

AMAURY ROTEGER DE OLIVEIRA

DESENVOLVIMENTO DE UM

RADIÔMETRO DE CAVIDADE

ELIPSOIDAL DE ALTA SENSIBILIDADE

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do título
de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Engenharia Mecânica

Orientador:
Prof. Dr. Jurandir Itizo Yanagihara

São Paulo
1998

**A Isaura Castro, sempre
presente em todos os
momentos desta vida.**

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;

À Diretoria do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. pelo investimento realizado e sem o qual este trabalho não seria possível;

A todos que, direta ou indiretamente, colaboraram na execução deste trabalho;

Aos meus colegas da Poli-Mecânica pela agradável convivência;

Ao Eng. Francisco Domingues Alves de Sousa, pelas discussões, pelo apreço e pelo constante exemplo de profissionalismo.

À Terê pela compreensão e o amor sempre devotados.

SUMÁRIO

i	LISTA DE SÍMBOLOS	i
ii	RESUMO	iv
iii	ABSTRACT	v
1	INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
	2.1 Radiação térmica.....	4
	2.2 Corpo negro.....	6
	2.3 Detetores de radiação tipo térmico.....	8
	2.4 O radiômetro elipsoidal IFRF/Land.....	13
	2.5 O protótipo IPT-88.....	15
	2.6 O estado da arte.....	17
	2.7 Comentários finais sobre a revisão bibliográfica.....	22
3	CONCEPÇÃO DO RADIÔMETRO DE CAVIDADE ELIPSOIDAL	
	IPT/EPUSP-96	23
	3.1 Modelagem elementar do detetor térmico.....	23
	3.2 Características construtivas básicas.....	25
4	BANCADA EXPERIMENTAL	31
	4.1 Fornos de calibração.....	31
	4.2 Sistema de aquisição de dados.....	34

5 RESULTADOS E ANÁLISES.....	36
5.1 Resultados do protótipo	36
5.2 Curva de calibração.....	37
5.3 Cálculo da sensibilidade do instrumento.....	40
5.4 Efeito da emissividade do coletor.....	41
5.5 Efeito da refletividade das paredes.....	42
5.6 Efeito do tipo de junta de medida do termopar.....	44
5.7 Constante de tempo.....	45
5.8 Comparação do protótipo com outros instrumentos.....	46
6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	47
ANEXO A - Dados experimentais obtidos.....	49
ANEXO B - Análise de incertezas.....	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	72
APÊNDICE	

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Romanas

A	área	$[\text{cm}^2]$
C	constante	[adimensional]
C	capacidade térmica do coletor	$[\text{J.K}^{-1}]$
C_1	constante	$[\text{W}.\mu\text{m}^4.\text{m}^{-2}]$
C_2	constante	$[\mu\text{m.K}]$
C_p	capacidade térmica a pressão constante	$[\text{J.K}^{-1}]$
E	força eletromotriz	$[\mu\text{V}; \text{V}]$
$E_{W_{12}}$	força eletromotriz do par W_1 e W_2	$[\mu\text{V}; \text{V}]$
G	condutância térmica	$[\text{J.K}^{-1}.\text{s}^{-1}]$
L	distância	$[\text{m}]$
Q	quantidade de calor	$[\text{J}]$
R	resistência elétrica	$[\Omega]$
R	resistência térmica do coletor	$[\text{K.s.J}^{-1}]$
R	raio	$[\text{m}]$
Re	número de Reynolds	[adimensional]
S	área da superfície interna do corpo negro	$[\text{m}^2]$
S	sensibilidade do instrumento	$[\mu\text{V/W/cm}^2]$
$S_{W_{12}}$	coeficiente de Seebeck relativo	$[\mu\text{V}.\text{°C}^{-1}]$
T	temperatura	$[\text{K}]$
T'	temperatura do fluxo mássico	$[\text{K}]$
T_0	temperatura inicial do coletor	$[\text{K}]$

T_1	temperatura da junta de medida	[°C]
T_2	temperatura da junta de referência	[°C]
T_g	temperatura do gás	[K]
T_W	temperatura do meio poroso	[K]
W_0	potência ou fluxo de calor	[W]
W_R	potência emissiva hemisférica espectral	[W.m ⁻² .μm ⁻¹]
W_R	fluxo radiativo total hemisférico	[W.m ⁻²]
a	constante	[K ⁻¹]
b	constante	[K ⁻¹ .Ω ⁻¹]
c	velocidade da luz	[m.s ⁻¹]
c	constante	[K ⁻¹ .Ω ⁻³]
i	corrente elétrica	[A]
j_w	fluxo mássico	[Kg.s ⁻¹]
p	coeficiente piroelétrico	[C.cm ⁻² .K ⁻¹]
q_{conv}	fluxo de calor convectivo	[W.m ⁻²]
q_{rad}	fluxo de calor radiativo	[W.m ⁻²]
q_s	radiação refletida	[W.m ⁻²]
q_{tot}	fluxo de calor total	[W.m ⁻²]
s	área da abertura do corpo negro	[m ²]
t	tempo	[s]
w_g	velocidade do gás	[m.s ⁻¹]

Letras Gregas

ε	emissividade total hemisférica	[adimensional]
ε_0	emissividade total hemisférica	[adimensional]
ν	freqüência	[Hz]
λ	comprimento de onda	[m; μm]
θ	ângulo	[rad]
Θ	acrécimo de temperatura no coletor	[K]
τ	constante de tempo do instrumento	[s]
$\Phi_{CN,\lambda}$	potência emissiva hemisférica espectral de corpo negro	[W.m ⁻² . μm^{-1}]
Φ_R	fluxo radiativo total hemisférico	[W.m ⁻²]
χ^2	Qui – quadrado	
χ_{red}^2	Qui – quadrado reduzido	
σ	constante de Stefan-Boltzmann	[W.K ⁻⁴ .m ²]
ρ_g	massa específica	[Kg.m ⁻³]

RESUMO

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um radiômetro de cavidade elipsoidal de alta sensibilidade para ser utilizado na medição de radiação total hemisférica em chamas e fornalhas. O instrumento integra toda a radiação hemisférica incidente em sua abertura de entrada convergindo-a para um coletor ao qual está acoplado um termopar diferencial. Os materiais utilizados na sua construção são largamente comercializados e o detector de radiação escolhido possui curvas de calibração universalmente aceitas. Essas características permitem sua fácil construção, baixo custo e calibração rastreável.

O protótipo revelou excelentes resultados ao ser calibrado contra corpos negros apresentando uma curva de calibração linear e uma sensibilidade de $935 \mu\text{V/W/cm}^2$ o que representa um aumento de 3,7 vezes quando comparada a instrumento comercial similar. Sua incerteza de calibração foi calculada em 6,6% com intervalo de confiança de 95%, valor comparável a instrumentos semelhantes. Foi determinada a constante de tempo do instrumento, que é um parâmetro de desempenho importante, sendo que seu valor é relativamente alto.

Foram também levantadas curvas de calibração modificando o tipo de junta de medida do termopar diferencial e variando parâmetros importantes como a emissividade do coletor e a refletividade das paredes internas da cavidade elipsoidal.

ABSTRACT

The objective of this work is the development of a hollow ellipsoidal radiometer of high sensitivity to be used in the measurement of total hemispherical radiation in flames and furnaces. The instrument integrates all incident radiation in a hemispherical solid angle converging the radiation into a collector in which is mounted a differential thermocouple. The materials used in its construction are widely commercialised and the chosen radiation detector possesses universally accepted calibration curves. These features allow its easy construction, low cost and rastreability.

The prototype presented excellent results when calibrated with black body radiation sources. It has a linear calibration curve and a sensitivity of $935 \mu\text{V}/\text{W}/\text{cm}^2$. This performance parameter is 3.7 times higher than the sensibility of similar commercial instruments. The calibration uncertainty was calculated as 6,6%, with a confidence level of 95%. The time constant of the instrument, that is another important performance parameter, was found to be relatively large.

Calibration curves were also plotted modifying the type of measurement junction of the differential thermocouple and varying important parameters such as the emissivity of the collector and the reflectivity of the internal walls of the hollow ellipsoidal.

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

O conhecimento do fluxo de radiação total hemisférica é importante em projetos na área de engenharia térmica. Em caldeiras, por exemplo, grande parte da energia é transferida por radiação. Consequentemente é muito importante o conhecimento de suas características radiativas, o que pode ser conseguido pela medição do fluxo de radiação total hemisférico através de um radiômetro elipsoidal, verificando-se assim se o projeto pretendido foi atingido. Utilizando esse tipo de radiômetro também é possível determinar a distribuição do fluxo de calor radiativo dentro de fornalhas realizando um mapeamento espacial e propor soluções para problemas existentes tais como queimadores que não apresentem o comprimento de chama especificado e necessitem de modificações. Em fornalhas experimentais, como a da figura 1.1, onde são realizados estudos sobre combustíveis e queimadores, este tipo de radiômetro também é de grande utilidade.



Figura 1.1 - Fornalha experimental do Laboratório de Combustão do IPT (1998)

Por outro lado, em diversas aplicações industriais o conhecimento da parcela da transferência de calor devida à convecção é importante. Com o uso de um radiômetro elipsoidal é possível separar esta componente do fluxo total de calor, como discutido por CHEDAILLE e BRAUD (1972).

Na década de 1950, informa WEBER (1997), foi desenvolvido, no International Flame Research Foundation (IFRF), sediado na Holanda, um radiômetro para medição de radiação total hemisférica em chamas e fornalhas. O radiômetro, atualmente também comercializado pela Land Combustion Ltd (LAND, 1977), consiste de uma cavidade elipsoidal espelhada internamente e seccionada em seus planos focais. Em um desses planos existe uma abertura circular que permite a entrada da radiação em um ângulo sólido de 2π sr e no outro plano está instalado um detector de radiação, tipo térmico, que gera um sinal elétrico proporcional ao fluxo radiativo total hemisférico incidente.

Na década de 1980 foi realizada uma tentativa para reproduzir esse instrumento no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) por SOUSA *et al.*, (1989). Contudo, o protótipo apresentou sérios problemas em sua sensibilidade e o projeto foi abandonado.

Todavia, dada a necessidade do Laboratório de Combustão do IPT possuir um instrumento desse tipo foi proposta a retomada do projeto no início de 1996. Uma de suas vantagens é o seu baixo custo de fabricação pois o preço FOB, na Holanda, é de US\$ 5.291,00 e o custo estimado no IPT é de US\$ 2.500,00, computando-se o material e a mão de obra para a usinagem das peças bem como a montagem do instrumento. Outra vantagem reside no fato do protótipo poder ser testado e calibrado inteiramente no IPT, pois um sistema de calibração composto de fornos tipo corpo negro já havia sido construído anteriormente.

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um radiômetro de cavidade elipsoidal de baixo custo e alta sensibilidade para ser utilizado na medição de radiação total hemisférica em chamas e fornalhas. Para isso também foram realizados alguns estudos paramétricos relacionados aos fenômenos de transporte radiativos mais importantes presentes nesse tipo de sensor, ampliando desta forma o domínio do conhecimento nessa área.

Os materiais utilizados na construção do radiômetro são largamente comercializados e o detetor de radiação escolhido possui curvas de calibração universalmente aceitas. Essas características permitem sua fácil construção, uma calibração rastreável e conseqüentemente sua possível utilização por outros grupos de pesquisa ou pela indústria deste país.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O objetivo deste capítulo é abordar os seguintes tópicos: o conceito de radiação térmica, os corpos negros como padrões de calibração para radiômetros, os tipos de detectores térmicos e rever a literatura a respeito dos radiômetros elipsoidais.

2.1 Radiação térmica

Acima de 0 K todos os corpos emitem radiação devido ao movimento aleatório das cargas elétricas de seus átomos constituintes. Radiação térmica é energia eletromagnética gerada e governada somente pela temperatura do corpo e apresenta um caráter dual: ondulatório ou corpuscular. No primeiro caso, é considerada como uma onda eletromagnética e no segundo como sendo constituída por fótons. Em ambos os casos pode ser relacionada à sua frequência, ν :

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (2.1)$$

onde c é a velocidade da luz no meio e λ seu comprimento de onda. A radiação assim emitida termicamente por uma superfície possui duas características: um espectro contínuo de frequências e uma distribuição direcional. Para fontes térmicas ou superfícies arbitrárias, a sua determinação é um problema extremamente difícil. Contudo, para fontes chamadas corpos negros a intensidade de radiação é independente da direção, isto é, ela é difusa, e sua distribuição espectral obedece a uma função universal que depende somente da frequência de radiação e da temperatura da fonte. Essa função é a chamada lei de Planck e é dada por

$$\Phi_{CN,\lambda}(\lambda,T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} \quad (2.2)$$

onde $\Phi_{CN,\lambda}(\lambda,T)$ é a potência emissiva hemisférica espectral ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}$), T a temperatura do corpo emissor (K), λ o comprimento de onda considerado (μm) e C_1 , C_2 são constantes dadas por $3,742 \times 10^8 \text{ W}\cdot\mu\text{m}^4\cdot\text{m}^{-2}$ e $1,439 \times 10^4 \mu\text{m}\cdot\text{K}$. Seu espectro, em termos de comprimento de onda, situa-se entre 0 e ∞ e a faixa interesse vai de $0,1 \mu\text{m}$ a $100 \mu\text{m}$.

A razão entre a potência emissiva de uma superfície real e a potência emissiva de um corpo negro, à mesma temperatura, em todas as possíveis direções e comprimentos de onda é definida como sendo a emissividade total hemisférica, ε . O fluxo de radiação total hemisférico pode ser deduzido de duas maneiras: através de argumentos termodinâmicos, como o fez Boltzmann (vide Apêndice) ou integrando a equação de Planck sobre todos os comprimentos de onda, o que resulta para superfícies reais

$$\Phi(T) = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (2.3)$$

onde ε é a emissividade total hemisférica e varia entre 0 e 1, σ é a constante de Stefan-Boltzmann e vale $5,670\,396 \times 10^{-8} \text{ (W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4})$, T é temperatura (K) e $\Phi(T)$ é a potência emissiva total hemisférica ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), ou também como é chamada, o fluxo de radiação total, que é a taxa com que a radiação é emitida por unidade de área, em todos os possíveis comprimentos de onda e em todas as direções.

O instrumento proposto neste trabalho visa medir esse fluxo de radiação total hemisférico.

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. Essa superfície emite radiação térmica difusamente e nenhuma outra emite mais do que ela, dada uma temperatura e um comprimento de onda.

A sua realização prática, já proposta por Stefan, apud PORTER (1951), consiste em manter uma cavidade a 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.

Os corpos negros reais são constituídos, em geral, de uma cavidade cilíndrica, como indica a figura 2.1 e podem ser padrões de referência primários ou secundários.

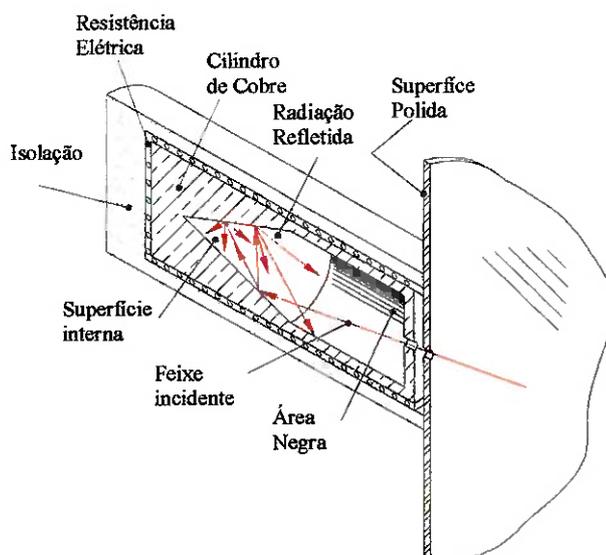


Figura 2.1 - Exemplo de corpo negro de cavidade cilíndrica (SIEGEL, 1992)

São chamados de corpos negros primários aqueles equipamentos projetados para que suas temperaturas de trabalho sejam dadas por pontos fixos de calibração, isto é, sua temperatura é dada por uma transição de fase de um material quimicamente puro, por exemplo, o ponto de solidificação do ouro. Já os corpos negros secundários são aqueles equipamentos cuja temperatura é determinada por um sensor, como por exemplo, um termopar.

Os corpos negros também podem ter sua cavidade no formato esférico como mostra a figura 2.2 . Nesse formato é conseguida a reprodução uma fonte que tenha como característica uma emissão difusa de radiação em um ângulo sólido de 2π sr.

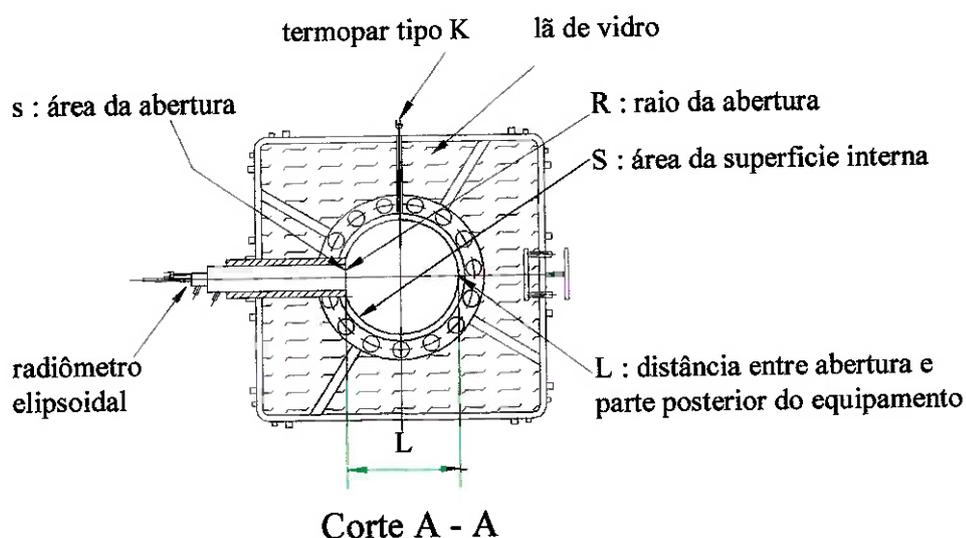


Figura 2.2 - Corpo negro de cavidade esférica (SOUSA *et al.*, 1989)

A emissividade aparente de um corpo negro é aquela medida por um observador externo à cavidade. Pode ser calculada teoricamente 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:

$$\varepsilon_0(\varepsilon, s, S, \theta) = \frac{1 + (1 - \varepsilon) \left(\frac{s}{S} - \text{sen } 2\theta \right)}{1 + \frac{s}{S} \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \right)} \quad (2.4)$$

onde:

ε : emissividade real das paredes

s : área da abertura do corpo negro

S : área da superfície emissora do corpo negro

2θ : ângulo do qual a abertura é vista da parte posterior do equipamento e calculado por:

$\text{tg } \theta = \frac{2R}{L}$ onde R é o raio da abertura do corpo negro e L é a distância entre a abertura e

a parte posterior do equipamento.

A descrição detalhada de um corpo negro real, utilizado como fonte de radiação neste trabalho, encontra-se no item 4.1.

2.3 Detetores de radiação tipo térmico

O primeiro instrumento para medição de radiação térmica foi um termômetro de líquido em vidro utilizado por Hershel em 1800 quando de sua descoberta da radiação infravermelha (VINCENT, 1990). Em 1850, Meloni apud BARR (1960) construiu o

primeiro radiômetro de radiação total com saída elétrica utilizando uma termopilha como sensor.

Os detetores de radiação podem ser classificados em duas grandes categorias: os térmicos e os quânticos. Esses últimos, também chamados de foto-detetores, respondem à radiação incidente por um processo que envolve a absorção de fótons individuais e a geração de sinal elétrico proporcional a ela. Já os detetores térmicos convertem toda a radiação incidente em energia térmica aumentando a temperatura do elemento sensor. Por sua vez, esse aumento de temperatura é convertido em um sinal elétrico, proporcional ao fluxo radiativo incidente, que pode ser adquirido e tratado. Os detetores térmicos têm, também, uma propriedade desejável que é possuir uma resposta em uma grande faixa de comprimentos de onda, sem que haja variações apreciáveis em sua sensibilidade. Dentre eles são destacados três tipos de detetores com saída elétrica:

Bolômetros

Os bolômetros são sensores que variam sua resistência elétrica com a temperatura. Os chamados RTD (“resistance temperature detector”) têm sua resistência elétrica aumentada com a temperatura. Seu principal material constituinte é a platina. Esses sensores são altamente estáveis e normalizados nacional e internacionalmente (IEC, 1983). Contudo, na escolha de um detetor térmico também deve ser levada em conta sua sensibilidade. Dentre os materiais que possuem esta característica, encontram-se os termistores (HEWLETT-PACKARD, 1972) geralmente compostos de materiais semicondutores. Os termistores têm, em sua grande maioria, coeficientes de temperatura negativos (sua resistência elétrica decresce com o aumento da temperatura) e sensibilidade elevada. A desvantagem desse tipo de detetor é sua não-linearidade.

Conseqüentemente, os fabricantes não conseguem normalizá-lo pois cada sensor necessita de calibração individual.

A relação funcional de um termistor pode ser dada pela equação 2.5:

$$\frac{1}{T} = a + b \cdot (\ln R) + c \cdot (\ln R)^3 \quad (2.5)$$

onde T é a temperatura do sensor em K, R é a sua resistência elétrica em Ω e a , b , c são constantes levantadas experimentalmente para cada sensor.

Outra desvantagem deste tipo de detetor é o limite máximo de sua temperatura de trabalho que vai somente até 150 °C, aproximadamente.

Detetor piroelétrico

Os detetores piroelétricos, segundo BOYD (1982), são detetores de cristais ferroelétricos, isto é, cristais que exibem um momento de dipolo elétrico mesmo na ausência de um campo elétrico aplicado externamente, e sua polarização é fortemente dependente da temperatura. Quando um fluxo de radiação térmica incide sobre o detetor, o momento de dipolo tende a variar levando a um movimento de cargas elétricas que induzem em eletrodos um fluxo de corrente para um circuito externo. Essa corrente é dada pela equação 2.6:

$$i(t) = p \cdot A \cdot \frac{dT}{dt} \quad (2.6)$$

onde

$i(t)$: corrente de polarização (C.s⁻¹)

A : área do detetor (cm²)

p : coeficiente piroelétrico ($C.cm^{-2}.K^{-1}$)

$\frac{dT}{dt}$: variação da temperatura do sensor com o tempo

Como a corrente depende da variação da temperatura com o tempo, o detector piroelétrico não responde a um sinal constante e necessita que a potência incidente seja modulada.

Termopares

Um termopar mede a diferença de temperatura entre sua junta de medida (T_2) e sua junta de referência (T_1) através da geração de uma força eletromotriz (E), proporcional a $T_2 - T_1$, entre os dois termoelementos (W_1 e W_2) e sob condições de corrente elétrica zero, conforme esquematizado na figura 2.3.

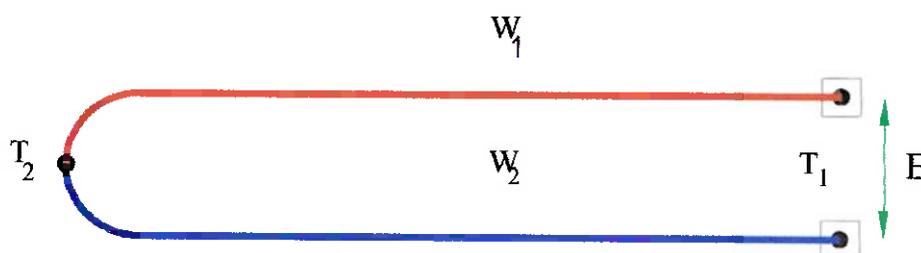


Figura 2.3 - Termopar esquemático

Essa força eletromotriz, assim medida, tem o nome de efeito Seebeck e para pequenas diferenças de temperatura vale:

$$dE_{w_{12}}(T) = S_{w_{12}}(T)dT \quad (2.7)$$

ou na forma integral :

$$E_{W_{12}}(T) = \int_{T_1}^{T_2} S_{W_{12}}(T) dT \quad (2.8)$$

onde $S_{W_{12}}$ é o coeficiente de Seebeck (ou potência termoelétrica) do par W_{12} , constituído de diferentes materiais, e que para pequenas diferenças de temperatura pode ser considerado constante.

Se a junta de referência T_1 está a 0°C , a leitura da força eletromotriz pode ser correlacionada diretamente à temperatura T_2 . Para pequenas diferenças entre T_2 e T_1 , a força eletromotriz de Seebeck é :

$$E = S_{W_{12}} \cdot \Delta T \quad (2.9)$$

Se for feita uma tabela ou encontrada uma função que correlacione a temperatura T_2 com a força eletromotriz E , o sensor termopar pode ser usado como um termômetro. Contudo, neste trabalho, o interesse é medir a força eletromotriz proporcional à diferença de temperatura entre dois pontos. Um arranjo para tal medição consiste em ligar em oposição as polaridades de dois termopares do mesmo tipo, como indicado na figura 2.4. Assim procedendo tem-se que E é proporcional a $T_2 - T_1$.

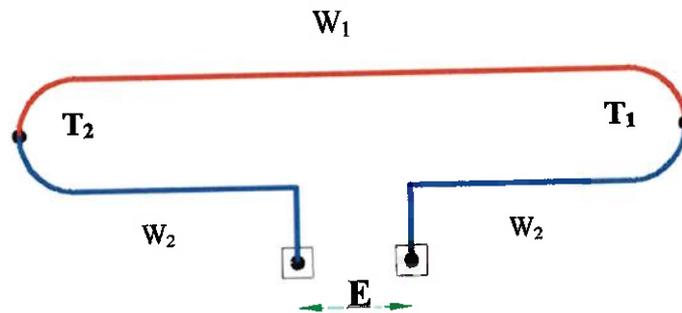


Figura 2.4 – Termopar diferencial esquemático

2.4 O radiômetro elipsoidal IFRF/Land

O radiômetro desenvolvido na IFRF (1994) e comercializado, também, pela Land Combustion Ltd. (LAND, 1977) está esquematizado na figura 2.5:

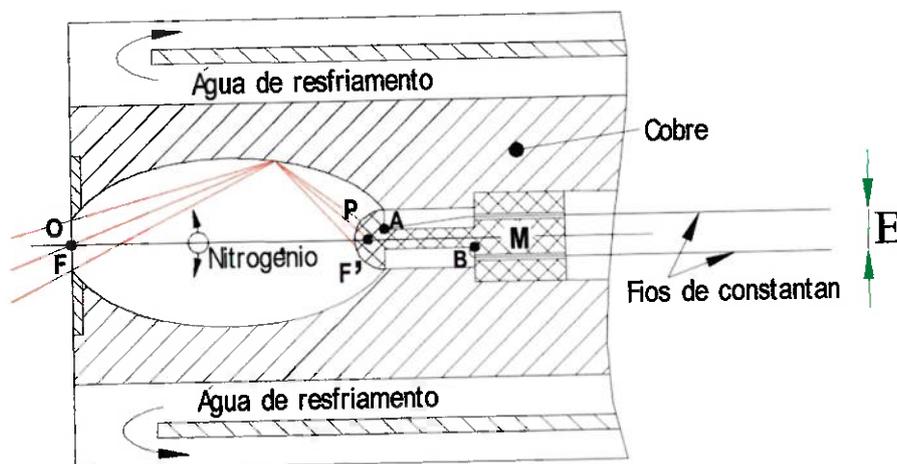


Figura 2.5 – Esquema do radiômetro IFRF (CHEDAILLE e BRAUD, 1972)

O radiômetro de cavidade elipsoidal tem como característica fundamental fazer convergir toda radiação incidente na abertura O, em um ângulo sólido de 2π sr, para um

detetor térmico tipo termopar e assim possibilitar a medição do fluxo radiativo total hemisférico.

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 inoxidável 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 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.

Normalmente operando em fornalhas é necessário evitar que o sensor do radiômetro seja aquecido convectivamente pelos gases de combustão como também impedir a entrada de fuligem ou gotas de óleo. Isso é conseguido através da injeção de nitrogênio em sua cavidade de modo a produzir uma pressão positiva eliminando esses problemas.

Um sistema de resfriamento permite ao instrumento operar em torno de temperaturas de até 1500 °C e sua faixa de trabalho vai de 0 a 500 kW.m⁻².

A incerteza desse instrumento é da ordem de 5% mas CHEDAILLE e BRAUD (1972) não declaram qual é o intervalo de confiança. O tempo de resposta é da ordem de 60 s para 99% do valor medido e a sensibilidade declarada pelo fabricante LAND (1977) é de 250 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{cm}^2$ sem especificar também a incerteza do instrumento e seu nível de confiança.

2.5 O protótipo IPT-88

O modelo desenvolvido no IPT em 1988 por SOUSA *et al.* (1989) está desenhado na figura 2.6. Sua concepção básica é a do IFRF mas o termopar diferencial utilizado é formado por uma pastilha de constantan alojada em um cilindro de cobre. Dois fios de constantan levam o sinal até um registrador.

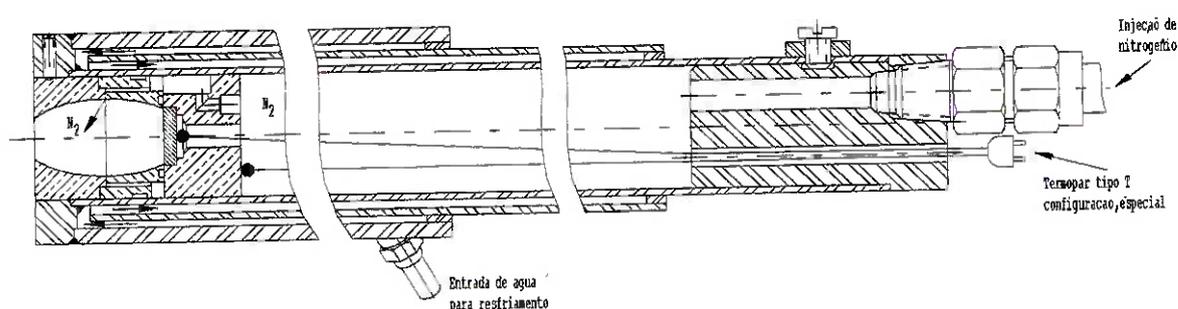


Figura 2.6 – Desenho parcial do instrumento IPT-88

Na figura 2.7 é apresentado um detalhe da cavidade elipsoidal e do termopar diferencial.

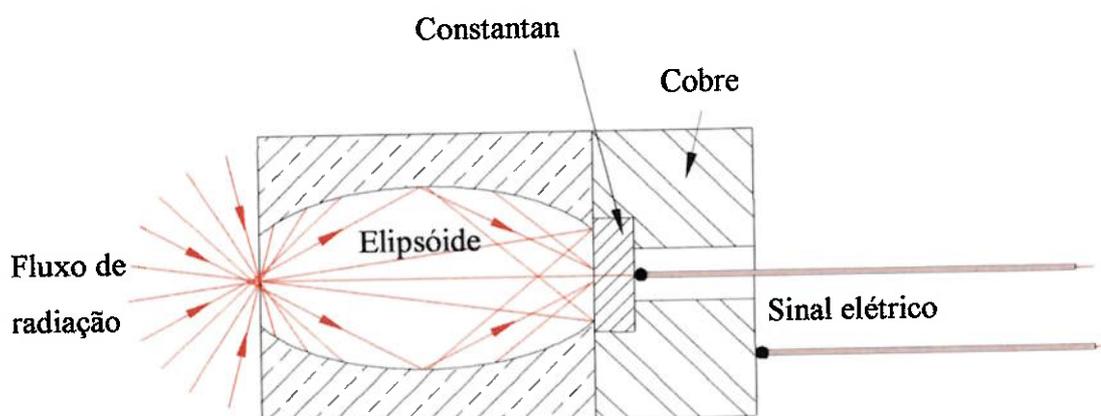


Figura 2.7 - Cavidade elipsoidal e termopar diferencial (SOUSA *et al.*, 1989)

Esforços foram realizados para a calibração desse radiômetro. Na Tabela 2.1 são apresentados os dados de uma tentativa de calibração realizada em 3.9.1990 e outra realizada em 20.12.93 (IPT, 1993).

TABELA 2.1 – RESULTADOS DO PROTÓTIPO IPT – 88

Data	Hora	Temperatura no interior do forno esférico (°C)	Sinal de tensão do radiômetro (μV)
03.09.90	8:42	720,0	90
03.09.90	15:40	793,0	120
03.09.90	22:20	829,0	140
04.09.90	10:31	845,0	150 a 155
04.09.90	14:55	887,0	170
04.09.90	21:05	950,0	205
03.09.90	1:34	1 005,2	245
03.09.90	5:27	1 059,3	260
03.09.90	9:05	1 089,0	295 a 300
20.12.93	sem registro	902,1	430
20.12.93	sem registro	1 004,5	585
20.12.93	sem registro	1 100,1	771

Pode ser observado que o maior sinal obtido foi de 771 μV , estando o forno a uma temperatura de 1100 °C. Isso representa um aquecimento, do elemento sensor, de somente 19 °C.

Esses testes, realizados em fornos de calibração tipo corpo negro, indicaram um fraco desempenho do protótipo pois os sinais obtidos foram baixíssimos. Esse desempenho foi devido a um erro de projeto em seu detetor pois o alojamento de cobre, onde estava inserida a pastilha de constantan, permanecia em contato térmico com as paredes refrigeradas. Assim, toda a energia térmica acumulada na pastilha era perdida para as paredes e, como consequência, não havia aquecimento significativo do sensor.

2.6 O estado da arte

Foram realizadas pesquisas bibliográficas em várias fontes mas nenhum artigo específico sobre radiômetros elipsoidais foi encontrado.

Em artigo recente, ARAI *et al.* (1996) revisaram os medidores de fluxo de calor mas não citaram o radiômetro elipsoidal. O artigo de ARAI fornece um bom panorama histórico sobre o desenvolvimento dos tipos de instrumentos aplicáveis ao campo da combustão apesar de entre suas referências a mais recente ser de 1970.

Uma referência importante sobre radiômetros é GARDON (1953) pois em seu projeto de instrumento utiliza como princípio de funcionamento um termopar diferencial. Sua concepção básica, apresentada na figura 2.8, é constituída por um termopar diferencial formado por uma fina superfície circular de constantan enegrecida (A) e soldada em torno de sua circunferência em um bloco maciço de cobre (B).

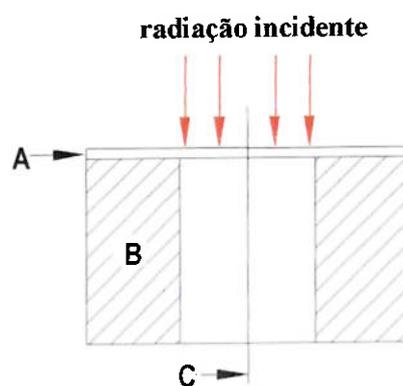


Figura 2.8 - O radiômetro de Gardon

A radiação incidente é absorvida em A e essa energia flui, por condução, radialmente para o bloco de cobre, que age 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 circunferência. Essa diferença de temperatura é diretamente proporcional à radiação incidente e é medida através de um fio fino (C) de cobre soldado no centro da superfície circular e um terminal instalado no bloco. A força eletromotriz resultante desse termopar diferencial é correlacionada diretamente ao fluxo radiativo incidente. GARDON construiu três protótipos e a maior sensibilidade declarada foi de $516 \mu\text{V} / \text{W} / \text{cm}^2$.

No início da década de 1950, já eram bem conhecidos os espelhos elipsoidais usados em espectrômetros infravermelhos (NIELSEN, 1949). Havia então condições para que surgisse na Holanda (IFRF) o radiômetro elipsoidal: utilizava o princípio de GARDON (um termopar diferencial robusto), as propriedades refletoras dos espelhos elipsoidais e inovava, introduzindo um fluxo gasoso de modo a eliminar trocas por convecção entre meio e sensor.

O instrumento de GARDON continuou influenciando os projetistas na década de 1960. Um medidor de fluxo de calor para uso contínuo em caldeiras foi projetado por NORTHOVER e HITCHCOCK (1967), no Central Electricity Research Laboratories (CERL), Inglaterra, utilizando o “princípio do disco radial”, descrito anteriormente. O projeto e os materiais empregados foram selecionados para que o instrumento operasse com sucesso nas árduas condições de uma câmara de combustão onde o modo de transferência de calor é predominantemente radiativo. Suas propriedades anti-corrosivas eram boas mas possuía sensibilidade baixa, $69 \mu\text{V} / \text{W} / \text{cm}^2$. Sua vida útil contudo era longa, 10 000 horas em trabalho contínuo.

O grande problema enfrentado pelos pesquisadores foi o depósito de fuligem que ao longo do tempo vai blindando termicamente os sensores, diminuindo sua saída elétrica e conseqüentemente mascarando suas medidas. Na literatura há referências que

reportam os esforços realizados por NEAL *et al.* (1980), CHAMBERS *et al.* (1981) e BRAJUSKOVIC e AFGAN (1991) para minimizar esse problema.

Inovador, como princípio de funcionamento, foi o instrumento proposto 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. Este instrumento, figura 2.9, reportado por MARTINS *et al.*, (1995) foi submetido a um processo de patente em Portugal (INPI, número 101653J, Lisboa) através do Instituto Superior Técnico (MESSIAS, 1996) .

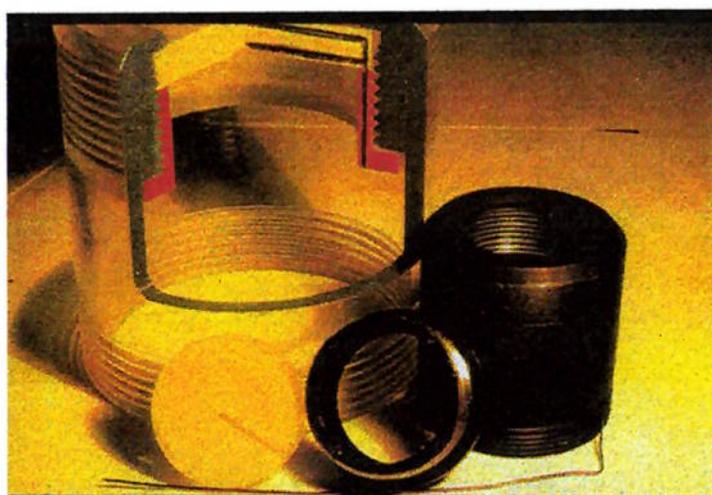


Figura 2.9 - Instrumento do Instituto Superior Técnico (Portugal)

O instrumento tem como finalidade a medição de fluxo radiativo hemisférico total, exatamente a mesma função do radiômetro elipsoidal. O instrumento é composto por um tubo e um filamento poroso onde pode ser estabelecido um fluxo mássico j_w à temperatura T' em um escoamento de velocidade w_g e temperatura T_g , como esquematizado na figura 2.10.

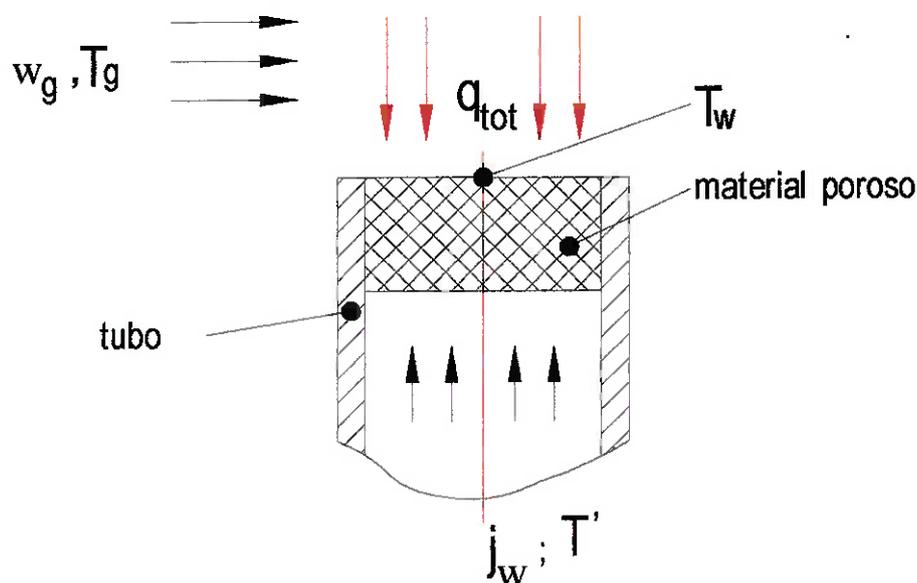


Figura 2.10 - Esquema básico do radiômetro do IST

É conhecido que para um determinado fluxo mássico através do filamento poroso a camada limite do gás escoando sobre o filamento poroso pode ser eliminada (“blow off”) resultando em uma transferência convectiva de calor em sua superfície praticamente nula. O valor crítico desse fluxo mássico, para um dado fluxo de gás em que a camada limite é eliminada, é:

$$\frac{j_{w,cr}}{\rho_g \cdot w_g} \cdot (R_e)^{1/2} = C \quad (2.10)$$

onde $R_e = \rho_g \cdot w_g \cdot d \cdot \mu_g^{-1}$ e C é uma constante que depende da geometria da superfície do filamento poroso.

A transferência de calor do gás para a superfície porosa é dada por :

$$q_{tot} = q_{rad} + q_{conv} \quad (2.11)$$

onde q_{conv} é o fluxo de calor convectivo na superfície porosa e q_{rad} é o fluxo radiativo na mesma superfície.

Quando o fluxo crítico através do filamento é atingido, a camada limite é extinta (“blow off”) e o calor transferido por convecção torna-se desprezível, então:

$$q_{tot} = q_{rad} \quad (2.12)$$

Se também for levada em conta a radiação refletida q_s , o fluxo de calor no meio poroso é:

$$q_{rad} - q_s = j_{w,cr} \cdot c_p \cdot (T_w - T') \quad (2.13)$$

onde

$$q_s = (1 - \varepsilon) \left(\frac{T_w}{100} \right) \quad (2.14).$$

T_w é a temperatura do meio poroso no ponto especificado da figura 2.10 e ε é a emissividade da superfície. Supondo $\varepsilon \cong 1$ temos que $q_{rad} \gg q_s$, resultando em uma relação direta para o fluxo radiativo:

$$q_{rad} = j_{w,cr} \cdot C_p \cdot (T_w - T') \quad (2.15)$$

Pela medição do fluxo mássico e das temperaturas do gás T_w e T' podemos obter o fluxo de radiação térmica total hemisférico.

AFGAN e LEONTIEV (1995) 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. Há somente como dado relevante a faixa de trabalho: 250 a 500 kW.m⁻².

2.7 Comentários finais sobre a revisão bibliográfica

A única publicação encontrada na pesquisa bibliográfica realizada e que trata especificamente sobre radiômetro elipsoidal, e na qual este trabalho está baseado, é de CHEDAILLE e BRAUD (1972). Na literatura recente foi encontrada somente aplicações do radiômetro elipsoidal (BUTLER e WEBB, 1991, COSTA *et al.*, 1991) na medição de fluxo radiante em caldeiras industriais alimentadas a carvão. Esse tipo de radiômetro também é utilizado pelos Laboratórios Sandia (SANDIA, 1997) em suas pesquisas, assim como na indústria em avaliações de secadores de papel via radiação infravermelha.

3 CONCEPÇÃO DO RADIÔMETRO DE CAVIDADE ELIPSOIDAL IPT/EPUSP-96

Neste capítulo é apresentado um modelo elementar de um detetor de radiação tipo térmico e é descrito o radiômetro de cavidade elipsoidal IPT/EPUSP-96 em suas características construtivas básicas.

3.1 Modelagem elementar do detetor térmico

Um detetor térmico ideal pode ser esquematizado como na figura 3.1:

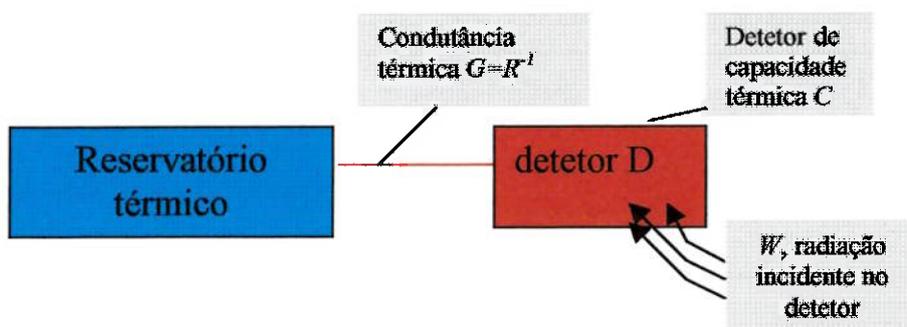


Figura 3.1 – Esquema de um sistema de detecção térmico

onde

W_0 : fluxo de calor do detetor para o reservatório

C : capacidade térmica do detetor

R : resistência térmica entre detetor e reservatório

G : condutância térmica entre detetor e reservatório

T_0 : temperatura inicial do detetor e reservatório

Θ : acréscimo de temperatura no detetor devido a W_0 ($\Theta \ll T_0$)

Um corpo à temperatura T_0 permanece em equilíbrio térmico somente se suas vizinhanças estão à temperatura T_0 ou uma fonte externa fornece calor a uma taxa equivalente às suas perdas. Supondo que detector receba uma pequena quantidade de calor, o aumento de sua temperatura é dado por:

$$dQ = C.d\Theta \quad (3.1)$$

A resistência térmica é definida por $W_0 = \frac{\Theta}{R}$. Para um corpo que perde calor espontaneamente (não conectado a nenhuma fonte), a taxa de calor transferida do corpo

$$\text{é } -C.\frac{d\Theta}{dt}, \text{ logo } \left| \frac{dQ}{dt} \right| = |W_0| \text{ e}$$

$$C.\frac{d\Theta}{dt} + \frac{\Theta}{R} = 0 \quad (3.2)$$

Resolvendo, tem-se: $\Theta = T_0.e^{-\frac{t}{\tau}}$ onde $\tau = R.C$ e T_0 é temperatura inicial do detector.

Se a radiação, $W=W(t)$, incidir continuamente sobre o detector, somente uma parte dela será absorvida, $W=\epsilon.W(t)$. Logo:

$$C.\frac{d\Theta}{dt} + \frac{\Theta}{R} = \epsilon.W(t) \quad (3.3)$$

A resposta em temperatura do detector pode ser verificada quando a entrada é uma função do tipo degrau:

$$W(t) = 0; \quad t < 0 \quad e$$

$$W(t) = W_0; \quad t \geq 0$$

Resolvendo a equação 3.3 tem-se a resposta em temperatura do detetor:

$$\Theta(t) = \varepsilon.W_0.R.(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (3.4)$$

onde $\varepsilon.W_0.R$ é a sua magnitude. Com esse modelo simples um importante parâmetro de projeto pode ser obtido: a magnitude de resposta. Esta pode ser maximizada fazendo a resistência térmica entre sensor e reservatório tão grande quanto possível.

Mas como a constante de tempo é $\tau = R.C$, pode ser visto também que existe um compromisso entre a magnitude e o tempo de resposta. Um aumento muito grande de R , levará a tempos de resposta igualmente elevados. A única maneira de reduzir τ é também diminuir a capacidade térmica C do detetor e isso pode ser conseguido pela diminuição de sua massa. Tem-se então a dupla característica de um detetor ideal: isolado térmicamente, para que a magnitude de resposta seja alta e pequeno para que o tempo de resposta seja baixo.

3.2 Características construtivas básicas

O protótipo, desenvolvido ao longo de 1996, mantém as concepções básicas do radiômetro do IFRF mas possui modificações que otimizam seu desempenho. Foi realizada uma nova concepção de seu detetor, que superou em larga escala os problemas apresentados pelo protótipo IPT-88, transformando-o em um instrumento de alta sensibilidade. No Capítulo 5 será visto que a sensibilidade do protótipo IPT/EPUSP-96 supera a do instrumento IFRF/Land em quase quatro vezes.

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 figura 3.2 .

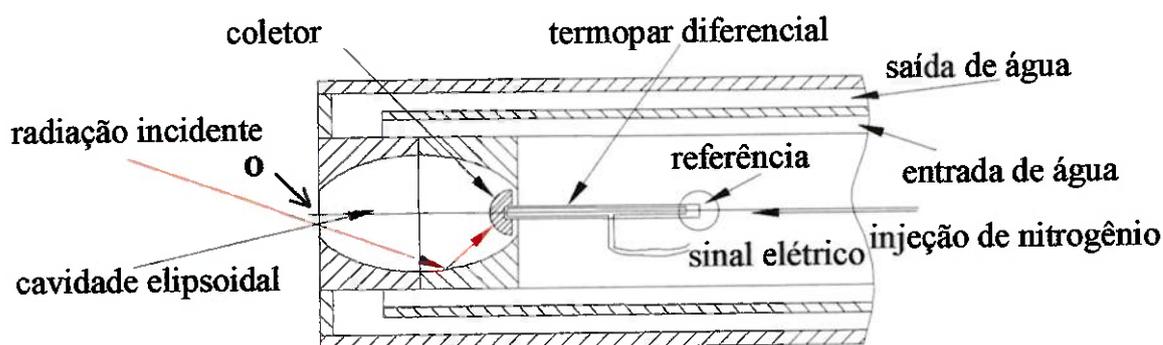


Figura 3.2 – Desenho esquemático do radiômetro elipsoidal IPT/EPUSP-96

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 através do orifício de entrada O. A vazão de água de refrigeração pode variar em função da temperatura que o radiômetro irá trabalhar assim como em função de seu comprimento de imersão no processo.

A figura 3.3 mostra uma foto do radiômetro. Ao alto e à direita, são observadas as conexões do sistema de refrigeração. Abaixo e à esquerda o orifício da cavidade elipsoidal.

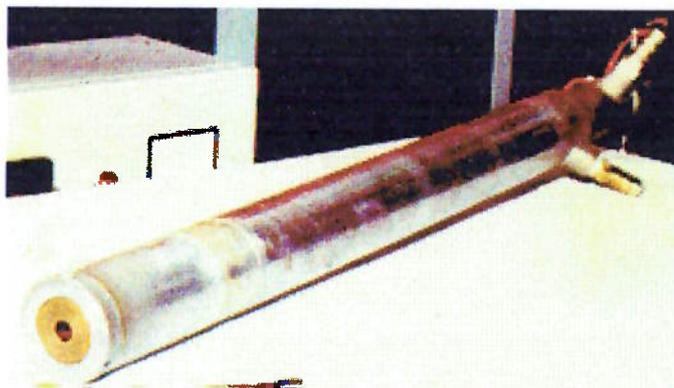


Figura 3.3 - Radiômetro elipsoidal IPT/EPUSP-96

A cavidade elipsoidal (figura 3.4) possui excentricidade 0,5 e é constituída por um cilindro metálico bipartido, em latão, cujo interior foi usinado para que possam encaixar-se e desta maneira formar uma cavidade elipsoidal, com aberturas circulares em seus planos focais.

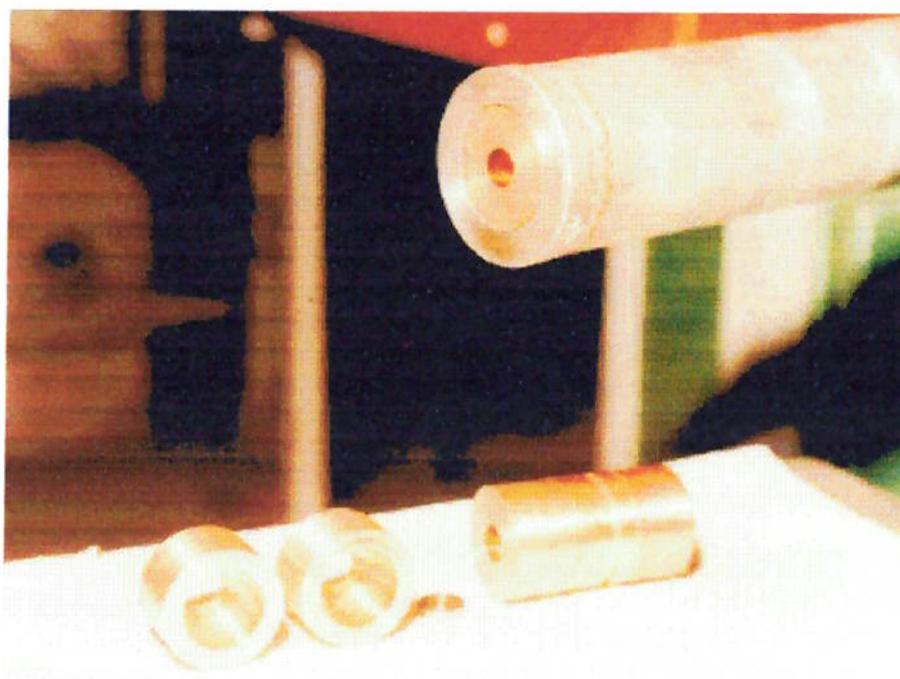


Figura 3.4 - Abaixo e à esquerda, a cavidade elipsoidal em suas duas partes constituintes. Abaixo e à direita, a cavidade montada. Acima e à direita, a cavidade instalada no tubo de refrigeração.

A superfície da cavidade foi recoberta por uma fina camada (50 μm) de níquel, depositado por eletrodeposição, para que seja refletora. A refletividade do níquel é em torno de 0,9 (GRAY,1972). 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, como indicado na figura 3.2 . A cavidade aparece em detalhe na figura 3.5 e o coletor na figura 3.6 . A técnica de eletrodeposição foi sugerida pelo Laboratório Pelletron do Instituto de Física da Universidade de São Paulo e realizada no Laboratório de Corrosão e Tratamento de Superfície do IPT.

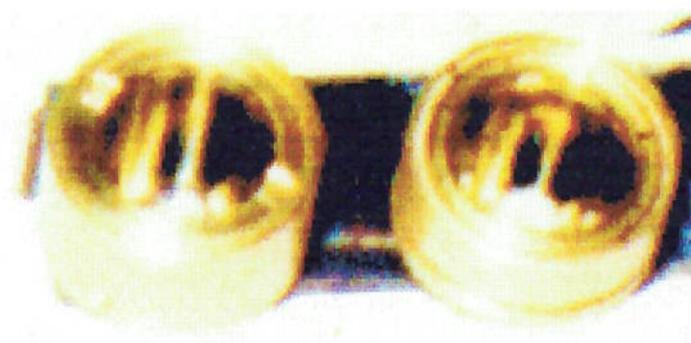


Figura 3.5 – Detalhe da cavidade com seu interior recoberto de níquel.

A finalidade do coletor hemisférico é absorver toda 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.



Figura 3.6 – Detalhe do coletor.

O coletor é fabricado em cobre e recoberto por uma fina camada de material de alta emissividade, combinando as duas características de um coletor ideal: possui grande absorvibilidade superficial e interna conforme recomenda SIEGEL e HOWELL (1992). No início deste trabalho foi seguida a concepção do IFRF/LAND que é oxidar a superfície do coletor para aumentar sua absorvibilidade, tal como reportado em CHEDAILLE e BRAUD (1972). Posteriormente, foi depositado em sua superfície uma fina camada de fuligem, que possui emissividade 0,95 (SIEGEL e HOWELL,1992). Isso foi realizado através de uma simples vela de parafina, tipo caseira, o que apresentou ótima absorvibilidade e permitiu um controle um pouco maior deste parâmetro do instrumento já que seria difícil controlar o seu grau de oxidação.

Alojado no coletor, foi montado um termopar diferencial composto por dois termopares comerciais ligados em oposição, como já mencionado no item 2.3 e esquematizado na figura 2.4. A junta de medida está localizada no centro do hemisfério, como apresentada na figura 3.6 . O termopar diferencial é de cobre-constantan (tipo T), isolamento mineral, com junta de medida aterrada e diâmetro externo de 1,5 mm.

O conjunto coletor/termopar é mantido posicionado através de uma pinça (figura 3.7) . O sinal produzido pelo termopar diferencial é levado a um voltímetro por dois fios comuns de cobre.



Figura 3.7 - Pinça para posicionar o conjunto coletor/termopar

Estas são algumas das vantagens do radiômetro IPT/EPUSP-96: seus materiais são largamente comercializados, os termopares utilizados possuem curvas de calibração universalmente aceitas e, dessa maneira, pode ser facilmente construído ou reproduzido.

Em seu estágio atual este radiômetro apresentou excelentes resultados em calibração contra corpos negros. Contudo, operando em fornalha há necessidade de injeção de gás nitrogênio, através da cavidade elipsoidal, por três razões: *a)* impedir a entrada de gases de combustão que provocariam o aquecimento convectivo do coletor; *b)* impedir a entrada de partículas ou vapores condensáveis de combustível que diminuiriam a refletividade das paredes e *c)* o gás nitrogênio apresenta grande transparência à radiação térmica.

Por outro lado, a injeção do gás provoca o resfriamento do coletor e conseqüente perda na sensibilidade do sinal. Essa perda de sensibilidade é da ordem de 10% para uma vazão de nitrogênio de cerca de 42 l.h^{-1} como afirma JUNQUEIRA (1997). Na calibração do instrumento contra corpos negros não foi utilizada injeção de nenhum gás.

4 BANCADA EXPERIMENTAL

Neste capítulo é descrita a bancada experimental utilizada para os testes iniciais e a calibração do instrumento. Os testes iniciais foram realizados somente para verificar se o instrumento apresentaria um bom funcionamento enquanto que a calibração foi fundamental para correlacionar o fluxo radiativo incidente ao sinal de saída do instrumento.

4.1 Os fornos de calibração

A bancada experimental utilizada para calibrar o radiômetro é apresentada na figura 4.1 . Basicamente ela é composta por três fornos esféricos tipo corpo negro aquecidos eletricamente e um sistema de aquisição de dados formado por um registrador e um microcomputador.

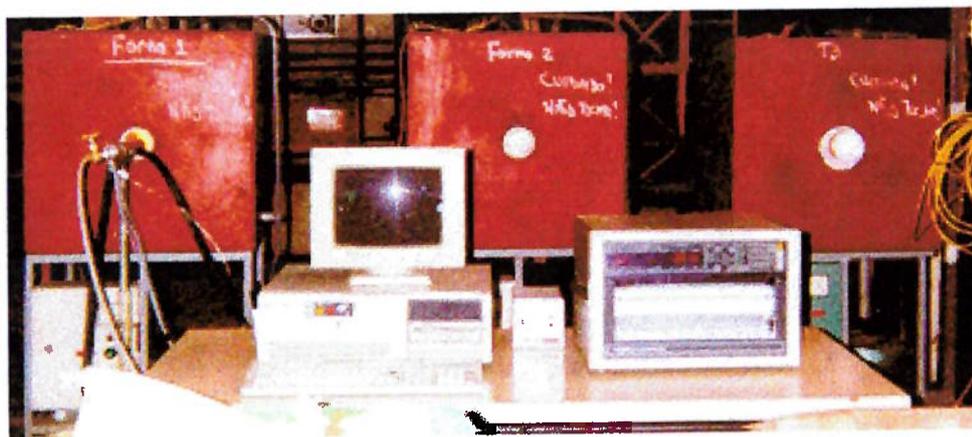


Figura 4.1 – Bancada experimental utilizada na calibração do radiômetro IPT/EPUSP-96, ao fundo os fornos de calibração, em primeiro plano o registrador à direita e o microcomputador à esquerda.

Um dos fornos pode ser visto isoladamente na figura 4.2 . A sua temperatura é medida por termopares de cromel-alumel (tipo K), de isolamento mineral, capa de proteção

em aço com diâmetro externo de 3 mm posicionado no centro da cavidade. O controle é realizado por um reostato tipo Variac e os fornos podem atingir temperaturas de até 1100 °C. Uma abertura frontal permite o acesso do instrumento ao seu interior.

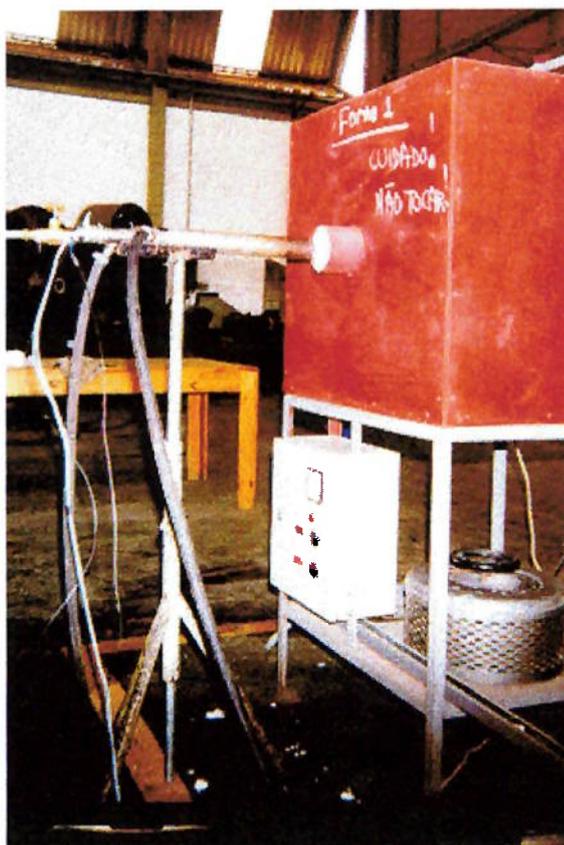


Figura 4.2 - Forno utilizado na calibração. Acima, abertura de acesso e o radiômetro posicionado em um tripé. Embaixo o quadro elétrico com um amperímetro e, mais à direita, o reostato de controle.

Os fornos são constituídos por uma casca esférica, de 300 mm de diâmetro interno, em cimento refratário aluminoso (93 % Al_2O_3) e sua abertura de acesso (A) , indicada na figura 4.3, tem um raio de 38 mm.

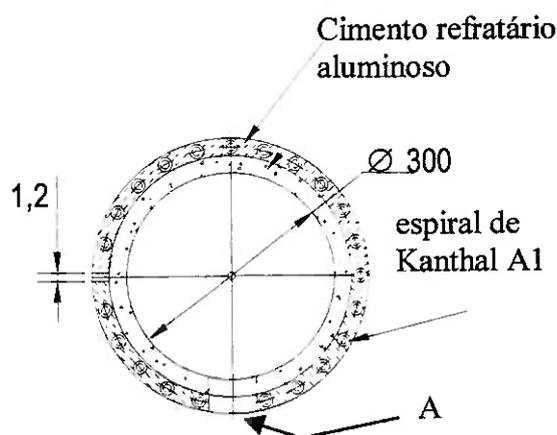


Figura 4.3 – Detalhe do forno de calibração

Todo o conjunto é isolado com lã de vidro e fechado em uma caixa cúbica de 1000 mm de aresta. O aquecimento elétrico é realizado por fios tipo Kanthal A1, com diâmetro de 2 mm, e distribuídos de tal forma que as paredes da casca esférica sejam aquecidas uniformemente. Para que o forno não sofresse choques térmicos que o danificassem, seu aquecimento foi feito da forma apresentada na Tabela 4.1 (IPT, 1993).

TABELA 4.1 – RAMPAS DE AQUECIMENTO

Faixa de temperatura (°C)	Taxa de aquecimento (°C/h)
20 a 100	10
Patamar em 100	24 horas
100 a 650	20
Patamar em 650	12 horas
650 a 950	50
Patamar em 950	12 horas
950 a 1100	50

A intensidade de corrente elétrica não ultrapassou 12 A, para não danificar o reostato ou a resistência elétrica de aquecimento. Para manter a temperatura do forno estabilizada, o orifício de entrada do forno foi aberto apenas no momento das medições.

A inserção do radiômetro foi tal que sua face foi posicionada tangencialmente às paredes fazendo com que a radiação emitida em qualquer ponto das paredes atravessasse o seu orifício de abertura. Ao inserir o instrumento na cavidade, foi observado que a temperatura do forno diminuía até novamente atingir um novo estado de equilíbrio térmico. As medições foram realizadas nessas condições de equilíbrio.

4.2 Sistema de aquisição de dados

Para coletar o sinal produzido pelo instrumento foi utilizado um registrador multicanal marca Yokogawa, modelo 3056, que permite leituras diretamente em tensão ou em temperatura. O registrador possui um conversor analógico-digital (IEEE-488) que foi acoplado a um microcomputador. O conversor permite taxas de aquisição de dados com intervalo de tempo variável, desde um segundo até horas.

Para a aquisição de todos os dados relevantes do instrumento foi montado o circuito termoeletrico da figura 4.4 .

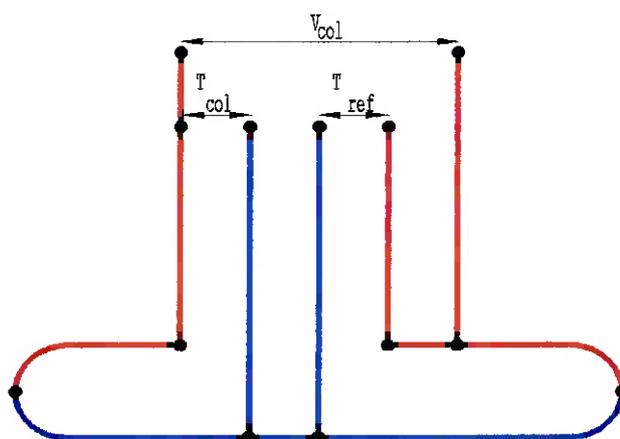


Figura 4.4 - Esquema de ligação dos termopares para o radiômetro elipsoidal

Com este circuito foi monitorado: o sinal de saída (V_{col}), a temperatura do coletor (T_{col}) e a temperatura da referência (T_{ref}). As temperaturas dos fornos foram medidas em três canais diferentes e a temperatura ambiente foi monitorada por um termopar instalado no registrador.

O sinal de saída foi medido para ser correlacionado diretamente ao fluxo incidente. A temperatura do coletor foi monitorada para serem obtidos dados diretamente em graus celsius ($^{\circ}\text{C}$). Já a temperatura de referência foi monitorada para verificar sua variação em cada condição de calibração e compará-la com a temperatura ambiente.

5 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo são apresentados alguns resultados típicos fornecidos pelo instrumento, sua curva de calibração, um estudo paramétrico, uma análise de sua sensibilidade e uma comparação de suas especificações com outros instrumentos comerciais. A totalidade dos dados utilizados na calibração está no Anexo A. Os termopares utilizados nos fornos de calibração e o termopar diferencial do coletor foram calibrados no Laboratório de Termometria do IPT. A análise de incertezas do processo de calibração é apresentada no Anexo B.

5.1 Resultados do protótipo

Os resultados obtidos pelo protótipo foram muito bons. Na tabela 5.1 estão alguns resultados típicos encontrados nas medições realizadas.

TABELA 5.1 – ALGUNS RESULTADO TÍPICOS DO PROTÓTIPO

Temperatura do Corpo Negro	Sinal Medido	Fluxo do Corpo Negro	Temperatura do Coletor	Temperatura de referência
°C	μV	W.m ⁻²	°C	°C
1 108	14 281	170 974	312,1	30,8
1 034	12 323	138 447	275,3	27,0
1 009	11 710	128 570	267,9	28,6
937	9 345	103 061	222,7	28,4
887	8 125	87 350	200,0	28,5
793	6 367	62 956	169,1	28,7
748	5 081	53 259	141,8	30,0

Desses resultados podem ser observados os elevados sinais de saída fornecidos pelo instrumento assim como as temperaturas atingidas pelo coletor. É interessante também notar que para temperaturas de corpos negros maiores do que as permissíveis

pelo forno de calibração utilizado, a temperatura do coletor poderia superar 400 °C (673 K) o que revela sua grande resistência térmica.

Temperatura do Corpo Negro Versus Temperatura do Coletor

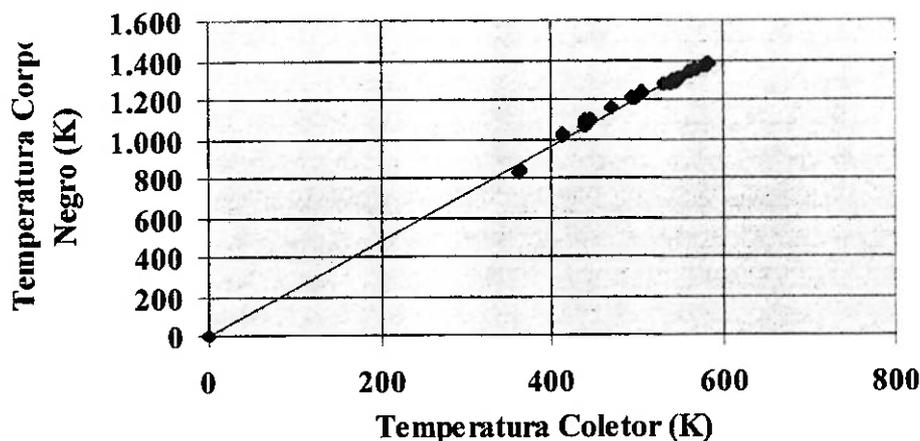


Figura 5.1 - Curva entre temperatura do corpo negro e temperatura do coletor

Na figura 5.1 é vista a relação entre as temperaturas do corpo negro e as temperaturas do coletor. A temperatura do coletor, teoricamente, deveria ser a da fonte mas isso não ocorre porque o sistema não é adiabático. A curva linear do gráfico, que possuiu um $\chi_{red}^2 = 0,98$, também indica que é possível correlacionar linearmente o fluxo radiativo com o sinal elétrico fornecido pelo instrumento.

5.2 Curva de calibração

O resultado consolidado das medições realizadas está resumido na curva de calibração da figura 5.2. Durante o processo de calibração as temperaturas dos três fornos situaram-se entre 560°C e 1100°C. Todas as medidas foram realizadas quando o sistema estava em equilíbrio térmico e foi levada em conta a emissividade aparente da

fonte de acordo com a equação 2.4 . O fluxo radiativo, nessas condições, foi calculado através da equação 2.3, de Stefan-Boltzmann. Os dados utilizados foram tratados, sendo corrigidas as temperaturas dos fornos e do sensor do coletor através da calibração realizada nos mesmos. Foi levada em conta a emissividade aparente dos corpos negros de calibração assim como a variação da emissividade com a temperatura do material de suas superfícies emissoras.

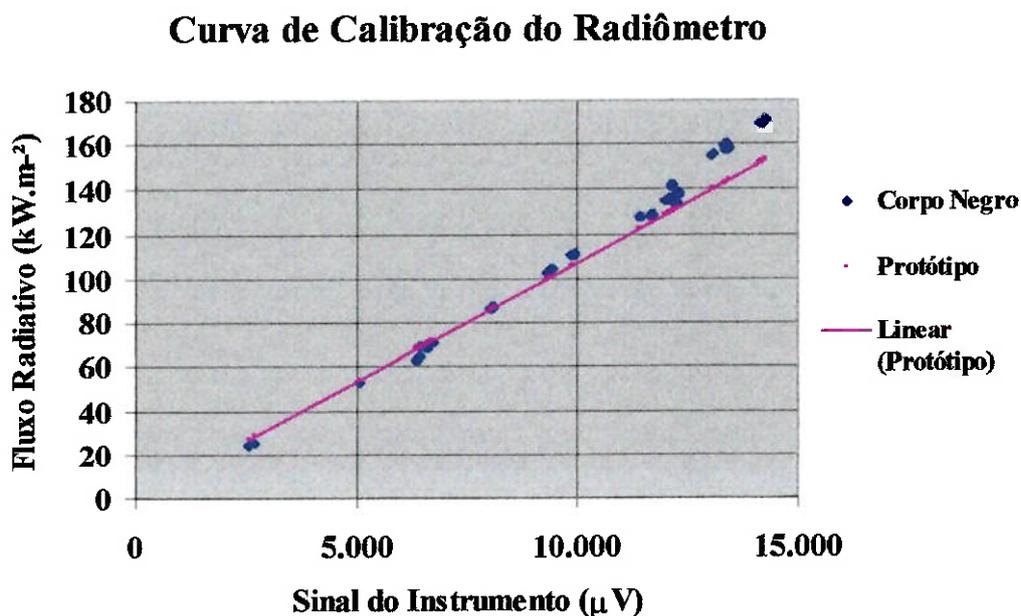


Figura 5.2 - Curva de calibração do radiômetro elipsoidal

Fazendo uma regressão linear e considerando todos os 557 dados adquiridos, foi obtida a seguinte relação:

$$\Phi_R = 10,6927.E \quad (5.1)$$

onde Φ_R é o fluxo radiativo total hemisférico, dado em W.m^{-2} , e o sinal do instrumento, E , é dado em μV . Essa curva possui $\chi^2_{\text{red}} = 0,926$ e uma estimativa de erro padrão (“Standard Error of Estimate, SEE”) de $12,35 \text{ kW.m}^{-2}$, calculada a 95% conforme COLEMAN (1989). Foi realizada uma análise de incertezas dessa calibração e a incerteza média do instrumento foi calculada em 6,6% (95%) do fluxo medido. Na figura 5.3 é apresentada a variação da incerteza com o fluxo medido. Essas incertezas foram calculadas em cada ponto do fluxo medido.

Varição da Incerteza com o Fluxo

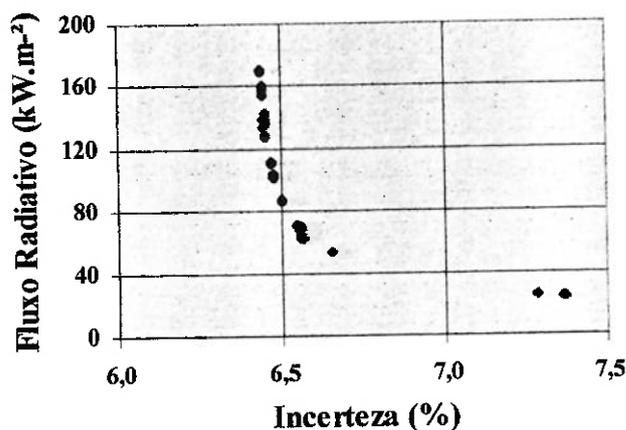


Figura 5.3 - Variação da incerteza do fluxo medido

Da análise realizada foi verificado que a grande parcela responsável pela incerteza total do instrumento residiu na fonte de calibração. Os detalhes dessa análise estão no Anexo B.

5.3 Cálculo da sensibilidade do instrumento

Uma forma de avaliar o desempenho do protótipo foi calcular sua sensibilidade, que segundo a definição oficial do Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO, 1995) é a “variação da resposta de um instrumento de medição dividida pela correspondente variação do estímulo.”

Chamando de S a sensibilidade, tem-se:

$$S = \frac{dE}{d\Phi_R} \quad (5.2)$$

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

$$S = 935 \mu\text{V}/\text{W}/\text{cm}^2$$

o que é 3,7 vezes maior quando comparada a instrumentos comerciais semelhantes (LAND, 1977).

A incerteza média da sensibilidade foi calculada em 6,7% (95%). Sua variação com o fluxo é apresentada na figura 5.4. Os detalhes desses cálculos estão no Anexo B.

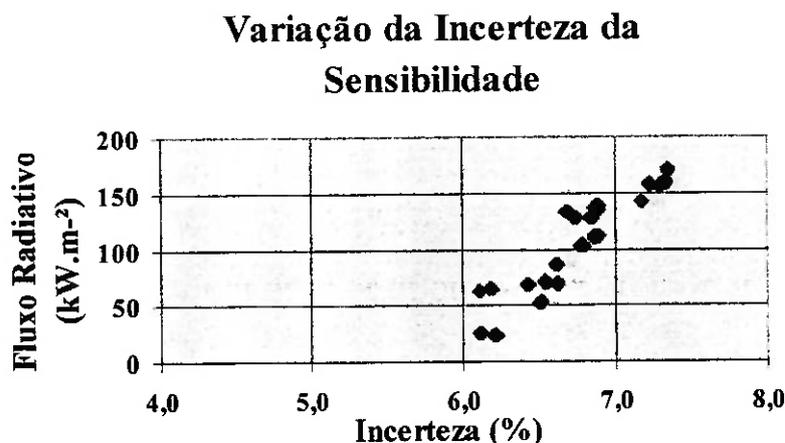


Figura 5.4 – Variação da sensibilidade do instrumento com o fluxo radiativo

A razão da sensibilidade ser muito alta está no fato do coletor ter sido concebido para que esteja muito bem isolado do sistema de refrigeração, o que não ocorre nas outras versões comerciais do IFRF e da Land.

O fluxo máximo medido foi 171 KW.m^{-2} para uma temperatura do corpo negro de $1108 \text{ }^\circ\text{C}$.

5.4 Efeito da emissividade do coletor

Esse 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 figura 5.5.

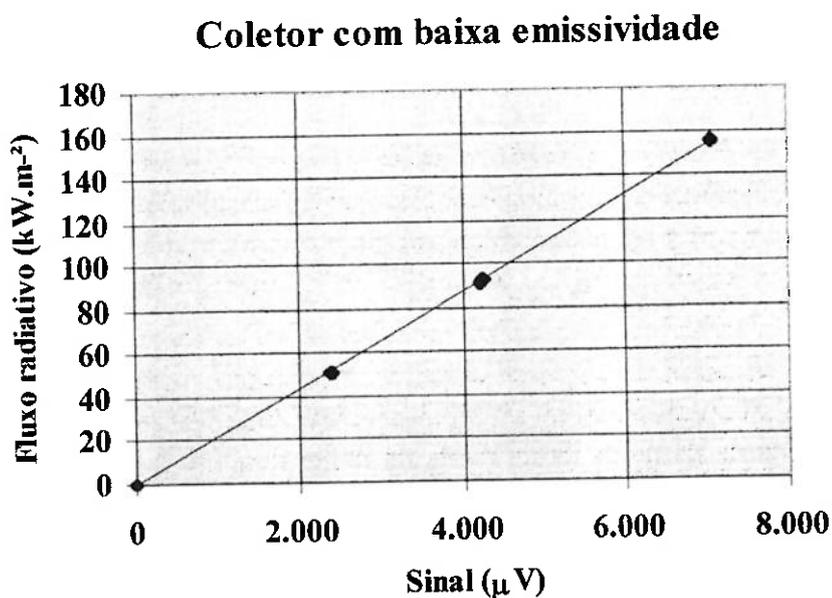


Figura 5.5. – Curva de calibração para coletor com baixa emissividade.

A curva de calibração obtida foi:

$$\Phi_R = 21,556.E \quad (5.5)$$

tendo $\chi_{red}^2 = 0,999$.

A ausência de fuligem e o polimento do coletor fizeram com que a sensibilidade do instrumento diminuísse para $464 \mu V.W^{-1}.cm^{-2}$ o que é a metade da sensibilidade do instrumento obtida com o coletor enegrecido.

5.5 Efeito da refletividade das paredes

Foi realizada uma diminuição na refletividade das paredes da cavidade pelo depósito de fuligem em suas paredes. A emissividade do coletor não foi alterada. O

enegrecimento provocou nas paredes uma aparência fosca. Os dados obtidos com essa nova cavidade aparecem na curva de calibração da figura 5.6.

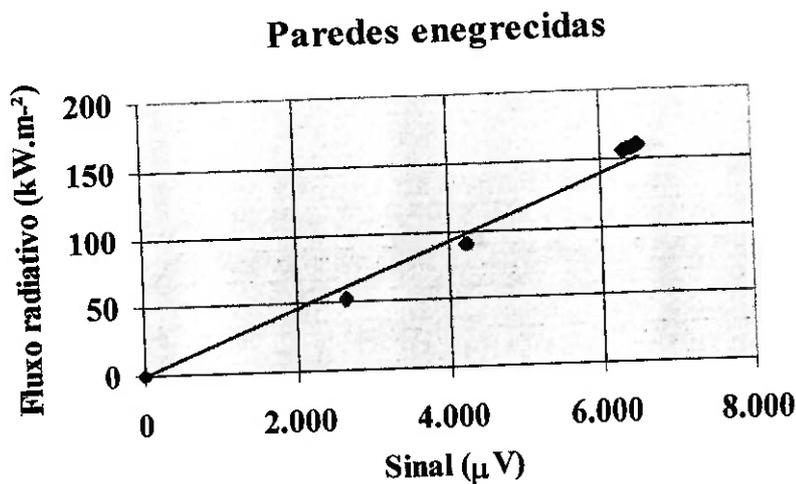


Figura 5.6 – Curva de calibração para cavidade elipsoidal enegrecida.

A curva de calibração obtida foi:

$$\Phi_R = 22,958.E \quad (5.7)$$

e o $\chi^2_{red} = 0,968$. A nova sensibilidade encontrada foi de $436 \mu V/W/cm^2$, que representa menos da metade da sensibilidade original.

Este efeito provavelmente poderia ter sido maior se tivesse sido provocado um enegrecimento total. Entretanto, isso não foi possível pois existia o risco da refletividade da cavidade ficar comprometida definitivamente pois era única peça disponível para o presente trabalho.

5.6 Efeito do tipo de junta de medida do termopar

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 e para verificar esse efeito tanto o coletor quanto as paredes não foram alteradas de sua condição de trabalho normal. A figura 5.7 mostra os resultados para esse caso.

A curva de calibração obtida, com $\chi^2 = 0,993$, foi:

$$\Phi_R = 17,642.E \quad (5.8)$$

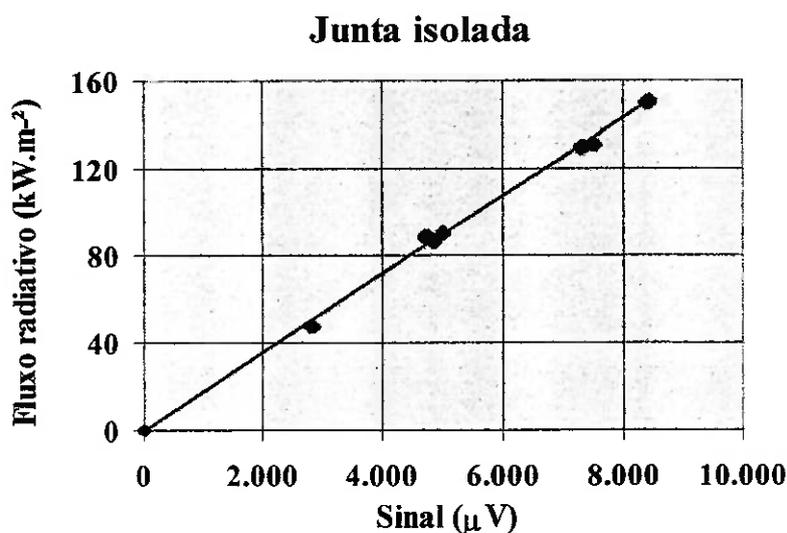


Figura 5.7 - Curva de calibração para junta do termopar isolada.

A sensibilidade caiu de 928 para $567 \mu\text{V}/\text{W}/\text{cm}^2$ o que mostra o efeito da resistência térmica entre o coletor e a junta de medida. Este 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.

5.7 Constante de tempo

Foi medida a resposta do instrumento com relação ao tempo, para um estímulo em degrau, como indica a figura 5.8.

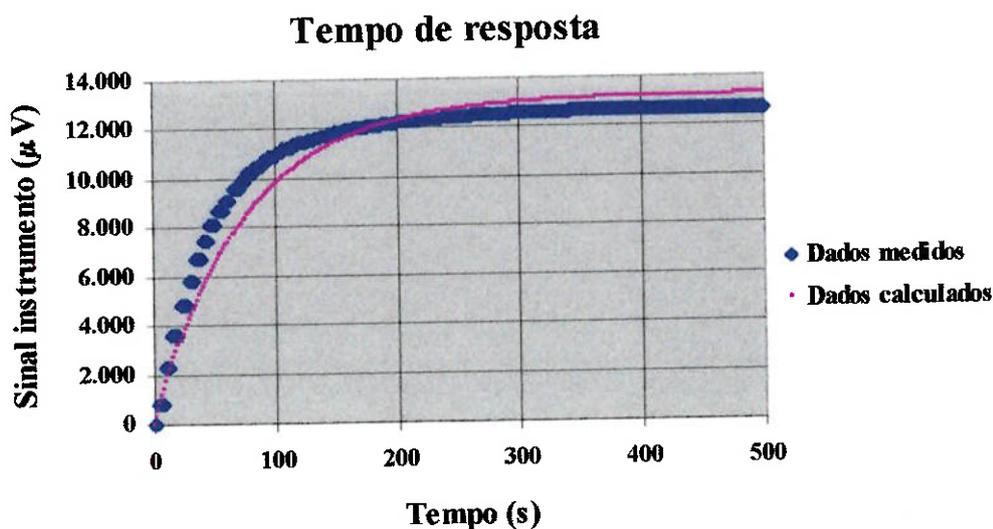


Figura 5.8 - Resposta do instrumento com relação ao tempo

Realizado um ajuste da curva de resposta pelo método dos mínimos quadrados a função encontrada foi:

$$E = 12797 \left(1 - e^{-\frac{t}{75}} \right) \quad (5.4)$$

onde E foi medido em μV , t medido em s, $12797 \mu\text{V}$ foi o sinal obtido no equilíbrio e 75 s a constante de tempo (τ) calculada. Portanto, o tempo de resposta do instrumento é 344 s (99%) o que é muito alto e muito maior do que o de seu similar comercial (LAND, 1972) que é de 60 s (99%). O fato do tempo de resposta ser muito alto é devido a grande resistência térmica, R , do coletor do instrumento. Foi visto no capítulo 3 que $\tau = R.C$, onde C é a capacidade térmica do coletor. A constante de tempo poderá ser reduzida pela diminuição da massa do coletor, o que pode ser conseguido facilmente.

5.8 Comparação do protótipo com outros instrumentos

Na Tabela 5.2 estão as especificações de outros cinco instrumentos e a do instrumento desenvolvido neste trabalho. Elas foram obtidas em ARAI (1996) e esse autor não cita as incertezas e as sensibilidades declaradas pelos respectivos fabricantes.

TABELA 5.2 – ESPECIFICAÇÕES DE OUTROS INSTRUMENTOS

Fabricante	Modelo	Faixa de trabalho (W.m ⁻²)	Faixa de temperatura (°C)	Constante de tempo (s)	Sensibilidade (μ.W.cm ⁻²)	Incerteza (%)	Referência
Thermonetic Corp. (USA)	H42-200-10	10 ² a 10 ⁶	-200 a 1 100	1	Não consta	Não consta	ARAI (1996)
Medthermo Co. (USA)	-	9.10 ² a 7,1.10 ⁵	-45 a 93	Não consta	Não consta	Não consta	ARAI (1996)
Kyoto-Denshi Co. (Japan)	E750	5,5.10 ² a 5,5.10 ⁴	+200 a 750	2	Não consta	Não consta	ARAI (1996)
IFRF/LAND	A	0 a 5.10 ⁵	1 600 (max)	60 (99%)	250	5	CHEDAILLE (1972)
IPT	IPT/EPUSP-96	0 a 1,6.10 ⁵	1 100 (max)	75	935	6,6	-
IST	-	2,5 a 5,0 10 ⁵	Não consta	Não consta	Não consta	Não consta	AFGAN (1995)
MIT-Gardon	-	4,18.10 ⁴ (max)	280 (max)	1,2	516	Não consta	GARDON (1953)

Pode ser observado que a constante de tempo do protótipo está muito aquém de um produto comercial mas sua faixa de trabalho assim como sua temperatura são compatíveis com essa família de instrumentos. No capítulo 6 são apresentadas considerações de como é possível melhorar o desempenho do instrumento desenvolvido neste trabalho.

6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi desenvolvido um radiômetro de cavidade elipsoidal de alta sensibilidade para ser utilizado na medição de radiação total hemisférica em chamas e fornalhas.

O instrumento 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.

O protótipo revelou excelente desempenho ao ser calibrado contra corpos negros apresentando uma curva de calibração linear e uma sensibilidade de $935 \mu\text{V/W/cm}^2$ o que representa um aumento de 3,7 vezes quando comparada a seu similar comercial. Sua incerteza de calibração calculada em 6,6% (95%) também é comparável a instrumentos semelhantes. Estudos paramétricos demonstraram que os métodos de construção do instrumento são corretos como também revelam uma de suas deficiências: o tempo de resposta é muito longo.

Apesar de nossos objetivos terem sido plenamente alcançados a incorporação de melhorias é sempre importante e pode tornar o protótipo IPT/EPUSP-96 um instrumento efetivamente operacional. É possível destacar várias modificações que poderiam ser realizadas nesse novo projeto:

a) Proteção da cavidade contra entrada de fuligem ou condensáveis

Proteção realizada através de injeção de ar seco por fora da cavidade elipsoidal;

b) Capacidade térmica do coletor

Diminuição da massa do coletor;

c) Superfície do coletor

Recobrimento da superfície anterior do coletor por uma camada de “metal black” e a superfície posterior por material refletor;

d) Termopar diferencial

Diminuição do diâmetro do termopar diferencial;

e) Superfície da cavidade

Usinagem ultra-precisa da cavidade e seu recobrimento por uma camada de ouro;

f) Borda de entrada

Diminuição da espessura da borda de entrada da cavidade;

g) Temperatura máxima de trabalho

Aumento da temperatura máxima de trabalho através do aumento da vazão da água de refrigeração.

i) Indicador eletrônico

Projeto de um indicador eletrônico, com leitura em kW.m^{-2} , para ser ligado à saída elétrica do instrumento.

Essas modificações tornariam seu desempenho muito superior aos atuais radiômetros dedicados à medição de radiação total hemisférica em chamas e fornalhas e, assim desenvolvido, o instrumento poderia ser disponibilizado a todos os grupos de pesquisa que trabalhem com combustão ou a fabricantes que necessitem de parâmetros de projeto para o desenvolvimento de novos equipamentos nessa área.

ANEXO A - DADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS

Neste anexo estão todos os dados obtidos que foram utilizados para calibrar o instrumento no seu modo de operação normal. Na primeira coluna está o sinal fornecido pelo instrumento para cada temperatura de corpo negro e a data do ensaio. Na segunda coluna, o sinal fornecido pelo instrumento aparece corrigido após a calibração do termopar diferencial. A terceira e quarta colunas apresentam as temperaturas do coletor e da referência. Na quinta coluna está a temperatura ambiente. Na sexta coluna estão as temperaturas dos corpos negros e na sétima elas aparecem corrigidas pela calibração realizadas nos seus termopares. Na oitava coluna está o fluxo radiativo do corpo negro calculado através da equação de Stefan-Boltzmann (2.3). A nona coluna apresenta o fluxo calculado através da equação de calibração do instrumento (5.1). Somente no dia 18 de abril não foram coletadas as temperaturas de referência.

Sinal Coletor μV (medido) 18/4/97	Sinal Coletor μV (corrigido)	Temp. Coletor $^{\circ}C$	Temp. Refer. $^{\circ}C$	Temp. Amb. $^{\circ}C$	Temp. Forno 1 $^{\circ}C$ (medida)	Temp. Forno 1 $^{\circ}C$ (corrigida)	Fluxo Radiativo Corpo Negro $W.m^{-2}$ (Stefan - Boltzmann)	Fluxo Radiativo Corpo Negro $W.m^{-2}$ (calibração)
12.317	12.267	274,3	-	24,6	1.018,4	1.022,5	133.733	131.170
12.317	12.267	274,3	-	24,6	1.018,5	1.022,5	133.750	131.164
12.317	12.267	274,3	-	24,5	1.018,4	1.022,4	133.716	131.164
12.315	12.265	274,2	-	24,5	1.018,3	1.022,4	133.693	131.146
12.312	12.262	274,2	-	24,6	1.018,3	1.022,3	133.676	131.116
12.308	12.258	274,1	-	24,9	1.018,3	1.022,3	133.676	131.069
12.307	12.257	274,1	-	24,7	1.018,2	1.022,2	133.642	131.059
12.307	12.257	274,0	-	24,5	1.018,2	1.022,2	133.625	131.061
12.306	12.256	274,0	-	24,7	1.018,1	1.022,1	133.602	131.049
12.303	12.253	274,0	-	25,0	1.018,2	1.022,2	133.636	131.021
12.301	12.251	274,1	-	24,8	1.018,1	1.022,1	133.604	131.001
12.300	12.251	274,0	-	24,7	1.018,0	1.022,0	133.550	130.992
12.297	12.247	274,0	-	24,7	1.018,0	1.022,0	133.539	130.956
12.297	12.247	273,9	-	24,7	1.017,9	1.021,9	133.499	130.951
12.295	12.245	273,8	-	24,9	1.017,9	1.021,9	133.499	130.935
12.293	12.244	273,8	-	25,0	1.017,9	1.021,9	133.499	130.918
12.293	12.243	273,9	-	24,8	1.017,8	1.021,8	133.465	130.912
12.291	12.241	273,8	-	24,8	1.017,5	1.021,6	133.368	130.889
12.290	12.241	273,8	-	24,8	1.017,5	1.021,5	133.356	130.886
12.287	12.237	273,8	-	24,7	1.017,6	1.021,6	133.379	130.848
12.287	12.237	273,8	-	24,8	1.017,5	1.021,5	133.356	130.846
12.284	12.234	273,8	-	24,8	1.017,4	1.021,4	133.316	130.819
12.281	12.232	273,7	-	24,6	1.017,3	1.021,3	133.282	130.789
12.281	12.231	273,7	-	24,7	1.017,2	1.021,3	133.254	130.783
12.278	12.229	273,7	-	24,8	1.017,3	1.021,3	133.265	130.758

Sinal Coletor μV (medido) 18/4/97	Sinal Coletor μV (corrigido)	Temp. Coletor $^{\circ}C$	Temp. Refer. $^{\circ}C$	Temp. Amb. $^{\circ}C$	Temp. Forno 2 $^{\circ}C$ (medida)	Temp. Forno 2 $^{\circ}C$ (corrigida)	Fluxo Radiativo Corpo Negro $W.m^{-2}$ (Stefan - Boltzmann)	Fluxo Radiativo Corpo Negro $W.m^{-2}$ (calibração)
6.471	6.445	167,7	-	26,3	796,8	799,8	64.487	68.911
6.472	6.446	167,7	-	26,4	796,8	799,8	64.487	68.922
6.471	6.445	167,8	-	26,6	796,8	799,8	64.476	68.912
6.471	6.444	167,8	-	26,4	796,8	799,8	64.476	68.908
6.469	6.443	167,7	-	26,3	796,8	799,7	64.466	68.896
6.470	6.443	167,8	-	26,2	796,8	799,8	64.473	68.897
6.469	6.443	167,8	-	26,2	796,7	799,7	64.463	68.893
6.468	6.442	167,7	-	26,3	796,7	799,7	64.457	68.879
6.469	6.443	167,7	-	26,3	796,8	799,7	64.467	68.888
6.466	6.440	167,8	-	26,4	796,7	799,7	64.450	68.864
6.466	6.440	167,7	-	26,4	796,6	799,6	64.430	68.856
6.464	6.438	167,7	-	26,5	796,6	799,6	64.430	68.838
6.464	6.438	167,6	-	26,3	796,5	799,5	64.406	68.838
6.463	6.437	167,6	-	26,4	796,5	799,5	64.406	68.829
6.462	6.435	167,6	-	26,4	796,5	799,5	64.406	68.812
6.463	6.437	167,7	-	26,4	796,6	799,6	64.433	68.826
6.462	6.435	167,7	-	26,5	796,7	799,7	64.447	68.812
6.461	6.435	167,7	-	26,3	796,6	799,6	64.433	68.809
6.461	6.435	167,7	-	25,8	796,4	799,4	64.393	68.803
6.461	6.435	167,7	-	25,9	796,4	799,4	64.393	68.806
6.460	6.434	167,6	-	26,3	796,4	799,4	64.383	68.800
6.459	6.433	167,6	-	26,4	796,5	799,5	64.406	68.783
6.458	6.432	167,6	-	26,5	796,5	799,5	64.406	68.771
6.459	6.433	167,7	-	26,2	796,4	799,4	64.386	68.785
6.459	6.433	167,7	-	26,3	796,4	799,4	64.383	68.785
6.459	6.433	167,7	-	26,3	796,3	799,3	64.370	68.788
6.459	6.433	167,7	-	26,4	796,3	799,3	64.360	68.782

Sinal Coletor μV (medido) 18/4/97	Sinal Coletor μV (corrigido)	Temp. Coletor $^{\circ}C$	Temp. Refer. $^{\circ}C$	Temp. Amb. $^{\circ}C$	Temp. Forno 3 $^{\circ}C$ (medida)	Temp. Forno 3 $^{\circ}C$ (corrigida)	Fluxo Radiativo Corpo Negro $W.m^{-2}$ (Stefan - Boltzmann)	Fluxo Radiativo Corpo Negro $W.m^{-2}$ (calibração)
2.568	2.557	88,7	-	27,3	559,3	561,8	24.242	27.346
2.569	2.558	88,6	-	27,3	559,2	561,7	24.231	27.355
2.568	2.557	88,5	-	27,7	559,2	561,8	24.234	27.343
2.570	2.560	88,7	-	28,0	559,3	561,9	24.246	27.374
2.569	2.559	88,7	-	27,7	559,3	561,8	24.241	27.360
2.568	2.558	88,8	-	27,5	559,2	561,8	24.234	27.348
2.570	2.560	88,7	-	27,3	559,1	561,7	24.224	27.369
2.570	2.560	88,7	-	27,4	559,1	561,6	24.223	27.371
2.569	2.558	88,7	-	27,5	559,1	561,7	24.224	27.357
2.569	2.558	88,6	-	27,6	559,1	561,7	24.227	27.357
2.569	2.558	88,7	-	27,9	559,2	561,8	24.234	27.357
2.569	2.558	88,7	-	28,2	559,2	561,8	24.234	27.355
2.569	2.558	88,7	-	28,0	559,1	561,6	24.223	27.355
2.570	2.560	88,8	-	27,7	559,1	561,6	24.223	27.369
2.569	2.559	88,8	-	27,4	559,1	561,6	24.223	27.363
2.570	2.560	88,8	-	27,2	559,1	561,6	24.223	27.372
2.569	2.559	88,7	-	27,1	559,1	561,6	24.223	27.363
2.570	2.559	88,7	-	27,3	559,1	561,6	24.223	27.366
2.569	2.559	88,8	-	27,5	559,1	561,6	24.223	27.360
2.571	2.560	88,7	-	27,2	559,1	561,6	24.223	27.375
2.571	2.560	88,8	-	27,2	559,1	561,6	24.223	27.375
2.571	2.560	88,8	-	27,3	559,1	561,6	24.223	27.375
2.568	2.558	88,8	-	27,8	559,1	561,6	24.223	27.351
2.568	2.558	88,8	-	28,1	559,1	561,6	24.223	27.348
2.568	2.558	88,8	-	28,2	559,1	561,6	24.223	27.348
2.568	2.557	88,8	-	28,1	559,1	561,6	24.221	27.346
2.568	2.558	88,8	-	27,8	559,0	561,6	24.216	27.351
2.568	2.557	88,8	-	27,6	559,1	561,6	24.218	27.343
2.568	2.557	88,8	-	27,5	559,0	561,5	24.211	27.343
2.566	2.556	88,8	-	27,4	559,0	561,5	24.209	27.331
2.567	2.557	88,7	-	27,4	559,1	561,6	24.223	27.340

Sinal Coletor μV (medido) 18/4/97	Sinal Coletor μV (corrigido)	Temp. Coletor $^{\circ}C$	Temp. Refer. $^{\circ}C$	Temp. Amb. $^{\circ}C$	Temp. Forno 1 $^{\circ}C$ (medida)	Temp. Forno 1 $^{\circ}C$ (corrigida)	Fluxo Radiativo Corpo Negro $W.m^{-2}$ (Stefan - Boltzmann)	Fluxo Radiativo Corpo Negro $W.m^{-2}$ (calibração)
11.758	11.710	267,9	no data	28,2	1.005,4	1009,3	128.571	125.211
11.756	11.709	267,9	-	28,4	1.005,3	1009,3	128.565	125.196
11.755	11.708	267,9	-	28,4	1.005,3	1009,3	128.554	125.187
11.753	11.705	267,8	-	28,5	1.005,3	1009,2	128.548	125.160
11.750	11.703	267,8	-	28,8	1.005,3	1009,2	128.544	125.132
11.748	11.701	267,8	-	28,6	1.005,2	1009,1	128.505	125.112
11.747	11.699	267,7	-	28,7	1.005,1	1009,0	128.472	125.097
11.747	11.700	267,7	-	28,6	1.005,0	1008,9	128.432	125.103
11.744	11.697	267,7	-	28,5	1.005,0	1008,9	128.433	125.071
11.743	11.695	267,7	-	28,6	1.004,9	1008,8	128.393	125.052
11.742	11.694	267,7	-	28,7	1.004,9	1008,8	128.383	125.046
11.739	11.692	267,5	-	29,0	1.004,8	1008,7	128.355	125.018
11.736	11.689	267,6	-	29,2	1.004,7	1008,7	128.326	124.986
11.736	11.689	267,5	-	29,0	1.004,7	1008,6	128.316	124.985
11.734	11.686	267,5	-	28,8	1.004,6	1008,6	128.293	124.957
11.731	11.683	267,5	-	29,0	1.004,7	1008,6	128.297	124.927
11.731	11.683	267,6	-	29,1	1.004,8	1008,7	128.339	124.925
11.729	11.681	267,5	-	29,1	1.004,6	1008,6	128.295	124.904
11.726	11.679	267,4	-	29,0	1.004,5	1008,4	128.228	124.880
11.725	11.678	267,3	-	28,6	1.004,3	1008,3	128.171	124.868
11.724	11.677	267,3	-	28,7	1.004,3	1008,2	128.161	124.858

Sinal Coletor μV (medido) 18/4/97	Sinal Coletor μV (corrigido)	Temp. Coletor $^{\circ}C$ -	Temp. Refer. $^{\circ}C$ -	Temp. Amb. $^{\circ}C$ -	Temp. Forno 1 $^{\circ}C$ (medida)	Temp. Forno 1 $^{\circ}C$ (corrigida)	Fluxo Radiativo Corpo Negro $W.m^{-2}$ (Stefan - Boltzmann)	Fluxo Radiativo Corpo Negro $W.m^{-2}$ (calibração)
11.723	11.675	267,3	-	28,9	1.004,2	1008,1	128.117	124.839
11.720	11.672	267,3	-	28,8	1.004,1	1008,0	128.080	124.808
11.719	11.671	267,3	-	29,2	1.004,2	1008,1	128.124	124.796
11.718	11.670	267,2	-	29,8	1.004,4	1008,3	128.182	124.787
Sinal Coletor μV (medido) 18/4/97	Sinal Coletor μV (corrigido)	Temp. Coletor $^{\circ}C$ -	Temp. Refer. $^{\circ}C$ -	Temp. Amb. $^{\circ}C$ -	Temp. Forno2 $^{\circ}C$ (medida)	Temp. Forno 2 $^{\circ}C$ (corrigida)	Fluxo Radiativo Corpo Negro $W.m^{-2}$ (Stefan - Boltzmann)	Fluxo Radiativo Corpo Negro $W.m^{-2}$ (calibração)
6.394	6.368	169,1	-	29,7	790,2	793,2	62.956	68.088
6.392	6.366	169,1	-	29,6	790,3	793,2	62.960	68.068
6.394	6.368	169,1	-	29,2	790,2	793,2	62.946	68.091
6.391	6.365	169,2	-	29,2	790,2	793,1	62.937	68.057
6.390	6.364	169,2	-	29,0	790,1	793,0	62.917	68.050
6.389	6.363	169,1	-	29,1	790,0	792,9	62.890	68.039
6.388	6.362	169,0	-	29,3	790,0	793,0	62.897	68.029
6.388	6.362	169,0	-	29,4	790,0	792,9	62.890	68.024
6.386	6.360	169,0	-	29,2	790,0	793,0	62.900	68.010
6.387	6.361	169,0	-	29,2	790,0	793,0	62.900	68.018
6.388	6.362	169,0	-	29,2	790,0	793,0	62.900	68.024
6.387	6.361	169,0	-	29,3	790,0	792,9	62.891	68.018
6.386	6.361	169,0	-	29,2	789,9	792,8	62.871	68.012
6.385	6.359	168,9	-	29,0	789,8	792,7	62.848	67.992
6.384	6.358	168,8	-	28,8	789,7	792,7	62.831	67.989
6.383	6.357	168,8	-	29,1	789,7	792,7	62.834	67.974
6.383	6.358	168,9	-	29,2	789,7	792,7	62.841	67.980
6.382	6.356	168,9	-	29,2	789,7	792,7	62.841	67.963
6.381	6.355	168,9	-	29,4	789,8	792,7	62.845	67.951
6.382	6.356	168,8	-	29,3	789,7	792,7	62.832	67.965
6.381	6.355	168,8	-	29,2	789,6	792,6	62.812	67.951
6.381	6.355	168,8	-	29,1	789,5	792,5	62.795	67.951
6.379	6.353	168,9	-	28,8	789,5	792,5	62.792	67.933
6.378	6.352	168,8	-	28,4	789,5	792,5	62.783	67.925
6.378	6.352	168,8	-	28,2	789,4	792,4	62.762	67.922
6.376	6.350	168,8	-	28,4	789,4	792,4	62.762	67.899
6.376	6.350	168,8	-	28,7	789,4	792,4	62.762	67.896
6.374	6.348	168,8	-	28,8	789,4	792,4	64.235	67.881
Sinal Coletor μV (medido) 18/4/97	Sinal Coletor μV (corrigido)	Temp. Coletor $^{\circ}C$ -	Temp. Refer. $^{\circ}C$ -	Temp. Amb. $^{\circ}C$ -	Temp. Forno 3 $^{\circ}C$ (medida)	Temp. Forno 3 $^{\circ}C$ (corrigida)	Fluxo Radiativo Corpo Negro $W.m^{-2}$ (Stefan - Boltzmann)	Fluxo Radiativo Corpo Negro $W.m^{-2}$ (calibração)
2.699	2.688	92,8	-	28,6	567,3	570,0	25.189	28.744
2.699	2.689	92,8	-	28,6	567,5	570,2	25.204	28.747
2.698	2.688	92,8	-	28,6	567,6	570,3	25.220	28.737
2.698	2.687	92,9	-	28,9	567,6	570,3	25.220	28.734
2.698	2.687	93,0	-	29,0	567,5	570,2	25.203	28.728
2.699	2.688	92,9	-	29,1	567,4	570,1	25.199	28.746
2.699	2.688	92,9	-	28,9	567,5	570,2	25.205	28.743
2.698	2.687	92,9	-	28,8	567,4	570,1	25.196	28.734
2.698	2.688	92,9	-	28,9	567,4	570,1	25.195	28.737
2.696	2.686	92,9	-	29,2	567,4	570,1	25.192	28.715
2.698	2.688	92,9	-	29,2	567,6	570,3	25.215	28.737
2.698	2.687	93,0	-	29,2	567,6	570,3	25.220	28.732
2.697	2.686	92,9	-	29,1	567,5	570,2	25.203	28.718

Sinal Coletor μV (medido) 18/4/97	Sinal Coletor μV (corrigido)	Temp. Coletor $^{\circ}\text{C}$ -	Temp. Refer. $^{\circ}\text{C}$ -	Temp. Amb. $^{\circ}\text{C}$ -	Temp. Forno 3 $^{\circ}\text{C}$ (medida)	Temp. Forno 3 $^{\circ}\text{C}$ (corrigida)	Fluxo Radiativo Corpo Negro W.m^{-2} (Stefan - Boltzmann)	Fluxo Radiativo Corpo Negro W.m^{-2} (calibração)
2.697	2.687	92,8	-	28,7	567,4	570,1	25.196	28.726
2.698	2.687	92,8	-	28,4	567,5	570,2	25.205	28.734
2.697	2.686	92,9	-	28,2	567,5	570,2	25.208	28.722
2.698	2.687	92,8	-	28,0	567,5	570,2	25.213	28.732
2.699	2.688	92,9	-	28,1	567,5	570,2	25.208	28.738
2.697	2.686	92,9	-	28,3	567,5	570,2	25.208	28.722
2.696	2.685	92,9	-	28,3	567,5	570,2	25.213	28.714
2.699	2.688	92,9	-	28,4	567,6	570,3	25.215	28.741
2.698	2.687	92,9	-	28,3	567,5	570,2	25.213	28.731
2.698	2.687	92,9	-	28,2	567,6	570,3	25.220	28.729
2.699	2.688	93,1	-	28,1	567,5	570,2	25.213	28.743
2.700	2.689	93,0	-	28,0	567,5	570,2	25.205	28.752
2.698	2.687	92,9	-	27,9	567,3	570,0	25.184	28.731
2.700	2.689	93,0	-	28,0	567,3	570,0	25.184	28.749
2.700	2.689	93,0	-	28,0	567,4	570,1	25.201	28.749

Sinal Coletor μV (medido) 23/4/97	Sinal Coletor μV (corrigido)	Temp. Coletor $^{\circ}\text{C}$ -	Temp. Refer. $^{\circ}\text{C}$ -	Temp. Ambiente $^{\circ}\text{C}$ -	Temp. Forno 1 $^{\circ}\text{C}$ (medida)	Temp. Forno 1 $^{\circ}\text{C}$ (corrigida)	Fluxo Radiativo Corpo Negro W.m^{-2} (Stefan - Boltzmann)	Fluxo Radiativo Corpo Negro W.m^{-2} (calibração)
12.374	12.323	275,3	27,0	26,0	1.030,1	1034,2	138.448	131.771
12.370	12.320	275,3	27,0	26,1	1.029,9	1034,1	138.395	131.729
12.368	12.318	275,3	27,1	26,0	1.029,8	1034,0	138.354	131.708
12.366	12.316	275,3	27,1	25,9	1.029,7	1033,8	138.307	131.694
12.365	12.315	275,2	27,1	25,9	1.029,6	1033,7	138.266	131.683
12.363	12.313	275,1	27,0	26,0	1.029,5	1033,6	138.225	131.660
12.361	12.311	275,1	27,0	26,3	1.029,4	1033,5	138.171	131.638
12.358	12.308	275,1	27,1	26,6	1.029,3	1033,5	138.148	131.606
12.356	12.306	275,0	27,0	26,5	1.029,3	1033,4	138.114	131.584
12.355	12.305	275,0	27,0	26,3	1.029,1	1033,2	138.057	131.578
12.352	12.302	274,9	26,9	26,3	1.028,9	1033,0	137.972	131.543
12.351	12.301	274,9	26,9	26,3	1.028,9	1033,0	137.949	131.531
12.348	12.298	274,8	26,9	26,2	1.028,8	1032,9	137.915	131.495
12.345	12.295	274,7	27,0	26,0	1.028,6	1032,7	137.856	131.470
12.342	12.292	274,7	26,9	26,0	1.028,5	1032,6	137.815	131.434
12.340	12.290	274,6	26,9	26,2	1.028,4	1032,5	137.776	131.412
12.338	12.288	274,6	26,8	26,2	1.028,2	1032,3	137.698	131.397
12.336	12.286	274,5	26,7	26,3	1.028,2	1032,3	137.677	131.371
12.336	12.286	274,5	26,7	26,3	1.028,0	1032,1	137.582	131.367
12.334	12.284	274,4	26,7	26,4	1.027,8	1031,9	137.523	131.352
12.330	12.280	274,3	26,6	26,1	1.027,7	1031,8	137.492	131.303
12.327	12.277	274,3	26,7	26,4	1.027,8	1031,9	137.506	131.279
12.324	12.274	274,3	26,7	26,3	1.027,7	1031,8	137.467	131.239
12.321	12.271	274,2	26,8	26,2	1.027,5	1031,6	137.385	131.209
12.314	12.264	274,1	26,8	25,9	1.027,3	1031,4	137.312	131.140
12.302	12.252	274,2	27,1	25,8	1.027,3	1031,4	137.312	131.005
12.292	12.242	274,1	27,3	25,9	1.027,3	1031,4	137.308	130.903
12.287	12.238	274,1	27,4	26,1	1.027,1	1031,2	137.249	130.853
12.282	12.232	274,0	27,4	26,6	1.027,0	1031,1	137.208	130.793
12.279	12.229	274,0	27,4	26,4	1.027,0	1031,1	137.192	130.761
12.274	12.224	273,9	27,4	26,6	1.026,9	1030,9	137.134	130.708
12.270	12.221	273,8	27,4	26,6	1.026,7	1030,8	137.057	130.671
12.266	12.216	273,8	27,4	26,7	1.026,6	1030,7	137.014	130.624
12.263	12.213	273,7	27,4	26,6	1.026,6	1030,7	137.045	130.592
12.259	12.209	273,7	27,5	26,6	1.026,6	1030,7	137.024	130.551
12.256	12.206	273,6	27,5	26,4	1.026,4	1030,5	136.948	130.518
12.253	12.203	273,6	27,5	26,4	1.026,2	1030,3	136.865	130.482

Sinal Coletor μV (medido) 23/4/97	Sinal Coletor μV (corrigido)	Temp. Coletor $^{\circ}\text{C}$ -	Temp. Refer. $^{\circ}\text{C}$ -	Temp. Amb. $^{\circ}\text{C}$ -	Temp. Forno 1 $^{\circ}\text{C}$ (medida)	Temp. Forno 1 $^{\circ}\text{C}$ (corrigida)	Fluxo Radiativo Corpo Negro W.m^{-2} (Stefan - Boltzmann)	Fluxo Radiativo Corpo Negro W.m^{-2} (calibração)
12.250	12.201	273,5	27,4	26,5	1.026,1	1030,2	136.824	130.457
12.248	12.199	273,5	27,5	26,8	1.026,0	1030,1	136.789	130.436
12.244	12.194	273,4	27,5	26,8	1.025,9	1030,0	136.759	130.392
12.240	12.191	273,4	27,5	26,7	1.025,9	1030,0	136.750	130.350
12.237	12.187	273,3	27,5	26,6	1.025,8	1029,8	136.686	130.315
12.233	12.184	273,2	27,5	26,5	1.025,6	1029,7	136.633	130.279
12.230	12.180	273,1	27,4	26,5	1.025,5	1029,6	136.587	130.239
Sinal Coletor μV (medido) 23/4/97	Sinal Coletor μV (corrigido)	Temp. Coletor $^{\circ}\text{C}$ -	Temp. Refer. $^{\circ}\text{C}$ -	Temp. Amb. $^{\circ}\text{C}$ -	Temp. Forno 1 $^{\circ}\text{C}$ (medida)	Temp. Forno 1 $^{\circ}\text{C}$ (corrigida)	Fluxo Radiativo Corpo Negro W.m^{-2} (Stefan - Boltzmann)	Fluxo Radiativo Corpo Negro W.m^{-2} (calibração)
12.227	12.178	273,1	27,4	26,5	1.025,4	1029,5	136.539	130.215
12.223	12.174	273,0	27,4	26,6	1.025,3	1029,4	136.515	130.172
12.220	12.171	272,9	27,4	26,4	1.025,4	1029,4	136.522	130.136
12.217	12.167	272,9	27,3	26,2	1.025,3	1029,4	136.506	130.099
12.214	12.165	272,9	27,4	26,3	1.025,2	1029,2	136.443	130.075
12.210	12.160	272,8	27,4	26,4	1.025,0	1029,0	136.365	130.028
12.207	12.157	272,7	27,4	26,2	1.024,9	1029,0	136.337	129.993
12.203	12.154	272,7	27,4	25,9	1.024,8	1028,9	136.300	129.955
12.201	12.152	272,6	27,5	26,2	1.024,9	1028,9	136.324	129.934
12.199	12.150	272,6	27,5	26,3	1.024,9	1029,0	136.333	129.915
12.195	12.145	272,6	27,5	26,0	1.024,6	1028,7	136.233	129.865
12.192	12.143	272,5	27,4	25,9	1.024,5	1028,6	136.175	129.838
12.189	12.140	272,4	27,4	26,1	1.024,4	1028,5	136.134	129.810
12.187	12.138	272,4	27,4	26,2	1.024,3	1028,4	136.099	129.785
12.185	12.135	272,3	27,3	26,3	1.024,3	1028,3	136.076	129.759
12.181	12.132	272,2	27,3	26,4	1.024,2	1028,3	136.051	129.719
12.178	12.129	272,2	27,4	26,4	1.024,2	1028,3	136.052	129.690
12.175	12.126	272,2	27,4	26,6	1.024,2	1028,3	136.050	129.655
12.172	12.123	272,1	27,4	26,5	1.023,9	1028,0	135.950	129.626
12.169	12.120	272,0	27,3	26,4	1.023,8	1027,9	135.889	129.593
12.168	12.119	272,0	27,4	26,3	1.023,8	1027,9	135.889	129.587
12.165	12.116	272,0	27,4	26,1	1.023,8	1027,9	135.889	129.549
12.162	12.113	272,0	27,4	26,1	1.023,8	1027,9	135.892	129.518
12.160	12.111	271,9	27,4	26,3	1.023,7	1027,7	135.840	129.495
12.158	12.109	271,8	27,4	26,4	1.023,5	1027,6	135.770	129.476
12.156	12.107	271,8	27,3	26,6	1.023,4	1027,5	135.721	129.459
12.155	12.106	271,8	27,4	26,6	1.023,4	1027,5	135.735	129.447
12.152	12.103	271,8	27,5	26,8	1.023,3	1027,4	135.705	129.416
12.148	12.099	271,7	27,4	26,7	1.023,3	1027,4	135.683	129.374
12.146	12.097	271,7	27,5	26,7	1.023,2	1027,3	135.647	129.346
12.143	12.094	271,5	27,4	26,6	1.023,2	1027,3	135.649	129.313
12.140	12.091	271,5	27,4	26,3	1.023,0	1027,1	135.584	129.283
12.137	12.087	271,4	27,4	26,3	1.023,0	1027,1	135.567	129.248
12.134	12.085	271,4	27,3	26,4	1.022,9	1027,0	135.543	129.220
12.131	12.081	271,4	27,4	26,4	1.023,0	1027,0	135.548	129.184
12.128	12.079	271,3	27,4	26,6	1.023,0	1027,0	135.557	129.161
12.126	12.076	271,3	27,4	26,4	1.022,8	1026,9	135.492	129.130
12.124	12.075	271,3	27,4	26,2	1.022,7	1026,8	135.458	129.112
12.121	12.072	271,2	27,4	25,9	1.022,6	1026,7	135.418	129.077
12.118	12.069	271,1	27,3	25,9	1.022,5	1026,6	135.372	129.045
12.114	12.065	271,1	27,4	25,9	1.022,4	1026,4	135.318	129.012
12.112	12.063	271,0	27,3	26,0	1.022,4	1026,4	135.306	128.989
12.110	12.061	271,0	27,4	25,9	1.022,4	1026,5	135.325	128.961

Sinal Coletor μV (medido) 23/4/97	Sinal Coletor μV (corrigido)	Temp. Coletor $^{\circ}\text{C}$ -	Temp. Refer. $^{\circ}\text{C}$ -	Temp. Amb. $^{\circ}\text{C}$ -	Temp. Forno 1 $^{\circ}\text{C}$ (medida)	Temp. Forno 1 $^{\circ}\text{C}$ (corrigida)	Fluxo Radiativo Corpo Negro W.m^{-2} (Stefan - Boltzmann)	Fluxo Radiativo Corpo Negro W.m^{-2} (calibração)
12.107	12.058	270,9	27,4	25,8	1.022,3	1026,4	135.284	128.934
12.103	12.054	270,9	27,3	26,0	1.022,3	1026,3	135.268	128.892
12.102	12.053	270,8	27,4	26,1	1.022,1	1026,2	135.210	128.879
12.100	12.051	270,8	27,3	26,3	1.022,0	1026,0	135.155	128.853
12.097	12.048	270,7	27,3	26,2	1.022,1	1026,1	135.191	128.828
12.095	12.046	270,7	27,4	26,5	1.022,1	1026,1	135.198	128.806
12.092	12.043	270,6	27,3	26,4	1.022,0	1026,0	135.158	128.770
12.092	12.043	270,6	27,3	26,5	1.021,9	1025,9	135.113	128.768
12.088	12.039	270,5	27,3	26,3	1.021,7	1025,8	135.040	128.729
12.084	12.035	270,4	27,3	26,2	1.021,8	1025,9	135.083	128.691
12.084	12.035	270,5	27,4	26,1	1.021,7	1025,8	135.041	128.683
12.079	12.030	270,5	27,4	26,3	1.021,7	1025,8	135.043	128.636
12.077	12.028	270,4	27,4	26,2	1.021,6	1025,6	134.990	128.615
12.075	12.026	270,4	27,4	26,3	1.021,5	1025,6	134.969	128.590
12.073	12.024	270,4	27,4	26,4	1.021,4	1025,4	134.906	128.569
12.071	12.022	270,3	27,3	26,6	1.021,2	1025,2	134.829	128.545
12.068	12.019	270,2	27,3	26,7	1.021,1	1025,2	134.800	128.521
12.067	12.018	270,2	27,4	26,6	1.021,1	1025,2	134.799	128.507
12.064	12.015	270,2	27,4	26,5	1.021,2	1025,2	134.824	128.476
12.062	12.013	270,1	27,3	26,6	1.021,0	1025,1	134.777	128.453
12.061	12.012	270,1	27,3	26,6	1.021,0	1025,1	134.766	128.440
12.058	12.009	270,0	27,3	26,5	1.021,0	1025,0	134.749	128.412
12.055	12.006	269,9	27,3	26,5	1.020,9	1024,9	134.708	128.377
12.053	12.004	269,9	27,3	26,7	1.020,8	1024,9	134.690	128.356
12.051	12.002	269,9	27,4	26,8	1.020,8	1024,9	134.691	128.335
12.048	11.999	269,9	27,3	26,8	1.020,8	1024,8	134.675	128.301
12.046	11.998	269,8	27,3	26,5	1.020,7	1024,7	134.913	128.286

Sinal Coletor μV (medido) 23/4/97	Sinal Coletor μV (corrigido)	Temp. Coletor $^{\circ}\text{C}$ -	Temp. Refer. $^{\circ}\text{C}$ -	Temp. Amb. $^{\circ}\text{C}$ -	Temp. Forno 1 $^{\circ}\text{C}$ (medida)	Temp. Forno 1 $^{\circ}\text{C}$ (corrigida)	Fluxo Radiativo Corpo Negro W.m^{-2} (Stefan - Boltzmann)	Fluxo Radiativo Corpo Negro W.m^{-2} (calibração)
11.480	11.433	260,8	28,6	28,2	1.002,9	1006,8	127.602	122.251
11.479	11.433	260,7	28,6	28,2	1.002,8	1006,7	127.581	122.245
11.477	11.431	260,7	28,5	28,2	1.002,6	1006,6	127.518	122.223
11.475	11.429	260,6	28,5	28,1	1.002,6	1006,6	127.518	122.202
11.474	11.428	260,6	28,6	28,1	1.002,6	1006,6	127.517	122.193
11.471	11.425	260,6	28,5	28,2	1.002,7	1006,6	127.540	122.163
11.471	11.424	260,6	28,6	28,1	1.002,7	1006,6	127.529	122.157
11.469	11.422	260,6	28,6	28,3	1.002,7	1006,6	127.525	122.137
11.466	11.420	260,5	28,6	28,0	1.002,5	1006,4	127.475	122.108
11.465	11.418	260,5	28,6	28,0	1.002,4	1006,3	127.437	122.091
11.462	11.415	260,4	28,6	28,1	1.002,3	1006,2	127.398	122.061
11.460	11.413	260,4	28,5	28,2	1.002,2	1006,2	127.363	122.041
11.457	11.411	260,3	28,5	28,4	1.002,3	1006,2	127.369	122.014
11.456	11.410	260,3	28,5	28,3	1.002,2	1006,2	127.363	122.000

Sinal Coletor μV (medido) 23/04/97	Sinal Coletor μV (corrigido)	Temp. Coletor $^{\circ}C$ -	Temp. Refer. $^{\circ}C$ -	Temp. Amb. $^{\circ}C$ -	Temp. Forno2 $^{\circ}C$ (medida)	Temp. Forno 2 $^{\circ}C$ (corrigida)	Fluxo Radiativo Corpo Negro $W.m^{-2}$ (Stefan - Boltzmann)	Fluxo Radiativo Corpo Negro $W.m^{-2}$ (calibração)
8.158	8.125	200,0	28,5	27,6	884,0	887,2	87.351	86.880
8.155	8.122	200,0	28,5	27,5	883,7	886,9	87.275	86.848
8.153	8.120	200,0	28,5	27,3	883,8	886,9	87.284	86.825
8.148	8.115	199,9	28,5	27,3	883,7	886,8	87.254	86.775
8.146	8.113	199,8	28,6	27,3	883,6	886,8	87.250	86.749
8.144	8.111	199,8	28,6	27,3	883,6	886,8	87.237	86.727
8.142	8.109	199,8	28,6	27,6	883,6	886,8	87.238	86.703
8.140	8.107	199,8	28,7	27,7	883,5	886,7	87.209	86.683
8.138	8.105	199,8	28,6	27,7	883,4	886,5	87.171	86.660
8.137	8.104	199,7	28,5	27,6	883,4	886,5	87.167	86.656
8.136	8.103	199,7	28,6	27,7	883,3	886,5	87.150	86.645
8.135	8.102	199,8	28,7	27,6	883,3	886,5	87.150	86.636
8.133	8.100	199,7	28,6	27,5	883,3	886,5	87.151	86.615
8.133	8.100	199,6	28,6	27,8	883,2	886,3	87.109	86.613
8.132	8.099	199,6	28,6	27,8	883,1	886,3	87.091	86.601
8.131	8.099	199,6	28,6	27,9	883,2	886,3	87.109	86.595
8.131	8.098	199,6	28,6	27,7	883,1	886,3	87.092	86.586
8.129	8.096	199,5	28,6	27,8	883,0	886,2	87.075	86.569
8.129	8.096	199,5	28,6	27,8	883,0	886,2	87.067	86.569
8.126	8.093	199,5	28,6	27,7	883,0	886,2	87.064	86.536
8.125	8.093	199,4	28,5	27,8	882,9	886,0	87.022	86.531
8.125	8.092	199,4	28,6	27,9	882,7	885,9	86.976	86.524
8.123	8.090	199,4	28,5	27,8	882,6	885,8	86.954	86.502
8.121	8.088	199,4	28,6	27,8	882,7	885,8	86.967	86.484
8.121	8.088	199,4	28,7	27,9	882,6	885,8	86.959	86.479
8.120	8.087	199,4	28,6	27,7	882,5	885,7	86.930	86.472
8.119	8.086	199,3	28,6	27,9	882,5	885,7	86.917	86.463
8.117	8.084	199,3	28,6	27,9	882,5	885,6	86.905	86.443
8.114	8.081	199,3	28,6	28,0	882,4	885,6	86.888	86.411
8.114	8.081	199,3	28,6	27,9	882,3	885,5	86.863	86.411
8.113	8.080	199,3	28,7	27,7	882,3	885,5	86.859	86.402
8.112	8.079	199,3	28,6	27,8	882,3	885,5	86.859	86.388
8.112	8.079	199,3	28,7	28,0	882,3	885,5	86.855	86.384
8.109	8.076	199,2	28,6	27,8	882,2	885,4	86.830	86.355
8.108	8.075	199,2	28,6	27,7	882,2	885,4	86.826	86.344
8.108	8.075	199,1	28,6	27,8	882,1	885,3	86.801	86.341
8.105	8.072	199,1	28,6	27,7	882,0	885,2	86.772	86.314
8.104	8.071	199,2	28,7	27,9	882,0	885,1	86.759	86.298
8.104	8.071	199,1	28,7	27,7	881,9	885,1	86.743	86.298
8.103	8.070	199,1	28,7	27,5	881,9	885,0	86.730	86.288
8.102	8.069	199,1	28,7	27,3	881,9	885,0	86.730	86.279
8.100	8.068	199,1	28,7	27,4	881,9	885,0	86.730	86.265
8.098	8.065	199,1	28,7	27,7	881,8	885,0	86.709	86.241
8.097	8.064	199,0	28,7	27,9	881,8	884,9	86.701	86.227
8.096	8.063	199,0	28,7	27,9	881,8	884,9	86.700	86.215

Sinal Coletor μV (medido) 23/4/97	Sinal Coletor μV (corrigido)	Temp. Coletor $^{\circ}C$ -	Temp. Refer. $^{\circ}C$ -	Temp. Amb. $^{\circ}C$ -	Temp. Forno2 $^{\circ}C$ (medida)	Temp. Forno 2 $^{\circ}C$ (corrigida)	Fluxo Radiativo Corpo Negro $W.m^{-2}$ (Stefan - Boltzmann)	Fluxo Radiativo Corpo Negro $W.m^{-2}$ (calibração)
8.094	8.061	199,0	28,7	27,9	881,8	885,0	86.714	86.196
8.092	8.060	198,9	28,7	28,0	881,7	884,9	86.686	86.180
8.093	8.060	198,9	28,7	27,9	881,5	884,6	86.615	86.186
8.092	8.059	198,8	28,6	27,9	881,3	884,5	86.580	86.175
8.091	8.058	198,9	28,6	27,9	881,4	884,6	86.596	86.161
8.088	8.055	198,9	28,7	27,8	881,5	884,7	86.626	86.133
8.087	8.054	198,8	28,7	27,4	881,5	884,7	86.627	86.119
8.086	8.053	198,8	28,7	27,4	881,4	884,5	86.585	86.108
8.085	8.052	198,8	28,7	27,6	881,3	884,5	86.568	86.101
8.083	8.050	198,8	28,7	27,6	881,3	884,5	86.568	86.075
8.081	8.049	198,7	28,6	27,7	881,3	884,5	86.569	86.063
8.080	8.047	198,6	28,6	27,9	881,2	884,4	86.540	86.047
8.078	8.046	198,7	28,7	27,9	881,1	884,3	86.515	86.029
8.077	8.044	198,6	28,6	27,8	881,0	884,2	86.494	86.015
8.075	8.043	198,5	28,6	27,8	881,0	884,2	86.487	85.999
8.075	8.042	198,5	28,6	27,9	880,9	884,0	86.441	85.993
8.075	8.042	198,5	28,6	27,7	880,7	883,9	86.406	85.994
8.074	8.041	198,5	28,6	27,6	880,8	884,0	86.427	85.982
8.072	8.039	198,5	28,6	27,6	880,8	884,0	86.435	85.961
8.069	8.037	198,5	28,7	27,7	880,8	884,0	86.436	85.935
8.068	8.035	198,4	28,6	27,7	880,8	883,9	86.412	85.920
8.066	8.033	198,3	28,6	27,7	880,6	883,7	86.353	85.898
8.064	8.032	198,4	28,6	27,8	880,5	883,7	86.348	85.880
8.064	8.031	198,3	28,6	27,9	880,6	883,7	86.361	85.874
8.062	8.030	198,3	28,6	27,7	880,6	883,8	86.366	85.860
8.061	8.028	198,3	28,7	27,8	880,5	883,7	86.345	85.843
8.060	8.027	198,3	28,6	27,8	880,4	883,6	86.315	85.834
8.059	8.027	198,3	28,7	27,9	880,4	883,6	86.311	85.827
8.058	8.025	198,3	28,6	27,9	880,4	883,5	87.576	85.813

Sinal Coletor μV (medido) 23/4/97	Sinal Coletor μV (corrigido)	Temp. Coletor $^{\circ}C$ -	Temp. Refer. $^{\circ}C$ -	Temp. Amb. $^{\circ}C$ -	Temp. Forno 3 $^{\circ}C$ (medida)	Temp. Forno 3 $^{\circ}C$ (corrigida)	Fluxo Radiativo Corpo Negro $W.m^{-2}$ (Stefan - Boltzmann)	Fluxo Radiativo Corpo Negro $W.m^{-2}$ (calibração)
5.102	5.082	141,8	30,0	26,0	742,5	748,3	53.259	54.336
5.102	5.081	141,8	30,1	26,1	742,5	748,2	53.241	54.335
5.100	5.080	141,8	30,0	26,1	742,4	748,2	53.230	54.314
5.100	5.079	141,7	30,0	26,1	742,3	748,1	53.212	54.309
5.100	5.079	141,7	30,0	26,0	742,3	748,0	53.203	54.308
5.099	5.079	141,7	30,0	26,2	742,3	748,0	53.200	54.303
5.098	5.077	141,7	29,9	26,2	742,2	747,9	53.185	54.291
5.098	5.077	141,7	30,0	26,1	742,1	747,9	53.170	54.288
5.096	5.075	141,7	30,0	26,2	742,1	747,8	53.164	54.269
5.096	5.075	141,7	30,0	26,2	742,1	747,8	53.159	54.269
5.097	5.077	141,7	30,0	26,1	741,9	747,6	53.117	54.282
5.094	5.074	141,6	29,9	26,0	741,8	747,6	53.106	54.251
5.093	5.072	141,6	29,9	25,9	741,7	747,5	53.088	54.238
5.093	5.073	141,6	30,0	26,1	741,7	747,5	53.091	54.242
5.093	5.072	141,6	30,1	26,1	741,7	747,5	53.090	54.238
5.092	5.072	141,6	30,1	26,1	741,8	747,5	53.097	54.230
5.091	5.070	141,5	30,0	26,0	741,7	747,5	53.085	54.215

Sinal Coletor μV (medido) 26/4/97	Sinal Coletor μV (corrigido)	Temp. Coletor $^{\circ}\text{C}$ -	Temp. Refer. $^{\circ}\text{C}$ -	Temp. Amb. $^{\circ}\text{C}$ -	Temp. Forno 1 $^{\circ}\text{C}$ (medida)	Temp. Forno 1 $^{\circ}\text{C}$ (corrigida)	Fluxo Radiativo Corpo Negro W.m^{-2} (Stefan - Boltzmann)	Fluxo Radiativo Corpo Negro W.m^{-2} (calibração)
13.514	13.459	297,9	30,8	28,8	1.076,7	1081,2	158.566	143.918
13.500	13.445	297,6	30,8	28,9	1.076,4	1080,8	158.407	143.767
13.482	13.428	297,3	30,8	29,0	1.075,9	1080,3	158.203	143.578
13.466	13.411	297,0	30,8	28,7	1.075,6	1080,0	158.051	143.405
13.458	13.404	296,9	30,7	28,6	1.075,1	1079,6	157.843	143.321
13.449	13.394	296,7	30,7	28,5	1.075,0	1079,4	157.780	143.221
13.441	13.387	296,6	30,7	28,5	1.074,8	1079,2	157.701	143.138
13.434	13.380	296,4	30,7	29,0	1.074,5	1079,0	157.584	143.069
13.425	13.371	296,3	30,8	28,9	1.074,5	1078,9	157.542	142.974
Sinal Coletor μV (medido) 26/4/97	Sinal Coletor μV (corrigido)	Temp. Coletor $^{\circ}\text{C}$ -	Temp. Refer. $^{\circ}\text{C}$ -	Temp. Amb. $^{\circ}\text{C}$ -	Temp. Forno 2 $^{\circ}\text{C}$ (medida)	Temp. Forno 2 $^{\circ}\text{C}$ (corrigida)	Fluxo Radiativo Corpo Negro W.m^{-2} (Stefan - Boltzmann)	Fluxo Radiativo Corpo Negro W.m^{-2} (calibração)
9.384	9.346	222,7	28,4	28,2	934,6	937,8	103.062	99.933
9.370	9.332	222,5	28,5	28,2	934,0	937,3	102.873	99.786
9.367	9.329	222,5	28,5	28,3	933,9	937,2	102.853	99.756
9.365	9.327	222,5	28,6	28,3	933,9	937,1	102.832	99.733
9.359	9.321	222,4	28,6	28,2	933,6	936,9	102.754	99.670
9.355	9.317	222,3	28,6	28,1	933,6	936,9	102.738	99.625
9.351	9.313	222,3	28,6	28,4	933,4	936,7	102.679	99.578
9.348	9.310	222,2	28,6	28,3	933,3	936,6	102.647	99.549
9.344	9.306	222,1	28,6	28,2	933,1	936,4	102.590	99.503
9.340	9.302	222,0	28,6	27,9	933,1	936,3	102.568	99.464
9.337	9.299	222,0	28,6	28,0	933,0	936,3	102.545	99.434
9.332	9.295	221,8	28,5	28,1	932,7	936,0	102.440	99.385
9.328	9.290	221,8	28,5	28,2	932,5	935,8	103.679	99.338
Sinal Coletor μV (medido) 26/4/97	Sinal Coletor μV (corrigido)	Temp. Coletor $^{\circ}\text{C}$ -	Temp. Refer. $^{\circ}\text{C}$ -	Temp. Amb. $^{\circ}\text{C}$ -	Temp. Forno 3 $^{\circ}\text{C}$ (medida)	Temp. Forno 3 $^{\circ}\text{C}$ (corrigida)	Fluxo Radiativo Corpo Negro W.m^{-2} (Stefan - Boltzmann)	Fluxo Radiativo Corpo Negro W.m^{-2} (calibração)
6.525	6.499	168,9	28,7	28,0	814,5	821,6	69.714	69.489
6.520	6.494	168,8	28,6	27,9	814,2	821,2	69.617	69.434
6.515	6.489	168,7	28,6	27,7	813,9	820,9	69.542	69.384
6.511	6.484	168,6	28,6	27,7	813,7	820,7	69.507	69.334
6.507	6.480	168,5	28,6	28,0	813,6	820,7	69.487	69.291
6.503	6.477	168,4	28,5	27,8	813,4	820,4	69.429	69.252
6.500	6.474	168,4	28,6	28,1	813,2	820,2	69.383	69.220
6.496	6.470	168,4	28,6	28,4	813,1	820,1	69.360	69.178
6.491	6.465	168,2	28,6	28,3	812,9	819,9	69.299	69.126
6.487	6.461	168,1	28,6	28,5	812,8	819,8	69.276	69.085
6.482	6.456	168,1	28,6	28,5	812,7	819,7	69.261	69.032
6.478	6.451	168,0	28,6	28,2	812,6	819,6	69.222	68.984
6.477	6.451	168,0	28,6	28,0	812,5	819,5	69.195	68.977
6.472	6.446	167,9	28,6	28,0	812,2	819,2	69.127	68.921
6.470	6.444	167,8	28,7	28,0	812,2	819,2	69.124	68.903
6.465	6.439	167,8	28,7	28,0	812,0	819,0	69.086	68.847
6.460	6.434	167,7	28,7	27,8	811,8	818,8	69.035	68.797

Sinal Coletor μV (medido) 28/4/97	Sinal Coletor μV (corrigido)	Temp. Coletor $^{\circ}\text{C}$ -	Temp. Refer. $^{\circ}\text{C}$ -	Temp. Amb. $^{\circ}\text{C}$ -	Temp. Forno 1 $^{\circ}\text{C}$ (medida)	Temp. Forno 1 $^{\circ}\text{C}$ (corrigida)	Fluxo Radiativo Corpo Negro W.m^{-2} (Stefan - Boltzmann)	Fluxo Radiativo Corpo Negro W.m^{-2} (calibração)
14.339	14.281	312,1	30,8	25,2	1.103,4	1108,0	170.974	152.706
14.306	14.248	311,4	30,6	25,0	1.102,4	1107,1	170.531	152.352
14.272	14.214	310,8	30,6	25,1	1.101,6	1106,3	170.157	151.988
14.244	14.186	310,3	30,5	25,0	1.101,0	1105,6	169.824	151.688
14.219	14.161	309,8	30,4	24,6	1.100,3	1104,9	169.497	151.423
14.214	14.156	309,7	30,4	24,4	1.100,2	1104,8	169.444	151.368
14.209	14.151	309,6	30,4	24,5	1.100,0	1104,6	169.368	151.318
14.203	14.146	309,5	30,4	24,6	1.099,9	1104,5	169.307	151.258
14.198	14.141	309,4	30,4	24,7	1.099,8	1104,4	169.254	151.204
14.192	14.135	309,2	30,4	25,0	1.099,6	1104,2	169.555	151.140
13.476	13.422	297,9	31,9	31,0	1.080,7	1085,2	160.374	143.513
13.463	13.409	297,6	31,9	30,9	1.080,2	1084,7	160.166	143.374
13.452	13.397	297,4	31,9	31,1	1.080,0	1084,4	160.047	143.253
13.440	13.386	297,2	31,8	30,9	1.079,5	1084,0	159.846	143.128
13.420	13.366	297,1	32,1	31,0	1.079,2	1083,7	159.723	142.920
13.401	13.347	296,9	32,3	31,4	1.078,7	1083,2	159.484	142.717
13.391	13.337	296,8	32,4	31,3	1.078,4	1082,9	159.344	142.611
13.383	13.329	296,7	32,4	31,2	1.078,0	1082,5	159.170	142.524
13.380	13.326	296,5	32,3	31,1	1.077,6	1082,1	159.122	142.488
13.151	13.097	291,4	30,7	30,8	1.070,4	1074,8	155.710	140.046
13.142	13.089	291,2	30,7	30,9	1.070,1	1074,5	155.577	139.955
13.130	13.077	291,1	30,7	31,2	1.069,9	1074,3	155.516	139.827
13.124	13.071	290,9	30,7	31,2	1.069,6	1074,0	155.386	139.761
13.119	13.066	290,8	30,6	31,1	1.069,3	1073,7	155.247	139.707
13.111	13.058	290,6	30,6	30,8	1.069,1	1073,5	155.134	139.621
13.102	13.049	290,6	30,7	31,0	1.069,0	1073,4	155.104	139.525
13.094	13.041	290,5	30,8	31,0	1.068,7	1073,1	154.983	139.445
13.088	13.035	290,3	30,7	31,1	1.068,5	1072,9	154.877	139.379
13.083	13.030	290,2	30,7	31,2	1.068,5	1072,9	154.870	139.326
13.077	13.024	290,1	30,6	31,4	1.068,3	1072,7	154.780	139.266
13.071	13.018	290,0	30,6	31,2	1.068,1	1072,5	154.698	139.195

Sinal Coletor μV (medido) 28/4/97	Sinal Coletor μV (corrigido)	Temp. Coletor $^{\circ}\text{C}$ -	Temp. Refer. $^{\circ}\text{C}$ -	Temp. Amb. $^{\circ}\text{C}$ -	Temp. Forno 2 $^{\circ}\text{C}$ (medida)	Temp. Forno 2 $^{\circ}\text{C}$ (corrigida)	Fluxo Radiativo Corpo Negro W.m^{-2} (Stefan - Boltzmann)	Fluxo Radiativo Corpo Negro W.m^{-2} (calibração)
9.993	9.953	235,7	31,1	30,8	960,0	963,3	111.688	106.422
9.989	9.949	235,7	31,1	30,6	959,8	963,2	111.639	106.379
9.988	9.947	235,5	30,9	30,4	959,5	962,8	111.525	106.362
9.981	9.941	235,4	31,0	30,5	959,2	962,6	111.431	106.296
9.977	9.936	235,2	30,9	30,5	958,8	962,1	111.264	106.244
9.970	9.930	235,1	30,8	30,5	958,4	961,7	111.128	106.176
9.963	9.923	234,9	30,7	30,6	958,2	961,5	111.060	106.101
9.958	9.917	234,8	30,8	30,7	957,8	961,1	110.930	106.043
9.951	9.911	234,6	30,7	30,7	957,5	960,9	110.840	105.972
9.943	9.903	234,5	30,7	30,8	957,2	960,6	110.731	105.888
9.937	9.896	234,4	30,6	30,7	957,1	960,4	110.682	105.820
9.929	9.888	234,2	30,6	30,5	956,8	960,1	110.589	105.733
9.920	9.880	234,0	30,5	30,5	956,5	959,8	110.482	105.647
9.911	9.871	233,8	30,7	30,4	956,3	959,6	110.395	105.545
9.901	9.861	233,7	30,6	30,4	955,9	959,2	110.273	105.438

Sinal Coletor μV (medido) 28/4/97	Sinal Coletor μV (corrigido)	Temp. Coletor $^{\circ}\text{C}$ -	Temp. Refer. $^{\circ}\text{C}$ -	Temp. Amb. $^{\circ}\text{C}$ -	Temp. Forno 3 $^{\circ}\text{C}$ (medida)	Temp. Forno 3 $^{\circ}\text{C}$ (corrigida)	Fluxo Radiativo Corpo Negro W.m^{-2} (Stefan - Boltzmann)	Fluxo Radiativo Corpo Negro W.m^{-2} (calibração)
6.752	6.725	174,1	29,9	30,5	820,9	828,0	71.326	71.909
6.748	6.721	173,9	29,8	30,4	820,7	827,9	71.280	71.862
6.744	6.716	173,8	29,8	30,2	820,6	827,7	71.245	71.817
6.740	6.712	173,7	29,7	30,1	820,4	827,5	71.196	71.772
6.734	6.707	173,6	29,7	30,4	820,2	827,3	71.137	71.715
6.731	6.704	173,5	29,7	30,3	820,1	827,2	71.109	71.679
6.727	6.699	173,5	29,8	30,6	819,9	827,0	71.061	71.634
6.723	6.696	173,3	29,6	30,4	819,7	826,8	71.022	71.595
6.719	6.692	173,3	29,6	30,4	819,6	826,7	71.002	71.555
6.715	6.688	173,1	29,6	30,5	819,5	826,6	70.974	71.513
6.711	6.684	173,0	29,6	30,3	819,3	826,4	70.926	71.468
6.707	6.680	172,9	29,5	29,8	819,1	826,2	70.875	71.426
6.703	6.676	172,8	29,5	29,9	818,9	826,0	70.819	71.383
6.698	6.671	172,7	29,4	30,0	818,7	825,8	70.775	71.334
6.696	6.669	172,7	29,5	30,1	818,7	825,8	70.757	71.309
6.692	6.665	172,6	29,5	30,2	818,6	825,6	70.728	71.267
6.687	6.660	172,5	29,5	30,2	818,2	825,3	70.644	71.216
6.684	6.657	172,4	29,4	30,1	818,0	825,1	70.591	71.176
6.680	6.653	172,3	29,5	29,9	818,0	825,1	70.587	71.142
6.677	6.650	172,3	29,5	29,9	817,9	825,0	70.561	71.109
6.673	6.646	172,2	29,5	29,9	817,8	824,9	70.547	71.061
6.670	6.643	172,1	29,4	30,1	817,7	824,7	70.501	71.033
6.666	6.639	172,1	29,5	30,2	817,5	824,6	70.471	70.987
6.663	6.636	172,0	29,4	30,3	817,3	824,4	70.418	70.955
6.660	6.633	171,9	29,4	30,2	817,1	824,2	70.415	70.922

Sinal Coletor μV (medido) 29/4/97	Sinal Coletor μV (corrigido)	Temp. Coletor $^{\circ}\text{C}$ -	Temp. Refer. $^{\circ}\text{C}$ -	Temp. Amb. $^{\circ}\text{C}$ -	Temp. Forno 3 $^{\circ}\text{C}$ (medida)	Temp. Forno 3 $^{\circ}\text{C}$ (corrigida)	Fluxo Radiativo Corpo Negro W.m^{-2} (Stefan - Boltzmann)	Fluxo Radiativo Corpo Negro W.m^{-2} (calibração)
6.628	6.601	172,8	31,2	28,0	810,8	817,7	68.766	70.584
6.627	6.600	172,7	31,2	28,2	810,7	817,7	68.751	70.574
6.625	6.598	172,6	31,1	28,1	810,6	817,6	68.738	70.552
6.623	6.596	172,6	31,1	27,4	810,5	817,4	68.692	70.533
6.621	6.594	172,5	31,1	27,6	810,3	817,3	68.656	70.511
6.618	6.591	172,5	31,0	27,7	810,2	817,2	68.630	70.473
6.616	6.589	172,4	31,0	27,6	810,2	817,1	68.620	70.452
6.615	6.588	172,4	31,0	27,8	810,1	817,1	68.602	70.441
6.612	6.585	172,3	31,0	27,7	810,0	817,0	68.587	70.411
6.609	6.582	172,3	31,1	27,8	810,1	817,0	68.600	70.384
6.607	6.580	172,3	31,1	27,8	809,9	816,8	68.550	70.359
6.604	6.577	172,2	31,1	27,9	809,7	816,7	68.514	70.329
6.602	6.575	172,2	31,1	27,7	809,6	816,5	68.467	70.304
6.599	6.572	172,2	31,1	27,7	809,6	816,5	68.468	70.276
6.598	6.571	172,1	31,1	27,8	809,5	816,4	68.443	70.266
6.597	6.570	172,1	31,1	27,8	809,3	816,3	68.407	70.256
6.594	6.568	172,0	31,0	27,9	809,2	816,2	68.382	70.227
6.593	6.566	171,9	31,0	27,9	809,2	816,1	68.372	70.207
6.590	6.563	171,8	30,9	27,7	809,1	816,0	68.354	70.181
6.588	6.561	171,8	30,9	28,1	809,0	816,0	68.336	70.160
6.586	6.559	171,8	31,0	28,2	808,9	815,9	68.315	70.139
6.583	6.556	171,7	30,9	27,9	808,8	815,8	68.289	70.104
6.583	6.556	171,8	31,0	27,9	808,9	815,8	68.305	70.105
6.582	6.555	171,7	31,0	28,1	808,8	815,7	68.270	70.090
6.579	6.553	171,6	30,9	28,0	808,5	815,5	68.212	70.066

Sinal Coletor μV (medido) 29/04/97	Sinal Coletor μV (corrigido)	Temp. Coletor $^{\circ}C$ -	Temp. Refer. $^{\circ}C$ -	Temp. Amb. $^{\circ}C$ -	Temp. Forno2 $^{\circ}C$ (medida)	Temp. Forno 2 $^{\circ}C$ (corrigida)	Fluxo Radiativo Corpo Negro $W.m^{-2}$ (Stefan - Boltzmann)	Fluxo Radiativo Corpo Negro $W.m^{-2}$ (calibração)
9.473	9.435	227,8	33,1	28,8	937,8	941,1	104.143	100.884
9.470	9.432	227,7	33,1	29,0	937,8	941,1	104.130	100.849
9.466	9.428	227,6	33,1	28,9	937,7	941,0	104.105	100.811
9.463	9.424	227,6	33,2	28,9	937,7	941,0	104.097	100.771
9.459	9.421	227,5	33,1	28,8	937,6	940,9	104.063	100.736
9.455	9.417	227,4	33,0	28,9	937,5	940,8	104.031	100.690
9.452	9.413	227,3	33,0	29,0	937,4	940,6	103.980	100.653
9.448	9.410	227,2	32,9	29,0	937,3	940,5	103.950	100.620
9.445	9.407	227,1	32,9	28,9	937,1	940,4	103.911	100.588
9.442	9.404	227,0	32,9	29,0	937,1	940,4	103.893	100.550
9.438	9.399	226,9	32,9	29,2	937,0	940,3	103.864	100.505
9.435	9.397	226,9	32,9	29,2	936,9	940,2	103.838	100.479
9.431	9.393	226,8	32,9	29,1	936,7	939,9	103.751	100.435
9.427	9.389	226,7	32,8	29,0	936,6	939,9	103.728	100.394
9.424	9.386	226,6	32,7	29,1	936,4	939,7	103.678	100.365
9.422	9.384	226,6	32,8	29,0	936,5	939,8	103.699	100.337
9.418	9.379	226,5	32,7	29,1	936,4	939,6	103.652	100.292
9.413	9.375	226,4	32,7	29,3	936,2	939,5	103.606	100.245
9.409	9.371	226,2	32,6	29,2	935,9	939,2	103.511	100.197
9.406	9.368	226,2	32,6	28,9	935,9	939,1	103.487	100.164
9.402	9.364	226,1	32,6	28,9	935,8	939,1	103.474	100.122
9.398	9.360	226,0	32,6	28,7	935,7	939,0	103.445	100.082
9.397	9.359	226,0	32,6	28,7	935,7	938,9	103.418	100.073
9.391	9.352	225,9	32,6	28,6	935,6	938,8	103.384	100.003

Sinal Coletor μV (medido) 29/4/97	Sinal Coletor μV (corrigido)	Temp. Coletor $^{\circ}C$ -	Temp. Refer. $^{\circ}C$ -	Temp. Amb. $^{\circ}C$ -	Temp. Forno 1 $^{\circ}C$ (medida)	Temp. Forno 1 $^{\circ}C$ (corrigida)	Fluxo Radiativo Corpo Negro $W.m^{-2}$ (Stefan - Boltzmann)	Fluxo Radiativo Corpo Negro $W.m^{-2}$ (calibração)
12.237	12.187	278,8	35,2	29,8	1.039,7	1043,9	142.450	130.315
12.215	12.166	278,3	35,1	30,2	1.039,0	1043,2	142.159	130.085
12.211	12.162	278,3	35,1	30,3	1.039,0	1043,1	142.131	130.041
12.208	12.159	278,1	35,1	30,5	1.038,8	1043,0	142.063	130.008
12.203	12.153	278,1	35,1	30,6	1.038,7	1042,8	142.006	129.952
12.199	12.149	278,0	35,1	30,6	1.038,7	1042,9	142.022	129.908
12.196	12.146	277,9	35,0	30,3	1.038,6	1042,7	141.965	129.875
12.192	12.142	277,8	34,9	30,2	1.038,6	1042,7	141.960	129.832
12.189	12.139	277,7	34,9	30,2	1.038,4	1042,5	141.882	129.801
12.184	12.135	277,6	34,9	29,8	1.038,1	1042,3	141.769	129.757
12.180	12.131	277,5	34,9	29,5	1.038,1	1042,3	141.770	129.714
12.176	12.127	277,5	34,9	29,7	1.038,1	1042,2	141.751	129.671
12.173	12.124	277,4	34,9	29,9	1.037,8	1042,0	141.662	129.635
12.169	12.120	277,3	34,9	30,1	1.037,7	1041,9	141.622	129.596
12.166	12.117	277,3	34,9	30,2	1.037,6	1041,7	141.543	129.560

ANEXO B - ANÁLISE DE INCERTEZAS

Neste anexo é apresentada a análise de incertezas da calibração realizada. É calculada a incerteza do fluxo radiativo e a incerteza da sensibilidade do radiômetro.

a) Cálculo da incerteza do fluxo radiativo medido

A equação obtida na calibração foi do seguinte tipo:

$$\Phi(E) = a.E \quad (\text{B.1})$$

onde Φ é o fluxo radiativo total hemisférico (W.m^{-2}), a uma constante e E o sinal do instrumento (μV). A incerteza em Φ (u_{Φ}) é dada por:

$$u_{\Phi}^2 = \left(\frac{\partial\Phi}{\partial a}\right)^2 u_a^2 + \left(\frac{\partial\Phi}{\partial E}\right)^2 u_E^2 \quad (\text{B.2})$$

Derivando B.2 tem-se:

$$u_{\Phi}^2 = E^2 u_a^2 + a^2 u_E^2 \quad (\text{B.3})$$

O cálculo de u_a é realizado através da equação

$$a = \frac{\Phi}{E} = \frac{\epsilon_0 \cdot \sigma \cdot T^4}{E} \quad (\text{B.4})$$

onde Φ é o fluxo radiativo total hemisférico, ε_0 é a emissividade total hemisférica da fonte, T a sua temperatura termodinâmica e σ a constante de Stefan-Boltzmann.

A incerteza em α , então, é:

$$u_a^2 = \left(\frac{\sigma T^4}{E}\right)^2 \cdot u_{\varepsilon_0}^2 + \left(\frac{\varepsilon_0 T^4}{E}\right)^2 \cdot u_{\sigma}^2 + \left(\frac{4 \varepsilon_0 \sigma T^3}{E}\right)^2 \cdot u_T^2 + \left(\frac{-\varepsilon_0 \sigma T^4}{E^2}\right)^2 \cdot u_E^2 \quad (\text{B.5})$$

Substituindo a equação B.5 na equação B.3 e dividindo por Φ , tem-se a incerteza percentual de Φ :

$$\left(\frac{u_{\Phi}}{\Phi}\right)^2 = \left(\frac{u_{\varepsilon_0}}{\varepsilon_0}\right)^2 + \left(\frac{u_{\sigma}}{\sigma}\right)^2 + \left(\frac{4 u_T}{T}\right)^2 + 2 \left(\frac{u_E}{E}\right)^2 \quad (\text{B.6})$$

A seguir é apresentado o cálculo de cada uma das incertezas da equação B.6.

Incerteza na emissividade da fonte

A emissividade aparente da fonte, ε_0 , é dada pela equação 2.4 para uma dada emissividade real, ε , de suas paredes. Como as paredes internas da fonte são constituídas por refratário aluminoso (93% de alumina, Al_2O_3) a sua emissividade real foi aproximada pela da alumina. Na literatura pesquisada (TOULOUKIAN,1970; INCROPERA,1990; ROHSENOW,1985) há somente dados sobre a emissividade total normal e, como não há expressão analítica da dependência da emissividade com o ângulo azimutal, os dados da literatura foram aproximados para a emissividade total hemisférica.

Segundo SPARROW e CESS (1966) para materiais não condutores elétricos o valor hemisférico pode ser até 5% menor do que o valor normal. INCROPERA (1990) também afirma que a razão entre a emissividade total hemisférica e a normal está entre 0,95 e 1,0. Para o cálculo da emissividade total hemisférica foi adotada a relação $\frac{\epsilon_h}{\epsilon_n} = 0,98$, dada por JAKOB (1949), onde ϵ_h é a emissividade total hemisférica, e ϵ_n a emissividade total normal. Todos os cálculos foram baseados na tabela B1.

TABELA B1 : VARIAÇÃO DA EMISSIVIDADE DA ALUMINA COM A
TEMPERATURA

Temperatura (K)	Emissividade real (total normal)	Referência
400	0,78	Rohsenow (1985)
600	0,69	"
800	0,61	"
1000	0,54	"
1200	0,49	"
1400	0,42	"
600	0,69	Incropera (1990)
1000	0,55	"
1500	0,41	"
400	0,75	Touloukian (1970)
500	0,74	"
600	0,71	"
700	0,66	"
800	0,61	"
900	0,56	"
1000	0,52	"
1100	0,48	"
1200	0,46	"
1300	0,44	"
1400	0,43	"

Pode ser verificado pela figura B1 que há uma forte dependência da emissividade da alumina com a temperatura e não é possível trabalhar como se ela fosse constante.

Variação da emissividade da alumina com a temperatura

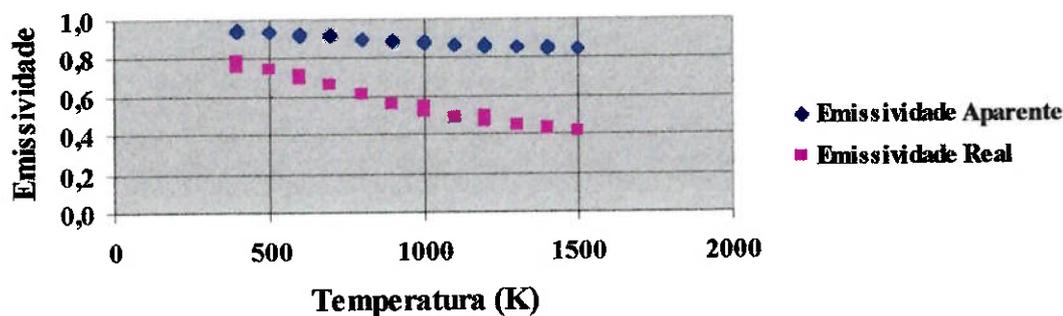


Figura B1- Variação da emissividade aparente e real da alumina com a temperatura

TOULOUKIAN (1970) apresenta seus dados com incertezas de 20% enquanto que SILVA FILHO (1998) afirma que em medidas de emissividade total hemisférica de óxidos, realizadas em laboratório, pelo método do balanço térmico, essas incertezas podem chegar a 25%. A análise de incertezas foi realizada nessas hipóteses e aproximações pois uma determinação mais exata das incertezas na emissividade real da fonte de calibração envolveria medições diretas do material utilizado, o que está fora do escopo deste trabalho.

Trabalhando com os dados da Tabela B1 e aplicando-os na equação 2.4 é possível estimar quantitativamente uma incerteza no parâmetro ϵ_0 . Através de regressão linear foi obtida uma relação entre a emissividade aparente da fonte e sua temperatura.

A relação encontrada foi:

$$\varepsilon_0 = -9,4336 \cdot 10^{-5} \cdot T + 0,97833 \quad (\text{B.7})$$

A incerteza na emissividade aparente foi calculada expandindo a equação 2.4 :

$$u_{\varepsilon_0}^2 = \left(\frac{\partial \varepsilon_0}{\partial \varepsilon} \right)^2 \cdot u_{\varepsilon}^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon_0}{\partial A} \right)^2 \cdot u_A^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon_0}{\partial z} \right)^2 \cdot u_z^2 \quad (\text{B.8})$$

onde $A = \frac{S}{S}$ e $z = \text{sen } \theta$ foram mudanças de variáveis realizadas para facilitar a derivação da expressão. Assim tem-se que

$$u_A^2 = \left(\frac{2 \cdot R}{L^2} \right)^2 \cdot u_R^2 + \left(\frac{-2 \cdot R^2}{L^3} \right)^2 \cdot u_L^2 \quad (\text{B.9})$$

e que

$$u_z^2 = \left(\frac{2}{L} \right)^2 \cdot u_R^2 + \left(\frac{-2 \cdot R}{L^2} \right)^2 \cdot u_L^2 \quad (\text{B.10})$$

As incertezas em R (u_R) e L (u_L) foram estimadas, respectivamente, em 1 e 3 mm. Admitindo uma incerteza em u_{ε} de 25% obtém-se a incerteza média de ε_0 :

$$u_{\varepsilon_0} = 6,2\%$$

Incerteza na constante de Stefan-Boltzmann

A incerteza na constante de Stefan-Boltzmann foi encontrada na literatura (NIST, 1998)

$$\sigma = 5,67396 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4} \quad \text{e} \quad u_{\sigma} = 0,000039 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

Incerteza na medição da temperatura da fonte

A medição da temperatura das fontes (fornos 1, 2 e 3) foi realizada com três termopares tipo K. Foi obtida uma correlação entre os valores resultantes da calibração dos termopares, em μV , e os valores do padrão do laboratório. Foi utilizado um polinômio (QUINN, 1990) para interpolar os valores dos pontos de calibração sendo válido para temperaturas entre 200 e 1200 °C. Foi obtida, então, uma equação, para cada termopar, que correlaciona a temperatura medida pelo termopar (T_{med}) e a temperatura corrigida (T_{corr}) através da calibração. A incerteza total da calibração declarada pelo laboratório foi de 1,8 °C (95%).

As equações de correlação entre as temperaturas medidas e as temperaturas corrigidas e seus respectivos gráficos são:

$$\text{Forno 1:} \quad T_{corr} = 1,0071 \cdot T_{med} - 3,2331 \quad (\text{B.11})$$

Correlação entre Temperatura do Forno 1 e sua Correção

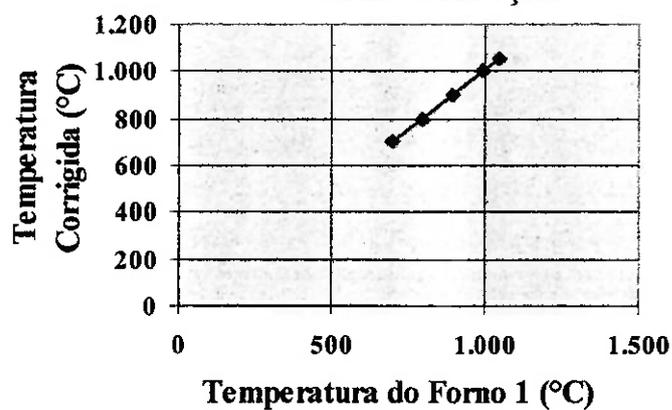


Figura B2: Curva de correlação do termopar do forno 1.

$$\text{Forno 2: } T_{corr} = 1,0021.T_{med} + 1,3182 \quad (\text{B.12})$$

Correlação Temperatura do Forno 2 e sua Correção

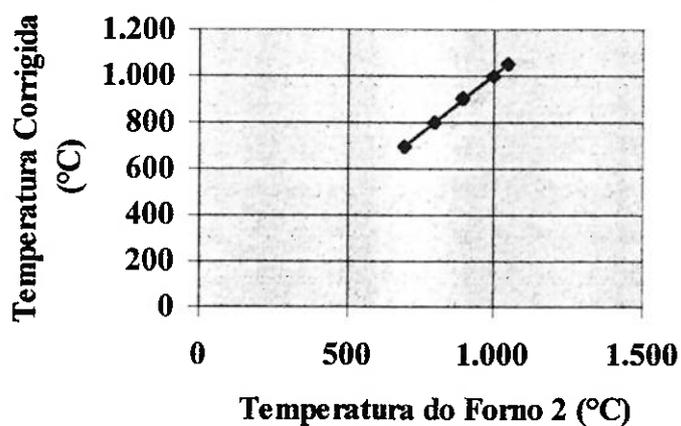


Figura B3: Curva de correlação do termopar do forno 2.

$$\text{Forno 3: } T_{corr} = 1,0071.T_{med} - 3,2331 \quad (\text{B.13})$$

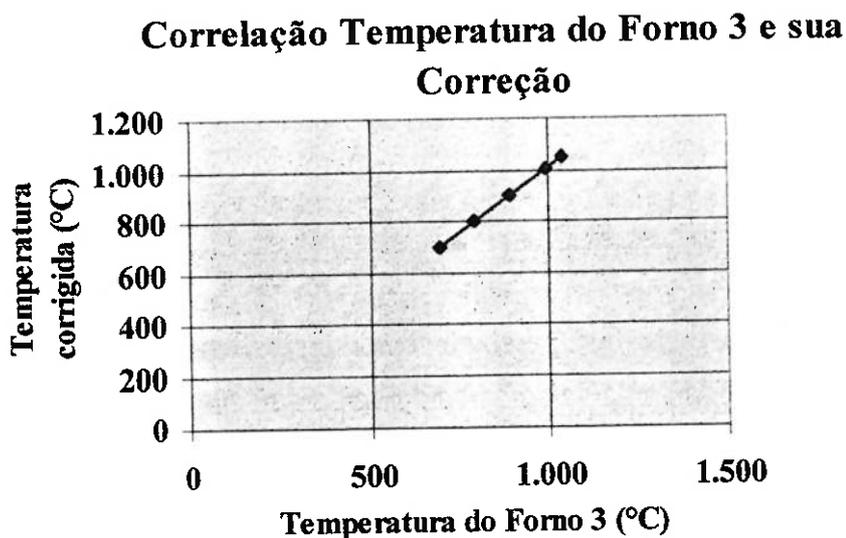


Figura B4: Curva de correlação do termopar do forno 3.

A partir dessas correlações as temperaturas dos fornos foram corrigidas para efeito do cálculo do fluxo radiativo da fonte.

Incerteza no sinal do instrumento

O termopar diferencial do instrumento foi calibrado em laboratório e sua temperatura de referência foi fixada em 24,5 °C. A temperatura de referência do instrumento não permaneceu constante durante o processo de calibração e sua temperatura média foi de 29,2 °C ± 4 (95%). Como esteve próxima da referência fixada em laboratório foi considerado que a calibração dada em μV pôde ser estendida. A calibração foi realizada da seguinte maneira: foram tomadas temperaturas de 50 em

50 °C até 350 °C, mantida a junta de referência na temperatura acima e medida a força eletromotriz correspondente na saída do termopar diferencial. Essa força eletromotriz foi correlacionada à força eletromotriz padrão e obtida a seguinte relação:

$$E_{corr} = 0,9959.E_{med} \quad (B.14)$$

Essa relação foi utilizada para corrigir os dados adquiridos e seu gráfico é apresentado na figura B5.

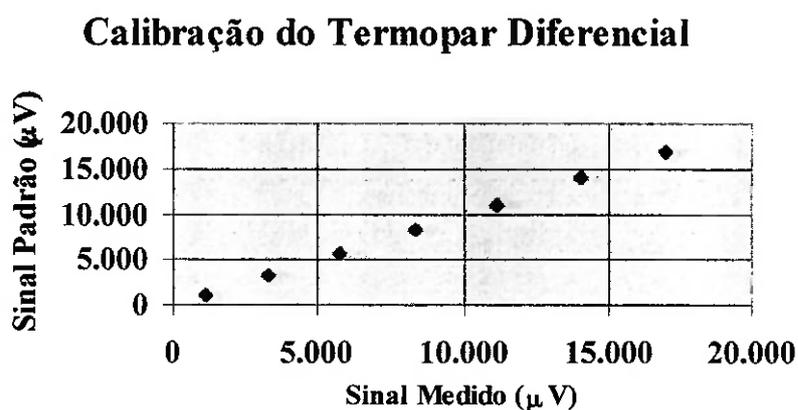


Figura B5: Curva de calibração do termopar diferencial

A incerteza declarada pelo laboratório foi de $\pm 1,5$ °C, equivalente a 60 µV, a incerteza da junta de medida foi de 0,5 °C, equivalente a 20 µV, e a incerteza do instrumento é 40 µV. Realizando a soma quadrática dessas quantidades e extraíndo sua raiz quadrada tem-se a incerteza total na medida da força eletromotriz: $u_E = 75$ µV.

Incerteza total da calibração

Determinadas as incertezas em ε_0 , σ , T e E , e retornando à equação (B.6) a incerteza média total do fluxo na calibração calculada foi:

$$u_{\Phi} = 6,6 \%$$

b) Cálculo da incerteza da sensibilidade do instrumento

A sensibilidade S é definida como:

$$S = \frac{\partial E}{\partial \Phi} = \frac{1}{a} \quad (\text{B.15})$$

Logo

$$u_S^2 = \left(\frac{\partial S}{\partial a} \right)^2 u_a^2 \quad (\text{B.16})$$

e

$$\left(\frac{u_S}{S} \right)^2 = \left(\frac{u_a}{a} \right)^2 \quad (\text{B.17})$$

O valor de u_a é calculado pela equação B.5 e tem-se que:

$$u_S = 6,7\% .$$

Comentário

A maior fonte de incerteza da calibração foi a incerteza na emissividade dos corpos negros (6,2%), as outras incertezas foram minimizadas pelo processo de calibração dos termopares.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALONSO, M.; FINN, E.J. **Fundamental University Physics, Volume II, Fields and Waves**, New York, Addison-Wesley, 1967.

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.

ARAI, N.; MATSUNAMI, A.; CHURCHILL, S.W. A review of measurements of heat flux density applicable to the field of combustion. **Experimental Thermal and Fluid Science**, n.12, p. 452-460, 1996.

BARR, E.S. Historical survey of the early development of the infrared spectral region **American Journal of Physics**, v.28, n.1, p. 42-54, 1960.

BOYD, R.W., **Radiometry and the detection of optical radiation**, John Wiley & Sons, 1982

BRAJUSKOVIC, B.; AFGAN, N. A heat flux-meter for ash deposit monitoring systems – II. ‘Clean’ heat flux-meter characteristics, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.34, n.9, p. 2303-2315, 1991.

BUTLER, B.W.; WEBB, B.W. Local temperature and wall radiant heat flux measurements in an industrial scale coal fired boiler ; **Fuel**, v. 70,p.1457-1464, 1991.

CHAMBERS, A. K.; WYNNYCKYJ, J.R.; RHODES,E. Development of a monitoring system for ash deposits on boiler tube surfaces. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v.59, p. 230-235, 1981.

CHEDAILLE, J., BRAUD, Y. **Measurements in Flames**, Vol. 1., *in Industrial Flames*, General Editors: J.M. Beér and M.W. Thring; Edward Arnold, 1972.

COLEMAN, H.W. , STEELE,Jr, W.G., **Experimentation and Uncertainty Analysis for Engineers**, John Wiley & Sons, New York, 1989.

COSTA, M.; COSTEN, P.; LOCKWOO, F.C. Pulverised-coal and heavy-fuel-oil flames: large-scale experimental studies at Imperial College, London. **Journal of Institute of Energy**, v04, p.64-76, 1991

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

HEWLETT-PACKARD Practical temperature measurements **Application Note 290**, 1972.

IEC, International Electrotechnical Commission, **IEC-751 – Standard for industrial resistance thermometers**, 1983.

INCROPERA, F.P.; DE WITT, D.P. **Introduction to heat transfer**, John Wisley, 1990.

IFRF, International Flame Research Foundation,, Doc.No. C76/y/1/3, **Measurement Equipment, Ellipsoidal Radiometer**, Ijmuiden, Holland, 1994.

INMETRO Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial, **Vocabulário Internacional de Metrologia** , março de 1995.

IPT, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S. A., Laboratório de Combustão, **Operação do radiômetro elipsoidal** , 1993.

IPT, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S. A **Programação de Cursos, folheto** , Agrupamento de Engenharia Térmica da Divisão de Mecânica e Eletricidade, 1998.

JAKOB, M. **Heat Transfer**, N.Y., John Wiley & Sons, 1949.

JUNQUEIRA, P., White Martins Gases Industriais S.A., **comunicação pessoal**, São Paulo, 1997.

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

MESSIAS, L. S. Laboratório de Combustão, DME, IPT, **comunicação pessoal**, São Paulo, 1996.

MORSE, P. M. **Thermal Physics**; W. A. Benjamin, Inc., 1965

NEAL, S. B. H.; NORTHOVER, E.W.; PREECE, R.J. The measurement of radiant heat flux in large boiler furnaces – II Development of flux measuring instruments; **International Journal of Heat and Mass Transfer** – v.23, p.1023-1031, 1980.

NIELSEN, J. R. Aberrations in ellipsoidal mirrors used in infra-red spectrometers, **Journal of Optical Society of America**, v.39,n.1, p.59-63, 1949.

NIST, National Institute for Science and Technology, USA; <http://physics-nist.gov>,1998

NORTHOVER, E. W. , HITCHCOCK, J. A. A heat flux meter for use in boiler furnaces, **Journal of Scientific Instruments**, v.44, p.371-374, 1967.

PORTER, A. W. **Thermodynamics** ; John Wiley & Sons, New York, 1951.

QUINN, T.J. **Temperature** ; Academic Press, London, 1990

REITZ, J.R., MILFORD, F.J. and CHRISTY, R. W. **Fundamentos da Teoria Eletromagnética** Editora Campus, 1982.

ROHSENOW, W.M., (Editor), **Handbook of Heat Transfer Fundamentals**, McGraw-Hill, 1985.

SANDIA, in <http://www.ca.sandia.gov/CRF/Research/Applied/94-8541/94-8541.html>, 1997

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

SILVA FILHO, F.T. da, **comunicação pessoal**, São Paulo, 1998.

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

SPARROW, E.M.; CESS, R.D. **Radiation Heat Transfer**, Brooks/Cole Publishing Company, 1966.

TOULOUKIAN, Y.S.; **Thermal Radiative Properties**, v.8, **Non Metallic Solids**, Thermophysical Properties Research Center of Purdue University, Data Series, Plenum Publishing, 1970.

VINCENT, J.D. **Fundamentals of Infrared Detector Operation and Testing**; John Wiley & Sons, 1990.

WEBER, R; IFRF, Technical Director, **comunicação pessoal**, 1997.

APÊNDICE - DEDUÇÃO DA EQUAÇÃO DE STEFAN-BOLTZMANN

Todo o eletromagnetismo clássico está baseado nas equações de Maxwell, uma das grandes sínteses da física do século XIX:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (\text{C.1})$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (\text{C.2})$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (\text{C.3})$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (\text{C.4})$$

onde \mathbf{E} (V.m^{-1}) é o campo elétrico existente pelo fato de a matéria possuir carga elétrica, \mathbf{B} é o campo magnético que sempre aparece quando cargas elétricas estão em movimento acelerado enquanto que \mathbf{J} (A.m^{-2}) a densidade de corrente elétrica que caracteriza o transporte daquelas cargas. Já \mathbf{D} (C.m^{-2}) é o deslocamento elétrico e \mathbf{H} é a intensidade magnética (A.m^{-1}). As equações C1, C2, C3 e C4 são baseadas em fatos experimentais. A primeira é a lei de Ampère, generalizada por Maxwell; a segunda é a lei de Faraday, a terceira é a lei de Coulomb e a quarta representa o fato de não haver monopolos magnéticos.

Este conjunto de equações representa a teoria mais fundamental, não-quântica, da eletrodinâmica e contém as leis da radiação eletromagnética. Uma de suas conseqüências importantes é que elas levam às equações das ondas eletromagnéticas.

Tomando-se o rotacional das equações (C.1) e (C.2) e utilizando-se de identidades vetoriais (REITZ, 1982 e ALONSO, 1967) é obtido para o campo elétrico:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \varepsilon \cdot \mu \cdot \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} - g \cdot \mu \cdot \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = 0 \quad (\text{C.5})$$

cuja solução é a equação de onda:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}(\mathbf{r}) \cdot e^{-i \cdot \omega \cdot t} \quad (\text{C.6})$$

Ao campo eletromagnético é associado o conceito de energia. Trabalhando as equações de Maxwell e supondo não haver correntes elétricas no sistema pode-se chegar à expressão:

$$\nabla \cdot (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) + \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial (\mathbf{D} \cdot \mathbf{E} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{H})}{\partial t} = 0 \quad (\text{C.7})$$

A equação (C.7) representa um balanço de energia onde

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{B} \quad (\text{C.8})$$

é o chamado vetor de Poynting e dá a taxa com que energia eletromagnética passa através de uma unidade de área cuja normal está na direção de \mathbf{S} e a quantidade

$$u = \frac{1}{2} \cdot (\mathbf{D} \cdot \mathbf{E} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{H}) \quad (\text{C.9})$$

é a energia por unidade de volume armazenada no campo eletromagnético.

A energia e o momento de uma onda eletromagnética estão correlacionados e o momento é dado por:

$$\mathbf{p} = \varepsilon_0 \cdot \mathbf{E} \times \mathbf{B} \quad (\text{C.10})$$

O momento das ondas eletromagnéticas dão origem a uma pressão quando são refletidas ou absorvidas na superfície de um corpo. E para uma superfície que absorve perfeitamente seu valor é dado por:

$$p = \frac{1}{3} u \quad (\text{C.11})$$

A dedução da lei de Stefan, realizada por Boltzmann, pode ser realizada termodinamicamente utilizando esse resultado, (C.11), da teoria eletromagnética clássica. A análise termodinâmica demonstra, ao mesmo tempo, o seu caráter geral e sua unidade com outros ramos da ciência.

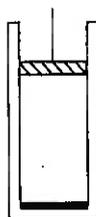


Figura C1 - Sistema cilindro – pistão

Boltzmann partiu do sistema esquematizado na Figura C1: um cilindro com pistão móvel. Esse sistema é composto de um parede que irradia à temperatura T com emissividade igual a 1 (um) em sua base e as paredes do cilindro e do pistão têm emissividade igual a zero, isto é, são perfeitamente refletoras e portanto não há troca de calor entres essas paredes.

Se a parede, considerada como corpo negro, está em equilíbrio com o resto da cavidade, pode-se afirmar que aquela porção do espaço, preenchida com radiação eletromagnética, também está à temperatura T . Essa é a chamada "temperatura de radiação", aplicada somente à radiação de equilíbrio, e permite a análise termodinâmica do corpo negro. A cavidade tem, também, tamanho suficiente para que os comprimentos de onda do espectro, na faixa de interesse (radiação térmica) sejam considerados tão pequenos que ela seja homogênea em todos os pontos como também são pequenos quando comparados com as dimensões da cavidade. Esse sistema é considerado termodinâmico pois calor pode ser trocado através da parede absorvedora e o volume da cavidade pode ser variado.

Uma imagem do sistema seria um "gás de fótons" em equilíbrio e sua densidade de radiação u tem uma característica que difere dos sistemas contendo partículas: independe do volume da cavidade. Se o volume da cavidade é aumentado mais fótons são produzidos e a densidade u permanece constante. Portanto a energia total é proporcional ao volume:

$$U = V.u \tag{C.12}$$

Neste sistema a energia interna U , para T constante, é independente do volume V pois se o pistão aumenta de ΔV , a densidade do "gás" diminui, assim como a densidade

de energia. E como diz o bem humorado (MORSE, 1965) nesse caso: "fótons extras podem ser criados para ocupar qualquer espaço adicionado; átomos são mais difíceis de serem criados". O sistema, então, tem a seguinte equação fundamental:

$$dU = T.dS - p.dV \quad (\text{C.13})$$

com

$$U = V.u(T) \quad (\text{C.14})$$

A pressão de radiação exercida no embolo já foi calculada anteriormente e vale $p = \frac{1}{3}.u$. Essas equações de estado dependem de U, V mas não de N , isto é, na cavidade não existem partículas sendo conservadas e o potencial químico também é zero. Tem-se então:

$$\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T = T.\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_V - p \quad (\text{C.15})$$

já que

$$\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right) = u(T) \quad (\text{C.16})$$

Das transformações de Maxwell:

$$\left(\frac{\partial v}{\partial s}\right)_{T,x} = \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_{v,x} \quad (\text{C.17})$$

Logo

$$u(T) = T \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_v - p \quad (\text{C.18})$$

e tem-se

$$u(T) = T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v - \frac{1}{3} u(T) \quad (\text{C.19})$$

substituindo p na equação C.19 tem-se :

$$u(T) = T \left[\frac{\partial \left(\frac{1}{3} u(T) \right)}{\partial T} \right]_v - \frac{1}{3} u(T) \quad (\text{C.20})$$

e a equação fica:

$$u(T) = \frac{T}{3} \cdot \frac{du(T)}{dT} - \frac{1}{3} u(T) \quad (\text{C.21})$$

e simplificando a equação C.21:

$$\frac{du}{u} = 4 \cdot \frac{dT}{T} \quad (\text{C.22})$$

que integrada fornece:

$$u = a.T^4 \quad (\text{C.23})$$

que é a equação que procurada.