

ANÁLISE PARAMÉTRICA E DESEMPENHO DE UM RADIÔMETRO DE CAVIDADE ELIPSOIDAL

Amaury Roteger de Oliveira

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – Laboratório de Óptica
Cidade Universitária – CEP 05508-901 - São Paulo – Brasil
arotger@ipt.br

Jurandir Itizo Yanagihara

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia Mecânica
Av. Prof. Mello Morais, 2231 – CEP 05356-000 - São Paulo - Brasil
jiy@usp.br

Resumo. O objetivo deste trabalho é realizar uma análise paramétrica experimental para avaliar o desempenho de um radiômetro de cavidade elipsoidal sob várias configurações. A geometria e a superfície refletiva da cavidade elipsoidal fazem com que toda radiação incidente num dos planos focais seja direcionada para um coletor hemisférico, colocado no outro plano focal e conectado a um termopar. A partir da tensão termelétrica gerada é possível avaliar diretamente a potência radiante por meio de curvas de calibração obtidas num forno de corpo-negro. Diferentes curvas de calibração e sensibilidades foram obtidas para cada conjunto de parâmetros. Para isso foram eletrodepositados dois tipos de materiais em sua cavidade (níquel ou ouro), usadas dois tipos de junta de medida do termopar (isolada ou aterrada) e dois tipos de revestimento do coletor absorvedor (negro ou polido). Os resultados obtidos indicam que a sensibilidade do instrumento é grandemente afetada por esses parâmetros. Foi verificado que a melhor combinação é revestimento de ouro, junta aterrada e coletor negro. Utilizando somente um termopar, a sensibilidade atingida foi de $0,000102 \mu V/kW/m^2$, que é quatro vezes maior do que a sensibilidade de um instrumento comercial equivalente.

Palavras chave: radiação térmica, radiômetro de cavidade elipsoidal.

1. Introdução e objetivo

Estudos de desempenho e projetos de equipamentos térmicos ou ensaios de fogo exigem medição do fluxo total de calor assim como de seus dois componentes básicos: o calor transferido por convecção e o calor transferido por radiação. O conhecimento da magnitude desses componentes permite projetar ou testar equipamentos com maior eficiência. A medição da potência emissiva total hemisférica é possível com a utilização de um radiômetro de cavidade elipsoidal. Esse tipo de instrumento foi desenvolvido originalmente na Holanda na década de 1950 (Chedaille e Braud, 1972). Na década subsequente um outro tipo foi desenvolvido na Suécia por Gunners (1967) que utilizou uma termopilha como sensor. Um radiômetro de cavidade elipsoidal também foi desenvolvido no Brasil por Oliveira (1998) e recentemente Murthy et al. (2003) apresentaram um desenvolvimento do antigo radiômetro elipsoidal de Gunners aprimorado com a inclusão de sua resposta angular. Atualmente existe uma norma internacional (ISO, 2002) para testes de fogo que recomenda o uso de um radiômetro de cavidade elipsoidal em sua cadeia de calibração.

O objetivo deste trabalho é realizar uma análise paramétrica experimental e verificar o desempenho de um radiômetro de cavidade elipsoidal sob várias configurações, em desenvolvimento no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo e na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (IPT/EPUSP).

2. Metodologia

2.1. Descrição do instrumento

A Figura 1 mostra o desenho esquemático do radiômetro de cavidade elipsoidal desenvolvido no IPT/EPUSP.

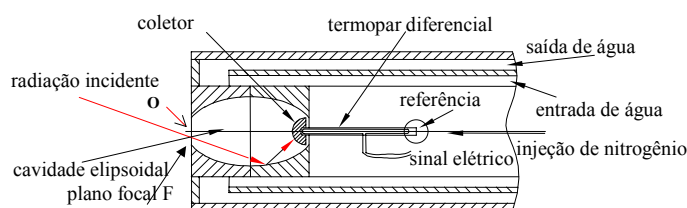


Figura 1. Desenho esquemático do radiômetro elipsoidal IPT/EPUSP.

A radiação espectral hemisférica incidente no orifício de abertura circular O, situado no plano focal F da cavidade elipsoidal, é refletida internamente e incide no plano focal F' onde está localizado um único termopar, de cobre-constantan, alojado em um coletor e transforma a radiação incidente em um sinal elétrico proporcional a potência emissiva total hemisférica. Com essa geometria e esse tipo de detetor, o instrumento integra duplamente a energia incidente em seu aspecto angular e espectral, isto é, o instrumento tem como sua equação constituinte a de Stefan-Boltzmann:

$$e(T) = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (1)$$

onde $e(T)$ é a potência emissiva total hemisférica (ou fluxo radiativo total hemisférico), ε é a emissividade total hemisférica e T a temperatura.

Para impedir o aquecimento por convecção provocado por gases de combustão e também impedir a entrada de fuligem ou gotas de óleo na cavidade, ar seco (ou nitrogênio) é injetado de modo a produzir uma pressão positiva eliminando esses problemas. O protótipo mantém as concepções básicas do radiômetro desenvolvido na Holanda mas possui modificações que melhoram seu desempenho. O instrumento, medindo 410 mm de comprimento e com um diâmetro externo de 52 mm, é composto basicamente por três tubos concêntricos pelos quais circula água para manter refrigerada a cavidade elipsoidal neles alojada, como esquematizado na Fig. 1.

O sistema de refrigeração é necessário para que o radiômetro possa trabalhar a altas temperaturas, permitindo durabilidade aos tubos, mantendo a cavidade resfriada e garantindo que a elevação de temperatura no coletor seja devida somente à radiação incidente no orifício de entrada O.

A cavidade elipsoidal da Fig. 1 possui excentricidade 0,5 e é constituída por um cilindro de bronze bipartido, cujo interior foi usinado para que possam encaixar-se e desta maneira formar uma cavidade elipsoidal, com aberturas circulares em seus planos focais. O orifício de entrada apresenta bordas delgadas de modo a evitar reflexões, independentemente do ângulo de incidência, enquanto que na parte posterior do cilindro, no outro plano focal da cavidade, está alojado o coletor. A finalidade do coletor é absorver a radiação incidente no orifício de entrada e sua geometria hemisférica compensa eventuais dispersões causadas pelas bordas do orifício ou pela rugosidade das paredes internas da cavidade. O coletor com diâmetro de 10 mm é fabricado em cobre.

2.2. Metodologia experimental

A metodologia experimental utilizada foi calibrar o instrumento para cada um dos parâmetros variados e avaliar seus efeitos a partir das sensibilidades obtidas. Foram realizadas calibrações variando o material das paredes refletivas da cavidade (níquel ou ouro) e também foram usados dois tipos de junta de medida do termopar (aterrada ou isolada). A emissividade do coletor de cobre foi variada polindo-o ou tornando negro com uma fina camada de fuligem. Desse modo foram realizadas quatro diferentes calibrações para as seguintes condições:

- a) paredes de níquel, coletor negro e junta de referência aterrada;
- b) paredes de níquel, coletor polido e junta de referência aterrada;
- c) paredes de níquel, coletor negro e junta de referência isolada;
- d) paredes de ouro, coletor negro e junta de referência aterrada.

Os valores adotados para as refletividades do níquel, ouro e cobre polido são os disponíveis na literatura e podem ser encontrados em SIEGEL e HOWELL (1992) e, estes são praticamente invariantes em largo intervalo de temperatura.

A fonte de calibração utilizada foi um forno de corpo-negro de cavidade esférica e com emissividade aparente de 0,99 como mostra a Fig. 2. Nesse formato é conseguida uma emissão difusa em um ângulo sólido de 2π sr. As medições foram realizadas com a fonte em condições de equilíbrio e o sinal elétrico foi medido por meio de um sistema de aquisição de dados composto por um voltímetro multicanal com resolução de $1\mu\text{V}$ e um computador para adquirir os dados. O radiômetro foi posicionado tangencialmente à cavidade, como mostra a Fig. 2.

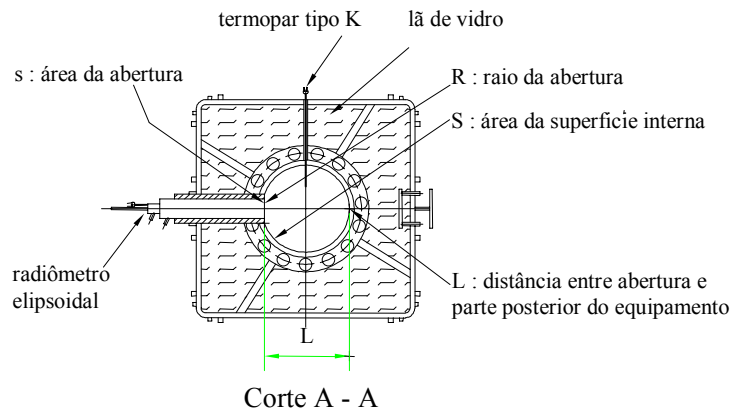


Figura 2. Corpo negro de cavidade esférica.

O fluxo radiativo, nessas condições, foi calculado por meio da equação de Stefan-Boltzmann. Os dados utilizados foram tratados, sendo corrigidas as temperaturas do forno e do sensor do coletor por meio de calibração dos mesmos. O sistema de refrigeração a água foi especialmente projetado e consiste basicamente de um reservatório de 0,1 m³ com uma bomba que permite regular a vazão de água. Esse sistema pode acompanhar o radiômetro em medições em campo permitindo relativa independência operacional em sua utilização. A injeção de ar seco ou nitrogênio não foi necessária pois a calibração foi realizada em laboratório e na ausência de gases de combustão. A temperatura da água de resfriamento das paredes da cavidade foi monitorada e não ultrapassou 30 °C

3. Resultados e Análises

A seguir são apresentados os resultados e análises dos experimentos realizados. Para cada condição dos parâmetros variados foram levantadas suas curvas de calibração e calculadas suas sensibilidades. A incerteza calculada com base nos procedimentos descritos no Guia do INMETRO (1998) foi de 6,6% com intervalo de confiança de 95%. Uma análise detalhada do cálculo de incertezas de um radiômetro desse tipo pode ser encontrada em OLIVEIRA e YANAGIHARA (2003). Utilizando-se a mesma metodologia, a incerteza na sensibilidade foi calculada em 6,7% com intervalo de confiança de 95%.

3.1. Cavidade recoberta com níquel, coletor negro e junta de medida aterrada

O resultado consolidado das medições realizadas está resumido na curva de calibração da Fig. 3.

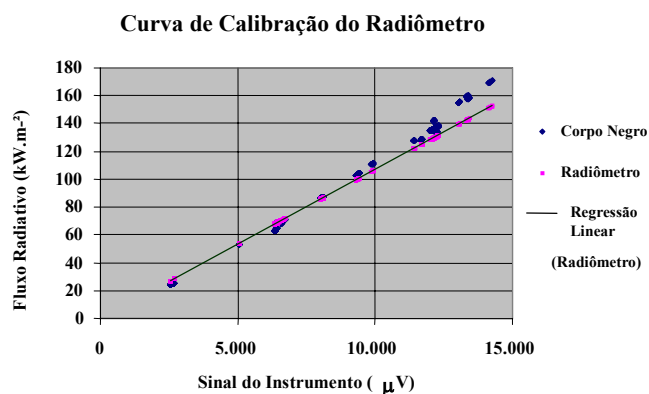


Fig. 3 – Curva de calibração nas condições: cavidade recoberta com níquel, coletor negro e junta aterrada.

Fazendo uma regressão linear foi obtida a seguinte relação, onde E é o sinal do instrumento

$$e(T) = 0,0106927.E \tag{2}$$

A sensibilidade do instrumento é dada pela Eq.(3)

$$S = \frac{dE}{de} \quad (3)$$

Utilizando a relação de calibração obtida experimentalmente o valor calculado de S é:

$$S = 0,0000935 \text{ } \mu\text{V/kW/m}^2$$

O resultado é expressivo pois representa cerca de quatro vezes o valor da sensibilidade de um instrumento comercial (LAND, 1977). O fluxo radiativo máximo medido foi 171 kW/m^2 para uma temperatura do corpo negro de $1108 \text{ }^\circ\text{C}$.

3.2. Paredes de níquel, coletor polido e junta de medida aterrada

Este ensaio foi realizado para verificar a influência da emissividade do coletor na resposta do instrumento. A emissividade do coletor foi diminuída livrando-o da fuligem depositada anteriormente e polindo-o até que possuísse um aspecto brilhante. Os dados obtidos são apresentados na curva de calibração da Fig. 4.

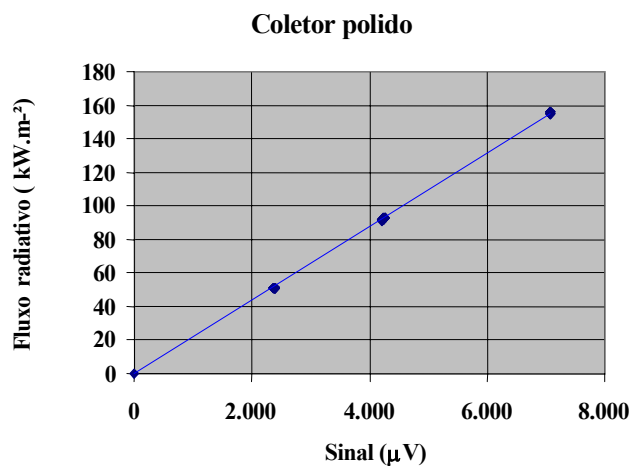


Figura 4. Curva de calibração para coletor polido, paredes de níquel e junta aterrada.

A ausência de fuligem e o polimento do coletor fizeram com que a sensibilidade do instrumento diminuísse para $0,0000464 \text{ } \mu\text{V/kW/m}^2$ o que é a metade da sensibilidade do instrumento obtida com o coletor enegrecido.

3.3. Paredes de níquel, coletor negro e junta de medida isolada

Para os termopares de isolamento mineral são comuns dois tipos de junta de medida: a chamada “aterrada” que fica soldada à bainha e a “isolada” cuja junta não está em contato com a capa protetora. O instrumento operou com sua junta de medida isolada, para verificar esse efeito. O coletor permaneceu negro assim como as paredes de níquel. A Fig. 5 mostra os resultados para esse caso.

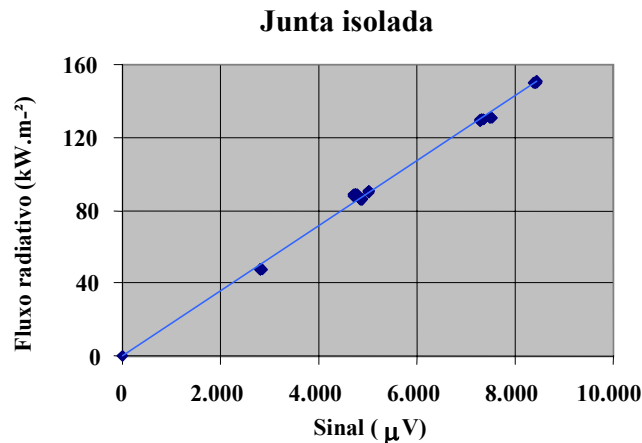


Figura 5. Curva de calibração para junta de medida isolada, paredes de níquel e coletor negro.

A sensibilidade do instrumento caiu para $0,0000567 \mu\text{V}/\text{kW}/\text{m}^2$ o que mostra o efeito da resistência térmica entre o coletor e a junta de medida. Esse efeito tem uma importância prática grande pois mostra que a montagem do termopar no coletor deve ser tal que exista o melhor contato térmico possível entre eles.

3.4. Paredes recobertas com ouro, coletor negro e junta aterrada

Para essa configuração a sensibilidade calculada foi de $0,000102 \mu\text{V}/\text{kW}/\text{m}^2$ cerca de 10% a mais do que a configuração utilizando níquel e quatro vezes maior do que o instrumento comercial equivalente.

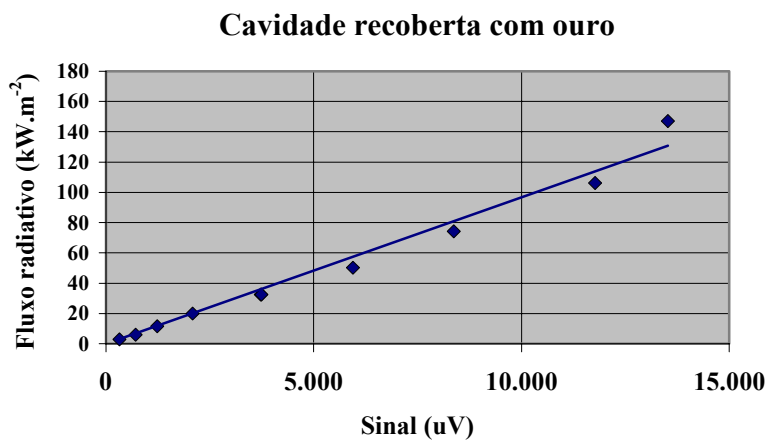


Figura 6. Calibração com a configuração: cavidade recoberta com ouro, coletor negro e junta isolada

3.5. Análise

Os experimentos revelaram que a melhor configuração combina paredes da cavidade recoberta com ouro, coletor negro e junta aterrada. A configuração composta por cavidade recoberta com níquel, coletor negro e junta isolada é 10% inferior à aquela. Isso é explicado pelo fato de o níquel ter uma refletividade de 0,9 enquanto que a do ouro é muito próxima de 1. Já os efeitos da emissividade do coletor e do tipo de junta de medida do termopar são extremamente críticos, diminuindo em cerca de 50% a sensibilidade do instrumento.

Outro aspecto que os experimentos revelaram é uma não-linearidade na curva de calibração da melhor combinação e que pode ser observada na Fig. 6. Essa não-linearidade é explicada pelo fato de a temperatura do coletor não ser mais desprezível nas trocas radiativas existentes entre o instrumento e a fonte tipo corpo negro. Para instrumentos sensíveis como este em desenvolvimento, a sua equação constitutiva não é simplesmente a equação de Stefan-Boltzmann mas deve conter correções que levem em conta a radiação emitida pelo coletor.

4. Conclusões

Foi realizada uma análise paramétrica de um radiômetro de cavidade elipsoidal onde foram estudados parâmetros importantes tais como a influência da refletividade das paredes, da emissividade do coletor e do tipo de junta de medida do sensor térmico. Os resultados obtidos pelo protótipo foram muito bons. Em seu estágio atual esse radiômetro apresentou excelentes resultados em calibração contra corpos negros. Foi verificado que o revestimento de ouro, junta aterrada e coletor negro são as melhores combinações para o instrumento transformando-se em um instrumento de alta sensibilidade. Por sua vez o aumento da sensibilidade indica que a sua equação constitutiva não é simplesmente a de Stefan-Boltzmann mas que ela deve conter correções que levem em conta a radiação emitida pelo coletor.

5. Referências

- CHEDAILLE, J., BRAUD, Y., 1972 “Measurements in Flames”, Vol. 1., in “Industrial Flames”, General Editors, J.M. Beér and M.W. Thring; Edward Arnold, London.
- IFRF, 1994, “International Flame Research Foundation”, Doc.No. C76/y/1/3, Measurement Equipment, Ellipsoidal Radiometer, Ijmuiden, Holland.
- INMETRO, 1998, “Guia para a expressão da incerteza de medição”, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ISO, 2002, “Reaction-to-fire tests – Calibration and use of radiometers and heat flux meters”, ISO/TS 14934-1, Part 1. : General Principles., Switzerland.
- GUNNERS, N.-E., 1967 “Methods of measurement and measuring equipment for fire tests”, Series No. 43, ACTA Polytechnica Scandinavica, Stockholm.
- LAND COMBUSTION LIMITED, 1977, “Operating Instructions for the Land 2π Ellipsoidal Radiometer”, ISS 6/879, England.
- MURTHY, A.V., WETTERLUND, I. & DeWITT, D. P., 2003, “Characterization of an ellipsoidal radiometer” Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, Vol. 108, Number 2, pag. 115.
- OLIVEIRA, A. R, 1998, “Desenvolvimento de um radiômetro de cavidade elipsoidal de alta sensibilidade”, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil.
- OLIVEIRA, A. R. & YANAGIHARA, J. I. , 2003, “Análise de incertezas do processo de calibração de um radiômetro de cavidade elipsoidal”, Encontro para a Qualidade de Laboratórios, ENQUALAB, São Paulo, Brasil, pp. 54-58.

PARAMETRIC ANALYSIS AND PERFORMANCE OF AN ELLIPSOIDAL RADIOMETER

Amaury Roteger de Oliveira

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – Laboratório de Óptica
Cidade Universitária – CEP 05508-901 - São Paulo – Brasil
arotger@ipt.br

Jurandir Itizo Yanagihara

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia Mecânica
Av. Prof. Mello Moraes, 2231 – CEP 05356-000 - São Paulo - Brasil
jiy@usp.br

Abstract

The main objective of this work is to conduct an experimental parametric analysis to evaluate the performance of

an ellipsoidal radiometer with different configurations. The ellipsoidal cavity has an appropriate geometry and high-reflectivity surface so that all incident radiation is directed to a hemispheric sensor connected to a differential thermocouple. From the generated thermoelectric voltage it is possible to evaluate directly the incident radiation power through a calibration curve obtained by using a black-body cavity. Different calibration curves and instrument's sensitivity were obtained for the various sets of the parameters. The varied parameters were the cavity's surface material (nickel or gold), the thermocouple's hot junction (isolated or grounded) and the sensor's surface treatment (black or polished). The results indicated that the instrument's sensitivity is greatly affected by these parameters. The combination that produced the highest sensitivity is the cavity's surface coated with gold, the thermocouple with grounded junction and the black sensor's surface. Using a simple thermocouple, the sensitivity obtained was $0,000102 \mu\text{V}/\text{kW}/\text{m}^2$, which is four times higher than the sensitivity of an equivalent commercial instrument.

Keywords: thermal radiation, ellipsoidal radiometer.