

CONSIDERAÇÕES SOBRE A CALIBRAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE PIRÔMETROS DE RADIAÇÃO QUE OPERAM EM UMA BANDA DO INFRAVERMELHO E PROPOSTA DE NORMA TÉCNICA

Juliano Augusto Dillenburg - dill@mecanica.ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Nuclear
Av. Osvaldo Aranha 99, 4º andar, CEP: 90460-900 Porto Alegre, RS, Brasil.

Milton Antonio Zaro – zaro@mecanica.ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Mecânica
Rua Sarmiento Leite, 425, CEP: 90050-170, P. Alegre, RS, Brasil.

Horácio Antonio Vielmo – vielmoh@mecanica.ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Mecânica
Rua Sarmiento Leite, 425, CEP: 90050-170, P. Alegre, RS, Brasil.

***Resumo.** São propostos procedimentos de calibração e caracterização de pirômetros que operam em uma banda do espectro de infravermelho. Tendo em vista a não existência de norma brasileira e a deficiência da norma internacional (ASTM E1256-95), espera-se que estas considerações venham a subsidiar uma necessária discussão sobre a criação de uma norma brasileira para este tipo de procedimento.*

Palavras-Chave: Calibração, Temperatura, Pirometria, Emissividade, Radiação

1. INTRODUÇÃO

Pirômetros de infravermelho, ou termômetros de radiação infravermelha são usados em uma ampla gama de aplicações no controle de temperatura em aplicações industriais e em laboratórios de pesquisa. Exemplos de aplicação em baixas temperaturas incluem: laminação, extrusão, cura de plásticos, papel, borrachas, resinas, tintas, etc. Exemplos de aplicação em altas temperaturas incluem: fundição, forjamento, tratamento térmico de metais, calcinação de cerâmicas, etc.

Em virtude da necessidade de calibração dos pirômetros, faz-se necessário o estabelecimento de uma norma que padronize os procedimentos, e os critérios de classificação e especificação dos referidos instrumentos. Neste artigo é apresentada uma sugestão de norma baseada nas normas ASTM E1256-88 e E1256-95, “Standart Test Methods for Radiation Thermometers (Single Waveband Type)”, que estabelecem critérios de avaliação de desempenho de pirômetros de uma banda de comprimento de onda, para utilização por usuários ou fabricantes destes instrumentos. São incluídas modificações significativas em relação às normas da ASTM, modificações estas que permitem obter a calibração de pirômetros para a medição de corpos reais em ambientes industriais.

2. PIRÔMETROS: UMA TEORIA GERAL DOS INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA POR RADIAÇÃO

A incerteza de medição total de uma medição utilizando um pirômetro de radiação depende, segundo autores referidos na revisão bibliográfica*, dos seguintes fatores:

- a) Incerteza causada pela atenuação atmosférica da radiação entre o alvo e o pirômetro^{1,2}.
- b) Radiação de fundo (da vizinhança) desconhecida refletida pelo alvo e detectada pelo pirômetro^{1,2,3}.
- c) Incerteza de medição do próprio pirômetro¹.
- d) Incerteza na emissividade do alvo¹.
- e) Emissão de radiação dos gases da atmosfera entre o alvo e o pirômetro^{2,3}.
- f) Flutuação da temperatura ambiente em que se encontra o pirômetro^{4,5,6}.

Além dos fatores encontrados na bibliografia, pode-se constatar que os seguintes fatores também influenciam no resultado da medida de temperatura com a utilização de pirômetros, e que portanto devem ser levados em conta:

- g) A velocidade de medição do instrumento.
- h) A não homogeneidade da temperatura do alvo.
- i) Calibração do pirômetro em emissividade diferente da utilizada para medição de alvos reais.

O item f, se deduz pelas características físicas de desempenho de sensores encontradas em parte da bibliografia que fala sobre o assunto e poucas vezes citada em manuais por fabricantes de pirômetros, um detalhe que, por isso, pode passar despercebido pelo usuário e pode ser de fundamental importância na medição correta da temperatura.

Em muitos casos, os efeitos da atenuação atmosférica, da emissão atmosférica e da radiação de fundo, podem ser negligenciados ou podem ser minimizados usando-se barreiras à radiação reflexa, ou escolhendo comprimentos de onda apropriados.

Os erros causados pela incerteza de medição do próprio instrumento são usualmente da ordem de 0,5 a 2% do fundo de escala.

Para a medição de objetos reais, é necessário para a maioria dos pirômetros, o conhecimento do valor da emissividade do alvo. Várias técnicas têm sido utilizadas, investigadas e propostas, para a medição da emissividade, ou ainda para a eliminação da necessidade de seu conhecimento; dentre estas técnicas pode-se citar: termometria de multicomprimento de onda e de duplo comprimento de onda; técnicas de medição de reflectância e absorptância; pirometria acústica.

A velocidade de medição do instrumento é relevante na medição de objetos em movimento, pois neste caso, se esta é inadequada, o pirômetro não indicará a temperatura do objeto de medição (alvo), mas sim uma temperatura média entre o objeto de medição e o ambiente no entorno, ou ainda poderá não captar a passagem do objeto de medição (alvo) por

* Bibliografia

¹ Corwin e Rodenburgh II, 1994.

² DeWitt, 1986.

³ Zissis, 1976.

⁴ Raytek, 1997.

⁵ Cal Sensors, 1998.

⁶ Budde, 1983.

sua área útil de foco.

A não homogeneidade da temperatura do alvo, como ocorre no caso peças oxidadas a alta temperatura em que ocorre a formação da “carepa”, ocasiona a indicação por parte do pirômetro de uma temperatura média, que para o exemplo citado seria menor que a temperatura da peça. Por isso, se faz necessário uma escolha adequada do sistema óptico do pirômetro de modo a proporcionar uma área útil de foco adequada (Dillenburg, 1999a), além de uma limpeza periódica das lentes de modo a remover a fuligem comum em ambientes industriais e que provoca efeito idêntico a “carepa”.

A calibração do pirômetro contra corpos negros (emissividade próxima de 1), não garante que o instrumento esteja calibrado para a medição de alvos reais cuja emissividade é diferente da unidade. Pode ocorrer o caso em pirômetros não microprocessados, que a temperatura indicada para um corpo negro esteja correta, mas quando da medição de corpos reais, com a emissividade corretamente ajustada, o valor seja incorreto ou ainda sejam obtidos resultados diferentes dos obtidos por outros pirômetros de mesmo fabricante e modelo.

Levando em consideração os aspectos da necessidade de calibração dos pirômetros na emissividade de trabalho, são propostas modificações na norma ASTM E1256-95, de modo a suprir esta deficiência, que originalmente desqualifica a norma para a sua utilização em pirômetros que meçam a temperatura de alvos com emissividade diferente de 1.

Ainda na proposta de norma apresentada, são incluídos ensaios em diferentes temperaturas de modo a se determinar o efeito da temperatura no comportamento do pirômetro em condições típicas existentes fora dos laboratórios de calibração, onde nem sempre se tem ambientes com temperaturas controladas.

Também é proposta a realização de ensaios que permitam classificar os pirômetros quanto à estabilidade da resposta do instrumento em função da variação brusca da temperatura ambiente. O aspecto da estabilidade com a variação brusca da temperatura é um aspecto importante a ser levado em consideração na utilização dos pirômetros em ambientes fabris. Alguns fabricantes estipulam um tempo mínimo de 45 minutos em um ambiente com temperatura estável, para que se possa medir dentro das especificações de exatidão e reprodutibilidade especificadas.

3. ANTEPROJETO DE NORMA DE CALIBRAÇÃO DE PIRÔMETROS DE UMA BANDA DE COMPRIMENTO DE ONDA

São sugeridos os seguintes critérios de avaliação para a caracterização de pirômetros de uma banda de comprimento de onda:

3.1 Exatidão

Definição:

É o máximo desvio entre a temperatura indicada pelo instrumento a ser calibrado e a temperatura de uma fonte de referência, mais ou menos a incerteza da fonte de referência em relação a escala internacional de temperatura.

Considerações:

- O erro de exatidão pode ser expresso em unidades de temperatura ou porcentagem de fundo de escala.
- O valor de exatidão se refere a toda escala de medição.

- O diâmetro da abertura do corpo negro deve ser igual 1,25 vezes o diâmetro da área útil do foco do pirômetro.
- A emissividade a ser ajustada segue o procedimento constante no item 3.11.
- O teste deve ser feito em três pontos da escala, 10%, 50% e 90 % do fundo de escala. O teste deverá ser repetido três vezes para cada ponto, onde deverá ser calculado o valor médio e o erro correspondentes.
- Neste teste se examina também a exatidão da resposta do pirômetro em diferentes temperaturas ambientes. Para tanto, são necessários a manutenção de quatro ambientes a temperaturas diferentes, ou que a temperatura de um único ambiente seja alterada nos seguintes valores de temperatura ambiente: 10 °C, 20 °C, 30 °C, e 40 °C. O tempo de estabilização do instrumento à temperatura ambiente é de 60 minutos.
- O maior valor do desvio dentre as médias das quatro temperaturas ambientes ensaiadas, será considerado o máximo erro de exatidão, mais ou menos a incerteza da fonte de referência.

3.2 Reprodutibilidade

Definição:

É a variação da indicação do instrumento em uma série de medições, nas mesmas condições e no mesmo intervalo de tempo entre elas.

Considerações:

- O erro de reprodutibilidade pode ser expresso em unidades de temperatura ou porcentagem de fundo de escala.
- O valor de exatidão se refere a toda escala de medição.
- O diâmetro da abertura do corpo negro deve ser igual 1,25 vezes o diâmetro da área útil do foco do pirômetro.
- A emissividade a ser ajustada segue o procedimento constante no item 3.11
- O teste deverá ser feito durante doze dias sucessivos, o ponto de medição deverá ser sempre o mesmo, e cujo valor deverá ser o ponto médio da escala do instrumento. São registradas, as indicações de temperatura de instrumento durante cada teste. O instrumento deveria ser apagado entre cada série de medidas. Opcionalmente o teste pode ser aplicado para outras regiões da escala.
- Neste teste se examina também a reprodutibilidade da resposta do pirômetro em diferentes temperaturas ambientes. Para tanto são necessários a manutenção de quatro ambientes a temperaturas diferentes ou que a temperatura de um único ambiente seja alterada nos seguintes valores de temperatura ambiente: 10 °C, 20 °C, 30 °C, e 40 °C. O tempo de estabilização do instrumento à temperatura ambiente é de 60 minutos.
- O maior valor de desvio padrão amostral dentre as quatro temperaturas ensaiadas, será considerado o máximo erro de reprodutibilidade para o intervalo de temperaturas ensaiadas.

3.3 Resolução em temperatura

Definição:

É a mínima alteração na temperatura do alvo que provoca uma mudança ou alteração na saída ou indicação do instrumento em teste.

Considerações:

- A resolução pode ser expressa em unidades de temperatura ou porcentagem de fundo de escala.
- O valor de resolução é válido para toda escala de medição.

3.4 Limites de resposta espectral

Definição:

Os limites superior e inferior da banda de comprimento de onda para o qual o instrumento responde quando submetido a um fluxo radiante.

Considerações:

- Normalmente os limites são especificados em micrometros (μm) e incluem os efeitos de todos os elementos do sistema óptico.
- Considera-se os limites de resposta espectral, quando a resposta do instrumento equivale a 5% da máxima resposta do instrumento (Figura 1).
- Normalmente a sua determinação exige equipamentos especiais, sendo difícil sua determinação pelos usuários, mas a distribuição pode ser fornecida pelo fabricante do instrumento.

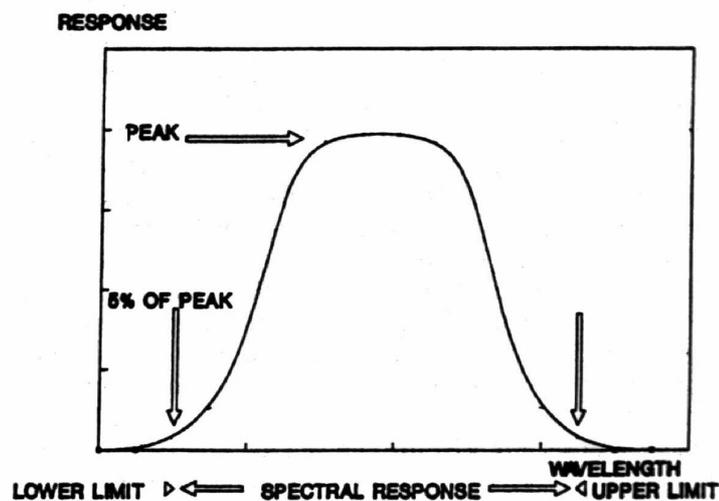


Figura 1 – Limites de Resposta espectral [fonte: ASTM, 1988].

3.5 Determinação do diâmetro da área útil do foco do pirômetro

Definição:

Determinação do diâmetro de um círculo no plano do alvo, perpendicular a linha de centro do sistema óptico do instrumento, e que contém 99 % da potência radiante que chega até o instrumento.

Considerações

- Normalmente este parâmetro é especificado em termos do diâmetro do alvo versus a distância ao alvo (D:S).

- Deve-se utilizar um diâmetro de abertura do corpo negro igual a 2 vezes o diâmetro da área útil do foco do pirômetro esperada.
- Para a determinação dos diâmetros é recomendável a utilização de uma Íris negra tipo diafragma, ou caso não se tenha disponível, de um conjunto de discos negros de várias aberturas (diâmetros internos). O erro causado pelo fato da Íris não ser um corpo negro ideal pode ser considerado insignificante, se a mesma é mantida à temperatura ambiente (20°C) e o corpo de negro usado como fonte estiver acima de 200 °C.
- O corpo negro deve ser ajustado para uma temperatura perto do valor máximo da escala do instrumento. A íris deve ser posicionada na frente do corpo negro e concêntrica com a abertura do corpo negro. A íris é então ajustada para um diâmetro da ordem de 10% do diâmetro esperado para a área útil do foco do pirômetro. A posição do pirômetro é ajustada verticalmente e horizontalmente até se encontrar o máximo valor indicado, mantendo a linha de centro perpendicular a íris. A íris então é aberta até que o valor indicado pelo instrumento pare de aumentar, anota-se então este valor de temperatura. Diminui-se o diâmetro da íris até que a quantidade de radiação decresça de um ΔT , onde

$$\Delta T = 0,01 \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{-C_2}{\lambda_e T}\right) \right] \cdot \left[\frac{\lambda_e T^2}{C_2} \right] \quad (1)$$

Onde: $C_2 = 14388 \mu\text{mK}$; $\lambda_e =$ comprimento de onda efetivo em μm (DeWitt, 1986; Gardner, 1980); $T =$ temperatura absoluta (K).

O valor do diâmetro da área útil do foco do pirômetro para a distância entre o alvo e o pirômetro, é o diâmetro da abertura da íris, de modo que a potência radiante que chega ao pirômetro sofra uma redução de 1 % do seu valor máximo. Este procedimento deve ser repetido para outras distâncias alvo objeto.

3.6 Velocidade de resposta

Definição:

O objetivo deste teste é avaliar o intervalo de tempo requerido para o sinal de saída de um pirômetro chegar a 95 % da resposta final correspondente a alteração brusca da potência radiativa que chega ao pirômetro.

Considerações:

- Temperatura ambiente entre 20°C a 25°C.
- Entre a fonte de radiação e o pirômetro existe um obturador, que no instante do ensaio, a uma velocidade bem superior a velocidade de resposta do pirômetro, permite a passagem da radiação. O tempo necessário para o pirômetro indicar o equivalente a 95 % da resposta final, é o valor da velocidade de resposta.

3.7 Tempo de preparação

Definição:

Este é um procedimento para verificar o intervalo de tempo, após o pirômetro ser ligado, em que o pirômetro fornece o sinal de saída estabilizado e dentro das especificações de reprodutibilidade do pirômetro.

Considerações:

- Temperatura ambiente entre 20°C a 25°C. O pirômetro deve permanecer deve ser desligado e em seguida ligado, permanecendo por um período de 8h no ambiente a temperatura controlada.
- O tempo mínimo do ensaio deverá ser igual a dez vezes o tempo necessário para o pirômetro estabilizar a temperatura dentro do valor de reprodutibilidade especificado.
- O teste deve ser feito em diversas faixas da escala, de modo a representar o máximo valor para qualquer posição da escala.

3.8 Teste de estabilidade com o tempo

Definição:

Este procedimento visa avaliar as alterações na indicação do pirômetro que podem ocorrer ao longo de um período de tempo, que não sejam causadas por influências externas.

Considerações:

- Temperatura ambiente entre 20°C a 25°C, com variação máxima de $\pm 1^\circ\text{C}$.
- O instrumento deve permanecer continuamente ligado por um período de um mês. O resultado é a diferença entre o valor máximo e o valor mínimo registrados no período ensaiado com o instrumento lendo continuamente o valor de uma fonte de referência (corpo negro).
- A estabilidade de um instrumento normalmente é expressa em termos de temperatura ou porcentagem do fundo de escala por unidade de tempo.

3.9 Teste de estabilidade da resposta em função da variação da temperatura ambiente

O objetivo deste teste é avaliar a estabilidade da resposta do pirômetro em função da variação brusca da temperatura ambiente. Os sensores de radiação apresentam um sinal de resposta que varia com a temperatura em que se encontram, os pirômetros costumam apresentar sistemas de compensação de temperatura e/ou blindagem e refrigeração. Este teste pretende avaliar a velocidade de atuação do sistema de compensação de temperatura e a variação da resposta do pirômetro com a variação da temperatura ambiente.

São estabelecidas três classes de pirômetro segundo a estabilidade de sua resposta mediante a uma variação da temperatura ambiente de 15°C. Para a realização do experimento são mantidos dois ambientes distintos, com as temperaturas de $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$, e $(35 \pm 1)^\circ\text{C}$, isolados térmicamente. O instrumento deve ser mantido no ambiente a $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ por duas horas no mínimo, quando então deve ser colocado no ambiente a $(35 \pm 1)^\circ\text{C}$. Serão então efetuadas quatro medidas da temperatura indicadas pelo pirômetro. A primeira medida deve ser feita ao se posicionar o pirômetro no ambiente a $(35 \pm 1)^\circ\text{C}$, sendo a segunda medida feita 1 minuto após a primeira, a terceira 5 minutos e a quarta 15 minutos após a primeira.

As classes dos instrumentos segundo o desempenho de estabilidade de resposta mediante uma alteração brusca da temperatura ambiente, são:

Classe I : recebem esta classificação os pirômetros que respondem a variação de temperatura ambiente proposta de 20 °C para 35 °C, em tempo igual ou inferior a 1 minuto.

Classe II : recebem esta classificação os pirômetros que respondem a variação de temperatura ambiente proposta de 20 °C para 35 °C, em tempo superior a 1 minuto e igual ou inferior a 5 minutos.

Classe III : recebem esta classificação os pirômetros que respondem a variação de temperatura ambiente proposta de 20 °C para 35 °C, em tempo superior a 5 minutos e igual ou inferior a 15 minutos.

Classe IV : recebem esta classificação os pirômetros que respondem a variação de temperatura ambiente proposta de 20 °C para 35 °C, superior a 15 minutos.

3.10 Sobre os limites de erros de exatidão e reprodutibilidade

Sobre os limites dos erros aleatórios (reprodutibilidade) e dos erros sistemáticos (exatidão) faz-se as seguintes observações:

a) Ensaaios realizados pelo mesmo operador, que resultarem no mesmo valor, devem ser considerados suspeitos, ou se qualquer dois resultados para o mesmo parâmetro diferirem por mais que 0,5% do fundo de escala do pirômetro ou 2°C, o que for maior.

b) O usuário deveria consultar o fabricante do pirômetro, caso os resultados de calibração diferirem dos resultados do fabricante em mais que 1% do fundo de escala do pirômetro ou 3°C, o que for maior.

3.11 Procedimento de calibração de pirômetros para medição de corpos reais

Em função do tipo de padrão de corpo negro adotam-se os seguintes procedimentos:

a) Quando são utilizadas cavidades isotérmicas com emissividade próxima da unidade (mínima típica 0,99):

- A emissividade deverá ser ajustada no pirômetro a ser calibrado, com o(s) valor(es) de emissividade(s) utilizado(s) na medição de objetos reais.
- Denomina-se temperatura real (T_r), a temperatura em que se encontra a cavidade; e o valor de temperatura virtual (T_v), a temperatura prevista pela expressão de Planck ou Wien, para a distribuição de intensidade espectral para um corpo negro, integrada dentro dos limites espectrais de trabalho do pirômetro.

A expressão de Wien para a intensidade de radiação integrada sobre os limites espectrais inferior (λ_i) e superior (λ_s) do pirômetro a ser calibrado, tem a seguinte forma:

$$i(T) = \int_{\lambda_i}^{\lambda_s} \frac{1.191062 \cdot 10^8}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{14388}{\lambda T}} \right)} d\lambda, \quad (\text{W/m}^2 \cdot \text{sr}) \quad (2)$$

Obtendo então a expressão para a emissividade em função da temperatura real e a temperatura virtual, segundo:

$$\varepsilon(T) = \frac{i(T_r)}{i(T_v)} \quad (3)$$

Combinando as equações 2 e 3, chega-se então a seguinte expressão

$$\varepsilon(T_v) = \frac{\int_{\lambda_i}^{\lambda_s} \frac{1.191062 \cdot 10^8}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{14388}{\lambda T_r}} \right)} d\lambda}{\int_{\lambda_i}^{\lambda_s} \frac{1.191062 \cdot 10^8}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{14388}{\lambda T_v}} \right)} d\lambda} \quad (4)$$

No caso de se possuir, ou ter condições de se obter a função combinada produto da Sensibilidade $S_\lambda(\lambda)$ do sensor pela Transmissibilidade $\mathfrak{T}_o(\lambda)$ do sistema óptico, resultando na função denominada $K_\lambda(\lambda)$, têm-se então que a expressão que relaciona a emissividade e as temperaturas real (T_r) e virtual (T_v), toma a seguinte forma:

$$\varepsilon(T_v) = \frac{\int_{\lambda_i}^{\lambda_s} \frac{1.191062 \cdot 10^8 \cdot K_\lambda(\lambda)}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{14388}{\lambda T_r}} \right)} d\lambda}{\int_{\lambda_i}^{\lambda_s} \frac{1.191062 \cdot 10^8 \cdot K_\lambda(\lambda)}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{14388}{\lambda T_v}} \right)} d\lambda} \quad (5)$$

A temperatura T_v deverá ser ajustada na Eq. 4 ou na Eq. 5, até que a emissividade obtida por uma destas equações seja igual a emissividade ajustada no pirômetro. Quando se chegar a identidade entre as duas emissividades, a ajustada e a calculada, o valor da temperatura indicada pelo pirômetro T_i , deverá ser comparada com a temperatura virtual T_v , para fins de calculo do desvio de exatidão e reprodutibilidade.

b) Quando da utilização de fontes com emissividade conhecida e diferente da unidade

Ao se utilizar fontes padrão com emissividade conhecida e menor que a unidade, deve-se ajustar o pirômetro para a emissividade do padrão e fazer a leitura da temperatura indicada pelo pirômetro (T_i), registra-la e deverá ser comparado com a temperatura real da fonte T_r , para fins de calculo do desvio de exatidão e reprodutibilidade.

4. CONCLUSÃO

Conforme levantamentos e observações realizados, sugere-se que a norma ASTM E-1256-95, seja alterada de modo a garantir uma confiabilidade da calibração na utilização de pirômetros em materiais reais. É recomendável também a abertura de um comitê da ABNT, com o intuito de estabelecer norma a respeito do procedimento de calibração de pirômetros no Brasil e regularizar este procedimento, de modo a que se possa garantir um procedimento eficiente de calibração dos pirômetros.

5. REFERÊNCIAS

- ASME. “Policy on Reporting Uncertainties in Experimental Measurements and Results”, Journal of Heat Transfer – Policy, USA.
- ASTM, 1988. “Standart Test Methods for Radiation Thermometers (Single Waveband Type)”, ASTM, New York.
- ASTM, 1995. “Standart Test Methods for Radiation Thermometers (Single Waveband Type)”, ASTM, New York.
- Budde, W., 1983. “Physical Detectors of Optical Radiation”, Vol. 4, Academic Press Inc., London.
- Beckwith, T.G., Marangoni, R.D., Lienhard V, J.H., 1995. “Mechanical Measurements”, Addison-Wesley Publishing Co., New York.
- Cal Sensors, 1998. “Catálogos Diversos”, <http://www.calsensors.com>.
- Corwin, R.R., Rodenburgh II, A., 1994. “Temperature Error in Radiation Thermometry Caused by Emissivity and Reflectance Measurement Error”, Applied Optics, vol. 33, n°10, pp. 1950-1957.
- Dillenburg, J. A., 1999a. “Avaliação do Sistema de Medição de Temperatura e do Campo Térmico sob Forjamento a Quente em Condições de Oxidação Severa”, Dissertação PROMEC/UFRGS, Porto Alegre.
- Dillenburg, J. A., 1999b. “Medição de Temperatura por Radiação e Aspectos Tecnológicos do Forjamento”, Caderno Técnico PROMEC/UFRGS, Porto Alegre.
- DeWitt, D.P., 1986. “Inferring Temperature from Optical Radiation Measurements”, Optical Engineering, vol. 25, n° 4, pp. 596-601.
- Doebelin, E.O., 1990. “Measurement Systems”, McGraw-Hill, New York.
- Gardner, J.L., 1980. “Effective Wavelength for Multicolor/Pyrometry”, Applied Optics, vol. 19, n° 18, pp. 3088-3091.
- Frota, M. N., et alli, 1997. “Guia para a Expressão da Incerteza de Medição”, Programa RH-Metrologia, Brasil.
- Finkelstein, L, Grattan, K.T.V., 1994. “Concise Enciclopedia of Measurements & Instrumentation”, Pergamon Press, Tokyo.
- Johnson, R.B., Jones, J.D., 1975. “Uncertainties in Calibration”, Long Wavelength Infrared – SPIE Proceedings, vol. 67, pp. 111-114.
- Nutter, G.D., 1972a. “Radiation”, Mechanical Engineering, june 1972, pp. 16-23.
- Nutter, G.D., 1972b. “Radiation Thermometry”, Mechanical Engineering, july 1972, pp. 12-15.
- Raytek Co., 1996. “Noncontact Temperature Measurement Using Infrared Technology”, USA.
- Vuolo, J. H., 1998. “Fundamentos da Teoria dos Erros”, Edgard Blücher Ltda, São Paulo.
- Zissis, G.J., 1976. “Infrared Technology Fundamentals”, Optical Engineering, vol. 15, n° 6, pp. 484-497.