XIX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2010 – 22 a 26 de novembro

São Paulo - SP - Brasil

Proposta de metodologia para verificação de Termovisores utilizados em manutenção de sistemas elétricos de potência.

Breno Rodrigo G. Gurgel	Herbert Geovane de Carvalho	Denise M. Camarano
Cemig D	Cemig D	Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear
brenorg@cemig.com.br	herbertg@cemig.com.br	dmc@cdtn.br

Palavras-chave:

Calibração/verificação de termovisores
Inspeções termográficas
Termografia

RESUMO

Todo instrumento de medição deve ser calibrado em intervalos periódicos para garantir a confiabilidade de seus resultados. Estes intervalos devem ser reduzidos ou aumentados a partir dos resultados de calibrações prévias. A calibração periódica não previne a ocorrência do uso de instrumentos de medição fora das especificações. Assim, é comum o uso de verificações intermediárias de modo a garantir o *status* da calibração. O objetivo principal deste trabalho é apresentar uma proposta de metodologia para verificação intermediária de termovisores utilizados na manutenção de sistemas elétricos. Além disso, será apresentada uma discussão sobre a recomendação internacional relativa ao procedimento de calibração e verificação das principais características de instrumentos termográficos de acordo com a norma internacional OIML R 141.

Estas verificações intermediárias executadas pela Cemig diminuirão os custos de calibrações, as indisponibilidades dos equipamentos, otimizando a demanda para atendimento de um maior número de Linhas de Distribuição e cumprimento de metas acordadas com os Gestores.

1. INTRODUÇÃO

A termografia é uma técnica de monitoramento remoto, que possibilita a medição de temperatura e a formação de imagens térmicas de um componente, equipamento ou processo, a partir da radiação infravermelha, naturalmente emitida pelos corpos. Um exemplo de sua ampla utilização é em sistemas elétricos de potência como ferramenta de monitoramento e detecção de possíveis falhas em conexões, estruturas, transformadores, chaves, cabos, pára-raios, coluna de isoladores, dentre outros. As principais vantagens no uso da termografia estão relacionadas à sua facilidade de operação, velocidade de medição e resposta, facilidade na interpretação de resultados e a possibilidade de medição de objetos em

movimento. Permite identificar anomalias no funcionamento de equipamentos sem que seja necessária a interrupção do processo produtivo, assim como revelar a existência, quantificar e qualificar defeitos internos em materiais, quando suas estruturas estão submetidas a uma excitação térmica. Isto porque o processo de difusão térmica, afetado pela presença de falhas, inclusões, umidade, dentre outras ocorrências, gera uma alteração do campo de temperatura superficial da estrutura em comparação ao campo de temperatura gerado por uma estrutura íntegra [1-5].

Os aprimoramentos introduzidos na parte óptica, nos detectores e nos termovisores e a interligação do sistema de aquisição de imagens a microcomputadores, juntamente com melhoramentos no tratamento de sinal têm viabilizado a realização de análises mais completas da informação térmica obtida através da termografia. Os resultados qualitativos dos estudos iniciais começaram então a tomar um caráter mais quantitativo. Hoje em dia o uso da termografia passou de simples observação para medição e comparação de resultados, levando-se em conta os principais fatores que podem interferir ou contribuir nas medições, como temperatura ambiente, umidade relativa do ar, temperatura do mensurando, bem como uma maior interação de conhecimento da técnica. A termografia de hoje requer além de uma boa visualização da distribuição térmica também uma boa exatidão da medição da temperatura. Assim, a termografia como uma técnica de manutenção preditiva/preventiva vem sendo aprimorada e tratada de forma científica com o objetivo de identificar as causas fundamentais das anomalias. Pequenas alterações na temperatura de um equipamento ou componente podem causar grandes danos [6].

Os termovisores podem ser divididos em dois grupos: observação e medição. Os termovisores de observação são mais direcionados ao setor militar onde a qualidade da imagem é fundamental e os termovisores de medição têm sido amplamente utilizados no setor industrial e científico, para medições relativas e absolutas da temperatura, sendo fundamental a exatidão dos resultados. Contudo, é problemática a questão relacionada com a calibração e verificação intermediária de termovisores, pois existe uma carência de informações conclusivas sobre o assunto. As normas ASTM E 1311, ASTM E 1213 e ASTM E 154313 são aplicadas a termocâmeras de medição, não sendo tratada a questão relacionada à exatidão das medições sendo útil apenas para medições relativas de temperatura [6]. O mesmo objetivo tem as normas militares publicadas pelo departamento de defesa americano, como a MIL-T-49381, a MIL-I-24689 (SH), a MIL-STD-1859 e a MIL-STV-2194 que são aplicadas a termovisores de observação [6]. Somente a partir de 2008 é que foi publicado um procedimento para calibração e verificação das principais características de instrumentos termométricos recomendado pela International Organization of Legal Metrology (OIML R141) [7] e desde 2009 encontra-se em desenvolvimento a norma relativa ao vocabulário e terminologia específicos da termografia (ISO/TC 135/SC 8 N 015) [8]. A periodicidade de calibração deve ser freqüentemente reavaliada e otimizada, pois a fixação de intervalos fixos, normalmente sugeridos pelos respectivos fabricantes, pode não representar a melhor relação custo / benefício na garantia da qualidade de um dado processo. É bom destacar que comprovação metrológica compreende a calibração e a verificação dos instrumentos de medição. O uso de um plano de verificação intermediário permite uma avaliação mais eficaz do intervalo de calibração podendo ser aumentado ou reduzido, implicando diretamente nos custos das calibrações. Geralmente a calibração de termovisores é feita na maioria das vezes pelo próprio fabricante sendo considerada somente a diferença entre o valor indicado pelo termovisor com o valor correspondente a de um padrão. Além disso, é usual o intervalo de calibração fixo não havendo nenhuma verificação intermediária entre as calibrações sucessivas dos termovisores.

O objetivo principal deste trabalho é apresentar uma proposta de metodologia para verificação intermediária de termovisores utilizados na manutenção de sistemas elétricos. Inicialmente, é apresentada

uma discussão sobre a recomendação internacional relativa ao procedimento de calibração e verificação das características principais de instrumentos termográficos de acordo com a OIML R 141 [7]. Em seguida, é apresentado um estudo de caso para ilustrar o uso da metodologia proposta.

1.1. *TERMINOLOGIA/CALIBRAÇÃO/VERIFICAÇÃO*

Apesar de a termografia ser amplamente utilizada há muito tempo, somente a partir de 2009 é que surgiu a primeira proposta de norma relativa ao vocabulário e terminologia específicos da termografia (ISO/TC 135/SC 8 N 015) [8]. A falta de uniformização na terminologia pode ser facilmente observada nos artigos técnicos, manuais e catálogos de fabricantes onde é comum encontrar diferentes termos para a mesma característica metrológica, dificultando sua compreensão. Primeiramente ressaltam-se os termos usados na literatura como sinônimos de termovisor: câmera de imagem térmica, sistema de imagem térmica, termocâmera, sistema de imagem infravermelho, visor térmico, pirômetro, etc. Os demais exemplos estão relacionados com as características metrológicas tais como exatidão, resolução térmica e campo de visão [9].

A calibração de um termovisor geralmente é feita por comparação com um corpo negro (padrão) de grandes dimensões para a realização das medições na menor distância possível entre o termovisor e o corpo negro. Isto é feito para não considerar as influências da transmitância da atmosfera, da temperatura ambiente do laboratório e do posicionamento do corpo negro no centro do campo de visão do sistema. Os resultados são apresentados como uma média de, pelo menos, 5 medidas. Em [10-11] apresentam um conjunto de sete características a serem determinadas na calibração de um termovisor: mínimo erro, erro gerado por ruído, resolução digital da temperatura, estabilidade da temperatura, repetitividade, uniformidade da medição e resolução espacial da medição. De acordo com a recomendação de procedimento para calibração e verificação da OIML R 141 [7] as principais características os instrumentos termográficos a serem determinadas são:

- Resolução espacial (angular). Campo de visão e campo de visão instantâneo. Para determinar estas características é necessário um conjunto padrão com dimensões específicas. Os valores encontrados para a resolução espacial, campo de visão e campo de visão instantâneo devem corresponder aos valores declarados pelo fabricante.
- Exatidão da medição da temperatura – Deve ser determinada em pelo menos 5 pontos dentro da faixa nominal do termovisor. Após o padrão atingir o equilíbrio térmico deve ser feitas no mínimo 5 medições em cada temperatura. A exatidão em cada temperatura é expressa pela diferença entre a temperatura indicada pelo padrão e a temperatura indicada pelo termovisor correspondente ao valor médio da região analisada. Contudo, exatidão de acordo com o Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM) é um conceito qualitativo não devendo ser representado por um número [12];
- Resolução em temperatura (*Noise Equivalente Temperature Difference*- NETD) – Incremento em temperatura equivalente ao desvio padrão devido ao ruído em um termograma. A temperatura é fixada para 30 °C (ou conforme definido no certificado ou pelo fabricante) e dois termogramas são obtidos em um curto intervalo de tempo. A diferença de temperatura de cada elemento sensor na área observada não deve ser menor do ± 0,05 °C/min ou ao valor especificado pelo fabricante.
- Número de elementos sensores defeituosos. Para a determinação desta característica é necessário um programa computacional fornecido pelo fabricante. O número de elementos sensores defeituosos não deve ser superior a 0,3 % do número total de elementos sensores especificado pelo fabricante.
- Instabilidade a um campo não uniforme de um instrumento termográfico – Máximo valor da diferença de temperatura de fragmentos de um termograma obtido do radiador padrão. Esta característica deve

ser determinada em 5 pontos da faixa nominal e devem ser feitas 5 medições em cada ponto. A diferença encontrada não deve ser superior ao valor especificado pelo fabricante.

- Influência das condições ambientais no desempenho do instrumento. Faixa de indicações de temperatura na qual os resultados das medições, realizadas em diferentes condições de temperatura ambiente (de acordo com as especificações dos fabricantes), estão localizados. Mudanças da temperatura ambiente em comparação com a temperatura utilizada durante a calibração do equipamento causam mudanças no sinal elétrico de saída. Para realizara este ensaio é necessário uma câmara climática.

- Repetitividade das indicações do instrumento termográfico. Faixa de temperatura na qual os resultados de séries medições estão localizados quando estas séries são realizadas sob idênticas condições. As medições devem ser realizadas em intervalos de 10 s a 15 s durante 15 min ou conforme especificado pelo fabricante. A diferença entre os valores máximos e mínimos correspondentes ao valor médio de cada intervalo de 5 min não deve ser superior ao declarado pelo fabricante.

2. DESENVOLVIMENTO

O experimento foi realizado por meio da comparação entre os valores indicados pelo termovisor padrão e pelo termovisor sob teste. Como meio térmico foi utilizado uma fonte de radiação AGA com emissividade igual a 0,98. Foram realizadas 5 medições simultâneas com os dois termovisores, na faixa de temperatura de 34 ºC a 105 ºC. Durante o experimento a temperatura ambiente estava na faixa de (23 a 24)ºC e umidade relativa do ar de 45 % a 50 %. As medições foram realizadas em intervalos de 15 min a 20 min durante aproximadamente 2 h e 35 min. Antes de iniciar as medições foi feita uma inspeção visual para verificar possíveis danos nos termovisores que podem ter um impacto significativo em suas características metrológicas. Os termovisores foram posicionados a uma distância de 0,6 m e direcionados para a região central da fonte de radiação para que a mesma imagem fosse obtida pelos dois termovisores, correspondente a área central do termograma (FIG 1). Os resultados foram considerados satisfatórios se a diferença de temperatura entre o valor indicado pelo termovisor sob teste e do termovisor padrão estão dentro dos limites estabelecidos pela incerteza de medição (2 ºC ou 2 % do valor indicado, o que for maior).

FIGURA 1 – Bancada experimental

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na figura 2 é apresentado um termograma típico obtido, indicando a região da fonte de radiação analisada.

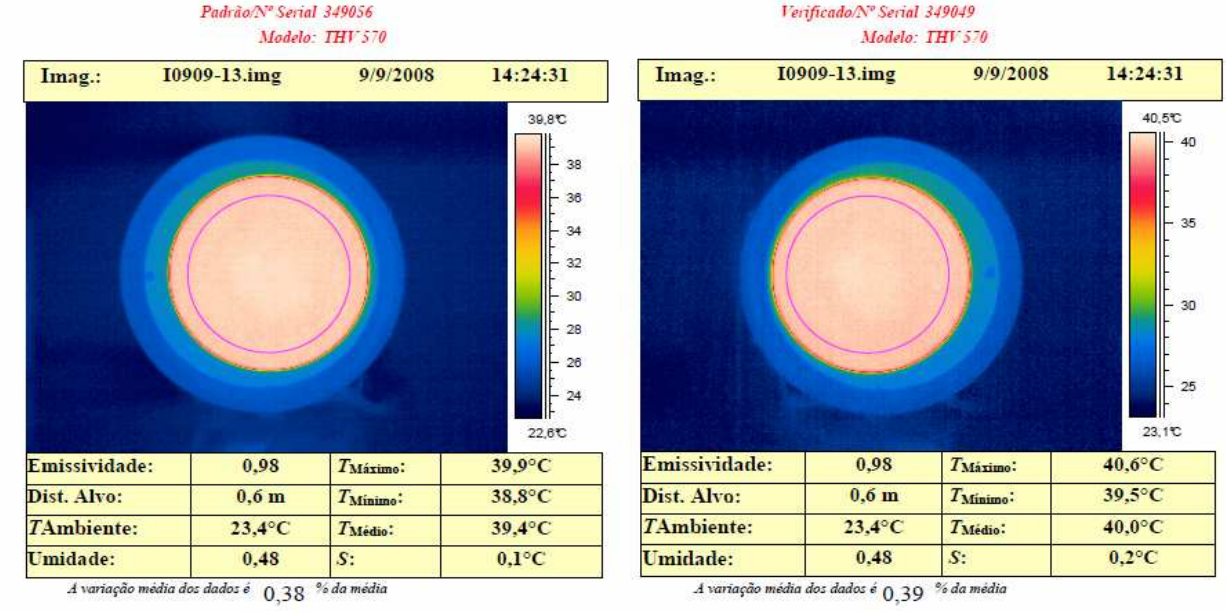
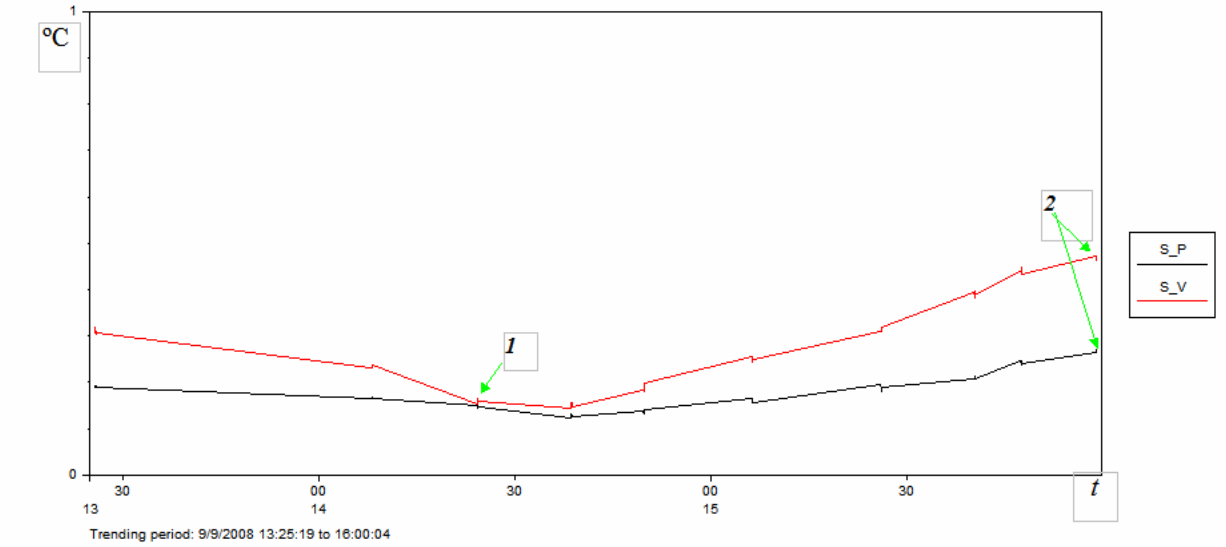


FIGURA 2 – Exemplo do termograma na temperatura de ensaio de 39,4 °C

No gráfico 1 podemos comparar o desvio padrão do verificado com o padrão.



A tabela 1 mostra os valores correspondentes à temperatura máxima, mínima e média dos valores obtidos pelo termovisor padrão e pelo termovisor sob teste [13].

TABELA 1 – Temperatura máxima, mínima e média do termovisor padrão e do termovisor sob teste.

Padrão – Temperatura / ºC				Teste – Temperatura / ºC			
T_{max}	$T_{mín}$	$T_{médio}$	Desvio padrão	T_{max}	$T_{mín}$	$T_{médio}$	Desvio padrão
30,3	29,2	29,7	0,2	30,6	29,0	29,7	0,2
40,1	39,0	39,5	0,1	40,6	39,4	40,0	0,2
60,0	59,1	59,5	0,1	60,6	59,0	59,9	0,2
69,6	68,6	69,1	0,2	70,5	68,5	69,7	0,3
79,7	78,4	79,1	0,2	81,0	78,8	79,8	0,3
89,8	88,1	89,1	0,2	91,0	87,8	89,7	0,4

99,0	97,1	98,2	0,2	100,2	96,5	98,8	0,4
105,3	103,4	104,4	0,3	106,8	102,7	105,2	0,5

Verifica-se a similaridade dos resultados obtidos entre os termovisores em toda a faixa de medição, na área selecionada. A temperatura máxima indicada pelo termovisor de teste é ligeiramente superior a indicada pela termovisor padrão. A maior diferença entre os valores indicados pelo termovisor sob teste e os valores correspondente ao do padrão na temperatura máxima é igual a - 1,5 ºC e igual a 0,7 ºC na temperatura mínima. A maior diferença correspondente à temperatura média é igual a 0,8 ºC com um desvio padrão experimental igual a 0,5 ºC (em T = 105,3 ºC), indicando a dispersão dos resultados na respectiva área. Observa-se que esta diferença é função do aumento da temperatura. Contudo, os valores encontrados estão dentro dos limites estabelecidos da incerteza de medição (2,0 ºC), implicando na validade do experimento.

4. CONCLUSÕES

A termografia é um método prático, eficiente e seguro para identificar anomalias em componentes de sistemas elétricos, tendo grande praticidade de uso e a vantagem de não exigir o desligamento dos equipamentos sob inspeção. Contudo, é importante que a manutenção não seja apenas eficiente, mas principalmente eficaz, ou seja, não basta reparar os equipamentos rapidamente, mas é preciso mantê-los disponíveis para operação, reduzindo a probabilidade de paralisações no fornecimento de energia. Conforme evidenciado, vários são os parâmetros relativos à calibração de termovisores que devem ser objetos de reavaliação. Os tópicos apresentados constituem uma ferramenta de apoio à definição do real intervalo de calibração de forma a garantir a confiabilidade, a continuidade de operação dos sistemas elétricos e a uniformidade das inspeções termográficas. Assim, verificações intermediárias são necessárias à manutenção da confiança na situação da calibração e devem ser realizadas de acordo com procedimentos e cronogramas definidos, permitindo uma redução nos custos diretos e indiretos. A metodologia proposta apresenta apenas um dos parâmetros estabelecidos pela OIML R141, mas que constitui uma ferramenta de apoio na definição do real intervalo de calibração e da estabilidade ao longo do tempo dos termovisores. Estas verificações intermediárias permitiram a diminuição dos custos das calibrações e na indisponibilidade dos termovisores. Estes resultados implicaram na otimização da demanda, do atendimento de um maior número de Linhas e do cumprimento de metas acordadas com os Gestores.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Norma Brasileira ABNT NBR 15424. Ensaios não Destrutivos – Termografia – Terminologia, Non-destructive testing – Thermografy – Terminology, Nov. 2006.

[2] R.C. Bathke, J.S. Melo, E.D. Neto. Efeitos da Inspeção Termográfica na manutenção de redes de distribuição aéreas. *V Encontro de Termografia de Furnas*, São Paulo, Nov. 2006.

[3] S.Gallindo, S. de Maria. Conectores Subestações. *V Encontro de Termografia de Furnas*. São Paulo, Nov. 2006.

[4] J.P. Sena, P. Braga. Estudo de Engenharia em Ponto Quente da Chave Seccionadora EGIC 230 kV. *V Encontro de Termografia de Furnas*. São Paulo, Nov. 2006.

[5] D.M Camarano, A. M. P. Azevedo. Termografia aplicada a Inspeções de Sistemas Elétricos – Confiabilidade nas Medições. 7 °Seminário Internacional de Metrologia Elétrica. Nov. 2007.

[6] S.G. Tavares, Desenvolvimento de uma metodologia para aplicação de ensaios térmicos não destrutivos na avaliação da integridade de obras de arte. Tese de doutorado submetida a Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica. Belo Horizonte, Dez. 2006.

[7] OIML R 141 – International Recommendation Edition 2008 (E), Organization Internationale de Métrologie Légale – International Organization of Legal Metrology.
[8] ISO/SC 8 -Infrared thermography for non-destructive testing.
[9] K. Chrzanowski, *Non-Contact Thermometry Measurement errors*. Poland, Polish Chapter of SPIE, vol. 7, 2001.
[10] K. Chrzanowski, "Evaluation of Thermal Cameras in Quality Systems According to ISO 9000 or EN 45000 Standards", *Thermosense XXIII*. Orlando, 2001
[11] K. Chrzanowski, S.N. Park., "Evaluation of Thermal Cameras for Non-Destructive Thermal Testing Applications". *Infrared Physics & Technology*, vol 42, pp. 101-105, 2001
[12] Inmetro, *Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia*. 2 ed. Brasília, 2000.
[13] VT001/2008/OM/MN – Relatório de Termografia Ensaio de Verificação.