

Capacitação Metrológica em Termografia para Planejamento de Manutenção

A.F.Orlando, M.M.H.Bellido, P.R.F.Santos, e R.N.Teixeira

Resumo- Foi desenvolvida uma metodologia para interpretar o sinal de termovisores com aplicação em planejamento de manutenção. Inicialmente, foi projetado um dispositivo para calibração de um termovisor na PUC-Rio. Ele consta de um bloco cilíndrico de latão, imerso em um banho de temperatura controlada, tendo sua superfície superior pintada de preto a cerca de 3 mm acima da superfície do líquido. Furos radiais foram feitos imediatamente abaixo da superfície, de modo que sua temperatura pudesse ser medida. A seguir, o termovisor foi calibrado no corpo negro do INMETRO. Através da comparação entre os valores medidos pelo termovisor na PUC-Rio e no INMETRO, a emissividade da superfície pode ser determinada, e ajustada no instrumento para medição de temperatura com superfícies semelhantes.

Palavras-chave—Termovisor, calibração, corpo negro, manutenção, emissividade.

I. INTRODUÇÃO

O monitoramento da temperatura de equipamentos e sistemas de usinas hidrelétricas e subestações é uma ferramenta utilizada para o planejamento da sua manutenção, quer seja preditiva ou corretiva. Quando a temperatura se eleva a valores superiores aos especificados pelo fabricante dos equipamentos, ou projetista dos sistemas, considera-se que deve ter havido uma deteriorização do desempenho, e, portanto, procedimentos de manutenção devem ser aplicados para restauração das suas características originais. Quanto mais rápido for o reconhecimento desta anormalidade, menores serão os prejuízos provocados pela interrupção do funcionamento e menores serão os custos de manutenção.

Desta forma, o monitoramento contínuo é uma ferramenta importante de acompanhamento do desempenho. Ele pode ser feito com a instalação de sensores tradicionais, como termopares e termo-resistências, o que requer muitas vezes a parada das máquinas para sua colocação, com os prejuízos associados. Ultimamente, entretanto, a tecnologia de medição remota de temperatura tem se de-

envolvido de modo a se tornar importante para o diagnóstico de funcionamento.

A termografia analisa a radiação infravermelha emitida pelo alvo, objeto da análise, e interpreta o sinal, associando uma temperatura ao mesmo, pelas leis da transferência de calor por radiação. Os equipamentos existentes, chamados de termovisores, indicam com uma razoável exatidão o valor de temperatura quando as condições de observação são ideais, isto é, uniformidade de temperatura, e conhecimento das propriedades radiantes da superfície emissora. Quando este não é o caso, isto é, quando a superfície não é uniforme em temperatura, e quando as propriedades superficiais do alvo não são conhecidas, um problema de interpretação do sinal surge, fazendo com que esta ferramenta se torne mais qualitativa do que quantitativa. Muitas vezes, por exemplo, existe entre o alvo e o termovisor uma janela de observação, e sua transparência deve ser levada em consideração.

Assim, o uso adequado do termovisor para indicar com exatidão a temperatura depende de uma calibração do mesmo, e da interpretação do sinal do mesmo em diferentes condições de operação, normalmente diferentes das de calibração.

Neste trabalho foi desenvolvida uma infraestrutura para calibrar termovisores e interpretar adequadamente o sinal infravermelho. Para isto, foi desenvolvida uma metodologia para analisar os resultados, consistindo da sua calibração em condições ideais, determinação das propriedades superficiais de radiação (usando também o próprio termovisor e equipamentos auxiliares), e procedimentos para a separação dos diferentes sinais, calculando a influência de cada um sobre a incerteza da temperatura desejada.

Tipicamente, a temperatura de diferentes componentes é medida nas seguintes faixas :

- Rotores dos geradores : 0 °C a 150 °C
- Enrolamentos estatóricos : 0 °C a 120 °C
- Juntas de vedação dos eixos : 0 °C a 150 °C
- Resfriadores de ar : 0 °C a 110 °C
- Enrolamento de transformadores: 0 °C a 150 °C
- Contatos elétricos : até 350 °C

A tolerância desejada para os primeiros itens é de 2%. Já para último aumenta para 5%.

A indicação de temperatura pelo termovisor, segundo o fabricante, tem uma incerteza de ± 2 °C, ou 2 %, o que for maior. O termovisor tem o ajuste da emissividade, que deve ser conhecida para que se consiga sua calibração.

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do V Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (V CITENEL), realizado em Belém/PA, no período de 22 a 24 de junho de 2009.

Este projeto foi desenvolvido dentro do programa de P&D LIGHT 02-05 regulado pela ANEEL.

A.F.Orlando, PUC-Rio (afo@mec.puc-rio.br)

M.M.H.Bellido, PUC-Rio (marlonmax@mec.puc-rio.br)

P.R.F.Santos (prsantos@inmetro.gov.br)

R.N.Teixeira (rnteixeira@inmetro.gov.br)

Portanto, a incerteza da medição da temperatura pelo termovisor depende da sua interpretação do sinal infravermelho e da emissividade do objeto no campo visual.

A faixa de temperatura 0 - 150 °C foi escolhida neste projeto por cobrir a maioria das aplicações em questão.

A emissividade da superfície pode ser estimada através de duas metodologias.

- 1ª metodologia : Inicialmente, o termovisor é calibrado contra um corpo negro existente no INMETRO na faixa da temperatura ambiente até 150 °C. Após esta fase, o termovisor será utilizado para medição da temperatura da superfície de um placa, pintada de preto e colocada em um banho de temperatura controlada. Sua temperatura será medida com termopares calibrados contra padrões rastreados à Rede Brasileira de Calibração. Variando-se a emissividade ajustada no termovisor até que a temperatura medida coincida com a temperatura indicada pelo termovisor, pode-se estimar a emissividade da superfície.
- 2ª metodologia : Através de um balanço térmico em um sistema que consiste de dois cilindros concêntricos, com as superfícies do espaço anular pintadas de preto, e um resistência elétrica inserida no cilindro interno para o fornecimento de calor ao sistema. Este pode ser considerado radial, pois as bases estão isoladas.

O LAPIR (INMETRO) utiliza um corpo negro para a calibração. Desta forma, a emissividade do material da cavidade não é importante, e, a radiação emitida pela mesma tem a característica daquela de um corpo negro. A temperatura do corpo negro pode então ser comparada com a indicada pelo termovisor, ajustado para uma emissividade igual a 1, na faixa de interesse de 25 °C até 150 °C.

O presente trabalho trata do desenvolvimento de um dispositivo para a medição da emissividade pela 1ª metodologia.

III. APLICAÇÕES EM MANUTENÇÃO

A Light possui uma estratégia de manutenção preditiva baseada na utilização do termovisor aplicada aos seus equipamentos elétricos, que estabelece uma rotina de critérios de avaliação e periodicidade [8]. Foram caracterizadas 6 (seis) áreas específicas para os equipamentos elétricos, que possuem acompanhamento de temperatura para os seguintes elementos:

- Usinas
 - a) Campo de excitação da máquina (escovas);
 - b) Ranhuras do estator;
 - c) Pacotes de lâminas do estator;
 - d) Conexões elétricas de cabos de potência e barramentos;
 - e) Reostato de campo.

- Linhas de transmissão aéreas
 - a) Grampos de jumper das torres de ancoragem;
 - b) Conexões de cabos;
 - c) Conexões para as derivações das LTA;
 - d) Conexões para os pára-raios das SE;
 - e) Conexões para os filtros das SE;
 - f) Conexões para os filtros de onda;
 - g) Dispositivos de seccionadoras de linhas.
- Cabos de transmissão subterrâneos
 - a) Emenda de cabos de potência isolados e barramentos;
 - b) Conexão dos terminais externos dos cabos.
- Subestações
 - a) Barramentos;
 - b) Transformadores de potência;
 - c) Disjuntores;
 - d) Seccionadoras;
 - e) TC e TP;
 - f) Pára-raios;
 - g) Filtros de onda;
 - h) Fusíveis;
 - i) Terminais de cabos de potência;
 - j) Bancos de capacitores;
 - k) Conjuntos blindados.
- Linhas de distribuição aéreas
 - a) Conexões e emendas de cabos e fios elétricos;
 - b) Transformadores de distribuição;
 - c) Pára-raios;
 - d) Capacitores e reguladores de tensão;
 - e) Chaves fusíveis e seccionadoras;
 - f) Religadores e seccionalizadores;
- Linhas de distribuição subterrâneas
 - a) Conexões e emendas de cabos de energia isolados;
 - b) Conexões de barramentos;
 - c) Chaves a óleo e protetores de rede;
 - d) Transformadores;
 - e) Bases fusíveis.

A avaliação dos resultados das inspeções compreende uma interpretação dos valores de temperatura medidos para cada ponto e a definição da ação necessária para sua correção por parte da manutenção.

A Light adota os seguintes critérios conforme a diferença encontrada entre a temperatura do ponto do objeto medido e o ambiente.

A ação a ser tomada pela manutenção é baseada nas recomendações abaixo descritas tomando como base faixas de diferença de temperatura.

- 0 – 5 °C : Não determina intervenção da manutenção;
- 5 – 15 °C : Intervenção dentro do programa normal de manutenção;
- 15 – 35 °C : Intervenção na primeira oportunidade, ou no prazo máximo de 60 dias;
- > 35 °C : Intervenção imediata, observando as restrições operativas do sistema.

Algumas observações sobre as diferenças registradas acima:

- As faixas de temperatura foram consideradas para uma corrente de 100% da corrente nominal ou da máxima de um período;
- A intervenção da manutenção é específica considerando-se pontos quentes em conexões, isto é, conectores e regiões de contatos externos;
- Quando os pontos quentes estiverem localizados em partes internas do equipamento, a intervenção deve ser imediata, observando-se as restrições operativas do sistema.
- Após cada reparo proceder a uma inspeção para se verificar se o defeito foi eliminado.

A Light utiliza o termovisor da marca AGEMA, modelo Scanner 487, para a realização das rotinas de inspeção preditiva em suas instalações. O equipamento é da década de 90 e de dimensões superiores aos existentes atualmente.

Atualmente, o termovisor da Light é calibrado por uma empresa .

O procedimento de calibração foi desenvolvido para fornecer aos sistemas de imagens infravermelhas exatidão a uma medição específica, de acordo com os padrões internacionais.

Com o objetivo de estimar a incerteza de medição, a empresa usa um grande número de corpos negros muito estáveis, trabalhando em diferentes temperaturas de 0 °C a 1500 °C. As temperaturas dependem das faixas utilizados.

Os corpos negros utilizados, que são as fontes de radiação, são regularmente calibrados. A incerteza é definida pelo NIST, o National Institute for Standards and Technology (EUA), e pelo SP, instituto equivalente de testes e pesquisas da Suécia.

O procedimento de calibração é baseado na medição de um sinal enviado pelo detector no sistema de imagem. O sinal é proporcional à radiação vinda de um corpo negro com uma temperatura conhecida e de emissividade também conhecida, a uma distância determinada entre o sistema de imagem e o corpo negro. A distância é determinada baseando-se no campo de visão da lente usada.

O ciclo de calibração é controlado por um computador com um software dedicado à calibração. O computador

também controla os movimentos mecânicos do sistema de imagem para o posicionamento e foco dos diferentes corpos negros. Todas as diferentes combinações do sistema de imagem com lentes e filtros são calibrados.

O computador armazena o valor dos sinais vindos do detector, juntamente da temperatura de uma específica fonte de radiação.

Após completado o ciclo com todas as calibrações requeridas, o software utiliza as informações gravadas para calcular as constantes matemáticas de calibração necessárias. As constantes como os dados do sistema de imagem são relevantes, tal como número de série, lentes e etc., que são então guardados na câmera. As constantes de calibração são usadas pelo sistema para calcular e apresentar as temperaturas corretas.

O procedimento de calibração também torna possível calcular os dados necessários para a compensação da variação de temperatura do sistema, tornando possível manter-se a qualidade da medição quando a temperatura ambiente varia.

A empresa preserva gravações de todas as calibrações realizadas e o processo de calibração é uma parte integrante do seu Programa de Garantia da Qualidade

Entretanto, existem incoerências metrológicas que precisam ser corrigidas para uma melhor interpretação dos resultados de calibração do termovisor.

Destá forma, resolveu-se neste projeto desenvolver uma metodologia de calibração de um termovisor para ser usado em planejamento de manutenção.

IV. METODOLOGIA

A..Calibração de termômetros infravermelhos no INMETRO

Apesar de haver uma grande demanda de serviços de calibração de sensores de temperatura por radiação, no Brasil, há somente dois laboratórios acreditados à Rede Brasileira de Calibração - RBC e o próprio INMETRO, capazes de realizar com competência técnica e rastreabilidade aos padrões nacionais de mais alta exatidão, garantindo assim, a base técnica imprescindível ao livre comércio nos mercados globalizados e a disseminação do conhecimento técnico na área medição de temperatura sem contato.

Os laboratórios de calibração de sensores de temperatura por radiação no Brasil são:

- INMETRO : O Laboratório de Pirometria - LA-PIR oferece serviços de calibração na faixa de medição 25°C a 1500°C com incerteza de medição variando entre $\pm 2^\circ\text{C}$ a $\pm 4^\circ\text{C}$, para termômetros de radiação infravermelha, e de 800°C a 2200°C com incerteza de medição variando entre $\pm 2,5^\circ\text{C}$ a $\pm 5^\circ\text{C}$ para sensores de radiação que operam dentro do espectro visível.
- USIMINAS : O Laboratório de Calibração de Instrumentação – IHI oferece serviços de calibração de termômetros de radiação infravermelha nas seguintes faixas de medição: de 50°C até < 550°C com menor incerteza de medição de

$\pm 1,0^\circ\text{C}$, de 550°C até $< 1100^\circ\text{C}$ com menor incerteza de medição de $\pm 1,6^\circ\text{C}$ e de 1100°C até 1500°C com menor incerteza de medição de $\pm 1,4^\circ\text{C}$ até $\pm 2,1^\circ\text{C}$.

- CST : O Laboratório de Calibração oferece serviços de calibração de termômetros de radiação infravermelha nas seguintes faixas de medição: de 500°C até 1100°C com menor incerteza de medição de $\pm 1,7^\circ\text{C}$ e de 1100°C até 1500°C com menor incerteza de medição de $\pm 3,5^\circ\text{C}$.

O Laboratório de Pirometria (LAPIR) possui a melhor infraestrutura no Brasil para realizar a calibração de sensores de temperatura por radiação infravermelha que operam acima de 25°C .

Para este projeto foi escolhido um corpo negro do LAPIR/INMETRO, de fabricação MIKRON, modelo M315X8. Ele consiste de uma placa preta de temperatura uniforme e controlada, cujas características de emissividade espectral foram medidas no NIST (National Institute for Standards and Technology), em Março de 2005, sendo apresentadas na Fig. 1.

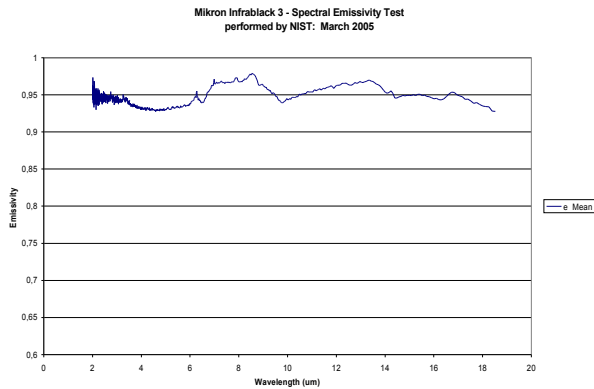


Figura 1 : Emissividade espectral do corpo negro MIKRON M315X8, medida pelo NIST.

Na faixa de comprimento de onda $2\ \mu\text{m} < \lambda < 18\ \mu\text{m}$, a emissividade varia, com um nível de confiabilidade de 95,45 %, em $0,94 \pm 0,02$. Esta correção foi, portanto, levada em consideração na calibração do termovisor com o corpo negro.

Durante a calibração realizada no INMETRO, o termovisor é apontado para o corpo negro. Correções para o fato de que a emissividade é diferente de um são utilizadas. Para várias temperaturas do corpo negro, $T_{\text{padrão}}$, o valor correspondente medido pelo termovisor, $T_{\text{Termovisor}}$, é registrado. Um ajuste pelo método dos mínimos quadrados é feito, [3], [4] e [5], relacionando os dois valores, calculando-se inclusive o desvio médio quadrático do ajuste, u_{fit} , para as duas variáveis. A incerteza padronizada do padrão é $u_{\text{padrão}}$ [5].

$$T_{\text{padrão}} = A + B \cdot T_{\text{Termovisor}} \quad (1)$$

$$u_{\text{fit}} = \sqrt{\frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^N (A + B \cdot T_{\text{Termovisor},i} - T_{\text{padrão},i})^2} \quad (2)$$

A calibração do termovisor contra um corpo negro é assim realizada. Entretanto, quando o termovisor é apontado para uma superfície não negra, o valor de uma temperatura efetiva $T_{\text{termovisor,efet}}$ é lida, ajustando-se o termovisor para $\epsilon = 1$. Este valor pode ser transformado para o valor verdadeiro T_{efet} através de “(1)”. A relação entre a temperatura verdadeira da superfície, T_p , e a efetiva, T_{efet} é dada por [7]:

$$T_{\text{efet}} = \epsilon^{1/4} \cdot T_p \quad (3)$$

No dispositivo desenvolvido pela PUC-Rio, a emissividade da superfície pode ser determinada, uma vez que a temperatura da superfície, T_p é medida com os termopares.

B. Dispositivo de teste na PUC-Rio

Foi projetado um dispositivo para calibração de um termovisor na PUC-Rio. O termovisor tem o ajuste da emissividade, que deve ser conhecida para que se consiga calibrar a indicação de temperatura pelo termovisor, que, segundo o fabricante, tem uma incerteza de $\pm 2^\circ\text{C}$ (até 120°C), ou 2 % (acima de 120°C), o que for maior. Este é o limite inferior da incerteza do LAPIR (INMETRO).



Figura 2 : Montagem do dispositivo para calibração do termovisor.

Ele consta de um bloco cilíndrico de latão, com 110 mm de altura e 75 mm de diâmetro, imerso em um banho de temperatura controlada, tendo sua superfície superior pintada de preto e cerca de 3 mm acima da superfície do líquido. A Fig. 2 mostra a montagem com o termovisor.

A temperatura do banho foi medida seis vezes em cada ponto por um termômetro de platina padrão Rosemount 1925 e um multímetro HP34420-A, com incerteza máxima estimada de $\pm 0,05$ °C.

A temperatura média da superfície do bloco cilíndrico foi medida com três (3) termopares tipo T, com multímetro HP34401-A e incerteza máxima estimada em $\pm 0,3$ °C. Furos radiais foram feitos imediatamente abaixo da superfície, de modo que sua temperatura pudesse ser medida.

O objetivo deste teste foi verificar a estabilidade do sistema de medição de temperatura. Na etapa seguinte, o termovisor medirá sua temperatura, comparando-se, portanto, os valores. A emissividade foi medida por comparação com um padrão do laboratório com incerteza estimada de $\pm 0,01$.

Foi utilizada uma placa FireCard 400™ 1394a PCMCIA (CardBus) adapter para realizar a conexão entre o computador e o termovisor.

A calibração dos termopares do tipo T, calibre 24, foi feita no Laboratório de Pressão e Temperatura (LPT) da PUC-Rio, acreditado pela Rede Brasileira de Calibração (RBC). A metodologia consiste em comparar o valor da força eletromotriz (f.e.m.) de cada um dos termopares tipo T com a temperatura do banho de temperatura controlada, medida por um termômetro padrão de resistência de platina (SPRT) do LPT da PUC-Rio, após a obtenção de sua estabilização. Seis (6) medições foram feitas, com intervalos de aproximadamente 5 minutos entre elas, para verificação da repetitividade de medição com os termopares. A junção de referência de cada termopar foi colocada no banho de gelo.

Os valores das f.e.m. dos termopares foram convertidos em °C, T_{ITS} pelas expressões da ITS-90. Um ajuste pelo método dos mínimos quadrados foi feito para relacionar estes valores, em °C, com os valores da temperatura verdadeira medida pelo SPRT (T_p). O grau do polinômio foi escolhido de forma a minimizar o desvio médio quadrático do ajuste. A incerteza de medição levou em consideração a incerteza do padrão, a incerteza de leitura do termopar, a incerteza do ajuste e a uniformidade do banho de calibração. Este procedimento está descrito na documentação do LPT. A Tabela 1 apresenta os valores dos coeficientes de ajuste (C_1, C_2, C_3, C_4, C_5) e da incerteza de medição U (95,45 %).

Tabela 1 : Coeficientes do ajuste e incerteza de medição dos termopares tipo T

	Termopar		
	1	2	3
C_1	0,26082	0,29289	-0,69686
C_2	0,99374	0,98043	1,05520
C_3	2,6977E-5	2,1821E-4	-1,4954E-3
C_4	0	-7,6167E-7	1,4452E-5
C_5	0	0	-4,5206E-8
U (°C)	0,25	0,15	0,30

$$T_p = C_1 + C_2.T_{ITS} + C_3.T_{ITS}^2 + C_4.T_{ITS}^3 + C_5.T_{ITS}^4 \quad (4)$$

A medição da emissividade da superfície foi feita colocando-se o termovisor imediatamente acima da superfície, e medindo-se a temperatura da superfície da placa com os três (3) termopares. Um valor de emissividade igual a 1,00 foi ajustado para a medição efetiva de temperatura. O termovisor indica os valores máximo e mínimo na superfície, além do valor médio e a dispersão ($2.\sigma$).

A temperatura média da superfície (T_p) é calculada como a média aritmética das temperaturas indicadas pelos termopares (T_1, T_2 e T_3), com incertezas expandidas (95,45%), respectivamente, $U_1 = \pm 0,25$ °C, $U_2 = \pm 0,15$ °C e $U_3 = \pm 0,30$ °C. Sua incerteza, U_p , pode ser calculada por “(6)”.

$$T_p = \frac{T_1 + T_2 + T_3}{3} \quad (5)$$

$$U_p = \frac{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2}}{3} = 0,14 \text{ °C} \quad (6)$$

Para minimização da incerteza, três (3) valores de temperatura são lidos pelo termovisor, $T_{Termo,1}, T_{Termo,2}, T_{Termo,3}$, juntamente com as dispersões apresentadas pelo mesmo, $u_{d,1}, u_{d,2}, u_{d,3}$, respectivamente. O valor médio é dado por

$$T_{Termo,efet} = \frac{T_{Termo,1} + T_{Termo,2} + T_{Termo,3}}{3} \quad (7)$$

$$u_d = \frac{\sqrt{u_{d,1}^2 + u_{d,2}^2 + u_{d,3}^2}}{3} \quad (8)$$

Os valores efetivos corrigidos por “(1)” podem ser escritos como :

$$T_{efet} = A + B.T_{Termo,efet} \quad (9)$$

$$u_{efet} = \sqrt{u_{ajuste}^2 + (B.u_d)^2 + u_{padrão}^2} \quad (10)$$

A emissividade pode então ser calculada por “(3)”, com sua incerteza obtida por “(11)”.

$$u_\varepsilon = 4.\varepsilon \cdot \sqrt{\left(\frac{u_{efet}}{T_{efet}}\right)^2 + \left(\frac{u_p}{T_p}\right)^2} \quad (11)$$

A incerteza expandida (95,45%) pode ser calculada como:

$$U_\varepsilon = 2. u_\varepsilon \quad (12)$$

Na maioria das vezes, a temperatura da superfície só pode ser medida uma única vez com o termovisor. Assim, a incerteza torna-se mais elevada. As equações. (7) e (8) podem ser usadas com os valores

$$T_{\text{Termo,efet}} = T_{\text{Termo},1} \quad (13)$$

$$u_d = u_{d,1} \quad (14)$$

As equações (9) e (10) podem ser usadas para o cálculo de T_{efet} e u_{efet} . Finalmente, “(4)” pode ser usada para o cálculo da temperatura da superfície T_p . Sua incerteza u_p pode ser calculada como :

$$u_p = T_p \cdot \sqrt{\left(\frac{u_\varepsilon}{4\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{u_{\text{efet}}}{T_{\text{efet}}}\right)^2} \quad (15)$$

C. Medição independente da emissividade

Uma medição independente da emissividade foi feita para verificar os valores determinados pelo termovisor. A metodologia segue a teoria da transferência de calor por radiação entre dois cilindros concêntricos de comprimento finito (147 mm), tendo vácuo na região anular [7].

O mesmo procedimento foi adotado em [1], porém com ar na região anular. Foi verificado que a incerteza na determinação do coeficiente de transferência de calor por convecção natural na região anular era responsável pela incerteza elevada da emissividade.

O desenvolvimento teórico seguiu [7], considerando que as bases da região anular, representadas pelos índices “3” e “4”, estão isoladas do meio exterior, tendo áreas, respectivamente, A_3 e A_4 . Assim, estas superfícies são consideradas superfícies re-radiantes. A superfície externa do cilindro interno A_1 é pintada de preto, da mesma forma que a placa no banho de temperatura controlada usada para medir a emissividade com o termovisor, tem diâmetro de 21 mm, sendo representada pelo índice “1”. A superfície interna do cilindro externo A_2 é pintada de preto, tem um diâmetro de 52 mm, sendo representada pelo índice “2”. Assim, as duas superfícies têm uma mesma emissividade $\varepsilon = \varepsilon_1 = \varepsilon_2$. O comprimento dos cilindros é 147 mm. A Fig. 3 apresenta o sistema utilizado.

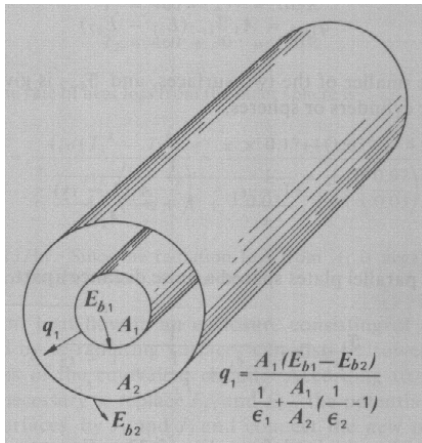


Figura 3 : Transferência de calor por radiação entre dois cilindros infinitos concêntricos [7].

Na Fig.3 $E_b = \sigma \cdot T^4$ é a potência emissiva do corpo negro, e $\sigma = 5,6697E-08 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ é a constante de Stefan-Boltzman.

Quando os cilindros são finitos, a expressão da Fig. 3 deve ser modificada para :

$$q_1 = \frac{A_1 \cdot (E_{b1} - E_{b2})}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \cdot \frac{A_1}{A_2} + R \cdot A_1} \quad (16)$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_{132}} + \frac{1}{R_{142}} \quad (17)$$

$$R_{12} = \frac{1}{A_1 \cdot F_{12}} \quad (18)$$

$$R_{132} = \frac{1}{A_1 \cdot F_{13}} + \frac{1}{A_2 \cdot F_{23}} \quad (19)$$

$$R_{142} = \frac{1}{A_1 \cdot F_{14}} + \frac{1}{A_2 \cdot F_{24}} \quad (20)$$

onde F_{ij} é fator de forma, ou seja, fração da energia radiante que parte da superfície i e chega na superfície j . Estes fatores de forma podem ser determinados pela metodologia descrita em [8].

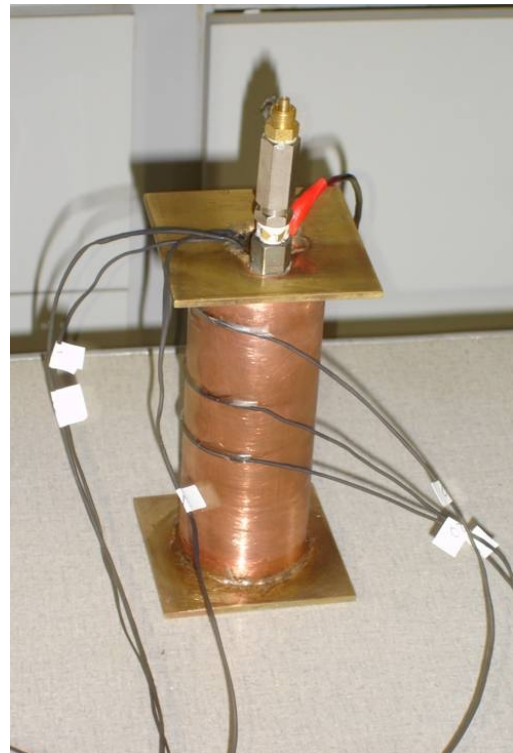


Figura 4 : Dispositivo experimental para medição da Emissividade, PUC-Rio

A Fig. 4 mostra o dispositivo experimental desenvolvido na PUC-Rio. Nela podem-se ver duas bases feitas de material isolante, uma válvula para fazer o vácuo na região anular, e três termopares calibrados em cada superfície para medição da temperatura das superfícies “1” e “2”. Uma resistência elétrica é colocada no interior do cilindro interno, aquecendo a sua superfície. Teoricamente, toda energia dissipada na resistência por efeito Joule é transferida por radiação entre os dois cilindros e então para o meio ambiente.

Para as dimensões do dispositivo, a Tabela 2 apresenta os valores calculados das resistências e fatores de forma.

Tabela 2 : Fatores de forma e resistências

Fatores de Forma				Resistências	
F ₂₁	0,3742	F ₁₁	0,0000	R ₁₂	111,28
F ₂₂	0,5096	F ₁₂	0,9266	R ₁₃₂	12497
F ₂₃	0,0581	F ₁₃	0,0367	R ₁₄₂	3526,3
F ₂₄	0,0581	F ₁₄	0,0367	R	106,95
F ₄₁	0,2003	F ₃₁	0,2003	RA ₁	1,0373
F ₄₂	0,7847	F ₃₂	0,7847		
F ₄₃	0,0150	F ₃₃	0,0000		
F ₄₄	0,0000	F ₃₄	0,0150		

IV. RESULTADOS

A.. Calibração do termovisor contra o corpo negro do INMETRO

Dez medições para cada temperatura, na faixa de 25 a 150 °C , foram feitas para se testar a repetitividade, totalizando 14 pontos. O método dos mínimos quadrados foi utilizado para relacionar a temperatura indicada pelo termovisor, T_{Termo} com a do padrão T_{padrão}, “(1)”, que tem uma incerteza estimada de U_{padrão} = ± 1 °C, ou u_{padrão} = ± 0,5 °C. Os resultados são :

$$A = 0,193363 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (21)$$

$$B = 0,988942 \quad (22)$$

$$u_{ajuste} = 0,041 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (23)$$

A dispersão típica do termovisor, na faixa de calibração, se encontra na faixa 0,20 °C ≤ u_d ≤ 0,30 °C.

B. Medição da emissividade da superfície na PUC-Rio

Usando o dispositivo desenvolvido na PUC-Rio, o termovisor foi utilizado para medir a temperatura da placa colocada em um banho de temperatura controlada.

A Tabela 3 apresenta os resultados da medição, com a temperatura média e a incerteza calculadas por “(5)” e “(6)”

Três (3) medições foram feitas pelo termovisor para cada valor de temperatura da placa. As equações (7), (8), (9), (10), (11) e (12) foram utilizadas, com os resultados apresentados na Tabela 4. A incerteza de medição (U_{efet} = 2. u_{efet}) da temperatura com o termovisor está na faixa de 1,1 °C ≤ U_{efet} ≤ 1,4 °C.

Pode-se observar que acima de 70 °C a emissividade permanece aproximadamente constante em torno de ε = 0,96, com incerteza de U_ε = ± 0,01. Desta forma, conseguiu-se medir a emissividade da placa no dispositivo da PUC-Rio. Este valor será utilizado para medição da temperatura pelo termovisor.

Tabela 3 : Calibração do termovisor. Temperatura média da superfície medida com os termopares.

Temperatura média da superfície medida com os termopares (°C)					
T ₁	T ₂	T ₃	T _p	Dif.Max.	U _p
25,01	24,98	24,94	24,98	0,07	0,14
34,00	33,94	34,00	33,98	0,06	0,14
44,49	44,40	44,56	44,48	0,15	0,14
54,11	53,96	54,16	54,08	0,20	0,14
63,70	63,69	64,02	63,81	0,32	0,14
73,69	73,49	73,93	73,70	0,44	0,14
83,06	83,20	83,85	83,37	0,79	0,14
92,92	92,67	93,67	93,08	1,00	0,14
82,77	82,67	82,88	82,77	0,21	0,14
92,18	92,13	92,56	92,29	0,43	0,14
101,05	100,97	101,84	101,29	0,87	0,14
110,12	110,17	111,35	110,55	1,23	0,14
120,40	120,31	121,66	120,79	1,35	0,14
120,52	120,50	121,87	120,96	1,38	0,14
130,04	129,86	131,35	130,42	1,49	0,14
139,91	139,70	140,81	140,14	1,11	0,14

Tabela 4 : Emissividade da superfície medida com o termovisor

PLACA		TERMOVISOR				Emissividade		
T _p	u _p	INDICADO		CALIBRAÇÃO (ε=1)		ε	u _ε	U _ε
°C	°C	T _{Termovisor}	u _d	T _{efet}	u _{efet}			
		°C	°C	°C	°C			
24,98	0,07	24,72	0,21	24,64	0,54	0,996	0,007	0,015
33,98	0,07	33,51	0,19	33,33	0,54	0,992	0,007	0,014
44,48	0,07	43,79	0,16	43,50	0,53	0,988	0,007	0,013
54,08	0,07	52,58	0,18	52,20	0,53	0,977	0,006	0,013
63,81	0,07	62,15	0,17	61,65	0,53	0,975	0,006	0,012
73,70	0,07	71,62	0,18	71,02	0,53	0,969	0,006	0,012
83,37	0,07	80,84	0,17	80,14	0,53	0,964	0,006	0,012
93,08	0,07	89,62	0,18	88,83	0,53	0,954	0,006	0,011
101,29	0,07	98,97	0,37	98,07	0,62	0,966	0,007	0,013
110,55	0,07	108,09	0,33	107,08	0,60	0,964	0,006	0,012
120,79	0,07	117,88	0,43	116,77	0,66	0,960	0,007	0,013
130,42	0,07	127,23	0,49	126,01	0,70	0,957	0,007	0,013
140,14	0,07	137,46	0,47	136,14	0,69	0,962	0,006	0,013

C. Medição da temperatura com o termovisor

Uma vez conhecida a emissividade da placa e a calibração do termovisor contra um corpo negro do INMETRO, a incerteza de medição de temperatura com o termovisor foi estimada para cada uma das temperaturas da placa, e cada uma das três (3) vezes medidas.

Pode-se observar que até aproximadamente 120 °C a incerteza é inferior a ± 2,0 °C , conforme declarado pelo fabricante. A partir deste ponto, a incerteza aumenta gra-

dativamente, porém inferior a 2 %, conforme declarado pelo fabricante.

D. Medição independente de emissividade

Para a medição da emissividade, um experimento foi conduzido, colocando-se uma resistência medida de 3,18 Ω dentro do cilindro interno, alimentada por uma fonte AC, totalizando 6,09 W. Testes realizados mostraram que a resistência não variou com a temperatura na faixa em questão e dentro da incerteza de medição. Foi feito um vácuo de 0,001 mbar no espaço anular, e quando a estabilização foi atingida após 2 horas, as temperaturas das superfícies dos cilindros interno e externo foram medidas. A Tabela 8 apresenta os resultados.

Tabela 5 : Incerteza de medição da temperatura com o termovisor. 1º Conjunto de dados

$T_{\text{termovisor}}$ °C	u_d °C	T_{efet} °C	u_{efet} °C	ϵ	u_ϵ	T_p °C	u_p °C	U_p °C
24,75	0,37	24,75	0,37	0,996	0,007	25,08	0,66	1,3
33,49	0,35	33,49	0,35	0,992	0,007	34,14	0,65	1,3
43,64	0,31	43,64	0,31	0,988	0,007	44,62	0,62	1,2
52,34	0,33	52,34	0,33	0,977	0,006	54,22	0,63	1,3
62,02	0,23	62,02	0,23	0,975	0,006	64,18	0,59	1,2
71,50	0,28	71,50	0,28	0,969	0,006	74,19	0,61	1,2
81,04	0,28	81,04	0,28	0,964	0,006	84,27	0,61	1,2
90,03	0,31	90,03	0,31	0,954	0,006	94,30	0,63	1,3
99,14	0,54	99,14	0,54	0,966	0,007	102,37	0,84	1,7
108,14	0,71	108,14	0,71	0,964	0,006	111,61	0,94	1,9
117,86	0,78	117,86	0,78	0,960	0,007	121,89	1,04	2,1
127,31	0,90	127,31	0,90	0,957	0,007	131,73	1,15	2,3
137,63	0,76	137,63	0,76	0,962	0,006	141,65	1,04	2,1

Tabela 6 : Incerteza de medição da temperatura com o termovisor. 2º Conjunto de dados.

$T_{\text{termovisor}}$ °C	u_d °C	T_{efet} °C	u_{efet} °C	ϵ	u_ϵ	T_p °C	u_p °C	U_p °C
24,88	0,34	24,88	0,34	0,996	0,007	25,21	0,65	1,3
33,49	0,35	33,49	0,35	0,992	0,007	34,14	0,65	1,3
43,86	0,26	43,86	0,26	0,988	0,007	44,84	0,59	1,2
52,93	0,31	52,93	0,31	0,977	0,006	54,82	0,62	1,2
62,22	0,31	62,22	0,31	0,975	0,006	64,38	0,62	1,2
71,65	0,37	71,65	0,37	0,969	0,006	74,34	0,66	1,3
80,78	0,29	80,78	0,29	0,964	0,006	84,01	0,61	1,2
90,23	0,28	90,23	0,28	0,954	0,006	94,50	0,61	1,2
98,89	0,59	98,89	0,59	0,966	0,007	102,12	0,87	1,7
108,06	0,61	108,06	0,61	0,964	0,006	111,53	0,87	1,7
117,89	0,80	117,89	0,80	0,960	0,007	121,92	1,05	2,1
127,07	0,77	127,07	0,77	0,957	0,007	131,49	1,05	2,1
137,65	0,85	137,65	0,85	0,962	0,006	141,67	1,11	2,2

Tabela 7 : Incerteza de medição da temperatura com o termovisor. 3º Conjunto de dados.

$T_{\text{termovisor}}$ °C	u_d °C	T_{efet} °C	u_{efet} °C	ϵ	u_ϵ	T_p °C	u_p °C	U_p °C
24,54	0,38	24,54	0,38	0,996	0,007	24,87	0,67	1,3
33,55	0,29	33,55	0,29	0,992	0,007	34,20	0,62	1,2
43,88	0,25	43,88	0,25	0,988	0,007	44,86	0,59	1,2
52,48	0,29	52,48	0,29	0,977	0,006	54,36	0,61	1,2
62,20	0,34	62,20	0,34	0,975	0,006	64,36	0,64	1,3
71,70	0,25	71,70	0,25	0,969	0,006	74,39	0,60	1,2
80,71	0,29	80,71	0,29	0,964	0,006	83,94	0,61	1,2
88,61	0,32	88,61	0,32	0,954	0,006	92,87	0,63	1,3
98,87	0,58	98,87	0,58	0,966	0,007	102,10	0,86	1,7
108,06	0,61	108,06	0,61	0,964	0,006	111,53	0,87	1,7
117,88	0,67	117,88	0,67	0,960	0,007	121,91	0,95	1,9
127,30	0,86	127,30	0,86	0,957	0,007	131,72	1,12	2,2
137,11	0,85	137,11	0,85	0,962	0,006	141,12	1,11	2,2

Como pode ser observado, o valor medido de emissividade foi maior do que 1. Como a potência radiante teórica para $\epsilon = 0,96$ é 5,36 W (segundo a formulação descrita anteriormente), concluiu-se que a diferença (0,73 W) para

a potência térmica dissipada pela resistência (6,09 W) poderia ser considerada como perdas pelas bases ou incerteza de medição. Desta forma, uma investigação mais detalhada da discrepância deve ser feita para qualificar o medidor.

A literatura mostra que o uso de uma esfera integradora com um espectrofotômetro pode determinar a emissividade espectral e, portanto, a variação da emissividade total como função da temperatura. Este método, entretanto, não foi considerado neste estudo devido ao seu alto custo e indisponibilidade por muitos usuários.

Uma outra forma de medição independente da emissividade é pelo método comparativo, desde que se conheça a emissividade de um padrão medida por outro método independente. A PUC-Rio possui um forno em que a energia necessária para manter a temperatura constante da superfície absorvedora de radiação é medida. Por comparação com o padrão pode-se estimar a emissividade das diferentes superfícies.

Como conclusão deste estudo, a utilização do termovisor parece ser atualmente o método mais confiável de medição da emissividade da superfície

Tabela 8 : Medição da emissividade

Grandeza	Símbolo	Unidade	Valor
Potência térmica	q_1	W	6,09
Área da superfície interna	A_1	m ²	0,009698
Área da superfície externa	A_2	m ²	0,024014
Temperatura da superfície interna	T_1	°C	108,49
Temperatura da superfície externa	T_2	°C	47,29
Emissividade	ϵ		1,06
Potência radiante teórica para $\epsilon = 0,96$	q_r	W	5,36
Perdas estimadas para $\epsilon = 0,96$	q_p	W	0,73

V. CONCLUSÕES

Uma metodologia experimental foi desenvolvida para calibrar termovisores, calculando a incerteza de medição e a emissividade. Chegou-se à conclusão que as incertezas estimadas estão de acordo com os valores especificados pelo fabricante. Mais ainda, uma placa colocada num banho de temperatura controlada pode ser usada para calibrar o termovisor, necessitando apenas que o termovisor seja comparado com um corpo negro para que os erros sistemáticos sejam minimizados. Uma medição independente da emissividade deverá ter seu desenvolvimento completado para maior confiabilidade da temperatura.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Orlando, A.F. et ali, Determinação Experimental da Emissividade de Superfícies, in VIII Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, VIII COBEM, São José dos Campos. 1985

- [2] Orlando,A.F. et alli,2003, “Calibração de um TermômetroPt-100 como Padrão de Trabalho de um Laboratório de Serviços Metro-lógicos”. In *Metrologia 2003*. Recife, 2003
- [3] Holman, J.P. , *Experimental Methods for Engineers*, New York : McGraw-Hill, 1971
- [4] Benedict,R.P, *Fundamentals of Temperature, Pressure, and Flow Measurements*, New York : Wiley Intersciences, 1977.
- [5] INMETRO, *Guia para expressão da incerteza de medição*, Rio de Janeiro : INMETRO, 1997.
- [6] Chaves,C.E.O., 2004, “Confiabilidade Metroológica da medição de elevadas temperaturas em processos industriais”, Dissertação de Mestrado, MQI, PUC-Rio, 2004.
- [7] Kreith, F., *Principles of Heat Transfer*, New York : Intext, 1973
- [8] Siegel, R. and Howell, J.R., *Thermal Radiation Heat Transfer*, New York : McGraw-Hill, 1972
- [9] Costa, H.S.A., *Calibração de um termovisor para planejamento de manutenção*, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio, 2007.