

TÉCNICA DE DETECÇÃO DE FALHAS EM CÉLULAS FOTVOLTAICAS POR TERMOGRAFIA ATIVA

José Jorge de Oliveira Neto (UFS) - neto.oliveira.273@gmail.com

Thiago Santos Silva (UFS) - thiagosil143@gmail.com

Wellington Francisco da Silva (UFS) - wellsilva036@gmail.com

Douglas Bressan Riffel (UFS) - dbr.ufs@gmail.com

Resumo:

A detecção de defeitos em células fotovoltaicas têm impacto direto no desempenho e na confiabilidade dosistema. Diante disso, diversas técnicas são empregadas buscando garantir a operação correta do sistema, dentre elas,a termografia é uma das mais populares no setor. No entanto, as inspeções estão sujeitas a experiência e subjetividade do operador para a realização do diagnóstico. Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento de uma ferramenta queauxilia no diagnóstico de falhas em células fotovoltaicas baseada em termografia ativa. Como estudo de caso seaplicou o algoritmo em células mono-Si sem encapsulamento. Utilizaram-se os princípios físicos de transferência decalor na elaboração dos indicadores, o que por sua vez permite uma análise técnica acerca do estado da célula, aexemplo: constante de tempo (τ), temperatura máxima (ΔT_{max}), contraste máximo (C_{max}), ângulo do gradiente detemperatura e método de Kirsch - aproximação do módulo do gradiente. Foram analisados três células em diferentes estados, a saber: uma célula com múltiplas falhas (MF), uma célula com apenas uma falha (1F) e uma célula em condições normais - sem falhas (SF). As imagens resultantes do processo são apresentadas, possibilitando distinguir com clareza as regiões com defeito.

Palavras-chave: *Energia Solar, Termografia, Processamento de Imagem*

Área temática: *Conversão Fotovoltaica*

Subárea temática: *Tecnologias e ensaios de módulos fotovoltaicos*

TÉCNICA DE DETECÇÃO DE FALHAS EM CÉLULAS FOTOVOLTAICAS POR TERMOGRAFIA ATIVA

José Jorge de Oliveira Neto – neto.oliveira.273@gmail.com

Thiago Santos Silva – thiagosil143@gmail.com

Wellington Francisco da Silva – wellsilva036@gmail.com

Universidade Federal de Sergipe, Departamento de Engenharia Elétrica

Douglas Bressan Riffel – dbr.ufs@gmail.com

Universidade Federal de Sergipe, Departamento de Engenharia Mecânica

Resumo. A detecção de defeitos em células fotovoltaicas tem impacto direto no desempenho e na confiabilidade do sistema de geração. Diante disso, diversas técnicas são empregadas com intuito de garantir a sua operação correta, dentre elas, a termografia é uma das mais populares no setor. No entanto, as inspeções estão sujeitas a experiência e subjetividade do operador para a realização dos diagnósticos. Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento de uma ferramenta que auxilia no diagnóstico de falhas em células fotovoltaicas baseada em termografia ativa. Como estudo de caso se aplicou o algoritmo em células mono-Si sem encapsulamento. Utilizaram-se os princípios físicos de transferência de calor na elaboração dos indicadores, o que por sua vez permite uma análise técnica acerca do estado da célula, a exemplo: constante de tempo (τ), variação máxima de temperatura (ΔT_{max}), contraste máximo (C_{max}), ângulo do gradiente de temperatura e método de Kirsch - aproximação do módulo do gradiente. Foram analisadas três células em diferentes estados, a saber: uma célula com múltiplas falhas (MF), uma célula com apenas uma falha (1F) e uma célula em condições normais - sem falhas (SF). As imagens resultantes do processo são apresentadas, possibilitando distinguir com clareza as regiões com defeito.

Palavras-chave: Energia Solar, Termografia, Processamento de Imagem

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, o esgotamento dos combustíveis fósseis tem sido observado cada vez mais eminente. Uma das grandes preocupações da sociedade moderna é sua dependência a esse tipo de fonte energética, que tem diversos efeitos colaterais indesejados. Nesse sentido, a ampliação da matriz energética com a utilização de geração sustentável (energia eólica, maremotriz, biomassa, solar etc) se torna uma tendência, reduzindo os riscos e a degradação ambiental dela e às futuras gerações de acordo com Mukhopadhyay et al (2020). Dito isso, para a produção de eletricidade em larga escala, uma das alternativas é a energia fotovoltaica, que converte a luz do sol diretamente em eletricidade. A geração de energia fotovoltaica - photovoltaic - PV, encontrados por exemplo em telhados residenciais, iluminação pública e sistemas de telecomunicações remotos, tem crescido exponencialmente devido ao custo decrescente das placas solares e ao aumento das preocupações ambientais. A capacidade instalada de energia fotovoltaica solar atual é superior a 500 GWp, de acordo com a Agência Internacional de Energia - *International Energy Agency* - IEA, em que a tecnologia de silício cristalino (c-Si) compartilha mais de 90% do mercado conforme Niazi et al (2019).

Para se tornar mais competitivo, os módulos necessitam assegurar uma confiabilidade do processo de produção e uma longevidade entre 20 e 25 anos, consoante Diniz et al (2020). O desempenho e a integridade dos componentes fotovoltaicos, assim como a sua vida útil, são bastante afetados pelo sombreamento parcial ou por falhas, o que, por sua vez, aumenta a temperatura dos módulos fotovoltaicos, tornando-se uma grande preocupação. Os módulos fotovoltaicos ainda experimentam cargas termomecânicas durante a fabricação (M. Waqar Akram, 2019) e em estágios de vida subsequentes, levando à origem de trincas e outros defeitos. Esses defeitos resultam em perda de energia e degradação do módulo. As regiões de alta temperatura dos módulos fotovoltaicos são conhecidas como pontos quentes, que podem afetar todo o painel de acordo com Faye et al (2019).

Diante disso, faz-se necessária uma rotina de manutenção eficiente. Os custos de manutenção podem ser reduzidos usando novas técnicas confiáveis e econômicas de inspeção e monitoramento (eletroluminescência, análise das curvas IV e outros ensaios não destrutivos) de acordo com Akram, M. Waqar, et al (2019). Vale ressaltar que a geração fotovoltaica é reconhecidamente uma das formas que menos necessita de manutenção, entretanto técnicas de monitoramento podem ajudar a prevenir perda de geração e de receita. Existem diversos tipos de ensaios não destrutivos para identificar diferentes espécies de falhas, como por exemplo: pontos quentes, defeitos construtivos, riscos de incêndio etc.. A termografia infravermelha - *Infrared Thermography* - IRT permite que os operadores de usinas solares obtenham uma grande quantidade de dados em alguns minutos sobre a saúde do sistema.

Dentre as técnicas de IRT aplicadas existem duas modalidades, a termografia ativa e passiva. A forma de termografia ativa envolve uma fonte externa de calor e geralmente necessita um processamento de imagens. Muitas vezes, somente a inspeção visual das imagens não consegue detectar o defeito, em outras, o volume de dados é muito grande, sobrecarregando o operador e até o tempo de processamento. Nesse sentido, a utilização de um algoritmo para

auxiliar na identificação das falhas reduz a subjetividade dos operadores e acelera o processamento dos dados, evitando diagnósticos equivocados (Silva, 2019).

Em particular, o principal interesse desta pesquisa é adaptar o algoritmo desenvolvido para detecção de falhas em materiais isolantes (Silva, 2019), detectando as falhas em células monocristalinas utilizando como base conceitos físicos de transferência de calor. Os objetivos incluem: compactar dados com o uso de ajuste de curvas e caracterização dos defeitos capturados pela constante de tempo (τ); encontrar contraste máximo (C_{max}) entre o *pixel* e a temperatura máxima/mínima de cada frame; a variação máxima de temperatura (ΔT_{max}) de cada *pixel* e o gradiente das regiões de interesse (defeitos), destacando o fundo da imagem da amostra; identificação dos defeitos pelas bordas e entendimento do significado físico da mudança de fluxo de calor. Isso posto, a fim de reduzir a subjetividade do operador foi obtido um conjunto de imagens como resultado final.

O artigo está organizado da seguinte maneira: a seção 2 discute a descrição do experimento e a metodologia; a seção 3 apresenta o desenvolvimento do algoritmo; seção 4 apresenta os resultados; por fim, os comentários finais e observações estão na seção 5.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O intuito do experimento é capturar o processo de aquecimento e resfriamento do objeto de estudo, o que por sua vez possibilitaria a detecção de regiões que caracterizam um ponto defeituoso (Moore, 2001). Os objetos de estudo aqui foram três células (*wafer*) C60 SunPower™ de silício monocristalino de 3,4 Wp, com dimensões de 12,5 x 12,5 cm em diferentes condições, as quais eram inseridas uma de cada vez no circuito responsável pelo seu aquecimento. Na Fig. 1 é possível observar as três células utilizadas, em (a) a célula sem defeitos (SF), (b) uma célula apresentando uma fratura (1F) e (c) uma célula apresentando problemas variados como fraturas e perfurações em diferentes pontos de seu corpo (MF). Nota-se a presença de algumas manchas causadas na sua manipulação - circulado em branco na Fig. 1a, em amarelo é possível observar as regiões das fraturas na Fig. 1b e Fig. 1c. Adicionalmente, a região em vermelho destacada na Fig. 1c apresenta um rompimento na célula, ocorrido apenas após os experimentos.

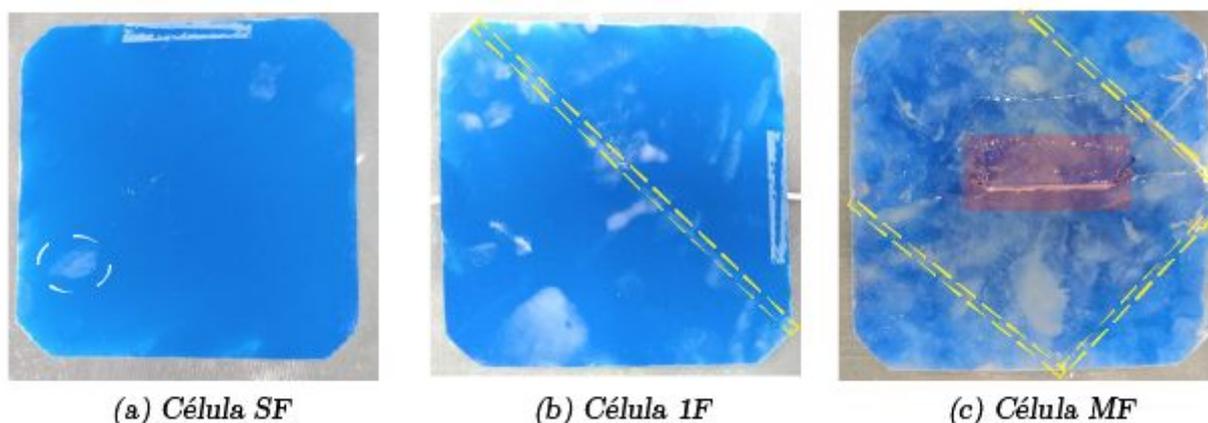


Figura 1 - Células Monocristalinas: (a) em boas condições (SF), (b) apresentando uma fratura (1F) e (c) extremamente danificada (MF).

O circuito utilizado para o aquecimento conta com uma fonte de tensão modelo LW-3020 KD em série com uma das células diretamente polarizadas. A captura do processo foi realizada através de um termovisor FLIR T420, o qual realizava a amostragem em uma frequência de 30Hz, emissividade 0,97, dentro de uma câmara escura. Adicionalmente, utilizou-se uma barreira opaca para o espectro infravermelho acoplada ao termovisor, a qual tinha a finalidade de evitar a interferência do dispositivo de medição. As imagens foram transmitidas via USB para um computador pessoal, por meio da *interface* disponibilizada no pacote SDK da FLIR®. No computador, a sequência de imagens eram armazenadas e posteriormente analisadas via *software* MATLAB®. Tanto um diagrama do arranjo experimental quanto uma foto da realização do procedimento estão apresentados na Fig. 2.

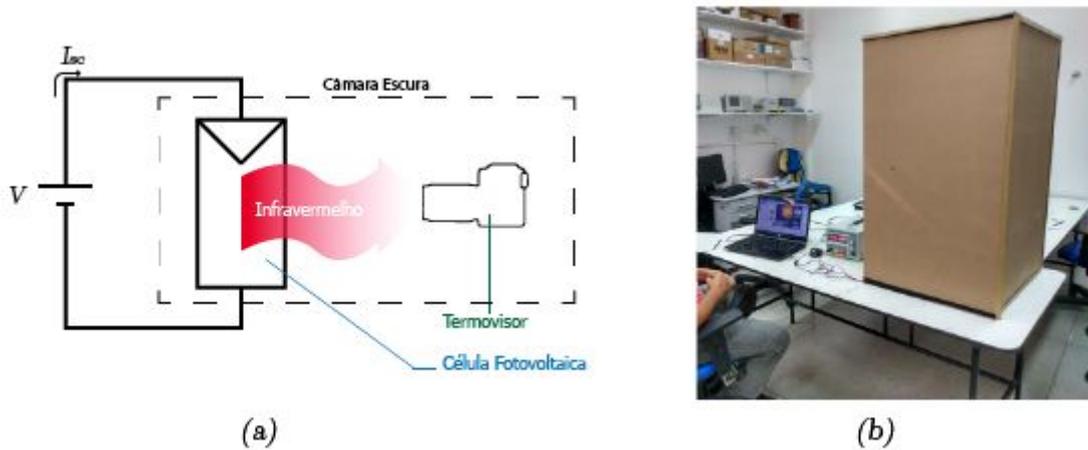


Figura 2 - Procedimento experimental: (a) diagrama e (b) configuração.

A câmara escura foi confeccionada em papelão, com dimensões de aproximadamente 1,00 x 0,55 x 0,60 m. Num primeiro momento, a célula e o termovisor são colocados a uma distância de 0,50 m dentro da câmara. A célula MF teve seu experimento realizado com o arranjo posicionado na horizontal, fixada em um suporte metálico por meio de fita adesiva. Devido a extrema fragilidade do material e as condições avançadas de desgaste, a célula teve seu corpo rompido no momento da troca do adesivo de fixação. Dessa maneira, optou-se por posicionar as células SF e 1F no assoalho, tornando o manuseio mais seguro além de evitar inclinações indesejadas. A fonte é acionada a uma tensão de 2,5 V com uma corrente de 7,3 A no arranjo horizontal (ensaio de MF) e 1 V com corrente de 3,5 A nos demais ensaios (1F e SF). Ainda, pondo a potência de cada ensaio em razão da potência de pico nominal da célula, obtêm-se índices de 5,38 e 1,03 para a primeira e segunda configuração respectivamente. Tais valores de tensão e corrente são selecionados buscando uma amplitude na variação da temperatura suficiente para que se permita extrair as informações relevantes. Uma vez alimentada a célula, inicia-se a amostragem após um intervalo de 1s com intuito de facilitar o ajuste por parte do algoritmo, capturando o perfil de temperatura de cada *pixel*. O experimento pode ser dividido em dois períodos, o aquecimento com duração de 1 minuto e resfriamento com 30 s.

Realizados os procedimentos experimentais, os arquivos são então submetidos ao algoritmo de processamento de dados para a extração de informações, como a temperatura máxima (ΔT_{max}), contraste máximo (C_{max}), constante de tempo (τ) e gradiente da temperatura (∇) de cada *pixel*. Como produto são obtidas quatro imagens referentes a cada uma dessas informações, onde é possível observar a presença de regiões anômalas na peça defeituosa.

2.1 Algoritmos de processamento de dados

Uma forma de expor defeitos por meio da termografia é analisar os conjuntos de valores de temperatura no tempo e no espaço $T(x, y, t)$, representando sempre que possível os dados extraídos de modo visual em imagens. Com esse intuito, os algoritmos aqui buscam extrair informações de T a partir das curvas da propagação térmica no tempo, como a constante de tempo no aquecimento/resfriamento ($\tau(x, y)$) e a variação máxima de temperatura $\Delta T_{max}(x, y)$ ao longo do tempo. Isso pode revelar regiões defeituosas, uma vez que se espera um comportamento térmico irregular nesses locais. Outra informação relevante é o fluxo de calor no espaço, por haver a possibilidade de mostrar locais onde a propagação ocorra de maneira diferente, o que pode revelar alguns defeitos. Além disso, por possuir um apelo visual, usam-se também algoritmos que melhoram a representação das imagens, a exemplo, o intervalo de visualização. Adicionalmente, busca-se o *frame* que possua o contraste máximo da temperatura para uma região de possível defeito. Dito isso, é mostrado a seguir como foi obtido cada uma dessas representações em maiores detalhes.

2.1.1 Variação máxima de temperatura $\Delta T_{max}(x, y)$

Uma primeira busca de falhas consiste em ver a variação máxima de temperatura $\Delta T_{max}(x, y)$ em cada ponto da peça. Isso pode ser feito simplesmente pela subtração da temperatura máxima $T_{max}(x, y)$ pela mínima $T_{min}(x, y)$ no tempo em cada *pixel*, $\Delta T_{max}(x, y) = T_{max}(x, y) - T_{min}(x, y)$.

2.1.2 Contraste máximo $C_{max}(x, y)$

Uma primeira inspeção de falhas por termovisão consiste em analisar as imagens térmicas puras. Diante da quantidade de *frames* amostrados (30 por segundo), analisar uma a uma é custoso, sendo que frames próximos são

semelhantes. Em vista disso, torna-se interessante encontrar um *frame* que as falhas tenham contrastes com as regiões sadias. Com base em Roche, J. M et al. (2014) o contraste máximo utilizado aqui se usa do centro de uma região de possível falha como referência, por essa apresentar uma anormalidade na curva de resfriamento, como vista na Fig. 3.

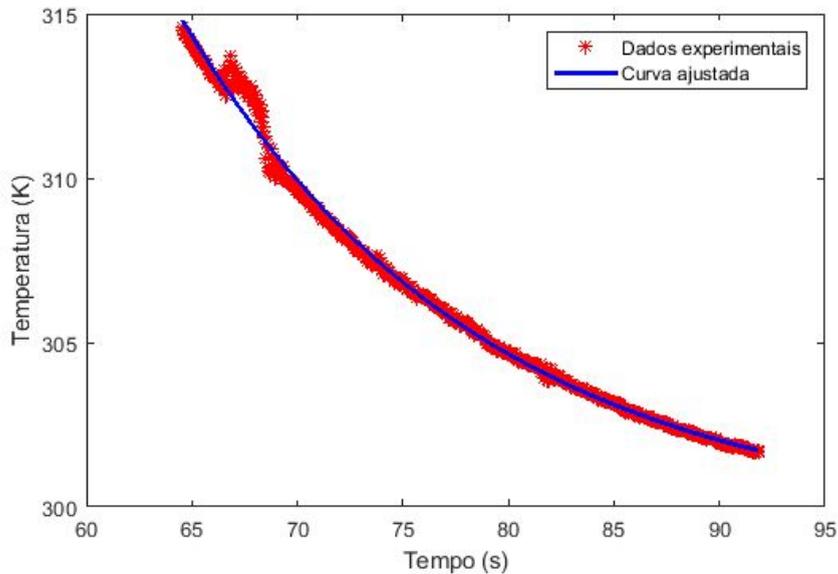


Figura 3 - Ajuste à curva de resfriamento no centro de uma região de possível falha.

Para se ter uma imagem que destaque essa anormalidade, escolhe-se o *frame* em que a curva de temperatura do centro da região de possível falha, medida no tempo, tem a maior diferença da curva ajustada.

2.1.3 Constante de tempo $\tau(x,y)$

A forma como as regiões de um material esquentam/esfriam dependem tanto de fatores externos a eles quanto às suas condições. Desse modo, se as diferentes regiões são submetidas a fatores externos semelhantes, é possível que as constantes de tempo para aquecimento e resfriamento exponham alguns defeitos. Dito isso, utiliza-se uma metodologia para estimação das constantes de tempo (τ 's) baseada no ajuste das amostras de temperatura para cada *pixel* no tempo com o modelo de aquecimento/resfriamento de Newton. O método utilizado para realização de tal tarefa foi o Gauss-Newton, devido à sua velocidade de processamento. Além disso, como exponenciais modelam bem o decaimento da temperatura ao longo do tempo, a convergência do método é garantida para condições iniciais nas redondezas do ponto que minimiza o erro. Uma vez considerada que o aquecimento/resfriamento tem característica exponencial, a função a qual deseja-se minimizar o erro quadrático é dado por:

$$T(t) = a + be^{t/\tau} \quad (1),$$

com a e b constantes, e τ é a constante de tempo. Essa possui uma equivalência com o modelo de aquecimento/resfriamento de Newton

$$T(t) = T_a + (T_0 - T_a)e^{t-t_0/\tau}, \quad (2),$$

em que T_a é a temperatura ambiente e T_0 é a temperatura no tempo t_0 .

Para ilustrar o processo de ajuste, na Fig. 4 pode ser observada a curva ajustada aos dados experimentais para o resfriamento. Vale mencionar, que devido à parte de aquecimento, o resfriamento não inicia no tempo zero. Isso tem impacto somente no valor ajustado para b que é sensível à escolha do instante inicial.

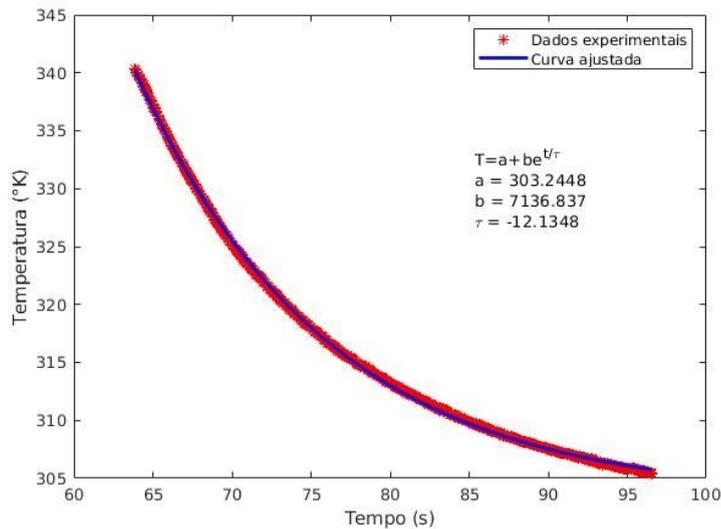


Figura 4 - Ajuste à curva de resfriamento.

2.1.4 Fluxo de Calor

Até o momento, foram apresentadas algumas ferramentas para observação de anormalidades da placa, usando como análise o comportamento temporal da temperatura. Complementarmente a isso, pode-se observar como o fluxo de calor se propaga espacialmente. O intuito disso é detectar regiões com irregularidades no fluxo que possam indicar falhas. Por conseguinte, o uso de operadores como o gradiente auxiliam nessa tarefa, tanto para indicar módulo da variação, quanto direção. Na literatura, há diferentes métodos para aproximar o módulo do gradiente que se baseiam nas equações de diferença ao redor do ponto (*pixel*). Essas podem ser escritas por matrizes de pesos que alteram o valor do *pixel* central com base nas suas redondezas, comumente conhecidas na área de processamento como máscaras de convolução. Dentre os métodos, podem-se citar Sobel, Kirsch, Canny, etc (Marques Filho e Neto, 1999).

Para o que se pretende aqui, expor regiões com possíveis defeitos, foi utilizado o método de Kirsch. Esse apresenta oito máscaras de convolução que avaliam o módulo do gradiente em cada direção a partir do *pixel* central, escolhendo o maior desses como sendo o gradiente do ponto.

Como mencionado anteriormente, a quantidade de *frames* amostrados é grande, sendo dispendioso analisar o gradiente de todos. Uma vez que há o interesse em módulos maiores do gradiente para visualização de irregularidade, é escolhido como o *frame* para análise espacial aquele em que a placa possui a maior temperatura média.

Além do módulo gradiente, o ângulo do fluxo se comporta de forma irregular, podendo exibir regiões defeituosas. Assim, é calculado também uma imagem com valores dos ângulos do fluxo em cada *pixel*, utilizando para isso as variações espaciais do fluxo na direção x e y.

2.1.5 Intervalo de Visualização

Os dados obtidos pelos métodos apresentados costumam apresentar uma granulação maior que uma imagem consegue representar. Neste sentido, representá-los em níveis limitados pode esconder detalhes de interesse. Para comodidade nas análises das informações obtidas, apenas um intervalo de valores centrada na média na célula é transformada na imagem final, sendo que os valores acima e abaixo do intervalo são truncados. Em suma o intervalo tomado é

$$[\mu - k\sigma, \mu + k\sigma] \quad (3),$$

com μ a média dos valores, σ é o desvio, k é ajustado empiricamente para melhor visualização.

3. Resultados e Discussão

Após o processamento de imagens se inicia a etapa de análise. Como resultado de cada experimento realizado, obteve-se seis imagens referentes aos elementos anteriormente mencionados. Na Fig. 5 é possível observar os resultados do processamento da célula degradada (MF): (a) e (b) são os valores de constante de tempo durante o resfriamento e aquecimento respectivamente, (c) resultante do processo de Kirsch, (d) C_{max} , (e) ΔT_{max} e (f) o ângulo do gradiente de temperatura. A princípio, nota-se a definição de regiões que podem ser caracterizadas como defeitos. É possível ainda observar a presença da haste e da fita de fixação atrás da célula, o que já dá uma ideia da sensibilidade da técnica,

sujeita a transmissividade do material. A camada adesiva se comporta nesse caso de forma semelhante a uma bolha presente no encapsulamento, alterando a dinâmica da temperatura naquela região, o que possibilita a interpretação da mesma como uma espécie de falha artificial. Essa região é notável em todas as imagens resultantes do processamento. Outro elemento a ser observado ao longo das imagens é a presença de um círculo próximo ao centro da célula, que se trata do reflexo do termovisor. Este reflexo é observável inclusive na célula antes do aquecimento. Tal interferência é atenuada na imagem de ΔT_{max} (e), enquanto é facilmente detectável nas imagens das constantes de tempo (b).

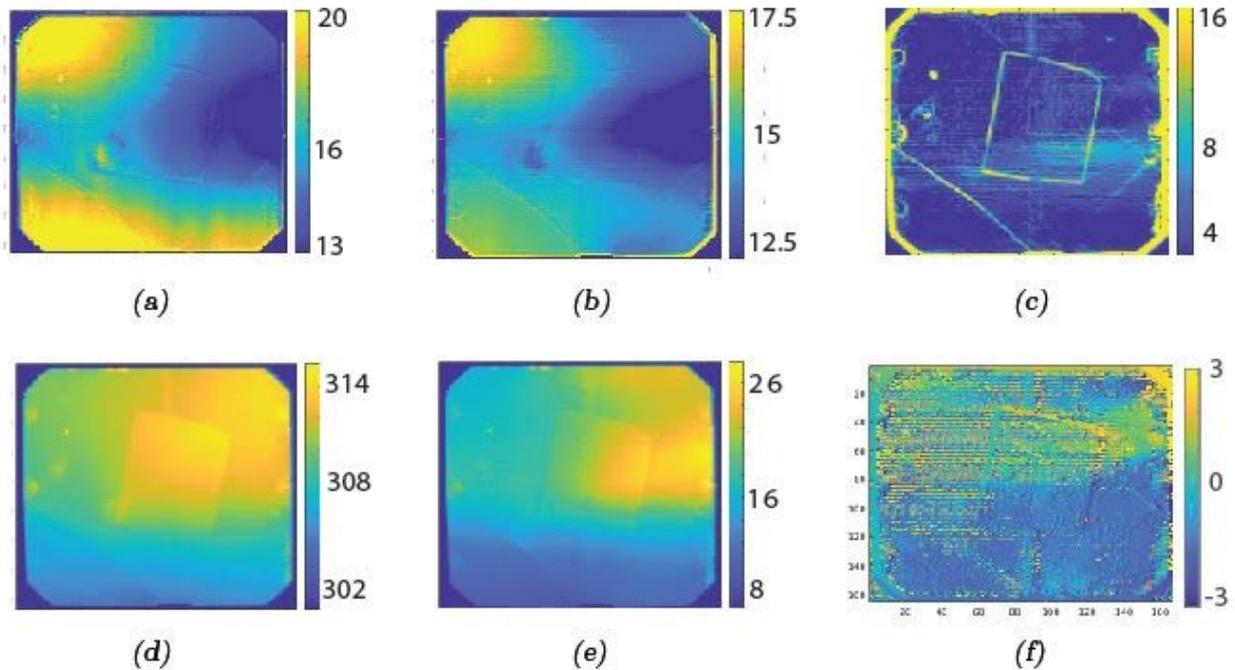


Figura 5 - Imagens resultantes do processamento: (a) τ do processo de resfriamento, (b) τ aquecimento, (c) máscara de Kirsch, (d) C_{max} , (e) ΔT_{max} e (f) ângulo do gradiente.

Na Fig. 5 (a) e (b) é possível destacar regiões onde existem uma maior velocidade de aquecimento e resfriamento, observando uma área do lado direito da célula em azul indicando menores valores de τ . O rápido aquecimento pode ser atribuído aos pontos de solda, além de uma fratura na região que contribui para uma certa discontinuidade no fluxo de calor. Tal fratura pode ser melhor visualizada na Fig. 5 (c) e (f) ao lado de outras duas, cada uma apresentando um comportamento diferente com relação aos taus, ΔT_{max} e C_{max} . Ademais, algumas regiões evidenciadas reproduziram uma distorção semelhante nas medições (Fig. 6). O ponto destacado na Fig. 6 é utilizado como referência para o cálculo do contraste máximo utilizado.

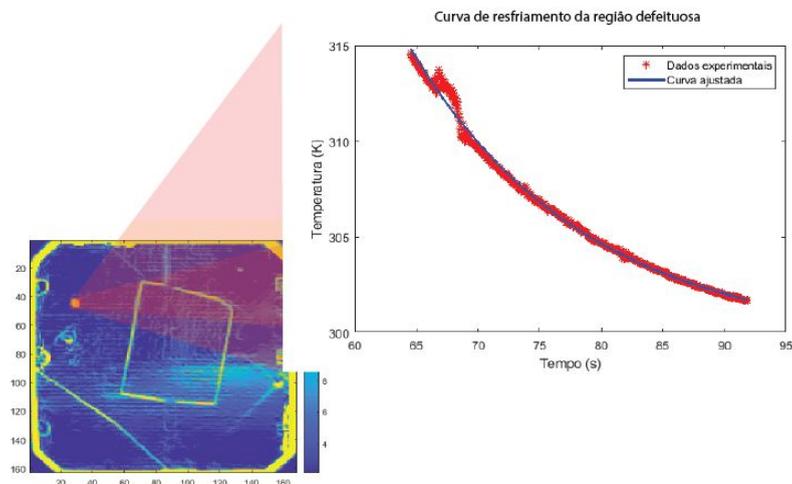


Figura 6 - Anomalia no comportamento da temperatura de um *pixel* da região de falha.

Com interesse de observar o comportamento isolado da fratura, utilizou-se duas outras células para comparação: 1F com apenas um defeito e SF sem defeitos. Nesse escopo, a forma de fixação foi ajustada para não haver a necessidade da fita adesiva, uma vez que essa adiciona um defeito artificial. Ainda, a corrente foi alterada para 3,5 A, buscando reduzir o desgaste da célula ao longo dos ensaios. Entretanto, esta última alteração resultou numa redução da amplitude da temperatura alcançada, o que por consequência tornou mais evidente a interferência da câmera. A título de comparação, no primeiro procedimento se utilizou 18,25 W de potência, enquanto no segundo foi empregado 3,5 W, sendo esse último valor muito próximo da potência de pico nominal (3,4 W).

A fratura não é visível nas constantes de tempo encontradas da 1F como os obtidos na primeira placa. Entretanto, ao comparar os resultados τ , tanto no resfriamento quanto no aquecimento de 1F com SF, pode-se observar uma anormalidade no seu fluxo de calor no tempo. Em uma placa sem defeitos, o fluxo de calor natural no resfriamento tende a possuir uma simetria em relação ao centro da célula, como mostrado nas Fig. 7 e 8, em contrapartida, 1F mostra um distúrbio nessa simetria causada pela fratura.

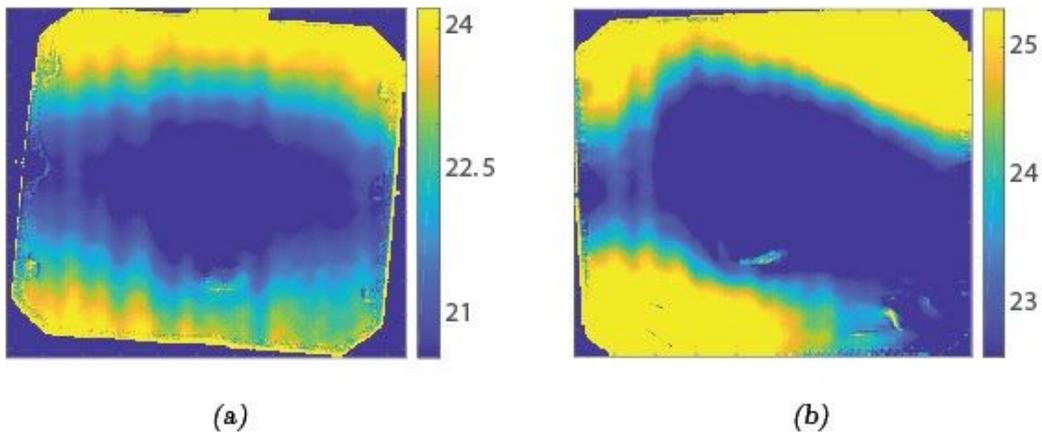


Figura 7 - Imagens de valores da constante de tempo aquecimento (a) SF e (b) 1F.

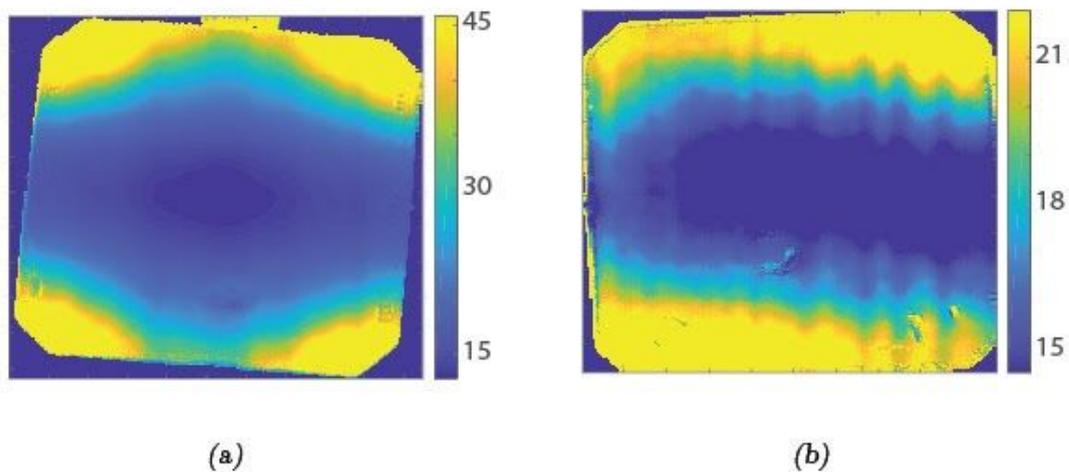


Figura 8 - Imagens de valores da constante de tempo resfriamento (a) SF e (b) 1F.

Nas Fig. 9 (a) e (b) é possível observar a aplicação da máscara de Kirsch, em que se nota uma definição da região fraturada em (b). Ainda é possível destacar a região de interferência da câmera, o qual ficou bastante evidenciada neste processamento.

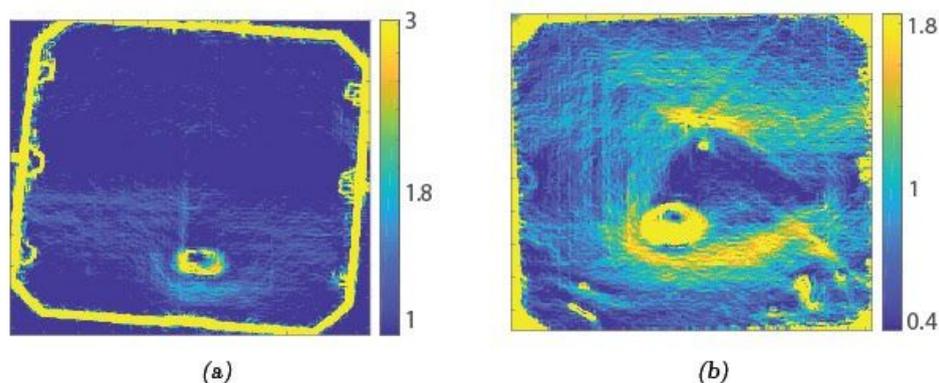


Figura 9 - Imagens resultantes do método de Kirsch (a) SF e (b) 1F.

Por outro lado, nas imagens de ΔT_{max} (Fig. 10) é possível observar uma clara assimetria em 1F quando comparada a SF. Enquanto em 1F os valores mais altos se encontram no centro da placa e se atenuam em direção às bordas, em SF estes valores são deslocados para a direita, região onde existe a fratura. O mesmo pode ser observado nas imagens de C_{max} (Fig. 11). Tal comportamento é esperado devido à característica do defeito, no entanto, a forma como esta assimetria se apresenta poderia ser melhor evidenciada diante de uma maior variação de temperatura.

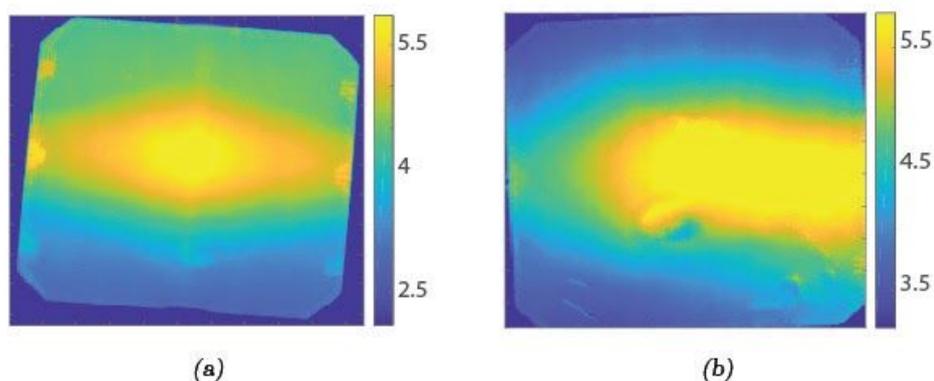


Figura 10 - Imagens de valores de ΔT_{max} (a) SF e (b) 1F.

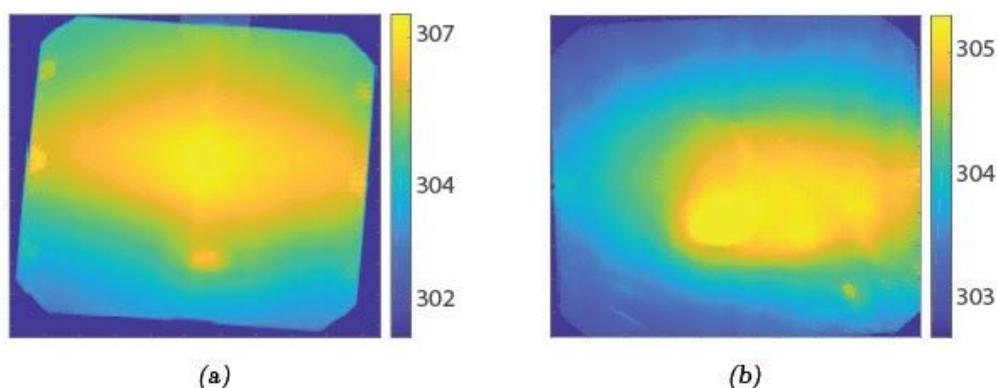


Figura 11 - Imagens de valores de C_{max} (a) SF e (b) 1F.

O fluxo de temperatura no espaço (Fig. 12) tende do centro da célula, região mais quente, para as bordas, regiões mais fria. Isso faz com que o ângulo das direções do gradiente de temperatura (Seção 2.1.4) apontem para o centro, assumindo um comportamento como o apresentado na Fig. 12. Por outro lado, na presença de uma fratura o gradiente foge a esse padrão, apresentando ainda uma região distinguível visualmente, como visto na Fig. 12.

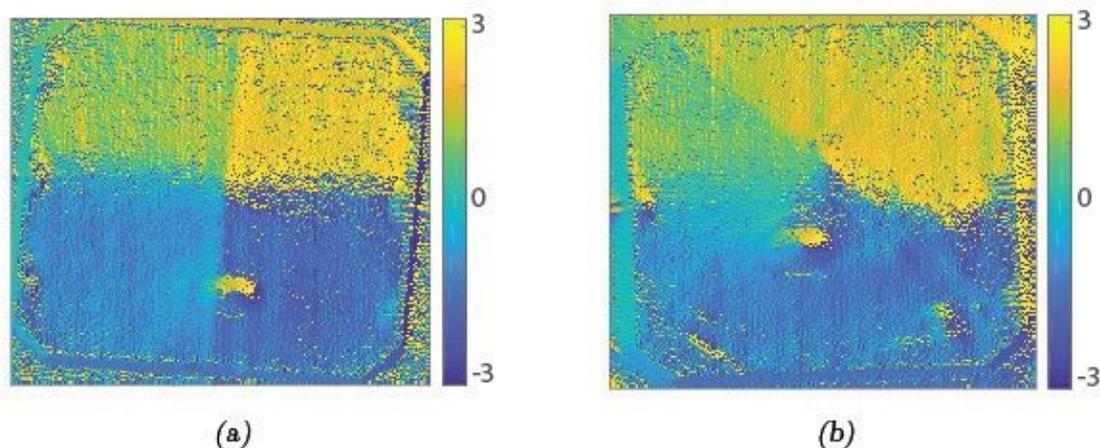


Figura 12 - Imagens de valores do ângulo do gradiente de temperatura (a) SF e (b) 1F.

4. Conclusões

Uma ferramenta para análise e diagnóstico de falhas baseadas na metodologia de Silva (2019) foi desenvolvida para aplicação de células fotovoltaicas. Aqui, foi possível destacar regiões defeituosas como fraturas, solda fria, formação de bolha (emulada artificialmente), além do comportamento térmico da placa, o que permite reduzir a subjetividade do usuário no diagnóstico. Como resultado a ferramenta produz seis imagens referentes as constantes de tempo (τ de aquecimento e resfriamento), ΔT_{max} , C_{max} , fluxo de calor (gradiente e Kirsch) para cada célula ensaiada.

Na placa MF, célula com múltiplos defeitos, foi possível observar a presença de múltiplas falhas simultaneamente, as quais foram facilmente destacadas pela ferramenta. No intuito de observar o comportamento de defeitos isoladamente, ensaiou-se uma célula com apenas uma fratura (1F). Nessa célula, foi possível acompanhar a contribuição da fratura para as alterações no comportamento de uma em plenas condições (SF).

As imagens resultantes do processamento revelaram diferenças particulares entre as duas células, observando assimetrias presentes tanto nas constantes de tempo, quanto em ΔT_{max} e C_{max} . Ademais, o método de Kirsch e o gradiente do fluxo permitiu a delimitação das regiões de fratura, ainda que de maneira suave devido ao baixo valor de tensão aplicada no ensaio.

Os próximos passos serão a observação de outras falhas isoladamente (bolhas artificiais e solda fria), ajustes na estrutura para se minimizar a interferência da câmera e a definição de características de cada falha, o que por sua vez permitirá a utilização de um sistema inteligente para classificação e diagnóstico da célula.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem a CAPES, FAPITEC, CNPq e a Universidade Federal de Sergipe pelo apoio financeiro e estrutural recebido na realização deste estudo.

REFERÊNCIAS

- Akram, M. W., Li, G., Jin, Y., Chen, X., Zhu, C., Zhao, X., ... & Ahmad, A. 2019. Improved outdoor thermography and processing of infrared images for defect detection in PV modules. *Solar Energy*, 190, 549-560.
- Faye, I., Ndiaye, A., Gecke, R., Blieske, U., Kobor, D., & Camara, M. 2019. Experimental study of observed defects in mini-modules based on crystalline silicon solar cell under damp heat and thermal cycle testing. *Solar Energy*, 191, 161-166.
- Herraiz, Á. H., Marugán, A. P., & Márquez, F. P. G. 2019. A review on condition monitoring system for solar plants based on thermography. In *Non-Destructive Testing and Condition Monitoring Techniques for Renewable Energy Industrial Assets* (pp. 103-118). Butterworth-Heinemann.
- Marques Filho, O., & Neto, H. V. 1999. Processamento digital de imagens. Brasport.
- Moore, P. O., Maldague X. P.V. *Nondestructive Testing Handbook*. 3ed., Columbus, ASNT, 2001.
- Mukhopadhyay, A., Basu, D. N., Mondal, S., & Sen, S. 2019. Dynamic Behaviour, Identification and Control of Energy Systems. In *Dynamics and Control of Energy Systems* (pp. 3-7). Springer, Singapore.

- Niazi, K. A. K., Yang, Y., Spataru, S. V., Musharraf, M. U., & Séra, D. 2019. Experimental benchmarking of partial shading effect on thin-film and crystalline-silicon solar photovoltaic modules. In *36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*.
- Roche, J. M., Leroy, F. H., & Balageas, D. L., 2014. Images of thermographic signal reconstruction coefficients: a simple way for rapid and efficient detection of discontinuities. *Materials evaluation*, 72(1)
- Silva, W. F. D. 2019. Desenvolvimento de um algoritmo de processamento de dados radiométricos obtidos por termografia ativa pulsada, Dissertação de Mestrado, UFS, São Cristóvão

FAULT DETECTION TECHNIQUE FOR PHOTOVOLTAIC CELLS BY ACTIVE THERMOGRAPHY

Abstract. *The fault detection is essential for the reliability and performance of a photovoltaic system. Therefore, several techniques are applied aiming ensure a well operation of system, among which, the thermography is very common in industry. However, inspections are bound to inspector's expertise and subjectivity for diagnosis realization. In this paper, it is presented the development of a diagnosis auxiliary tool for photovoltaic cells faults based on active thermography. As a case study, it was applied the tool on photovoltaic mono-Si cells not encapsulated. Furthermore, heat transfer physical principles was used to build analysis indicators, such as: time constant (τ), maximum temperature (ΔT_{max}), maximum contrast, temperature gradient angle and Kirsch method - an approximation to gradient module. In this work, it was analyzed three cells in different conditions: one cell with multiple defects (MF), one cell with one defect (1F), and one cell without defects. Also, the resulting pictures from the tool process are presented, which makes possible tell healthy regions from faulty ones.*

Key words: *Solar Energy, Thermography, Image Processing*