

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

AVALIAÇÃO DOS LAUDOS TÉCNICOS DAS INSPEÇÕES TERMOGRÁFICAS EM COMPONENTES ELÉTRICOS PELO MÉTODO DE MONTE CARLO

Guilherme Teixeira Gonçalves, guiemail@gmail.com¹

Bruno Phillip Alves da Silva, bruno.phill@gmail.com²

Vitor Torres Alvarenga, vatorres01@gmail.com²

Bruno Ude Todde Fonseca Valadares, bruno_todde@hotmail.com²

Matheus Pereira Porto, matheusporto@ufmg.br²

¹Serviço Federal de Processamento de Dados (Serpro), Regional Rio de Janeiro Horto, Rua Pacheco Leão, 1235 – Fundos – Jardim Botânico Rio de Janeiro/RJ.

²Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha, Belo Horizonte/MG – Escola de Engenharia, Galpão da Engenharia Mecânica, Sala 2933.

Resumo: *Esse trabalho tem como objetivo mostrar a relação da temperatura e identificação de falhas em conexões elétricas através da Termografia Infravermelha. Para isso foram realizados ensaios em conectores, com e sem encapsulamento, operando em diferentes correntes elétricas. O Método de Monte Carlo (MMC) foi utilizado como ferramenta para avaliar as incertezas de medição. Os resultados ratificam o diagnóstico da manutenção, no qual conectores com maiores módulos de resistência elétrica operam em maiores temperaturas, por consequência maior tendência de falhas. Porém, devido à superposição dos intervalos de confiança, não se pode avaliar os conectores operando em qualquer faixa de temperatura pelo MMC. O encapsulamento apesar de conferir proteção e isolamento elétrico às conexões prejudica sua dissipação térmica, que sujeita a elevados gradientes de temperatura, tem sua capacidade de condução afetada.*

Palavras-chave: *Conexões elétricas, Monte Carlo, Termografia.*

1. INTRODUÇÃO

Inspeções termográficas em componentes elétricos são realizadas em subestações a fim de gerar informações técnicas sobre o estado de operação dos ativos para identificação de falhas e manutenção. Essa inspeção envolve a utilização de uma termocâmera, calibrada, que auxilia na detecção de pontos quentes em componentes como conexões, chaves seccionadoras e para-raios, e na avaliação qualitativa do estado de degradação do componente.

A termografia se evidencia como uma das técnicas mais exploradas na avaliação de componentes elétricos por ser um método não intrusivo e apresentar o resultado em forma de termogramas (imagem térmica) de fácil visualização, que permite uma análise prévia dos dados de uma inspeção de forma imediata. Avaliando padrões térmicos dos componentes em operação, investigações de anomalias térmicas em dispositivos elétricos são realizadas e possíveis falhas podem ser identificadas e avaliadas suas gravidades.

Porém, diagnosticar uma falha em dispositivos elétricos não constitui a identificação do sobreaquecimento do equipamento, mas sim perceber que este possui resistência elétrica acima dos valores normais ou tolerados. No diagnóstico de anomalias em dispositivos elétricos, geralmente, o sobreaquecimento de um equipamento em níveis anormais para sua operação é o primeiro indicativo de disformidade. Consequentemente, há uma relação entre a temperatura e a resistência elétrica dos equipamentos.

O objetivo desse trabalho é mostrar uma análise da relação entre a temperatura de operação de um conector elétrico e sua predisposição a falha quando avaliados pela técnica da Termografia Infravermelha usando o Método de Monte Carlo para estimativa das incertezas presentes na edição.

O presente trabalho permitirá avaliar o processo de inspeção de conectores elétricos com o uso da técnica termografia buscando o aumento da confiabilidade do diagnóstico operacional de componentes elétricos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A resistência elétrica (R) é uma medida da resistência do material ao movimento de cargas, ou seja, em linhas gerais representa a dificuldade que as cargas encontram para se movimentarem através de um corpo. À medida que se altera a temperatura de um condutor sua resistividade elétrica também varia, sendo esta relação linear para ampla faixa de temperaturas (Patience, 2013). Assim sendo, a resistência do condutor tende a valores maiores quando esse opera em temperaturas acima da temperatura de operação. Essa relação é apresentada na Eq. (1), onde R_o é a resistência do condutor à temperatura t_o , e α o coeficiente de temperatura do material.

$$R = R_o (1 + \alpha(t - t_o)) \quad (1)$$

Entretanto, essa variação é pequena, e muitas vezes, considerada constante dentro de determinados intervalos de temperaturas. Outro fenômeno que altera o movimento de cargas conhecido como efeito pelicular (*skin effect*). Este ocorre quando o dispositivo, geralmente cabos elétricos, está submetido a uma redução efetiva de sua seção de condução, o que diminui a densidade de corrente elétrica fluindo pelo seu interior, tornando o fluxo de corrente não uniforme na seção do condutor, o que também provoca o aumento de sua resistência elétrica (Teixeira, 2012).

A termografia é uma das principais ferramentas de avaliação de componentes elétricos. Seu processo de monitoramento é feito por sensoriamento remoto, conforme ilustrado na Fig. 1, o que possibilita a medição de temperaturas superficiais sem a necessidade do contato físico, garantindo segurança com a instalação, não interferência na produção e alta velocidade de inspeção, identificando com maior sucesso possível pontos quentes nos sistemas de distribuição de energia elétrica (Araujo *et al.*, 2008; Korendo; Florkowski, 2001).

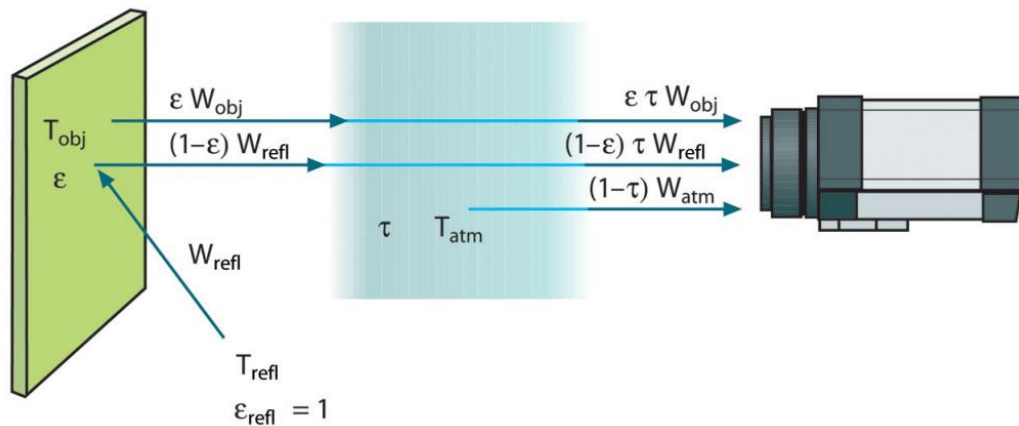


Figura 1. Diagrama de medição (FLIR, 2010)

Na imagem, $\epsilon\tau W_{obj}$ representa fluxo radiativo emitido pelo objeto de emissividade ϵ , à temperatura T_{ob} atenuado pela transmissividade atmosférica τ ; O termo $(1-\epsilon)\tau W_{refl}$ é a parcela da irradiação refletida sobre o objeto de refletividade $(1-\epsilon)$, proveniente de uma fonte de calor a temperatura T_{ref} também atenuada pela transmissividade atmosférica τ e $(1-\tau)W_{atm}$ a emissão atmosférica de emissividade $(1-\tau)$. À vista disso, o fluxo radiativo total, G , recebido pelo termovisor é dado pela Eq. (2):

$$G = \epsilon\tau E(T_{ob}) + (1-\epsilon)\tau G(T_{ref}) + (1-\tau)E(T_{atm}) \quad (2)$$

Todavia, o resultado de uma medição, em que se desconhece o valor verdadeiro, se torna apenas uma estimativa do valor real, o que não o torna adequadamente confiável. Essa confiabilidade se dá ao cálculo da incerteza ao resultado, que nada mais é a indicação quantitativa da qualidade dos resultados de medição, explicitando a extensão e a natureza de sua exatidão.

O método de Monte Carlo utiliza simulação de variáveis aleatórias para a solução de problemas matemáticos por meio da simulação de amostragem aleatória de uma distribuição probabilística. Utilizando a geração de números aleatórios para simular os valores de variáveis aleatórias, essa técnica tornou-se popular com a chegada dos computadores (Donatelli e Konrath, 2005).

Nessa abordagem, o valor do mensurando (Y) é caracterizado por N grandezas de entradas, de forma que o modelo assume uma função de probabilidade (g_{xi}) para cada uma delas, e, através do próprio modelo matemático f , para os N conjuntos de dados aleatórios de dimensão M , origina uma função de probabilidade (g_y) para a grandeza, ou grandezas,

de saída. Esse procedimento é mostrado na Fig. 2 onde ξ_i e η representam os valores que as variáveis aleatórias X_i e Y podem assumir.

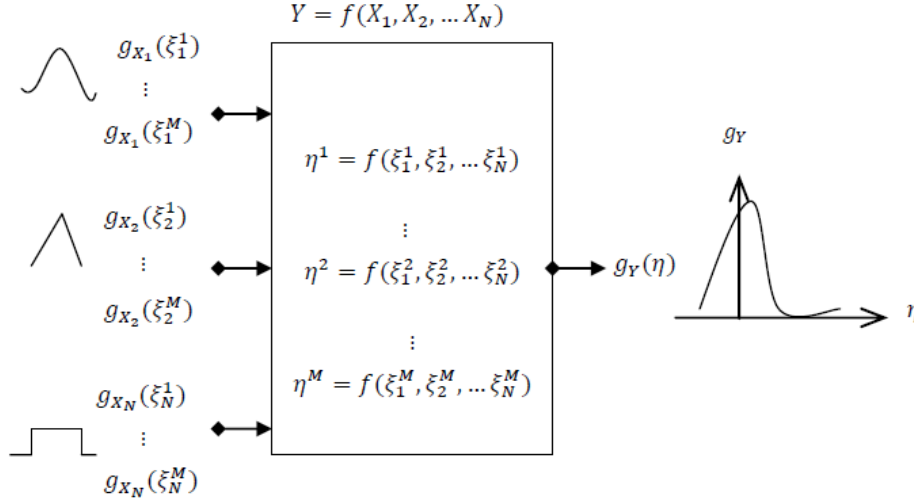


Figura 2. Propagação de distribuição de probabilidades (Teixeira, 2012)

É possível afirmar que o número M possui forte influência sobre o erro amostral esperado, de tal forma que quanto maior M , menor o ruído amostral e maior a confiabilidade sobre as estimativas do mensurando e incerteza associada.

O intervalo de confiança é dado pela função de probabilidade acumulada, $G_Y(\eta)$, garantido que as probabilidades dos valores assumidos pela variável aleatória Y sejam no máximo igual a η . Para um nível de confiança desejado, p , as extremidades do intervalo de abrangência será dado por $G_Y^{-1}(\alpha)$ e $G_Y^{-1}(p+\alpha)$ onde α é um valor entre 0 e $(1-p)$.

Quando a distribuição acumulada possuir simetria, o valor de α é dado pela metade de $(1-p)$ e a incerteza expandida, $U(y)$, pela Eq. (3):

$$U(y) = \frac{y(1+p)M}{4} - \frac{y(1-p)M}{4} \quad (3)$$

Contudo, quando possuir assimetria na distribuição, o valor de α deve ser estipulado conforme a Eq. (4) com o propósito de se obter o menor intervalo de abrangência para o nível de confiança desejável, $I_{p \min}$.

$$I_{p \min} = \text{mínimo} | G^{-1}(\rho + \alpha) - G^{-1}(\alpha) | \quad \forall \frac{\alpha}{0} \leq \alpha \leq (1 - \rho) \quad (4)$$

3. METODOLOGIA

Os ensaios foram realizados em conectores elétricos, dispositivos tipicamente empregados em sistemas de distribuição de energia. Conector elétrico é o dispositivo que garante uma conexão, comumente por cabos condutores seccionados, entre diferentes pontos distintos de um circuito elétrico. Esses componentes foram escolhidos devido a grande reincidência na identificação de falhas sobre eles. Para esse trabalho foram utilizadas quatro amostras de dois modelos diferentes de conectores: tipo H e tipo Cunha, ilustrados na Fig.3. Os conectores do tipo H foram identificados como Ch_1 e Ch_2 , e tipo Cunha como Cc_1 e Cc_2 . As amostras Ch_1 , Ch_2 e Cc_1 estavam em estado normal para operação, já a Cc_2 foi preparada com um defeito induzido, a fim de caracterizar a medição em componentes defectivos, e a influência sobre as incertezas das medições.

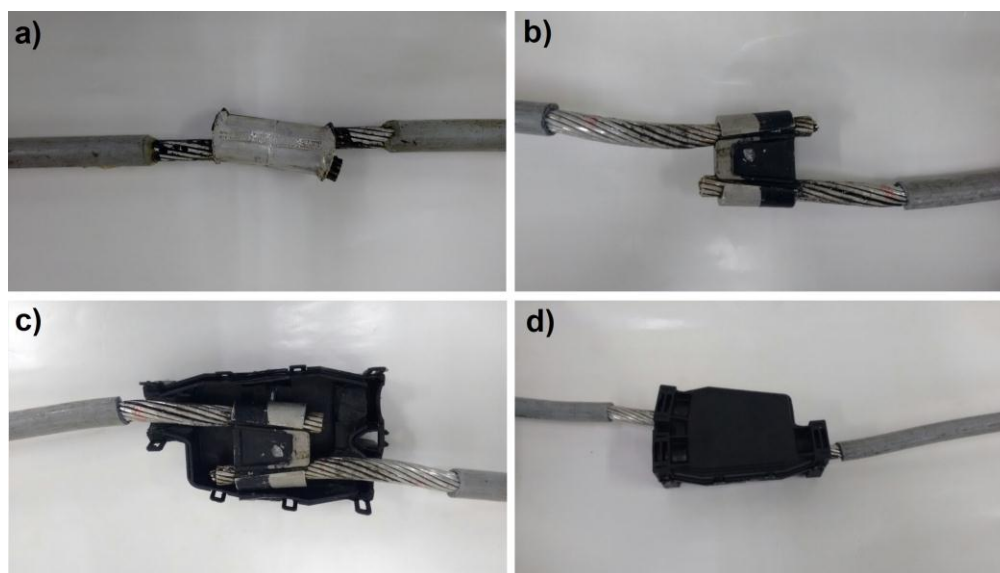


Figura 3. Conectores elétricos: a) Conector tipo H; b) Conector tipo Cunha; c) Conector com encapsulamento aberto e d) Conector com encapsulamento fechado.

A amostra Ch_2 foi submetida a dois ensaios, de forma que se diferenciaram devido a aplicação de uma tinta comercial utilizada em refratários que suportam temperaturas elevadas na superfície do conector para o segundo ensaio. A aplicação da tinta teve por objetivo conferir maior uniformidade à superfície, alterando assim sua emissividade para valores mais altos. Dessa forma, buscava-se a caracterização do impacto da emissividade na avaliação da temperatura por termografia.

As conexões Cc_1 e Cc_2 também foram sujeitadas a dois ensaios, com e sem encapsulamento, dispositivo utilizado para proteção e isolamento elétrico. Dessa maneira pôde-se verificar a influência do uso do componente sobre o funcionamento dos conectores.

Para os testes, cada amostra foi submetida a uma bateria de ensaios, intervalados de 50 A. Foi utilizada uma fonte de corrente contínua, SMC LET-1000-RD, para alimentar os cabos. Dessa forma, após a estabilização das temperaturas em cada faixa de operação, foram registrados 3 termogramas, pelo termovisor FLIR SC660. As variáveis referentes às condições ambientais e de ensaios foram controladas, desde que os ensaios foram realizados em ambiente laboratorial. Sendo assim, condições como transmitância do meio e velocidade do vento foram desconsideradas na avaliação dos resultados. O teste da fita, radiométrico indireto, foi usado para determinar a emissividade de cada conector. As imagens térmicas foram avaliadas e tratadas ThermaCAMTM Researcher Pro 2.9®.

As resistências iniciais de cada amostra foi medida em Ponte Kelvin através de um micrometro digital, Microhm 10 – Intrum Power, antes de serem submetidas aos ensaios. A tensão e a corrente foram monitoradas durante todo ensaio com um micrometro digital, para análise das variações das resistências elétrica com o aumento da temperatura provocada pela passagem de elevadas correntes. Com esses dados, as resistências foram calculadas através da lei de Ohm.

Em todas as medições o termovisor foi posicionado a uma distância de 0,30m da amostra com um ângulo de aproximadamente 30° com a direção normal à superfície da amostra, de maneira a evitar a influência da radiação refletida do operador do termovisor sobre o conector, Fig. 4.



Figura 4. Posicionamento do termovisor para avaliação dos conectores.

O modelo matemático da medição da temperatura adotado neste trabalho foi baseado o modelo transmitância atmosférica dos termovisores Agema 470 ProSW e Agema 880 ProLW baseados no modelo *Lowtran* (MINKINA; DUDZIK, 2009) conforme apresentado na Eq. (5):

$$T_{ob} = \frac{B}{\ln\left(\frac{R}{S_{ob}} + F\right)} \quad (6)$$

Onde S_{ob} é o o sinal proporcional à emissão do objeto e R, B e F são constantes de calibração específicas para cada faixa de operação do termovisor e para diferentes filtros e lentes.

Conforme ilustrado na Eq. (6), o modelo assumido, então, é função da emissividade do objeto, ε , da sua distância d em relação ao termovisor, da temperatura refletida de uma fonte externa, T_{ref} , da temperatura atmosférica, T_{atm} , e do sinal proporcional à radiação incidente produzido pelo detector do termovisor.

$$T_{ob} = f(\varepsilon, d, T_{ref}, T_{atm}, S) \quad (6)$$

Para quantificar a incerteza de medição apresentados neste trabalho foi utilizado o software Incerteza de Medição Termográfica, IMT, desenvolvido em ambiente MatLab® por Teixeira (2012) com 10^6 números aleatórios provenientes da distribuição adotada para cada variável.

4. RESULTADOS

Na Figura 5 pode ser visto os resultados encontrados para os ensaios realizados nas conexões Ch_1 e Ch_2 . A resistência elétrica medida para Ch_1 foi de $199\mu\Omega$ e na conexão Ch_2 de $85\mu\Omega$ no primeiro ensaio. No segundo ensaio na Ch_2 , quando foi pintada com tinta refratária e teve sua emissividade alterada para 0,97, a resistência elétrica medida foi de $227\mu\Omega$.

Conforme esperado, foi identificada a elevação da resistência do condutor com o aumento da corrente (efeito peculiar). Embora a literatura discuta sua ocorrência apenas em cabos-condutores, o conjunto cabo-conexão esteve sujeito aos mesmos fenômenos. A Figura 6 mostra a grande variação das resistências elétricas nas conexões Ch_1 e Ch_2 revestida calculadas através da lei de Ohm. A sobrecarga do primeiro ensaio, mesmo por um curto período de tempo, foi suficiente para prejudicar a condutividade elétrica da conexão Ch_2 , que apresentou aumento de sua resistência para o segundo ensaio. Ademais, no segundo ensaio nota-se a descontinuidade na tendência de elevação da temperatura com o aumento da corrente elétrica. Ao fim do ensaio ($T=802$ K), a resistência elétrica da conexão Ch_2 sofreu um decremento significativo de seu valor. Isso se deve à alta temperatura atingida, próxima à fusão do material, que causou uma alteração irreversível da conexão ensaiada.

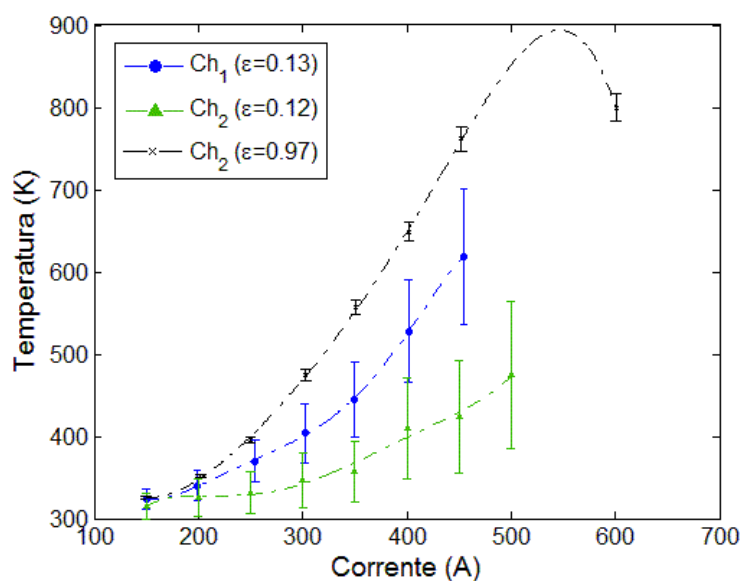


Figura 5. Evolução temperatura em função da corrente em conexões tipo H

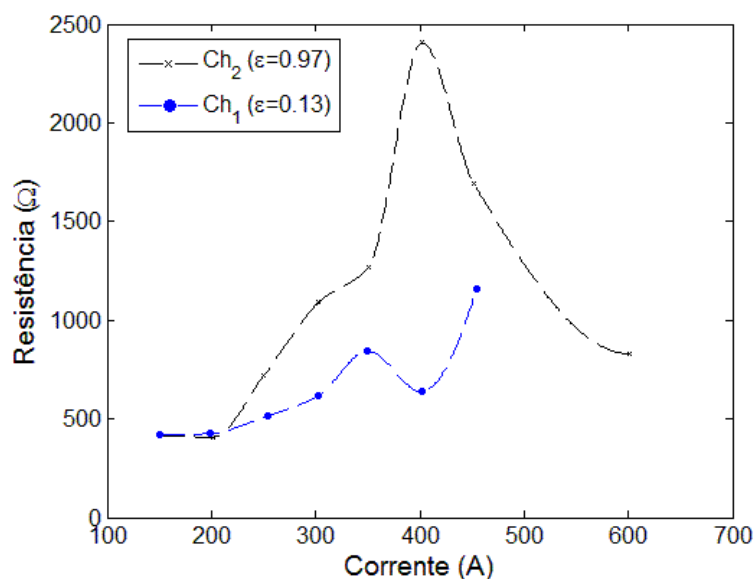


Figura 6. Evolução da resistência em função da corrente em conexões tipo H

Pode-se perceber que, conforme esperado, as maiores temperaturas foram alcançadas respectivamente pelas conexões com maior resistência elétrica. As medições realizadas nas conexões Ch₁ e Ch₂ sem cobertura da tinta, de emissividade, $\epsilon=0,13$, e $\epsilon=0,12$, apresentaram valores de incerteza elevados. De forma que, operando sobre a corrente de 450 A, as incertezas das temperaturas dos conectores foram da ordem de 80K e 70K, respectivamente. Esse fato impossibilitou a diferenciação das temperaturas das conexões em correntes inferiores a 400 A, já que os intervalos de abrangência sobrepuseram-se. Entretanto, pode-se perceber que alterando a emissividade superficial da amostra, os intervalos de confiança se atenuam. Na amostra Ch₂ recoberta por tinta, $\epsilon=0,97$, a incerteza calculada sobre os 450A foi reduzida em mais de 80%, 13K, evidenciando a influência da emissividade na avaliação da temperatura superficial dos conectores em operação.

O ensaio sobre as conexões do tipo cunha Cc₁ (íntegra) e Cc₂ (defeituosa), também apresentou a mesma relação entre temperatura e resistência elétrica. Devido às baixas emissividades das amostras, as incertezas de medição das duas conexões também apresentaram valores altos, de forma que não era possível a distinção das temperaturas de operação até aproximadamente 300A, conforme apresentado na Fig. 7. Sendo assim, para esses valores de corrente também não é possível distinguir a conexão íntegra da defeituosa. Isso evidencia que desprezar os intervalos de abrangência das medições de temperatura pode levar o operador a diagnosticar o componente elétrico de forma errônea afetando a confiabilidade do método aplicado a avaliação.

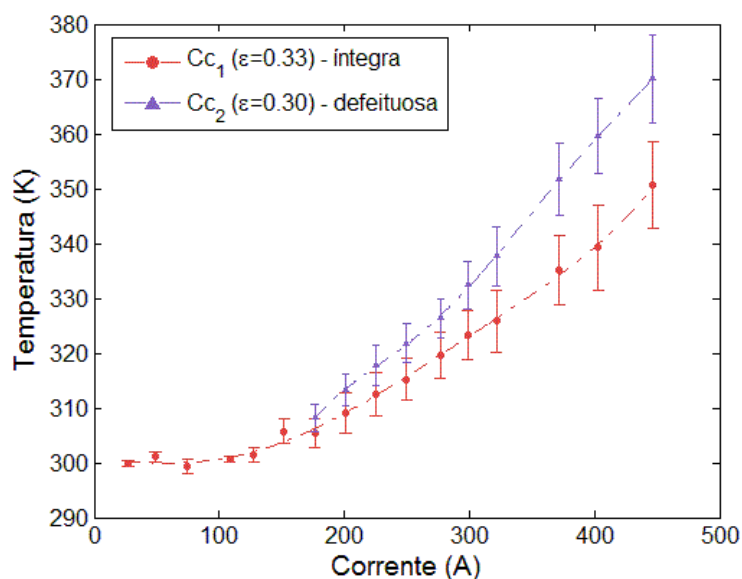


Figura 7. Evolução temperatura em função da corrente em conexões tipo cunha.

Os efeitos dos encapsulamentos podem ser vistos na Fig. 8, onde ambas as conexões foram submetidas a testes encapsuladas. Como pode ser observado, o valor de emissividade adotado foi de 0,97 para ambas, pois corresponde ao material das encapsuladoras. Em razão dos altos valores de emissividade, esses dispositivos aumentam a confiança da avaliação uma vez que em qualquer faixa de operação foi possível a distinção entre o conector íntegro do defeituoso. Confrontando os dados da Fig. 8 com as medições de temperatura sobre as conexões sem proteção do encapsulamento, Fig. 7, nota-se que aparente diminuição da temperatura de operação. Porém, o encapsulamento reduz a dissipação térmica, e a concentração de ar quente em torno das amostras provoca a elevação da temperatura das conexões a valores superiores aos registrados quando as mesmas amostras não estavam protegidas pela caixa polimérica. Essa situação teve reflexo direto sobre os valores de resistência elétrica das conexões, de forma que as conexões encapsuladas apresentaram valores superiores à quando não protegidas pelo invólucro ao término dos ensaios.

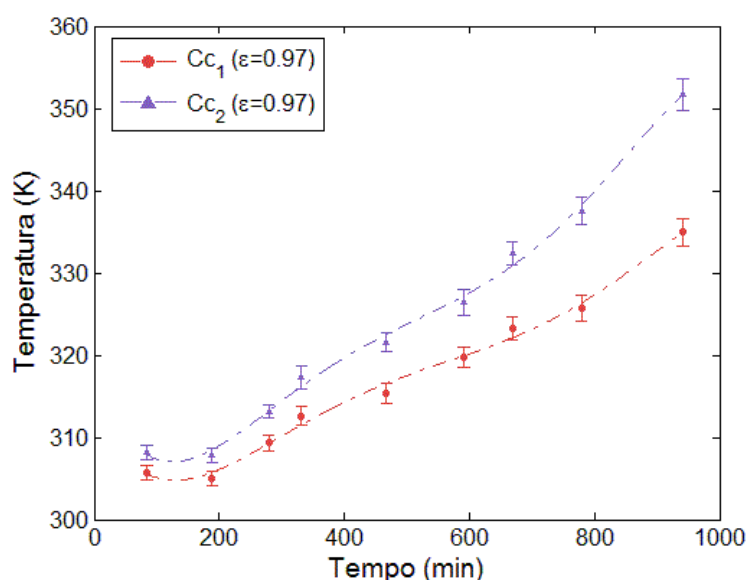


Figura 8. Medições de temperatura em conexões tipo cunha, com e sem encapsulamento.

5. CONCLUSÃO

Os resultados corroboram o diagnóstico da manutenção, no qual conexões que apresentam os maiores valores de resistência elétrica atingem maiores temperaturas, logo maior tendência de falhas. Contudo, inferir as tolerâncias na resistência elétrica de uma conexão íntegra exige uma abordagem teórica dos efeitos que a temperatura e pelicular exercem sobre o conjunto conector-cabo, além da influência do próprio processo de dissipação térmica na conexão. Outro ponto que deve ser observado é que embora as resistências RCC sejam referências importantes sobre o estado das conexões, seus valores não correspondem às resistências elétricas reais durante sua utilização em corrente alternada. Isto porque a resistência elétrica dos condutores é afetada pela sua temperatura, frequência e densidade de corrente elétrica conduzida.

As medições realizadas na amostra revestida permitem inferir com elevado grau de confiabilidade as temperaturas das conexões, devido à alta emissividade. Os intervalos de abrangência, calculadas com o MMC, são estreitos e não se sobrepõem, sendo possível distinguir claramente as temperaturas de cada conexão e a faixa provável onde se encontram.

Não se pode avaliar os conectores operando em qualquer faixa de temperatura. Em intervalos de confiança onde as temperaturas das duas conexões se sobrepõem. Por exemplo, considerando que as duas conexões apresentam situações diferentes quanto a sua degradação, inferir seu estado de degradação a partir de medições nesses pontos pode levar a um diagnóstico errôneo.

Quando as medições feitas em baixas emissividades são confrontadas com a diferença entre as temperaturas das conexões íntegra e defeituosa, torna-se clara a necessidade de se avaliar o papel da incerteza de medição no diagnóstico de anomalias, principalmente, porque a grande maioria dos dispositivos elétricos utilizados possui emissividade inferior a 0,5.

Embora o encapsulamento confira proteção e isolamento elétrico às conexões, sua utilização prejudica a dissipação térmica do dispositivo, que submetido a um elevado gradiente de temperatura, tem sua capacidade de condução prejudicada. Além disso, o diagnóstico de sobreaquecimento do dispositivo elétrico é prejudicado, pois não é possível relacionar a temperatura medida pela termografia infravermelha à temperatura das conexões internas ao invólucro.

6. REFERÊNCIAS

- Araújo, R. A.; Barbosa, L. C.; Siniscalchi, R. Teixeira., 2008, “Os impactos da aplicação da termografia na operação do sistema elétrico de fornos e as ações adotadas para buscar a máxima operacionalidade, produtividade e confiabilidade do sistema”, X EDAO – Encontro para debates de assuntos de operação. Anais... São Paulo, SP, Brasil: [s.n.].
- Bordalo, S.N., Ferziger, J.H. and Kline, S.J., 1989, “The Development of Zonal Models for Turbulence”, Proceedings of the 10th Brazilian Congress of Mechanical Engineering, Vol. 1, Rio de Janeiro, Brazil, pp. 41-44.
- Donatelli, G. D.; Konrath, A. C., 2005, “Simulação De Monte Carlo Na Avaliação De Incertezas De Medição”. Revista de Ciência & Tecnologia, v. 13, n. 25/26, p. 5-15.
- Flir Systems., 2010, “User’s manual FLIR B6XX series FLIR P6XX series FLIR SC6XX series”. [S.l: s.n.].
- Korendo, Z.; Florkowski, M., 2001, “Thermography based diagnostics of power equipment”, Power Engineering Journal, v. 15, n. 1, p. 33–42.
- Patience, Gregory S., 2013, “Experimental methods and instrumentation for chemical engineers”. Waltham MA, Elsevier.
- Teixeira, G. G. D., 2012, “Confiabilidade Metrológica em Termografia Aplicada em Sistemas Elétricos”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — UFMG, Belo Horizonte, Brasil.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

EVALUATION OF TECHNICAL REPORT IN ELECTRICAL COMPONENTS USING THERMOGRAPHY BY MONTE CARLO METHOD

Guilherme Teixeira Gonçalves, guiemail@gmail.com¹
Bruno Phillip Alves da Silva, bruno.phill@gmail.com²
Vitor Torres Alvarenga, vatorres01@gmail.com²
Bruno Ude Todde Fonseca Valadares, bruno_todde@hotmail.com²
Matheus Pereira Porto, matheusporto@ufmg.br²

¹Serviço Federal de Processamento de Dados (Serpro), Regional Rio de Janeiro Horto, Rua Pacheco Leão, 1235 – Fundos – Jardim Botânico Rio de Janeiro/RJ.

²Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha, Belo Horizonte/MG – Escola de Engenharia, Galpão da Engenharia Mecânica, Sala 2933.

Abstract. *This work presents the relationship between temperature and electrical connections failure using Infrared Thermography method. The tests were carried out in connectors, with and without encapsulation, operating at different electrical currents. The Monte Carlo method (MMC) was used as a tool to evaluate the measurement uncertainties. Results show agreement with diagnosis of maintenance, where connectors with higher electrical resistance operate at higher temperatures, therefore greater failure trend. However, due to the superposition of the confidence intervals, the connectors cannot be evaluated operating at any temperature by MMC. Encapsulation confer protection and electrical isolation to connections, nevertheless it affect the thermal dissipation affecting the heat conduction.*

Keywords: *Electrical connectors, Monte Carlo, Thermography.*