



MÉTODO DE MEDIÇÃO DE EMISSIVIDADE EXEQUÍVEL EM CAMPO SEM A NECESSIDADE DE CONTATO FÍSICO

Juan C. D. Demuner

Jussara F. Fardin

dd.juancarlos@gmail.com

jussara.fardin@ufes.br

Depto. de Pós Graduação em Engenharia Elétrica de Universidade Federal do Espírito Santo
Av. Fernando Ferrari, 514 – CEP: 29.075-910, Vitória, Espírito Santo, Brasil

Pablo R. Muniz

Letícia C. Gomes

pablorm@ifes.edu.br

lee.colombi@gmail.com

Coord. de Engenharia Elétrica do Instituto Federal do Espírito Santo – *Campus* Vitória.

Avenida Vitória, nº 1729 – CEP: 29.040-780, Vitória, Espírito Santo, Brasil

Abstract. Due to the importance in the emissivity thermographic analyzes, this paper proposes a method to estimate the emissivity of a surface without the need for physical contact. The proposed method is to perform three measurements apparent temperature of the surface inspected with and without an external heat source. The results are used as input data into a computer program developed based on Planck's Law and the employee Imager features. From the computer program is estimated the emissivity of the surface in question and its uncertainty. To validate the proposed method, experiments were conducted in a controlled environment whose results indicate consistency with the expected values, a much lower level of uncertainty to the emissivity tables of queries available in the literature.

Keywords: *Termografia, Emissividade, Inspeção Preditiva.*

1. INTRODUÇÃO

A termografia infravermelha é uma técnica em que se mapeia termicamente um corpo ou região. É uma importante ferramenta empregada em diversas áreas tecnológicas, se destacando no auxílio à manutenção preditiva, em especial à manutenção elétrica, propiciando inspeções não intrusivas, minimizando riscos de acidente e redução dos custos de manutenção (Togawa, 1989; Muniz, 2014; Jadin & Taib, 2012).

Para obtenção de imagens térmicas são utilizados instrumentos denominados câmeras termográficas ou termovisores. Para estimar a temperatura superficial do objeto, o aparelho carece de informações como: distância entre o termovisor e o objeto, temperatura e umidade relativa atmosféricas, além da emissividade da superfície. Dessas, a emissividade responde por 80% da incerteza na estimativa da temperatura (Muniz et al., 2014). Com essa necessidade, diversas técnicas foram desenvolvidas com intuito de obter os valores de emissividade, dentre elas destacam-se principalmente os métodos de simulação de corpo negro e condições com temperatura conhecida (Perin, 2009; Holman, 2011). Todos esses métodos necessitam de interação física com a superfície analisada. Neste contexto o presente artigo visa obter um método de estimativa da emissividade de superfícies sem a necessidade de contato físico, podendo ser feito em campo com o equipamento em operação, visando à aplicação em instalações elétricas.

2. DESENVOLVIMENTO MATEMÁTICO

A radiação total proveniente de uma superfície inspecionada corresponde à soma da radiação emitida pela própria superfície com a parcela por ela refletida proveniente do ambiente (Chrzanowski, 2001; Vollmer & Mollmann, 2010). Considerando E_b a componente da radiação emitida pelo objeto e G a parcela refletida por este, a radiação total J , também denominada radiosidade total, dá-se pela equação:

$$J = \varepsilon E_b + \rho G \quad (1)$$

Onde ε é a emissividade da superfície e a componente ρ está associada ao valor da refletividade do objeto. No entanto, a emissividade é fator complementar à refletividade, princípio representado pela Equação (2) (Incropera et al., 2007).

$$\rho = 1 - \varepsilon \quad (2)$$

Dessa forma, é possível reescrever a Equação (1) como:

$$J = \varepsilon E_b + (1 - \varepsilon) G \quad (3)$$

As componentes E_b , G e J são obtidas através da Lei de Planck, a qual descreve a emissão de radiação do corpo negro relacionando a distribuição espectral da radiação emitida por ele a uma determinada temperatura absoluta (T), por unidade de área, por unidade de comprimento de onda (λ) descrita pela Equação(4) (Vollmer & Mollmann, 2010).

De acordo com a Lei de Planck, a excitância espectral $M_\lambda(T)$ expressa à potência de radiação térmica, adquirindo seus valores máximos dentro da faixa de comprimento de onda contida no espectro infravermelho, (1 a 20) μm . Dessa forma, a radiosidade total para uma dada temperatura será obtida através da integração de toda a faixa de frequência operacional do termovisor (Muniz, 2014).

$$M_\lambda(T) = \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k \cdot T}} - 1 \right)} \quad (4)$$

Onde h é a constante de Planck, $6,62606957 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$; c é a velocidade da luz no vácuo, $2,9979246 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ e k é a constante de Boltzmann, $1,3806488 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$.

Por conseguinte, a estimativa da emissividade é dada a partir da Equação (3), que pode ser rescrita evidenciando o termo ε conforme a Equação (5).

$$\varepsilon = \frac{J - G}{E_b - G} \quad (5)$$

A fim de avaliar a qualidade do resultado obtido, faz-se necessário obter a incerteza associada à emissividade calculada. Analisando cada parâmetro da Equação (5), observa-se que a radiação total J apresenta forte correlação com a irradiação refletida G , visto que a radiação refletida por um corpo é parte componente da radiação total captada pelo termovisor. De maneira conservadora, as variáveis são consideradas diretamente correlacionadas. De maneira adversa, a radiação incidente G é dita independente da radiação característica do objeto, E_b . Portanto, o denominador da Equação (5) possui variáveis não correlacionadas.

O numerador e o denominador da razão entre as subtrações na Equação (5) mostram-se como grandezas correlacionadas. Dessa forma, a incerteza relativa resultante da divisão entre as grandezas que determinam a emissividade é dada pela Equação (6). Ela descreve a divisão de variáveis correlacionadas envolvidas (Albertazzi & Sousa, 2008; Joint Committee for Guides in Metrology, 2008).

$$u_r\left(\frac{J - G}{E_b - G}\right) = \left| \frac{|u(J) + u(G)|}{J - G} - \frac{\sqrt{u(E_b)^2 + u(G)^2}}{E_b - G} \right| \quad (6)$$

Na Equação (6), $\frac{|u(J) + u(G)|}{J - G}$ corresponde à razão entre a incerteza resultante da diferença entre a radiação total (J) e irradiação (G) sendo estas correlacionadas diretamente. Já a variável $\frac{\sqrt{u(E_b)^2 + u(G)^2}}{E_b - G}$ equivale a razão entre incerteza resultante da diferença entre a radiação de Corpo Negro (E_b) e irradiação (G), sendo essas duas ultimas propriedades não correlacionadas.

3. MÉTODO PROPOSTO

O método está dividido em três etapas de medidas e cálculos. Na primeira etapa, é calculada a radiação emitida E_b . Na segunda etapa é calculada a radiação refletida pelo objeto G , mantendo as condições anteriores do corpo e do ambiente. Nesta etapa propõe-se então direcionar a fonte de radiação térmica para o termovisor, a fim de calcular a radiação G refletida pelo corpo, alusiva ao ambiente. Na última etapa propõe-se direcionar a fonte de radiação térmica para o sistema inspecionado, calculando a radiação total captada J .

Para calcular a radiação em todas as etapas é necessária a medição da temperatura, feita com um termovisor. Por fim, utilizando a Lei de Planck, Equação (4), e integrando a faixa de comprimento de onda do termovisor utilizado, obtém-se a radiação característica para as três etapas do método.

Após as três etapas de medidas e os cálculos, a emissividade é obtida com o emprego da Equação (5). O cálculo da emissividade foi implementado usando a Plataforma MATLAB¹. Nele as variáveis de entrada são os valores de temperatura medidos pelo termovisor, bem

¹ MatLab é uma linguagem técnica computacional utilizada para resoluções de problema matemáticos com interface computacional. A versão utilizada é 7.8.0.347.

como a incerteza típica de medição associada a cada uma das três etapas. Como dado de saída o programa fornece as respectivas radiações e a emissividade da superfície. Em ambos os resultados a incerteza associada do objeto inspecionado é calculada.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para fins de aplicação do método, foi realizado um experimento cujo material escolhido foi uma placa de aço galvanizado aquecida através de circulação de corrente elétrica. Para variar a influência externa, foi utilizada como fonte de radiação uma placa de aquecimento marca Quimis, modelo Q-261-22, 220 V, 552 W, com controle de temperatura. Para as imagens térmicas foi utilizado um termovisor Flir BCAM SD, operando na faixa de (8 a 13) μm , distante 0,8 m da placa de aço galvanizado.

Cada medição de temperatura foi realizada cinco vezes. Segundo Martins (2010), essa quantidade representa um número amostral pequeno, porém satisfatório para análise dos resultados, conforme Tabela 1. Os resultados das medições de temperatura bem como a incerteza padrão típica de 1,9 °C (Muniz et al., 2014), são dados de entrada do programa implementado.

Tabela 1. Dados obtidos experimentalmente e resultados do cálculo da radiação

Medição	Temperatura aparente do objeto – medida pelo termovisor / °C	Radiação recebida pelo termovisor/ $\text{W.m}^{-2}.\mu\text{m}^{-1}$	Temperatura da fonte de calor / °C	Radiação associada à fonte de calor / $\text{W.m}^{-2}.\mu\text{m}^{-1}$	Emissividade estimada
1	35,5 ± 1,9	4,09.10 ⁻¹⁴	-	-	0,51 ± 0,03
	105,9 ± 1,9	5,06.10 ⁻¹⁴	179 ± 1,9	6,03.10 ⁻¹⁴	
2	35,9 ± 1,9	4,12.10 ⁻¹⁴	-	-	0,50 ± 0,03
	107,6 ± 1,9	5,08.10 ⁻¹⁴	179 ± 1,9	6,03.10 ⁻¹⁴	
3	35,7 ± 1,9	4,12.10 ⁻¹⁴	-	-	0,50 ± 0,03
	106,9 ± 1,9	5,07.10 ⁻¹⁴	179 ± 1,9	6,03.10 ⁻¹⁴	
4	35,6 ± 1,9	4,12.10 ⁻¹⁴	-	-	0,53 ± 0,02
	103,2 ± 1,9	5,02.10 ⁻¹⁴	179 ± 1,9	6,03.10 ⁻¹⁴	
	36,1 ± 1,9	4,13.10 ⁻¹⁴	-	-	
5	100,9 ± 1,9	4,99.10 ⁻¹⁴	179 ± 1,9	6,03.10 ⁻¹⁴	0,55 ± 0,02

Com os experimentos realizados e considerando a independência entre as medições pode-se afirmar que o valor médio de emissividade é 0,52 com incerteza resultante de 0,06.

Para fins de comparação, a estimativa da emissividade do corpo se deu por aplicação do método de simulação de corpo negro (Perin, 2009; Holman, 2011) estimando para a amostra o valor de 0,57. Outra forma de analisar o resultado obtido é por meio de tabelas de emissividade disponíveis na literatura. Consultando a tabela (Contemp, [s.d.]) para o mesmo material com acabamento superficial “placa oxidada” são encontrados valores que variam de 0,23 a 0,85 para diferentes temperaturas e espectros, ficando a cargo do termografista a escolha do valor a ser utilizado. Assim o método proposto é eficaz no estudo de caso, pois convergem para uma mesma faixa de valor de emissividade, considerando incertezas de medição e aproximações numéricas. Além disso, a metodologia proposta leva a um resultado único, obtido em função do próprio termovisor a ser empregado na inspeção preditiva, tornando mais assertiva e confiável à análise termográfica.

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste artigo são preliminares, pois ainda estão sendo realizados estudos e experimentos com maior variedade de materiais visando aperfeiçoar as técnicas empregadas. Contudo, pode-se concluir que a metodologia deste artigo leva a resultados satisfatórios quando comparados com os métodos comumente utilizados. Além disso, a metodologia proposta destaca-se por não necessitar do contato direto com a superfície da amostra, o que torna o procedimento seguro e operacional permitindo que este seja exequível em campo sem a necessidade de desenergizar o equipamento ou retirá-lo de operação.

REFERÊNCIAS

- Albertazzi, A., & Sousa, A. R., 2008. *Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial*. Manole.
- Azevedo, L. C. S., & Silva Junior, A. M. G., 2012. Uso da termografia na manutenção preditiva. *Revista de Divulgação do Projeto Universidade Petrobras e IF Fluminense*, vol. 2, pp. 155-158.
- Chrzanowski, K., 2001. *Non-Contact Thermometry –Measurement Errors*. RDT Series. CONTEMP., s.d. *Adendo: Tabelas de Emissividade*.
- Holman, J. P., 2011. *Experimental Methods for Engineers*. Mc Graw Hill.
- Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S., 2007. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John Wiley & Sons.
- Jadin, M. S., & Taib, S., 2012. Recent progress in diagnosing the reliability of electrical equipment by using infrared thermography. *Infrared Physics & Technology*, vol. 55, n. 4, pp. 236-245.
- JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY., 2008. *Evaluation of measurement data: Guide to the expression of uncertainty in measurement*.
- Martins, M. A. F., 2010. *Contribuições para a avaliação da incerteza de medição no regime estacionário*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal da Bahia/Salvador.
- Muniz, P. R., 2014. *Influência dos instrumentos, do ângulo de visada e do campo de visão do termovisor na execução de termografia por infravermelhos aplicada à manutenção elétrica*. Tese de doutorado, Universidade Federal da Bahia/Salvador.
- Muniz, P. R., Kalid, R. A., Cani, S. P. N., & Magalhães, R. S., 2012. Handy method to estimate uncertainty of temperature measurement by infrared thermography. *Optical Engineering*, vol. 53, n. 7, pp. 01-07.
- Perin, A. L., 2009. *Desenvolvimento de um equipamento para medição de emissividade*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul/Porto Alegre.
- Togawa, T., 1989. Non-contact skin emissivity: measurement from reflectance using step change in ambient radiation temperature. *Clinical physics and physiological measurement : an official journal of the Hospital Physicists' Association, Deutsche Gesellschaft für Medizinische Physik and the European Federation of Organisations for Medical Physics*, vol. 10, n. 1, p. 39–48.
- Vollmer, M., & Möllmann, K. P., 2010. *Infrared thermal imaging*. Wiley-VCH.