fase final envolveu a validação da precisão da IA na identificação de anomalias e a medição de indicadores de sucesso do processo. A validação foi realizada em campo, utilizando uma câmera termográfica manual para verificar uma amostra de placas identificadas pela IA como apresentando anomalias térmicas, conforme imagem 8. O marco foi a

confirmação da precisão dos dados e o cálculo dos indicadores de desempenho, enquanto o *gate* consistiu na avaliação de como esses indicadores atenderam às metas previamente estabelecidas.

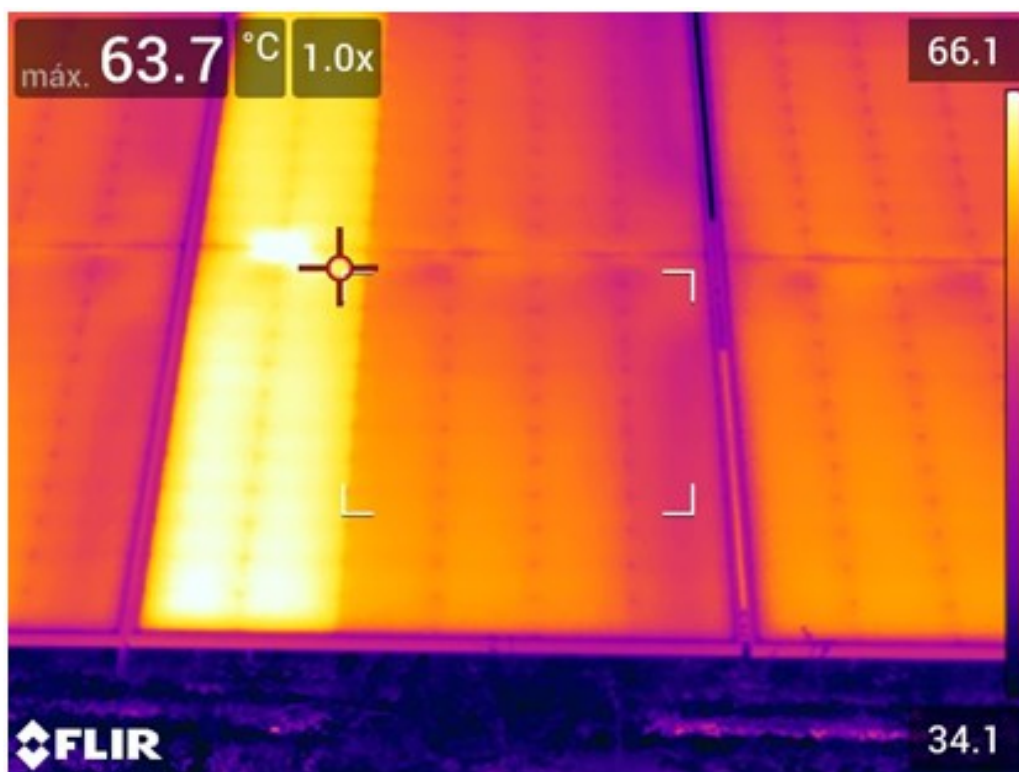


Imagem 8 - Termografia manual realizada para validação de anomalia

Essas etapas, com seu design meticuloso e a combinação de metodologias ágeis e tradicionais, permitiram a implementação de um processo robusto que garantiu a qualidade e a eficácia das inspeções termográficas na usina fotovoltaica em São João do Rio do Peixe. O uso de IA e a integração de práticas de georreferenciamento e processamento de imagens são aspectos inovadores que demonstram a viabilidade de uma abordagem mais eficaz e econômica para a manutenção de usinas solares.

Indicadores de avaliação e resultados

Para avaliar a eficiência e viabilidade da solução de inspeção termográfica aérea com suporte de inteligência artificial (IA), cinco indicadores técnicos e de negócio foram adotados. Os resultados obtidos foram analisados em comparação com as metas estabelecidas na linha de base do projeto e mostram que todos os indicadores apresentaram resultados satisfatórios e superiores às expectativas.

Indicador 01 – Quantidade de painéis inspecionados

Este indicador mede a porcentagem de inspeção dos 132 mil painéis da usina de Rio do Peixe, refletindo a abrangência do monitoramento realizado. O tipo de avaliação é “quanto maior, melhor”. A meta estabelecida para esse indicador era de 100%, e o resultado alcançado foi também de 100%, atingindo a meta de forma completa.

Indicador 02 – Volume de painéis inspecionados por dia

Esse indicador avalia a quantidade de painéis inspecionados por dia pelo drone, permitindo uma análise da produtividade do operador e a viabilidade financeira de internalizar o processo. Com uma meta de 7 MWp/dia, a performance real superou a meta com um resultado de 14 MWp/dia, ultrapassando a expectativa e demonstrando uma alta produtividade do processo.

Indicador 03 – Anomalias solucionáveis em relação às causas totais

O percentual de anomalias identificadas e de fácil solução, em relação ao total de anomalias detectadas, foi analisado para direcionar o trabalho de campo. A meta era de 10%, mas o resultado alcançado foi de 31%, superando a meta inicial em mais de três vezes, o que destaca a eficácia da solução em identificar anomalias passíveis de correção eficiente.

Indicador 04 – Identificação via termografia manual das anomalias solucionáveis

Este indicador mede a taxa de confirmação das anomalias identificadas pela IA por meio de inspeção manual com câmeras termográficas, validando a assertividade da IA. A meta estabelecida era de 100%, e o resultado obtido também foi de 100%, atingindo a meta e confirmando a alta precisão da solução automatizada.

Indicador 05 – Redução de custos de operação

Este indicador avalia o impacto econômico da solução em relação à comparação com a terceirização do serviço, destacando a economia potencial da internalização. A meta de redução de custos era de 20%, e o resultado real foi de 30%, superando a meta e demonstrando uma economia significativa no custo operacional (OPEX).

3. Conclusão

Em conclusão, este estudo evidenciou a eficácia de uma abordagem integrada para o monitoramento e manutenção de usinas fotovoltaicas, utilizando tecnologias avançadas, como drones, inteligência artificial (IA) e inspeção termográfica, juntamente com uma metodologia híbrida de gestão de projetos. A usina em São João do Rio do Peixe, no sertão da Paraíba, foi o cenário ideal para a aplicação dessas soluções, dada sua grande escala e as condições climáticas desafiadoras. O trabalho foi estruturado em fases sequenciais, combinando práticas de metodologias tradicionais e ágeis, o que permitiu um planejamento detalhado, aliado à flexibilidade para ajustes durante a execução.

Os indicadores de desempenho demonstraram resultados acima das expectativas. A quantidade de painéis inspecionados alcançou 100%, com todos os 132 mil módulos sendo inspecionados em apenas 5 dias úteis, uma eficiência muito superior à meta inicial de 7 MWp/dia. O volume de painéis inspecionados por dia atingiu 14 MWp/dia, o dobro do esperado. Além disso, a taxa de anomalias solucionáveis foi de 31%, significativamente superior aos 10% previstos, indicando uma alta eficiência na identificação e resolução rápida de falhas. A identificação via termografia manual das anomalias solucionáveis também foi 100% assertiva, validando a precisão da IA.

Por fim, os resultados financeiros confirmaram a viabilidade da internalização da solução. A redução de custos operacionais foi de 30%, superando a meta de 20%, o que reflete uma otimização significativa dos recursos e uma redução de despesas em comparação com métodos tradicionais. Esses resultados indicam que a combinação de tecnologias inovadoras e uma gestão adaptativa, que integrou práticas de georreferenciamento e IA, não só trouxe ganhos operacionais e econômicos, mas também ofereceu uma solução mais sustentável e eficiente para o monitoramento de grandes usinas solares. A estratégia aplicada

tem grande potencial de ser replicada em outras usinas, contribuindo para o avanço do setor de energias renováveis.

4. Referências bibliográficas

- MÖLLER, D. et al. Inspeção de sistemas fotovoltaicos utilizando drones: uma abordagem de monitoramento de alta precisão. *Revista de Tecnologia e Energia*, v. 15, n. 2, p. 45-58, 2019.
- EICKER, U. et al. Advances in aerial thermographic inspections of photovoltaic plants. *Solar Energy Journal*, v. 203, p. 123-134, 2021.
- SCHMID, J. et al. Infrared thermography for detecting failures in photovoltaic systems: a review. *Renewable Energy*, v. 140, p. 1158-1167, 2020.
- SANTAMARIA, F. et al. A study on the effectiveness of drone-based thermographic inspections for large-scale solar farms. *Energy Reports*, v. 8, p. 567-578, 2022.
- BAZZANO, D. et al. Comparative analysis of drone and ground-based thermographic inspection in PV maintenance. *Journal of Photovoltaic Technology*, v. 27, n. 3, p. 221-230, 2020.
- LI, J. et al. Field verification and practical applications of thermal imaging in photovoltaic systems. *International Journal of Sustainable Energy*, v. 14, p. 59-72, 2023.
- WANG, L. et al. Deep learning algorithms for the automated analysis of thermographic data in solar panel inspections. *Solar Energy Engineering*, v. 143, p. 421-430, 2021.
- MARTINEZ, A. et al. Integration of AI-based image processing for fault detection in photovoltaic systems. *IEEE Journal of Renewable Energy*, v. 10, n. 4, p. 1537-1545, 2022.
- ZHAO, Q. et al. The role of infrared thermography in predictive maintenance of solar power plants. *Journal of Energy Research*, v. 11, p. 90-104, 2018.
- ZHANG, Y. et al. Long-term impacts of thermal imaging on solar panel performance optimization. *Energy Sustainability Review*, v. 15, n. 1, p. 28-39, 2021.