

08 a 11 de Outubro de 2018
Instituto Federal Fluminense
Búzios - RJ

UMA PROPOSTA DE REGISTRO DE IMAGEM TÉRMICA PARA POSSÍVEL UTILIZAÇÃO NA DETECÇÃO DE FALHAS EM EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS

Aparecido Juneo dos Santos¹ - aparecidojuneo@yahoo.com.br

Antônio Wilson Vieira¹ - awilsondcc@gmail.com

Marcos Flávio Silveira Vasconcelos D'Angelo¹ - marcos.dangelo@unimontes.br

Neirismar Antunes Pereira¹ - neirismarantunes@gmail.com

¹Universidade Estadual de Montes Claros, Unimontes - Montes Claros, MG, Brasil

Resumo. *O presente trabalho propõe uma metodologia baseada em termografia para possível detecção de falhas em equipamentos elétricos. Para isso é utilizada uma câmera da marca FLIR Systems modelo E6 que disponibiliza tanto a imagem térmica quanto a imagem RGB da mesma cena. As imagens térmicas capturadas em diferentes instantes de tempo são alinhadas a partir de uma transformação obtida pelo registro das imagens RGB correspondentes, que é a principal contribuição do trabalho. Com as imagens térmicas alinhadas, foi criado um índice temporal I (calculado como o somatório do módulo da subtração entre uma imagem térmica padrão T_0 e as imagens T_n) que é utilizado para detectar a possível ocorrência de uma falha em um equipamento elétrico. O acompanhamento permite analisar a evolução da temperatura e assim com uma variação de temperatura encontrada, o detector de falha sinaliza essa mudança de temperatura que pode indicar uma falha de funcionamento.*

Palavras-chave: *Visão Computacional, registro de Imagens, Imagens Térmicas, Detecção de Falhas em Equipamentos Elétricos*

1. INTRODUÇÃO

A inspeção de equipamentos elétricos visa garantir uma maior durabilidade dos mesmos e também evitar a ocorrência de manutenções corretivas. Por exemplo, uma concessionária de energia elétrica tem de manter uma ampla quantidade de equipamentos elétricos funcionando para garantir tanto a qualidade da energia fornecida como também a disponibilidade de energia para o consumidor final. Sendo que falhas nesses equipamentos podem acarretar transtornos e prejuízos diversos aos consumidores. Em indústrias de produção contínua os equipamentos elétricos ao apresentarem falhas podem interromper processos de produção acarretando perdas significativas (Gade and Moeslund, 2014).

Uma maneira de acompanhar falhas em equipamentos é utilizando imagens térmicas. Em equipamentos elétricos, uma imagem térmica pode revelar regiões de aquecimento acima do es-

perado, podendo indicar sobre-corrente, curto circuito, aquecimento anormal, pontos de solda mal realizados, conexões elétricas ruins, curto-circuitos, sobre-cargas, desbalanceamento de cargas, instalação inapropriada, dentre outras (Jadin and Taib, 2012). A maioria dessas falhas não podem ser detectadas a olho nu ou utilizando uma câmera comum e geralmente só são identificadas em estágios avançados, acarretando a parada do equipamento. A grande vantagem de utilizar uma câmera térmica para obter imagens térmicas, é a possibilidade de identificar essas anormalidades, sem a necessidade de medir diretamente grandezas como corrente e tensão, além de ser um método não invasivo.

Todo equipamento elétrico aquece quando em funcionamento e por meio do uso da imagem térmica, regiões com temperaturas diferentes podem ser identificadas. Na Figura 1 tem-se a imagem térmica de três disjuntores de um sistema trifásico. Uma das fases desse sistema trifásico está possivelmente com maior corrente de operação acarretando maior temperatura de funcionamento em um dos disjuntores.

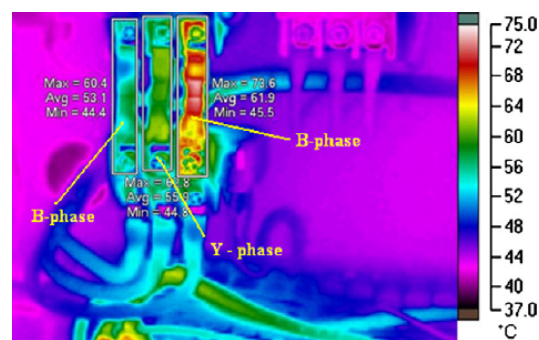


Figura 1- Foto térmica mostrando aquecimento em disjuntores devido ao desbalanceamento de cargas trifásicas.

Fonte:(Jadin and Taib, 2012)

Na Figura 2 tem-se um exemplo de uma câmera térmica que foi utilizada para obter imagens térmicas de um equipamento elétrico. Percebe-se que o equipamento não sofreu deformações e que apenas houve mudança da orientação da câmera. Para que essas duas imagens possam ter pontos correspondentes comparados é necessário o registro das imagens (Zitova and Flusser, 2003). O procedimento de registro consiste em procurar uma transformação, que permita mapear cada *pixel* de uma imagem A, com um *pixel* correspondente de uma imagem B (imagem alvo) em um mesmo sistema de coordenadas espaciais (Ashburner and Friston, 2007) e (Moghe and Singhai, 2013). Esse procedimento é necessário quando um conjunto de imagens representa uma mesma cena, e essas imagens precisam ser comparadas. Quando esse conjunto de imagens possui diferenças, como por exemplo, mudança de posição do objeto presente na cena ou mudança do ponto de vista da câmera, o processo de registro é necessário para que a comparação entre esse conjunto de imagens possa ser realizada.

O operador da câmera por mais treinado que seja para obter as imagens, dificilmente consegue manter a mesma orientação e distância do objeto. Mudanças sutis que podem ser difíceis de serem percebidas a olho nu podem ser introduzidas com leves modificações entre as posições em que a câmera é usada para obtenção das imagens. Para garantir que a comparação de forma automática possa ser realizada com sucesso é imprescindível o procedimento de registro das imagens.

O presente trabalho propõe a utilização de imagens térmicas de equipamentos elétricos para acompanhar e detectar pontos de aquecimento que podem indicar possíveis falhas de funciona-

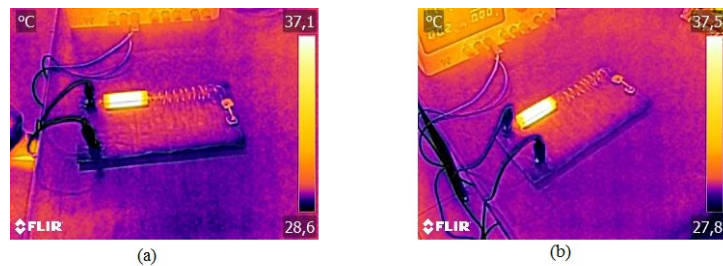


Figura 2- Imagem térmica obtida com posicionamento diferente da câmera.

mento ao longo do tempo. O trabalho consiste na obtenção e comparação das imagens térmicas periodicamente de equipamentos elétricos. Para a comparação entre as imagens, o processo de registro deve ser realizado devido ao fato de que a câmera pode mudar de orientação no momento de captura da imagem térmica. Por meio do processo de comparação, a evolução do comportamento de equipamentos elétricos ao longo do tempo pode ser analisada, possibilitando que indícios de falhas possam ser detectados.

2. TRABALHOS RELACIONADOS

As imagens térmicas são usadas em diversas aplicações como detecção e rastreamento de pessoas e animais, detecção de fogo, detecção de gases, inspeção na construção civil, indústria, agricultura, medicina, veterinária e diversas outras aplicações (Gade and Moeslund, 2014). Na área de inspeção de equipamentos elétricos, (Merryman and Nelms, 1995), utilizou imagens térmicas para detecção de falhas como perda de alimentação de entrada, falha na ventilação, curto circuito na carga, dentre outras em fontes de alimentação. O autor utiliza uma rede neural para identificar se a temperatura do circuito analisado é diferente do valor considerado como normal para funcionamento. Como ponto chave o autor relaciona o sinal térmico com o *status* de operação das fontes de alimentação. Em (Ha et al., 2012), é proposto um método de detecção de falhas para isoladores em linhas de transmissão usando um conjunto de microfones em um robô para localização da falha e imagens térmicas para confirmar a falha ocorrida. Quando o robô localiza um possível local de falha, ele desloca-se até o ponto de falha por meio do processamento do algoritmo desenvolvido pelo autor. O robô fica posicionado e calcula, através da imagem térmica, a temperatura de cada pixel da imagem. Quando algum ponto do isolador tem um erro de temperatura acima do pré determinado a imagem térmica é armazenada para análise posterior por um operador humano. Seguindo o mesmo caminho de detecção de falhas, (Hu et al., 2013) utiliza a imagem térmica em conjunto com valores de tensão e corrente elétrica de placas fotovoltaicas para criar um modelo de detecção de falhas baseada na comparação entre um modelo da placa sem falha e as medições reais de uma placa.

Em (Yang et al., 2013) é proposto um método de diagnóstico de falhas em máquinas rotativas usando imagens térmicas, onde é utilizada a técnica *Bi-dimensional Empirical Mode Decomposition* (BEMD) para decompor as imagens térmicas em suas componentes de frequência; utilizando a técnica *Generalized Discriminant Analysis* (GDA) que mapeia espaços diferentes. Depois é utilizado *Relevance Vector Machine* (RVM) como classificador. As imagens térmicas são obtidas de forma que tanto o motor usado para simular as falhas quanto a câmera térmica são fixos e a região de interesse utilizada para o processamento e identificação das falhas é selecionada de forma manual. Na mesma linha de pesquisa, (Younus and Yang, 2012) também

utiliza imagens térmicas adquiridas de uma câmera térmica fixa para classificar condições de falhas em motores.

Seguindo a mesma linha de detecção de falhas em máquinas rotativas, (Garcia-Ramirez et al., 2014) trata da detecção de falhas em motores de indução utilizando imagens térmicas para detectar falhas devido a falta de lubrificação, falha de ventilação, dentre outras. O trabalho baseia-se na coleta de imagens térmicas dos motores e segmentação dos pontos de interesse. Nesse trabalho os pontos de interesse (pontos de temperatura diferente das condições normais de funcionamento) são selecionados de forma manual.

Outra metodologia é proposta em (Al-Obaidy et al., 2017), em que um sistema foi proposto para identificar falhas em circuitos integrados durante a manufatura das placas de circuito impresso. Devido à grande quantidade de circuitos impressos produzidos e também a necessidade de aumentar a velocidade dos testes de qualidade das placas de circuito impresso, as imagens térmicas são usadas de modo a permitir que um classificador de falhas identifique condições anormais nas placas que possam ser detectadas como falhas. No trabalho é adotado o limiar de quarenta graus Celsius para classificar como condição de falha. Quando o ponto de interesse está acima ou igual a esse limiar a condição de falha é detectada. As regiões de interesse (componentes com maior temperatura) são obtidas de forma manual.

Todos os trabalhos aqui citados utilizam em maior ou menor grau as imagens térmicas para detectar/diagnosticar falhas. Nos trabalhos pesquisados, uma característica comum é utilizar a câmera térmica fixa de forma que as imagens térmicas são obtidas em uma mesma pose sem necessidade de registro. Quando a pose não é fixa ocorre desalinhamento das imagens térmicas. Há um desafio adicional de ser obter o registro correto em uma etapa de pré-processamento da imagem. Nessa direção, o presente trabalho utiliza uma câmera térmica cujo posicionamento não é fixo, sendo assim necessário o registro das imagens para comparação e detecção de falha. Outro ponto importante é que foram utilizadas dois tipos de imagens, sendo que na etapa de processamento do registro é utilizado em imagens RGB e posteriormente a transformação encontrada é aplicada nas respectivas imagens térmicas.

A criação de um índice é assemante a ideia proposta pelo autor, (Garcia-Ramirez et al., 2014). Como esse trabalho trata apenas de motores, foi possível detectar e diagnosticar falhas mais comuns em motores. No presente trabalho a proposta é detectar falhas a partir da evolução temporal da temperatura de diversos equipamentos elétricos. Esse é um ponto chave que diferencia o presente trabalho de (Al-Obaidy et al., 2017), que determina a ocorrência de falha com um limiar de temperatura, e o trabalho proposto baseia na diferença de temperatura das imagens térmicas retiradas em instantes de tempo diferentes.

3. PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

O procedimento metodológico adotado para o trabalho é visualizado no formato de diagrama de blocos na Figura 3. Uma câmera térmica é utilizada para obter imagens de um equipamento elétrico que deseja-se monitorar. A câmera térmica modelo E6 da marca FLIR Systems, disponibiliza a imagem RGB e a imagem térmica de uma mesma cena. O procedimento de registro é realizado primeiramente nas imagens RGB e posteriormente aplicado nas respectivas imagens térmicas. Com as imagens térmicas alinhadas, é utilizada uma operação de subtração entre o par de imagens (normalizadas quando necessário). A partir desse ponto pode-se realizar o procedimento de segmentar a subtração entre o par de imagens, calcular o valor do índice I e realizar o procedimento de detecção de falha. Se não for necessário o procedimento

de segmentação é realizado o cálculo do índice e a detecção de falha.

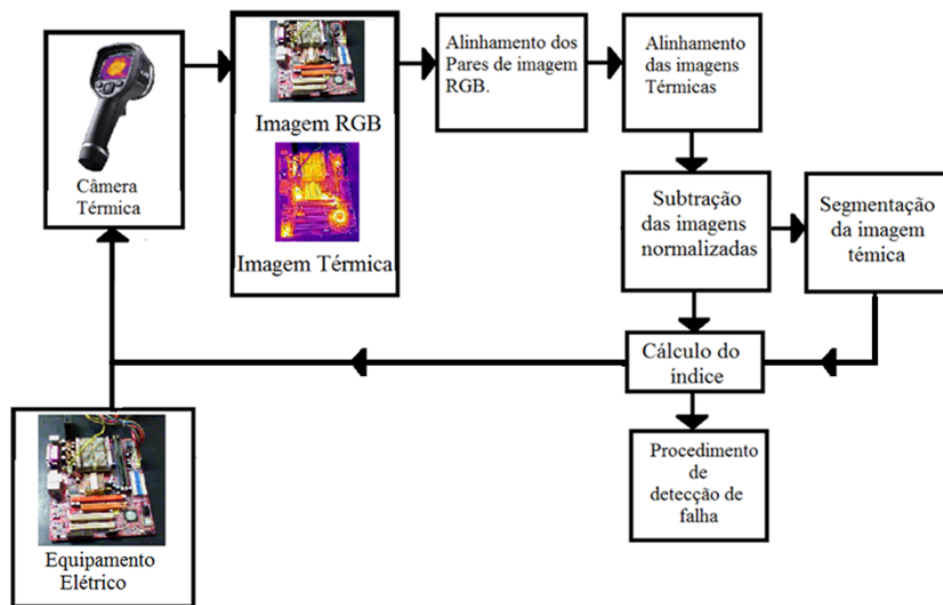


Figura 3- Modelo de Detecção de Falhas.

Na seção 3.1 é descrita uma das principais contribuições do presente trabalho com o registro das imagens térmicas e na seção 3.2 é descrito o procedimento de detecção de falhas.

3.1 registro de Imagens

As imagens são obtidas do equipamento elétrico periodicamente em um intervalo de tempo T . O procedimento de registro deformável global (obtenção da matriz de transformação projetiva) é executado a cada par $((B_0, B_n))$, sendo $n = 1, 2, 3, 4, 5, \dots$ de imagens RGB. O registro é possível de ser realizado primeiramente pela detecção de pontos de interesse nos pares de imagens utilizando o algoritmo *SURF* (Bay et al., 2006).

Na Figura 4 tem-se um exemplo de tentativa de encontrar pontos correspondentes utilizando o algoritmo *SURF* em um par de imagens térmicas. Um placa mãe de um computador foi fotografada com dois posicionamentos diferentes da câmera e ao executar o *SURF* 50 vezes, ele detecta sempre falsos pontos correspondentes.

Ao executar o *SURF* para diversos pares de imagens térmicas não foi possível encontrar uma matriz de transformação entre os pares de imagens, pois o *SURF* sempre detectava pontos de correspondências falsos entre as imagens e/ou uma quantidade de pontos correspondentes menor que a quantidade mínima necessária para que a transformação projetiva fosse realizada. Após verificar que não seria possível realizar o registro a partir das imagens térmicas, as imagens RGB foram utilizadas como entrada para o algoritmo *SURF*. O uso do modelo de câmera E6 da FLIR Systems foi primordial pois ela capta da mesma cena as duas imagens: RGB e térmica.

Na Figura 5 é visualizado o registro de um par de imagens RGB. Na Figura 6 é mostrada o registro correspondente do par de imagens térmicas.

Com o registro automático das imagens RGB (convertida para monocromática), pode-se aplicar a matriz de transformação encontrada no respectivo par de imagens térmicas. A imagem térmica tem a resolução menor que a imagem RGB. Foram realizados dois testes. Primeiro reduzindo a resolução da imagem RGB para 160×120 o que dificultou o descritor *SURF*

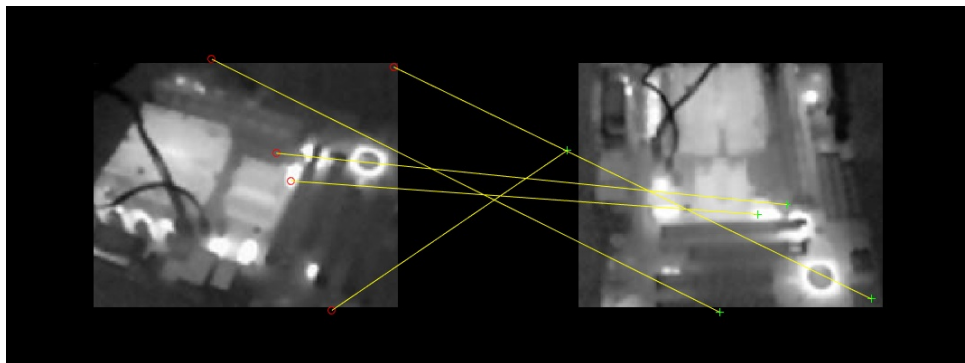


Figura 4- Possíveis pontos de correspondência encontrados no par de imagens térmicas de uma placa mãe de um computador.

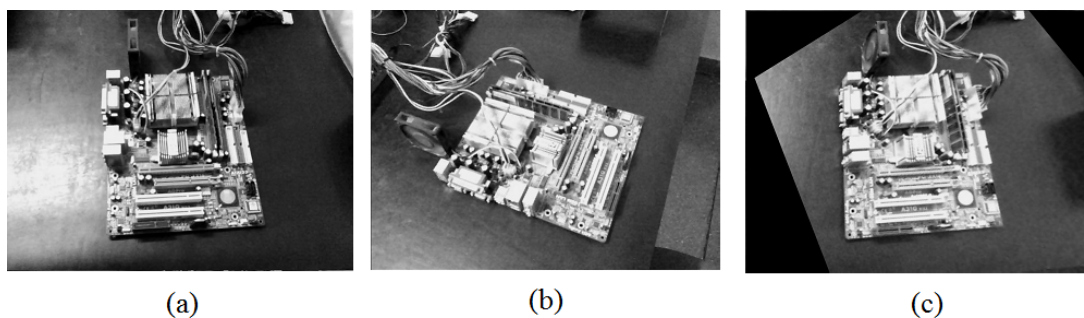


Figura 5- Resultado do registro do par de imagens térmicas: (a) imagem alvo; (b) imagem que deve ser alinhada e (c) imagem alinhada.

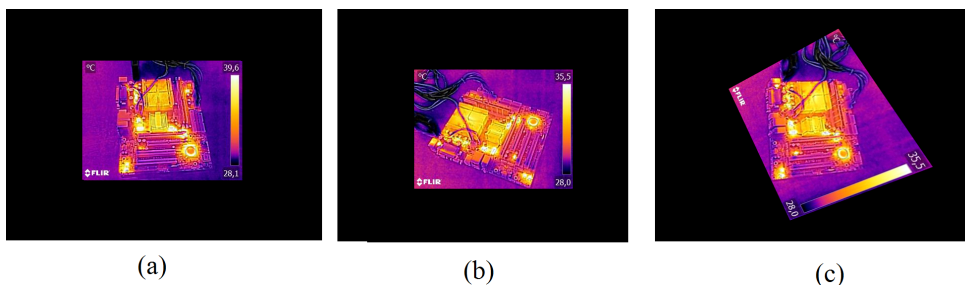


Figura 6- Resultado do registro do par de imagens térmicas: (a) imagem térmica alvo; (b) imagem que deve ser alinhada e (c) imagem térmica que foi alinhada.

em encontrar pontos correspondentes. No segundo teste a imagem térmica teve a resolução aumentada para 640×480 o que gerou os resultados melhores.

3.2 Detecção de Falhas

Após o procedimento de registro das imagens térmicas o módulo da subtração das imagens térmicas ($T_1, T_2, T_3, \dots, T_n$) com a imagem térmica (T_0) é realizado. A imagem T_0 é a imagem padrão que representa o funcionamento normal do equipamento. O índice numérico I representa a soma dos valores de amplitudes de todos os pixels presentes nas imagens subtraídas. Como exemplo, o valor do elemento I_{10} do índice I é obtido da soma das amplitudes dos pixels presentes na subtração entre as imagens térmicas $T_{10} - T_0$. Os índices ($I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$) são

armazenados em um *buffer*. O principal ponto para escolha desse índice é que sempre que duas imagens térmicas alinhadas de um mesmo equipamento tiverem temperaturas de operação iguais, o índice I não sofre variação. Quando a mudança de temperatura ocorre o algoritmo indica a mudança de ponto do índice I , indicando uma provável falha de funcionamento.

A câmera adotada para o trabalho tem uma resolução para a imagem térmica de 160×120 , sendo a imagem térmica composta por 19200 pixels. Pensando em uma variação extrema do valor zero para todos os pixels em uma imagem T_0 e valor 255 para todos os pixels de outra imagem T_1 a máxima variação obtida com a subtração seria o valor de 4896000. Para uma câmera com resolução $M \times N$ e q bits de quantização o valor máximo do somatório das amplitudes dos pixels seria $M \times N \times (2^q - 1)$.

Cada posição n do índice I é preenchida com a soma das amplitudes de todos os pixels do módulo da subtração entre um par de imagens térmicas T_n e T_0 . O índice I é então dividido por 100. Essa divisão foi adotada após testes para minimizar os efeitos de variações devido a ruídos permitindo que somente variações de temperaturas consideráveis possam ser detectadas com êxito pelos algoritmos de detecção de falhas. Os índices ($I_1, I_2, I_3, ..I_n$) são armazenados em um *buffer* e passados como parâmetros de entrada para o algoritmos para detecção de pontos de falha do equipamento. O procedimento metodológico adotado para o trabalho utilizou o algoritmo Metrololis-Hastings (Hastings, 1970), classificador *fuzzy* (Vachtsevanos et al., 2006) e o algoritmo ECM (Song and Kasabov, 2001) para detecção de falhas.

4. RESULTADOS

As imagens térmicas disponibilizadas pela câmera utilizada tem tamanho 160×120 pixels com 0,06 graus Celsius de sensibilidade e com limites de medição de temperatura de -20 a 250 graus Celsius. As fotos RGB capturadas tem tamanho 640×480 .

Nos experimentos realizados o valor de emissividade utilizado foi de 0,95. A emissividade é a razão entre a radiância de um corpo numa dada temperatura e a radiância de um corpo negro na mesma temperatura (Resnick and Halliday, 1986). Os equipamentos usados nos testes são compostos por materiais diferentes, porém como nesse trabalho realiza a detecção de falhas pela variação de temperatura, a emissividade pode ser usada como um valor constante para todos os experimentos (Jadin and Taib, 2012). Outro aspecto importante é manter o mesmo *range* de temperatura para cada respectivo equipamento a ser acompanhado para facilitar a etapa de comparação das imagens térmicas.

As imagens térmicas foram obtidas de três cenas: circuito elétrico com resistor e solenóide (*setup 1*); placa mãe de um computador (*setup 2*) e fonte de alimentação ATX (*setup 3*).

Para esse trabalho foi adotado o registro deformável global utilizando a transformação projetiva (Perhac, 2007), pois os equipamentos nas cenas avaliadas são rígidos. Para cada imagem obtida foi mudado apenas o posicionamento da câmera, portanto foi proposto que a transformação projetiva é capaz de realizar o processo de registro de forma eficaz desde que os pontos correspondentes corretos fossem identificados. Para que a transformação projetiva possa ter sucesso, é necessário pelo menos quatro pontos correspondentes no par de imagens. Os pontos de correspondências são encontrados utilizando o descritor *SURF*. As taxas de acerto do registro das imagens RGB antes e após as modificações nos parâmetros do algoritmo *SURF* podem ser vistos na 4..

Tabela 1- Comparação SURF

Setup	SURF sem alterações	Setup	SURF alterado
1	5%	1	68%
2	15%	2	73%
3	3%	3	39%

Na figura 7 tem-se uma sequência com três imagens térmicas (T_0 , T_5 , T_6) que permitiram calcular os elementos do índice I_5 e I_6 . Os valores encontrados foram $I_5 = 142883$ e $I_6 = 177323$. Como foi adotado a divisão por 100, os valores desses índices utilizados nos algoritmos de detecção de falhas foram $I_5 = 1428$ e $I_6 = 1773$.

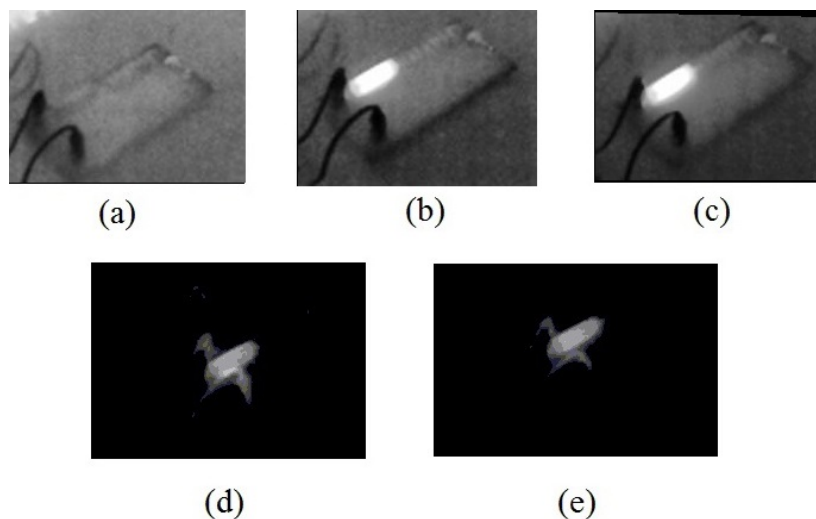


Figura 7- Exemplos de imagens térmicas (a) imagem T_0 , (b) imagem T_n , (c) imagem T_{n+1} , (d) módulo da subtração entre T_{n+1} e T_0 e (e) módulo da subtração entre T_n e T_0 .

Como exemplo na detecção de falhas é realizado um teste com o algoritmo Metropolis-Hastings com 10000 iterações (número de Mote Carlo), o resultado obtido é visualizado na Figura 8 que mostra a evolução temporal do índice I e a posição de detecção de mudança de ponto. Nesse teste foi detectada a mudança na posição 19 (o maior valor em amplitude) que dentro do índice é o valor correspondente a 1428.

Os testes realizados nessa etapa foram executados 50 vezes (com cada detector de falhas) para comprovar se a detecção de falhas realmente estava funcionando como esperado. Para construir uma detecção de falha confiável é proposto utilizar sempre os três detectores. Nos testes realizados em algumas situações um deles indica falsa falha. Sendo assim a indicação de ocorrência de possível falha é sinalizada quando dois ou três detectores de falhas indicarem mudança no índice I .

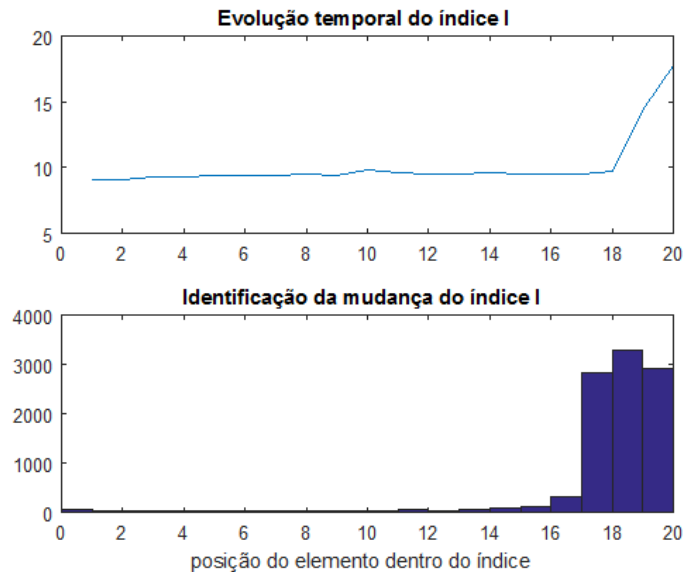


Figura 8- Detecção da mudança de ponto com Metropolis-Hastings.

5. CONCLUSÕES

A metodologia proposta mostrou resultados preliminares indicando sucesso na aplicação do registro de imagens térmicas de equipamentos elétricos a partir das respectivas imagens RGB. Com o registro os três detectores de falhas propostos trabalhando em conjunto permitiram detectar possíveis situações de falhas com o material obtido dos três *setups*. Com o índice I criado expressando a variação da temperatura durante o acompanhamento do equipamento elétrico e com os três detectores de falha abordados foi possível em diversas situações detectar a ocorrência de falha comprovando a aplicabilidade da metodologia proposta.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro da FAPEMIG e CNPq.

A THERMAL IMAGE REGISTRATION PROPOSAL FOR POSSIBLE USE IN ELECTRICAL EQUIPMENT FAULT DETECTION

Abstract. *The present work proposes a methodology based on thermography for possible detection of fault in electrical equipment. For this, a camera of the brand FLIR Systems model E6 is used proving both thermal and RGB images of the same scene. The thermal images captured at different time points are aligned from a transformation obtained by the alignment of the corresponding RGB images, which is the main contribution of the work. With the thermal images aligned, a temporal index I (calculated as the sum of subtraction module between a standard thermal image T_0 and the images T_n) was created that is used to detect the possible occurrence of a electrical equipment. The monitoring allows to analyze the evolution of temperature and thus with a variation of temperature found, the fault detector signals this change in temperature which may indicate a malfunction.*

Palavras-chave: *Computer Vision, Image Alignment, Thermal Images, Electrical Equipment Fault*

REFERÊNCIAS

- Al-Obaidy, F., Yazdani, F., and Mohammadi, F. A. (2017). Fault detection using thermal image based on soft computing methods: Comparative study. *Microelectronics Reliability*, 71:56–64.
- Ashburner, J. and Friston, K. J. (2007). Rigid body registration. *Statistical parametric mapping: The analysis of functional brain images*, pages 49–62.
- Bay, H., Tuytelaars, T., and Van Gool, L. (2006). Surf: Speeded up robust features. In *European conference on computer vision*, pages 404–417. Springer.
- Gade, R. and Moeslund, T. B. (2014). Thermal cameras and applications: A survey. *Machine vision and applications*, 25(1):245–262.
- Garcia-Ramirez, A. G., Morales-Hernandez, L. A., Osornio-Rios, R. A., Benitez-Rangel, J. P., Garcia-Perez, A., and de Jesus Romero-Troncoso, R. (2014). Fault detection in induction motors and the impact on the kinematic chain through thermographic analysis. *Electric Power Systems Research*, 114:1–9.
- Ha, H., Han, S., and Lee, J. (2012). Fault detection on transmission lines using a microphone array and an infrared thermal imaging camera. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 61(1):267–275.
- Hastings, W. K. (1970). Monte carlo sampling methods using markov chains and their applications. *Biometrika*, 57(1):97–109.
- Hu, Y., Gao, B., Song, X., Tian, G. Y., Li, K., and He, X. (2013). Photovoltaic fault detection using a parameter based model. *Solar Energy*, 96:96–102.
- Jadin, M. S. and Taib, S. (2012). Recent progress in diagnosing the reliability of electrical equipment by using infrared thermography. *Infrared Physics & Technology*, 55(4):236–245.
- Merryman, S. A. and Nelms, R. M. (1995). Diagnostic technique for power systems utilizing infrared thermal imaging. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 42(6):615–628.
- Moghe, A. A. and Singhai, J. (2013). Image registration: A review of elastic registration methods applied to medical imaging. *International Journal of Computer Applications*, 70(7).
- Perhac, J. (2007). Image registration.
- Resnick, R. and Halliday, D. (1986). *Física 2*. Number v. 2. Livros Tecnicos e Cientificos.
- Song, Q. and Kasabov, N. (2001). Ecm-a novel on-line, evolving clustering method and its applications.
- Vachtsevanos, G. J., Lewis, F., Hess, A., and Wu, B. (2006). *Intelligent fault diagnosis and prognosis for engineering systems*. Wiley Online Library.
- Yang, B.-S., Gu, F., Ball, A., et al. (2013). Thermal image enhancement using bi-dimensional empirical mode decomposition in combination with relevance vector machine for rotating machinery fault diagnosis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 38(2):601–614.
- Younus, A. M. and Yang, B.-S. (2012). Intelligent fault diagnosis of rotating machinery using infrared thermal image. *Expert Systems with Applications*, 39(2):2082–2091.
- Zitova, B. and Flusser, J. (2003). Image registration methods: a survey. *Image and vision computing*, 21(11):977–1000.