

PROCESSAMENTO DE SINAL INFRAVERMELHO GERADO POR TERMOGRAFIA ATIVA COMO POSSIBILIDADE DE ENSAIO NÃO DESTRUTIVO PARA PÁS DE AEROGERADORES DE PEQUENO PORTE

M. C. FRANÇA^{1*}, L. F. V. de S. PAIXÃO¹, D. B. RIFFEL¹

¹Department of Mechanical Engineering, Federal University of Sergipe, University City Prof. José Aloísio de Campos, São Cristóvão 49100-000, Brazil.

*eng.mayarafranca@gmail.com

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar um estudo de processamento de imagem termográfica para análise do estado de pás de aerogeradores de pequeno porte mediante os parâmetros de efusividade térmica, fator de incompatibilidade térmica, contraste térmico padrão e aplicação do modelo de resfriamento baseado na lei de resfriamento de Newton. Utilizou-se a termografia ativa como ensaio não destrutivo (END) que nas últimas décadas vem apresentando excelentes resultados em diversas aplicações. Elaborou-se um planejamento experimental utilizando corpos de provas com materiais similares aos utilizados nas pás dos aerogeradores. Estas amostras passam por um estágio de aquecimento, processo que caracteriza a termografia ativa. Posteriormente com uma câmera infravermelho captura a imagem da superfície em análise e registra o resfriamento da superfície. Nesta etapa as falhas internas podem ser detectadas através da diferença na difusividade térmica em regiões sadias em comparação com as regiões com falhas. O processamento dos dados gerados permite extrair características das propriedades físicas de falhas internas que são as regiões de interesse. Para isto é preciso analisar os termogramas gerados com uma taxa de 30 frames por segundo. O vídeo desenvolvido foi gravado por 300 segundos o que nos entrega uma grande quantidade de dados. A câmera FLIRT420 captura as imagens com dimensão de 240x320 pixels, portanto a matriz analisada possui a dimensão de 240x320x9000. O pós-processamento objetiva identificar falhas como: a delaminação, vacâncias ou adesão entre regiões. Estas falhas se diferenciam em relação a profundidade e dimensão. Através do pós-processamento proposto dos dados foi possível identificar as áreas com falhas e determinar a profundidade máxima detectável pela técnica.

Palavras-chaves: Processamento de termogramas. Ensaios não destrutivos (END). Identificação de defeitos internos. Qualidade das pás.

ABSTRACT

This work aims to present a thermographic image processing study for analysis of the state of small wind turbine blades through the parameters of thermal effusivity, thermal incompatibility factor, standard thermal contrast and application of the model based on the Newton's Cooling Law. Active thermography was used as a non-destructive test (NDT), which in recent decades has taken on proportions in academic studies due to the data processing capacity of computers. An experimental design was elaborated using test specimens with materials similar to those used in wind turbine blades. These samples go through a heating stage, a process that characterizes active thermography. Subsequently, with an infrared camera, it captures the image of the surface under analysis and records the cooling of the surface. In this step, internal faults can be detected through the difference in thermal diffusivity in healthy regions compared to regions with faults. The processing of the generated data allows extracting characteristics of the physical properties of internal faults that are the regions of interest. For this, it is necessary to analyze the thermograms generated

at a rate of 30 frames per second. The developed video was recorded for 300 seconds, which gives us a large amount of data. The camera (FLIRT420) captures images with dimensions of 240x320 pixels, so the analyzed matrix has dimensions of 240x320x9000. Post-processing aims to identify flaws such as: delamination, vacancies or adhesion between regions. These faults differ in terms of depth and dimension. Through the proposed post-processing of the data, it was possible to identify the areas with flaws and determine the maximum depth detectable by the technique.

Keywords: Processing of thermograms. Non-destructive testing (END). Identification of internal faults. Blade quality.

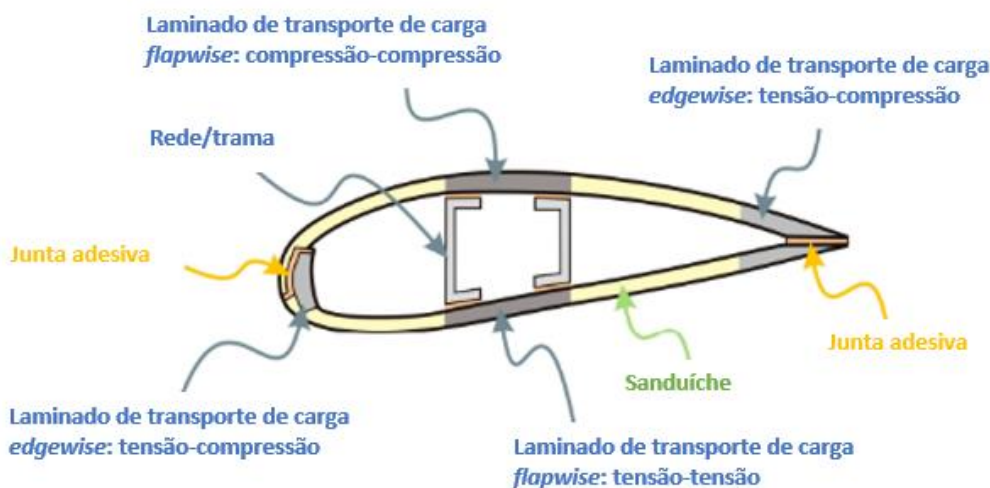
1. INTRODUÇÃO

A energia eólica como um tipo de fonte de energia renovável tem recebido atenção considerável em todo o mundo e seu desenvolvimento está crescendo a uma taxa sem precedentes nos últimos anos. No sistema de turbina eólica, as pás de um rotor são geralmente consideradas como um dos componentes mais críticos (CHEN *et al.*, 2014). JENSEN *et al.* (2021) apresentam estudos sobre detecção de defeitos subsuperficiais em estruturas de fibra de vidro. MÁRQUEZ E CHACÓN (2020) revisaram os END aplicados em pás de aerogeradores. MAIERHOFER *et al.* (2018) avaliam diferentes técnicas de atividade termografia para quantificação de defeitos artificiais em compósitos reforçados com fibra usando análise térmica e contraste de fase. Estas pesquisas reforçam o crescimento dos estudos neste setor e a importância de buscar garantir a qualidade das pás de turbinas eólicas.

As técnicas de monitoramento baseadas em vibração são bem compreendidas e amplamente adotadas para monitorar a condição de máquinas rotativas. No entanto, no caso de turbinas eólicas, a vibração medida é complexa devido ao alto número de fontes de vibração e ao fenômeno de modulação. Portanto, extrair informações relacionadas à condição de um elemento específico, por exemplo, a condição das pás é muito difícil. As condições de funcionamento do aerogeradores submetem as pás a processo de vibração severas que danificam a sua estrutura (ABOUHNIK *et al.* 2012).

As pás de uma turbina eólica consistem em duas faces, no lado da sucção e no lado da pressão, unidas e reforçadas por uma ou várias redes/tramas integrais de cisalhamento que ligam as partes superior e inferior do casco da pá. A Figura 1 apresenta o esquema de seção de uma pá de turbina eólica. A carga *flapwise* é causada pela pressão do vento, e a carga *edgewise* é causada pela gravidade (MISHNAEVSKY *et al.* 2017).

Figura 1: Esquema de seção de uma pá de turbina eólica.



FONTE: MISHNAEVSKY *et al.* (2017)

As cargas estáticas e as cargas cíclicas aplicadas à estrutura das pás durante testes em escala real podem resultar em falhas de vários tipos, como: delaminação das camadas adesivas e laminada, descolamento nas interfaces da pele e divisão ao longo das fibras de falha compressiva no plano, bem como o deslocamento da pele e rachaduras na camada de gel (MISHNAEVSKY *et al.* 2017).

JOSHUVA (2018) revisa a bibliografia de estudos de falhas de pás de turbinas eólicas analisando os seguintes tipos de ensaios: técnica acústica, espectrograma de ressonância local, técnica de eco de ultrassom, monitoramento visual, monitoramento ótico, emissão acústica, ultrassom e radiografia. Ao contrário do modo passivo, a termografia ativa é nomeada assim pois necessita de aquecimento ou resfriamento a fim de que se obtenha significativas diferenças de temperatura e as descontinuidades possam ser reveladas (MALDAGUE, 2001).

GRYS (2011) indica que a detecção de heterogeneidade na distribuição de temperatura de termogramas, sem justificativa na estrutura e construção, é pré-requisito para qualificar áreas com defeitos. O conhecimento da geometria e profundidade do defeito facilita para modelarmos a causa e a ocorrência das falhas. A falta de padrões dificulta a difusão dos Ensaios Não-Destrutivos por termografia ativa na indústria. Isso indica que é crucial investigar suas propriedades metrológicas e limitações para fins de aplicações práticas.

Os materiais compósitos são usados tipicamente em pás e naceles de turbinas eólicas. Os geradores e torres são fabricados a partir de metais. As pás são a parte mais importante que aerodinamicamente converte a força do vento através da turbina em energia elétrica, e o componente de maior custo das turbinas (MISHNAEVSKY *et al.* 2017). A intercorrência de falha em uma das pás após centenas de horas de operação intermitente é apresentada na turbina eólica de *Smith* (1941). Assim, a importância da escolha adequada dos materiais e limitações inerentes de metais como material para pás foi demonstrado no início da história do desenvolvimento da energia eólica (WILBERFORCE *et al.*, 2023)

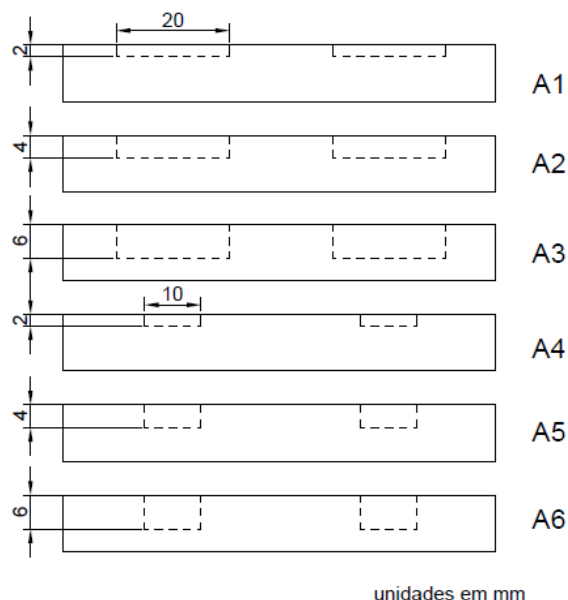
MISHNAEVSKY *et al.* (2017) apresentam uma breve visão geral de materiais compósitos para aplicações em turbinas eólicas. Revisam os materiais de turbinas eólicas, e apresentam a necessidade de utilizar compósitos reforçados para construção das pás. Além dos compósitos tradicionais para pás de turbinas eólicas (fibras de vidro/compósitos de matriz epóxi), são discutidos compósitos naturais, híbridos e nanoengenharia.

Escolheu-se o polipropileno nesta pesquisa para realizar os ensaios, tendo em vista que este polímero pode ser utilizado como matriz para a fabricação dos compósitos que constituem uma pá de turbina eólica. Observamos neste contexto a necessidade de propor um método e buscar identificar as suas potencialidades e limitações de modo experimental. Neste trabalho buscou-se apresentar uma técnica alternativa que leva em consideração o comportamento térmico do processo de resfriamento, bem como o desenvolvimento do pós-processamento dos termogramas gerados nos experimentos.

2. MÉTODO DO ESTUDO

O material selecionado para os testes foi o polipropileno devido ao seu fator de incompatibilidade. Segundo GRYS (2012) este fator é um indicador adimensional limitado pelo intervalo de (-1, 1) e seu valor absoluto e sinal caracterizam o grau e a característica da diferença térmica entre dois materiais, respectivamente.

Figura 2: Dimensão e profundidade das falhas nas amostras A1, A2, A3, A4, A5 e A6.



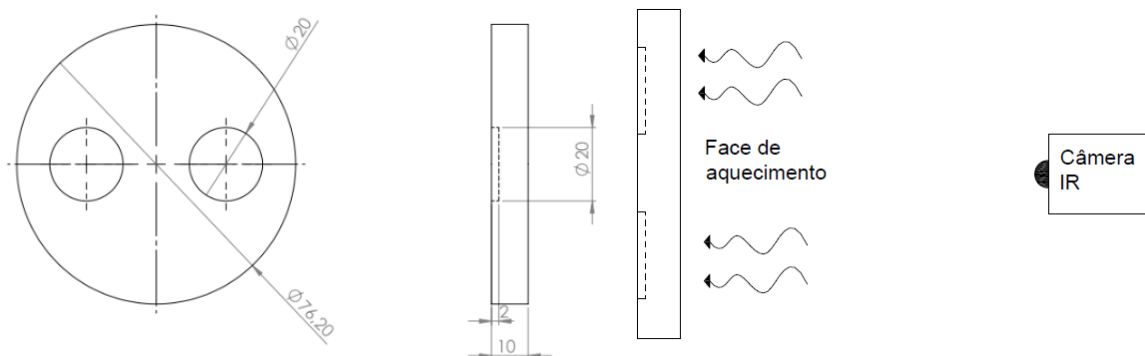
O polímero selecionado possui um fator de incompatibilidade térmica próximo a -1 quando comparado com o ar, material da falha. Escolheu-se o cilindro como o formato das amostras porque a geometria proporciona simplicidade na análise dos dados. A face lisa, sem falhas, é a que entra em contato com a fonte térmica, a distância da superfície para a falha são 8, 6, e 4 mm, respectivamente. A capacidade da termografia ativa identificar uma falha depende da razão entre o diâmetro e a profundidade que deve ser maior que 2. A tabela 1 apresenta esta relação. É possível notar que os corpos de provas A4 e A5 apresentam valores abaixo do esperado.

Tabela 1: Capacidade de visualização do defeito em função do diâmetro e da profundidade da falha.

Corpo de prova	Diâmetro	Profundidade	$\frac{\text{Diâmetro}}{\text{Profundidade}} > 2$
A1	20	8	2,5
A2	20	6	3,3
A3	20	4	5
A4	10	8	1,25
A5	10	6	1,67
A6	10	4	2,5

Escolheu a amostra A1 para apresentar os detalhes do formato na Figura 3. Inseriu-se dois furos no fundo da amostra para simular a presença das falhas. Ambos têm o formato de cilindro oco de 20 mm de diâmetro e estão localizadas com profundidades expressas na figura 2.

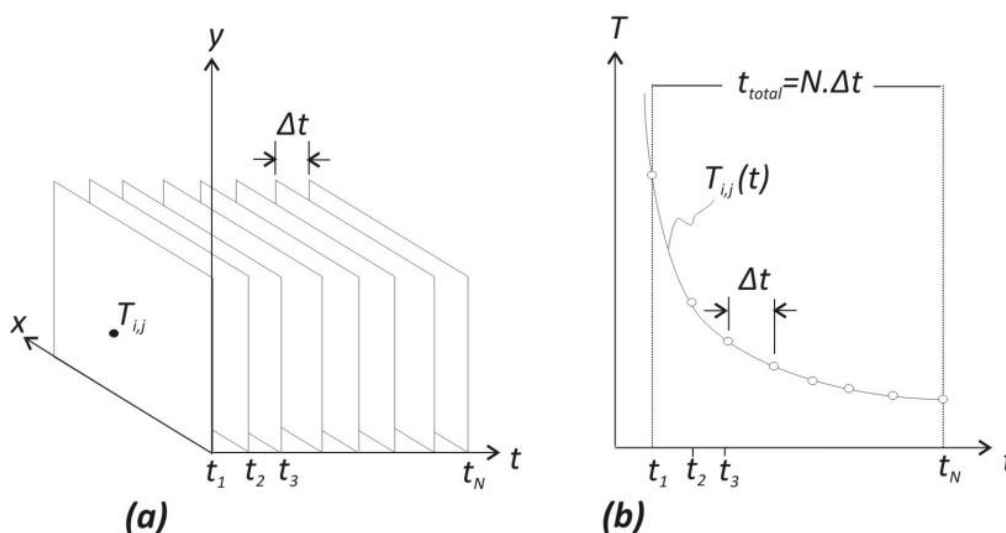
Figura 3: Dimensões da amostra A1 e face de aquecimento.



Um sistema termográfico foi usado para observar a superfície frontal sendo excitado com fonte térmica externa, apresentado na figura 4. O polipropileno é um material translúcido e para garantir condições satisfatórias da inspeção infravermelha, a superfície testada foi coberta com tinta preta fosca de alta emissividade ($\epsilon > 0.9$). O material testado foi aquecido por contato utilizando uma superfície aquecida por resistência elétrica de 13,5 ohms e tensão alternada de 50V. A superfície da fonte térmica foi montada sobre suporte de madeira nivelado simetricamente em ambos os lados, resultando em um nível adequado para que a amostra seja colocada sobre a superfície e obtenha uma condução/convecção térmica o mais homogênea possível entre as superfícies (fonte térmica/amostra sob análise).

O sistema de termovisão consiste de uma câmera térmica FLIR T420 IR e foi utilizado a interface GUI Flir Atlas SDK for MATLAB para conectar a câmera a um computador e gravar a sequência do termograma em tempo real. O tipo de detector da câmera é matriz plano focal (FPA) microbolômetro não refrigerado 320 x 240 pixels. A distância entre a câmera e o objeto foi fixada em 0,4 m (menor distância focal da lente utilizada). Uma sequência de termogramas foi registrada com uma taxa de 30fps (frames por segundo) durante 300s. Para extrair do vídeo a matriz foi usado Flir Atlas SDK for MATLAB resultando em uma matriz com a dimensão de 320x240x9000 formato *double*. A Figura 4 apresenta a estrutura dos dados em 3D (a) e a curva de resfriamento da temperatura por pixel (b).

Figura 4: Estrutura dos dados. (a) Matriz 3D de temperatura no domínio do tempo e (b) curva de decaimento da temperatura de um pixel com/sem defeito em coordenadas (i,j)



Fonte: RODRIGUES, 2010.

2.1 PROCESSAMENTO DO TERMOGRAMA

Durante o processamento do sinal foram utilizados a interface gráfica desenvolvida por (FREITA, 2018) e as funções do MATLAB GUI (*graphic user interfaces*), além de aplicar o algoritmo desenvolvido por SILVA *et al.* (2020). Estas ferramentas possibilitaram durante as análises visualizar os termogramas e localizar as áreas defeituosas visualmente (Figura 5), verificar contraste entre as curvas de resfriamento pelo tempo e calcular o desvio padrão da temperatura máxima (Figura 6), plotar as imagens em 3D (Figura 7), identificar as linhas de contorno da área de interesse e das falhas (Figura 8), entre outras funções.

Figura 5: Imagem térmica frame 1000 na paleta *Rainbow* do A2.

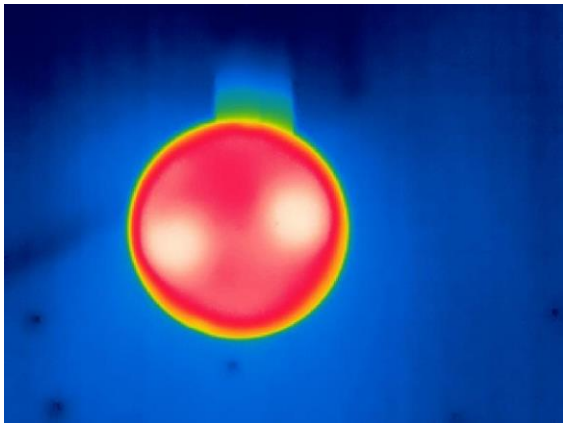


Figura 7: Função *mesh* do MATLAB do frame 1000 da imagem térmica normalizada.

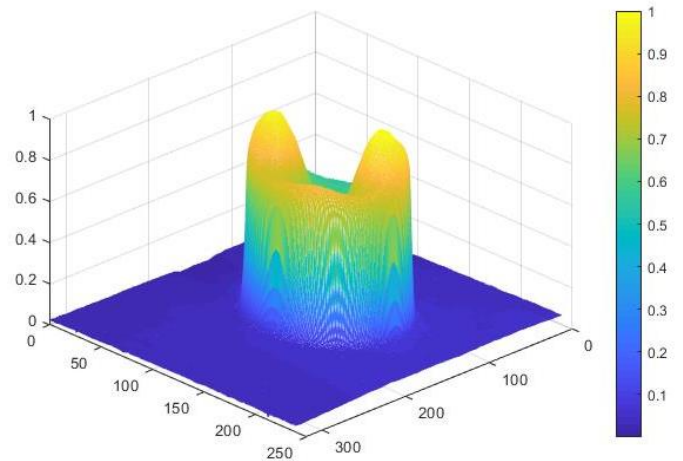


Figura 6: Curva de decaimento do pixel com a temperatura máxima e desvio padrão.

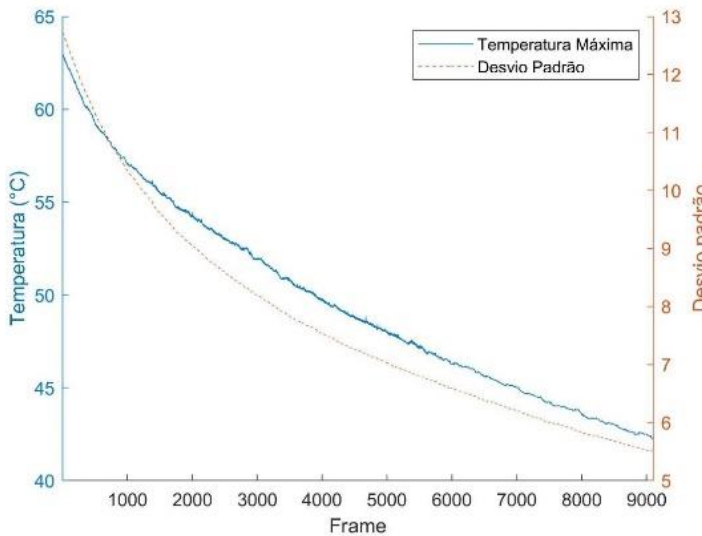
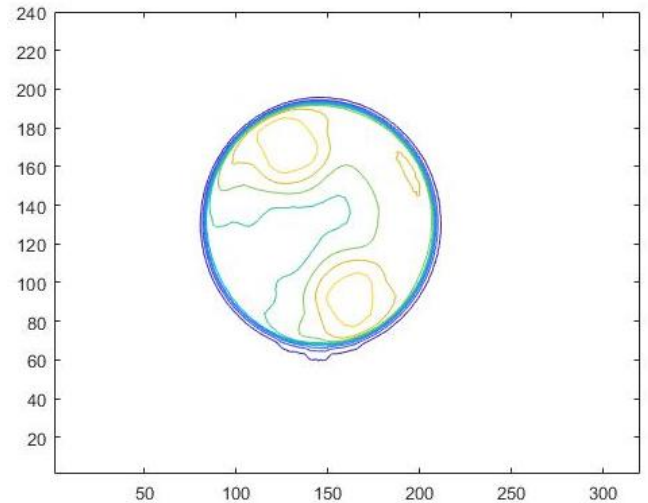


Figura 8: Linhas de contorno.



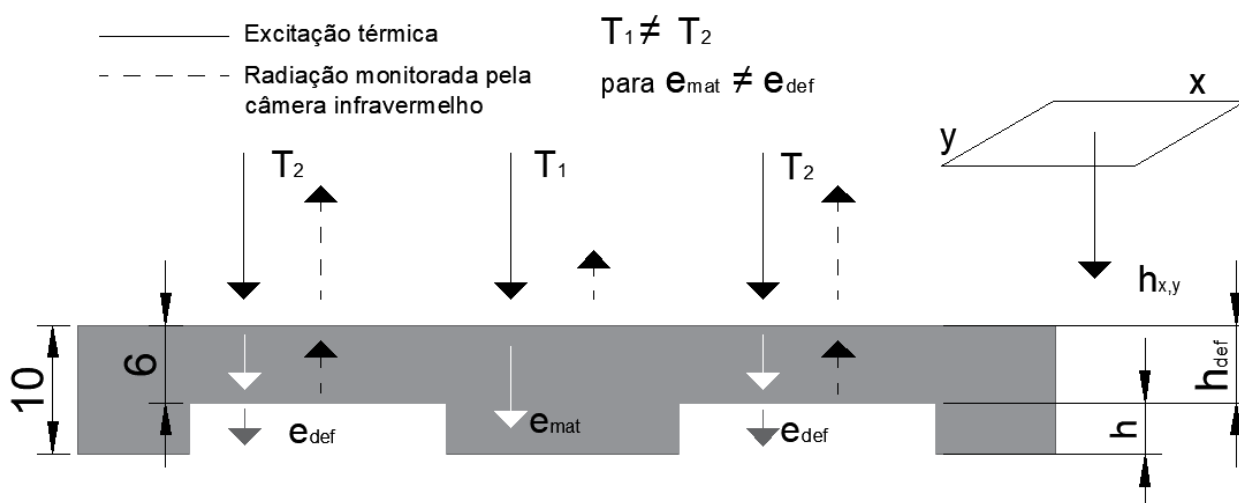
2.2 EFUSIVIDADE

A termografia ativa pode ser eficaz apenas se os parâmetros térmicos de material e defeito diferem consideravelmente. A efusividade térmica, caracteriza a quantidade de energia que o material é capaz de absorver e conecta três outros parâmetros, de acordo com a seguinte equação:

$$e = \sqrt[2]{k \cdot \rho \cdot c_p} \quad (1)$$

Onde: e - efusividade (J/(m².K.s^{1/2}); k - condutividade térmica (W/mK); ρ - densidade (kg/m³); c_p - Calor específico (KJ/Kg)

Figura 7: Diagrama da estrutura dos dois materiais, h_{def} é a profundidade do defeito em relação a superfície de análise e h é a profundidade do defeito.



Considerando a eq. 1 calculamos a efusividade e os resultados estão apresentados na tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros físicos e térmicos.

Parâmetros	Polipropileno	Poliamida	Ar
Densidade (kg/m ³)	900	1130	1,2754
Condutividade (W/mK)	0,21	0,23	0,03
Calor específico (J/kg)	1930	1700	1012
Efusividade (J/m ² Ks ^{1/2})	603,96	664,7	6,22

2.3 FATOR DE INCOMPATIBILIDADE TÉRMICA

O fator de incompatibilidade térmica (FIT) entre o material e o ar (material do defeito) pode ser calculado utilizando a seguinte equação:

$$\Gamma = \frac{e_{ar} - e_{mat}}{e_{ar} + e_{mat}} \quad (2)$$

Onde: e_{ar} - efusividade do ar; e_{mat} - efusividade do material; Γ - Fator de incompatibilidade térmica

Para o polipropileno encontramos o valor de -0,9796 e para a poliamida o valor de -0,9815, ambos aproximam de -1 que indica uma alta capacidade de indicação da diferença térmica entre as áreas com defeito e sem defeito. Abaixo, apresenta-se a tabela 3 que determina as características do fator Gama aplicado à termografia ativa. Este fator é importante para definir se as condições das falhas são sensíveis à técnica. Podemos verificar se o fator de incompatibilidade for muito próximo de zero a capacidade da termografia detectar o defeito é impossível. Evidente, pois as diferentes características entre a falha e o material de análise que produz diferença na efusividade térmica produzida.

Tabela 3 – Fator de incompatibilidade térmica (Gama) e significado nos ensaios por termografia ativa.

Γ	Característica	Defeito é _____ em relação ao material testado	Contraste térmico entre região com e sem defeito	Detectibilidade do defeito por termografia ativa
-1	Alto	Bom isolador térmico	Rápido	Alto
-0,1	Baixo	Ruim isolador térmico	Lento	Baixo
0	Não há	O mesmo	Não há	Impossível
0,1	Baixo	Ruim condutor térmico	Lento	Baixo
1	Alto	Bom condutor térmico	Rápido	Alto

2.4 CONTRASTE TÉRMICO PADRÃO

O método de impulso longo tem muitas aplicações, como determinação de espessura de revestimentos, inspeção das ligações revestimento-substrato, avaliação de estruturas compostas, medições de condutividade térmica dos materiais. No experimento foram analisados apenas os termogramas da fase de resfriamento capturadas após a excitação térmica por fonte externa por contato. A detecção de defeitos é um processamento básico aplicando o contraste térmico padrão (CTP) [GRYS, 2012] utilizando a equação abaixo.

$$CTP_{x,y}(t) = \frac{T_{x,y}(t) - T_{x,y}(t_0)}{T_{semfalha}(t) - T_{semfalha}(t_0)} \quad (3)$$

Onde: $T_{x,y}(t)$ - Imagem no tempo t ; $T_{x,y}(t_0)$ - Imagem de referência no t_0 ; $T_{semfalha}(t)$ - Pixel sem falha no tempo t ; $T_{semfalha}(t_0)$ - Pixel sem falha de referência em t_0 ;

A equação (3) apresentada que calcula o CTP representado pela razão entre a diferença de um frame em análise com relação a um frame de referência e a diferença entre pixels ao longo do tempo sem falha. Encontramos os resultados a seguir para as três profundidades e observando os resultados apresentados na Figura 8 apresenta que o CTP para a profundidade de 8mm da falha em relação a superfície foi a que mais apresentou ruído, devido a difusividade térmica lateral e pelo fato da falha possuir apenas 2mm de profundidade como esperado devido ao fator da Tabela 1 ser próximo de 2. A Figura 9 apresenta a distribuição normal de uma região com defeito.

Figura 8: Resultados em 3D do contraste térmico considerando as três profundidades (4, 6 e 8).

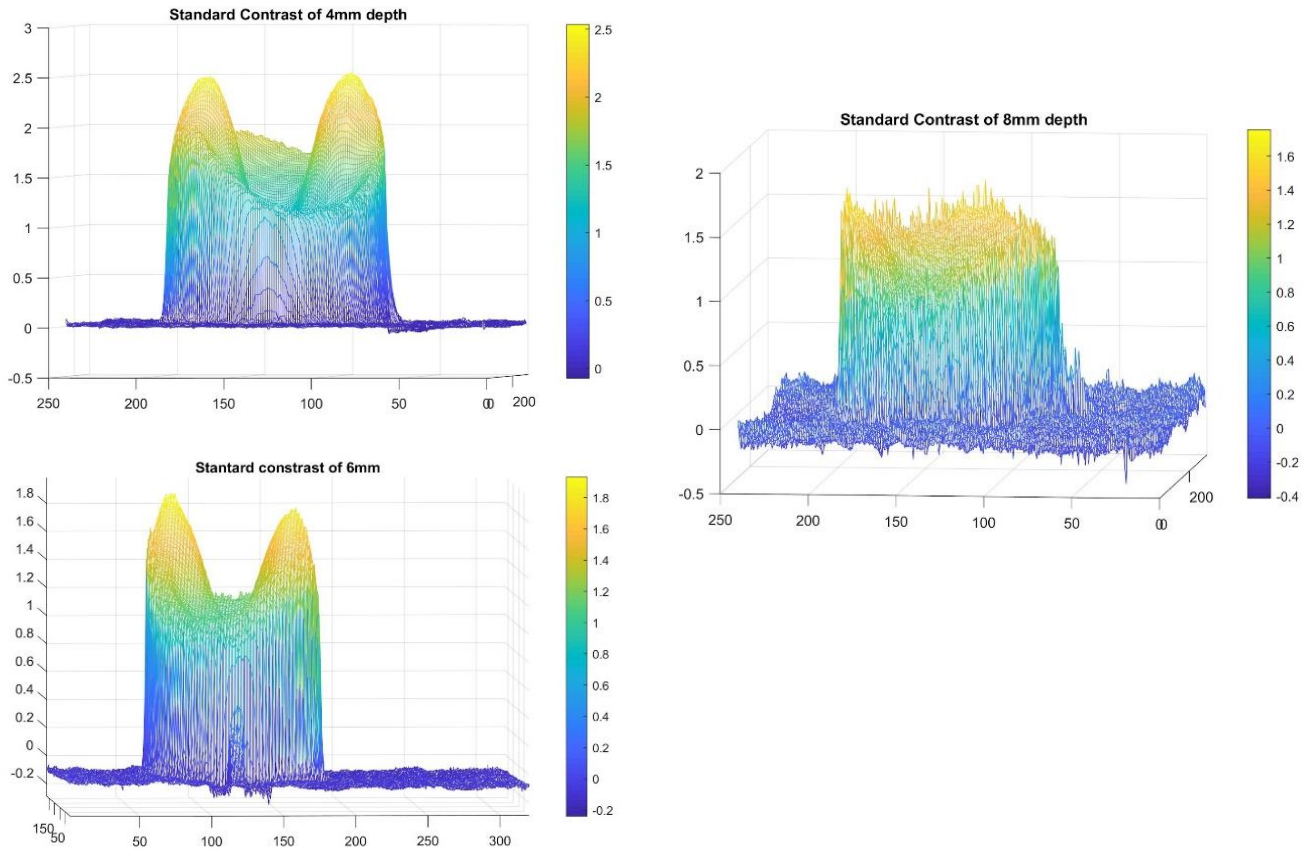
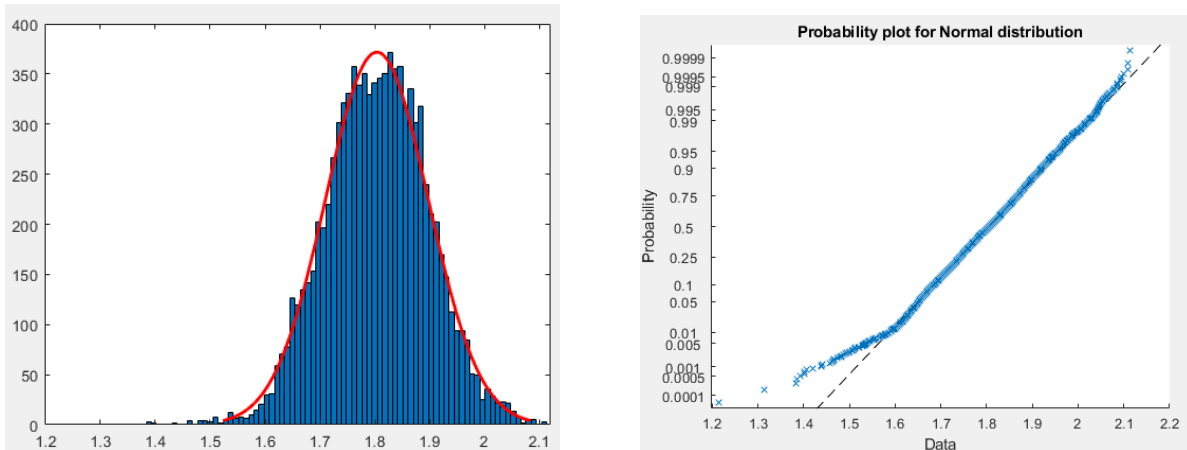


Figura 9: Distribuição normal do pixel máximo.



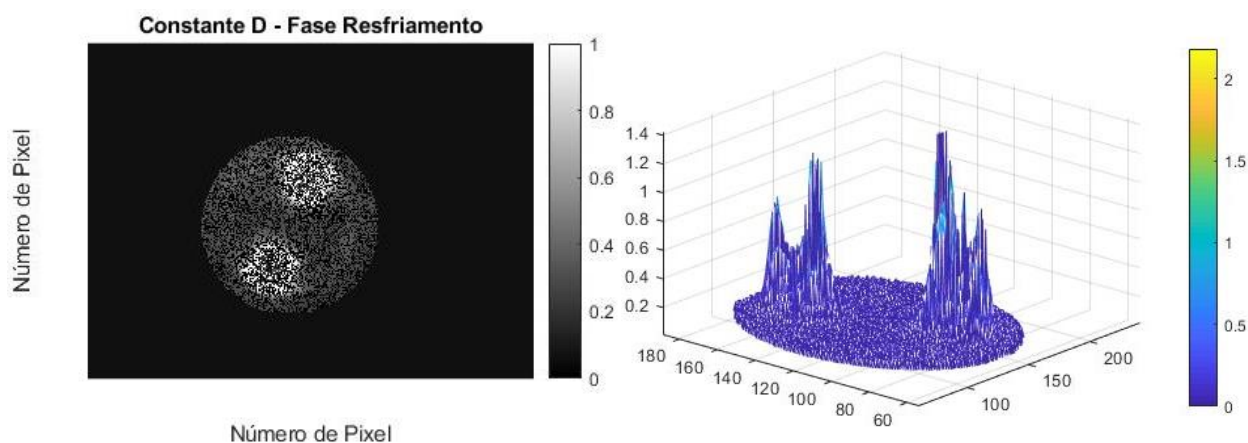
2.5 COMPRESSÃO UTILIZANDO O MODELO DE RESFRIAMENTO

Devido ao gigantesco volume de dados, uma etapa importante no processamento é a redução sem perda de informação. SILVA *et al.* (2022) desenvolveu um modelo de compressão utilizado para reduzir a dimensão dos dados em até 98% utilizando a equação (4) como modelo para o ajuste de resfriamento elaborado especificamente para análise da curva de resfriamento de sinais radiométricos para a faixa do baixo e médio infravermelho.

$$y = a \cdot e^{-b \cdot t} + c \cdot e^{-d \cdot t} \quad (4)$$

São calculados os quatro parâmetros (a, b, c e d) por regressão não linear de Gauss-Newton. O sinal de temperatura de cada pixel é normalizado, onde os dados e a curva ajustada pela equação 1 calculam o sinal normalizado ao longo do tempo. Antes de ajustá-los, foi aplicado o filtro da mediana para eliminar algum ruído (alta frequência) e facilitar o ajuste, tornando a convergência mais rápida. A figura 9 apresenta o resultado da constante de resfriamento 'd' em 2D com a exclusão do fundo e apenas os dados relevantes para análise. Ao lado apresenta-se a constante em 3D evidenciando as regiões com falhas.

Figura 9: Constante de fase de resfriamento 'd'.



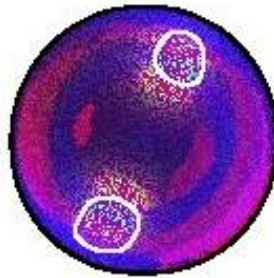
É importante salientar o significado físico do ajuste aplicado do modelo utilizado considerando as restrições do fenômeno físico, portanto, seguindo as leis de transferência de calor e termodinâmica. É possível verificar a similaridade entre as teorias de Newton Lei do resfriamento na Eq. 5 e o ajuste com a soma de o modelo exponencial na Eq. 4:

$$T = T_a + (T_0 - T_a) \cdot e^{\left(\frac{t-t_0}{\tau}\right)} \quad (5)$$

2.6 IMAGEM RESULTANTE

O método da imagem resultante sugerido por SILVA *et al.* (2022) possui a finalidade de entregar ao operador e mantenedor uma única imagem capaz de sintetizar todas as regiões importantes para identificação de falhas internas. Mediante um simples entendimento dos conceitos físicos envolvidos se espera converter a análise de uma única imagem em um processo rápido e que entregue agilidade no processo de tomada de decisão.

Figura 10: Resultado final atribuindo os indicadores em cada canal RGB.



Calculou-se segundo NETO *et al.* (2020) os 3 indicadores que representam sinais de entrada para os canais RGB da imagem resultante: o Máximo contraste, a Variação máxima de cada pixel ($\Delta T_{\text{máx}}$) e a constante de tempo. O resultado está exposto na figura 10. Importante ressaltar que o fundo da imagem térmica foi excluído utilizando a técnica do limiar de Otsu que a partir de um valor de *threshold* deletamos dados abaixo desse valor ajustado e mantemos apenas os dados acima, mantendo apenas a região de interesse para minimizar a quantidade de dados e atingir um processamento dos dados mais rápido.

6. CONCLUSÃO

O trabalho proposto objetivou analisar e processar os dados gerados pelo método de termografia ativa com aquecimento de pulso longo. Buscando aplicar em pás de aerogeradores, pode-se indicar a capacidade da técnica em verificar falhas como deslocamento da pele já que esta se dá de forma próxima da superfície, rachaduras internas, e descolamento das junções. Além de evidenciar a espessura das camadas superior e inferior das pás onde as falhas possuem alta capacidade de identificação por termografia ativa.

O crescimento dos END no setor requer aprimoramento das pesquisas e da forma de processamento dos dados. Quanto mais estudos temos sobre esta técnica maior a probabilidade de elaboração de normas técnicas e padronizações. É muito importante conhecer os limites e as características de cada técnica para que sejam assertivas as escolhas em função do tipo de falhas que se deseja identificar. O pós-processamento dos sinais termográficos permitiu identificar regiões com defeitos em função do diâmetro e profundidade da falha em relação à superfície de análise. As etapas de pré-processamento aplicadas foram o filtro mediana, exclusão do fundo da imagem pelo limiar de Otsu e identificação das bordas são essenciais para que a etapa de pós-processamento seja aplicada e parâmetros das condições da imagem sejam obtidas.

O indicador utilizado para verificação da utilização da END foi o fator de incompatibilidade térmica que para calcular necessita da efusividade do material da peça e da falha. Este fator indica a detectabilidade do defeito. Os resultados foram constatados experimentalmente e apresentaram respostas condizentes com o esperado pelo estado da arte. O contraste térmico padrão apresentou como a profundidade da falha influência na análise dos dados obtidos. Observou-se que a profundidade de 8mm gerou muito ruído e não evidenciou a falha, enquanto que para as profundidades de 4 e 6 as falhas foram claramente identificadas. Foi possível verificar a distribuição normal de uma região com defeito indicado pelo pixel máximo. Utilizou-se o algoritmo desenvolvido por SILVA *et al.* (2020) para modelar a curva de resfriamento de cada pixel baseado na Lei de Resfriamento de Newton.

Os experimentos permitiram testar e validar os estágios de pós-processamento. Utilizou-se algumas ferramentas para desenvolvimento do pós-processamento, a função *mesh* do MATLAB para plotar em 3D a imagem térmica por frame, a função *contour* que define as linhas de contorno da imagem térmica, os dados no tempo pixel-a-pixel através da seleção do ponto máximo de um frame, bem como a seleção de pontos com defeito ou sem defeito na região de interesse mediante a visualização com a paleta de cor

rainbow. Aplicou-se aos dados o processo de compressão, muito importante quando estamos tratando de análise de imagens, principalmente porque minimiza o tempo de processamento.

Com as informações importantes evidenciadas, três indicadores foram calculados para gerar a imagem resultante: Máximo contraste, Variação máxima de cada pixel ($\Delta T_{\text{máx}}$) e Constante de tempo. Esta pesquisa apresenta o processamento dos dados obtidos a partir da termografia ativa e sugere ensaios das condições de funcionamento das pás de aerogeradores de pequeno porte. O próximo passo é submeter estruturas de pás com falhas artificialmente inseridas para aplicação do método.

Este trabalho é fruto de estudos no Laboratório de Engenharia e Energia (LABENGE) da Universidade Federal de Sergipe (UFS) localizado no departamento de Engenharia Mecânica. Obteve apoio através da Fundação de Apoio à Pesquisa e à Inovação do Estado de Sergipe (FAPITEC). E é um pequeno fragmento do trabalho de dissertação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da autora com ênfase em processamento de sinais termográficos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

JOSHUVA, A. D., **Fault Diagnosis and Localization of Wind Turbine Blade**, Vellore Institute of Technology - VIT, Índia, 2018.

MÁRQUEZ, F. P. G., CHACÓN, A. M. P. **A review of non-destructive testing on wind turbines blades**, Renewable Energy, Volume 161, 2020, Pages 998-1010, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.145>.

JENSEN, F., TERLAU, M., SORG, M., FISCHER, A. **Active Thermography for the Detection of Sub-Surface Defects on a Curved and Coated GFRP-Structure**. Appl. Sci. 2021, 11, 9545. <https://doi.org/10.3390/app11209545>.

NETO, J. J. de O., SILVA, T. S., SILVA, W. F. e RIFFEL, D. B., **TÉCNICA DE DETECÇÃO DE FALHAS EM CÉLULAS FOTOVOLTAICAS POR TERMOGRAFIA ATIVA**, VIII congresso brasileiro de energia solar, Fortaleza, 2020.

FREITAS, J. P. O., **DESENVOLVIMENTO DE UMA INTERFACE GRÁFICA PARA OBTENÇÃO E ANÁLISE DE VÍDEOS TÉRMICOS**, TCC de Engenharia Mecânica, UFS, São Cristóvão, 2018.

MALDAGUE, X., MOORE, P. O., **Nondestructive Testing Handbook: Infrared and Thermal Testing**. 3 ed. ASNT (American Society for Nondestructive Testing), 2001.

RODRÍGUEZ, F. DE J. L., **Detecção de defeitos em materiais cerâmicos usando termografia**, Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2010. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/94002>.

SILVA, V. M. A. **TERMOGRAFIA ATIVA PULSADA APLICADA A JUNTAS COMPÓSITAS LAMINADAS**, Projeto de Graduação, UFRJ, Escola Politécnica, 2014.

ABOUHNIK, A.; ALBARBAR, A., **WIND TURBINE BLADES CONDITION ASSESSMENT BASED ON VIBRATION MEASUREMENT AND LEVEL OF AN EMPIRICALLY DECOMPOSED FEATURE**. Energy Conversion and Management, 64(), 606–613. doi:10.1016/j.enconman.2012.06.008, 2012.

MISHNAEVSKY, L., BRANNER, K., PETERSEN, H. N., BEAUSON J., MCGUGAN, M., SORENSEN, B. F. **MATERIAL FOR WIND TURBINE BLADES: AN OVERVIEW**. <https://doi.org/10.3390/ma10111285>, 2017.

SILVA, W. F., MELO, R. A. C., GROSSO, M., PEREIRA, G. R. e RIFFEL, D. B., **ACTIVE THERMOGRAPHY DATA-PROCESSING ALGORITHM FOR NONDESTRUCTIVE TESTING OF MATERIALS**, IEEE Acesso, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3025329.

CHEN, X., ZHAO, W., LU ZHAO, X., XU, J. Z., **Preliminary failure investigation of a 52.3m glass/epoxy composite wind turbine blade**, ELSEVIER, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.05.024>doi: 2014.

WILBERFORCE, T., OLABI, A.G., SAYED, E. T., ALALMI, A. H., ABDELKAREEM, M. A., **Wind turbine concepts for domestic wind power generation at low wind quality sites**, Journal of Cleaner Production, Volume 394, 2023, 136137, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136137>.