Parâmetros Relevantes Na Análise Termográfica De Um Motor de Indução Trifásico

João P. Carvalho*. Paulo C. M. Lamim**. Ana C. S. Araujo***. Júlia F. de Oliveira****. Josemar S. Moreira*****.

*Universidade Federal De São João Del Rei, São João Del Rei, CEP 36307-352
Brasil (Tel: 31 97302-6032; e-mail: mcjpedro@gmail.com).

**Universidade Federal De São João Del Rei, São João Del Rei, CEP 36307-352
Brasil (e-mail: lamim@ufsj.edu.br).

***Universidade Federal De São João Del Rei, São João Del Rei, CEP 36307-352
Brasil (e-mail: anacarolinasantosaaraujo@hotmail.com).

****Universidade Federal De São João Del Rei, São João Del Rei, CEP 36307-352
Brasil (e-mail: julia_foliveira@hotmail.com).

*****Universidade Federal De São João Del Rei, São João Del Rei, CEP 36307-352
Brasil (e-mail: js_moreira99@yahoo.com.br).

Abstract: The diagnosis of engine failures is a topic that is important in the industrial context. Several techniques have been developed in this sense and one of them is the thermographic analysis. This paper presents a contribution about the interference caused by measurement parameters in a thermal analysis of an induction motor. Through different tests, the main points to be verified in a thermographic camera calibration, the errors caused by the bad adjustment of the parameters and viable solutions were presented.

Resumo: O diagnóstico de falhas em motores é um tópico que tem importância no contexto industrial. Várias técnicas têm sido desenvolvidas neste sentido e uma delas é a análise termográfica. Este artigo apresenta uma contribuição acerca da interferência causada por parâmetros de medição em uma análise térmica de um motor de indução. Através de diferentes testes, foram apresentados os principais pontos a serem verificados em uma aferição por câmera termográfica, os erros causados pelo mal ajuste dos parâmetros e soluções viáveis.

Keywords: Thermography; motor; temperature; camera; emissivity.

Palavras-chaves: Termografia; motor; temperatura; câmera; emissividade.

1. INTRODUÇÃO

Os motores de indução são amplamente usados na indústria pela sua robustez, versatilidade e baixo custo. Representam 85% do total de motores utilizados no setor e em países desenvolvidos, chegam a demandar cerca de 45% de toda energia gerada. (Martin-Diaz et al. 2017) (Kowsari et al. 2017) (Mirzaeva et al. 2018) (Picazo-Rodenas et al. 2012)

Com os fatos, fica evidente a importância desta máquina, o que justifica o número de pesquisas realizadas na área. Uma grande parte dos trabalhos é voltada para a detecção de defeitos que podem ocorrer durante sua operação. Neste cenário, várias técnicas como análise de corrente, tensão, vibração e temperatura vem sendo desenvolvidas. (Munoz-Ornelas et al. 2016).

A termografia é uma das técnicas que vem crescendo nos últimos anos, principalmente por ser uma ferramenta não intrusiva. A partir de uma câmera termográfica é possível a visualização do comportamento térmico da superfície do motor, o que permite a detecção de uma possível anomalia

térmica. (Garcia-Ramirez et al. 2014) (Picazo-Rodenas et al. 2012)

Entretanto, a medição através de câmeras termográficas possui seus contrapontos. De acordo com Lagüela et al. (2011) a diferença entre as aferições de câmeras de marcas diferentes é discutida. Já Munoz-Ornelas et al. (2016) expõem como a posição do instrumento de medida modifica a medição. Todavia nenhum destes trabalhos faz uma varredura nos principais parâmetros que interferem na análise de imagem térmica de um motor de indução. Sendo assim, este trabalho tem como objetivo descrever os principais aspectos na hora de se utilizar uma câmera termográfica para a aferição de temperaturas de um motor.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A câmera termográfica, a partir dos seus sensores infravermelhos, capta a radiação infravermelha emitida por um objeto e a transforma em sinal elétrico, através deste é possível mensurar a temperatura do mesmo. A estimativa se baseia na lei de Stefan-Boltzmann que relaciona a energia emitida por

um corpo e sua temperatura superficial, como mostrado em (1). (Lopez-Perez et al. 2016) (Munoz-Ornelas et al. 2016)

$$E = \varepsilon \sigma T^4 \quad (1)$$

Na qual E é a energia emitida, σ é a constante de Stefan-Boltzmann, ε é a emissividade e T é a temperatura em Kelvin. Pode-se perceber, pela Lei de Stefan-Boltzmann, que a emissividade tem um papel importante na definição do resultado da medição. Este parâmetro é definido por (2) e tem como objetivo ilustrar a característica de emissão de radiação que um determinado corpo possui.

$$\varepsilon = \frac{\text{emissividade real}}{\text{emissividade do corpo negro}} \quad (2)$$

O valor de emissividade varia de 0 a 1, sendo 0 um objeto transparente e 1 um corpo negro. O corpo negro é um objeto ideal que absorve e emite toda radiação que incidente sobre ele, o que obviamente não ocorre para um objeto real que tem como característica outras propriedades, como transmissão e reflexão. (Pereira 2015) (Çengel et al. 2012)

A primeira lei da termodinâmica nos diz que a soma da radiação absorvida, refletida e transmitida é igual a radiação incidente sobre um objeto. Já a lei de Kirchhoff nos garante que a emissividade é igual à absorvidade, e a radiação pode ser definida por (3). (Çengel et al. 2012)

$$\alpha + \rho + \tau = \varepsilon + \rho + \tau = 1 \quad (3)$$

Na qual α é a absorvidade (razão entre radiação absorvida e incidente em um corpo), ε é a emissividade, τ é a transmissividade (razão entre radiação transmitida e incidente em um corpo) e ρ a refletividade (razão entre radiação refletida e incidente em um corpo).

3. METODOLOGIA

Para a análise de diferentes parâmetros que podem interferir numa medição, foram capturadas várias imagens termográficas do motor para diferentes tipos de carga, em diferentes instantes de tempo. Através dos softwares FLIR Tools e Matlab 2017a, várias comparações e observações foram feitas para os dados coletados.

O motor utilizado foi um motor trifásico WEG de 3 CV, 220 V, 60 Hz, 4 polos e velocidade nominal de 1735 rpm. Acoplado a este foi utilizado um motor CC que juntamente a um banco de resistores simulou diversas condições de carga (0% a 100% de carga de 10% em 10%). Para a coleta das imagens foi utilizada uma câmera termográfica FLIR modelo E40 com faixa de medição de - 25 °C até 650 °C, resolução de 160 x 120 pixels e sensibilidade térmica de 0,07 °C.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Emissividade

Como já mencionado, a emissividade é um fator de extrema importância para a medição correta da temperatura de um corpo. A câmera termográfica deve receber um valor plausível

de emissividade do objeto de interesse para apresentar o resultado mais apropriado para uma dada medição.

Para demonstrar a discrepância de resultados que a alteração da emissividade causa, coletaram-se diversas imagens para diferentes emissividades em um curto espaço de tempo. Os resultados são mostrados pela Tabela 1.

Tabela 1. Temperatura do motor com 80% de carga, 120 minutos de funcionamento, para diversas emissividades

ε	Temperatura Média (°C)	Temperatura Máxima (°C)	Temperatura Mínima (°C)
0,3	125,7	207,3	107,3
0,5	91,2	91,8	78,2
0,8	68,6	73,5	59,3
1	60,2	64,4	52,3

Ao se analisar (1), fica evidente a proporcionalidade inversa entre emissividade e temperatura, ou seja, quanto maior a emissividade, menor a temperatura e vice-versa. Como a energia que a câmera capta é única para cada instante, variar o parâmetro de emissão é modificar o valor final da temperatura aferida. Através da Tabela 1 podemos observar que a diferença entre as médias chegou a valores de até 65,4 °C, que para condições extremas poderia ser ainda maior.

No caso de um motor de indução, deve-se considerar dois parâmetros para selecionar uma emissividade razoável, sendo eles o material e a oxidação. O material preponderante da carcaça do motor utilizado é o ferro fundido. Logo, de acordo com tabela do fabricante, a emissividade aproximada é de 0,8. Na Tabela 1 pode-se perceber então, quão errônea pode ser a amostragem caso o valor da emissividade do motor seja negligenciado.

4.2 Temperatura Ambiente

A temperatura ambiente é um fator que altera não só os parâmetros de medição, como também o comportamento térmico do motor. Para a configuração da câmera termográfica é importante observar que a temperatura atmosférica é a temperatura entre o objeto e a câmera, e ao alterar este tópico, alteram-se também os valores das temperaturas mensuradas, principalmente para distancias maiores, assim como o exemplo mostrado na Tabela 2.

Tabela 2. Temperatura média do motor com 30% de carga, 100 minutos de funcionamento, 4 metros de distância, para diversas temperaturas atmosféricas

Temperatura Atmosférica (°C)	Temperatura Média (°C)
- 25	32,35
0	49,3
20	49,3
40	49

Outro fator de destaque na análise da assinatura térmica de um motor está relacionado à primeira lei da termodinâmica. Por

meio desta, tem-se que toda energia trocada na forma de calor por um sistema é igual a variação de energia que o mesmo possui. Ou seja, se há uma troca de calor entre motor e ambiente, variações na energia interna ocorrerão, o que por sua vez ocasionará fatalmente alterações nas temperaturas.

Tendo em vista tal aspecto, é importante que as análises e comparações sejam feitas em condições de temperatura atmosférica semelhantes, principalmente em se tratando de um estudo comparativo, pois desta forma se garante que o calor trocado entre ambiente e máquina obedecerão às mesmas circunstâncias. Este cuidado é relevante também ao se tratar de motores em contato direto com o meio, tendo em vista que estes sofrem interferências diretas tanto da temperatura atmosféricas quanto do clima no local.

4.3 Tipos de Análise

Foram observadas dois dos tipos de análise térmica que a câmera possui, sendo eles por ponto e por área. As diferentes formas trazem diferentes informações que se adequam a diferentes situações. Foi demonstrado através de uma série de medições como as diversas opções de avaliação encontram resultados difusos.

Em uma aferição pontual, observam-se valores distintos de temperatura para diferentes pontos selecionados, isso ocorre, pois, a distribuição de calor de um motor não é uniforme, áreas próximas à ventoinha tendem a ser mais frias do que as áreas próximas aos rolamentos, por exemplo. Logo, ao usar uma medição pontual, é necessário ter precisão e/ou interesse em um item específico do motor, tópicos que nem sempre são possíveis em um contexto industrial. Essas diferenças estão representadas pela Figura 1 e pela Tabela 3.

Fig. 1 Imagem termográfica do motor a 80% de carga com 120 minutos de funcionamento e a 1 metro de distância.

Tabela 3. Temperatura para cada ponto especificado na Figura 1

Ponto	Temperatura (°C)
Sp1	73
Sp2	62,2
Sp3	64,6

Utilizando uma topologia em área obtém-se a medida da média de todas as temperaturas além de se obter os pontos de máximo e mínimo. Observou-se nos testes experimentais que esta medição possui uma maior constância e analisa a temperatura superficial de uma maneira mais geral. Um empecilho na utilização do artifício é a presença de obstáculos que possam gerar pontos de *outlier*, bem como a má alocação da área de interesse como mostrado nas Figuras 2, 3 e 4.

Fig. 2 Imagem termográfica do motor a 50% de carga com 40 minutos de funcionamento e a 1 metro de distância.

Fig. 3 Imagem termográfica do motor a 50% de carga com 40 minutos de funcionamento e a 1 metro de distância. Observa-se um parafuso que não faz parte do sistema do motor incluído na análise.

Fig. 4 Imagem termográfica do motor a 50% de carga com 40 minutos de funcionamento e a 1 metro de distância. Observa-se que a área ultrapassou as bordas da máquina.

Tabela 4. Temperatura para cada área especificada

Figura	Temperatura Média (°C)	Temperatura Máxima (°C)	Temperatura Mínima (°C)
2	46,9	49,6	41,8
3	45,8	49,6	27,35
4	46,3	49,6	26,6

Para todos os casos analisados a seleção da tipologia e a melhor adequação desta para a medição são de suma relevância, visto que os resultados obtidos para diferentes aferições podem ser divergentes, tornando inviável uma análise termográfica conclusiva.

4.4 Tempo de Funcionamento do Motor

Um dos pontos positivos da análise termográfica é sua característica não intrusiva. A aquisição das temperaturas é feita com o motor em operação e sem a interrupção de seu funcionamento, logo, é relevante observar que o tempo de operação do motor é altamente relacionado com a sua temperatura.

Como apresentado na Figura 5, para todas as cargas testadas, o motor leva cerca de 80 minutos para atingir o equilíbrio térmico. Sendo assim, qualquer medição feita no transitório pode apresentar diagnósticos errôneos, visto que a máquina ainda está em processo de aquecimento.

Fig. 5 Gráfico da temperatura do motor, coletada durante 120 minutos para diferentes condições de carga.

A Figura 6 demonstra como uma aferição no momento errado pode representar um resultado contraditório, como a temperatura menor para uma carga maior ou uma temperatura igual para duas cargas distintas no mesmo instante de tempo.

Fig. 6 Gráfico da temperatura do motor durante 120 minutos para duas condições de carga.

5. CONCLUSÕES

Como apontado durante todo o texto e em diversos artigos relacionados, a técnica de análise termográfica de um motor pode ser uma ferramenta auxiliar poderosa para a detecção preditiva de falhas. Deste modo, é importante enfatizar que sua utilização depende de parâmetros que são selecionados pelo usuário, logo, este deve ter total ciência das características do ambiente, do processo de medição e das características do motor para que as aferições não interfiram no diagnóstico final.

Este artigo trás então, de forma sucinta, os principais parâmetros e cuidados a serem estudados em uma análise térmica de um motor e as consequências práticas que erros de medição podem causar em um processo de detecção de falha. Além disso, propõem quais características e parâmetros são mais adequados para um motor trifásico de média potência.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao colega Guilherme Soriano de Almeida, da Universidade Federal de São João Del Rei, pelos conhecimentos e competências que facilitaram a pesquisa. À FAPEMIG pela bolsa do primeiro autor, ao LAMET e à UFSJ.

REFERÊNCIAS

- Çengel, Y. A., Ghajar, A. J. (2012). *Transferência de calor e massa: uma abordagem prática*. AMGH Editora Ltda., Nova York.
- Garcia-Ramirez, A.G., Morales-Hernandez, L.A., Osornio-Rios, R.A., Benitez-Rangel, J.P., Garcia-Perez, A., de Jesus Romero-Troncoso, R. (2014). Fault detection in induction motors and the impact on the kinematic chain through thermographic analysis. *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 114, pp. 1–9.
- Kowsari, E., Zarei, J., Razavi-Far, R., Saif, M. (2017). Broken rotor bars detection in induction motors using cubature kalman filter. *IECON 2017–43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 8567-8571.
- Lagüela, S., González-Jorge, H., Armesto, J., Arias, P. (2011). Calibration and verification of thermographic cameras for geometric measurements. *Infrared Phys. Technol.*, vol. 54, no. 2, pp. 92–99.
- Lopez-Perez, D., Antonino-Daviu, J. (2016). Application of infrared thermography to fault detection in industrial induction motors: case stories. *International Conference on Electrical Machines (IEEE-ICEM'16)*.
- Martin-Diaz, I., Morinigo-Sotelo, D., Duque-Perez, O., Romeo-Troncoso, R.J. (2017). Early fault detection in induction motors using Adaboost with imbalanced small data optimized sampling. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 3, pp. 3066-3075.
- Mirzaeva, G., Saad, K.I. (2018). Advanced diagnosis of stator turn-to-turn faults and static eccentricity in induction motors based on internal flux measurement. *Industry Applications IEEE Transactions*, vol. 54, no. 4, pp. 3961-3970.
- Munoz-Ornelas, O., Elvira-Ortiz, D.A., Osornio-Rios, R.A., Romero-Troncoso, R.J., Morales-Hernandez, L.A. (2016). Methodology for thermal analysis of induction motors with infrared thermography considering camera location. *Proc. IEEE Ind. Electron. Soc. IECON*.
- Pereira, A. C. M. (2015). Emissividade dos materiais de construção – influência da medição em diferentes variants. *Disseertação de Mestrado*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.
- Picazo-Rodenas, M.J., Royo, R., Antonino-Daviu, J., Roger-Folch, J. (2012). Use of infrared thermography for computation of heating curves and preliminary failure detection in induction motors. *Proc. Of the International Conference of Electric Machines and Drives (ICEM12)*, pp. 525-531.