

INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA A PAINÉIS FOTOVOLTAICOS COM RECURSO A DRONE

Resumo:

A inspeção termográfica a painéis fotovoltaicos com recurso a *drones* é uma alternativa tecnológica em atual desenvolvimento que proporciona uma solução eficaz e económica para a avaliação do desempenho de sistemas solares e sua manutenção. Equipados com câmaras termográficas de alta resolução, os *drones* podem sobrevoar os painéis solares e capturar imagens térmicas detalhadas de forma rápida e precisa.

Este artigo visa apresentar o estado de desenvolvimento da realização de inspeções termográficas a centrais fotovoltaicas, fazendo uso de *drones*. Os objetivos deste estudo são expor as vantagens e desvantagens referentes à utilização de *drones* na monitorização de painéis fotovoltaicos e explicar como se atribui níveis de severidade aos defeitos capturados nas imagens termográficas realizadas, para tomar as medidas adequadas à resolução das anomalias.

Palavras-chave: Painéis fotovoltaicos (FV); Manutenção; Inspeção Termográfica; *Drone*; Defeitos

1. Introdução

A energia solar fotovoltaica, pela sua popularidade e fácil acesso, tem-se tornado numa das principais fontes de energia renovável.

É uma fonte limpa e com reduzido impacto ambiental, o que faz com que seja das opções energéticas mais requisitadas em todo o mundo [1]. No entanto, para garantir o melhor desempenho dos sistemas fotovoltaicos e maximizar a sua produção de energia, é essencial monitorizar o funcionamento dos painéis solares, assim como manter a regularidade das ações de manutenção [2].

A inspeção termográfica tem sido uma solução técnica valiosa para identificar potenciais falhas, anomalias e problemas de desempenho nos painéis FV.

É uma abordagem que permite identificar áreas com sobreaquecimento, mau contato elétrico, células defeituosas ou outros problemas que possam comprometer a eficiência e a durabilidade do sistema [3]. Um procedimento cada vez mais eficaz para realizar essa inspeção é através da utilização de *drones* – *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) [4]. Esta tecnologia não requer uma manutenção dispendiosa porém, dependendo da sua localização e dimensão, necessita de cumprir com algumas exigências específicas e diferenciadas no contexto da sua operação e manutenção [5]. Existem outras soluções para a exploração de instalações fotovoltaicas de grande dimensão, no entanto, a inspeção termográfica com *drone* é aquela que oferece a melhor qualidade em termos de inspeção visual e termográfica [6].

2. Defeitos Comuns nos Módulos Fotovoltaicos

São inúmeros os defeitos que podem ser encontrados nas unidades produtoras fotovoltaicas [7]. Na Figura 1 é possível ver o painel FV do lado direito sem aparente sinal de defeito, no entanto, do lado esquerdo a imagem termográfica assinala um defeito numa zona do módulo que não foi visível a olho nú. Se estes defeitos não forem detetados antecipadamente, têm como consequência direta a quebra de produção de energia elétrica. Como consequência, existirá uma perda considerável no rendimento global da instalação fotovoltaica.

A inspeção termográfica permite captar informação por imagens que mostram as variações de temperatura em diferentes áreas dos painéis solares. Essa informação é processada e analisada para identificar padrões de aquecimento anormais ou áreas problemáticas que requerem a atenção dos operadores [8].

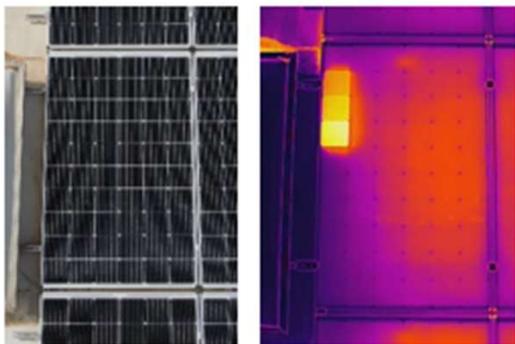


Figura 1 - Detecção de Pontos Quentes (Hotspots) num Módulo Fotovoltaico

A inspeção termográfica com drones oferece benefícios significativos em termos de segurança e custos associados. As pessoas que controlam as operações não necessitam de se colocar em estruturas elevadas, nem de utilizar equipamentos de acesso especial para realização das inspeções, o que reduz consideravelmente o risco de acidentes. Além disso, a utilização de drones não exige a necessidade de parar a operação dos painéis FV durante a inspeção, evitando assim a perda de produção ou a interrupção do seu funcionamento [9].

Os sistemas fotovoltaicos são constituídos por equipamentos estáticos (sem peças rotativas), como tal, a grande incidência das suas falhas deve-se às condições da operação como defeitos na própria instalação, condições ambientais e anomalias elétricas. Sendo estas falhas de difícil observação visual, a tecnologia de drones e termografia constituem práticas cada vez mais utilizadas na indústria solar fotovoltaica, apresentando-se como as melhores soluções para detetar os defeitos de forma rápida e eficaz [10].

A temperatura de um painel fotovoltaico é consequência do balanço da energia, da irradiação, da corrente elétrica e das condições ambientais. Trata-se de um parâmetro especialmente importante na operação de uma célula fotovoltaica que deve ser tido em atenção, uma vez que influencia todo o funcionamento elétrico dos painéis FV.

O aumento da temperatura provoca uma diminuição proporcional na tensão de saída e um pequeno incremento na corrente, para baixos valores de tensão. Estes fatores provocam uma diminuição no ponto máximo de potência dos módulos em operação, causando assim uma perda no rendimento na conversão elétrica [11].

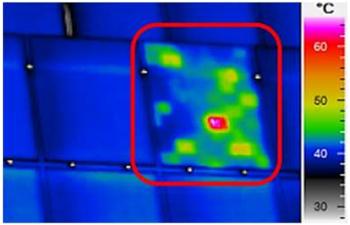
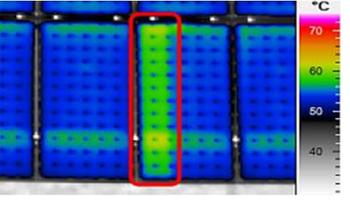
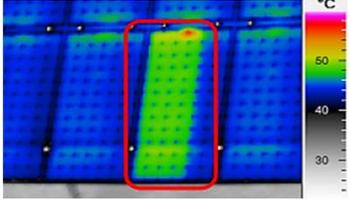
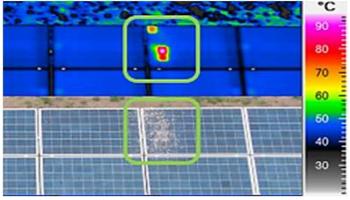
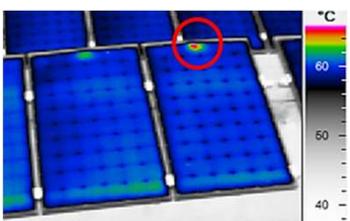
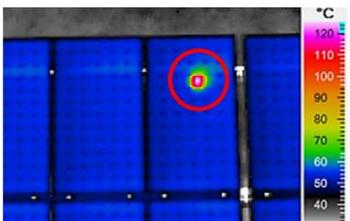
Antes de qualquer inspeção termográfica, há dois passos essenciais a serem executados. Primeiramente deve ser realizada uma inspeção visual a todos os módulos. De seguida, deve-se proceder à validação dos parâmetros dos painéis nas condições ideais standard de irradiação e temperatura, respetivamente, 1000 W/m^2 e $25 \text{ }^\circ\text{C}$ [12].

Na Tabela 1 é possível visualizar os principais tipos de defeitos passíveis de serem detetados em módulos fotovoltaicos, por inspeção termográfica [13].

Tabela 1. Anomalias nos Módulos Fotovoltaicos

Strings e Módulos	Defeito
	Módulos em Circuito Aberto
	Módulo em Curto-Circuito
	Substring em Curto-Circuito
	Módulos de Película Fina com Vidro Partido

Tabela 1. Anomalias nos Módulos Fotovoltaicos (cont.)

Strings e Módulos	Defeito
	Módulo de Silício Cristalino com Vidro Partido
	1x Substring em Circuito Aberto
	2x Substrings em Circuito Aberto
	Módulos com Sujidade
	Caixa de Junção do Módulo Sobreaquecida
	Ponto Quente (Hotspot)

Em função da sua temperatura e característica, os defeitos podem apresentar diferentes graus de severidade. A Tabela 2 representa as classificações que se podem atribuir aos defeitos e as medidas que devem ser tomadas para colmatar estas anomalias [5].

Tabela 2 - Descrição dos Níveis de Anomalias

Nível de Anomalia	Grau de Severidade	Ações
Nível I	Baixo	O defeito deve ser revisto na inspeção seguinte
Nível II	Médio	Deve-se acompanhar o progresso do defeito e, se possível, reparar o mesmo
Nível III	Alto	Deve-se proceder à reparação imediata do defeito

A realização das inspeções aos painéis FV seguem critérios específicos que devem ser cumpridos e contemplados na norma IEC 62446-3 TS: *Photovoltaic (PV) Systems – Requirements for Testing and Maintenance – Part 3: Outdoor Infrared Thermography of Photovoltaic Modules and Plants* [13].

Para definir a classe de severidade de um defeito, há cálculos que devem ser aplicados aquando do estudo de uma imagem termográfica.

A Tabela 3 enuncia o nível de anormalidade correspondente a cada valor de temperatura, para cada tipo de defeito.

Em primeiro lugar, deve ser calculado o valor de ΔT , a diferença de temperatura funcional T_f e não funcional T_{nf} , ou seja, o valor da temperatura sem e com defeito, respetivamente.

Falando em termos de diferenças de temperatura, significa que $\Delta T (K) = \Delta T (^\circ C)$, obtendo:

$$\Delta T = T_{nf} - T_f \quad (1)$$

De seguida, com os valores de irradiância medidos no trabalho de campo - I_{local} e o valor ideal da irradiância - I_{ideal} (ambos em W/m^2), calcula-se o fator de correção.

$$\text{Fator de Correção} = \frac{I_{ideal}}{I_{local}} \quad (2)$$

Após estes cálculos, e para classificar o defeito quanto à sua severidade, consultamos a Tabela 3, para cada tipo de defeito [13].

Tabela 3 - Nível de Anormalidade correspondente a cada

Defeito \ Nível de Anomalia	$\Delta T_{\text{corrigido}}$		
	1	2	3
Módulo em Circuito Aberto	< 2°C	2°C – 7°C	> 7°C
Módulo em Curto-Circuito	< 2°C	2°C – 7°C	> 7°C
1x Substring em Circuito Aberto	< 4°C	4°C – 6°C	> 6°C
1x Substring em Circuito Aberto	< 4°C	4°C – 6°C	> 6°C
Ponto Quente (Hotspot)	< 10°C	10°C – 40°C	> 40°C
Caixa de Junção Sobreaquecida	< 3°C	3°C – 4°C	> 4°C
Substring em Curto-circuito	< 2°C	2°C – 7°C	> 7°C
Módulos com Vidro Partido	-	-	> 0°C

3. Inspeção Termográfica com Drone

A possibilidade de combinar a mobilidade e capacidade de voo dos *drones* com a tecnologia de termografia, garante a realização de inspeções abrangentes e eficientes em áreas que, de outra forma, seriam de difícil acesso ou perigosas para os inspetores.

Na Figura 2 visualiza-se o procedimento de uma inspeção a painéis FV recorrendo ao *drone*. Estas inspeções podem ser termográficas ou apenas visuais.



Figura 2 - Ilustração do Procedimento de uma Inspeção Termográfica com *Drone*

A possibilidade de localização por georreferenciação, permite a identificação exata da localização das eventuais anomalias detetadas, com registo fotográfico e/ou vídeo e posterior análise de potenciais defeitos encontrados [5]. Este serviço, apresenta-se como uma enorme vantagem, uma vez que se poderá realizar inspeções a locais de difícil acesso

e/ou a locais de grande dimensão, em curto espaço de tempo [14]. O uso de *drones* também garante a segurança dos trabalhadores, uma vez que minimiza a realização de trabalhos em altura e elimina os riscos associados à instalação [15].

Por outro lado, a termografia é uma ferramenta consolidada em testes não destrutivos, uma vez

que não apresenta quaisquer riscos ou perigo ao instrumento em estudo [16].

Porém, não é qualquer *drone* que nos permite fazer este tipo de avaliação. Para realizar este tipo de inspeções recomenda-se o uso de um *drone* com câmara infravermelha incorporada na sua composição [5]. Seria possível realizar este estudo com uma simples câmara de mão termográfica, no entanto, o tempo necessário para executar esta ação seria longo e dispendioso.

Atualmente, a informação relativa às imagens capturadas ainda é analisada manualmente. No entanto, estão a ser desenvolvidas aplicações baseadas em inteligência artificial que auxiliam as tarefas de análise e interpretação da informação recolhida [6].

Como visto anteriormente, são diversos os defeitos que podem ser observados numa inspeção termográfica. Para a sua apropriada validação são realizados outros testes como, medição das curvas I-V, eletroluminescência, cálculo da eficiência dos inversores, inspeção elétrica na baixa e média tensão e inspeção estrutural do suporte dos módulos fotovoltaicos, sendo todos considerados ensaios não destrutivos [17].

Na Figura 3 vemos o exemplo de um teste de eletroluminescência realizado a um módulo em curto-circuito. O teste de eletroluminescência consiste na aplicação direta de corrente no módulo e capturar as emissões resultantes com uma câmara infravermelha [18]. Normalmente, numa imagem resultante de um teste de eletroluminescência, a intensidade da luz resultante é diretamente proporcional à corrente que percorre as células, assim, todas as partes eletricamente inativas dentro de um módulo ou célula são retratadas como áreas escuras [10].

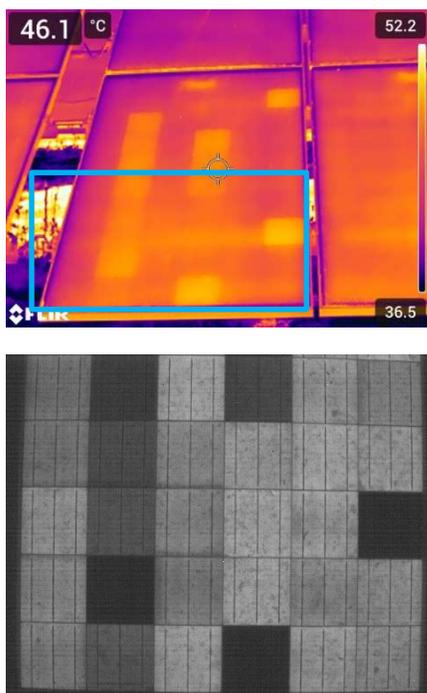


Figura 3 - Eletroluminescência realizada a um Módulo em Curto-Circuito

Na Figura 4 é possível observar uma *substring* em circuito aberto, capturada pela câmara termográfica do *drone* DJI MAVIC 2 *Enterprise Advanced* numa central fotovoltaica.

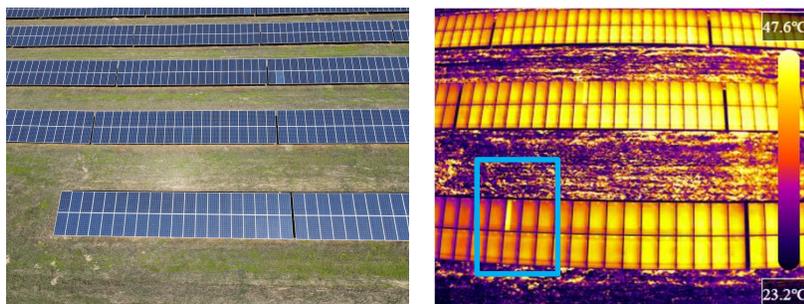


Figura 4 - Imagens com Defeito de um Módulo Fotovoltaico

No dia da inspeção, a irradiação incidente no painel era de 850 W/m^2 e as temperaturas T_f e T_{nf} eram, respetivamente, de $37,4$ e $42,1$ $^{\circ}\text{C}$, resultando em:

$$\Delta T = T_{nf} - T_f = 42,1 \text{ }^{\circ}\text{C} - 37,4 \text{ }^{\circ}\text{C} = 4,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Fator de Correção} = \frac{I_{ideal}}{I_{local}} = \frac{1000 \text{ W/m}^2}{850 \text{ W/m}^2} \approx 1,18$$

$$\Delta T_{\text{corrigido}} = \text{Fator de Correção} * \Delta T = 1,18 * 4,7 \text{ }^{\circ}\text{C} \approx 5,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Com os resultados obtidos e com a utilização da Tabela 3, podemos classificar a anomalia deste defeito. Sabendo que o defeito em causa é $1x$ *Substring* em Circuito Aberto e o valor de $\Delta T_{\text{corrigido}} = 5,5$ $^{\circ}\text{C}$, este é um defeito com nível 2 de anomalia, como tal, precisa de ser acompanhado e corrigido o quanto antes.

4. Conclusões

Com o número crescente da construção de centrais fotovoltaicas, torna-se cada vez mais importante a inspeção e manutenção dos seus equipamentos. A inspeção termográfica aos painéis fotovoltaicos com *drones* tem evoluído de forma significativa ao longo dos últimos anos, oferecendo uma abordagem rápida para identificar os problemas em estágios iniciais e maximizar o desempenho dos sistemas solares, contribuindo para a expansão e crescimento das instalações de produção.

A utilização de *drones* para inspeção termográfica dos painéis fotovoltaicos garante um aumento significativo na eficiência do processo termográfico, sendo capazes de capturar imagens térmicas de alta resolução num curto

período de tempo. Como consequência existe uma redução da necessidade de inspeções manuais demoradas, resultando numa maior eficiência operacional.

O uso de *drones* equipados com câmara termográficas torna possível detetar pontos quentes, fissuras, quebras de células solares, falhas de isolamento e outros problemas, permitindo que os operadores ajam rapidamente para resolver os defeitos, antes que eles provoquem perdas significativas de energia ou até mesmo falhas completas do sistema. Os *drones* podem ser programados para realizar inspeções periódicas, monitorizando continuamente o desempenho dos painéis FV, aumentando a eficiência operacional e a vida útil dos painéis.

O uso de algoritmos de inteligência artificial permite a deteção automática dos defeitos e a análise e produção de relatórios detalhados. Este facto proporciona aos operadores uma visão abrangente do estado dos painéis e apoia a tomada de decisões para a realização de manutenções preventivas e corretivas.

Referências Bibliográficas

- [1] REN21, RENEWABLES 2022 GLOBAL STATUS REPORT. 2022.
- [2] G. Schirripa Spagnolo, P. Del Vecchio, G. Makary, D. Papalillo, and A. Martocchia, "A review of IR thermography applied to PV systems," in 2012 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering, May 2012, pp. 879–884, doi: 10.1109/EEEIC.2012.6221500.
- [3] K.-C. Liao, H.-Y. Wu, and H.-T. Wen, "Using Drones for Thermal Imaging Photography and Building 3D Images to Analyze the Defects of Solar Modules," *Inventions*, vol. 7, no. 3, p. 67, Aug. 2022, doi: 10.3390/inventions7030067.
- [4] A. Kirsten Vidal de Oliveira, M. Aghaei, and R. Rüther, "Aerial infrared thermography for low-cost and fast fault detection in utility-scale PV power plants," *Sol. Energy*, vol. 211, pp. 712–724, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.09.066.
- [5] Instituto Eletrotécnico Português, "DUE Diligence Técnica em Parques Solares - Especificações Técnicas para o Fornecimento," Porto, Portugal.
- [6] D. Rocha, M. Lopes, J. Teixeira, P. Fernandes, M. Morais, and P. M. P. Salomé, "A Deep Learning Approach for PV Failure Mode Detection in Infrared Images: First Insights," p. 3.
- [7] X. Li, Q. Yang, Z. Chen, X. Luo, and W. Yan, "Visible defects detection based on UAV-based inspection in large-scale photovoltaic systems," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 11, no. 10, pp. 1234–1244, Aug. 2017, doi: 10.1049/iet-rpg.2017.0001.
- [8] ABOVE, "The Pro and Cons of Drone Thermography Methodology for Solar Plants." <https://www.abovesurveying.com/pro-and-cons-of-drone-thermography-methodology-for-solar-pv-plants/?lang=pt-pt> (accessed Jun. 19, 2023).
- [9] R. I. Mukhamediev et al., "Review of Some Applications of Unmanned Aerial Vehicles Technology in the Resource-Rich Country," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 21, p. 10171, Oct. 2021, doi: 10.3390/app112110171.
- [10] S. S. Martí, "Aerial Thermography Inspections in Large-Scale PV Plantes," European Solar Engineering School, 2018.
- [11] B. P. A. da Silva, "Metodologia para a Determinação de Temperatura em Painéis Fotovoltaicos por Meio de Termografia Quantitativa," Universidade Federal de Minas Gerais, 2017.
- [12] P. B. Quater, F. Grimaccia, S. Leva, M. Mussetta, and M. Aghaei, "Light Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for Cooperative Inspection of PV Plants," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 4, 2014.
- [13] I. International Electrotechnical Commission, IEC 62446-3 TS Ed.1 - Photovoltaic (PV) systems - Requirements for testing, documentation and maintenance - Part 3: Outdoor infrared thermography of photovoltaic modules and plant. USA, 2016.
- [14] T. Jung and F. Liebelt, "Thermography Drone For Aerial Recordings Using The FLIR T640bx Thermal Imaging Camera," Teledyne FLIR. .
- [15] D. M. Papa, "Tecnologias Avançadas de Manutenção de Centrais Fotovoltaicas," Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2017.
- [16] L. Altoé and D. O. Filho, "Termografia Infravermelha aplicada à Inspeção de Edifícios," *Acta Tecnológica*, Volume 7, No1, pp. 55–59, 2012.
- [17] V. Nogueira, "A Energia Solar Fotovoltaica como fator de competitividade na Indústria," *O Instalador*, 2021. .
- [18] Y. Zefri, A. El Kettani, I. Sebari, and S. A. Lamallam, "Thermal Infrared and Visual Inspection of Photovoltaic Installations by UAV Photogrammetry - Application Case: Morocco," Casablanca, Morocco, p. 24, 2018.