



ISADORA CARVALHO REZENDE BORGES

**INSPEÇÃO DE USINAS FOTOVOLTAICAS POR TERMOGRAFIA
E SUA VIABILIDADE ECONÔMICA.**

LAVRAS - MG

2021

ISADORA CARVALHO REZENDE BORGES

**INSPEÇÃO DE USINAS FOTOVOLTAICAS POR TERMOGRAFIA E SUA
VIABILIDADE ECONÔMICA.**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Mecânica, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Márcio Montagnana Vicente Leme

Orientador

LAVRAS - MG

2021

Resumo

Com a corrida mundial para atuar contra a mudança climática, cresce cada vez mais a importância das energias renováveis no cenário atual para o Desenvolvimento Sustentável, incluindo a energia fotovoltaica. Seguindo a linha *Lean Manufacturing*, onde a manutenção preventiva prevalece, a inspeção de usinas através de termografias, aéreas e manuais, tem como objetivo a fiscalização dos módulos fotovoltaicos, assim como qualquer outro equipamento, passíveis de falhas, que ocasionam a perda de potência ou a interrupção de funcionamento. Dessa forma, este trabalho apresenta como objetivo demonstrar o funcionamento das inspeções por termografia manual e aérea, com o auxílio de *softwares* e analisar economicamente o retorno financeiro de duas usinas fotovoltaicas junto as inspeções nelas realizadas, assim como apontar seus benefícios econômicos. Para essa demonstração e retorno financeiro, fez-se um estudo de caso na Usina X e Usina Y, com a metodologia de inspeções de termografias manuais e aéreas utilizando câmeras termográficas e também drones combinado a elas para rotas pré-determinadas de painéis fotovoltaicos, além de uma metodologia para viabilidade econômica. Assim, verificou-se resultados favoráveis de detalhamento das inspeções nas Usinas que facilitará o trabalho dos colaboradores para reparos nos equipamentos, com módulos georeferenciados para não ocorrer perdas daqueles que não apresentam anomalias. Pôde-se observar a viabilidade econômica da manutenção preventiva em ambas as Usinas, as vantagens e o retorno do valor investido em curto prazo, *payback* positivo, além de VPL maior que 0 e TIR maior que a taxa de atratividade do mercado, Selic. Concluiu-se então que a sua implementação não é apenas um diferencial, mas sim uma necessidade para não ter desperdício de recursos com manutenções desnecessárias, nem observar um potencial risco de destruição parcial ou total do sistema elétrico.

Palavras-chave: Energia fotovoltaica; Termografias; Viabilidade econômica.

Lista de figuras

Figura 1: Termovisor resfriado a hidrogênio líquido.	11
Figura 2: Termovisor resfriado eletricamente.	12
Figura 3: Termovisor não resfriado.	12
Figura 4: Câmera termográfica avançada.	13
Figura 5: Espectro eletromagnético.	14
Figura 6: Termografia manual tratada de uma <i>string box</i> e inversor, respectivamente.	15
Figura 7: Exemplo de sequência de imagens térmicas.	17
Figura 8: Exemplos de anomalias.	17
Figura 9: Câmera termográfica FLUKE Ti450.	22
Figura 10: DJI Matrice 600 Pro.	23
Figura 11: Câmera DJI Zenmuse XT2.	24
Figura 12: Método aplicado na termografia manual.	25
Figura 13: Método aplicado na termografia aérea.	26
Figura 14: Exemplo de um ortomosaico térmico e RGB.	27
Figura 15: Relatório da termografia manual realizada em inversores.	30
Figura 16: Relatório da termografia manual realizada em <i>string box</i>	31
Figura 17: Relatório da termografia aérea realizada em módulos fotovoltaicos.	32
Figura 18: Disposição dos módulos no <i>tracker</i>	33
Figura 19: Análise econômica realizada no EXCEL da Usina X.	34
Figura 20: Análise econômica realizada no EXCEL da Usina Y.	38

Lista de tabelas

Tabela 1: Recursos da câmera termográfica FLUKE Ti450.	23
Tabela 2: Recursos da câmera termográfica DJI Zenmuse XT2.....	24
Tabela 3: Resumo dos módulos com anomalias da Usina X.	29
Tabela 4: Resumo da termografia manual da Usina X.	29
Tabela 5: Detalhamento das anomalias da Usina X.....	33
Tabela 6: Resumo dos módulos com anomalias da Usina Y.	36
Tabela 7: Resumo da termografia manual da Usina Y.	36
Tabela 8: Detalhamento das anomalias da Usina Y.....	37

Sumário

1. INTRODUÇÃO	7
2. OBJETIVOS	9
2.1 Objetivo Geral	9
2.2 Objetivos Específicos	9
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
3.1 Marco teórico	10
3.2 Radiação térmica e fatores que afetam a medição	13
3.3 Termografia manual	15
3.4 Termografia aérea	16
3.5 Análise de viabilidade econômica.....	18
3.6 Estado da arte	19
4. METODOLOGIA	22
4.1 Equipamentos	22
4.2 Sistema 1: metodologia manual	24
4.3 Sistema 2: metodologia aérea.....	25
4.4 Viabilidade econômica.....	28
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	29
5.1 Usina X.....	29
5.2 Usina Y.....	36
6. CONCLUSÃO	40
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a sustentabilidade tem grande importância em âmbito social, econômico e ambiental. Para uma melhor eficiência na conquista da mesma, o uso de fontes renováveis tornou-se destaque, preservando o meio ambiente, diminuindo as alterações climáticas com a redução da concentração de gases poluentes.

Em 2015, líderes mundiais se reuniram na sede da Organização das Nações Unidas (ONU) para organizarem um plano de ação: Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, a qual contém o conjunto de 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), uma ambiciosa lista de tarefas para todas as pessoas, em todas as partes, a serem cumpridas. Três deles estão diretamente ligados ao consumo de energia limpa, o 7, 11 e 13, que se caracterizam como energia acessível e limpa, cidades e comunidades sustentáveis e ação contra a mudança global do clima, respectivamente (SILVA, 2018).

Um exemplo de consumo de energia limpa é a solar, que ganhou espaço nos últimos anos na matriz energética do mundo e do Brasil. No Brasil, a energia solar faz parte de 2,0% da matriz elétrica brasileira, se destacando no estado de Minas Gerais. Em comparação aos países do mundo, em 2019, o Brasil ocupou a posição de 16º país com a maior capacidade instalada acumulada e, em capacidade adicionada, 12º país. Ou seja, o Brasil está constantemente investindo na energia solar fotovoltaica que, além de impactar de forma positiva o meio ambiente, gera novos empregos e investimentos privados (INFOGRÁFICO ABSOLAR, 2021).

O Sol é a principal fonte de energia para a Terra, a sua radiação é uma inesgotável fonte de energia, havendo um enorme potencial de sua utilização por meio de sistemas de captação e conversão em outra forma de energia, como por exemplo, térmica e elétrica. Assim, as usinas fotovoltaicas têm papel fundamental para a nova era de energia. Para que estas usinas operem de forma eficaz, deve-se realizar periodicamente manutenções que otimizem sua durabilidade e evite desperdícios financeiros (PINHO E GALDINO, 2014).

Seguindo a linha *Lean Manufacturing*, onde a manutenção corretiva abre espaço para a manutenção preventiva, a inspeção de usinas através de termografias, sejam elas aéreas ou manuais, tem como objetivo a fiscalização dos módulos fotovoltaicos, assim como qualquer outro equipamento, passíveis de falhas, que ocasionam a perda de potência ou a interrupção de funcionamento. Por serem equipamentos estáticos, seus modos de

falhas são decorrentes de condições de operação (instalação, condições ambientais e elétricas) e de difícil visualização, fazendo necessário o uso de tecnologias que consigam detectar de forma rápida e eficiente, como por exemplo, a termografia (DA SILVA, 2017).

A termografia possibilita a medição à distância e sem contato das temperaturas superficiais dos objetos observados, assim como a visualização da distribuição dessas temperaturas. Todos os corpos acima do zero absoluto (-273,15 °C) emitem calor, o qual é absorvido e reemitido por tudo que os rodeia. Assim, a termografia é considerada como o processo de tornar essas radiações térmicas visíveis e capazes de interpretação, através da banda espectral dos infravermelhos (CARAMALHO, 2012).

Tradicionalmente utiliza-se câmeras manuais no campo que depende do esforço humano e sua experiência para realização das imagens. Este método consome muito tempo e trabalho intensivo, além da precisão do teste ser vulnerável ao erro humano. Contudo, ainda é o método mais eficaz para realização de termografias em equipamentos como *string box* e inversores em usinas, pois são equipamentos com visibilidade vertical, não sendo viável um sobrevoo, pois seria em alturas muito baixas (DE OLIVEIRA et al., 2020).

Para aumentar a relação custo-benefício e permitir inspeções em sistemas fotovoltaicos de larga escala, como em usinas, e em telhados com acesso limitado, as câmeras termográficas podem ser combinadas com UAVs (*Unmanned Aerial Vehicles*), os drones. Este método de termografia aérea aumenta a velocidade das inspeções e é o mais utilizado nos últimos anos, mas fornecem resoluções de imagens mais baixas do que as tradicionais (DE OLIVEIRA et al., 2020).

Assim como o investimento em usinas fotovoltaicas, têm-se uma grande valia a utilização da termografia nas mesmas, em manutenção preventiva, sendo um investimento compensador, tanto pelo rápido retorno financeiro, comprovado por métodos atuariais como valor presente líquido (VPL) em conjunto com os métodos de taxa interna de retorno (TIR) e *payback*, quanto pelos danos que consegue prevenir e interrupções de produção que conseguem evitar (KIM et al., 2017; DU, Bolun et al., 2020; DE ALMEIDA et al., 2017).

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Analisar e demonstrar uma metodologia de manutenção preventiva caracterizada pela inspeção de usinas fotovoltaicas por meio de termografia manual e aérea e avaliar a viabilidade econômica de sua implantação.

2.2 Objetivos Específicos

1. Demonstrar o funcionamento das inspeções por termografia manual e aérea, com o auxílio de *softwares*;
2. Apontar os benefícios econômicos da utilização da manutenção preventiva com termografia manual e aérea;
3. Analisar economicamente o retorno financeiro de duas usinas fotovoltaicas junto as inspeções nelas realizadas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Termografia infravermelha têm como principais benefícios a rápida detecção de distribuição de temperatura, uma metodologia sem contato e relativamente fácil de manusear. Exemplos significativos de aplicação de termografia IR (*Infrared*) estão presentes na manutenção fotovoltaica, com utilização de imagens termográficas de qualidade resultantes de espectros infravermelhos descobertos por acaso no ano de 1800. A temperatura aparente é o crucial termo obtido pela câmera termográfica e é explicado juntamente ao desenvolvimento da termografia ao longo dos anos (GLAVAŠ et al., 2017).

3.1 Marco teórico

A radiação infravermelha foi descoberta por acaso no ano de 1800, por Sir Willian Herschel, astrônomo real do Rei Jorge III de Inglaterra. Ele testou várias amostras de vidro de cor que permitiam reduções semelhantes do brilho, e ficou intrigado quando se atentou que algumas das amostras deixavam passar muito pouco calor do sol, enquanto outras deixavam passar tanto calor que, após alguns segundos de observação, os olhos corriam o risco de sofrerem lesões (CARAMALHO, 2012).

Então, Herschel começou a escurecer com tinta o bolbo de um termômetro de mercúrio em vidro sensível e, utilizando-o como detector de radiações, procedeu ao teste do efeito térmico das várias cores do espectro formado sobre a superfície de uma mesa, fazendo passar a luz do sol através de um prisma de vidro. A fim de controlar o experimento, outros termômetros foram utilizados fora do alcance da radiação solar. À medida que o termômetro escurecido era lentamente deslocado através das cores do espectro, as leituras da temperatura registavam um aumento contínuo desde o violeta até o vermelho. Dessa forma, o astrônomo reconheceu que deveria existir um ponto onde o efeito térmico atingia um valor máximo e que as medições limitadas à porção visível do espectro não tinham conseguido localizar (CARAMALHO, 2012).

Ao mover o termômetro para a região escura, para além da extremidade vermelha do espectro, Herschel teve a confirmação de que o calor continuava a aumentar e, dessa forma, encontrou o ponto máximo, que estava muito além da extremidade vermelha – hoje conhecida por “comprimentos de onda infravermelhos”. Embora Herschel tenha feito a descoberta da radiação infravermelha, não foi ele quem deu origem ao termo “infravermelho”. Esta palavra só começou a aparecer impressa cerca 75 anos mais tarde,

não se sabendo ainda muito bem a quem pertence o mérito da sua origem (CARAMALHO, 2012).

Em 1840, a primeira imagem térmica foi realizada por um trabalho efetuado de Sir John Herschel, filho do descobridor dos infravermelhos, também astrônomo. O aperfeiçoamento do detector de infravermelhos progrediu lentamente. Entre 1900 e 1920, os inventores de todo o mundo “descobriram” os infravermelhos. Foram emitidas muitas patentes para dispositivos de detecção de pessoas, artilharia, aviões, barcos e até icebergues. Após a segunda guerra mundial, os avanços de pesquisa de infravermelhos foram sigilosos por programas militares e só em meados dos anos 50 do século XX que começaram a disponibilizar às comunidades civis e industriais, os dispositivos apropriados de formação de imagens térmicas (CARAMALHO, 2012).

Atualmente, a termografia infravermelha tornou-se uma ferramenta sólida em monitoramento de equipamentos e testes não destrutivos. Ela é atuante em áreas militares, medicina humana e veterinária, industrial e aplicações na engenharia (ALTOÉ et al., 2012).

A inserção de termovisores na realidade brasileira iniciou-se entre 1970 e 1980, com a utilização dos mesmos no setor elétrico. Contudo, eram aparelhos muito robustos e que necessitavam de nitrogênio líquido para seu resfriamento, que dificultavam seu transporte e utilização. Eram termovisores ópticos-mecânicos com metodologia de varredura, com transformação de imagens térmicas e suas respectivas temperaturas através de cálculos pelo operador, representado na Figura 1 (TEXEIRA, 2017).

Figura 1: Termovisor resfriado a hidrogênio líquido.



Fonte: TEXEIRA (2017).

Com o contínuo avanço nessa tecnologia, o resfriamento passou de hidrogênio líquido para elétrico, representado na Figura 2, e logo para detectores sem resfriamento com microprocessadores, Figura 3.

Figura 2: Termovisor resfriado eletricamente.



Fonte: TEXEIRA (2017).

Figura 3: Termovisor não resfriado.



Fonte: TEXEIRA (2017).

Além do avanço do resfriamento, o tamanho e o peso destes equipamentos também sofreram uma profunda e significativa melhora, com avanços gradativos para modelos mais leves e compactos. Os primeiros aparelhos pesavam em torno de 40 kg, já os aparelhos atuais se parecem com câmeras fotográficas pesando menos de 2 kg. A leitura dos níveis de radiação infravermelha que anteriormente se transformavam em temperatura, agora são mostradas diretamente no monitor do termovisor (SANTOS, 2017).

Existem diferentes tecnologias de câmeras termográficas que possibilitam detectar, medir e formar uma imagem através de radiação de infravermelhos emitida por um objeto. As câmeras atuais são muito fáceis de utilizar e a existência de sistemas de menus incorporados também facilita o acesso à *softwares* de câmeras avançados, os quais

possibilitam o tratamento das imagens realizadas. A Figura 4 representa uma câmera atual (MONTEIRO, 2018).

Figura 4: Câmera termográfica avançada.



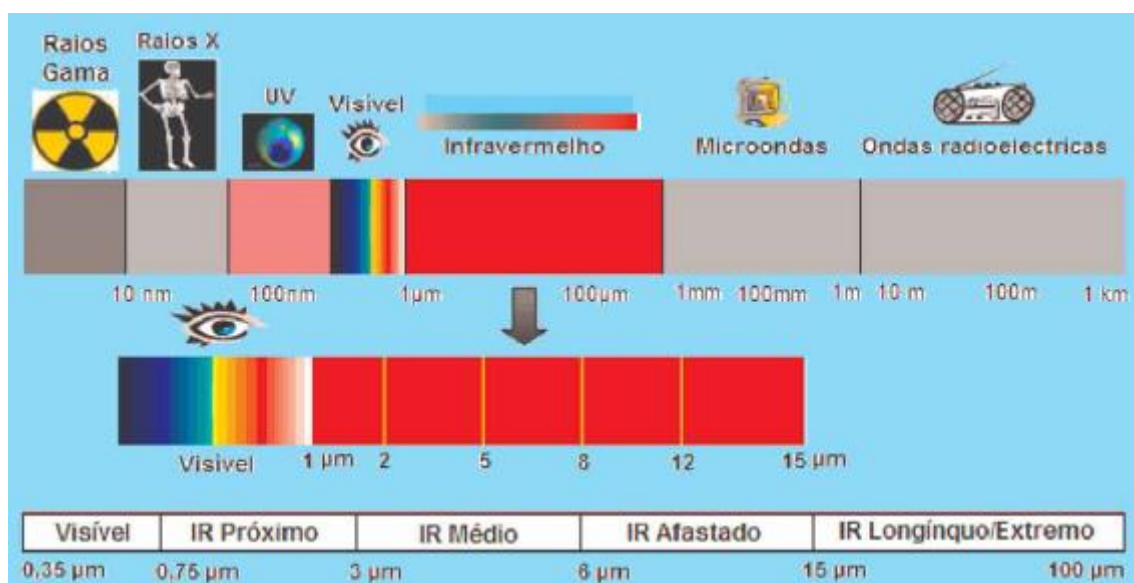
Fonte: FLIR (2021).

Um dos ramos de aplicação de termovisores, ou termocâmeras, é o elétrico, mais especificamente sistemas elétricos fotovoltaicos que também podem ser combinadas com UAVs (drones). Em ambas as termografias, sejam manuais, utilizando somente as termocâmeras ou as aéreas, utilizando o conjunto termocâmera e UAV, ressalta-se que os operadores dos equipamentos devem se atentar à riscos de segurança dos equipamentos, para que, caso perceba algum dano, suspenda a inspeção (DE OLIVEIRA et al., 2020).

3.2 Radiação térmica e fatores que afetam a medição

A radiação térmica é um fenômeno ondulatório, através de ondas eletromagnéticas, no qual o calor é transferido de um corpo sem o auxílio do meio interveniente e em função da sua temperatura. Essa radiação não necessita de um meio material para que seja efetivada, como uma colisão de partículas em um meio material por exemplo, ela ocorre no vácuo. Dessa forma, é medido em equipamentos térmicos a termografia de objetos (CARAMALHO, 2012).

Figura 5: Espectro eletromagnético.



Fonte: CARAMALHO (2012).

Na física, um corpo negro é àquele que absorve toda a energia que nele incide, mas, na realidade, isto quase nunca acontece. Dessa forma, são considerados como corpos cinzentos ou corpos reais. Esses corpos se diferem pela sua emissividade, que nada mais é que a capacidade de emissão de energia por radiação da sua superfície. A emissividade depende das características superficiais de material e acabamento do corpo em questão e define-se como a relação entre radiação emitida desse corpo numa dada temperatura e a radiação emitida por um corpo negro na mesma temperatura. Ou seja, a emissividade apresenta-se como a capacidade de um objeto radiar energia infravermelha. Portanto, a emissividade cumpre um importante papel nas termografias, pois a mesma limita ou amplifica a energia que chega aos sensores por meio de um ganho, sendo a mesma um dado de entrada da termocâmara (DA SILVA, 2017).

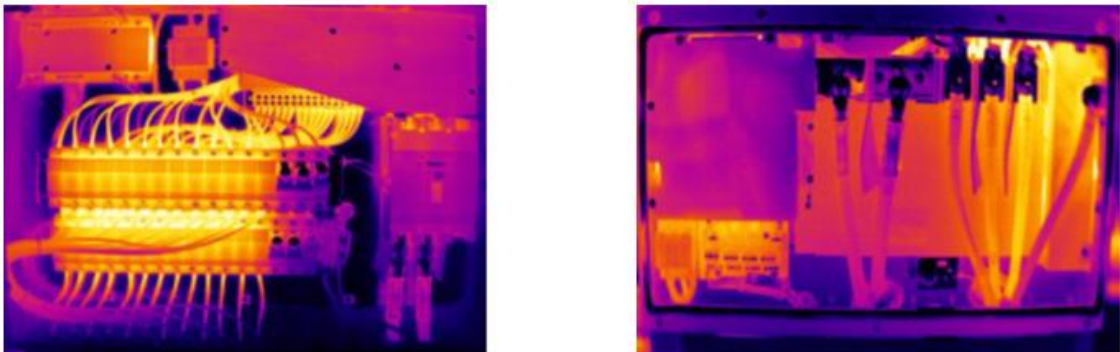
Outros parâmetros que devem ser introduzidos na câmera e afetam na medição são: temperatura ambiente refletida, a qual compensa a radiação refletida no objeto e a radiação emitida pela atmosfera entre a câmera e o objeto; temperatura ambiente atmosférica, que corresponde a temperatura que está no local e horário que realiza a termografia; e a distância entre a câmera e o objeto (CARAMALHO, 2012).

3.3 Termografia manual

Os pontos quentes, ou seja, regiões com temperatura muito superior ao restante do objeto em questão, podem produzir redução na operação do mesmo, podendo ele ser cabearmentos, dispositivos como inversores e *string box*. Assim, a termografia manual realizada através de uma câmera térmica é adequada a fim detectar o defeito antes da ocorrência da falha, pois problemas como mau contato e circuitos sobrecarregados irão apresentar temperaturas muito mais elevadas em relação aos circuitos normais (PINHO E GALDINO, 2014).

Para realizar a termografia pelo método da FLUKE, deve-se posicionar o ponto vermelho do laser da câmera térmica no equipamento que será inspecionado, depois puxar e soltar o gatilho para obter uma imagem com foco. Após a captura das imagens, as mesmas são tratadas nos *softwares*, como por exemplo, o Fluke Connect ®, obtendo imagens como representadas na Figura 6 (FLUKE, 2018).

Figura 6: Termografia manual tratada de uma *string box* e inversor, respectivamente.



Fonte: A autora.

O reparo de um equipamento ligeiramente sobreaquecido é mais fácil e mais barato, assim, a periodicidade da termografia manual nos mesmos é importante para evitar sua substituição. Pode ocorrer desequilíbrio de cargas entre fases, cabo com fios interrompidos circulando a intensidade de corrente por menos fios do que o necessário, isolador de apoio com defeito (bem mais quente que o parafuso de aperto), união com mau contato, terminal mal cravado, entre outros problemas (CARAMALHO, 2012).

Como soluções para os problemas citados, pode-se realizar a substituição apenas de cabos condutores, isoladores de apoio, porca e parafuso de aperto, limpar zona de contato e apertar união corretamente (CARAMALHO, 2012).

3.4 Termografia aérea

Elevações de temperatura pontuais em módulos fotovoltaicos são em geral indício de danos ou defeitos de fabricação. Ocorrências desse tipo devem ser detectadas no início da operação da usina, na etapa de comissionamento a quente (quando a usina ou parte dela é colocada em operação ainda na fase de testes) e também em ações de operação e manutenção que devem ser realizadas periodicamente ao longo da vida útil do sistema.

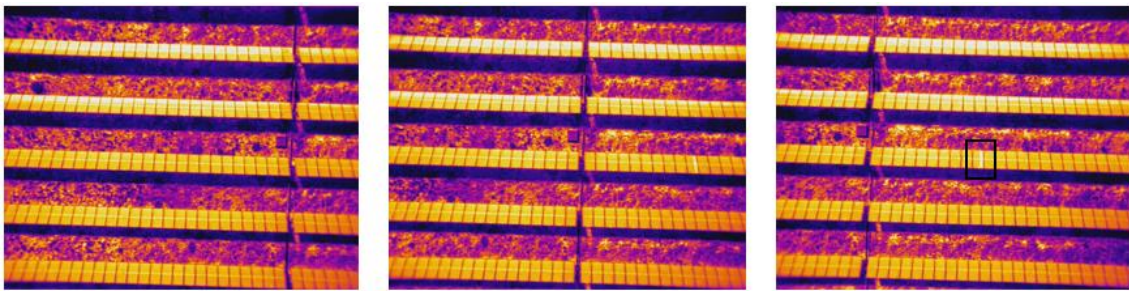
Na termografia aérea utiliza-se um sistema de medição formado por um UAV profissional que integra a uma câmera IRT (*Infrared Thermography*) radiométrica de alta qualidade, assim, têm-se câmera RGB (*Red Green Blue*) ou de luz visível, em um UAV robusto, que oferece autonomia de voo, estabilidade e isolamento contra interferências eletromagnéticas. Também inclui *software* de processamento de imagem que facilita a detecção de falhas, como, por exemplo, o FLIR Tools (DE OLIVEIRA et al., 2020).

Uma câmera aérea RGB auxilia a detecção de problemas não elétricos como sujeira, sombra, ninhos de animais e excrementos de pássaros. Uma imagem apenas térmica poderia potencialmente levar a falsos positivos por identificar erroneamente esses mesmos problemas como anomalias elétricas. À vista disso, a utilização deste sistema de medição possibilita uma consciência visível e contexto para identificar com eficácia e precisão anomalias no campo (FLIR, 2017).

No *software* FLIR Tools os parâmetros que afetam na medição são inseridos: emissividade aproximada de 0,84, temperatura atmosférica e refletida (aproximadamente 2°C a menos que a temperatura ambiente). Assim, pode-se tratar as imagens e inserir “caixas” de mensuração de temperatura no módulo para aferir a diferença de temperatura que causa o problema à ser solucionado.

Durante o voo são captadas inúmeras imagens sequenciais para análise, como apresentado na Figura 7. Para facilitar as análises, a criação de um ortomosaico é essencial para o direcionamento do voo e para possibilitar a obtenção da localização dos módulos com anomalias. Outra ferramenta útil é um *software* de CAD, a fim de orientar as nomenclaturas utilizadas em usinas representadas em um DWG que contêm todas as informações do desenho da planta baixa das mesmas. (DE OLIVEIRA et al., 2020).

Figura 7: Exemplo de sequência de imagens térmicas.



Fonte: A autora.

O diagnóstico de falha ocorre avaliando o módulo fotovoltaico térmico padrão, que é uniforme para módulos saudáveis e que é muito claramente impactado por falhas evidenciadas pela imagem IRT. Exemplos de detectáveis falhas incluem: diodo, célula inativa, *tracker* inativo, módulo quebrado e *string* inativo. Outros problemas que são mais facilmente resolvidos são: sujeira, resíduos e sombreamento. Através do manual da FLIR, pode-se observar os exemplos de anomalias caracterizados na Figura 8 (FLIR, 2017).

Figura 8: Exemplos de anomalias.



Fonte: FLIR (2017).

Em contrapartida aos problemas encontrados em módulos fotovoltaicos, soluções como a limpeza contínua dos mesmos, da vegetação presente no local, da substituição de

pontuais módulos para não afetar o restante do sistema elétrico, são formas de diminuir a falha deste.

3.5 Análise de viabilidade econômica

A análise de viabilidade econômica da implementação de inspeções periódicas de termografia manual e aérea em sistemas fotovoltaicos, tem como objetivo avaliar o orçamento e o tempo de retorno do investimento. Para isso, utilizam-se métodos atuariais como o método do valor presente líquido (VPL) em conjunto com taxa interna de retorno (TIR) e *payback* (DE ALMEIDA, 2017).

Para validar a utilização desses métodos, o auxílio do EXCEL é fundamental, pois o mesmo disponibiliza ferramentas de cálculos através das fórmulas como “VPL” e “TIR” no programa, com o uso dos dados claramente especificados de valores tanto da taxa atual do mercado que deve ser considerada, quanto dos custos para tal operação.

O VPL é responsável por calcular o valor presente dos fluxos de caixa fornecidos pelo projeto ao longo de sua vida útil, considerando o valor do dinheiro no tempo subtraindo deste o investimento inicial do valor presente de suas entradas de caixa, com as reais correções relativas à taxa de juros (DE ALMEIDA, 2017).

$$VPL(n) = -FC_0 + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t}$$

Eq. 1

Onde t é o período em anos, VPL o valor presente líquido no período n , FC_0 o investimento inicial do projeto, FC_t o fluxo de caixa no período n e i a taxa de inflação do mercado atual.

Para avaliar se o VPL é o ideal para o projeto, caracteriza-se como: se o VPL for maior que 0 o projeto está aprovado; igual a 0 o projeto é economicamente indiferente; e menor que 0 o projeto é rejeitado.

A TIR é a taxa de desconto que torna o VPL nulo, ou seja, o valor presente das entradas de caixa é igual ao investimento inicial. Considera-se como a taxa de retorno anual obtida pelo investimento realizado (DE ALMEIDA, 2017).

$$\sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+TIR)^t} = FC_0$$

Eq. 2

Para avaliar se a TIR é a ideal para o projeto, a mesma deve ser maior que a taxa mínima de atratividade, ou seja, taxa de retorno a ser obtida para manter o valor de mercado da ação.

O *payback* é a quantidade de períodos necessários para o projeto acumular o valor de retorno igual ao valor inicialmente investido (DE ALMEIDA, 2017).

$$PBs = \frac{I}{FC}$$

Eq.3

Onde PBs é o *payback*, I o investimento inicial e FC o fluxo de caixa anual, ou seja, o ganho do período.

3.6 Estado da arte

Os desafios e tendências futuras em manutenções e diagnóstico de falhas para o sistema RSE – energia renovável e sustentável, que inclui a energia fotovoltaica, com base em IRT – termografia, ganha revisões constantes a fim de melhorar essa metodologia a ser cada vez mais aplicada.

Com base em um artigo científico “*Progress and trends in fault diagnosis for renewable and sustainable energy system based on infrared thermography: A review*“, onde é apresentado um guia para detecção de defeitos e diagnóstico de falhas de módulos fotovoltaicos com base em IRT, verifica-se que no futuro, para realizar a detecção de aparência anormal do equipamento das usinas e o reconhecimento do status dos equipamentos, será utilizado um robô de inspeção inteligente da subestação de transmissão que deve integrar as tecnologias principais, como detector de plano focal não resfriado, navegação a laser sem rastros e posicionamento, medição de temperatura IR, medidor de leitura inteligente, reconhecimento de imagem, etc., empregando inspeção para todos os climas, aquisição de dados, vigilância por vídeo, medição de temperatura, operação segura de equipamentos elétricos na subestação, contemplando *string box* e inversores.

Já o artigo “*On Field Infrared Thermography Sensing for PV System Efficiency Assessment: Results and Comparison with Electrical Models*“, representa a termografia como um instrumento de análise de eficiência energética, o qual relata um estudo em 12

painéis de trabalho defeituosos que foram investigados. Seus modelos elétricos foram implementados em ambiente MATLAB e desenvolvidos para recuperar a característica I-V ideal (das classificações), as características I-V reais (operacionais) e a eficiência elétrica. Assim, resultou-se em curvas características e suas diferenças relativas, com base em três pontos de referência (circuito aberto, curto-circuito e pontos de potência máxima), e a tipologia de falhas foi evidenciada. As informações obtidas a partir de imagens de termografia infravermelha, realizadas simultaneamente em painéis durante a operação, foram comparadas com as da caracterização elétrica. A "assinatura térmica" dos painéis foi combinada com a "assinatura elétrica", para obter uma representação geral do estado de saúde dos painéis e capacitou a evidência de defeitos a serem corrigidos, o que tornou a análise não somente qualitativa e sim quantitativa.

Outro método atual evidenciado no artigo “*Using EMPHASIS for the Thermography-Based Fault Detection in Photovoltaic Plants*”, é o de diagnóstico em nível de célula rápido, para painéis fotovoltaicos comerciais. EMPHASIS (Método Eficiente para Estudo de Matrizes Fotovoltaicas por Varredura Infravermelha) processa mapas de temperatura obtidos experimentalmente através de câmeras infravermelhas e baseia-se em uma equação de balanço de potência para a identificação de eventos de mau funcionamento, assim como estima as potências elétricas geradas (ou dissipadas) pelas células individuais. O método também aplica simulações numéricas tridimensionais (3-D) para realizar mapas mais realistas. Dessa forma, painéis com defeito foram replicados no ambiente numérico e os mapas de temperatura correspondentes foram fornecidos ao EMPHASIS. O método apresentou excelentes resultados com previsões de energia em nível de célula e de painel, com estimativa da produção de energia de um painel fotovoltaico com uma célula desviada que demonstrou um erro inferior a 1% e em não uniformidades como um painel PV no hotspot, um erro de estimativa na faixa de 9–16% foi quantificado.

Mais um método quantitativo desenvolvido é apresentado no artigo “*Automatic fault recognition of photovoltaic modules based on statistical analysis of UAV thermography*”, o qual apresenta um algoritmo para detectar automaticamente painéis fotovoltaicos defeituosos usando imagens capturadas com uma câmera de imagem térmica de um UAV (veículo aéreo não tripulado). O algoritmo proposto usa análise estatística de características de intensidade (temperatura da superfície) de cada módulo PV para verificar a intensidade média e o desvio padrão de cada painel como parâmetros

para diagnóstico de falhas. Nele, desenvolveu-se uma regra de detecção local com base nesses parâmetros para detectar módulos fotovoltaicos defeituosos de arranjo individual automaticamente e apresentou um teste em três imagens de amostra, que verificou uma precisão de detecção de painéis defeituosos de 97% ou superior. Além disso, como o algoritmo proposto é capaz de ajustar a faixa de valores limite para julgar o mau funcionamento no nível da matriz, a regra de detecção local é considerado mais adequado para detecção de falha altamente sensível em comparação com uma regra de detecção global.

Para finalizar o estudo de como estão as pesquisas frente a utilização de termografias em usinas fotovoltaicas, o artigo “*Photovoltaic plant condition monitoring using thermal images analysis by convolutional neural network-based structure*” destacou a importância de uma nova abordagem para detectar nos painéis os pontos quentes e definir suas localizações. Assim, foram realizadas duas novas redes neurais convolucionais baseadas em regiões unificadas para gerar uma estrutura de detecção robusta. A principal contribuição foi a combinação de dados de termografia e telemetria para fornecer uma resposta do monitoramento da condição do painel. Os dados são adquiridos e processados automaticamente, permitindo a detecção de falhas durante a inspeção. Além disso, apresentou uma descrição detalhada da metodologia, incluindo as diferentes etapas para a construção das redes neurais, ou seja, o processo de treinamento, a aquisição e processamento de dados e a geração de resultados. Uma inspeção termográfica de uma usina solar fotovoltaica real foi feita para validar a metodologia proposta. A precisão, a eficiência e o desempenho da abordagem em diferentes cenários reais e obteve resultados satisfatórios.

Com isto posto, verificou-se que existe uma grande escala de pesquisa diante da área da termografia para a manutenção preventiva de usinas fotovoltaicas, tornando-a não somente uma análise qualitativa dos maus funcionamentos dos painéis e equipamentos dentro da central, e sim quantitativa com base de dados detalhadas para as correções desejadas.

4. METODOLOGIA

Os métodos aqui expostos são utilizados na empresa Mv Power, a qual será utilizada como referência. Será realizado dois estudos de caso na Usina X e Usina Y, assim denominadas para manter a integridade da empresa referenciada, e dois sistemas de medição serão abordados: a termografia manual para equipamentos como *string box* e inversores e a termografia aérea para inspeção de painéis fotovoltaicos. Também serão apresentados os custos dos mesmos referentes a manutenção preventiva, em comparação aos custos dos danos à vida útil dos sistemas fotovoltaicos caso ela não ocorra. O primeiro sistema consiste em uma câmera termográfica FLUKE Ti450 e o segundo sistema uma câmera termográfica, DJI Zenmuse XT2, combinada com UAV, DJI Matrice 600 Pro.

4.1 Equipamentos

Para a realização de uma termografia manual, o equipamento utilizado é a câmera térmica *Fluke Ti450*, equipada com foco automático *LaserSharp™* para a captura de imagens, apresentando uma melhor resolução, pois uma imagem sem foco pode ocasionar a perda da precisão de temperatura, às vezes com diferença de até 20 graus. Pode-se observar a câmera na Figura 9 e seus recursos na Tabela 1 (FLUKE, 2018).

Figura 9: Câmera termográfica FLUKE Ti450.



Fonte: FLUKE (2018).

Tabela 1: Recursos da câmera termográfica FLUKE Ti450.

MODELO FLUKE TI450

PESO	1,04 Kg
RESOLUÇÃO	320x240
SENSIBILIDADE TÉRMICA	<0,05 °C

Fonte: FLUKE (2018).

Já para a realização de termografia aérea usa-se dois equipamentos: UAV e câmera térmica acoplada. O Matrice 600 Pro, representado na Figura 10, é um drone que apresenta um bom desempenho de voo e é equipado com câmera termográfica DJI Zenmuse XT2, representada na Figura 11. A integração total com *software* e *hardware* de terceiros tornam o DJI Matrice 600 Pro adequado para fotografia aérea profissional (DJI, 2021).

Figura 10: DJI Matrice 600 Pro.



Fonte: DJI (2021).

A câmera DJI Zenmuse XT2, com recursos apresentados na Tabela 2, integra um sensor térmico FLIR de alta resolução e uma câmera visual 4K com alta tecnologia de estabilização da DJI, capaz de transformar rapidamente os dados aéreos em boas percepções para posteriores análises dos painéis solares (DJI, 2021).

Figura 11: Câmera DJI Zenmuse XT2.



Fonte: DJI (2021).

Tabela 2: Recursos da câmera termográfica DJI Zenmuse XT2.

MODELO DJI ZENMUSE XT2

PESO	0,27 Kg
RESOLUÇÃO	640x512
SENSIBILIDADE TÉRMICA	<0,05 °C
LENTE	MM FOV 57,12° x 42,22°

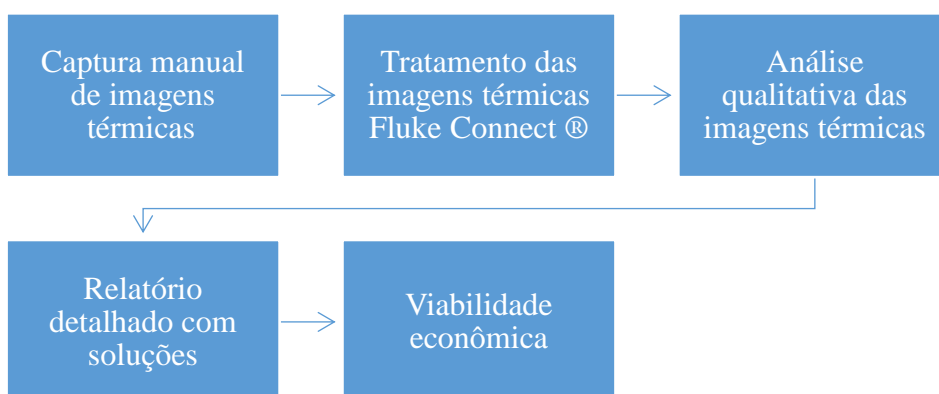
Fonte: DJI (2021).

4.2 Sistema 1: metodologia manual

Para a realização da termografia manual, o sistema por si só já denomina como as imagens térmicas são feitas: manualmente por um colaborador. O colaborador caminha por toda usina para inspecionar os equipamentos citados, geralmente em dias ensolarados, portanto, é uma tarefa desgastante para quem faça. Contudo, tem-se um alcance de nitidez de imagem de cabeamentos dentro dos equipamentos eficaz perante ao esforço humano.

Dessa forma, o método baseia-se em uma rota de inspeção dependente do esforço e capacidade do colaborador, que realiza a captura de imagem; em seguida, com as imagens realizadas, as mesmas são enviadas para outros colaboradores que irão tratá-las no *software* adequado Fluke Connect ®; por fim, os mesmos irão analisar as imagens e retratarão em um relatório detalhado as imagens com identificação de equipamentos inspecionados relatando quais devem ser substituídos ou reparados. Este método é exemplificado na Figura 12.

Figura 12: Método aplicado na termografia manual.



Fonte: A autora.

4.3 Sistema 2: metodologia aérea

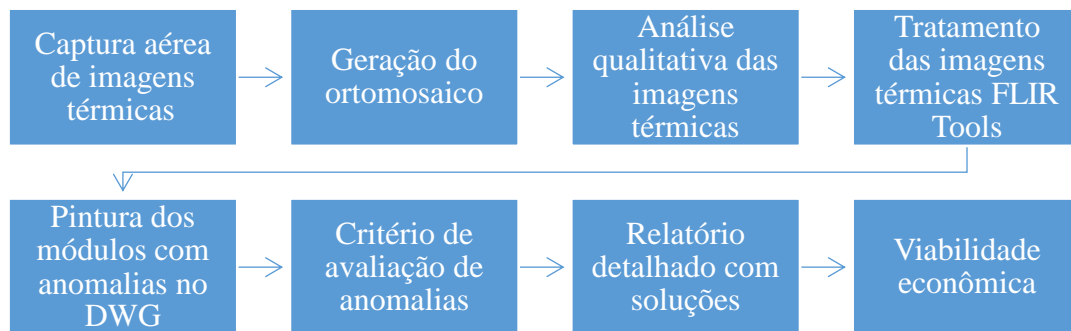
Para a inspeção de painéis fotovoltaicos, utiliza-se o sistema 2 com voos no decorrer da usina para caracterizar a temperatura relativa de todo o sistema de energia solar considerado. A trajetória do voo é planejada anteriormente a cada tarefa de inspeção e a rota deve ser bem documentada pelo colaborador responsável. Assim, o fator humano não é considerado um limitante para a realização da inspeção.

Para um melhor alcance da eficácia das imagens térmicas e RGB realizadas por esse sistema, deve-se seguir as condições ideais para o monitoramento aéreo: a orientação do sensor IRT juntamente ao UAV deve ser perpendicular aos módulos fotovoltaicos e mantidos constantes no voo; a altitude do voo não pode prejudicar as imagens capturadas, dessa forma, o UAV deve estar com altitude de pelo menos cinco metros para evitar qualquer auto-sombreamento nos painéis; a inspeção IRT deve ser realizada em dias ensolarados, sem nuvens, brilhantes e secos, com velocidade do vento não excedendo 4 m/s para não ocasionar perturbação no UAV durante o procedimento; e, por fim, ressalta-se que o melhor período de inspeção deste sistema é entre meio-dia, pois, a direção do sol encontra-se perpendicular aos módulos fotovoltaicos e irradiação sempre superior a 600 W/m² no plano do painel (DE OLIVEIRA et al., 2020).

Com as recomendações definidas, o método inicia-se com uma rota do UAV inicialmente programada e executada automaticamente pelo *software* do drone. Após o fim do voo, as imagens são enviadas para outros colaboradores que irão gerar um ortomosaico, a fim de direcionar o voo e pontualizar a localidade dos módulos com anomalias; com o ortomosaico pronto, as imagens serão analisadas e tratadas no *software*

FLIR Tools; com os módulos identificados, realiza-se a pintura dos mesmos em vermelho no DWG da planta baixa da usina em questão; além da análise qualitativa, usa-se o critério de avaliação de anomalias que consiste na diferença de temperatura corrigida diante da irradiação; por fim, essas informações são agrupadas em um relatório detalhado com os módulos que apresentarem anomalias para serem substituídos, evitando assim perda significativa do rendimento elétrico da usina. Este método é exemplificado na Figura 13.

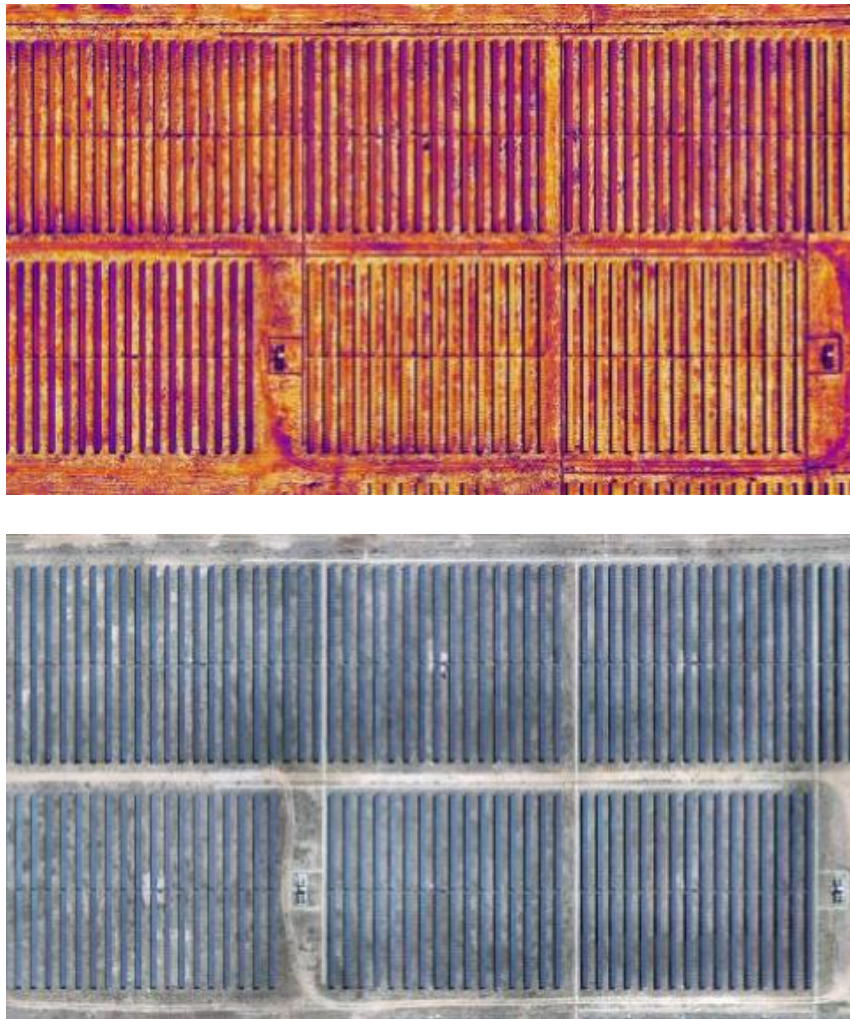
Figura 13: Método aplicado na termografia aérea.



Fonte: A autora.

Utiliza-se *dronedeploy.com* para realização do ortomosaico da usina fotovoltaica, tanto termográfico quanto RGB – Real, como pode ser observado na Figura 14.

Figura 14: Exemplo de um ortomosaico térmico e RGB.



Fonte: A autora.

Usando o critério de avaliação de anomalias utilizado pela empresa Mv Power, considera-se necessária uma conversão dos dados radiométricos obtidos na inspeção termográfica, para uma mesma base de irradiância padrão, equivalente a 1000W/m^2 . Essa correção é obtida pelo produto entre a variação de temperatura, a célula mais quente e a célula mais fria do painel, e um fator de correção relacionado com a irradiância presente no momento do voo.

Esse fator de correção é função da razão entre as irradiâncias medida e padrão e um fator x que considera as diferentes curvas de anormalidade, definido como 1,5. A equação a seguir ilustra a obtenção da diferença de temperatura corrigida (ΔT) em função das irradiâncias padrão (G_2) e medida (G_1), além da diferença de temperatura medida (ΔT_1).

$$\Delta T = \frac{G2}{G1} * \Delta T1$$

Eq. 4

4.4 Viabilidade econômica

Para a execução de uma análise da viabilidade econômica na usina em questão, divide-se essa metodologia em etapas (DE ALMEIDA, 2017).

Etapa 1: Cálculo das despesas com termografias – manutenção preventiva, normalmente feita por uma empresa terceirizada;

Etapa 2: Cálculo das despesas causadas pela não manutenção preventiva, ou seja, custo das perdas sobressalentes dos painéis em “efeito dominó”;

Etapa 3: Projeção econômica, considerando as 2 etapas anteriores;

Etapa 4: Análise econômica do investimento.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A fim de uma operação constante e de máximo rendimento possível em usinas solares fotovoltaicas, é necessário identificar e analisar possíveis problemas nos diversos componentes e subsistemas para evitar a redução da produtividade da central. Utilizando o recurso da termografia, foi possível identificar os módulos fotovoltaicos com irregularidades térmicas e a vistoria desejada nos equipamentos: *string box* e inversores das Usinas X e Y.

5.1 Usina X

Realizando as análises já exemplificadas referentes as termografias manuais e aéreas, chegou-se a um resumo da quantidade de módulos e anomalias encontradas na Usina X, apresentados na Tabela 3 e de um resumo da inspeção manual realizada nos equipamentos: inversores e *string box*, na Tabela 4.

Tabela 3: Resumo dos módulos com anomalias da Usina X.

ANOMALIA	QUANTIDADE DE MÓDULOS
DIODO	8
CÉLULA INATIVA/SUJEIRA	18
RESÍDUO	0
SOMBRA	0
TRACKER INATIVO	0
QUEBRADO	0
STRING INATIVA	0

Fonte: A autora.

Tabela 4: Resumo da termografia manual da Usina X.

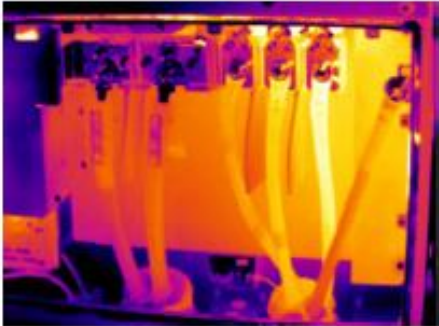

QUANTIDADE DE EQUIPAMENTOS	APRESENTARAM ANOMALIAS
40 INVERSORES	0
40 STRING BOX	0

Fonte: A autora.

As análises são agrupadas em relatórios exemplificados nas Figuras 15, 16 e 17 abaixo, com detalhamento de imagem, temperatura, sugestões de reparo e observações para termografias manuais e, nas termografias aéreas, detalhamento de imagem, temperatura, delta T corrigido, coordenadas geográficas para identificação específica do

módulo e parâmetros de entrada no tratamento das imagens. Em ambas as termografias, são especificadas as nomenclaturas dos equipamentos analisados, assim como suas unidades geradoras.

Figura 15: Relatório da termografia manual realizada em inversores.

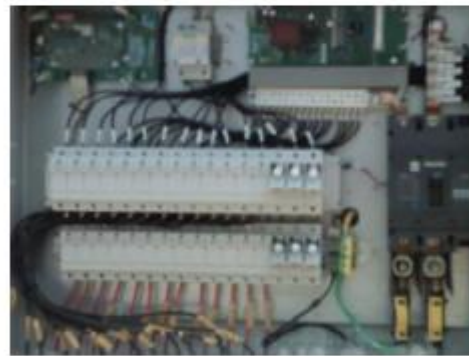
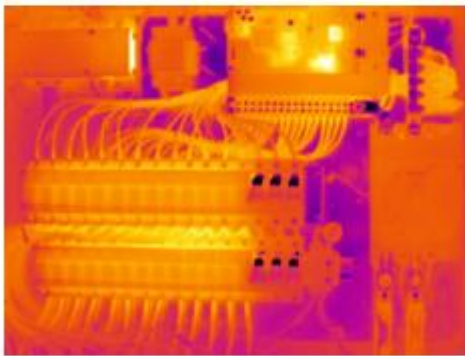
Relatório de Termografia		Data da inspeção: 28/02/2020	
Equipamento	TAG	Anomalia Detectada	
Inversor	INV 01	NA	
Local	T(°C)	Corrente(A)	Sugestão de Reparo
Pólo Positivo (+)	55,62	91,6	NA
Pólo Negativo (-)	54,77	-91,6	NA
Fase A	56,23	50,2	NA
Fase B	56,56	50,1	NA
Fase C	55,17	50,4	NA
Termografia		Imagem Real	
			
Observação da Inspeção			
Nenhum padrão de aquecimento verificado nas conexões individuais dos inversores, fiação, barramentos, fusíveis e qualquer outra conexão elétrica do referido Inversor.			

Fonte: A autora.

Figura 16: Relatório da termografia manual realizada em *string box*.

Relatório de Termografia			Data da Inspeção: 02/03/2020
Equipamento	TAG		Anomalia Detectada
String Box	CB-01		NA
Local	T(°C)	Corrente(A)	Sugestão de Reparo
Pólo Positivo (+)	48,2	97,8	NA
Pólo Negativo (-)	47,9	- 97,8	NA

Termografia	Imagem Física
-------------	---------------

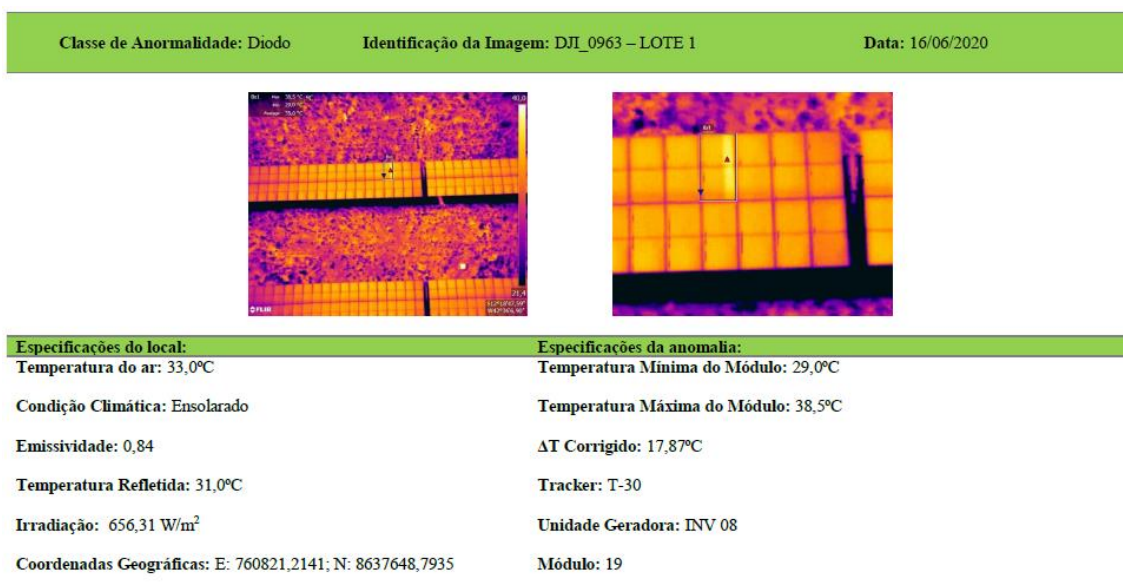


Observação da Inspeção

Nenhum padrão de aquecimento verificado nas conexões individuais das strings, fusíveis, e qualquer outra conexão elétrica da referida String Box.

Fonte: A autora.

Figura 17: Relatório da termografia aérea realizada em módulos fotovoltaicos.



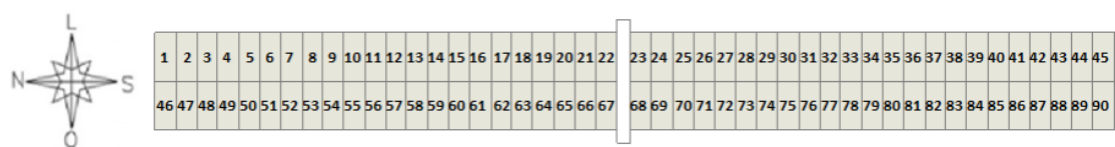
Fonte: A autora.

Dessa forma, com os resultados apresentados, observou-se que equipamentos como inversores e *string box* não relataram nenhum tipo de anomalia, ou seja, nenhum padrão de aquecimento, não precisando de reparo para o seu bom funcionamento. Já nos módulos fotovoltaicos, 26 apresentaram anomalias, 8 com diodos e 18 com células inativas/sujeiras.

Contudo, esse número de módulos afetados pelas anomalias não se limita aos 26, pois os mesmos afetam toda a *string* que está presente. Assim, uma célula inativa, que corresponde a 1/72 da energia de um módulo, afeta 1/72 multiplicado por 30, que é a quantidade de módulos dentro da *string*. Já o diodo corresponde a 1/3 da energia de um módulo e afeta 1/3 multiplicado por 30 módulos dentro da *string*. Conclui-se então que os 26 módulos que apresentaram anomalia correspondem a 87,5 módulos afetados.

Ressalta-se que foi possível essa análise através do detalhamento apresentado em quais *trackers/strings* as anomalias se encontram, apresentado na Tabela 5 e da disposição dos módulos em cada *string*, representada na Figura 18. Em um *tracker* existem 90 módulos e em cada *string* 30, assim, existem 3 *strings* no *tracker*, que são representadas como: *string* 1, equivale aos módulos de 1 a 30, *string* 2 do módulo 46 a 75 e *string* 3, módulos 31 a 45 e 76 a 90.

Figura 18: Disposição dos módulos no *tracker*.



Fonte: A autora.

Tabela 5: Detalhamento das anomalias da Usina X.

Número do Tracker	Anomalia	Módulo
T-16	Célula Inativa/Sujeira	23
T-30	Diodo	19
T-34	Célula Inativa/Sujeira	30,31
T-50	Diodo	90
T-53	Célula Inativa/Sujeira	29,32
T-70	Célula Inativa/Sujeira	26
T-73	Célula Inativa/Sujeira	7,11
T-93	Diodo	24
T-94	Célula Inativa/Sujeira	21
T-106	Célula Inativa/Sujeira	77,85
T-113	Diodo	37
T-124	Diodo	72
T-126	Diodo	4
T-134	Diodo	87
T-135	Célula Inativa/Sujeira	19
T-136	Célula Inativa/Sujeira	64
T-136	Diodo	63
T-141	Célula Inativa/Sujeira	62
T-145	Célula Inativa/Sujeira	29,30,74,75

Fonte: A autora.

Analisando economicamente a Usina X, com os dados coletados da mesma: valor do investimento das despesas com manutenção preventiva, das despesas causadas pela não manutenção, do fator de capacidade e geração de energia da central, assim como a perda de geração na não funcionalidade dos módulos correspondentes a anomalias,

chegou-se à projeção econômica representada na Figura 19, que abrange os dados de entrada e saída no EXCEL.

Figura 19: Análise econômica realizada no EXCEL da Usina X.

Potência Instalada	6176250 Wp
Vida Útil	25 anos
Juros de mercado	5,25% a.a.
Juros de mercado - ao mês	0,43% a.m.
Custo O&M	10000 R\$
Custo do painel fotovoltaico	750 R\$
Quantidade de módulo	16470 unidade
Potência Instalada em cada módulo	375 Wp
Fator de capacidade	23,7%

Energia produzida	35130,51 kWh/dia
Custo da eletricidade	0,206 R\$/kWh
Valor da energia	7236,88506 R\$/dia
Quantidade de módulo com anomalia	26 unidade
Energia perdida	32812,5 W
Eletricidade perdida	186,64 kWh/dia
Valor de energia perdida	38,45 R\$/dia
Valor de módulo perdido	19500 R\$

Perda de energia	
Célula Inativa/Sujeira	1/72
Diodo	1/3
Qtd. Módulo na String	30
Qtd. Anomalia Célula Inativa	18
Qtd. Anomalia Diodo	8
Anomalias na mesma String	14
Perda de energia - equipamentos	0
Qtd. Energia afetada	87,5

	janeiro	fevereiro	março	abril	maio	junho
Custo de O&M	10000	0	0	0	0	0
Custo dos módulos - troca	19500	0	0	0	0	0
Custo de energia perdida	0,00	1153,42	1153,42	1153,42	1153,42	1153,42
Resultado	-29500,00	1153,42	1153,42	1153,42	1153,42	1153,42

Subsequente aos próximos meses durante 25 anos (vida útil do sistema).

VPL	164997,53 R\$
TIR	3,91% a.m. 58,45% a.a.
PAYBACK	25,58 meses Aprox. 26 meses = 2 anos e 2 meses

Fonte: A autora.

Como representado na Figura 19, inicialmente verificou-se a entrada de dados em relação a Usina X e ao mercado atual: a potência instalada na mesma com aproximadamente 6,2 MWp, vida útil de 25 anos, o custo de operação e manutenção atrelada a uma manutenção preventiva de uma terceirizada de R\$10000,00, o custo de cada painel fotovoltaico, a quantidade deles presente na Usina X e sua potência instalada, assim como os juros de mercado ao ano e ao mês, taxa Selic referente ao mês de setembro de 2021.

Com os dados imputados, juntamente ao valor da venda de energia pela ANEE – Agência Nacional de Energia Elétrica, em leilões de energia solar, de 0,206 R\$/KWh, pôde-se calcular a energia produzida ao dia, por toda a Usina X, considerando o fator de capacidade de 23,7%, calculado pela usina pelo funcionamento e geração de energia durante o ano todo, assim como o valor da eletricidade perdida diante da quantidade de módulo com anomalia, já considerando a correspondência exemplificada anteriormente. Dessa forma, chegou-se a um valor de R\$38,45 por dia de venda de eletricidade perdida e, caso isso não seja reparado, perderá o valor de R\$1153,42 por mês, durante toda vida útil do sistema de 25 anos.

A manutenção preventiva aplicada por uma terceirizada equivale a R\$10000,00 e somando aos módulos que devem ser trocados R\$19500,00, correspondendo a 26 módulos perdidos com o valor aproximado de R\$750,00, informado pela empresa referência deste estudo de caso Mv Power, o valor gasto com a manutenção é R\$29500,00. Então, esse valor será investido inicialmente e, comparando ao valor perdido de eletricidade ao mês com a não manutenção na Usina X, fez-se a análise econômica e conclui-se que o retorno para esse investimento, *payback*, é de 2 anos e 2 meses.

Essa manutenção realizada inicialmente, quando a Usina começa a operar, é importante pois, ao ser construída, a falta de cuidado no manuseio das placas solares pode ocasionar anomalias que conseqüentemente causarão prejuízos mencionados durante toda sua vida útil. Outras manutenções preventivas são realizadas durante a operação contínua da central, como a limpeza dos módulos, por exemplo. Assim, o *payback* exposto é 8,7% da vida útil do sistema, ou seja, o retorno é muito rápido comparando aos anos que ainda funcionará.

Avaliando o VPL do projeto, se o VPL for maior que 0 o projeto está aprovado; igual a 0 o projeto é economicamente indiferente; e menor que 0 o projeto é rejeitado, como na análise feita o VPL deu um valor de R\$164997,53, revelou-se um investimento apropriado. Da mesma forma ocorre avaliando a TIR, a qual deve ser maior que a taxa mínima de atratividade, ou seja, taxa de retorno a ser obtida para manter o valor de mercado da ação, então, com uma TIR de 58,45% a.a., maior que a taxa de juros de mercado – Selic, 5,25 % a.a., confirmou-se que o investimento é ideal para a Usina X.

5.2 Usina Y

Na Usina Y, realizou-se as mesmas análises já exemplificadas referentes a termografias manuais e aéreas e chegou-se a um resumo da quantidade de módulos e anomalias encontradas na Tabela 6 e um resumo da inspeção manual realizada nos equipamentos: inversores e *string box*, na Tabela 7.

Tabela 6: Resumo dos módulos com anomalias da Usina Y.

ANOMALIA	QUANTIDADE DE MÓDULOS
DIODO	1
CÉLULA INATIVA/SUJEIRA	10
RESÍDUO	0
SOMBRA	0
TRACKER INATIVO	0
QUEBRADO	0
STRING INATIVA	0

Fonte: A autora.

Tabela 7: Resumo da termografia manual da Usina Y.

QUANTIDADE DE EQUIPAMENTOS	APRESENTARAM ANOMALIAS
08 INVERSORES	0
08 STRING BOX	0

Fonte: A autora.

Conforme apresentado na Usina X, as análises seguem agrupadas em relatórios exemplificados nas Figuras 15, 16 e 17, com os mesmos detalhamentos descritos anteriormente.

Na Usina Y, observou-se uma quantidade menor de equipamentos, tanto de inversores e *string box*, como módulos fotovoltaicos. Os 8 inversores e 8 *strings box* não relataram nenhum tipo de anomalia, não precisando de reparo para o seu bom funcionamento. Já nos módulos fotovoltaicos, de 3330 módulos, 11 apresentaram anomalias, 1 com diodo e 10 com células inativas/sujeiras.

Seguindo a mesma regra da correspondência dos módulos afetados dentro de uma *string*, os 11 módulos que apresentaram anomalias correspondem a 14,2 módulos afetados, uma quantidade menor comparada ao da Usina X, pois as anomalias apresentadas foram majoritariamente células inativas/sujeiras, que tem representatividade menor dentro de um módulo, de 1/72. Essa correspondência foi baseada no detalhamento apresentado em quais *trackers/strings* as anomalias se encontram, na Tabela 8, e, assim como na Usina X, na disposição dos módulos por *string box*.

Tabela 8: Detalhamento das anomalias da Usina Y.

Número do Tracker	Anomalia	Módulo
T-01	Célula Inativa/Sujeira	33
T-09	Célula Inativa/Sujeira	11,15
T-09	Célula Inativa/Sujeira	30,76
T-14	Célula Inativa/Sujeira	46
T-15	Célula Inativa/Sujeira	68
T-15	Célula Inativa/Sujeira	75
T-15	Célula Inativa/Sujeira	90
T-21	Diodo	14
T-29	Célula Inativa/Sujeira	76

Fonte: A autora.

Analisando economicamente a Usina Y, com os mesmos dados coletados da Usina X, chegou-se à projeção econômica representada na Figura 20, que abrange os dados de entrada e saída no EXCEL.

Figura 20: Análise econômica realizada no EXCEL da Usina Y.

Potência Instalada	1248750 Wp
Vida Útil	25 anos
Juros de mercado	5,25% a.a.
Juros de mercado - ao mês	0,43% a.m.
Custo O&M	2000 R\$
Custo do painel fotovoltaico	750 R\$
Quantidade de módulo	3330 unidade
Potência Instalada em cada módulo	375 Wp
Fator de capacidade	25,5%

Energia produzida	7642,35 kWh/dia
Custo da eletricidade	0,206 R\$/kWh
Valor da energia	1574,3241 R\$/dia
Quantidade de módulo com anomalia	11 unidade
Energia perdida	5312,5 W
Eletricidade perdida	32,51 kWh/dia
Valor de energia perdida	6,70 R\$/dia
Valor de módulo perdido	8250 R\$

Perda de energia	
Célula Inativa/Sujeira	1/72
Diodo	1/3
Qtd. Módulo na String	30
Qtd. Anomalia Célula Inativa	10
Qtd. Anomalia Diodo	1
Anomalias na mesma String	2
Perda de energia - equipamentos	0
Qtd. Energia afetada	14,2

	janeiro	fevereiro	março	abril	maio	junho	
Custo de O&M	2000	0	0	0	0	0	0
Custo dos módulos - troca	8250	0	0	0	0	0	0
Custo de energia perdida	0,00	200,93	200,93	200,93	200,93	200,93	200,93
Resultado	-10250,00	200,93	200,93	200,93	200,93	200,93	200,93

Subsequente aos próximos meses durante 25 anos (vida útil do sistema).

VPL	23631,73 R\$
TIR	1,95% a.m. 26,14% a.a.
PAYBACK	51,01 meses Aprox. 52 meses = 4 anos e 4 meses

Fonte: A autora.

Como representado na Figura 20, a entrada de dados é a mesma que na Usina X: potência instalada na Usina Y com aproximadamente 1,3 MWp, vida útil de 25 anos, o custo de operação e manutenção atrelada a uma manutenção preventiva de uma terceirizada de R\$2000,00, o custo de cada painel fotovoltaico, a quantidade deles presente na Usina Y e sua potência instalada, assim como os juros de mercado ao ano e ao mês, taxa Selic referente ao mês de setembro de 2021.

Com os dados imputados, juntamente ao valor da venda de energia pela ANEE – Agência Nacional de Energia Elétrica, em leilões de energia solar, de 0,206 R\$/KWh, pôde-se calcular a energia produzida ao dia da Usina Y, considerando o fator de capacidade de 25,5%, assim como o valor da eletricidade perdida diante da quantidade de módulo com anomalia, já considerando a correspondência exemplificada anteriormente. Dessa forma, chegou-se a um valor de R\$6,70 por dia de venda de eletricidade perdida e, caso isso não seja reparado, perderá o valor de R\$200,93 por mês, durante toda vida útil do sistema de 25 anos.

A manutenção preventiva aplicada por uma terceirizada equivale a R\$2000,00 e somando aos módulos que devem ser trocados R\$8250,00, correspondendo a 11 módulos perdidos com o valor aproximado de R\$750,00, o valor gasto com a manutenção é R\$10250,00. Então, esse valor será investido inicialmente e, comparando ao valor perdido de eletricidade ao mês com a não manutenção na Usina Y, fez-se a análise econômica e conclui-se que o retorno para esse investimento, *payback*, é de 4 anos e 4 meses, o que equivale a aproximadamente 17,3% da vida útil do sistema, um retorno rápido de investimento.

Avaliando se o VPL é o ideal para o projeto, como na análise feita o VPL deu um valor de R\$23631,73, revelou-se que o investimento é apropriado. Da mesma forma ocorre avaliando a TIR, com um valor de 26,14% a.a., maior que a taxa de juros de mercado – Selic, 5,25% a.a., confirmou-se que o investimento é ideal para a Usina Y.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou a exemplificação de uma metodologia para determinação de anomalias em painéis fotovoltaicos e equipamentos como *string box* e inversores por meio da termografia, assim como o retorno financeiro desta aplicação, com embasamento em pesquisas bibliográficas. O funcionamento das inspeções fornecido neste trabalho comprova a eficácia desse tipo de manutenção preventiva, a qual utiliza equipamentos e *softwares*, capazes de fornecer informações detalhadas para a usina fotovoltaica para eliminar perda de geração de energia e problemas futuros.

Conforme apresentado em “Resultados e Discussões”, este detalhamento das inspeções facilita o trabalho dos colaboradores para a troca dos módulos, georeferenciados para não ocorrer perdas de módulos sem anomalias. Essas anomalias são elevações de temperatura pontuais que são, em geral, indício de danos ou defeitos de fabricação nos módulos fotovoltaicos. Assim, ocorrências desse tipo devem ser detectadas no início da operação da usina, na etapa de comissionamento a quente, que é quando a usina ou parte dela é colocada em operação ainda na fase de testes, e, também, em ações de operação e manutenção que devem ser realizadas periodicamente ao longo da vida útil do sistema.

Deste modo, na Usina X, com a manutenção indicada inicialmente conforme apresentado no primeiro mês de vida útil, com o valor de R\$29500,00, somatizando o valor pago pela terceirizada e os módulos que serão trocados e, comparando ao valor de perda mensal de venda de eletricidade gerada pela Usina X, R\$1153,42, durante toda vida útil do sistema de 25 anos, chegou-se a um retorno para esse investimento, *payback*, de 2 anos e 2 meses, o que representa um retorno muito rápido.

Concluiu-se então que o investimento é apropriado, já que além de obter um *payback* positivo, ao analisar economicamente esse retorno financeiro, o VPL maior que 0 e a TIR maior que a taxa de atratividade do mercado, Selic, o investimento é ideal para a Usina X.

Na Usina Y, a mesma viabilidade econômica foi vista, com uma manutenção inicial no valor de R\$10250,00, somatizando o valor pago pela terceirizada e os módulos que serão trocados, em comparação com a perda mensal de venda de eletricidade gerada de R\$200,93, durante os 25 anos de vida útil, verificou-se um retorno de 4 anos e 4 meses.

O retorno do investimento foi o dobro em comparação ao retorno da Usina X, mas comprova que mesmo em usinas pequenas, a manutenção preventiva é indispensável com um retorno rápido se comparado com a vida útil do sistema.

Além do *payback* ser viável, o VPL é maior que 0 e a TIR maior que a taxa de atratividade do mercado, taxa Selic, o que comprova que o investimento na Usina Y também é ideal.

A utilização da termografia, as vantagens e o retorno do valor investido em curto prazo mostram que a sua implementação não é apenas um diferencial que a empresa pratica em seus sistemas de manutenção, mas sim uma necessidade, pois a não observação desta técnica acarreta prejuízos que vão desde o desperdício de recursos com manutenções desnecessárias até o potencial risco de destruição parcial ou total do sistema elétrico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Disponível em <Microsoft Power BI> Acesso em: 14 de setembro de 2021.

ALTOÉ, Leandra; OLIVEIRA FILHO, Delly. **Termografia infravermelha aplicada à inspeção de edifícios.** Acta Tecnológica, v. 7, n. 1, p. 55-59, 2012.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. Disponível em <<https://www.bcb.gov.br/detalhenoticia/17461/nota>> Acesso em: 14 de setembro de 2021.

CARAMALHO, Alberto. **25 anos em termografia.** 1ª ed. Portugal: Bubok, 2012.

CATALANO, Antonio Pio et al. **Using EMPHASIS for the Thermography-Based Fault Detection in Photovoltaic Plants.** Energies, v. 14, n. 6, p. 1559, 2021.

DA SILVA, B. P. A. **Metodologia para a determinação de temperatura em painéis fotovoltaicos por meio de termografia quantitativa.** 2017.

DE ALMEIDA, Renata Ribeiro Guedes et al. **Proposição de uma metodologia para análise de viabilidade econômica de uma usina fotovoltaica.** Rev Principia, v. 1, n. 34, p. 84-92, 2017.

DE OLIVEIRA, Aline Kirsten Vidal; AGHAEI, Mohammadreza; RÜTHER, Ricardo. **Aerial infrared thermography for low-cost and fast fault detection in utility-scale PV power plants.** Solar Energy, v. 211, p. 712-724, 2020.

DJI. Disponível em <<https://www.dji.com/br>> Acesso em: 20 de fevereiro de 2021.

DU, Bolun et al. **Progress and trends in fault diagnosis for renewable and sustainable energy system based on infrared thermography: A review.** Infrared Physics & Technology, v. 109, p. 103383, 2020.

FLIR. **A guide to inspecting solar fields with thermal imaging drones.** 2017.

FLUKE. **Connected Solutions 2017-2018 Test Tools Catalog.** 2018.

GLAVAŠ, Hrvoje et al. **Infrared thermography in inspection of photovoltaic panels.** In: 2017 International Conference on Smart Systems and Technologies (SST). IEEE, 2017. p. 63-68.

HERRAIZ, Álvaro Huerta; MARUGÁN, Alberto Pliego; MÁRQUEZ, Fausto Pedro García. **Photovoltaic plant condition monitoring using thermal images analysis by convolutional neural network-based structure.** Renewable Energy, v. 153, p. 334-348, 2020.

INFOGRÁFICO ABSOLAR. Disponível em <<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>> Acesso em: 16 de outubro de 2021.

KIM, Dusik; YOUN, Junhee; KIM, Changyoon. **Automatic fault recognition of photovoltaic modules based on statistical analysis of UAV thermography.** The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. 42, p. 179, 2017.

MONTEIRO, Manuel Maria Maia Marques Líbano. **Desenvolvimento de um método de detecção e análise de falhas em centrais fotovoltaicas por termografia.** 2018. Tese de Doutorado.

MUTTILLO, Mirco et al. **On field infrared thermography sensing for PV system efficiency assessment: Results and comparison with electrical models.** Sensors, v. 20, n. 4, p. 1055, 2020.

PINHO, J. T. e GALDINO, M . A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Edição Revisada e Atualizada.** Rio de Janeiro. 2014.

SANTOS, Tiago Pereira dos. **O estudo do estado da arte dos procedimentos de termografia na manutenção dos sistemas elétricos.** 2017.

SILVA, Enid Rocha Andrade da Coordenadora. **Agenda 2030: Ods - metas nacionais dos objetivos de desenvolvimento sustentável.** 2018.

TEXEIRA, Marcos José. **Manutenção por termografia em chaves seccionadoras de redes de distribuição de energia elétrica utilizando a modelagem multicritério de apoio a decisão.** 2017.