

AMAURY ROTEGER DE OLIVEIRA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL E
DESENVOLVIMENTO DE
RADIÔMETROS**

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
Título de Doutor em Engenharia.

CONSULTA
FT-2148

São Paulo
2005

AMAURY ROTEGER DE OLIVEIRA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL E
DESENVOLVIMENTO DE
RADIÔMETROS**

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
Título de Doutor em Engenharia.

Área de Concentração: Engenharia Mecânica

Orientador:
Prof. Dr. Jurandir Itizo Yanagihara

São Paulo
2005

Para
Mauro Castro de Oliveira (*in memoriam*)
Isolina Roteger Domingues
Norma Teresinha de Oliveira
Juscelino Roteger de Oliveira e
Mauro Castro de Oliveira Júnior.
Minha família grande.

Agradecimentos

Ao meu orientador, Prof. Dr. Jurandir Itizo Yanagihara, pela oportunidade oferecida assim como pela sua orientação competente, firme e tranqüila no decorrer deste trabalho.

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. (IPT), na pessoa do Prof. Dr. Agenor Fleury, Diretor da Divisão de Mecânica e Eletricidade, pelo apoio e investimento realizado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e ao Fundo Setorial do Petróleo e Gás Natural (CT-PETRO) pelos investimentos realizados e sem os quais este trabalho não seria possível.

Aos meus amigos do IPT que colaboraram na execução deste trabalho.

Aos meus colegas da Poli-Mecânica pela agradável convivência.

À Terê, Jú e Gi, minha família pequena, pelo amor e carinho de sempre.

RESUMO

O propósito deste trabalho é desenvolver dois novos radiômetros, um para medição de potência emissiva total hemisférica, outro para medição de intensidade total assim como montar um aparato experimental e desenvolver procedimentos para análise paramétrica de radiômetros de cavidade elipsoidal como também realizar uma análise experimental nesses tipos de radiômetros. O novo radiômetro para medição de potência emissiva total hemisférica quebrou o antigo paradigma de que esse tipo de radiômetro deve ser de cavidade elipsoidal. O radiômetro é formado por uma cavidade semi-elipsoidal e tem seu coletor instalado no seu eixo menor. Possui alta sensibilidade, $2.173 \mu V/W/cm^2$, e seu sensor, formado por uma termopilha robusta e especialmente construída, suporta grandes temperaturas. Os termopares são montados com grande resistência térmica e suas curvas de calibração são aceitas universalmente, garantindo sua reprodutibilidade. O radiômetro de cavidade semi-elipsoidal possui um sistema para formar uma cortina de ar que impede a entrada de gases ou contaminantes e não é necessário retirá-lo do processo para recalibrações periódicas. Utilizando somente uma cavidade semi-elipsoidal o instrumento minimiza as perdas por reflexão, espalhamento ou absorção de uma segunda parte da cavidade e com isso apresentou uma ótima resposta angular que supera largamente os radiômetros atuais. A resposta cossenoidal, ou lambertiana, implica que sua capacidade de integração angular é hemisférica e como a superfície de seu coletor é extremamente absorvedora indica que o sinal é proporcional à radiação total. O seu tempo de resposta, de 21s, é bastante satisfatório para as aplicações previstas em que a situação é de equilíbrio térmico ou de regime permanente. Com essas características, o novo radiômetro de cavidade semi-elipsoidal é uma boa alternativa a ser o instrumento padrão mundial para a medição de potência emissiva total hemisférica. O novo radiômetro para medição de intensidade total, ou radiômetro direcional, é muito simples e elimina todo um sistema óptico existente nos atuais instrumentos. Contudo sua sensibilidade, de $49,5 \mu V/W/cm^2.sr$, ainda é baixa mas seu ângulo sólido, calculado em $1,3084 \times 10^{-5} sr$, é consistente com suas aplicações industriais. A análise experimental realizada torna disponível dados inexistentes na literatura aberta tais como a comparação entre os materiais de revestimento da superfície refletora da cavidade, a comparação entre as diversas geometrias possíveis para o coletor e a comparação entre diferentes materiais depositados em sua superfície. Dentre os diversos sensores térmicos que podem ser utilizados fica estabelecido que o sensor do coletor pode também ser resistivo, elemento que hoje não é utilizado em nenhum outro radiômetro para medição de potência emissiva total hemisférica. Para a realização de todo o trabalho foi montado um aparato experimental e desenvolvidos procedimentos para análise paramétrica de radiômetros de cavidade elipsoidal. O sistema montado para verificar o comportamento da temperatura do sensor do radiômetro de cavidade semi-elipsoidal, baseado em um *laser* de potência, é inovador. Da análise experimental também é possível concluir que podem ser utilizadas, dependendo do tipo de aplicação, as várias configurações testadas com radiômetros elipsoidais.

ABSTRACT

The aim of this work is the development of two new radiometers, one for the measurement of the hemispherical total emissive power, another one for the measurement of total intensity as well as the mounting of an experimental apparatus and the development of procedures for parametric analysis for ellipsoidal cavity radiometers and to carry out an experimental analysis in these types of radiometers. The new radiometer for measurement of hemispherical total emissive power broke the old paradigm that considers that type of radiometer must be of ellipsoidal cavity. The radiometer is formed by a half-ellipsoidal cavity and has its collector installed in its minor axis. It has a high sensitivity, $2.173 \mu V/W/cm^2$, and its sensor, formed by an especially constructed robust thermopile supports high temperatures. The thermocouples are mounted with high thermal resistance and its curves of calibration are accepted universally, guaranteeing its reproducibility. The half-ellipsoidal cavity radiometer has a system to form an air curtain that block the entrance from gases or contaminants and is not necessary to remove it from the process for periodic recalibrations. Only using a half-ellipsoidal cavity the instrument minimizes the losses for reflection, scattering or absorption of the second part of the cavity and presented an excellent angular response surpassing the current radiometers. The cosenoidal response, or lambertian one, implies a hemispherical capacity of angular integration that summed to the extremely absorbent collector indicates a signal proportional to the total radiation. Its response time, of 21s, is sufficiently satisfactory for a wide range of applications where thermal equilibrium or steady state is present. With these features, the new half-ellipsoidal cavity radiometer is a good alternative to become the standard worldwide instrument for the measurement of the hemispherical total emissive power. The new radiometer for measurement of total intensity or directional radiometer is very simple and eliminates all the optics systems existing in the current instruments. However its sensitivity, $49,5 \mu V/W/cm^2.sr$, is still low although its solid angle, $1,3084 \times 10^{-5} sr$, is consistent with its applications. The experimental analysis carried out becomes available inexistent data in the open literature as the comparison between the covering materials of the reflective surface of the cavity, the comparison between several possible geometries for the collector, and the comparison between different materials deposited in its surface. Amongst the several thermal sensors that can be used, it is also established that the sensor of the collector can be resistive, element that today is not used in anyone radiometer for the measurement of hemispherical total emissive power. For the accomplishment of all the work it was mounted an experimental apparatus and apparatus procedures were developed for parametric analysis of ellipsoidal cavity radiometers. The apparatus to verify the behavior of the temperature of the sensor of the half-ellipsoidal radiometer, based on a power laser, is innovative. Based on the experimental analysis of the instrument, it could be concluded that some configurations tested could be used depending on the applications.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

RESUMO

ABSTRACT

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	1
1.1 Introdução	1
1.2 Objetivos	2
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
2.1 Radiação térmica	3
2.2 Corpo negro	4
2.3 Potência emissiva total hemisférica	6
2.4 Intensidade total	7
2.5 A lei dos cossenos de Lambert	8
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
3.1 O “radiômetro” de Gardon	9
3.2 O radiômetro elipsoidal IFRF/Land	10
3.3 O radiômetro elipsoidal de Gunners	12
3.4 O protótipo IPT/EPUSP	13
3.5 O radiômetro do IST	15
3.6 O radiômetro de intensidade total do IFRF	15
3.7 Comentários sobre a revisão bibliográfica	16
4 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL	18
4.1 Descrição do novo radiômetro de cavidade semi-elipsoidal	18
4.2 Descrição do novo radiômetro de intensidade total	27
4.3 Variações paramétricas em radiômetros de cavidade elipsoidal	30

4.3.1 Superfície da cavidade	30
4.3.2 Geometria e superfície do coletor	31
4.3.3 Tipos de sensores do coletor	32
4.4 Bancadas experimentais e metodologia	32
4.4.1 Calibração	36
4.4.2 Resposta angular	37
4.4.3 Efeito da cortina de ar no sinal do instrumento	38
4.4.4 Tempo de resposta	40
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
5.1 Resultados do radiômetro de cavidade semi-elipsoidal	41
5.1.1 Curva de calibração	41
5.1.2 Resposta angular	44
5.1.3 Efeito da cortina de ar	45
5.1.4 Tempo de resposta	47
5.2 Resultados do radiômetro de intensidade total	48
5.2.1 Curva de calibração	48
5.3 Variações paramétricas em radiômetros de cavidade elipsoidal ...	51
5.3.1 Superfície da cavidade	52
5.3.2 Geometria e superfície do coletor	52
5.3.3 Tipos de sensores do coletor	53
5.4 Comentários	54
6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
ANEXO - DADOS OBTIDOS	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Características principais dos radiômetros de cavidade elipsoidal . . .	17
Tabela 4.1 - Resumo das variações paramétricas realizadas	30
Tabela 5.1 - Dados da curva de calibração	42
Tabela 5.2 - Variação da potência da fonte laser	46
Tabela 5.3 - Dados de calibração do radiômetro direcional	50
Tabela 5.4 - Variações paramétricas realizadas e respectivas sensibilidades	51
Tabela 5.5 - Temperaturas do coletor em duas diferentes configurações	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EPUSP - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

IFRF - International Flame Research Foundation – Holanda

INPI - Instituto Nacional de Propriedade Industrial - Lisboa

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

E	força eletromotriz
T	temperatura
λ	comprimento de onda
θ	ângulo
χ^2	Qui – quadrado
σ	constante de Stefan-Boltzmann
τ	constante de tempo
ε	emissividade total hemisférica
ε_0	emissividade total hemisférica
$e(T)$	potência emissiva total hemisférica
$i(T)$	intensidade total

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Este capítulo apresenta a motivação, as aplicações, o histórico e os objetivos deste trabalho.

1.1 Introdução

O conhecimento das características da radiação térmica, por meio de sua potência emissiva total hemisférica ou de sua intensidade total, é necessário em projetos de engenharia térmica, sistemas de combustão ou de proteção ao fogo. Em caldeiras, por exemplo, grande parte da energia é transferida por radiação e suas características totais, hemisféricas ou direcionais, podem ser obtidas por intermédio de radiômetros e ser verificado, assim, se os objetivos de projeto foram atingidos. A utilização desses tipos de radiômetros permite determinar a distribuição do fluxo de calor radiativo dentro de fornalhas realizando um mapeamento espacial e a proposição de soluções para problemas existentes tais como queimadores que não apresentem o comprimento de chama especificado e necessitem de modificações. Radiômetros para medição de potência emissiva total hemisférica também são utilizados na indústria em avaliações de secadores de papel que operam via radiação infravermelha. Atualmente está sendo desenvolvida uma norma internacional sobre ensaios de fogos em que um radiômetro para medição de potência emissiva total hemisférica é parte essencial de sua realização (WETTERLUND, 2003).

Na década de 1950, foi desenvolvido na International Flame Research Foundation (IFRF) sediado na Holanda, um radiômetro para medição de intensidade total e um radiômetro de cavidade elipsoidal para medição de radiação total hemisférica em chamas e fornalhas. Este último também é comercializado pela Land Combustion Ltd (LAND, 1977). Em 1967 foi desenvolvido na Suécia um instrumento análogo ao da IFRF, o qual foi brevemente descrito por GUNNERS (1967). Na década de 1980 esse tipo de instrumento foi parcialmente desenvolvido no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) por SOUSA *et al.* (1989). No curso de mestrado de OLIVEIRA (1998) esse projeto foi retomado e desenvolvido um radiômetro de cavidade elipsoidal para medição de potência emissiva total hemisférica que apresentou excelentes resultados de calibração.

O estado da técnica dos radiômetros para medição de potência emissiva total hemisférica e intensidade total indica que existem muitos aperfeiçoamentos necessários nesses equipamentos. O presente trabalho toma por base o radiômetro desenvolvido por OLIVEIRA (1998) e visa preencher lacunas no conhecimento sobre os fenômenos térmicos presentes no radiômetro e fornecer soluções técnicas para alguns problemas presentes nos equipamentos atuais. Por meio do presente trabalho, espera-se que os radiômetros de cavidade elipsoidal sejam mais operacionais e evitem recalibrações constantes durante o processo enquanto que o radiômetro de intensidade total seja mais simples que o atual evitando todo seu sistema óptico.

1.2 Objetivos

Os objetivos deste trabalho são:

- a) montar um aparato experimental e desenvolver procedimentos para análise paramétrica de radiômetros de cavidade elipsoidal;
- b) realizar estudos paramétricos visando a caracterização de um radiômetro de cavidade elipsoidal;
- c) desenvolver um novo radiômetro para medição de potência emissiva total hemisférica e realizar sua caracterização;
- d) desenvolver um novo radiômetro para medição de intensidade total.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta os conceitos fundamentais sobre radiação térmica, corpo negro, as definições das grandezas potência emissiva total hemisférica, intensidade total e a lei do cosseno de Lambert.

2.1 Radiação térmica

Radiação térmica é uma parte da radiação eletromagnética existente no Universo. Acima do zero absoluto (0K) todos os corpos emitem radiação eletromagnética devido ao movimento aleatório das cargas elétricas de seus átomos constituintes, isto é, radiação térmica é energia eletromagnética gerada somente pela temperatura do corpo.

O termo radiação térmica foi criado para diferenciá-la da radiação eletromagnética produzida por meio de outros processos. Uma ilustração de como está dividido conceitualmente o espectro eletromagnético está na Fig. 2.1.

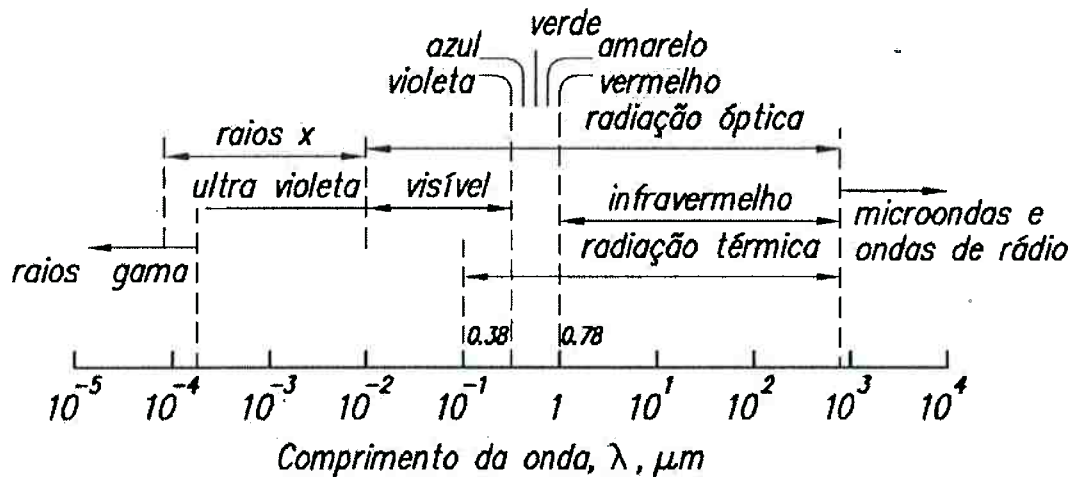


Fig. 2.1 – Espectro eletromagnético

Do ponto de vista emissivo as características da radiação térmica em seus aspectos espectrais e direcionais são complexas pois dependem fortemente das características da superfície do corpo emissor. Dois corpos emissores diferentes, à mesma temperatura, podem possuir distribuições em frequência e direção muito diferentes. O mesmo é válido para a absorção, reflexão e transmissão. A partir da

teoria hoje existente é impossível prever o comportamento da emissão ou absorção de uma superfície real qualquer. O conceito que permite simplificar o estudo e avançar, é o de corpo negro.

2.2 Corpo negro

Um corpo negro é definido com sendo uma superfície ideal que absorve toda a radiação incidente, independentemente de seu comprimento de onda ou direção. Além dessa propriedade, um corpo negro é uma superfície ideal que emite radiação térmica isotrópica e homoganeamente, isto é, a radiação de corpo negro é difusa. Quando em equilíbrio térmico, a energia emitida por unidade de tempo, por unidade de área, por unidade de comprimento de onda, por unidade de ângulo sólido é a mesma em qualquer direção. Além disso, dado qualquer ângulo sólido que contenha radiação de corpo negro, a distribuição espectral é a mesma.

Emissão e absorção são dois processos de criação e aniquilação da radiação eletromagnética. A radiação é extinta quando é absorvida pela matéria aumentando a energia interna do corpo. Para um corpo negro as características de absorção e emissão são equivalentes, isto é, um corpo negro absorve toda e qualquer radiação incidente isotrópica e homoganeamente assim como a emite da mesma maneira.

Uma forma de comparar um corpo negro com superfícies reais é utilizar o conceito de emissividade. Esse conceito pode ser definido para várias situações sejam elas angulares ou espectrais. A emissividade total hemisférica de um corpo, a uma certa temperatura, é a relação entre a potência emissiva total hemisférica desse corpo e a de um corpo negro.

$$\varepsilon(T) = \frac{e_b(T)}{e(T)} \quad (2.1)$$

A realização prática de fontes de radiação tipo corpo negro consiste em manter uma cavidade em uma temperatura uniforme e constante. Assim procedendo, emissividades totais hemisféricas muito próximas de 1 (um) podem ser alcançadas nesse tipo de equipamento, considerado padrão para a calibração de radiômetros.

As fontes de radiação negras reais podem ter sua cavidade no formato esférico como mostra a Fig. 2.2 . Nesse formato é conseguida a reprodução de uma

fonte que tenha como característica uma emissão difusa de radiação em um ângulo sólido de 2π sr.

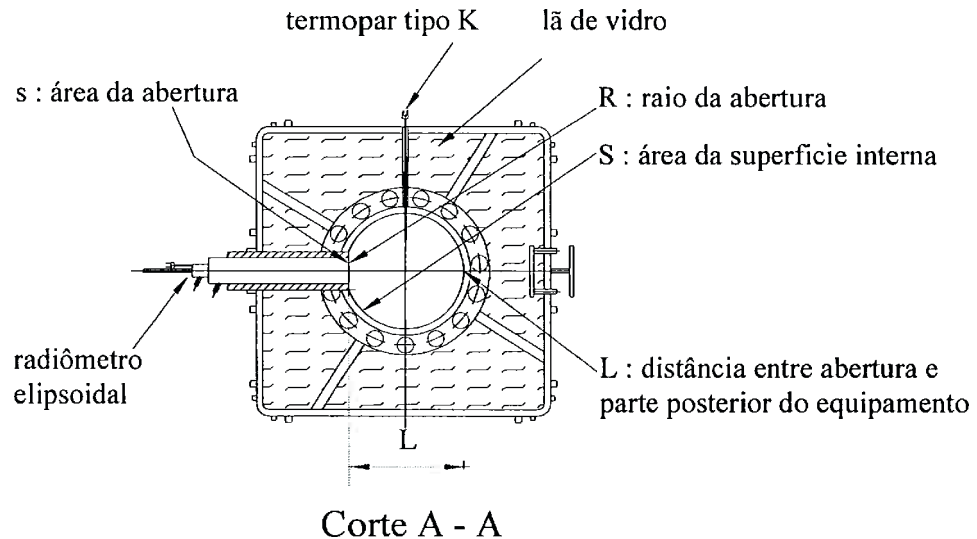


Fig. 2.2 - Corpo negro de cavidade esférica (SOUSA et al., 1989)

A emissividade aparente, ou efetiva, de um corpo negro é aquela medida por um observador externo à cavidade. Pode ser calculada por meio das relações de troca de calor entre as paredes e a abertura ou por uma relação funcional, que leva em conta todas as possíveis reflexões da radiação no interior da cavidade. Esse valor depende tanto da geometria da cavidade quanto da emissividade real das suas paredes constituintes. Vários métodos foram propostos para esse cálculo (QUINN, 1990) e a expressão aqui utilizada para o cálculo da emissividade aparente tem origem no trabalho de Gouffé apud CHEDAILLE e BRAUD (1972). A relação funcional é a seguinte:

$$\varepsilon_0(\varepsilon, s, S, \theta) = \frac{1 + (1 - \varepsilon) \left(\frac{s}{S} - \text{sen } 2\theta \right)}{1 + \frac{s}{S} \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \right)} \quad (2.2)$$

2.3 Potência emissiva total hemisférica

A potência emissiva espectral hemisférica, a chamada lei de Planck, fornece para um certa temperatura T , para um ângulo sólido de 2π sr, a distribuição espectral da densidade de fluxo de energia superficial emitida por um corpo negro. No vácuo ela é dada por

$$e_{\lambda b}(\lambda, T) = \frac{2\pi \cdot C_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda \cdot T}\right) - 1 \right]} \quad (2.3)$$

A Eq. 2.3 foi deduzida por Planck por meio de argumentos de que a energia pode assumir somente valores discretos. A equação de Planck foi comprovada experimentalmente por meio de medições em um corpo negro e foi a base para a criação da mecânica quântica. Um desenvolvimento histórico sobre esses conceitos é encontrado em STUDART (2000).

A radiação de corpo negro tem seu espectro, em termos de comprimento de onda, situado entre 0 e ∞ e a faixa de maior interesse para a engenharia térmica vai de $0,1 \mu\text{m}$ a $100 \mu\text{m}$. Um gráfico da potência emissiva espectral hemisférica para várias temperaturas é apresentado na Fig. 2.3.

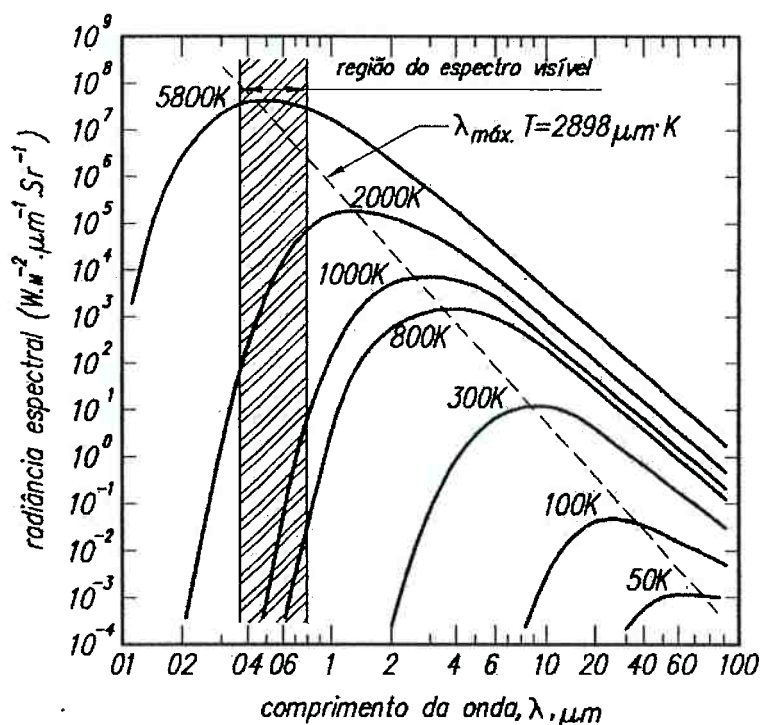


Fig. 2.3 – Potência emissiva espectral hemisférica de um corpo negro para várias temperaturas

A equação da potência emissiva total hemisférica, a chamada lei de Stefan-Boltzmann, fornece para uma certa temperatura T , um ângulo sólido de 2π sr e todos os comprimentos de onda, a densidade de fluxo total da energia emitida por um corpo negro. Stefan chegou a ela experimentalmente mas tal equação pode ser deduzida analiticamente de duas maneiras: por meio de argumentos termodinâmicos, como o fez Boltzmann ou integrando a equação de Planck sobre todos os comprimentos de onda e todas as direções o que resulta para superfícies negras

$$e_b(T) = \sigma.T^4 \quad (2.4)$$

2.4 Intensidade de radiação

A intensidade espectral de um corpo negro é a emissão de energia radiativa em qualquer direção por unidade de área projetada normal àquela direção, por unidade de tempo, por intervalo de comprimento de onda em torno de λ , por unidade de ângulo sólido e é dada pela Eq. 2.5 :

$$i_{\lambda b}(\lambda, T) = \frac{2.C_1}{\lambda^5 [e^{\frac{C_2}{\lambda.T}} - 1]} \quad (2.5)$$

Comparando as Eq. 2.3 e 2.5 pode ser observado que

$$e_{\lambda b}(\lambda, T) = \pi.i_{\lambda b}(\lambda, T) \quad (2.6)$$

Integrando a Eq. (2.5) em todos os comprimentos de onda é obtida a intensidade total que é dada pela Eq. (2.7). É a emissão de energia radiativa, incluindo todos os comprimentos de onda, em qualquer direção por unidade de área projetada normal àquela direção, por unidade de tempo e ângulo sólido. A Eq. (2.7) é a equação constitutiva do instrumento proposto neste trabalho para a medição de intensidade total.

$$i_b(T) = \frac{\sigma.T^4}{\pi} \quad (2.7)$$

Comparando-se as Eq. 2.4 e 2.7 obtém-se a seguinte igualdade:

$$e_b(T) = \pi.i_b(T) \quad (2.8)$$

Isto é, se a intensidade total de um corpo negro for medida, a potência emissiva total hemisférica pode ser calculada facilmente e vice-versa.

Os instrumentos propostos neste trabalho tem como equações constituintes a de Stefan-Boltzmann e Eq. (2.8) .

2.5 Lei do cosseno de Lambert

A relação entre a potência emissiva espectral hemisférica e a intensidade espectral é dada por

$$e'_{\lambda b}(\lambda, \theta, \varphi) = i'_{\lambda b}(\lambda) \cdot \cos(\theta) = e'_{\lambda b}(\lambda, \theta) \quad (2.9)$$

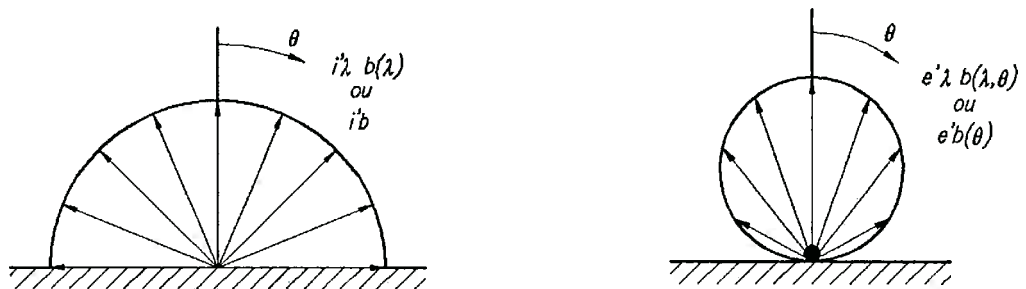


Fig. 2.4 – Ilustração da lei do cosseno de Lambert

A Eq. (2.9) é conhecida como lei do cosseno de Lambert e pode ser ilustrada como na Fig. 2.4. As relações acima são válidas para um corpo negro e portanto a intensidade total é a mesma em todas as direções mas a potência emissiva total hemisférica varia cossenoidalmente.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é realizada a revisão bibliográfica dos atuais instrumentos de medição de potência emissiva total hemisférica e de intensidade total onde estão contemplados os trabalhos mais importantes relativos às suas técnicas de medição.

A bibliografia sobre radiômetros de cavidade elipsoidal é muito escassa na literatura aberta. Existem atualmente três radiômetros para a medição de potência emissiva total hemisférica que utilizam o princípio da cavidade elipsoidal: o do IFRF, reportado por CHEDAILLE e BRAUD (1972), o de GUNNERS (1967) e o radiômetro desenvolvido por OLIVEIRA (1998).

Descrito por AFGAN e LEONTIEV (1995) e MARTINS, *et al.* (1995) surgiu em Portugal um radiômetro para medição de radiação total hemisférica que utiliza um outro princípio, o chamado “blow-off”, que também será reportado.

A bibliografia sobre radiômetros de intensidade total também é escassa e está baseada no instrumento fabricado e utilizado pela IFRF.

3.1 O “radiômetro” de Gardon

O “radiômetro” de GARDON (1953) na verdade é um medidor de fluxo total de calor, isto é, mede o fluxo radiativo e o convectivo, mas é uma referência histórica importante sobre radiômetros para medição de potência emissiva total hemisférica pois sua concepção utiliza como princípio de funcionamento um termopar diferencial, técnica que se repete nos radiômetros da IFRF, de Gunner e no protótipo IPT/EPUSP desenvolvido por Oliveira.

Em sua concepção básica, o elemento sensor é formado por uma fina superfície circular de constantan enegrecida e soldada em torno de sua circunferência em um bloco de cobre como é visto no desenho esquemático da Fig. 3.1.

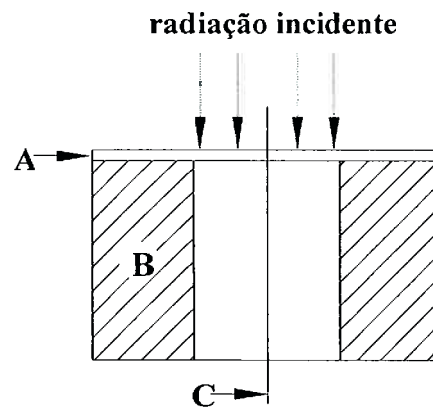


Fig. 3.1 – O radiômetro de Gardon

A radiação incidente é absorvida pela superfície circular e o calor é transferido radialmente por condução para o bloco de cobre, que funciona como um reservatório térmico à temperatura constante e, como resultado desse fluxo de calor, a temperatura no centro da superfície de constantan fica maior do que em sua periferia. Essa diferença de temperatura gera uma força eletromotriz que é correlacionada diretamente ao fluxo radiativo incidente. No radiômetro de Gardon a maior sensibilidade declarada foi de $516 \mu V/W.cm^2$.

3.2 O radiômetro elipsoidal IFRF/Land

No início da década de 1950 surgiu na Holanda o radiômetro de cavidade elipsoidal da IFRF e a publicação básica encontrada na literatura aberta e que trata especificamente desse radiômetro é de CHEDAILLE e BRAUD (1972). O radiômetro desenvolvido na IFRF e comercializado, também, pela Land Combustion Ltd. (LAND, 1977) está esquematizado na Fig. 3.2.

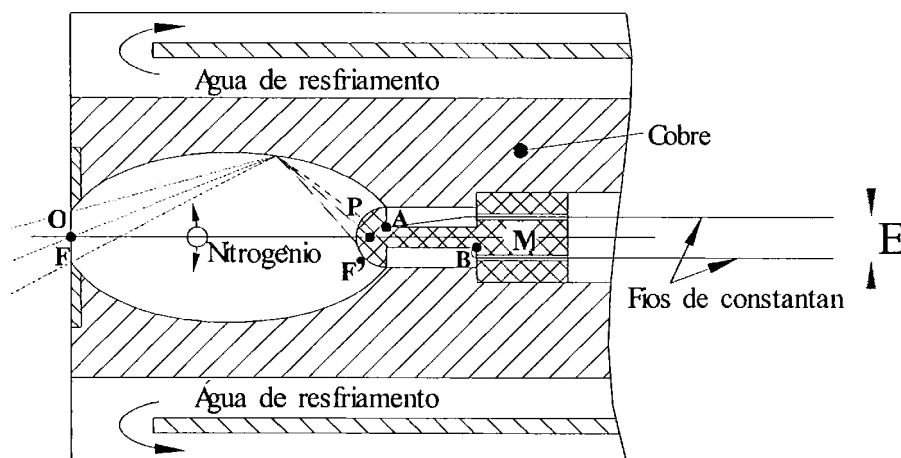


Fig. 3.2– Desenho esquemático do radiômetro da IFRF

O radiômetro de cavidade elipsoidal tem como característica fundamental fazer convergir a radiação incidente na abertura O, em um ângulo sólido de 2π sr, para um detector térmico tipo termopar e assim possibilitar a medição do fluxo radiativo total hemisférico. Com essa geometria e esse tipo de detector, o instrumento integra duplamente a energia incidente em seu aspecto angular e espectral, isto é, o instrumento tem como sua equação constitutiva a de Stefan-Boltzmann .

A radiação incidente que atravessa o plano focal F da cavidade elipsoidal espelhada é refletida e incide no plano focal F'. O elemento sensor é um termopar diferencial especial formado pelo elemento AB (em aço e de formato hemisférico) e dois fios de constantan (liga de cobre e níquel). Os pontos A e B estão em diferentes temperaturas e portanto é gerado um sinal elétrico proporcional ao fluxo incidente. A superfície sensível P é oxidada para aumentar sua absorvidade e a superfície da cavidade é espelhada com uma fina camada de ouro para aumentar sua refletividade.

Operando em fornalhas é necessário muitas vezes evitar que o sensor do radiômetro seja aquecido, de forma convectiva, pelos gases de combustão como também impedir a entrada de fuligem ou gotas de óleo. Isso é conseguido por meio da injeção de nitrogênio ou ar por dentro de sua cavidade de modo a produzir uma pressão positiva. Como a injeção de gás resfria o sensor somente pequenas vazões, da ordem de 42 l/h, são utilizadas em trabalho. Vazões assim pequenas muitas vezes são insuficientes para blindar totalmente a cavidade de gases ou particulados e,

então, constantemente o instrumento deve ser retirado do processo para ser limpo e recalibrado.

Um sistema de resfriamento permite ao instrumento operar com temperaturas de até $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ e sua faixa de trabalho vai de 0 a 500 kW/m^2 . Segundo CHEDAILLE e BRAUD (1972) medições realizadas com esse instrumento apresentam incertezas de 5%, entretanto os autores não indicam o intervalo de confiança. O tempo de resposta é da ordem de 60 s e a sensibilidade declarada pelo fabricante LAND (1977) é de $250\text{ }\mu\text{V/W/cm}^2$.

3.3 O radiômetro elipsoidal de Gunners

GUNNERS (1967) reportou brevemente um outro radiômetro de cavidade elipsoidal que segue basicamente a concepção do IFRF e está esquematizado na Fig. 3.3. Sua inovação foi a introdução, como elemento sensor, de uma termopilha convencional após o plano focal posterior da cavidade elipsoidal. O sensor de radiação é protegido por uma janela transparente de brometo de potássio e isso impede que o fluxo de ar, que evita a entrada de gases quentes ou deposição de fuligem na cavidade, diminua a temperatura do sensor. Uma desvantagem é que a janela não é totalmente transparente à radiação e outra é que o máximo fluxo que pode medir está em torno de 50 Kw/m^2 .

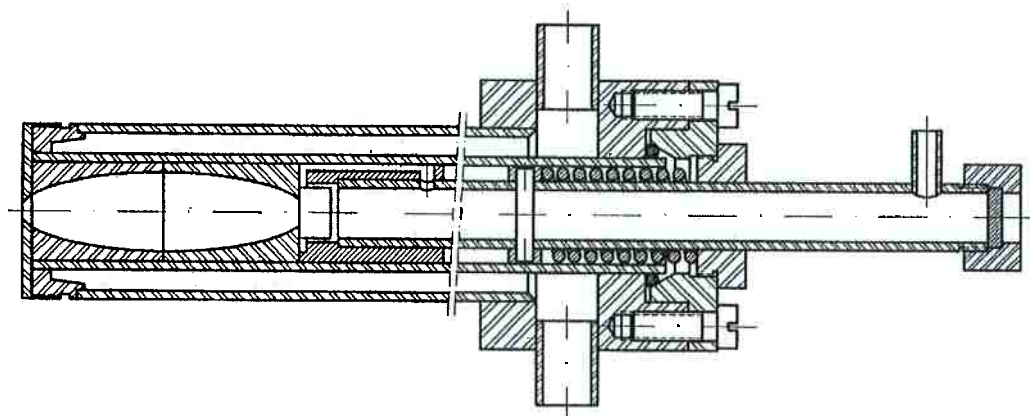


Fig. 3.3 – Desenho esquemático do radiômetro de Gunners

A curva de calibração fornecida é dada e a sensibilidade, que pode ser calculada por intermédio dela, é de aproximadamente $1250 \mu V/W/cm^2$. MURTHY *et al.* (2000) reportam também a utilização de um radiômetro de cavidade elipsoidal em seus estudos para padronizar a calibração de medidores de fluxo de calor total, instrumento de importância crescente na indústria aeroespacial. Atualmente, também, estão sendo realizadas pesquisas na IFRF para melhorar seu tempo de resposta (IFRF, 2001). Normas internacionais (WETTERLUND, 2003) de proteção ao fogo afirmam ser esse tipo de instrumento fundamental para a sua realização e é o instrumento padrão para medição de radiação total hemisférica.

MURTHY *et al.* (2003) também publicou uma caracterização do radiômetro de Gunners em que mostra a sua resposta angular, como na Fig. 3.4.

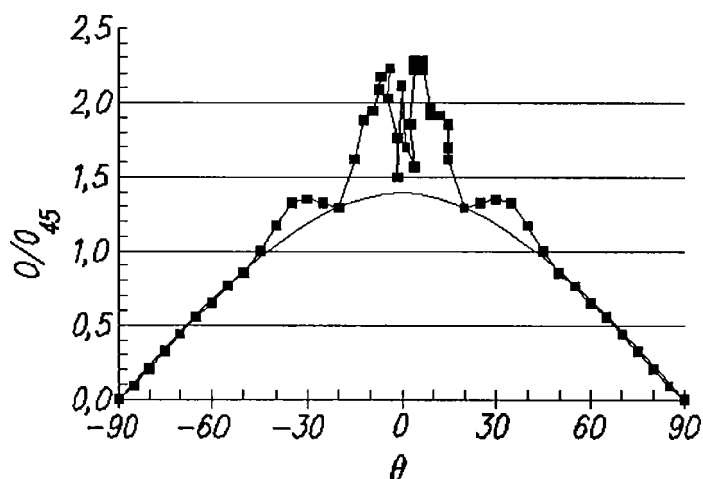


Fig. 3.4 - Resposta angular do radiômetro de Gunners

Como pode ser observado na Fig. 3.4, há uma concordância com a resposta cosenoidal teórica somente entre -90° e -40° e entre $+40^\circ$ e $+90^\circ$. Os autores reportam que o instrumento necessita de desenvolvimento.

3.4 O protótipo IPT/EPUSP

O protótipo, desenvolvido ao longo de 1996 e tema da dissertação de mestrado de OLIVEIRA (1998) mantém as concepções básicas do radiômetro do IFRF mas possui modificações que otimizaram seu desempenho. Foi realizada uma nova

concepção de seu detetor transformando-o em um instrumento de alta sensibilidade, que superou em larga escala os problemas apresentados pelo protótipo pioneiro desenvolvido no Brasil por SOUSA *et al.* (1980).

Tal como no instrumento do IFRF 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 que, alojado em um coletor, transforma a radiação incidente em um sinal elétrico proporcional a potência emissiva total hemisférica como na Fig. 3.5 .

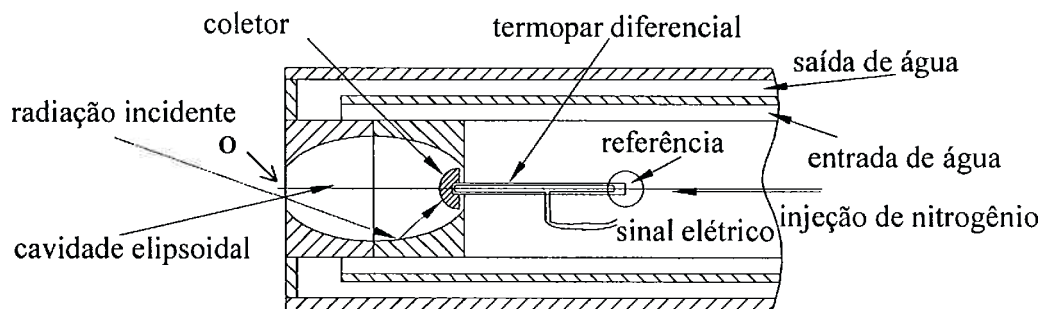


Figura 3.5 – Desenho esquemático do protótipo IPT/EPUSP

A sensibilidade desse radiômetro é de $935\mu V/kW/cm^2$. O resultado é expressivo pois representa cerca de quatro vezes o valor da sensibilidade de um instrumento comercial (LAND, 1977). Sua incerteza de calibração foi calculada em 6,6% , com intervalo de confiança de 95%, valor também comparável a instrumentos semelhantes. O fluxo radiativo máximo medido foi $171 kW/m^2$ para uma temperatura de corpo negro de $1108 ^\circ C$.

O radiômetro é inovador pela concepção de seu coletor de grande resistência térmica e utilização de elementos sensores que possuem curvas de calibração universalmente aceitas. Os materiais utilizados na sua construção são largamente comercializados e de baixo custo. Essas características permitem sua fácil construção e uma calibração rastreável. Contudo esse radiômetro ainda mantém a concepção de injeção de uma cortina protetora de ar sendo injetado por dentro da cavidade.

3.5 O radiômetro do Instituto Superior Técnico

Um instrumento com um princípio de funcionamento diferente foi proposto e patenteado (INPI, número 101653J, Lisboa) por AFGAN e LEONTIEV (1995) baseado nos estudos de LEONTIEV (1974) sobre a extinção (“blow-off”) da camada limite de escoamentos turbulentos em superfícies porosas. Os autores, do IST, não forneceram a sensibilidade do instrumento, os materiais utilizados e as temperaturas máximas que estes materiais suportam, tornando difícil uma comparação com os radiômetros elipsoidais. Um dado relevante é a sua faixa de trabalho: 250 a 500 kW/m^2 e sua ilustração está na Fig. 3.6.

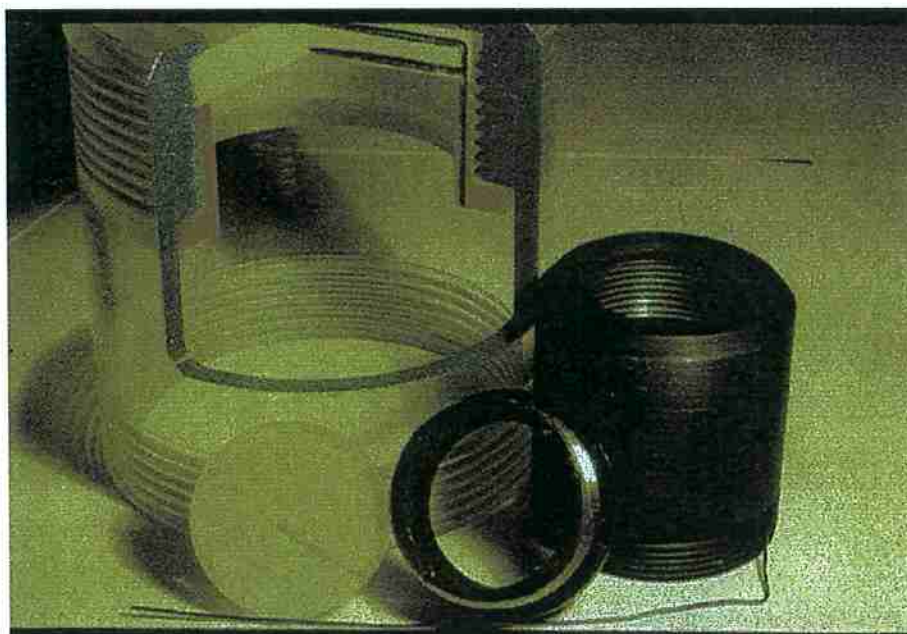


Fig. 3.6 – O radiômetro do Instituto Superior Técnico - Lisboa

3.6 O radiômetro de intensidade total do IFRF

Um medidor de intensidade total de radiação mede a energia radiante total em uma certa direção cujo pincel é limitado por um pequeno ângulo sólido. O assim chamado radiômetro de feixe estreito foi projetado e é comercializado pela IFRF (1994). O equipamento de medição é composto por tubos refrigerados, com 1000mm

de comprimento e diâmetro externo de 35 mm, nos quais está situado um orifício para a entrada de radiação e pelo qual é introduzido gás nitrogênio para purgar eventuais contaminações. O feixe que penetra no orifício incide em uma superfície espelhada de ródio e é refletido para um detetor de radiação total (termistor). Esse conjunto formado pelo espelho é refrigerado por um outro circuito de água. O instrumento é calibrado em fontes de radiação negras e um obturador, que impede a passagem de radiação, permitindo a verificação de zero. O ângulo sólido que o instrumento possui não é especificado. Na Fig. 3.7 está seu desenho esquemático.

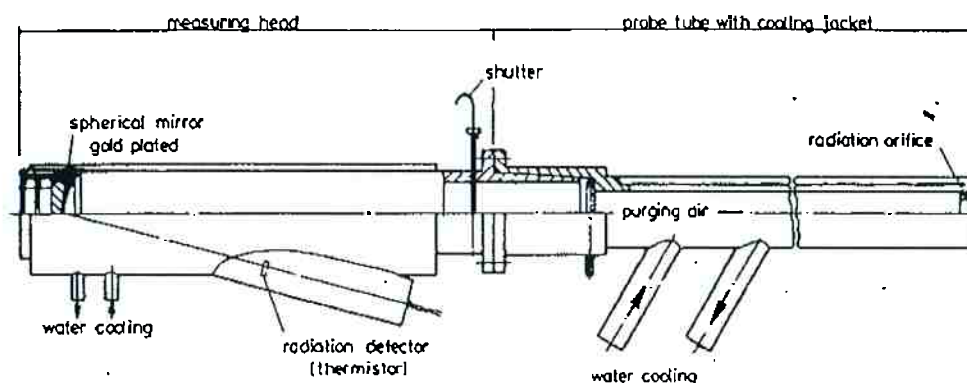


Fig. 3.8 – Desenho esquemático do radiômetro de intensidade total do IFRF

3.7 Comentários sobre a revisão bibliográfica

Por meio da pesquisa bibliográfica realizada foi verificado que atualmente existe somente um tipo de radiômetro para medição de intensidade total e somente três tipos de radiômetros de cavidade elipsoidal com a finalidade de medir potência emissiva total hemisférica: o do IFRF, o de Gunners e o radiômetro IPT/EPUSP. Na Tabela 2.1 estão algumas características dos três instrumentos.

Tabela 2.1 – Características principais dos radiômetros de cavidade elipsoidal

	Faixa de trabalho (kW.m ⁻²)	Sensibilidade (μV.W ⁻¹ .cm ⁻²)	Constante de tempo (s)	Incerteza (%)
IFRF	0 a 500	250	60 (99%)	5
Gunners	0 a 60	1 250	1 (99%)	Não informada
IPT/EPUSP	0 a 170	935	75 (63%)	6,6
IST	250 a 500	----	---	----

Da Tabela 2.1 pode ser observado que o radiômetro de Gunners tem a maior sensibilidade e menor tempo de resposta. Isto se deve ao fato de o instrumento possuir como sensor uma termopilha que multiplica o sinal de um termopar somente e possui tempo de resposta baixíssimos. Contudo sua faixa de trabalho é pequena justamente por usar como sensor a termopilha que não suporta altas temperaturas. Já o do IFRF é bastante robusto e pode trabalhar com fluxos altos mas sua sensibilidade é baixa. O protótipo IPT/EPUSP possui ótima sensibilidade mesmo utilizando somente um termopar mas seu tempo de resposta é muito alto.

Portanto, da revisão bibliográfica pode-se concluir que é possível melhorar esses tipos de radiômetros em suas características tais como sensibilidade, geometria, constante de tempo, resposta angular e sua operacionalidade.

4 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

Este capítulo apresenta o desenvolvimento experimental do trabalho: descreve o novo radiômetro de cavidade semi-elipsoidal, o novo radiômetro direcional, as variações paramétricas realizadas em radiômetros de cavidade elipsoidal assim como a bancada experimental desenvolvida e a metodologia utilizada.

O desenvolvimento experimental do radiômetro de cavidade semi-elipsoidal foi realizado por meio da caracterização do instrumento e envolveu sua calibração, o levantamento de sua resposta angular, a medição do efeito da cortina de ar e o seu tempo de resposta. O radiômetro direcional foi calibrado e as variações paramétricas em radiômetros de cavidade elipsoidal foram tais como a geometria e superfície do coletor, o material da superfície da cavidade e tipo de sensor térmico. Para cada configuração foi realizada sua calibração.

4.1 Descrição do novo radiômetro de cavidade semi-elipsoidal

O radiômetro de cavidade semi-elipsoidal, está esquematizado na Fig. 4.1.

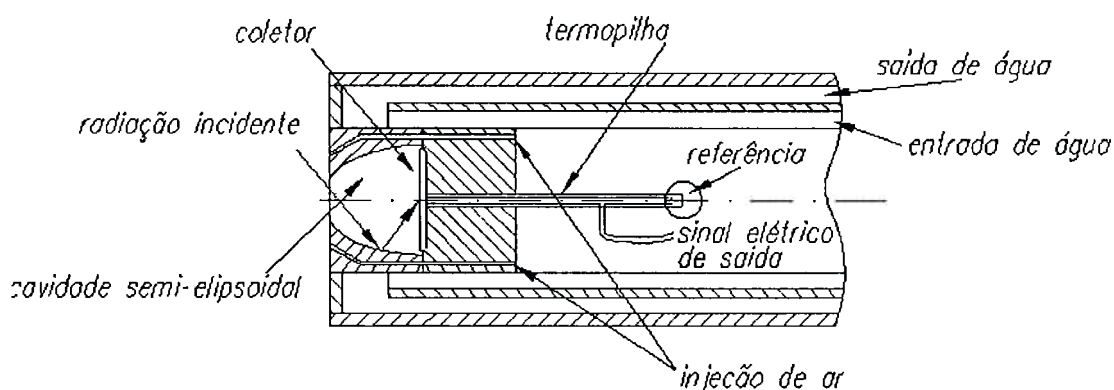


Fig. 4.1 – Desenho esquemático do radiômetro de cavidade semi-elipsoidal

Três tubos concêntricos, por onde circula água, mantêm refrigerada uma cavidade semi-elipsoidal que integra em um ângulo de 2π sr a radiação incidente convergindo-a para um coletor, na forma de disco, ao qual está acoplada uma termopilha robusta que gera um sinal elétrico proporcional à potência emissiva total

hemisférica incidente. Uma cortina de ar protege a cavidade da entrada de gases quentes ou da deposição de particulados ou voláteis. Uma vista completa do radiômetro está na Fig. 4.2.



Fig. 4.2 – Vista completa do instrumento

A cavidade semi-elipsoidal é espelhada e seccionada em seu plano focal onde está localizado o orifício de entrada. A cavidade elipsoidal que lhe dá origem tem excentricidade igual a 0,5, eixo maior igual a 38mm e eixo menor igual a 19mm . O orifício de entrada tem diâmetro igual a 10mm . A cavidade é fabricada em bronze e sua superfície recebeu um acabamento, por eletro-deposição, de uma fina camada de ouro, para torná-la altamente refletora. Na Fig. 4.3 é visto o orifício de entrada como também a secção no plano do eixo menor.



Fig. 4.3 – Cavidade semi-elipsoidal recoberta com ouro

O disco coletor, Fig. 4.4, é fabricado em cobre e na face que recebe a radiação, foi depositada uma fina camada de fuligem, garantindo assim uma alta absorvidade. O disco tem diâmetro de $0,9\text{mm}$, espessura de 1mm e possui um tubo em sua parte traseira para acoplar uma termopilha.



Fig. 4.4 – À esquerda, disco coletor fabricado em cobre. À direita disco coletor recoberto por fuligem e posicionado no eixo menor da cavidade semi-elipsoidal

Uma termopilha robusta, e especialmente construída, foi acoplada, por meio de soldagem, à parte traseira do coletor e é formada por cinco termopares, de isolamento mineral tipo K (cromel-alumel) com diâmetro externo de $0,5\text{mm}$. Esse conjunto de termopares é suportado por uma pinça, Fig. 4.5, garantindo seu posicionamento no eixo menor da cavidade. A junta de referência da termopilha é mantida em um banho de gelo fundente a 0°C e o sinal elétrico gerado é levado a um voltímetro por intermédio de fios de cobre.

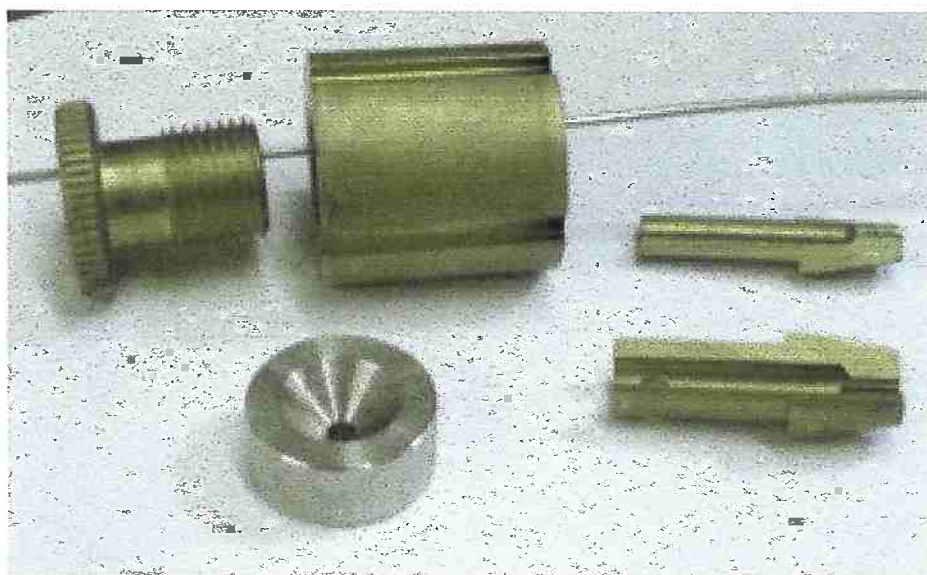


Fig. 4.5 – Pinça para suporte e posicionamento do coletor

O instrumento é robusto e foi projetado para trabalhar em altas temperaturas e ambientes hostis tais como o indicado na Fig. 4.6 onde se vê uma fornalha experimental sendo operada. A camisa d'água de refrigeração formada pelos três tubos concêntricos é fabricada em aço. Seu comprimento é de 410mm e o diâmetro externo mede 52mm .



Fig. 4.6 - Fornalha experimental do Laboratório de Combustão do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

Esse sistema de refrigeração permite que o radiômetro trabalhe em altas temperaturas assim como fornece durabilidade aos tubos. Na Fig. 4.7 são observadas as mangueiras para a entrada e saída de água assim como a soldagem dos três tubos concêntricos.



Fig. 4.7 – Vista da parte posterior do instrumento

Para a circulação de água através dos tubos foi construído um sistema de resfriamento composto por um reservatório, com capacidade de armazenamento de 100 l , e uma bomba que permite uma vazão máxima de 14 l/min. A Fig. 4.8 apresenta esse equipamento que permite ao instrumento ser levado a campo e tornando sua operação mais simples em situações reais de utilização.



Fig. 4.8 – Sistema de circulação de água para refrigeração do instrumento

Para que possa trabalhar em campo o radiômetro possui também um sistema de injeção de ar que forma uma cortina protetora de sua cavidade e evita que o coletor seja aquecido por gases ou sua superfície perca suas características refletoras pela deposição de voláteis ou partículas.



Fig. 4.9 – Orifícios de saída de ar por fora da cavidade

A injeção de ar é realizada pela parte traseira do instrumento, Fig. 4.7, passa pela parte central da camisa d'água, entra pela parte traseira da pinça, e por fora da cavidade, saindo entre o orifício de entrada e a tampa do instrumento. A Fig. 4.9 mostra os orifícios de saída do fluxo de ar enquanto que a Fig. 4.10 mostra a vista frontal do radiômetro onde é observada a tampa, rosqueada, que impede o movimento da cavidade, permite que a radiação incida somente em seu plano focal como também orienta o fluxo de ar para a formação da cortina sem que haja recirculação para o interior da cavidade.

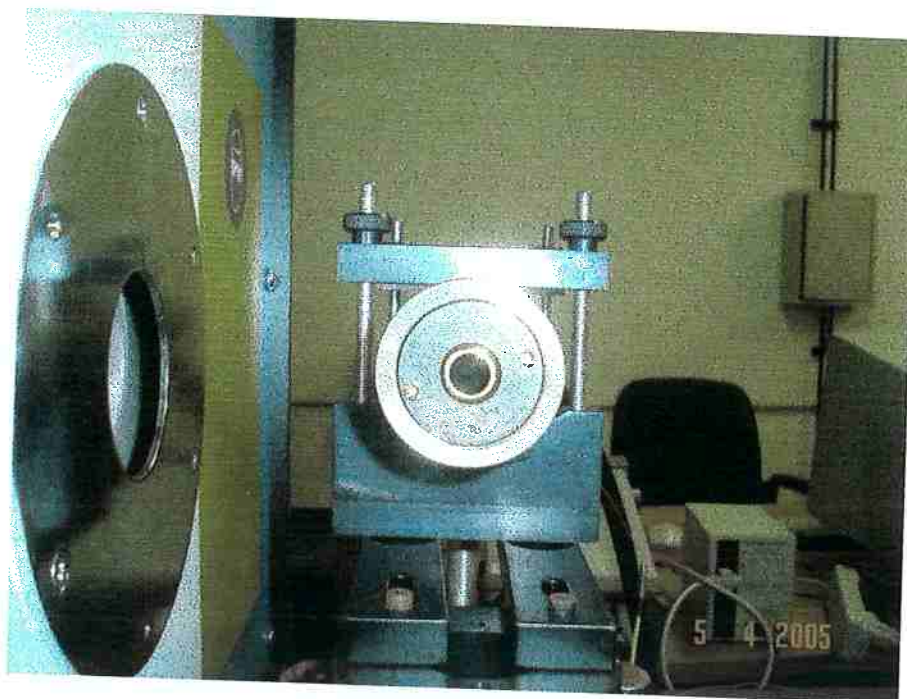


Fig. 4.10 – Vista frontal do radiômetro

A injeção de ar de é realizada por uma bomba e sua vazão pode ser medida por um medidor de vazão integrador, como na Fig. 4.11. Essa concepção da injeção de ar por fora da cavidade permite que a vazão de saída seja variada de acordo com o ambiente e que o instrumento trabalhe continuamente sem que haja necessidade de recalibrações constantes.



Figura 4.11 - Bomba utilizada para injeção de ar e medidor de vazão

4.2 Descrição do novo radiômetro de intensidade total

O novo radiômetro para medir intensidade total é composto por três tubos concêntricos por onde circula água de refrigeração e idênticos aos já descritos no item 4.1. Inserido na camisa d'água está o dispositivo da Fig. 4.12 que dirige a radiação em um ângulo sólido definido desde sua entrada até o sensor constituído por uma termopilha comercial. O sinal elétrico gerado é proporcional à intensidade total da radiação incidente na direção do tubo.



Fig. 4.12 – Sistema para dirigir a radiação

O sistema para dirigir a radiação é composto por um cilindro vazado, à esquerda da Fig. 4.12, um tubo acoplado a ele e que é conectado a um dispositivo que aloja a termopilha, à direita da Fig. 4.12. O sistema, todo fabricado em aço, tem 490mm de comprimento total. O cilindro tem diâmetro externo de 25mm e altura de 55mm . O orifício está no centro do cilindro e tem diâmetro de 2mm por onde incide a radiação como na Fig. 4.13.



Fig. 4.13 – Vista frontal do orifício para a entrada de radiação

A radiação que penetra no orifício incide diretamente na termopilha que está alojada ao final do sistema como na Fig. 4.14. Para as dimensões do instrumento, o ângulo sólido calculado foi de $1,3084 \times 10^{-5} \text{ sr}$. Isto significa que a uma distância de 10m o instrumento vê um objeto com diâmetro de 40mm . Um tal ângulo sólido permite um mapeamento bastante preciso para efeito de tecnologias industriais.

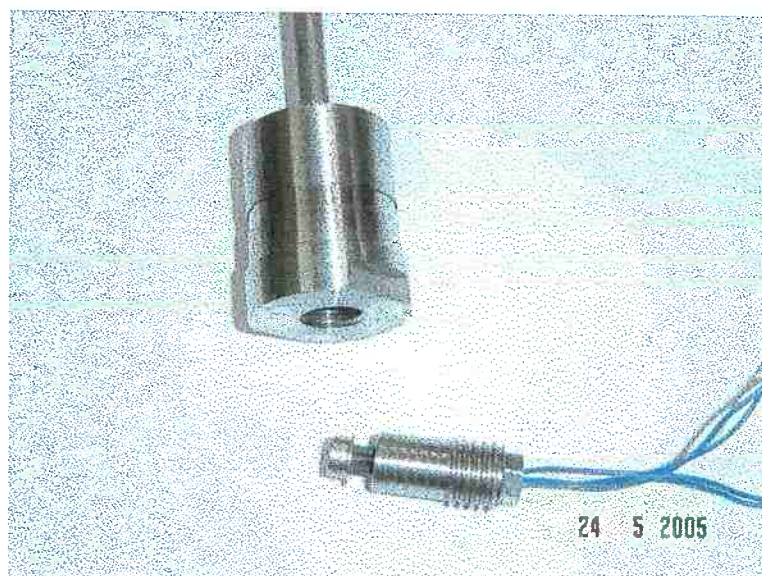


Fig. 4.14 – Dispositivo para alojar a termopilha

4.3 Variações paramétricas em radiômetros de cavidade elipsoidal

Esse item descreve uma análise experimental em radiômetros de cavidade elipsoidal tendo como base o protótipo IPT/EPUSP e descrito no item 3.3. A análise foi realizada por meio de variações paramétricas no recobrimento da superfície da cavidade por dois materiais (níquel ou ouro), na geometria do coletor (circular ou hemisférica), nos materiais de sua superfície (fuligem ou níquel preto) e no tipo de sensor de radiação térmica (termopar ou sensor resistivo). Para cada configuração estudada foi levantada sua curva de calibração e sua sensibilidade. A tabela 4.1 resume todas as variações paramétricas realizadas.

Tabela 4.1 – Resumo das variações paramétricas realizadas

Sensor	Geometria do coletor	Superfície do coletor	Superfície da cavidade
Termopar	Disco no plano focal	Fuligem	Ouro
	Disco no eixo menor da cavidade	Fuligem	Ouro
			Níquel
	Casca hemisférica no plano focal	Fuligem	Ouro
		Níquel preto	
	Termopilha	Disco no eixo menor da cavidade	Fuligem
Resistivo	Casca hemisférica no plano focal	Fuligem	Ouro

4.3.1 Superfície da cavidade

Na superfície das cavidades, todas fabricadas em bronze, foram realizados dois tipos de recobrimento por eletro-deposição com os materiais ouro ou níquel, para verificar qual o melhor desempenho daqueles materiais no aspecto reflexão. A

refletividade do níquel é em torno de 0,9 (GRAY,1972) e a do ouro é de 0,998 (SIEGEL & HOWELL, 1992). As cavidades são vistas na Fig. 4.15.



Fig. 4.15 – À esquerda, cavidade de ouro montada e à direita, cavidade de níquel sem montagem

4.3.2 Geometria e superfície do coletor

A geometria do coletor, fabricado em cobre, foi variada de duas maneiras: circular ou hemisférica e ambas posicionadas no plano focal da cavidade elipsoidal.

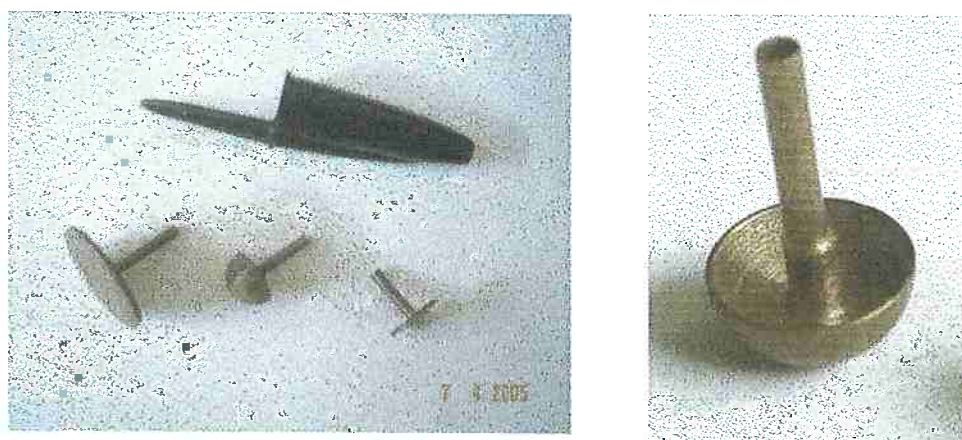


Fig.4.16 – Geometrias do coletor: à esquerda os três tipos utilizados. À direita detalhe do coletor hemisférico

O recobrimento da superfície do coletor é muito importante e deve possuir grande absorvidade. Esse parâmetro do radiômetro foi variado de duas maneiras: superfície com depósito de fuligem ou níquel preto eletro-depositado.

4.3.3 Tipos de sensores do coletor

Dois foram os tipos de sensores do coletor: um único termopar comercial de isolamento mineral, tipo T (cobre-constantan) e a medição da resistência elétrica do próprio termopar que atuou como um sensor resistivo. Atualmente todos os radiômetros de cavidade elipsoidal têm como sensor de radiação termopares ou termopilhas e tipo de sensor resistivo representa uma inovação.

4.4 Bancadas experimentais e metodologia

O arranjo experimental básico para o desenvolvimento deste trabalho é formado por uma fonte de radiação térmica tipo corpo negro, um voltímetro multicanal, uma junta de referência a 0°C , um computador para aquisição de dados, um goniômetro e um *laser* de potência. Um tripé foi usado como base de sustentação dos instrumentos.

O corpo negro, Fig. 4.17, é da marca Mikron, modelo M300, é composto por uma cavidade esférica aquecida eletricamente. A cavidade tem emissividade efetiva de 0,999 \pm 0,0005 e sua abertura tem 53mm de diâmetro. A temperatura dessa fonte pode ser controlada de 100°C até 1200°C com estabilidade de $0,5^{\circ}\text{C}$ para um período de 8h. A incerteza na medição da temperatura é de \pm 0,25% de sua leitura.



Fig 4.17. – Corpo negro de cavidade esférica

O voltímetro, mostrado na Fig. 4.18, é da marca Agilent, modelo 34970A, com capacidade para 60 canais e pode medir temperatura, tensão e resistência elétrica.



Fig. 4.18 – Multímetro de 60 canais

Os dados foram adquiridos em computador por meio de um programa próprio que acompanha o instrumento. A incerteza na medição de tensão elétrica é de $\pm 1\mu V$ e a de temperatura é de $\pm 0,1\text{ }^{\circ}C$. A Fig. 4.19 mostra o sistema completo de aquisição.



Fig. 4.19 – Sistema de aquisição de dados

A junta de referência para reproduzir $0^{\circ}C$, como vista na Fig. 4.20, é composta por uma garrafa térmica e um tubo de vidro onde estão os fios termopares. O gelo fundente foi feito com água destilada e periodicamente foi verificada a manutenção desse ponto fixo de temperatura.



Fig. 4.20– Junta de referência a 0°C

O *laser* é de argônio, marca Laser Coherent e sua potência pode ser variada entre 0,033 *W* e 10,0 *W*. Sua frequência de trabalho está entre 418 e 514 nm . A Fig. 4.21 mostra um detalhe dessa fonte.



Fig. 4.21 – Fonte *laser* de potência

O goniômetro tem resolução de 1° e foi sustentado em uma base de aço em cima de uma mesa comum.



Fig. 4.22- Goniômetro

4.4.1 Calibração

A calibração foi realizada com o corpo negro em temperaturas estáveis entre $200^\circ C$ e $1000^\circ C$, com variação entre cada uma de $100^\circ C$, o que permitiu densidades de fluxos radiativos de até $150 \text{ Kw}/m^2$. A face do instrumento foi posicionada tangencialmente à cavidade esférica para que seu ângulo de visada fosse $2\pi \text{ sr}$. Foram adquiridos dados da temperatura ambiente, do sinal do instrumento, da temperatura do coletor, da temperatura de entrada e saída de água de resfriamento.

Esse conjunto de dados foi adquirido em intervalos de 5 em 5s para um total de 30 leituras. A vazão de água foi medida em um volume com escala graduada. Para cada temperatura do corpo negro foi calculada sua potência emissiva total hemisférica, ou intensidade total, e correlacionada com o sinal elétrico medido. Os termopares foram calibrados e apresentaram incerteza de $\pm 0,5^\circ C$. A Fig. 4.23 apresenta o posicionamento do radiômetro nos experimentos de calibração.



Fig. 4.23 – Posicionamento do radiômetro para calibração

4.4.2 Resposta angular

A resposta angular do instrumento foi medida posicionando o radiômetro em frente à cavidade do corpo negro e variado o ângulo entre ela e a face do instrumento entre -90° e $+90^\circ$ com intervalo de 10° . A seguir, as Fig. 4.24 e Fig. 4.25 indicam as posições do radiômetro, respectivamente, em 0° e 90° .



Fig. 4.24 – Posição do radiômetro a 0°



Fig. 4.25 – Posicionamento a 90°

Para realizar as medições da resposta angular o instrumento foi montado em um goniômetro, a fonte foi mantida estável em 1000°C e o sinal de saída elétrico foi medido. Os dados foram coletados medindo-se, seqüencialmente, o sinal do

radiômetro a 0° , no ângulo θ a ser variado e em 90° . Os valores a 0° e 90° foram considerados, respectivamente, o máximo e mínimo. Para levar em conta que a 0° ainda o instrumento mede a radiação de fundo do ambiente foi feita uma correção e o cosseno foi calculado como sendo a Eq. 4.1 .

$$\cos(\theta) = \frac{E_\theta - E_{90^\circ}}{E_{0^\circ} - E_{90^\circ}} \quad (4.1)$$

4.4.3 Efeito da cortina de ar no sinal do instrumento

A bancada para esse experimento foi composta pela fonte *laser* e os demais componentes do radiômetro: sistema de resfriamento e injeção de ar. A Fig. 4.26 mostra o arranjo experimental.



Fig. 4.26 – Arranjo experimental para o efeito da cortina de ar

O procedimento foi aquecer o coletor e medir a sua temperatura com e sem a injeção de ar. O aquecimento foi realizado pelo *laser* e um espelho posicionado a 45° desviava o feixe para uma incidência direta no coletor. Com o sistema de circulação de água ligado e o de injeção de ar desligado foi aguardado o aumento e estabilização da temperatura do coletor. Após a estabilização foi ligado o sistema de injeção de ar com vazão de 660 l/h. Após a diminuição da temperatura do coletor foi aguardada

sua estabilização. Os dados foram coletados nas duas situações estáveis acima, uma sem ar e outra com ar sendo injetado.

4.4.4 Tempo de resposta

O tempo de resposta do instrumento foi levantado posicionando o radiômetro em frente à fonte de radiação, vedada sua cavidade e aguardada a estabilização do instrumento à temperatura ambiente. Após esse procedimento a cavidade foi aberta rapidamente e o sinal do instrumento foi medido, com intervalo de 1s, durante 228s. O tempo de resposta foi determinado quando o sinal atingiu 63% de seu valor máximo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos novos radiômetros como também os resultados das variações paramétricas realizadas em radiômetros para medição de potência emissiva total hemisférica.

A caracterização do novo radiômetro de cavidade semi-elipsoidal apresentou excelentes resultados: tem curva de calibração linear, alta sensibilidade, resposta angular lambertiana e resposta linear quando injetado ar.

A análise experimental, realizada por meio de variações paramétricas, demonstrou que o novo radiômetro de cavidade semi-elipsoidal tem características superiores a todos os outros. Em relação ao radiômetro direcional, os resultados indicam que o conceito adotado é válido mas alguns ajustes são necessários para obter uma sensibilidade maior.

5.1 Resultados do radiômetro de cavidade semi-elipsoidal

Este item apresenta os resultados da caracterização do radiômetro de cavidade semi-elipsoidal: sua curva de calibração, resposta angular, efeito da cortina de ar e tempo de resposta.

5.1.1 Curva de calibração

A calibração do radiômetro foi obtida com os dados da Tabela 5.1 onde foram medidos a temperatura da fonte, o sinal do coletor, a temperatura de entrada e saída de água. A potência emissiva total hemisférica foi calculada levando-se em conta a emissividade da fonte.

Tabela 5.1 – Dados da curva de calibração

Temperatura corpo negro	Potência emissiva total Hemisférica	Sinal coletor	Temperatur a de entrada da água	Temperatur a de saída da água
$^{\circ}C$	W/m^2	μV	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$
200	2.839	5.726	25,9	26,2
300	6.113	6.563	26,5	26,9
400	11.630	7.816	26,9	27,5
500	20.240	9.695	27,2	28,2
600	32.923	12.421	27,3	28,7
700	50.800	16.101	27,5	29,5
800	75.126	21.047	27,4	30,2
900	107.291	27.375	27,3	31,1
1.000	148.822	35.121	27,0	32,1

Os dados da Tabela 5.1 foram ajustados pelo método dos mínimos quadrados e a curva de calibração encontrada é a Eq. 5.1.

$$e(T) = 4,60.E - 23637 \quad (5.1)$$

Essa curva possui $\chi^2=0,99$ e a sensibilidade é de $2.173 \mu V/W/cm^2$. Na Fig. 5.1, é fornecida a sua curva de calibração.

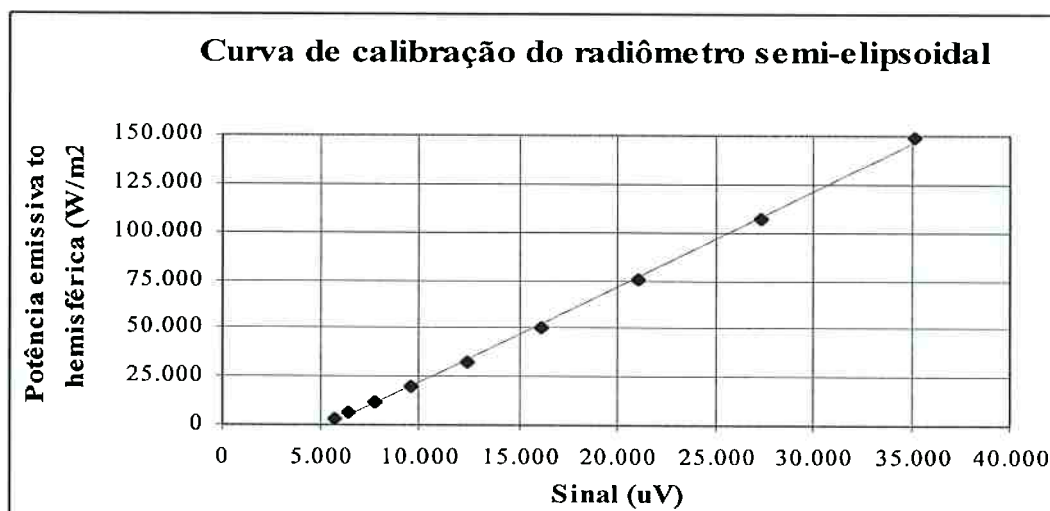


Fig. 5.1 – Curva de calibração do radiômetro de cavidade semi-elipsoidal

A variação da incerteza de medição está na Fig. 5.2 e foi calculada com a metodologia descrita em VUOLO (1996).

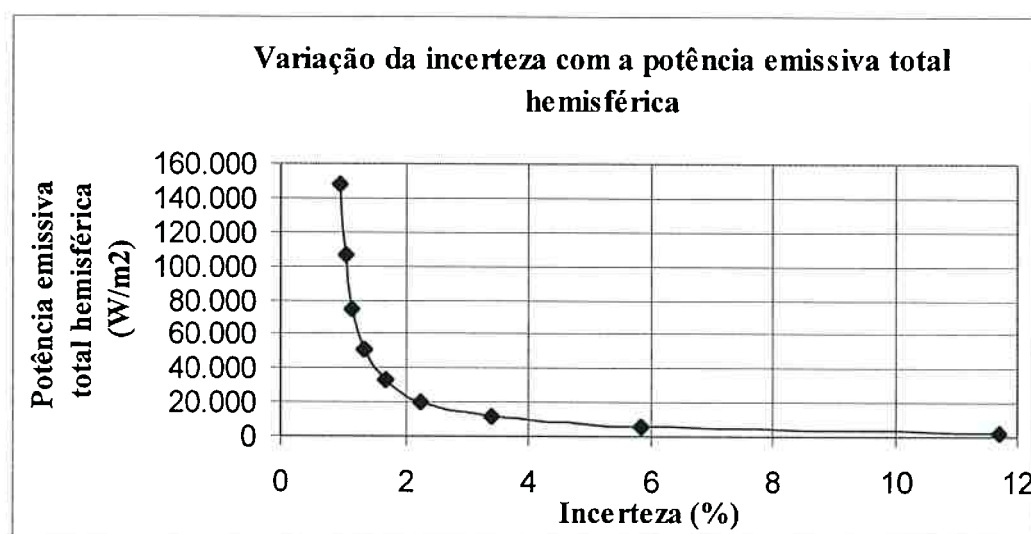


Fig. 5.2 – Variação da incerteza com o fluxo de radiação

No trabalho de OLIVEIRA (1998) foi verificado que a maior causa das incertezas nesse tipo de calibração estava na fonte. No presente trabalho, usando um equipamento comercial, observa-se que para baixos fluxos radiativos a incerteza é grande e diminui significativamente quando o equipamento atinge fluxos das ordem de 30.000 W/m^2 o que significa que a fonte aproxima-se mais de um corpo negro ideal a altas temperaturas e, conseqüentemente, a incerteza cai e praticamente permanece constante a partir de 70.000 W/m^2 .

5.1.2 Resposta angular

A resposta angular é uma medida importante para verificar a eficiência do radiômetro na integração da radiação incidente em um ângulo de 2π sr. A resposta angular do radiômetro é cossenoidal, conforme indicada na Fig. 5.3, que apresenta sua resposta ideal e a resposta angular experimental obtida.

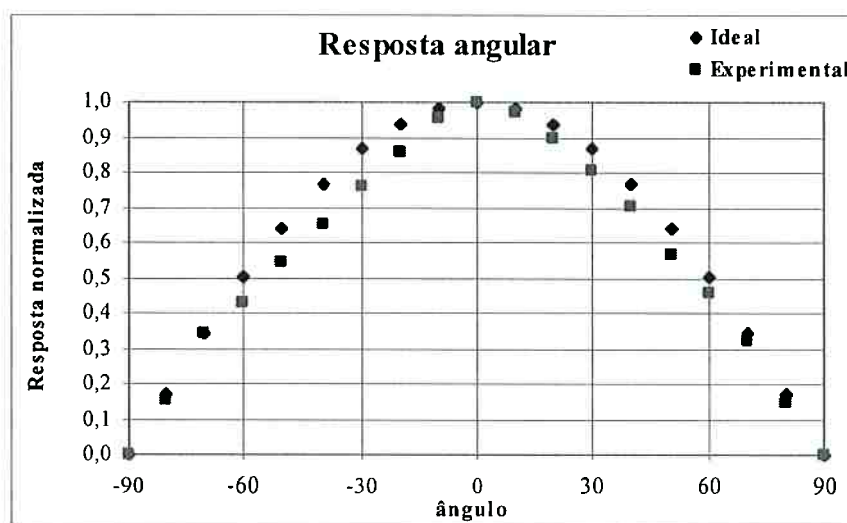


Fig. 5.3 – Resposta angular do radiômetro de cavidade elipsoidal

Os desvios da curva teórica são observados por causa do tamanho da fonte, conforme descrito no Cap. 4. Quando o radiômetro está posicionado a 0° , conforme indicado na Fig. 4.2.4, ele integra a parcela proveniente da fonte e também a radiação ambiente, o que faz com que seu sinal a 0° não seja o máximo, para aquela fonte. Isto é, o ângulo sólido efetivo do instrumento não é 2π sr.

A assimetria observada com relação aos ângulos negativos e positivos é explicada pelo fato de o tubo do corpo negro ter se quebrado e parcela da radiação é maior do lado direito do que do lado esquerdo.

Além disso como o radiômetro é semi-elipsoidal as imperfeições das paredes são reduzidas em 50% o que favoreceu sua ótima resposta angular. Utilizando somente uma cavidade semi-elipsoidal o instrumento minimiza as perdas por reflexão, espalhamento ou absorção de uma segunda parte da cavidade e com isso

apresentou uma ótima resposta angular que supera largamente o radiômetro de GUNNERS (1967) reportado por MURTHY *et al.* (2003).

5.1.3 Efeito da cortina de ar

O levantamento desse efeito é muito importante pois permite que o instrumento trabalhe em campo, tornando-o operacional, e não seja somente um instrumento de laboratório. A Fig. 5.4 mostra como é o efeito da cortina de ar na temperatura do coletor e, conseqüentemente, em seu sinal de saída. A potência do *laser* foi de $5,95W$ o que elevou a temperatura do coletor a $259,4^{\circ}C$. Após a injeção de ar com vazão de $660\ l/min$ a temperatura decresceu e atingiu $251,8^{\circ}C$. Desligado o fluxo de ar, a temperatura do coletor retornou ao valor inicial.

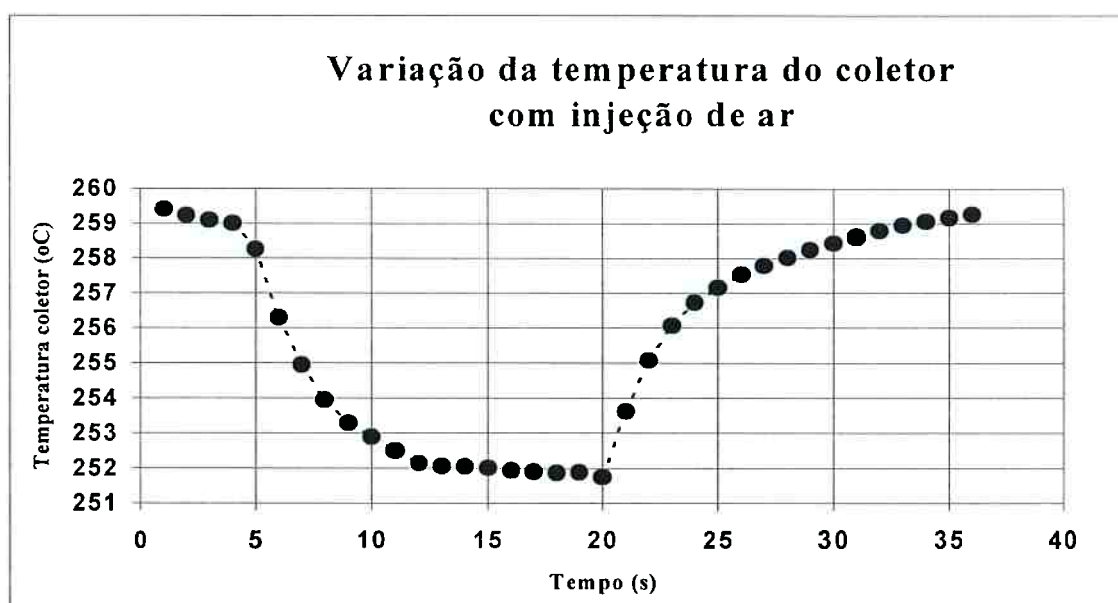


Fig. 5.4 – Variação da temperatura do coletor com a cortina de ar

A Tabela 5.2 indica as condições em que foram adquiridos os dados para verificar a influência da cortina de ar na temperatura do coletor. Essa tabela indica as temperaturas iniciais e finais de cada ciclo e a potência correspondente do *laser*.

Tabela 5.2 – Variação da potência da fonte *laser*

Potência <i>laser</i>	Temperatura final	Temperatura inicial
<i>W</i>	°C	°C
5,95	251,8	259,4
4,99	225,0	232,6
4,02	195,1	202,0
2,98	157,3	164,3
2,00	119,5	125,2
1,00	76,2	80,5

Com base nos dados da Tabela 5.2 foi levantada a curva de correlação entre as duas condições que está na Fig. 5.5.

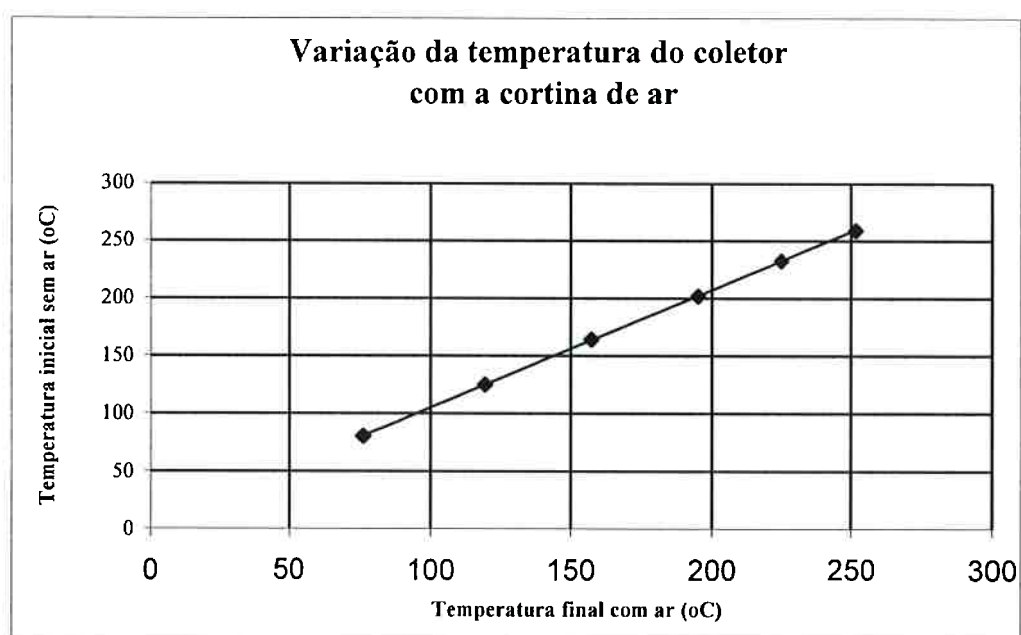


Fig. 5.5 – Correlação entre as temperaturas do coletor com e sem injeção de ar

A função de correlação obtida é a Eq. 5.2 e essa correlação possui $\chi^2=0,99$.

$$T_{Final} = 1,0187.T_{inicial} + 3,2943 \quad (5.2)$$

O resultado linear indica que o resfriamento do coletor não se dá pela recirculação do ar dentro da cavidade mas sim que a diminuição da temperatura do coletor é devida somente ao resfriamento da própria cavidade ocasionada pelo fluxo de ar.

O radiômetro do IFRF, reportado por CHEDAILLE e BRAUD (1972), introduz gás por dentro da cavidade para formar a cortina protetora e dessa maneira somente baixas vazões são possíveis para que ele possa ser calibrado em corpos negros e com injeção de ar. Vazões altas alterariam significativamente a temperatura da fonte assim como poderiam danificá-la. Por outro lado baixas vazões de gás implica que periodicamente o instrumento deve retirado do processo e recalibrado pois a cortina de gás pode não possuir pressão suficiente para barrar a entrada de contaminantes.

Já o radiômetro semi-elipsoidal é calibrado contra corpos sem injeção de ar e depois é realizada sua correção. A Eq. 5.2 é válida somente para as condições operacionais realizadas mas ela poderá ser refeita para qualquer outra vazão de ar necessária ao processo. Esse fato torna o instrumento muito operacional pois não necessita de recalibrações constantes pois as vazões podem ser ajustadas a cada caso.

5.1.4 Tempo de resposta

A Fig. 5.6 mostra a curva de resposta do instrumento com o sinal medido e o sinal ajustado. A constante de tempo foi calculada em 21s, o que para instrumentos desse tipo é um resultado muito bom. É observado que após 27s o sinal medido não acompanha a curva teórica respondendo mais lentamente pois a partir desse instante os efeitos de perda de calor por condução ficam mais evidentes pois o coletor se aproxima de sua temperatura máxima. O tempo de resposta pode ainda ser menor com a diminuição da massa do coletor.

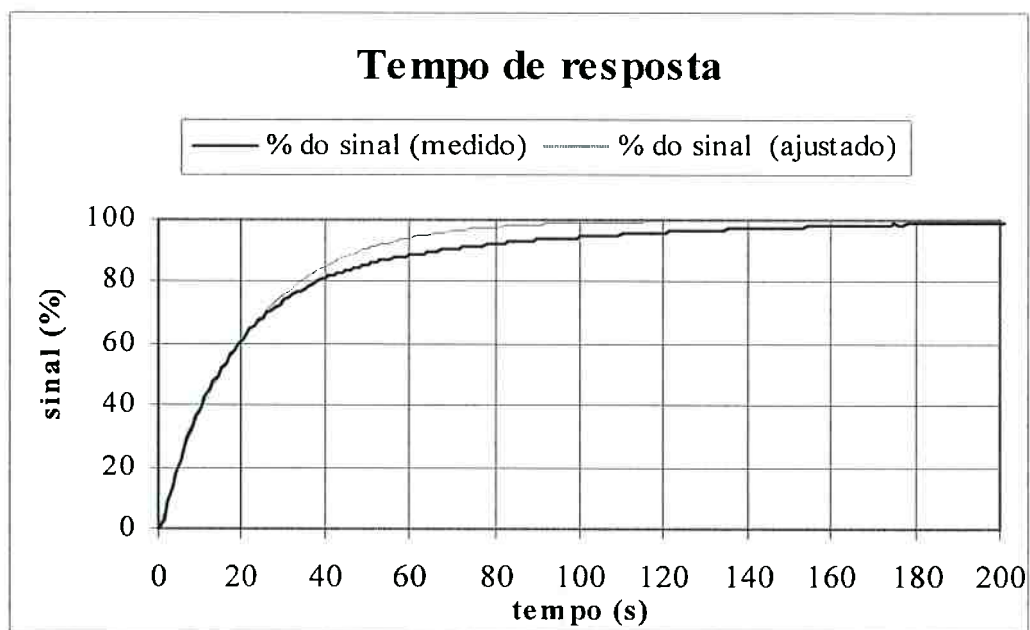


Fig. 5.6 – Tempo de resposta do radiômetro

5.2 Resultados do radiômetro de intensidade total

5.2.1 Curva de calibração

Foi levantada a curva de calibração do novo radiômetro direcional e ela está na Fig. 5.7 com base nos dados da Tabela 5.3.

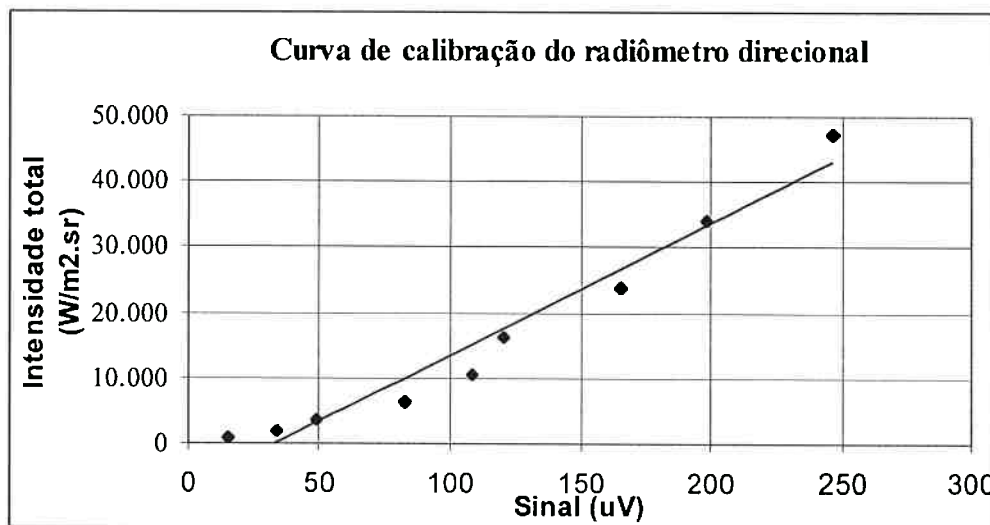


Fig. 5.7 – Curva de calibração do novo radiômetro direcional

A função de calibração é a Eq. 5.3 e possui $\chi^2=0,95$.

$$i(T) = 202,13.E - 6787 \quad (5.3)$$

A sua sensibilidade é de $49,5 \mu V/W/cm^2.sr$ o que é muito baixa quando comparada com a sensibilidade obtida como o novo radiômetro semi-elipsoidal. Apesar de a curva apresentar bom comportamento o valor obtido para o χ^2 indica uma possível não-linearidade e isso pode ser atribuído a vários fatores:

- o ângulo sólido é muito pequeno e resposta da termopilha, conseqüentemente, é baixa;
- a janela da termopilha age como um filtro diminuindo a parcela de radiação que chega aos fios termopares;
- esses fios termopares não são enegrecidos o que diminui a potência absorvida;
- a termopilha pode não estar isolada acarretando perdas de calor;
- a junta de referência da termopilha estava à temperatura ambiente e poderia ter sido colocada a $0^\circ C$.

Portanto, novos desenvolvimentos poderão ser realizados para melhorar sua sensibilidade pois seu ângulo sólido, calculado em $1,3084 \times 10^{-5} sr$, é consistente com suas aplicações pois significa que a uma distância de $10m$ o instrumento vê um

objeto com diâmetro de 40mm. Um tal ângulo sólido permite um mapeamento bastante preciso para efeito das tecnologias atuais.

Tabela 5.3 – Dados de calibração do radiômetro direcional

Temperatura do corpo negro	Intensidade total	Sinal
<i>°C</i>	<i>W/m².sr</i>	<i>μV</i>
200	904,5	15,0
300	1947,6	34,4
400	3705,8	49,3
500	6448,9	82,8
600	10490,3	108,0
700	16186,5	120,3
800	23937,3	165,7
900	34185,9	198,7
1000	47418,9	246,4

5.3 Variações paramétricas nos radiômetros de cavidade elipsoidal

A Tabela 5.4 indica todas as variações paramétricas realizadas nos radiômetros.

Tabela 5.4 – Variações paramétricas realizadas e respectivas sensibilidades

Sensor	Geometria do coletor	Superfície do coletor	Superfície da cavidade	Sensibilidade $\mu V/W/m^2$	χ^2	Experimento n°
Termopar	Disco no plano focal da cavidade elipsoidal	Fuligem	Ouro	477	0,99	37
	Disco no eixo menor da cavidade semi-elipsoidal	Fuligem	Ouro	1.135	0,98	33
			Níquel	1.062	0,99	34
	Casca hemisférica no plano focal da cavidade elipsoidal	Fuligem	Ouro	607	0,99	35 b
		Níquel preto		216	0,99	18
	Termopilha	Disco no eixo menor da cavidade semi-elipsoidal	Fuligem	Ouro	2.173	0,99
Resistivo	Casca hemisférica no plano focal	Fuligem	Ouro	0,424 ($\Omega/W/cm^2$)	0,99	14

5.3.1 Superfície da cavidade

Nos experimentos 33 e 34 foram variadas as superfícies da cavidade, ouro ou níquel. Nesse tipo de configuração o efeito da variação do tipo de revestimento da superfície interna de ouro para níquel, levou a uma diminuição da sensibilidade de cerca de 11% o que recomenda o ouro como sendo o melhor material para seu revestimento e está de acordo com a literatura, CHEDAILLE e BRAUD (1972) e GUNNERS (1967). Os demais parâmetros sempre foram comparados com a superfície da cavidade revestida de ouro.

5.3.2 Geometria e superfície do coletor

As geometrias do coletor foram variadas como na Fig. 4.16 . Comparando-se os resultados dos experimentos 37, 33 e 35b é verificado que a melhor configuração é a do experimento 33, isto é, o sensor posicionado no eixo menor da cavidade. A superfície do coletor nesses três experimentos foi de fuligem.

O radiômetro com coletor revestido de níquel preto, no experimento 18, mostrou-se 35% menos eficiente do que seu equivalente revestido de fuligem. Isso demonstra a importância de a superfície do coletor ser negra. Contudo essa desvantagem em termos de sensibilidade é compensada por sua operacionalidade pois superfícies revestidas com fuligem trabalham bem somente em ambientes de laboratório enquanto que a superfície revestida por níquel preto pode ser manipulada facilmente sem que ela se deteriore. Outra vantagem dessa configuração está no fato de que pode ser utilizada quando as temperaturas envolvidas sejam muito grandes.

5.3.3 Tipos de sensores do coletor

Os experimentos 44 e 14 foram realizados com dois tipos diferentes de sensor: uma termopilha construída especialmente e a utilização da própria resistência elétrica do termopar como sensor resistivo. Este último tipo de sensor não é atualmente utilizado em nenhum radiômetro para medição de potência emissiva total hemisférica e tem resposta linear. Isso demonstra que esse tipo de sensor desses radiômetros também poderá ser analisado com maiores detalhes.

Já o experimento 33, utilizando uma termopilha, superfície da cavidade de ouro, disco no eixo menor e com superfície recoberta por fuligem foi a melhor configuração encontrada e ela é a do novo radiômetro semi-elipsoidal.

Apesar de o radiômetro de cavidade semi-elipsoidal apresentar ótima sensibilidade seu projeto ainda pode ser melhorado. A Tabela 5.5 mostra as temperaturas atingidas pelo radiômetro semi-elipsoidal em sua configuração com um único termopar e com a termopilha.

Tabela 5.5 – Temperaturas atingidas pelo coletor em duas diferentes configurações

Temperatura corpo negro $(^{\circ}C)$	Sensor	
	Um único termopar	Termopares em série
	Temperatura coletor $(^{\circ}C)$	Temperatura coletor $(^{\circ}C)$
200	31,8	28,8
300	42,5	32,8
400	59,2	39,4
500	79,4	48,6
600	127,2	62,4
700	185,0	83,6
800	217,1	108,5
900	280,8	143,1
1.000	340,6	185,7

O fato de as temperaturas atingidas pela termopilha serem menores do que as atingidas por um único termopar é explicado pela maneira como foi feita a soldagem dos termopares. Eles foram soldados perpendicularmente à superfície, fazendo com que o efeito aleta seja muito pronunciado. Para minimizar esse efeito um outro tipo de soldagem deverá ser realizado, soldando uma pequena parte do comprimento do

termopar paralelamente à superfície e com isso o efeito será minimizado. Supondo que as temperaturas atinjam os mesmos valores da configuração com somente um termopar espera-se que a sensibilidade seja multiplicada por cinco o que forneceria uma sensibilidade excepcional de cerca de 10 mV/W/cm^2 , o que permitiria utilizar como revestimento da superfície do coletor níquel preto e ainda manter uma grande sensibilidade.

5.4 Comentários

O novo radiômetro para medição de potência emissiva total hemisférica quebra o antigo paradigma de que esse tipo de radiômetro deve ser de cavidade elipsoidal. O radiômetro é formado por uma cavidade semi-elipsoidal e tem seu coletor instalado no seu eixo menor. Possui alta sensibilidade, $2.173 \mu\text{V/W/cm}^2$, quase duas vezes maior que o de GUNNERS (1967) e quase nove vezes o do IFRF reportado por CHEDAILLE e BRAUD (1972). Seu sensor, formado por uma termopilha robusta, suporta grandes temperaturas. Os termopares são montados com grande resistência térmica e suas curvas de calibração são aceitas universalmente, garantindo sua reprodutibilidade.

O radiômetro de cavidade semi-elipsoidal possui um fator de correção linear quando utilizado em campo e com cortina de ar. Esse fato elimina a necessidade de que periodicamente o instrumento seja retirado do processo para recalibrações pois é possível utilizar altas vazões de ar que não permitem que seu interior seja penetrado por contaminantes nem aquecido por gases vindos do processo. A injeção de ar por fora da cavidade mostrou que não há recirculação dentro dela e a perda de sinal é devido somente aos efeitos de condução.

Utilizando somente uma cavidade semi-elipsoidal o instrumento minimiza as perdas por reflexão, espalhamento ou absorção de uma segunda parte da cavidade e com isso apresentou uma ótima resposta angular que supera largamente o radiômetro de GUNNERS (1967) reportado por MURTHY *et al.* (2003). O método de tratamento da superfície da cavidade, por eletro-deposição, também é simples e realizado comercialmente em larga escala. A resposta cossenoidal, ou lambertiana, implica que sua capacidade de integração angular é hemisférica e como a superfície

de seu coletor é extremamente absorvedora indica que o sinal é proporcional à radiação total.

O seu tempo de resposta, de 21s, é bastante satisfatório para as aplicações previstas em que a situação é de equilíbrio térmico ou de regime permanente.

Como essas características, o novo radiômetro de cavidade semi-elipsoidal é uma boa alternativa a vir a ser o instrumento padrão mundial para a medição da potência emissiva total hemisférica, grandeza importantíssima para avaliação de trocas de calor por radiação térmica.

O novo radiômetro para medição de intensidade total ou radiômetro direcional é muito simples e elimina todo um sistema óptico existente no atual instrumento IFRF (1994). Contudo sua sensibilidade calculada em $49,5 \mu V/W/cm^2.sr$ é muito baixa. Isso pode ser atribuído a vários fatores:

- a) o ângulo sólido é muito pequeno e resposta da termopilha, conseqüentemente, é baixa;
- b) a janela da termopilha age como um filtro diminuindo a parcela de radiação que chega aos fios termopares;
- c) esses fios termopares não são enegrecidos o que diminui a potência absorvida;
- d) a termopilha pode não estar isolada acarretando perdas de calor;
- e) a junta de referência da termopilha estava à temperatura ambiente e poderia ter sido colocada a $0^{\circ}C$.

Portanto, novos desenvolvimentos poderão ser realizados para melhorar sua sensibilidade pois seu ângulo sólido, calculado em $1,3084 \times 10^{-5} sr$, é consistente com suas aplicações pois significa que a uma distância de $10m$ o instrumento vê um objeto com diâmetro de $40mm$. Um tal ângulo sólido permite um mapeamento bastante preciso para efeito das tecnologias atuais.

A análise experimental realizada torna disponível dados inexistentes na literatura aberta como a comparação entre os materiais de revestimento da superfície refletora da cavidade, a comparação entre as diversas geometrias possíveis para o coletor, a comparação entre diferentes materiais depositados em sua superfície. Dentre os diversos sensores térmicos que podem ser utilizados fica estabelecido também que o sensor do coletor pode ser resistivo, elemento que hoje não é utilizado em nenhum outro radiômetro para medição de potência emissiva total hemisférica.

Para a realização de todo o trabalho foi montado um aparato experimental e desenvolvido procedimentos para análise paramétrica de radiômetros de cavidade elipsoidal. O sistema montado para verificar o comportamento da temperatura do sensor do radiômetro semi-elipsoidal, baseado em um *laser* de potência, é inovador. Da análise experimental também é possível concluir que podem ser utilizadas, dependendo do tipo de aplicação, as várias configurações testadas com radiômetros elipsoidais. Por exemplo, a configuração com um coletor revestido de níquel preto pode ser utilizada quando as temperaturas envolvidas sejam muito grandes ou a aplicação em campo seja o objetivo.

6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram desenvolvidos dois novos radiômetros, um para medição de potência emissiva total hemisférica, outro para medição de intensidade total. Foi montado um aparato experimental e desenvolvidos procedimentos para análise paramétrica de radiômetros de cavidade elipsoidal e realizada uma análise experimental nesses tipos de radiômetros.

O novo radiômetro para medição de potência emissiva total hemisférica quebra o antigo paradigma de que esse tipo de radiômetro deve ser de cavidade elipsoidal. O radiômetro é formado por uma cavidade semi-elipsoidal e tem seu coletor instalado no seu eixo menor. Possui alta sensibilidade, $2.173 \mu V/W/cm^2$, quase duas vezes maior que o de GUNNERS (1967) e quase nove vezes o do IFRF reportado por CHEDAILLE e BRAUD (1972). Seu sensor, formado por uma termopilha robusta, suporta grandes temperaturas. Os termopares são montados com grande resistência térmica e suas curvas de calibração são aceitas universalmente, garantindo sua reprodutibilidade.

O radiômetro de cavidade semi-elipsoidal possui um fator de correção linear quando utilizado em campo e com cortina de ar. Esse fato elimina a necessidade de que periodicamente o instrumento seja retirado do processo para recalibrações pois é possível utilizar altas vazões de ar que não permitem que seu interior seja penetrado por contaminantes nem aquecido por gases vindos do processo. A injeção de ar por fora da cavidade mostrou que não há recirculação dentro dela e a perda de sinal é devido somente aos efeitos de condução.

Utilizando somente uma cavidade semi-elipsoidal o instrumento minimiza as perdas por reflexão, espalhamento ou absorção de uma segunda parte da cavidade e com isso apresentou uma ótima resposta angular que supera largamente o radiômetro de GUNNERS (1967) reportado por MURTHY *et al.* (2003). O método de tratamento da superfície da cavidade, por eletro-deposição, também é simples e realizado comercialmente em larga escala. A resposta cossenoidal, ou lambertiana, implica que sua capacidade de integração angular é hemisférica e como a superfície de seu coletor é extremamente absorvedora indica que o sinal é proporcional à radiação total.

O seu tempo de resposta, de 21s, é bastante satisfatório para as aplicações previstas em que a situação é de equilíbrio térmico ou de regime permanente.

Como essas características, o novo radiômetro de cavidade semi-elipsoidal é uma boa alternativa a vir a ser o instrumento padrão mundial para a medição da potência emissiva total hemisférica, grandeza importantíssima para avaliação de trocas de calor por radiação térmica.

O novo radiômetro para medição de intensidade total ou radiômetro direcional é muito simples e elimina todo um sistema óptico existente no atual instrumento IFRF (1994). Contudo sua sensibilidade calculada em $49,5 \mu V/W/cm^2.sr$ é muito baixa. Isso pode ser atribuído a vários fatores:

- a) o ângulo sólido é muito pequeno e resposta da termopilha, conseqüentemente, é baixa;
- b) a janela da termopilha age como um filtro diminuindo a parcela de radiação que chega aos fios termopares;
- c) esses fios termopares não são enegrecidos o que diminui a potência absorvida;
- d) a termopilha pode não estar isolada acarretando perdas de calor;
- e) a junta de referência da termopilha estava à temperatura ambiente e poderia ter sido colocada a $0^{\circ}C$.

Portanto, novos desenvolvimentos poderão ser realizados para melhorar sua sensibilidade pois seu ângulo sólido, calculado em $1,3084 \times 10^{-5} sr$, é consistente com suas aplicações pois significa que a uma distância de 10m o instrumento vê um objeto com diâmetro de 40mm. Um tal ângulo sólido permite um mapeamento bastante preciso para efeito das tecnologias atuais.

A análise experimental realizada torna disponível dados inexistentes na literatura aberta como a comparação entre os materiais de revestimento da superfície refletora da cavidade, a comparação entre as diversas geometrias possíveis para o coletor, a comparação entre diferentes materiais depositados em sua superfície. Dentre os diversos sensores térmicos que podem ser utilizados fica estabelecido também que o sensor do coletor pode ser resistivo, elemento que hoje não é utilizado em nenhum outro radiômetro para medição de potência emissiva total hemisférica.

Para a realização de todo o trabalho foi montado um aparato experimental e desenvolvido procedimentos para análise paramétrica de radiômetros de cavidade elipsoidal. O sistema montado para verificar o comportamento da temperatura do sensor do radiômetro semi-elipsoidal, baseado em um *laser* de potência, é inovador.

Da análise experimental também é possível concluir que podem ser utilizadas, dependendo do tipo de aplicação, as várias configurações testadas com radiômetros elipsoidais. Por exemplo, a configuração com um coletor revestido de níquel preto pode ser utilizada quando as temperaturas envolvidas sejam muito grandes ou a aplicação em campo seja o objetivo.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFGAN, N.H. ; LEONTIEV, A.I. Instrument for thermal radiation flux measurement in high temperature gas flow. **Heat Recovery Systems & CHP**, v.15, n.4, p.347-350, 1995.
- CHEDAILLE, J., BRAUD, Y. **Measurements in Flames**, Vol. 1., *in* Industrial Flames, General Editors: J.M. Beér and M.W. Thring; Edward Arnold, 1972.
- GARDON, R., **An instrument for the direct measurement of intense thermal radiation**, The Review of Scientific Instruments, v.24, n.5, p.366-370, 1953.
- GRAY, D. E., (Coordinating Editor), **American Institute of Physics Handbook**, 3th. Ed.- McGraw-Hill, 1972
- GUNNERS, N. E., **Methods of measurement and measuring equipments for fire tests**. Series No. 43, ACTA Polytechnica Scandinavica, Stockholm, Sweden (1967).
- IFRF(1994) International Flame Research Foundation, Doc.No. C76/y/1/3, **Measurement Equipment, Ellipsoidal Radiometer** , Ijmuiden, Holland, 1994.
- IFRF (1994) International Flame Research Foundation, Doc.No. C76/y/1/9, **Measurement Equipment, Narrow Angle Radiometer** , Ijmuiden, Holland, 1994.
- LAND COMBUSTION LIMITED, **Operating Instructions for the Land 2π Ellipsoidal Radiometer**, ISS 6/879, England, 1977.
- LEONTIEV, A I. Heat and mass transfer in turbulent boundary layers, **Advances in Heat Transfer**. Academic Press, NY, 1974.
- MARTINS, N. , CARVALHO, M.G., AFGAN, N.H., LEONTIEV, A.I. **A new instrument for radiation heat flux measurement – Analysis and parameter selection**. Heat Recovery Systems & CHP v.15, n.8, p.787-796, 1995.
- MURTHY A . V. *et alli*, **Radiative calibration of heat-flux sensors at NIST: facilities and techniques**. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, v. 105, n 2, p. 293-305, 2000.
- QUINN, T.J. **Temperature** ; Academic Press, London, 1990.
- OLIVEIRA, A . R., **Desenvolvimento de um radiômetro de cavidade elipsoidal de alta sensibilidade**, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1998.

SIEGEL, R. e HOWELL, J. R., **Thermal Radiation Heat Transfer**, Hemisphere Publishing Corporation,, 3rd edition, New York, 1992.

STUDART, NELSON, **A invenção do conceito de quantum de energia segundo Planck**, Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 22, no 4, dezembro, 2000.

SOUSA, F.D.A. de, (Coordenador) **Estudo e projeto básico de radiômetros para medição em chamas** , Relatório nº 27311, IPT, São Paulo, 1989.

VUOLO, J. H. , **Fundamentos da teoria dos erros**, Editora Edgard Blücher Ltda, 2ª ed., São Paulo, 1996.

WETTERLUND, I; SE, **comunicação pessoal**, 2003.

ANEXO - DADOS OBTIDOS

Neste anexo estão os dados obtidos em todos os experimentos realizados. Cada experimento é numerado para efeito de controle e há uma breve descrição da configuração de cada radiômetro, sua função de calibração, sensibilidade e correspondente χ^2 .

EXPERIMENTO 37 – Calibração radiômetro de cavidade elipsoidal

Descrição da configuração:

Cavidade: elipsoidal com superfície interna recoberta de ouro;

Coletor: disco de cobre com superfície recoberta por fuligem;

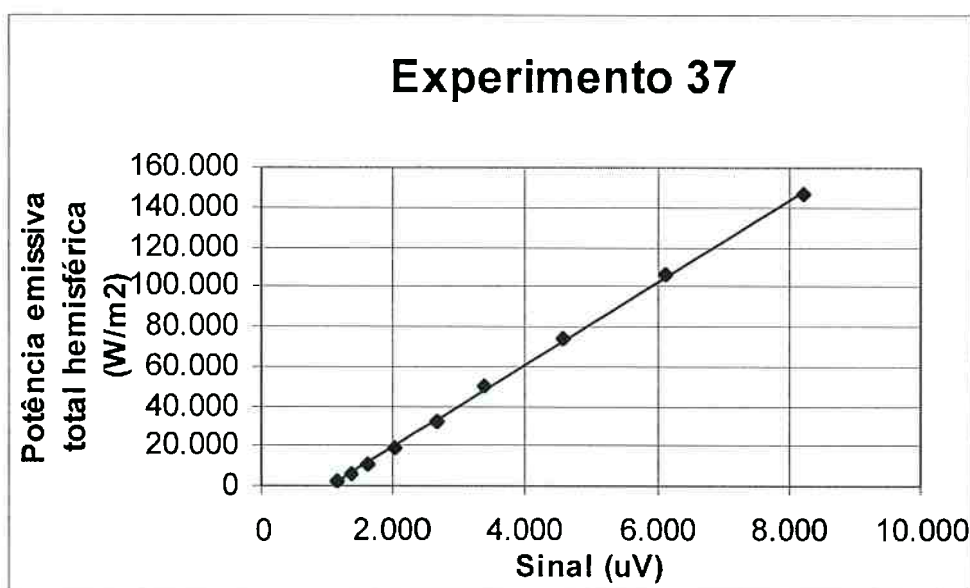
Posição do coletor: no plano focal da cavidade elipsoidal;

Sensor : um termopar de isolamento mineral tipo T;

Função de calibração: $y=20,966.x-21.818$

$\chi^2 = 0,99$

Sensibilidade : $477 \mu V/W/cm^2$



Temperatura corpo negro	Potência emissiva total Hemisférica	Sinal coletor	Temperatura coletor	Temperatura de entrada da água	Temperatura de saída da água
°C	W/m ²	μV	°C	°C	°C
200	2.849	1.160	29,0	26,2	26,6
300	6.129	1.361	33,7	27,1	27,7
400	11.653	1.642	40,4	27,4	28,3
500	20.268	2.046	49,9	27,1	28,4
600	32.956	2.641	63,6	27,0	28,8
700	50.835	3.373	80,2	25,2	27,8
800	75.157	4.554	105,6	26,3	30,1
900	107.312	6.132	138,3	26,5	31,5
1.000	148.825	8.207	179,2	27,3	33,9

EXPERIMENTO 33 – Calibração radiômetro de cavidade semi-elipsoidal

Descrição da configuração:

Cavidade: semi-elipsoidal com superfície interna recoberta de ouro;

Coletor: disco de cobre com superfície recoberta por fuligem;

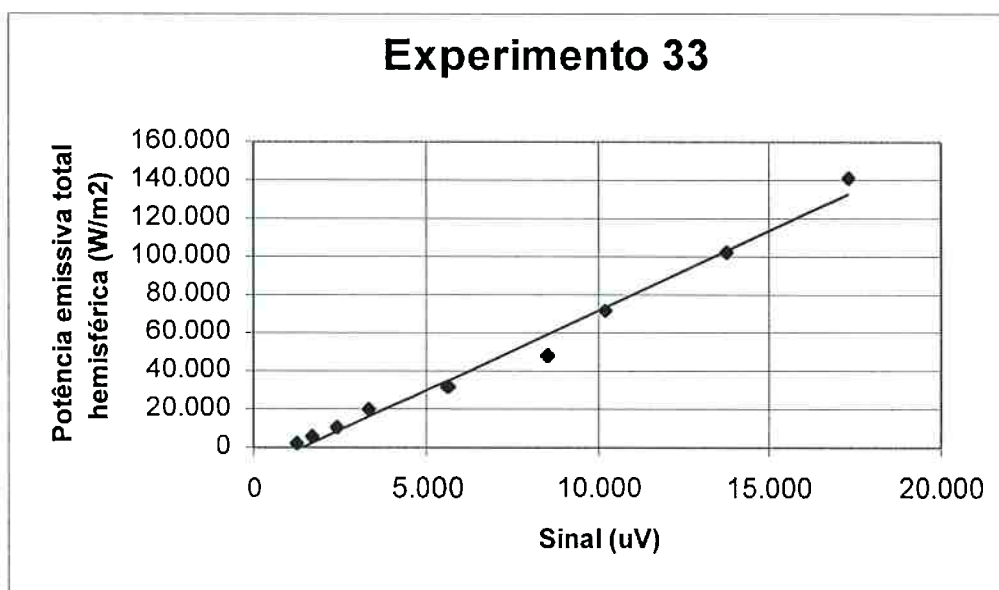
Posição do coletor: no plano do eixo menor da cavidade semi-elipsoidal;

Sensor : Um termopar isolamento mineral tipo T;

Função de calibração: $Y=8,8088.X -12.116$

$\chi^2 = 0,98$;

Sensibilidade : $1.135 \mu V/W/cm^2$.



Temperatura corpo negro	Potência emissiva total Hemisférica	Sinal coletor	Temperatura coletor	Temperatura de entrada da água	Temperatura de saída da água
°C	W/m ²	μV	°C	°C	°C
200	2.841	1.274	31,8	23,5	23,8
300	6.117	1.726	42,5	24,7	24,9
400	11.639	2.447	59,2	24,8	26,4
500	20.254	3.344	79,4	25,3	27,4
600	32.946	5.592	127,2	24,0	28,0
700	50.836	8.515	185,0	24,6	33,9
800	75.178	10.221	217,1	23,7	32,4
900	107.366	13.770	280,8	24,6	34,5
1.000	148.926	17.270	340,6	23,7	34,0

EXPERIMENTO 34 – Calibração radiômetro de cavidade semi-elipsoidal

Descrição da configuração:

Cavidade: semi-elipsoidal com superfície interna recoberta de níquel;

Coletor: disco de cobre com superfície recoberta por fuligem;

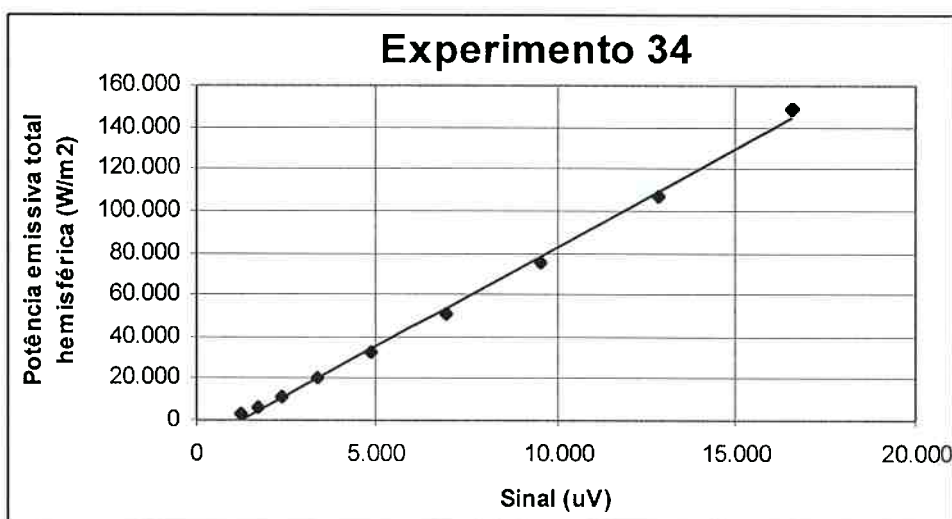
Posição do coletor: no plano do eixo menor da cavidade semi-elipsoidal;

Sensor : um termopar de isolamento mineral tipo T;

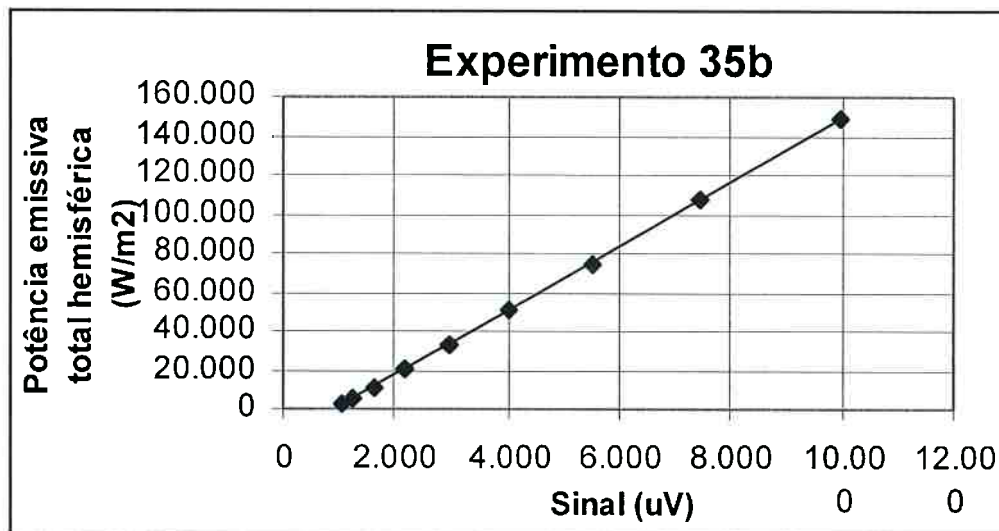
Função de calibração : $y=9,4164.x -11627$

$\chi^2 = 0,99$

Sensibilidade : $1062 \mu V/W/cm^2$



Temperatura corpo negro	Potência emissiva total Hemisférica	Sinal coletor	Temperatura coletor	Temperatura de entrada da água	Temperatura de saída da água
°C	W/m ²	μV	°C	°C	°C
200	2.849	1.272	31,5	23,4	24,0
300	6.129	1.736	42,6	23,5	24,2
400	11.653	2.403	58,1	24,1	25,3
500	20.268	3.388	80,3	22,3	25,0
600	32.956	4.877	112,3	22,9	26,3
700	50.835	6.897	153,6	23,6	27,8
800	75.157	9.535	204,3	22,9	32,6
900	107.312	12.837	264,4	23,7	36,3
1.000	148.825	16.591	329,2	24,4	33,7

EXPERIMENTO 35 b – Calibração radiômetro de cavidade elipsoidal**Descrição da configuração:****Cavidade:** elipsoidal com superfície interna recoberta de ouro;**Coletor:** casca hemisférica de cobre com superfície por fuligem;**Sensor :** um termopar de isolamento mineral tipo T**Função de calibração:** $y=16,471.x-15270$ **Sensibilidade :** $607 \mu V/W/cm^2$ $\chi^2 = 0,99$ 

Temperatura corpo negro	Potência emissiva total Hemisférica	Sinal coletor	Temperatura a coletor	Temperatura de entrada da água	Temperatura de saída da água
°C	W/m ²	μV	°C	°C	°C
200	2.854	1.055,0	26,4	22,8	23,2
300	6.141	1.272,6	31,5	23,2	23,9
400	11.673	1.656,7	40,7	24,5	25,4
500	20.268	2.196,2	53,4	25,0	26,5
600	32.956	2.953,0	70,6	25,4	27,3
700	50.835	4.012,4	94,0	25,5	28,0
800	75.157	5.494,4	125,2	25,7	29,0
900	107.312	7.435,2	164,1	25,7	30,0
1.000	148.825	9.955,0	212,2	25,4	31,1

EXPERIMENTO 18 – Calibração radiômetro de cavidade elipsoidal

Descrição da configuração:

Cavidade: elipsoidal com superfície interna recoberta de níquel;

Coletor: casca hemisférica de cobre com superfície recoberta por níquel preto;

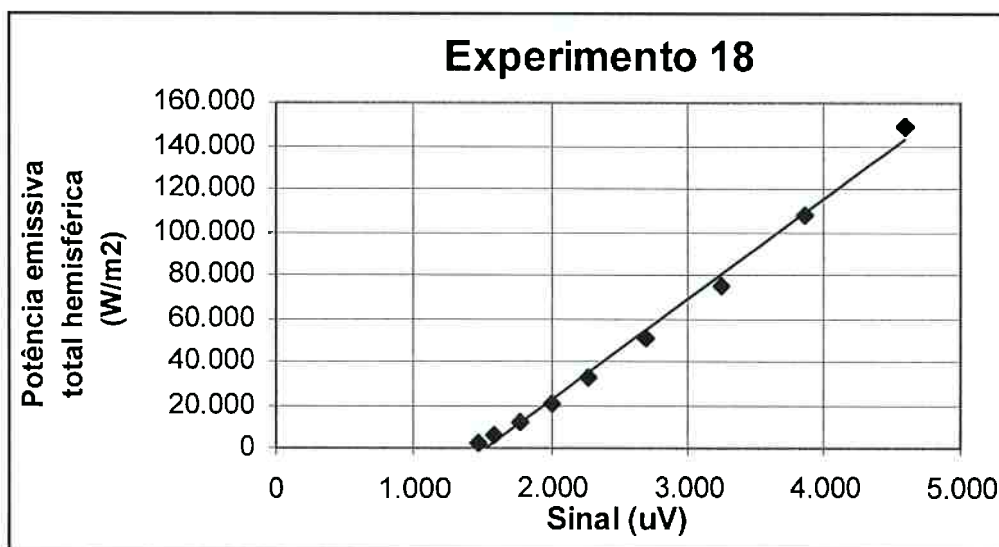
Posição do coletor: no plano focal da cavidade elipsoidal;

Sensor : um termopar de isolamento mineral tipo T;

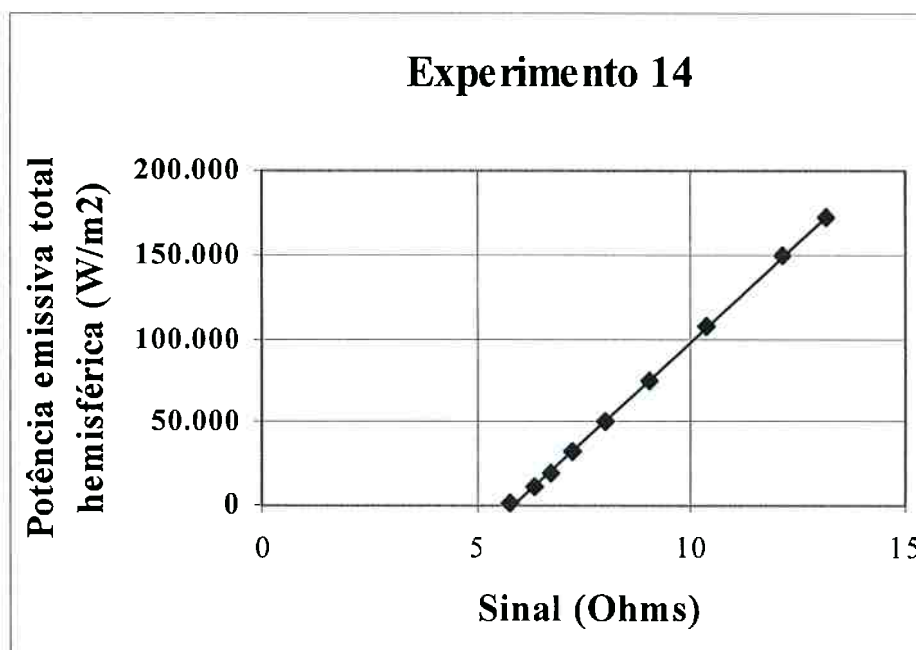
Função de calibração : $y=46,233.x -70097$

$\chi^2 = 0,99$

Sensibilidade : $216 \mu V/W/cm^2$



Temperatura corpo negro	Potência emissiva total Hemisférica	Sinal coletor	Temperatura coletor	Temperatura de entrada da água	Temperatura de saída da água
°C	W/m ²	µV	°C	°C	°C
200	2.849	1.471	36,3	34,6	34,8
300	6.129	1.578	38,8	35,0	35,5
400	11.653	1.774	43,5	36,0	36,8
500	20.268	1.992	48,6	36,1	37,3
600	32.956	2.278	55,2	35,6	37,1
700	50.835	2.699	64,9	35,5	37,8
800	75.157	3.241	77,1	34,5	37,9
900	107.312	3.872	90,9	32,4	36,8
1.000	148.825	4.603	106,7	29,3	35,2

EXPERIMENTO 14 – Calibração com resistor elétrico**Descrição da configuração:****Cavidade:** elipsoidal com superfície interna recoberta de ouro;**Coletor:** casca hemisférica com superfície de cobre recoberta por fuligem;**Posição do coletor:** no plano focal da cavidade;**Sensor :** resistência elétrica do coletor/termopar e ligação a dois fios.**Função de calibração:** $Y = 23.572x - 137.470$ $\chi^2 = 0,99$ **Sensibilidade :** $0,424 \Omega/W/cm^2$ 

Temperatura corpo negro °C	Resistência elétrica do coletor Ω	Temperatura do coletor °C	Temperatura ambiente °C
100	5,785	26,4	21,0
400	6,337	44,4	20,5
500	6,711	53,3	20,5
600	7,271	66,3	20,4
700	8,025	83,5	18,4
800	9,024	105,2	18,4
900	10,382	133,5	18,4
1000	12,168	169,3	18,3
1049	13,131	187,5	18,2