

## METODOLOGIA PARA INSPEÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS ATRAVÉS DA TERMOGRAFIA

Luiz Carlos P. de Souza Junior<sup>1,2</sup>, Chigueru Tiba<sup>1,2</sup>, Elielza M. S. Barbosa<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Centro de Energias Renováveis (CER) da Universidade Federal de Pernambuco (CER-UFPE). Av. da Arquitetura s/n, Recife-PE, Brasil

<sup>2</sup>Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco (DEN-UFPE). Av. Prof. Luiz Freire, s/n, Recife-PE, Brasil.

Tel. +55 81 2126-7326 (CER-UFPE) e-mail: [luiz.souza@ufpe.br](mailto:luiz.souza@ufpe.br)

**RESUMO:** Para otimizar o desempenho de uma usina FV (fotovoltaica) é necessário conhecer e diagnosticar preventivamente potenciais anomalias funcionais. Dentro deste contexto, foram testados e verificados procedimentos termográficos e elétricos para diagnósticos de módulos e sistemas FV. O objetivo desse estudo foi desenvolver uma metodologia eficiente de inspeção de falhas em sistemas FV baseado na utilização de câmeras termográficas. Inicialmente foram montados arranjos onde cada módulo foi testado eletricamente através do traçador de curvas IxV e termograficamente pela câmera termográfica. Também foram montados arranjos com esses módulos em conjunto, ligados em série, para novos ensaios com a utilização da câmera embarcada ao drone. Com esses ensaios identificamos a influência dos fatores geométricos e climáticos e a necessidade em calibrar adequadamente os equipamentos de medição. Também pudemos identificar a variação dos parâmetros elétricos dos módulos e mensurar a taxa de degradação desses, além de identificar os pontos quentes dos módulos do sistema. A análise dos termogramas que foram realizados tanto no solo (terrestre) quanto em sobrevoos com drone (aéreo), mostraram que são totalmente consistentes e identificaram as mesmas células quentes nos diversos módulos dos arranjos.

**Palavras-chave:** geração distribuída, energia solar, manutenção, termografia, drone, caracterização elétrica.

### INTRODUÇÃO

Em 2022, a energia solar se destacou mundialmente devido ao aumento de 175 GW (gigawatts) de nova capacidade e chegou a um total de cerca de 942 GW, o que significou um aumento aproximadamente de 20% em relação ao ano anterior (REN21, 2022). Em função deste crescente tamanho em número e dimensão dos sistemas FV (fotovoltaicos), os métodos convencionais de diagnóstico de falhas por medição elétrica módulo a módulo ou string a string, são impraticáveis em termos de tempo e economia para sistemas muito grandes e, por isso, se faz necessário desenvolver uma nova metodologia adequada de inspeção e manutenção preventiva.

Diferentes técnicas de inspeção de módulos fotovoltaicos foram elaboradas e convertidas em métodos de verificações locais ao longo dos últimos anos (MÜHLEISEN et al., 2019). Esses métodos variam desde procedimentos básicos de inspeção visual, da verificação da curva IxV e de técnicas mais elaboradas como eletroluminescência, fotoluminescência, espectroscopia e termografia infravermelha (COSTA et al., 2021).

Sob este contexto, o diagnóstico via imagem termográfica tem o potencial de permitir a análise operacional do sistema de forma não intrusiva e extremamente rápida, resultando em uma manutenção preventiva e corretiva mais eficiente e segura, de modo a maximizar a disponibilidade e a confiabilidade da produção da usina FV (fotovoltaica). Além disso, a termografia IV pode ser combinada com VANTs

(veículos aéreos não tripulados) com o objetivo de acelerar o procedimento de identificação de falhas em usinas com difícil acesso, seja em telhados, em fachadas ou grandes campos de módulos FV (AGHAEI et al., 2014; DE OLIVEIRA et al., 2019; QUATER et al., 2014; TSANAKAS e BOTSARIS, 2012).

Com o principal objetivo de desenvolver uma metodologia potencialmente rápida e eficiente de inspeção de falhas em sistemas / módulos FV baseado na utilização de câmeras termográficas, este estudo buscou também calibrar adequadamente câmeras de baixo custo de acordo com as condições meteorológicas e geométricas dos arranjos FV. Além disso, procurou identificar falhas operacionais por meio de imagens termográficas, visuais e medições elétricas e também detectar defeitos em módulos FV com longa vida útil (15 anos de uso). Um importante estudo que compara a termografia embarcada ao drone com a termografia manual em solo (terrestre) pode ser visto na Tabela 1 (BLISS, 2023):

*Tabela 1: Comparação entre a inspeção manual e inspeção com drone*

	SITE1	SITE2	SITE3	SITE4
SITE	74 MW	30 MW	21 MW	12,5 MW
TEMPO DE INSPEÇÃO POR DRONE	24 h	6 h	7 h	4 h
TEMPO DE INSPEÇÃO MANUAL	778 h	293 h	208 h	195h
HORAS DE TRABALHO PERIGOSAS EVITADAS	754 h	287 h	201 h	191h
EFICIÊNCIA AUMENTADA	97%	98%	97%	98%
ECONOMIA DE CUSTOS	\$ 68.399	\$ 25.485	\$ 17.063	\$ 19.552

No estudo citado, quatro usinas FV centralizadas com capacidades na faixa de 12,5 a 74 MW (megawatts) foram comparadas no que se refere ao processo de inspeção termográfica aérea com drone e terrestre (manual). A conclusão foi de que a inspeção por drone é 97% mais rápida do que a manual. O uso do drone praticamente elimina o trabalho perigoso e os custos evitados podem resultar em média US\$1.254/MW.

## **METODOLOGIA**

Os ensaios termográficos e elétricos deste trabalho foram realizados na Área de Testes do Grupo de Fontes Alternativas de Energia do Centro de Energias Renováveis do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco. O arranjo foi montado com módulos FV policristalinos PWX 500 do fabricante Photowatt® International S.A.

Inicialmente quinze módulos foram testados em um arranjo de forma isolada, painel a painel. Cada módulo foi testado eletricamente através do traçador de curvas IxV e termograficamente pela câmera termográfica. Após a análise dos módulos de forma isolada, um novo arranjo foi confeccionado com todos os módulos ligados em série onde mais uma vez foram realizadas as medições elétricas e termográficas do conjunto completo.

O período de realização das análises dos módulos foi dos meses de dezembro de 2021 a dezembro de 2022. As coordenadas de localização dos testes foram 8°03'17.6"S 34°57'19.0"W.

A Figura 1 apresenta o registro fotográfico dos arranjos com uso do tripé para medições em solo e com ajuda do drone para as medições aéreas.

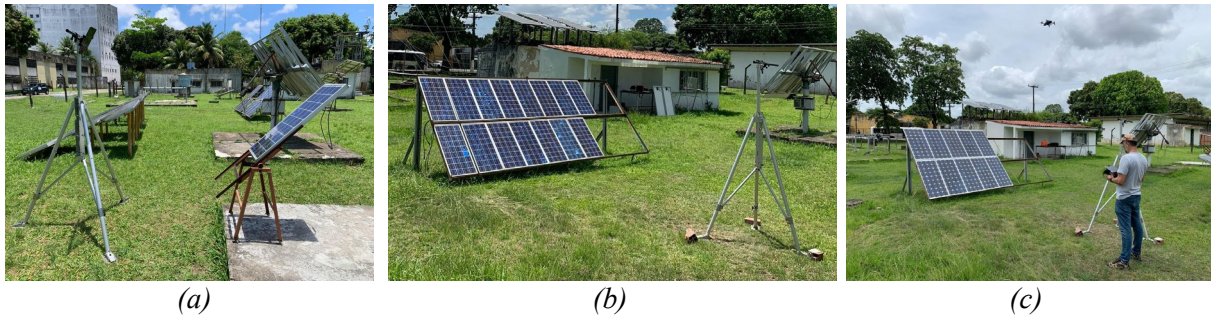


Figura 1: Arranjos FV, (a) Módulo isolado, (b) Módulos em série, (c) Módulos em série com medição por drone.

Todos os experimentos sempre foram iniciados com a limpeza dos módulos FV com pano úmido. Esses módulos sempre estiveram posicionados no mesmo local à 30 NE e com o mesmo cenário ao redor para manter constante a possível interferência da vizinhança sobre o experimento.

Os dados da estação solarimétrica da área de testes do grupo FAE/UFPE foram coletados para verificação dos parâmetros de temperatura do ar ( $T_{ar}$ ), umidade relativa do ar ( $U_{ar}$ ) e velocidade do vento média ( $V_{vm}$ ), individualmente, para cada intervalo de medição dos módulos.

Todas as medições foram realizadas sob condições de céu claro, com irradiância maior ou igual a  $600\text{W}/\text{m}^2$  e velocidade do vento menor que  $2\text{m}/\text{s}$  para obtenção de maior assertividade nas medições.

#### ***Calibração da temperatura média refletida do módulo FV***

Considerando que a radiação que parte de uma superfície é o resultado da junção da radiação emitida por ele mesmo, e depende de sua temperatura, com a radiação refletida, que depende da temperatura da vizinhança e ainda que o elemento sensor do termovisor não é capaz distingui-las, foi aplicado um procedimento simples onde utilizou-se uma folha de alumínio no seu lado mais espelhado (teste do papel alumínio), no mesmo ângulo de visão da captação normal do termovisor, para determinar a temperatura refletida, sendo então tal parâmetro passível de ser ajustado, possibilitando compensar a radiação advinda dos arredores.

Para a calibração deve-se ajustar seus parâmetros de aquisição para emissividade unitária (igual a um) e distância nula, para registro apenas da temperatura aparente. Finalmente, deve-se focar no papel alumínio, que tem a função de anteparo, para registro da temperatura média nesta região, a qual corresponde à temperatura média refletida (CEMIG, 2010).

#### ***Calibração da emissividade (e) do módulo FV***

Com relação à emissividade, parâmetro de grande importância na acuracidade dos valores de temperatura medidos neste estudo, para estimá-la foi utilizado um método comparativo, onde utilizou-se uma fita de alta emissividade ( $e_{fita} = 0,95$ ) sobre a superfície do módulo FV. Após atingir o equilíbrio térmico entre a fita e este módulo, foi realizado o registro termográfico sobre a superfície padrão e ajustado o termovisor para o valor de emissividade da fita para obtenção da temperatura real do módulo, a qual é utilizada como referência. Finalmente, verificou-se a superfície do módulo e ajustou-se a emissividade no termovisor até que a temperatura registrada fosse igualada à temperatura de referência obtida previamente.

#### ***Captação e processamento das imagens***

Essas imagens foram submetidas a edições no software FLIR® Thermal Studio, onde foi utilizada a paleta de cores Rainbow HC. Já para a identificação da temperatura foi seguido um padrão determinado de cores e inseridos pontos de temperatura em locais definidos nos módulos. Todos os parâmetros obtidos na estação solar como temperatura média do ar ( $T_{ar}$ ), umidade relativa ( $U_{ar}$ ), além dos aferidos como emissividade ( $e$ ) e temperatura média refletida frontal (TMRF) foram inseridos neste software para aferição da temperatura nos pontos de interesse.

### ***Avaliação do Termograma e ações recomendáveis***

A inspeção termográfica do módulo/arranjo FV é um procedimento do plano de manutenção preventiva e, portanto, sua análise e conclusões necessariamente vão resultar na recomendação de alguma ação preventiva ou mesmo corretiva. Após a constatação da ocorrência de anomalias na temperatura do módulo, com base em Jahn et al. (2018), categorizam-se 3 situações com as respectivas recomendações de ações:

- **Célula Normal:** Se o gradiente de temperatura entre uma célula FV e a temperatura de uma célula saudável no módulo FV for menor que 10°C, a situação será considerada um caso normal; não problemático e, portanto, sem nenhuma recomendação;
- **Célula aquecida:** Se o gradiente de temperatura entre uma célula FV e a temperatura de uma célula saudável no módulo FV, for entre 10°C a 20°C, a situação será considerada um caso que requer atenção e rastreamento nas próximas inspeções termográficas e;
- **Ponto quente:** Se o gradiente de temperatura entre uma célula FV e a temperatura de uma célula saudável no módulo FV for maior que 20°C, a situação irá provocar uma degradação importante na potência, além de potencialmente colocar em risco a integridade do módulo, podendo provocar incêndio e resultando em problemas de segurança. A recomendação neste caso é a troca de módulo.

## **RESULTADOS**

Os resultados serão apresentados e discutidos considerando as medições realizadas nos módulos Photowatt® de forma isolada e depois no arranjo com os respectivos módulos ligados em série e com aquisição de termograma no solo e depois embarcado no drone.

### ***Experimento 1: Módulo Photowatt® série 884436***

O experimento no módulo Photowatt®, série 884463, foi realizado no dia 18.11.2022 no período entre 10:59h e 11:15h. Neste intervalo foram coletados os seguintes dados meteorológicos da estação solarimétrica: Velocidade do vento média (VVM): 1,46 m/s; Temperatura do ar média (Tar): 30,60°C; Umidade relativa do ar média (Uar): 61,64.

### ***Medição da temperatura média refletida frontal – TMRF***

Após a coleta dos dados meteorológicos da estação solarimétrica, foi realizada a calibração da temperatura média refletida frontal (TMRF), utilizando uma folha de papel alumínio.

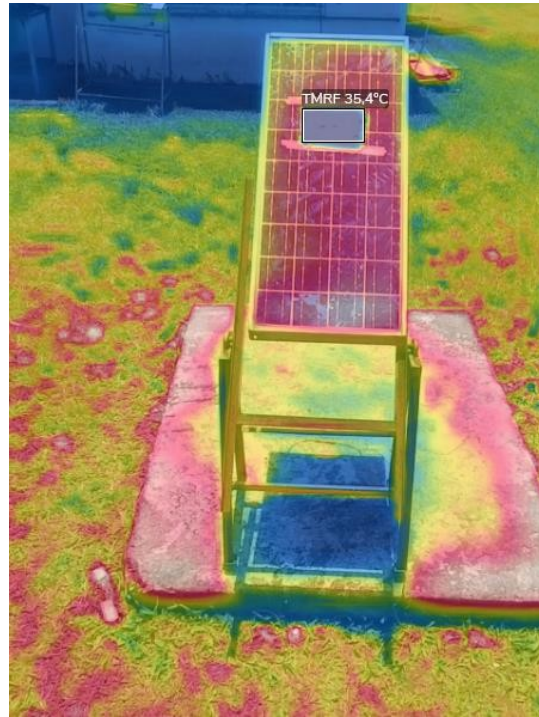
No editor de imagens Flir® thermal Studio foram inseridos os dados meteorológicos e configuradas a emissividade unitária e a distância nula.

O termograma obtido resultou uma temperatura média refletida (TMRF) da parte frontal do módulo de 35,4°C.

A Figura 2 a seguir exibe o experimento e o termograma, respectivamente:



(a)



(b)

Figura 2: Registro fotográfico da folha de papel alumínio afixado ao módulo Photowatt®, (a) imagem no espectro visível, (b) termograma.

#### Calibração da emissividade (e) para a parte frontal do módulo

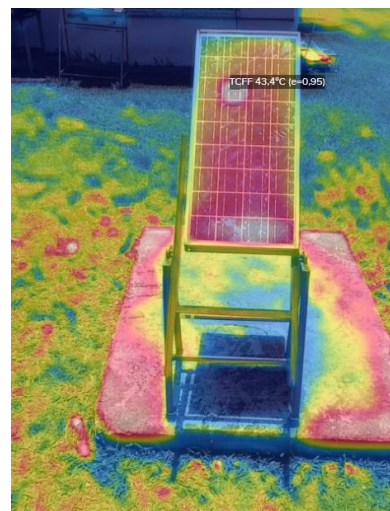
A calibração da emissividade (e) da parte frontal do módulo foi feita mediante um procedimento conhecido como teste da fita.

A fita, de emissividade conhecida (0,95), foi colocada na superfície do módulo conforme podemos observar na Figura 3 e após alguns minutos, quando a fita e o módulo atingiram o equilíbrio térmico, foi aferida a temperatura sobre a fita e sobre a célula onde ela estava afixada.

A comparação da temperatura da fita apenas com a temperatura da célula onde ela está afixada é fundamental, pois haverá um aquecimento sobre esta célula devido ao sombreamento causado pela fita nesta célula e portanto, as outras células não devem ser comparadas.



(a)



(b)

Figura 3: Teste da fita para calibração da emissividade, (a) Imagem no espectro visível, (b) termograma

A temperatura da fita na parte frontal do módulo (TCFF) com a emissividade conhecida, ( $e = 0,95$ ) foi comparada com a temperatura aferida na mesma célula próximo à fita (TSFF). Após aferição desta última, foi ajustada sua emissividade até obtenção da mesma temperatura da fita.

Foi observado conforme Figura 4 que a temperatura na fita, que tinha a emissividade conhecida ( $e=0,95$ ), igualava à da célula apenas quando foi ajustada a emissividade para 0,93.



Figura 4: Imagem IV aproximada da célula com as temperaturas aferidas sobre a fita isolante e logo abaixo da fita (na mesma célula).

A seguir, a Figura 5 mostra finalmente a parte frontal do módulo com emissividade calibrada e temperaturas em diversos pontos:

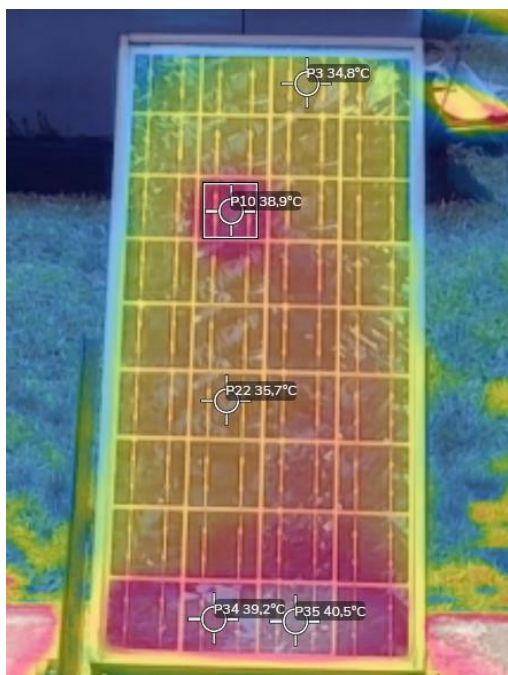


Figura 5: Imagem IV frontal do módulo Photowatt® com emissividade Calibrada

### **Experimento 2: arranjo em série com módulos Photowatt®**

O experimento com os módulos Photowatt®s ligados em série foi realizado no dia 14.12.2022 no período entre 10:32h e 10:40h. Neste intervalo de tempo coletamos os seguintes dados da estação solar: Velocidade do vento média (Vvm): 1,39 m/s; Temperatura do ar média (Tar): 31,44°C; Umidade relativa do ar média (Uar): 58,10.

Seguindo a mesma metodologia dos arranjos com módulos isolados foi realizada a calibração da temperatura refletida aparente da parte frontal deste arranjo (TMRF) em 29,9°C, utilizando-se a folha de papel alumínio.

### **Termografia do arranjo Photowatt® ligado em série**

Considerando os experimentos anteriores, para os ensaios com os módulos em série, o aplicativo Flir® Thermal Studio foi configurado com a emissividade em 0,95, visto que, com esse valor, a variação na parte frontal do módulo é pequena para aferição das temperaturas. Portanto, foi dada sequência às medições inserindo-se todos os parâmetros climáticos e geométricos obtidos através da estação solarimétrica e do arranjo montado conforme pode ser observado na Figura 6:

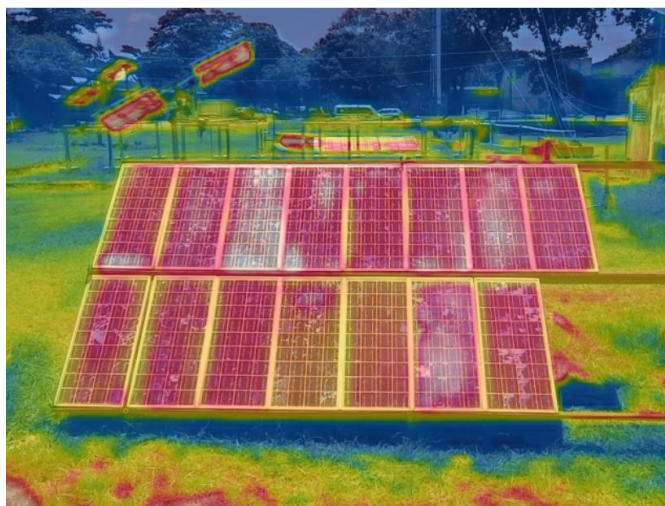


Figura 6: Imagem IV frontal de módulos Photowatt® em série

A Figura 7 representa a curva IxV dos módulos Photowatt® ligados em série:

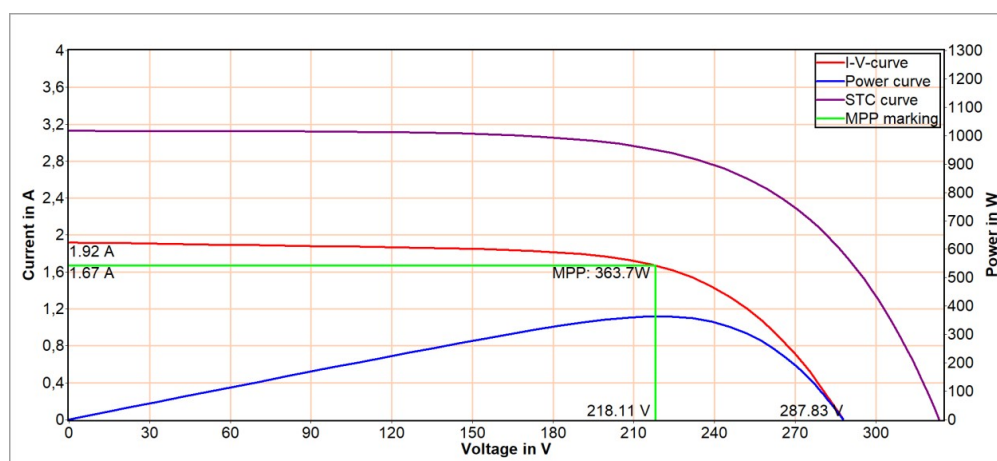


Figura 7: Curva IxV e PxV do arranjo Photowatt® em serie

Na tabela 2, são exibidos os valores da curva IxV medida, da curva em STC (Standard test conditions – Condições padrão de teste) e dos valores de referência do catálogo com os respectivos parâmetros onde P<sub>max</sub>: potência máxima; I<sub>p máx</sub>: corrente máxima; U<sub>P máx</sub>: tensão máxima; I<sub>sc(a)</sub>: corrente de curto-circuito; U<sub>oc</sub> (V): tensão de circuito aberto; R<sub>s</sub> (Ohm): resistência em série; R<sub>p</sub> (Ohm): resistência em paralelo; FF (%): fator de forma; E<sub>eff</sub> (W/m<sup>2</sup>): irradiância; T<sub>mod</sub> (°C): temperatura do módulo.

Tabela 2: Dados da curva  $I \times V$  do arranjo Photowatt® em série

Parâmetro	Medido	STC	Referência
Pmax (W,Wp)	363,7	662	750
Ip max(a)	1,67	2,72	2,9
UP max (V)	218,1	243,6	258
Isc (a)	1,92	3,13	3,10
Uoc (V)	287,8	323,62	324
Rs (Ohm)	33,6	24,3	9,7
Rp (Ohm)	>7,3	>5,1	>5,5
FF (%)	65,9	65,4	74,5
Eeff(W/m2)	613	100	1000
Tmod (°C)	38	25	25

Para o arranjo Photowatt® ligado em série, a perda na potência foi de 11,73%, a resistência série sofreu uma elevação de 150,51%, e o FF diminuiu 12,21%.

#### **Termografia com drone dos arranjos com módulos Photowatt® ligados em série**

As imagens aéreas foram realizadas por drone com a câmera à 45° em relação à normal a uma altura aproximadamente de 6 metros.

A comparação entre os termogramas dos arranjos ligados em série, obtidos com a câmera em solo (no tripé) e com a câmera acoplada ao drone, permitiu observar que nas duas imagens da Figura 8, os pontos quentes se repetiram de forma consistente nas mesmas células. Com isso o procedimento de inspeção aérea fica viabilizado tendo como requisitos prévios as diversas calibrações no solo em uma pequena parte do campo solar.

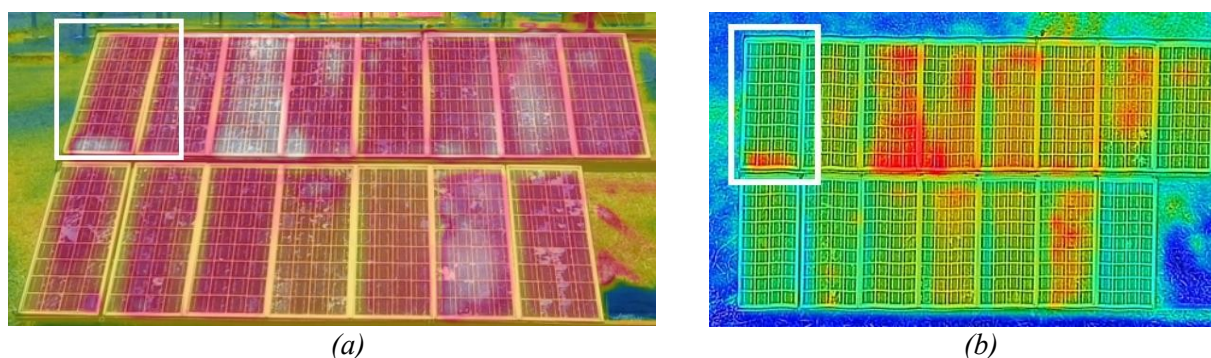


Figura 8: Comparação das imagens IV obtidas em solo e aéreo do arranjo Photowatt® em série, (a) termograma captado em solo do arranjo Photowatt® ligado em série, (b) termograma captado com o drone (destaque de módulo com quadrado na cor branca).

## CONCLUSÕES

Este trabalho estabeleceu os fundamentos de uma metodologia para uma inspeção potencialmente rápida de arranjos fotovoltaicos (FV), utilizando-se uma câmera termográfica acoplada a um drone. Também foram feitas as medições elétricas, com o objetivo de determinar a taxa de degradação dos módulos testados.

A técnica termográfica foi aplicada em um lote de módulos FV, com tecnologia policristalina (Photowatt®). Esses módulos foram anteriormente utilizados em arranjos experimentais que operaram



durante 15 anos. A primeira conclusão com relação à medição dos módulos isolados foi que a emissividade da parte frontal dos módulos Photowatt® foi, em média, 0,93.

Conforme a categorização do IEA (JAHN, 2018) dos quinze módulos Photowatt® testados, nenhum apresentou gradiente de temperatura maior que 20°C (ponto quente), seis apresentaram um gradiente de temperatura entre 10-20°C (célula aquecida) e nove menores que 10°C (célula normal). Cabe ressaltar que esse lote de módulos foi filtrado anteriormente de um lote inicial total de trinta, dos quais quinze foram eliminados porque estavam inoperantes. No caso de módulos com ponto quente, a recomendação IEA é sua substituição e no caso de módulos com células aquecidas, manter um registro para acompanhamento nas próximas inspeções termográficas

Em relação às medições elétricas as seguintes conclusões foram obtidas:

- A resistência série sofreu uma notável elevação em todos os módulos policristalinos (Photowatt®) com, no mínimo, para 1,20 Ohms (+100%) e um máximo para 2,90 Ohms (+ 383,33%) e no mínimo 0,5 Ohms (nível padrão) e máximo 0,8 Ohms (+60%);
- fator de forma sofreu uma pequena variação de cerca de 10%;
- As perdas de potência nos arranjos em série apresentaram taxas de 11,73%.

A análise dos termogramas dos arranjos com quinze módulos Photowatt® ligados em série mostraram que tanto os que foram realizados no solo quanto os que foram com drone são totalmente consistentes e identificaram as mesmas células aquecidas nos diversos módulos dos arranjos. Em síntese, permitiu identificar um subconjunto de módulos mais gravemente afetados que no caso de uma inspeção preventiva seriam prioritariamente testados do ponto de vista elétrico.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) por disponibilizar os dados para o desenvolvimento deste estudo, ao técnico administrativo Rinaldo Oliveira de Melo e ao colega Marcelo Luiz Ferreira pelo grande apoio presencial nas atividades de campo.

## REFERENCIAS

- AGHAEI, M. Unmanned Aerial Vehicles in Photovoltaic Systems Monitoring Applications. Conference: 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC), 2014.
- BLISS, R. Drones reduce solar O&M costs by \$1,254 per MW. Disponível em: <<https://energycentral.com/c/cp/drones-reduce-solar-om-costs-1254-mw>>. Acesso em: 10 jan. 2023.
- CEMIG. Revista P&D. CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2010.
- COSTA, A.L.C.; HIRASHIMA, S.Q.S.; FERREIRA, R.V. Operação e manutenção de sistemas fotovoltaicos conectados à rede: inspeção termográfica e limpeza de módulos FV. Ambiente Construído, v. 21, n. 4, 2021.
- DE OLIVEIRA, A. K. V. et al. Aerial infrared thermography of a CdTe utility-scale PV power plant. In: 2019 IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). IEEE, p. 1335-1340, 2019.
- JAHN, U.; HERZ, M.; KÖNTGES, M.; PARLEVLIET, D., PAGGI, M., TSANAKAS, I., STEIN, J.S., BERGER, K.A., RANTA, S., FRENCH, R.H., RICHTER, M., TANAHASHI, T. Review on Infrared and Electroluminescence Imaging for PV Field Applications. IEA PVPS, 2018.
- MÜHLEISEN, W. et al Scientific and economic comparison of outdoor characterisation methods for photovoltaic power plants. Renewable Energy, v. 134, p. 321-329, 2019.
- QUATER, P.B., GRIMACCIA, F., LEVA, S., MUSSETTA, M., AGHAEI, M. Light Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for cooperative inspection of PV plants. IEEE J. Photovoltaics 4, 1107–1113, 2014.
- REN21. Renewables 2022 Global Status Report: Global overview, 2022. Disponível em: <[https://www.ren21.net/gsr-2022/chapters/chapter\\_01/chapter\\_01/](https://www.ren21.net/gsr-2022/chapters/chapter_01/chapter_01/)>. Acesso em: 10 jan. 2023.

TSANAKAS, J.A.; BOTSARIS, P.N. An infrared thermographic approach as a hot-spot detection tool for photovoltaic modules using image histogram and line profile analysis. *Int. J. Cond. Monit.* 2, p. 22-30, 2012.

## **METHODOLOGY FOR INSPECTING PHOTOVOLTAIC SYSTEMS THROUGH THERMOGRAPHY**

**ABSTRACT** To optimize the performance of a photovoltaic plant, it is necessary to know and pre-diagnose potential functional anomalies. Within this context, thermographic and electrical procedures for diagnosing PV modules and systems were tested and verified. The objective of this study was to develop an efficient methodology for fault inspection in PV systems based on the use of thermographic cameras. Arrangements were initially assembled where each module was tested electrically using the IxV curve tracer and thermographically using the thermographic camera. Arrangements were also assembled with these modules together, connected in series, for new tests using the camera attached to the drone. With these tests, we identified the influence of geometric and climatic factors and the need to properly calibrate the measuring equipment. We were also able to identify the variation of the electrical parameters of the modules and measure their degradation rate, in addition to identifying the hot spots of the system modules. The analysis of the thermograms that were performed both on the ground (terrestrial) and in drone overflights (aerial), showed that they are totally consistent and identified the same hot cells in the different modules of the arrays.

**Keywords:** distributed generation, solar energy, maintenance, thermography, drone, electrical characterization.