



**Ana Sofia Morais Lacerda**

Licenciatura em Ciências da Engenharia Mecânica

## **Calibração e Caracterização do Termómetro por Radiação**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica

Orientadora: Doutora Helena Víctorovna Guitiss Navas,  
Prof<sup>a</sup>. Auxiliar, FCT/UNL-DEMI

Coorientadora: Engenheira Isabel Maria Melo Lopes Dias Lóio,  
Instituto Português da Qualidade

Coorientadora: Engenheira Sílvia Carreira Gentil,  
Instituto Português da Qualidade

Júri:

Presidente: Prof<sup>a</sup>. Doutora Ana Sofia Leonardo Vilela de Matos  
Arguente: Mestre Maria Eduarda de Carvalho Pamplona Côrte-Real Filipe  
Vogal: Prof<sup>a</sup>. Doutora Helena Víctorovna Guitiss Navas



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Março 2015**



## **Calibração e Caracterização do Termómetro por Radiação**

**COPYRIGHT © Ana Sofia Morais Lacerda, Faculdade Ciências e Tecnologia e Universidade Nova de Lisboa**

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



---

## Agradecimentos

---

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à minha família, especialmente aos meus pais, irmã e cunhado pelo apoio, motivação e também pelo facto de terem possibilitado a concretização desta etapa.

Agradeço também à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, e a todos os professores que fizeram parte do meu percurso académico e que contribuíram para a minha formação académica.

Agradecer ao Instituto Português da Qualidade que me proporcionou este estágio e que me permitiu aprofundar os conceitos teóricos e práticos no âmbito metrológico, mais especificamente na área da temperatura.

Agradeço à Professora Doutora Helena Navas, da FCT-UNL/DEMI, por me ter proporcionado este estágio, pela sua orientação e disponibilidade ao longo de todo trabalho.

Às coorientadoras, Engenheira Isabel Lóio e Engenheira Sílvia Gentil, do Laboratório de Temperatura do Instituto Português da Qualidade, agradeço a orientação, a disponibilidade, a paciência, a passagem de conhecimento e o apoio que foram imprescindíveis para a realização desta dissertação.

Gostaria ainda de agradecer à Engenheira Eduarda Filipe pela transmissão de conhecimento e disponibilidade ao longo de todo o meu percurso.

Agradeço também a todos os colegas que estagiaram comigo no IPQ e que contribuíram para um bom ambiente de trabalho, bem como os colegas com quem tive a oportunidade de conviver e trabalhar ao longo do curso.

Um agradecimento especial a aqueles que estão comigo diariamente, como o meu namorado e amigos, que me motivaram e apoiaram ao longo desta etapa.



---

## **Resumo**

---

O desenvolvimento científico promoveu a evolução tecnológica associada aos processos de calibração, tornando-se um fator indispensável na medida em que contribui para o rigor das metodologias utilizadas.

Esta dissertação foi desenvolvida no âmbito de um estágio curricular realizado no Laboratório de Temperatura do Departamento de Metrologia do Instituto Português da Qualidade, mais precisamente na área da Termometria sem Contacto e consistiu na caracterização e calibração de um pirómetro, por comparação com um termopar padrão num forno termorregulado e consequente análise estatística dos dados obtidos.

A calibração foi realizada por um método de comparação com um forno termorregulado, num intervalo de temperatura de 300 °C a 1050 °C. No intervalo de medição de 300 °C a 550 °C foi utilizado um tubo de calor de césio e para o intervalo de medição de 600 °C a 1050 °C um tubo de calor de sódio. As medições foram efetuadas com intervalos de temperatura de 50 °C.

Para a caracterização do pirómetro foi realizado o estudo do efeito do tamanho da fonte, que consistiu numa análise realizada através de dois métodos diferentes. No primeiro método foi utilizado um diafragma de diâmetro variável, no segundo método foram utilizados discos opacos negros, que permitiram fazer a análise inversa da realizada com o diafragma. Ambos os métodos foram realizados para valores de temperatura de 300 °C, 600 °C, 650 °C e 1050 °C.

Com a realização deste estudo ficou evidenciado a necessidade de efetuar a caracterização completa de cada pirómetro, nomeadamente o estudo do efeito do tamanho da fonte. Atualmente nem sempre é realizado um estudo desta natureza.

### **Palavras-chave:**

Termometria sem contacto, Calibração, Metrologia, Pirómetro, Efeito do tamanho da fonte.



---

## **Abstract**

---

The scientific development promoted the technological evolution associated with the calibration process, making it an indispensable factor which contributes to the rigor of the used methods.

This work was developed under a curricular internship held at the Temperature Laboratory of the Metrology Department in the Portuguese Institute for Quality, more precisely in the area of Contactless Thermometry and consisted in the characterization and calibration of a pyrometer, by comparison with a standard thermocouple in thermoregulated oven and consequent statistical analysis of the data.

The Calibration was performed by a method of comparison with a thermoregulated oven, a range of 300 °C to 1050 °C. At the measuring range of 300 °C to 550 °C it was used a cesium heat pipe and for the range of 600 °C to 1050 °C a sodium heat pipe. The temperature measurements were made with intervals 50 °C.

For the characterizing of the pyrometer was conducted the size-of-source-effect study which consisted of an analysis performed by two different methods. In the first method, we used a variable diameter diaphragm, the second method used black opaque disks, which allow to inverse analysis performed with the diaphragm. Both methods were conducted to temperature values of 300 °C, 600 °C, 650 °C and 1050 °C.

This study showed the need to make a complete characterization of each pyrometer, namely the size of source effect study. Currently this type of study is not always conducted.

**Keywords:**

Contactless thermometry, Calibration, Metrology, Pyrometer, Size of source effect.



---

# Índice

---

<b>1. Introdução.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Enquadramento e Objetivos da Dissertação.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Estrutura da Dissertação .....</b>	<b>2</b>
<b>2. Introdução à Metrologia .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1. Metrologia .....</b>	<b>3</b>
<b>2.2. Instituto Português da Qualidade .....</b>	<b>3</b>
<b>2.3. Domínio da Metrologia .....</b>	<b>4</b>
<b>2.4. Departamento de Metrologia.....</b>	<b>4</b>
<b>2.5. Sistema Internacional de Unidades.....</b>	<b>5</b>
2.5.1. Unidade de Base do Sistema Internacional da Grandeza Temperatura: kelvin .....	6
<b>2.6. Vocabulário Internacional de Metrologia - VIM.....</b>	<b>6</b>
<b>2.7. <i>Evaluation of Measurement Data - Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement - GUM</i> .....</b>	<b>7</b>
<b>2.8. Laboratório de Temperatura .....</b>	<b>7</b>
<b>3. Termometria Sem Contacto .....</b>	<b>9</b>
<b>3.1. Fundamentos Teóricos .....</b>	<b>9</b>
3.1.1. Radiação Térmica.....	9
3.1.1. Corpo Negro .....	10
3.1.2. Corpo Real.....	13
3.1.3. Termometria por Radiação .....	14
3.1.4. Efeito do Tamanho da Fonte .....	15
<b>3.2. Calibração .....</b>	<b>15</b>
<b>4. Equipamento e Método .....</b>	<b>17</b>
<b>4.1. Caracterização do Equipamento Utilizado .....</b>	<b>17</b>
4.1.1. Pirómetro.....	17
4.1.2. Forno com Tubos de Calor .....	20
4.1.3. Termopar .....	21

4.1.4.	Ponto Gelo .....	22
4.1.5.	Voltímetro .....	22
4.1.6.	LabView .....	23
4.1.7.	Diafragma .....	23
4.1.8.	Apoios do Pirómetro .....	24
<b>4.2.</b>	<b>Descrição do Método .....</b>	<b>25</b>
4.2.1.	Alinhamento .....	25
4.2.2.	Calibração do Pirómetro.....	26
4.2.3.	Estudo do Efeito do Tamanho da Fonte .....	27
<b>5.</b>	<b>Resultados .....</b>	<b>31</b>
<b>5.1.</b>	<b>Avaliação da Incerteza de Medição .....</b>	<b>31</b>
5.1.1.	Incerteza de Medição.....	31
5.1.2.	Avaliação da Incerteza de Medição das Grandezas de Entrada .....	32
5.1.3.	Avaliação de Tipo A da Incerteza-Padrão.....	32
5.1.4.	Avaliação de Tipo B da Incerteza-Padrão .....	33
5.1.5.	Avaliação da Incerteza-Padrão da Estimativa da Grandeza de Saída.....	35
5.1.6.	Incerteza de Medição Expandida.....	36
5.1.7.	Cálculo das Incertezas na Calibração de Termómetros e Sensores de Temperatura.	37
5.1.8.	Demonstração dos Cálculos das Componentes de Incerteza .....	39
5.1.9.	Cálculos Finais do Balanço das Incertezas.....	40
<b>5.2.</b>	<b>Discussão de Resultados.....</b>	<b>41</b>
5.2.1.	Resultados da Calibração do Pirómetro.....	42
5.2.2.	Resultados do Comportamento do Efeito do Tamanho da Fonte do Pirómetro .....	43
<b>6.</b>	<b>Conclusões.....</b>	<b>55</b>
	<b>Bibliografia .....</b>	<b>57</b>
	<b>Anexos .....</b>	<b>59</b>
	<b>Anexo I – Certificado de Calibração do Pirómetro MIKRON M190.....</b>	<b>61</b>
	<b>Anexo II – Certificado de Calibração do Termopar TS1 .....</b>	<b>63</b>
	<b>Anexo III – Folha de Cálculo.....</b>	<b>65</b>

**Anexo IV – Repetição da Calibração do Pirómetro MIKRON M190 ..... 66**



---

## Índice de Figuras

---

Figura 3.1- Espectro da radiação eletromagnética .....	9
Figura 3.2- Comportamento da radiação a incidir num material.....	10
Figura 3.3- a) Reflexão difusa. b) Reflexão especular .....	10
Figura 3.4- a) Representação de um corpo ideal opaco e isotérmico, onde ocorre absorção completa. b) Cavidade vazia, adiabática e isotérmica. ....	11
Figura 3.5-Excitância espectral de um corpo negro .....	12
Figura 3.6- a) Comparação espectral entre o corpo negro e um corpo real. b) Distribuição direcional da luminância entre o corpo negro e o corpo real .....	14
Figura 4.1- Esquema do pirómetro.....	18
Figura 4.2- Diagrama de blocos de um termómetro de infravermelho.....	18
Figura 4.3- Janela de transmissão.....	19
Figura 4.4- Forno com o tubo de calor .....	20
Figura 4.5- Tubo de sódio à esquerda e tubo de cézio à direita.....	21
Figura 4.6- Termopar tipo S .....	21
Figura 4.7- Ponto de gelo .....	22
Figura 4.8- Voltímetro Keithley, modelo 181 .....	23
Figura 4.9- Software LabVIEW .....	23
Figura 4.10- Diafragma Newport com abertura variável entre 7 mm e 73 mm. ....	24
Figura 4.11- Elevador Newport, modelo 271 .....	24
Figura 4.12- Placa de translação linear em $x$ .....	24
Figura 4.13- Mesa de rotação 360° .....	25
Figura 4.14- Mesa de inclinação .....	25
Figura 4.15- Estrutura com os respetivos componentes para o alinhamento do pirómetro.....	26
Figura 4.16- Estrutura experimental para a calibração a 750 °C.....	27
Figura 4.17- Esquema representativo da determinação do efeito do tamanho da fonte teórico (representado a azul). ....	28
Figura 4.18- Montagem experimental composta pelo diafragma à distância de 292 mm do pirómetro. ....	29
Figura 4.19- Montagem experimental composta pelo disco opaco negro a uma distância de 292 mm	29
Figura 5.1- Distribuição normal .....	34
Figura 5.2- Distribuição retangular .....	34
Figura 5.3 - Distribuição triangular.....	35
Figura 5.4- Representação gráfica das medições realizadas pelo pirómetro .....	42
Figura 5.5- Representação gráfica das medições realizadas com temperatura de 300 °C, à distância de 650 mm, e abertura de diafragma a partir de 12 mm.....	44

Figura 5.6- Representação gráfica das medições realizadas com temperatura de 550 °C, à distância de 650 mm, e abertura do diafragma a partir de 12 mm .....	45
Figura 5.7- Representação gráfica das medições realizadas com temperatura de 600 °C, à distância de 650 mm, e abertura de diafragma a partir de 12 mm.....	46
Figura 5.8- Representação gráfica das medições realizadas com temperatura de 1050 °C, à distância de 650 mm, e abertura de diafragma a partir de 12 mm.....	47
Figura 5.9- Representação gráfica das medições realizadas com temperatura de 300 °C, à distância de 292 mm, e abertura de diafragma a partir de 20 mm.....	48
Figura 5.10 - Representação gráfica das medições realizadas com temperatura de 550 °C, à distância de 292 mm, e abertura de diafragma a partir de 20 mm.....	49
Figura 5.11- Representação gráfica das medições realizadas com temperatura de 600 °C, à distância de 292 mm, e abertura de diafragma a partir de 20 mm.....	49
Figura 5.12- Representação gráfica das medições realizadas com temperatura de 1050 °C, à distância de 292 mm, e abertura de diafragma a partir de 20 mm.....	50
Figura 5.13- Esquema representativo da determinação do efeito do tamanho da fonte teórico e do efeito do tamanho da fonte calculado experimentalmente. ....	51
Figura 5.14 - Representação gráfica das medições realizadas com os dois discos opacos negros de diâmetro 12 mm e 20 mm, à distância 650 mm e 292 mm respectivamente, às temperaturas de 300 °C e 550 °C.....	52
Figura 5.15 - Representação gráfica das medições realizadas com os dois discos opacos negros de diâmetro 12 mm e 20 mm, à distância 650 mm e 292 mm respectivamente, às temperaturas de 600 °C e 1050 °C.....	53
Figura IV.1 - Representação gráfica da repetição das medições realizadas pelo pirômetro. ....	66

---

## Índice de Tabelas

---

Tabela 2.1 - Nome e símbolo especiais da unidade SI de temperatura no caso da temperatura Celsius.	6
Tabela 4.1- Especificações dos tubos de calor .....	20
Tabela 5.1- Fatores de expansão $k$ para diferentes números de graus de liberdade efetivos $v_{ef}$ .....	36
Tabela 5.2- Balanço das incertezas de medição da temperatura termodinâmica da cavidade do corpo negro para 300 °C.....	40
Tabela 5.3- Balanço da incerteza na medição da temperatura termodinâmica da cavidade do corpo negro para 1050 °C.....	40
Tabela 5.4- Balanço da incerteza na calibração do pirômetro por infravermelhos para 300 °C .....	41
Tabela 5.5- Balanço da incerteza na calibração do pirômetro por infravermelhos para 1050 °C .....	41
Tabela 5.6- Resultados obtidos na calibração do pirômetro MIKRO 190 .....	42
Tabela 5.7- Resultados obtidos das medições efetuadas com temperatura de 300 °C, à distância de 650 mm, e abertura do diafragma inicialmente a 12 mm .....	43
Tabela 5.8- Resultados obtidos das medições efetuadas com temperatura de 550 °C, à distância de 650 mm, e abertura do diafragma inicialmente a 12 mm .....	44
Tabela 5.9- Resultados obtidos das medições efetuadas com temperatura de 600 °C, à distância de 650 mm, e abertura do diafragma inicialmente a 12 mm .....	45
Tabela 5.10- Resultados obtidos das medições efetuadas com temperatura de 1050 °C, à distância de 650 mm, e abertura do diafragma inicialmente a 12 mm .....	46
Tabela 5.11- Resultados obtidos das medições efetuadas com temperatura de 300 °C, à distância de 292 mm, e abertura do diafragma inicialmente a 20 mm .....	48
Tabela 5.12- Resultados obtidos das medições efetuadas com temperatura de 550 °C, à distância de 292 mm, e abertura do diafragma inicialmente a 20 mm .....	48
Tabela 5.13- Resultados obtidos das medições efetuadas com temperatura de 600 °C, à distância de 292 mm, e abertura do diafragma inicialmente a 20 mm .....	49
Tabela 5.14- Resultados obtidos das medições efetuadas com temperatura de 1050 °C, à distância de 292 mm, e abertura do diafragma inicialmente a 20 mm .....	50
Tabela 5.15- Resultados obtidos das medições efetuadas com o disco opaco de diâmetro 12 mm e 20 mm, à distância 650 mm e 292 mm respectivamente, a várias temperaturas.....	52
Tabela IV.1 - Resultados obtidos na repetição da calibração do pirômetro MIKRO 190.....	66



---

## Abreviaturas

---

BIPM	<i>Bureau International des Poids et Mesures</i>
c.d.o	Comprimento de Onda
CGPM	Conferência Geral de Pesos e Medidas
EIT-90	Escala Internacional de Temperatura de 1990
f.e.m	Força eletromotriz
FOV	<i>Field of View</i>
GUM	<i>Evaluation of measurement data - Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IFCC	<i>International Federation of Clinical Chemistry</i>
IPQ	Instituto Português da Qualidade
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
IUPAC	<i>International Union of Pure and Applied Chemistry</i>
IUPAP	<i>International Union of Pure and Applied Physics</i>
LNM	Laboratório Nacional de Metrologia
OIML	Organização Internacional de Metrologia Legal
SI	Sistema Internacional de Unidades
SSE	<i>Size of Source Effect</i> – Efeito do Tamanho da Fonte
SPQ	Sistema Português da Qualidade
VIM	Vocabulário Internacional de Metrologia
VSMOW	<i>Vienna Standard Mean of Ocean Water</i>



---

## Simbologia

---

Símbolo	Grandeza	Unidades
$A$	Área	$m^2$
$c$	Velocidade da luz no vácuo ( $2,997\,924\,58 \times 10^8$ )	$m\,s^{-1}$
$c_1$	1ª constante de radiação ( $3,741\,771\,53 \times 10^{-16}$ )	$W\,m^2$
$c_2$	2ª constante de radiação ( $1,438\,777\,0 \times 10^{-2}$ )	$mK$
$D$	Distância do pirômetro ao alvo	$m$
$d$	Diâmetro do alvo a essa distância	$m$
$h$	Constante de Planck ( $6,626\,069\,57 \times 10^{-34}$ )	$J\cdot s$
$k$	Constante de Boltzmann ( $1,380\,6488 \times 10^{-23}$ )	$J\,K^{-1}$
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann ( $5,670\,373 \times 10^{-8}$ )	$W\,m^{-2}\,K^{-4}$
$E_\lambda$	Poder emissivo espectral	$W\,m^{-2}\,\mu m^{-1}$
$L_n$	Luminância energética de um corpo negro	$W\,m^{-2}\,sr^{-1}$
$L_\lambda$	Luminância energética espectral de um corpo negro	$W\,m^{-3}\,sr^{-1}$
$L_{n\lambda}$	Luminância energética espectral de um corpo negro	$W\,m^{-3}\,sr^{-1}$
$M_n$	Excitância energética total de um corpo negro	$W\,m^{-2}$
$M_{n,\lambda}$	Excitância energética espectral de um corpo negro	$W\,m^{-3}\,\mu m^{-1}$
$q_i$	Fluxo radiante incidente	$W\,m^{-2}$
$r$	Raio	$m$
$t$	Temperatura	$^\circ C$
$T_0$	Temperatura termodinâmica (273,15)	$K$
$T$	Temperatura termodinâmica	$K$
$V_M$	Valor medido	$^\circ$
$V_{Ref}$	Valor referência	$^\circ$
$\Omega$	Ângulo sólido	$sr$
$\theta_1$	Ângulo de incidência	$^\circ$
$\theta_2$	Ângulo de reflexão	$^\circ$
$\lambda$	Comprimento de onda da radiação no vácuo	$\mu m$

$\lambda_{\max}$	Comprimento de onda máximo	$\mu\text{m}$
$\varepsilon$	Emissividade	adimensional
$\varepsilon_{\lambda}$	Emissividade monocromática ou espectral	adimensional
$\rho$	Refletividade	adimensional
$\alpha$	Absortividade	adimensional
$\tau$	Transmissividade	adimensional

---

# 1. Introdução

---

## 1.1. Enquadramento e Objetivos da Dissertação

Esta dissertação foi realizada no âmbito de um estágio proposto pelo Laboratório de Temperatura integrado no Laboratório Nacional de Metrologia do Instituto Português da Qualidade. Este sugeriu o desenvolvimento de processos de calibração e estudos estatísticos na área da termometria.

Este trabalho teve como principais objetivos: a realização da escala termodinâmica, baseada em instrumentos de medição utilizados na termometria sem contato, a caracterização de sistemas de medição no que se refere à instrumentação utilizada, a análise e integração da informação técnica e estatística associada aos estudos efetuados.

Nesse seguimento foi realizada a calibração do pirómetro por comparação com um termopar padrão num forno termorregulado, seguindo-se a análise do cálculo estatístico, assim como a realização do estudo do efeito do tamanho da fonte, "*Size of Source Effect*".

O estudo do efeito do tamanho da fonte, teve como objetivo verificar se os resultados obtidos teoricamente correspondiam aos resultados obtidos na prática, ou seja, se toda radiação emitida pelo corpo negro seria recebida pelo pirómetro. Para isso recorreu-se à utilização de um diafragma com diâmetro variável e de um disco opaco negro com diversas dimensões. Para fundamentar o estudo foram efetuados cálculos estatísticos bem como a avaliação da incerteza de medição e os erros associados.

Para a realização desta dissertação as ordens de trabalhos foram:

- Integração das atividades desenvolvidas no LTE;
- Pesquisa e estudo de bibliografia dedicada;
- Utilização dos sistemas para a calibração de sensores de temperatura;
- Determinação das respetivas incertezas-padrão combinadas de acordo com os modelos matemáticos associados;
- Análise e integração da informação estatística associada aos estudos efetuados;

## 1.2. Estrutura da Dissertação

A presente dissertação foi dividida em seis capítulos, compostos por vários subcapítulos.

O primeiro capítulo, designado por “*Introdução*”, expõe o enquadramento deste projeto bem como os seus objetivos.

O segundo capítulo, designado por “*Introdução à Metrologia*” inclui informações que pretendem dar a conhecer o que é a Metrologia, os Domínios da Metrologia, o Instituto Português da Qualidade e o Sistema Internacional de Unidades. Neste mesmo capítulo, apresenta-se também o Laboratório de Temperatura do IPQ, bem como a Unidade de Base do Sistema Internacional da Grandeza Temperatura ( $T$ ): kelvin (K)

O terceiro capítulo, designado por “*Termometria sem contato*” descreve os fundamentos teóricos necessários para realização do trabalho e a definição de calibração.

No quarto capítulo, designado por “*Equipamento e Método*”, é descrito todo o equipamento utilizado e características específicas, finalizando com a apresentação das três etapas que foram realizadas para a concretização do trabalho experimental.

O quinto capítulo, designado por “*Resultados*”, apresenta o balanço das incertezas de medição e a discussão dos resultados obtidos após o trabalho experimental.

No sexto capítulo, designado por “*Conclusões*”, apresenta-se uma breve conclusão dos diversos pontos considerados importantes durante esta dissertação.

---

## 2. Introdução à Metrologia

---

### 2.1. Metrologia

Em Portugal, no século XII, o sistema de medidas para comercializar tecidos fundamentava-se no Palmo, correspondendo hoje a 22 cm, devido ao crescimento e aumento de trocas de mercadorias do nosso país ocorreu a necessidade de aperfeiçoar as medições das mesmas e criando múltiplos e submúltiplos [1].[2].

Embora D. João VI tenha determinado a adoção de um novo sistema baseado nas medidas do sistema métrico francês (cuja unidade fundamental era o mètre), mas com terminologia portuguesa, este nunca foi devidamente regulamentado. O Sistema Métrico só veio a ser formalmente adotado por Decreto da rainha D. Maria II de 13 de dezembro de 1852, que tinha como princípio a simplicidade e universalidade. A sua simplicidade era devido ao facto de se basear apenas no metro, e a universalidade porque era utilizado por diversos países [2].

Em 1867 foi criado um *Comité dos Pesos e Medidas e da Moeda* com o grande objetivo de uniformizar as medidas [2].

A 20 de maio de 1875, Portugal e outros 16 países assinaram a “Convenção do Metro”.

A metrologia é a ciência da medição, provavelmente a ciência mais antiga do mundo, e aplicada no nosso dia-a-dia e em todas as profissões relacionadas com a ciência. Esta procura garantir o máximo de qualidade em serviços e produtos através da calibração de instrumentos de medição.

### 2.2. Instituto Português da Qualidade

O IPQ é o organismo nacional responsável pela coordenação e desenvolvimento do Sistema Português da Qualidade (SPQ), seguindo princípios, regras e procedimentos aceites internacionalmente, congregando esforços para:

- Dinamizar a qualidade em Portugal;
- Assegurar a coordenação de três subsistemas: Normalização, Qualificação e Metrologia

com vista ao desenvolvimento sustentado do país e ao aumento da qualidade de vida da sociedade em geral [3].

### **2.3. Domínio da Metrologia**

A metrologia na União Europeia está dividida em três categorias com diferentes níveis de exatidão e complexidade [1]:

1. A Metrologia Científica que tem como principal objetivo a organização e desenvolvimentos de padrões de medição e a sua manutenção ao mais alto nível de qualidade, exatidão e incerteza.
2. A Metrologia Aplicada tem como principal objetivo assegurar o funcionamento dos instrumentos de medição que são utilizados na indústria e os processos de produção e ensaio.
3. A Metrologia Legal está relacionada com a exatidão das medições quando estas são realizadas nas transações comerciais, na segurança e na saúde.

### **2.4. Departamento de Metrologia**

O Laboratório Nacional de Metrologia (LNM) está sobre a diretoria do Departamento de Metrologia do IPQ e tem em sua incumbência a metrologia científica e aplicada do IPQ, responsabiliza-se também pelo Subsistema Nacional de Metrologia realizando as seguintes funções [4]:

- Exercer as funções de Instituto Nacional de Metrologia, fazendo a representação do IPQ em organizações internacionais de metrologia;
- Divulgar e coordenar a realização de padrões nacionais e assegurar a sua rastreabilidade ao sistema internacional (SI) de unidades;
- Organizar e participar em comparações europeias e internacionais de padrões e instrumentos de medição;
- Promover e participar sendo um laboratório de referência em programas de comparações nacionais;
- Promover a dinamização do subsistema de metrologia, realizar os padrões nacionais das unidades de medida da responsabilidade direta do IPQ;
- Desenvolver e participar em projetos internacionais de investigação e desenvolvimento metrológico;
- Realizar ensaios de controlo metrológico de instrumentos de medição e certificar matérias de referência;

- Calibrar padrões de referência e instrumentos de medição dos laboratórios acreditados.

O LMN é composto por quatro áreas laboratoriais [5]:

- Comprimento, Tempo e Frequência:

Domínios metrológicos: Metrologia Dimensional; Comprimento; Metrologia Cinética; Fotometria, Radiometria e Velocidade; Ângulo e Tempo/Frequência.

- Eletricidade, Temperatura e Acústica:

Domínios metrológicos: Corrente e Tensão AC; Corrente e Tensão DC; Humidade Relativa; Impedância; Pontos Fixos da EIT-90; Vibração e Termometria.

- Massa, Volume e Propriedades dos Líquidos:

Domínios metrológicos: Massa Volúmica de Sólidos, Força, Massa, Pressão, Propriedades dos Líquidos e Volume.

- Quantidade de Matéria e Eletroquímica:

Domínios metrológicos: Gases de Referência, pH, Quantidade de Matéria e Alcoolimetria.

## **2.5. Sistema Internacional de Unidades**

O Sistema Métrico Decimal foi estabelecido em França, no ano de 1789, durante a revolução francesa, e adotou primeiramente, três unidades básicas de medida: o metro, o litro e o quilograma.

Em 1960, o sistema métrico decimal foi nomeado Sistema Internacional de Unidades (SI) pela Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM), sendo nos dias de hoje constituído por sete unidades base. O SI define os nomes, símbolos e definições das unidades, bem como os prefixos e símbolos múltiplos e submúltiplos das mesmas unidades e contempla recomendações para a escrita e para a utilização dos símbolos aprovados pela CGPM.

O SI foi adotado em Portugal através do Decreto-Lei n.º 427/83, de 7 de dezembro, posteriormente revisto e alterado. A sua última atualização foi feita pelo Decreto-Lei n.º 128/2010 de 3 de dezembro de 2010.

O SI é dividido em dois tipos de unidades: de base e derivadas.

As unidades base são representadas por sete unidades bem definidas, consideradas dimensionalmente independentes: metro, quilograma, segundo, ampere, kelvin, mole e candela [6].

As unidades derivadas podem ser expressas a partir de unidades bases fornecidas por expressões algébricas sob a forma de potência das unidades SI de base (ex: comprimento ao cubo) [7]. Os nomes e símbolos das unidades derivadas podem ser substituídos por nomes e símbolos

específicos, e eles mesmos podem ser utilizados para formar expressões e símbolos de outras unidades derivadas [6].

### 2.5.1. Unidade de Base do Sistema Internacional da Grandeza Temperatura: kelvin

O kelvin (K) é definido como sendo a fração  $1 / 273,16$  da temperatura termodinâmica do ponto triplo da água [8].

Esta definição diz respeito à água com composição isotópica definida pelos seguintes rácios de quantidade de matéria: 0,00015576 mole de  $^2\text{H}$  por mole de  $^1\text{H}$ , 0,0003799 mole de  $^{17}\text{O}$  por mole de  $^{16}\text{O}$  e 0,0020052 mole de  $^{18}\text{O}$  por mole de  $^{16}\text{O}$  (13ª CGPM de 1967 - Resolução nº 4 e 23ª CGPM de 2007 - Resolução nº 10), composição do material de referência da *International Atomic Energy Agency - Vienna Standard Mean Ocean Water (VSMOW)*”, como recomendado pela União Internacional de Química Pura e Aplicada em "pesos atômicos dos Elementos: Análise de 2000".

A unidade derivada do Sistema Internacional da Grandeza Temperatura ( $t$ ), grau Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ), é definida pela diferença  $t = T - T_0$  entre duas temperaturas termodinâmicas  $T$  e  $T_0$  com  $T_0 = 273,17$  K. Um intervalo ou uma diferença de temperatura podem ser expressos quer em kelvin quer em graus Celsius. A unidade de grau Celsius é igual à unidade kelvin. Na tabela 2.1 está representado o nome e o símbolo da unidade SI de temperatura Celsius [9].

Tabela 2.1 - Nome e símbolo especiais da unidade SI de temperatura no caso da temperatura Celsius

Grandeza	Unidade	
	Nome	Símbolo
temperatura Celsius	grau Celsius	$^{\circ}\text{C}$

## 2.6. Vocabulário Internacional de Metrologia - VIM

Foi na segunda metade do século XX, que surgiu a necessidade de criar, no contexto da metrologia, um VIM. Este tem como objetivo harmonizar internacionalmente as terminologias e definições utilizadas na metrologia e instrumentação.

A primeira versão do VIM foi publicada em 1984 e contou com a colaboração das principais organizações internacionais na área da metrologia como o BIPM, IEC, ISO e OIML. Em Portugal a 1ª edição do VIM foi publicada, em 1985, pela Direção Geral da Qualidade.

A versão utilizada nesta dissertação é a 1ª edição luso-brasileira de 2012, tradução em língua portuguesa da 3ª edição internacional do VIM [7].

## **2.7. *Evaluation of Measurement Data - Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement - GUM***

O GUM é um guia internacional para a avaliação da incerteza na medição. A sua formulação é genérica de modo a ser validada em todos os domínios da calibração.

O principal objetivo deste documento é criar um procedimento universal que permita a avaliação da qualidade do resultado de medição, através da expressão da sua incerteza.

Este documento utilizado nesta dissertação está de acordo com “*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*” (GUM), publicado em 2008, em nome do BIPM, CEI, IFCC, ISO, IUPAC e OIML [10].

## **2.8. Laboratório de Temperatura**

O Laboratório de Temperatura é responsável pelo desenvolvimento dos padrões nacionais de temperatura e humidade relativa, incumbindo-lhe designadamente [8]:

- A realização da escala Internacional de Temperatura de 1990 (EIT-90) nos pontos fixos, entre o ponto triplo (PT) do árgon (189,344 °C) e o ponto de congelação (PC) da prata (961,78 °C);
- Realizar a EIT-90 a partir do ponto de congelação do cobre (1084,62 °C) através da radiação de Planck;
- Assegurar a rastreabilidade das medições da grandeza temperatura no intervalo de medição de 190 °C a 2500 °C;
- Calibrar os padrões de referência dos laboratórios secundários, acreditados e da indústria;
- Participar e coordenar comparações interlaboratoriais nacionais e internacionais;
- Apoiar tecnicamente a metrologia legal.



---

## 3. Termometria Sem Contacto

---

### 3.1. Fundamentos Teóricos

#### 3.1.1. Radiação Térmica

A radiação térmica é a energia emitida por um objeto que se encontra a uma temperatura diferente de 0 °C. A radiação pode ocorrer em superfícies sólidas, líquidos ou gases, independentemente da sua composição de matéria, a emissão desta energia tem como origem a agitação térmica de partículas constituintes da matéria, como por exemplo os átomos, moléculas ou iões [11]. A radiação não necessita de um suporte material para transferir energia, sendo mais eficiente no vácuo. Uma das principais vantagens termometria por radiação é o facto de não perturbar o meio envolvente e ser possível realizar a medição da temperatura a objetos em movimento e frágeis [12] [13].

A figura 3.1 representa o espectro de radiação eletromagnética, onde se indica o intervalo de medição do comprimento de onda (c.d.o) onde está situada a radiação térmica:  $0,1 \mu\text{m} < \lambda < 100 \mu\text{m}$ .

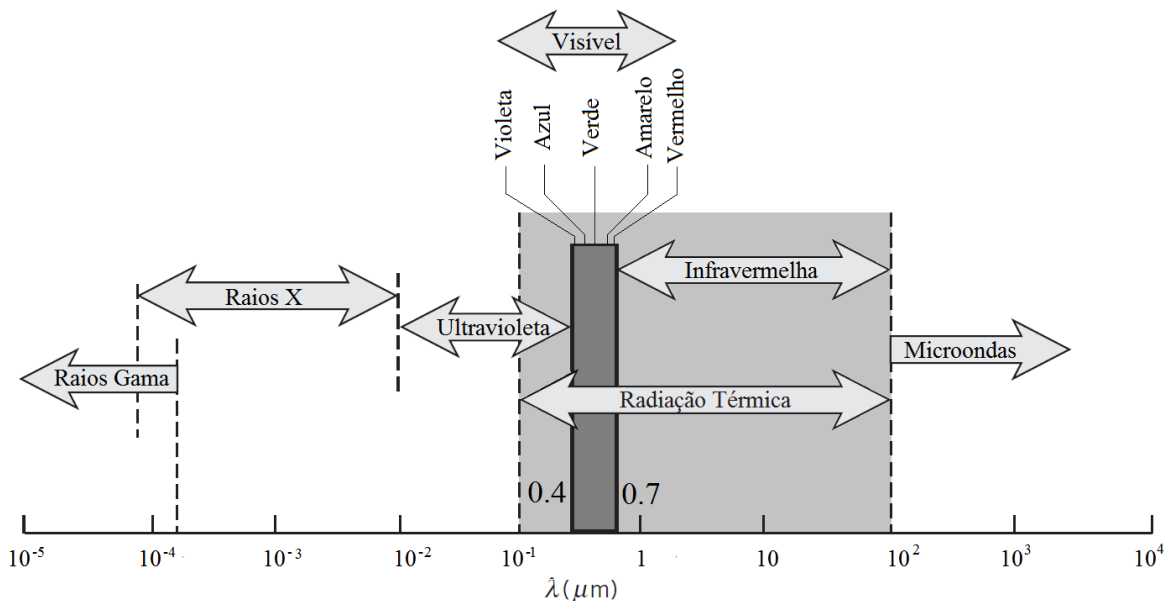


Figura 3.1- Espectro da radiação eletromagnética, adaptado de [12]

Um corpo negro é utilizado normalmente como referência no estudo e medição da radiação térmica. A luminância do corpo negro quando calculada para um comprimento de onda,  $\lambda$ , é chamada de luminância monocromática  $L_{m\lambda}$ .

Num corpo real, a radiação é absorvida, refletida e transmitida, como ilustra a figura 3.2. Considerando que a absorvidade,  $\alpha$ , é a fração absorvida, a refletividade,  $\rho$ , é a fração refletida e a

transmissividade,  $\tau$ , é a fração transmitida, obtêm-se segundo a lei da conservação da energia a equação 3.1 [14]:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad \text{Equação 3.1}$$

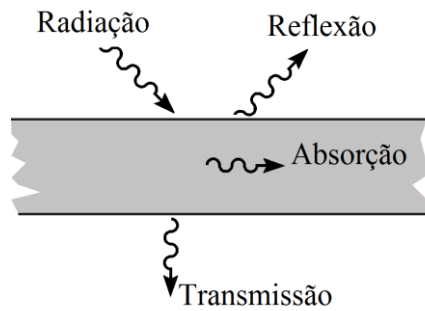


Figura 3.2- Comportamento da radiação a incidir num material

A radiação ao atingir uma superfície tem dois tipos de reflexão diferentes. É designada reflexão especular quando o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão, e reflexão difusa quando o raio incidente é distribuído uniformemente em todas as direções. Estes diferentes tipos de reflexão estão representados na figura 3.3.

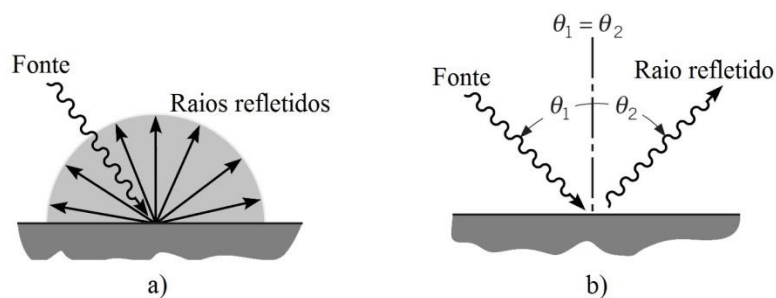


Figura 3.3- a) Reflexão difusa. b) Reflexão especular

A lei de Kirchhoff diz que, ao colocar um corpo com absorptividade  $\alpha$ , no interior de uma cavidade negra, ao fim de um certo tempo é encontrado o equilíbrio térmico entre ambos, ou seja, a energia emitida pelo corpo será igual a energia absorvida pelo mesmo, equação 3.2:

$$E A = q_i A \alpha \quad \text{Equação 3.2}$$

### 3.1.1. Corpo Negro

O Corpo Negro é definido (NF c01-845 [NF] (845-04-04)) como um radiador térmico ideal que absorve completamente todas as radiações incidentes, qualquer que seja o c.d.o, a sua direção e a sua polarização [11]. Emite também o fluxo radiante com a máxima intensidade de luminância espectral em todos os comprimentos de onda. É o radiador térmico que, em equilíbrio térmico a uma

dada temperatura para todos os c.d.o e para todas as direções, tem o máximo de densidade espectral de luminância energética.

O corpo negro é um objeto com capacidade de emitir e absorver toda a radiação nele incidente e a sua emissividade é 1,0. Se um objeto tiver uma emissividade de 0,9 significa que tem uma refletividade de 0,1, ou seja, reflete 10 % da radiação que é incidida na sua superfície [15]. Segundo a lei de Stefan-Boltzmann, a emissividade  $\varepsilon$  varia entre 0 e 1.

O corpo negro é um emissor perfeito e as suas paredes internas emitem em qualquer direção e comprimento de onda, e a sua geometria não interfere com a radiação emitida satisfazendo assim a lei de Lambert (isotropia energética). Nenhuma superfície emite mais radiação térmica do que um corpo negro [16].

Uma cavidade vazia, adiabática e isotérmica e com uma pequena abertura, será assim o modelo mais semelhante a um corpo negro. A radiação que nela incida sofre uma sucessão de reflexões e absorções fazendo com que a quantidade de radiação que sai pela abertura seja praticamente zero [17]. A figura 3.4 ilustra um corpo ideal opaco e isotérmico, onde ocorre absorção completa e uma cavidade vazia, adiabática e isotérmica.

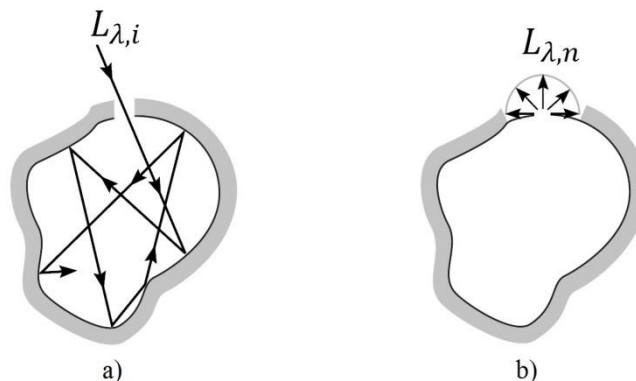


Figura 3.4- a) Representação de um corpo ideal opaco e isotérmico, onde ocorre absorção completa. b) Cavidade vazia, adiabática e isotérmica. Adaptada de [12]

A intensidade radiante de uma fonte numa direção dada, é o quociente entre o fluxo radiante que sai da fonte, e um ângulo sólido que contem essa direção e este ângulo sólido.

A luminância é obtida através de um ponto de uma superfície e com uma dada direção, e esta é o quociente entre a intensidade radiante de um elemento desta superfície e a área da projeção ortogonal deste elemento sobre um plano perpendicular à direção dada.

A lei de Planck define a potência de radiação de um corpo negro à temperatura  $T$  (K): potência emitida por unidade de superfície, no ângulo sólido  $\Omega$  e para o comprimento de onda  $\lambda$ . Esta grandeza é chamada de luminância energética espectral  $L_\lambda = E_\lambda/\pi$ , e esta é obtida da seguinte forma:

$$L_\lambda = \frac{c_1}{\pi} \frac{\lambda^{-5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \quad \text{Equação 3.3}$$

$$c_1 = 2\pi \times hc^2 \quad \text{Equação 3.4}$$

$$c_2 = \frac{hc}{k} \quad \text{Equação 3.5}$$

O c.d.o correspondente ao valor máximo da Luminância espectral,  $L_\lambda$ , é obtido a partir da anulação da primeira derivada da lei de Planck, chamada Lei de deslocamento de Wien, :

$$\lambda_{max} \times T = 2897,8 \mu m \cdot K \quad \text{Equação 3.6}$$

Na Figura 3.5-Excitância espectral de um corpo negro está representada a excitância espectral de um corpo negro, que é a integração da luminância espectral num ângulo solido de  $2\pi$  sr. Nesta figura é possível observar que quanto menor for o comprimento de onda,  $\lambda$ , maior é a temperatura. Mostra também que apenas a temperaturas iguais ou superiores a 1000 K a radiação do corpo negro se torna visível, isto é, a curva da temperatura intersecta intervalo do comprimento de onda onde a radiação é visível [18].

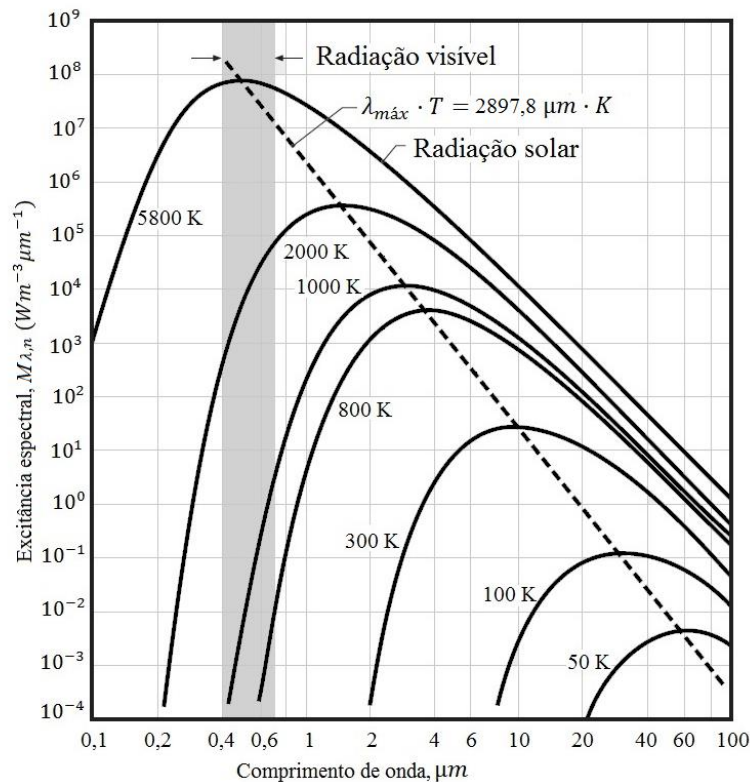


Figura 3.5-Excitância espectral de um corpo negro, adaptada de [12]

A energia total ou excitância espectral emitida por um corpo negro à temperatura de  $T$  é calculada através da integração da lei de Planck em todo o espectro [19]:

$$M_n = \int_0^\infty \int_{2\pi} L_n d\lambda d\Omega \quad \text{Equação 3.7}$$

Obtém-se a Lei de Stefan-Boltzmann e onde  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann.

$$M_n = \sigma T^4 \quad \text{Equação 3.8}$$

### 3.1.2. Corpo Real

Para descrever a emissão de uma superfície real é conveniente escolher um corpo negro como referência. Os corpos reais emitem menos radiação do que os corpos negros, embora o seu comportamento espectral seja muito semelhante.

Considerando um corpo negro onde  $\alpha = 1$ , ao dividir a luminância do corpo real pela luminância do corpo negro obtém-se:

$$\frac{L_\lambda}{L_{n,\lambda}} = \alpha_\lambda \quad \text{Equação 3.9}$$

$\alpha = \varepsilon$ , quando, à mesma temperatura, a relação da luminância de um corpo real, e a luminância de um corpo negro é igual à absorvidade, mas esta relação também define a emissividade de um corpo. A emissividade monocromática ou espectral,  $\varepsilon_\lambda$ , de uma superfície, à temperatura  $T$  e comprimento de onda  $\lambda$ , é dada através da relação entre luminância espectral do corpo real e a luminância espectral de um corpo negro.

$$\varepsilon_\lambda = \frac{L_\lambda(T)}{L_\lambda^n(T)} \quad \text{Equação 3.10}$$

Na figura 3.6 está representada a comparação espectral entre o corpo negro e um corpo real e a distribuição direcional da luminância entre o corpo negro e o corpo real.

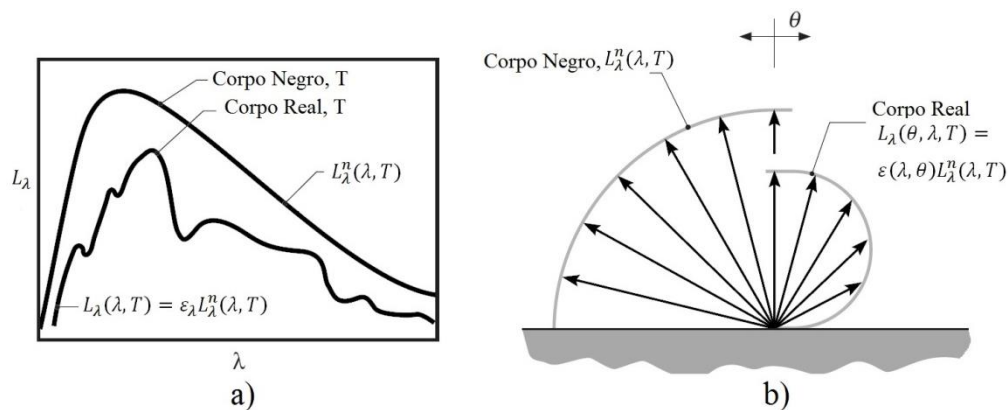


Figura 3.6- a) Comparação espectral entre o corpo negro e um corpo real. b) Distribuição direcional da luminância entre o corpo negro e o corpo real, adaptada de [12]

Analisando a figura acima representada, é visível que a luminância de um corpo negro é mais uniforme em relação à do corpo real.

Um corpo cinzento é definido pela emissividade monocromática ser independente do comprimento de onda, ou seja,  $\epsilon_\lambda = c^{te}$ .

A emissividade de uma substância depende do comprimento de onda, das condições de superfície e da temperatura [14] [18].

### 3.1.3. Termometria por Radiação

A temperatura é das grandezas físicas mais medida no dia-a-dia, estando presente em todo o tipo de produtos e equipamentos, melhorando a sua qualidade e produtividade.

A temperatura pode ser medida de duas formas, por contacto ou sem contacto.

Por contacto, o sensor do termómetro tem de estar em contacto físico com o meio do qual se quer obter a temperatura. É através da condução térmica que ocorre a troca de energia entre o termómetro e o meio, e estes necessitam de estar em equilíbrio térmico quando é feita a medição. Este tipo de medição é utilizado em meios gasosos e líquidos, para meios sólidos já apresenta algumas restrições.

Na medição sem contacto, o termómetro é colocado a uma distância do meio, e é por radiação que ocorre a transmissão de energia entre o termómetro e o meio, o termómetro obtém o valor da temperatura através da potência da radiação térmica emitida pelo meio, convertendo esse valor em temperatura. Este tipo de termómetro tem como vantagens: a rápida resposta, mede objetos em movimento, de difícil acesso, frágeis e perigosos [20] [21].

Um termómetro de radiação é um instrumento que indica a temperatura em função da radiação de entrada. A radiação de entrada está limitada por um sistema ótico e é influenciada pela resposta espectral do detetor. Para que seja possível obter a máxima sensibilidade são utilizadas larguras de banda de comprimentos de onda na ordem dos micrómetros.

Intervalos de medição da temperatura e comprimentos de onda, típicos, em termometria sem contato:

- Comprimento de onda próximo de 0,9  $\mu\text{m}$  (detetor de Si): 420 °C a 1100 °C
- Comprimento de onda próximo de 1,6  $\mu\text{m}$  (detetor de InGaAs): 150 °C a 1000 °C
- Comprimento de onda próximo de 3,9  $\mu\text{m}$  (detetor de PbSe) : 20 °C a 1000 °C
- Comprimento de onda próximo de 4,6  $\mu\text{m}$  (detetor de InSb) : -30 °C a 500 °C
- Comprimento de onda de 8  $\mu\text{m}$  a 14  $\mu\text{m}$  (detetor piroelétrico) :-40 °C a 500 °C

#### **3.1.4. Efeito do Tamanho da Fonte**

O efeito do tamanho da fonte (*size of source effect*) é definido como a radiação da fonte proveniente da superfície exterior à área do alvo que alcança o detetor do termómetro de radiação.

O efeito do tamanho da fonte é um problema crítico na termometria sem contacto, é originado pelas imperfeições do sistema ótico do pirómetro e as suas principais causas são:

- Difração da radiação no diafragma de campo do pirómetro;
- Dispersão da radiação nas superfícies das lentes da objetiva do pirómetro;
- Reflexões múltiplas nas superfícies óticas;
- Falhas causadas pelas lentes da objetiva.

Devido a todos estes fatores o efeito do tamanho da fonte não apresenta, em termos geométricos, um comportamento uniforme, dispersando-se a radiação pelo ambiente [22].

Estas medições realizam-se para valores de temperatura superiores a 100 °C, permitindo que a influência da radiação à temperatura ambiente seja desprezada. E os resultados obtidos do efeito do tamanho da fonte, são utilizados como contribuição no cálculo da incerteza de medição na calibração do termómetro de radiação.

### **3.2. Calibração**

Operação que estabelece, sob condições especificadas, num primeiro passo, uma relação entre os valores e as incertezas de medição fornecidos por padrões e as indicações correspondentes com as

incertezas associadas; num segundo passo, utiliza esta informação para estabelecer uma relação visando a obtenção dum resultado de medição a partir duma indicação. Uma calibração pode ser expressa por meio de uma declaração, uma função de calibração, um diagrama de calibração, uma curva de calibração ou uma tabela de calibração. Em alguns casos pode consistir numa correção aditiva ou multiplicativa da indicação com a incerteza de medição associada [7].

A calibração de termómetros de radiação deve ser efetuada pelo método de comparação com termómetros padrão, em meios termorregulados. O método baseia-se essencialmente na comparação da indicação do termómetro ou sensor de temperatura a calibrar, num meio controlado, com a indicação de um padrão de referência.

O modelo matemático, para a calibração de um termómetro por comparação com um termómetro padrão, pode ser descrito genericamente pela expressão do erro de medição [ $\varepsilon = t_s - t_{ref}$ ], que aplicado à leitura do termómetro em calibração ( $t_s$ ) corresponderá à temperatura do meio estabelecida pelo termómetro padrão ( $t_{ref}$ )

A temperatura do sensor depende das seguintes correções:

$$t_s = \varepsilon - t_{ref} + \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4 + \delta_5 + \delta_6$$

$\varepsilon$ : erro de medição

$t_{ref}$ : temperatura do termómetro padrão

$\delta_1$ : correção devida à calibração do padrão

$\delta_2$ : correção devida à estabilidade do padrão

$\delta_3$ : correção devida ao equipamento de leitura

$\delta_4$ : correção devida à uniformidade do banho

$\delta_5$ : correção devida à resolução da unidade de leitura do sensor

$\delta_6$ : correção devida à reprodutibilidade

Relativamente às correções  $\delta_i$  acima referidas o seu valor médio é nulo mas têm um valor de incerteza  $u_{bi}$  não nula, em conformidade com os cálculo do balanço de incertezas realizado no capítulo “5.Resultados”.

---

## 4. Equipamento e Método

---

### 4.1. Caracterização do Equipamento Utilizado

#### 4.1.1. Pirómetro

Neste projeto, o caso de estudo foi um termómetro por radiação infravermelha, também designado por pirómetro ótico ou pirómetro. A figura 4.1 representa o esquema de pirómetro.

O pirómetro é um termómetro sem contacto que mede a potência radiante e é calibrado em termos da radiação de um corpo negro a uma temperatura conhecida.

A escolha do comprimento de onda, depende essencialmente do intervalo de medição da temperatura, do meio ambiente e do tipo de superfície. Considerando que foram utilizados dois corpos negros para um intervalo de temperatura de 300 °C a 1050 °C, através da lei do deslocamento de Wien, calculou-se o intervalo de medição de comprimento de onda máximo de 5 µm a 2,2 µm. Devido às condições de absorção atmosférica e variações espectrais de emissividade, quanto maior for o comprimento de onda, maior o erro em temperatura. Em virtude do referido anteriormente o pirómetro selecionado apresenta as seguintes especificações técnicas:

- Marca: Mikron M190-QTS
- N° de série: 007076
- Intervalo de medição: 200 °C a 1600 °C
- Resolução de temperatura: 0,1 °C
- Banda espectral: 1,0 µm a 1,6 µm
- Campo de visão: 60:1
- Diâmetro mínimo de medição: 3,2 mm
- Intervalo de mediação de focagem: 600 mm a infinito
- Intervalo de medição da emissividade: 0,10 a 1,00 com incrementos de 0,001
- Tempo de resposta: 50 ms a 3 s
- Dimensões: (178×220×97) mm

O certificado de calibração resultante da calibração efetuada encontra-se no Anexo I.

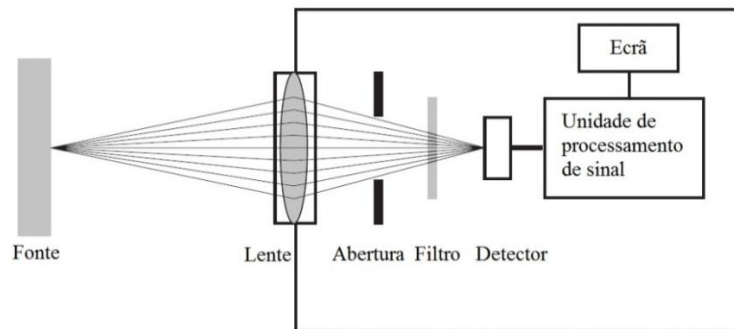


Figura 4.1- Esquema do pirômetro. Adaptada de [20]

### Cadeia de Medição

A figura 4.2 ilustra um diagrama de blocos de um pirômetro. À esquerda, está representado o objeto que emite a radiação, essa radiação é focada através do sistema ótico, e levada para o detector, este converte a radiação num sinal elétrico analógico. O sinal elétrico é amplificado e transferido para o conversor de sinal analógico para digital. É no processador que o valor da temperatura do objeto é calculado através do sinal recebido e do valor da emissividade previamente programada no pirômetro. Após esses cálculos o valor é transmitido através do ecrã do pirômetro, ou saída analógica ou digital [13].

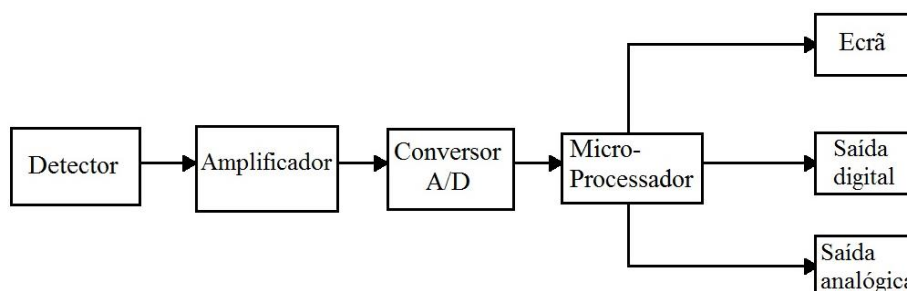


Figura 4.2- Diagrama de blocos de um termómetro de infravermelho, adaptada de [20]

### Detetor do Pirômetro

Existem dois tipos de detetores de radiação diferentes: os detetores térmicos e detetores quânticos ou fotónicos.

No detetor térmico, a radiação eletromagnética absorvida é convertida em calor, causando o aumento da sua temperatura. Este é constituído por detetores bolométricos, termopilhas, e detetores piroelétricos. São revestidos de um material negro, para uma maior absorção e consequentemente utilizados em pirómetros de banda larga.

Detetores fotónicos respondem a uma radiação incidente, libertando cargas elétricas, o tempo de resposta é menor, e o seu desempenho é muito afetado pela variação da temperatura ambiente. Atuam em comprimentos de onda curtos e são constituídos por silício, germânio e índio de antimoniato e neles a libertação de uma carga produz uma tensão de saída.

De acordo com o valor do comprimento de onda fornecido pelo fabricante, o detetor do pirômetro utilizado é um detetor de InGaAs (Índio arsenieto de gálio) [13] [21] [23].

### Absorção Atmosférica

A transmissão de radiação infravermelha através da atmosfera é efetuada pelas características de absorção dos diversos constituintes encontrados na atmosfera. A atmosfera é composta por gases, líquidos e partículas sólidas das quais atenuam ou dispersam a radiação infravermelha, estes fenómenos podem introduzir erros significativos na medição da temperatura, logo é necessário ter em conta o tipo de atmosfera envolvente, na figura 4.3 está representada a janela de transmissão.

O pirômetro em estudo tem como característica o intervalo de comprimento de onda de 1  $\mu\text{m}$  a 1,6  $\mu\text{m}$ , que coincide com a janela de transmissão do vapor de água [13] [20] [21].

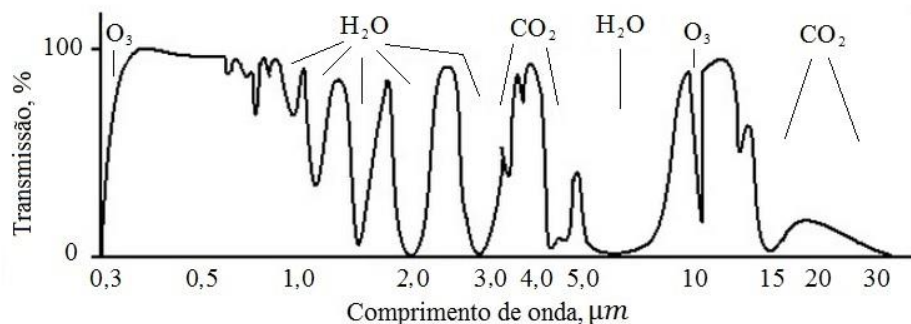


Figura 4.3- Janela de transmissão, adaptada de [24]

### Sistema Ótico

Os termómetros de radiação são construídos de modo a que colem toda a radiação emitida que é limitada pelo ângulo sólido do cone.

A leitura do pirômetro não é independente da distância entre o alvo e o instrumento, ou seja, se se diminuir a distância do pirômetro ao alvo, a área do alvo será maior, contudo, para uma boa leitura, é necessário que o alvo preencha todo o campo de visão do pirômetro, se isso não se verificar, a leitura da temperatura não será correta, contabilizando também a temperatura do meio em redor do alvo. Caso isso aconteça, é possível colocar um diafragma para controlar o diâmetro de abertura do cone, conseguindo medir o valor correto da temperatura do alvo, mas isso implica que a sensibilidade do pirômetro diminua.

O sistema ótico pode sofrer interferências devido ao meio envolvente e componentes óticos.

O ângulo de medição ou campo de visão de um pirômetro é calculado através da equação 4.1, onde  $D$  é a distância do pirômetro ao alvo e  $d$  é o diâmetro do alvo a essa distância [13]:

$$tg\theta = \frac{d}{D} \quad \text{Equação 4.1}$$

#### 4.1.2. Forno com Tubos de Calor

O meio termorregulado utilizado na calibração, é constituído por um forno, onde são introduzidos os tubos de calor isotérmicos, (*heatpipes*), componentes de elevada condutividade térmica com dois poços oxidados, para uma melhor emissividade. Num dos poços é introduzido o termómetro de referência e o outro apresenta as dimensões adequadas para funcionar como corpo negro de elevada emissividade, e também pela oxidação do metal. Assim são criadas condições isotérmicas adequadas à calibração de pirómetros óticos. O forno possui uma unidade de alimentação e controle [17] [25]. A figura 4.4 apresenta o forno com o tubo de calor.

Especificações do forno utilizado:

- Estabilidade:  $< 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Dimensões do forno:  $(320 \times 530 \times 3900) \text{ mm}$
- Dimensões da unidade de controlo:  $(580 \times 500 \times 500) \text{ mm}$
- Tensão:  $220 \text{ V}$  ( $50 \text{ Hz}$ )
- Potencia:  $2,42 \text{ kW}$
- Intervalo de temperatura:  $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $1070 \text{ }^{\circ}\text{C}$



Figura 4.4- Forno com o tubo de calor

A tabela 4.1 é composta pelas especificações dos tubos de calor e a figura 4.5 ilustra os dois tubos de calor utilizados.

Tabela 4.1- Especificações dos tubos de calor

	Césio	Sódio
Nº serie	CS-217-89	NA-216-89
Intervalo de temperatura	$300 \text{ }^{\circ}\text{C} - 600 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$600 \text{ }^{\circ}\text{C} - 1070 \text{ }^{\circ}\text{C}$



Figura 4.5- Tubo de sódio à esquerda e tubo de césio à direita

#### 4.1.3. Termopar

Um termopar é um sensor de temperatura, constituído por dois metais distintos que unidos pelas suas extremidades formam um circuito fechado. O termopar gera uma força eletromotriz (f.e.m) que depende da temperatura. Esta f.e.m. é medida com um voltímetro de resolução apropriada [26].

No estudo do campo de termoelectricidade, Seebeck, define o efeito termoelétrico como sendo a produção de uma força eletromotriz devida à diferença de temperatura entre uma junção de metais diferentes formando parte de um mesmo circuito. [25] [26].

Neste trabalho foi utilizado um Termopar do tipo S (platina- 10 % ródio/platina), instrumento de medição formado por um par de condutores de materiais diferentes, unidos numa junção que usa o efeito termoelétrico para a medição da temperatura, figura 4.6. A junção de referência, ponta fria, é introduzida em gelo fundente - ponto de gelo ( $\approx 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Especificações do termopar [27]:

- Marca: Isotech
- Modelo 1600; n° de serie 231343/1
- Intervalo de temperatura:  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Constituição: Termopar com ponta fria



Figura 4.6- Termopar tipo S

No Anexo II encontra-se uma cópia do certificado de calibração do termopar utilizado neste estudo.

#### 4.1.4. Ponto Gelo

O ponto de gelo (figura 4.7) é um ponto fixo com uma temperatura de referência ~de 0 °C, e é realizado a partir da junção gelo de água desmineralizada triturado e de água desmineralizada. A mistura é colocada dentro de um *dewar* que garante a sua homogeneização e conservação [15] [28] .



Figura 4.7- Ponto de gelo

#### 4.1.5. Voltímetro

Foi utilizado um voltímetro para as medições de tensão elétrica, na unidade derivada do SI, Volt (V) e que permite o registo das leituras do termopar em mV (resolução necessária) que é posteriormente convertida em temperatura através de uma função polinomial.

Especificações técnicas:

- Marca: Keithley; Modelo:181; N° série: 299590
- Intervalo de leitura: 10 nV a 1000 V.
- Capacitância: 5000 pF/mV
- Amplitude de medição: 20 mV
- Resolução: 100 nV
- Alimentação: (210-250) V, 50 Hz
- Ruído: < 30 nV

A figura 4.8 apresenta o voltímetro utilizado nesta dissertação.



Figura 4.8- Voltímetro Keithley, modelo 181

#### 4.1.6. LabView

O LabVIEW, é um software base de programação gráfica, sendo utilizado para o desenvolvimento de sistemas de medição ou controle, permitindo a realização de medições e aquisição de dados. Este programa fornece os dados em ficheiros “.dat” onde estão registados os valores das temperaturas lidos pelo termopar em mV. A figura 4.9 representa o Software LabVIEW.



Figura 4.9- Software LabVIEW

#### 4.1.7. Diafragma

O diafragma, modelo M-DI47.68 da Newport representado na figura 4.10, é composto por uma abertura variável de 7 mm a 73 mm e foi colocado num elevador com deslocamento no eixo z. No caso do presente a abertura foi ajustada para se efetuar o estudo do efeito do tamanho da fonte [29].



Figura 4.10- Diafragma Newport com abertura variável entre 7 mm e 73 mm [29].

#### 4.1.8. Apoios do Pirómetro

Nas figuras seguintes estão ilustradas as componentes que contribuiram para o alinhamento e fixação do pirómetro.

- Elevador com deslocamento no eixo  $z$ , marca Newport, modelo 271, com uma elevação máxima de 44,5 mm [30].



Figura 4.11- Elevador Newport, modelo 271 [30]

- Placa translação linear em  $x$  e  $y$ , formada pela montagem de duas placas Newport M-UMR8.25, uma orientada segundo  $x$  e outra segundo  $y$ . O deslocamento máximo é de 25 mm e apresentam um desvio angular inferior a 200  $\mu\text{rad}$  [31].



Figura 4.12- Placa de translação linear em  $x$  [31]

- Mesa de rotação, modelo M-UTR80 da Newport, tem uma rotação de 360°,

com um erro  $\pm 2^\circ$  e uma resolução de  $0,017^\circ$  [32].



Figura 4.13- Mesa de rotação 360° [32]

- Mesa de inclinação, modelo 37 da Newport, é composta por dois eixos de inclinação e um de rotação de  $\pm 4^\circ$  [33].



Figura 4.14- Mesa de inclinação [33]

## 4.2. Descrição do Método

No decorrer do trabalho experimental realizado no âmbito desta dissertação foram realizadas três etapas distintas: o alinhamento, calibração e estudo do efeito do tamanho da fonte.

### 4.2.1. Alinhamento

Na primeira etapa realizou-se a montagem da estrutura de apoio ao pirômetro e o seu alinhamento. A estrutura é composta por um elevador para translação no eixo  $z$ , placas de translação linear em  $x$  e  $y$ , mesa de rotação, e por fim uma mesa de inclinação. Todos estes componentes contribuíram para que a deslocação do pirômetro fosse feita em todas as direções, com bastante exatidão facilitando a movimentação do pirômetro. O alinhamento do pirômetro foi efetuado através da mira do pirômetro, com o auxílio da estrutura montada previamente, este alinhou-se com o eixo imaginário da cavidade do corpo negro e sem entrar em contacto com as paredes, procurando a posição com maior deteção de sinal. O pirômetro foi colocado a 1 m de distância do fundo da cavidade

do corpo negro. A figura 4.15 mostra a estrutura com os respectivos componentes para o alinhamento do pirômetro e o pirômetro em estudo.

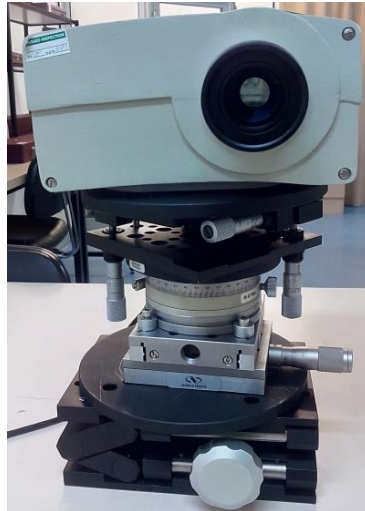


Figura 4.15- Estrutura com os respectivos componentes para o alinhamento do pirômetro.

#### 4.2.2. Calibração do Pirômetro

A segunda etapa consistiu na calibração do pirômetro. A calibração foi realizada por comparação num meio termorregulado, forno de tubos de calor, utilizando um padrão de referência, termopar tipo S, ligado a uma unidade de leitura, o voltímetro. Este termómetro padrão foi calibrado de acordo com a EIT-90.

Foram efetuadas medições no intervalo de temperatura de 300 °C a 1050 °C. No intervalo de medição de 300 °C a 550 °C foi utilizado um tubo de calor de cézio, para o intervalo de medição de 600 °C a 1050 °C, um tubo de calor de sódio.

Após a estabilização do meio termorregulado, visualizada através do programa LabVIEW, é iniciada a aquisição de dados do termopar e em simultâneo são registados os valores de medição do termómetro de radiação a calibrar. Os valores do termopar são adquiridos pelo LabVIEW e convertidos em temperatura, posteriormente, através de uma folha de cálculo.

As medições de temperatura começaram no ponto de temperatura mais baixo do intervalo de medição, terminando no valor mais elevado, com intervalos de temperatura de 50 °C. Em cada ponto de temperatura foram realizadas 10 medições em condições de repetibilidade. Como o tempo de resposta é muito pequeno, entre cada medição foi colocada uma placa em frente ao pirômetro não ser detetado qualquer tipo de sinal.

A figura 4.16 apresenta a estrutura experimental composta pelo pirômetro e o forno termorregulado.



Figura 4.16- Estrutura experimental para a calibração a 750 °C.

### 4.2.3. Estudo do Efeito do Tamanho da Fonte

Neste trabalho foram realizados dois métodos distintos para determinação do efeito do tamanho da fonte.

Em ambos os métodos foi utilizada uma fonte de radiação uniforme, um tubo de calor com um corpo negro.

Antes de se executarem os dois métodos diferentes, foram realizados os cálculos para a determinação do efeito do tamanho da fonte teórico. Considerando que a geometria do efeito do tamanho da fonte se comportava como um cone perfeito e sabendo que a ótica do pirômetro tinha uma abertura de 27 mm de diâmetro, segundo as características fornecidas pelo fabricante do pirômetro, à distância de 1 metro o diâmetro mínimo de medição é de 3,2 mm. A partir de cálculos trigonométricos, obteve-se que a 292 mm de distância da mira do pirômetro o diâmetro do efeito do tamanho da fonte era de 20 mm e que a 650 mm de distância era de 12 mm. Após a obtenção destes dados, estava-se em condições para iniciar o trabalho experimental. Na figura 4.17 está representado o esquema da determinação do efeito do tamanho da fonte teórico.

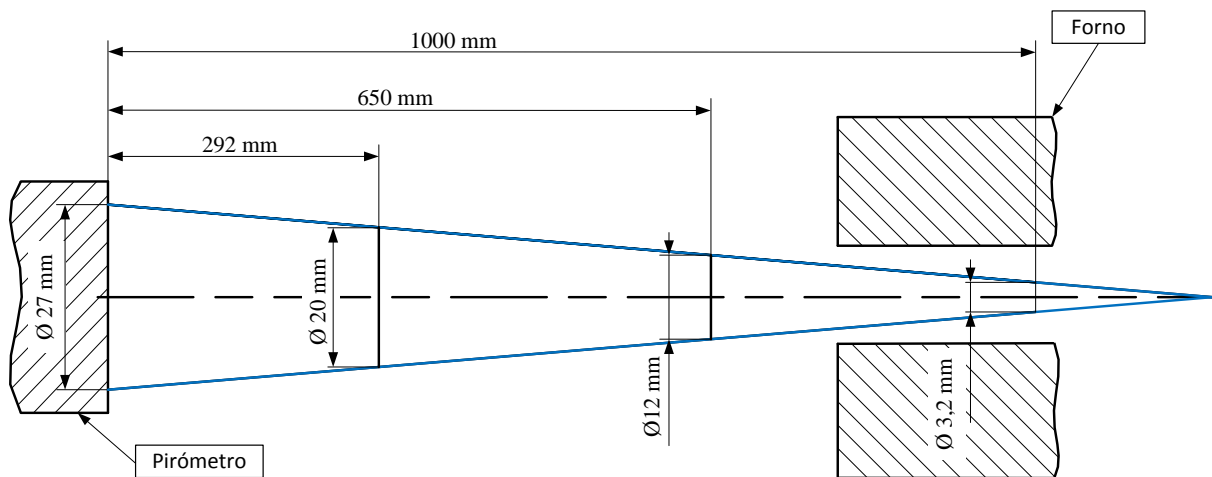


Figura 4.17- Esquema representativo da determinação do efeito do tamanho da fonte teórica (representado a azul).

Primeiro método: Mediante a utilização de um diafragma de abertura variável, situado entre o pirômetro e o corpo negro às duas distâncias anteriormente calculadas (292 mm e 650 mm), foram simuladas fontes de radiação com diversos raios. Inicialmente o raio da abertura do diafragma teve o valor calculado teoricamente, e foi retirado o sinal recebido pelo pirômetro. Em seguida o diafragma foi aberto progressivamente até que o valor recebido pelo pirômetro atingiu um valor semelhante ao obtido quando este estava focado diretamente na fonte.

Segundo método: Utilizando o diafragma anterior de abertura variável, situado entre o pirômetro e o corpo negro às duas distâncias anteriormente calculadas (292 mm e 650 mm), foram simuladas fontes de radiação com diversos raios, colocando um disco opaco negro de raio calculado teoricamente, situado no centro da abertura do diafragma, onde se foca o pirômetro. Foram retirados os sinais recebidos pelo pirômetro, para serem comparados com os valores obtidos quando este está focado diretamente na fonte. Este método comportou-se como sendo o inverso do primeiro método.

Ambos os métodos tiveram como finalidade a análise do comportamento do pirômetro, e verificar se o efeito do tamanho da fonte tem um comportamento linear e uniforme como foi calculado teoricamente pela trigonometria.

Procedeu-se à verificação do comportamento do efeito do tamanho da fonte, com o auxílio de um diafragma a vários diâmetros. As medições foram realizadas nas temperaturas de 300 °C, 550 °C, 600 °C e 1050 °C, por serem as temperaturas iniciais e finais para cada tubo de calor.

Em seguida o diafragma foi colocado às distâncias e diâmetros calculados, e à volta do diafragma foi colocada uma “placa” para garantir que não passava qualquer tipo de sinal em redor do diafragma, apenas passava sinal pela abertura do mesmo. O alinhamento deste com o pirômetro e a cavidade do corpo negro foi realizado, através da mira ótica e movimentando o pirômetro de modo a encontrar a posição com maior deteção de sinal. Em seguida foi verificada a estabilidade do forno e retirados os valores do mesmo modo que se realizou para a calibração. A abertura do diafragma foi aumentada progressivamente até ser obtido um valor aproximado ao da calibração, e assim analisar o

valor do efeito do tamanho da fonte. A figura 4.18 ilustra a montagem experimental composta pelo diafragma à distância de 292 mm do pirômetro.

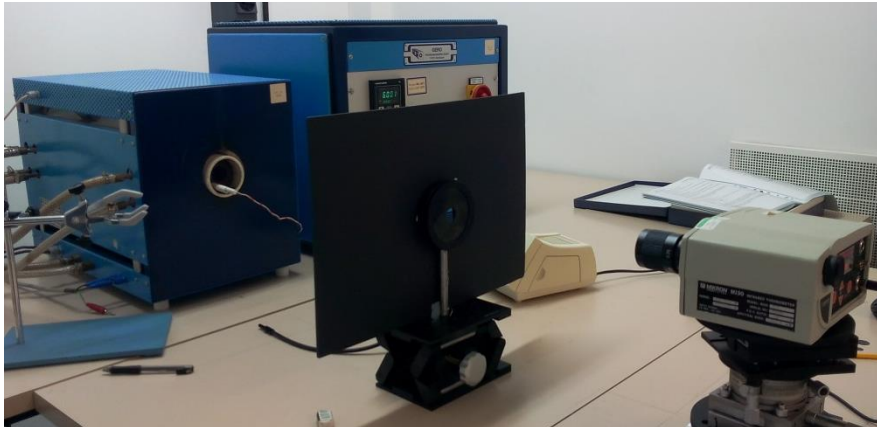


Figura 4.18- Montagem experimental composta pelo diafragma à distância de 292 mm do pirômetro.

Por fim realizou-se um segundo método para o estudo do efeito do tamanho da fonte, com o auxílio de um disco opaco negro colocado no centro do diafragma, representado na figura 4.19, mantendo-se o esquema de alinhamento e posicionamento utilizado no método anterior. Este ensaio foi realizado às mesmas temperaturas (300 °C, 550 °C, 600 °C e 1050 °C). Foram colocados discos opacos à distância de 292 mm com um diâmetro de 20 mm, e à distância de 650 mm com o diâmetro de 12 mm, separadamente. Foi realizado o alinhamento, e em seguida verificou-se a estabilidade do forno, por fim obtiveram-se os valores da temperatura, nestas condições.

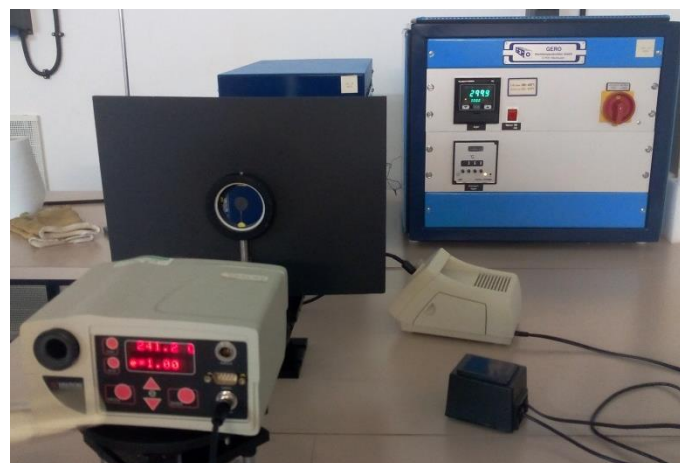


Figura 4.19- Montagem experimental composta pelo disco opaco negro a uma distância de 292 mm

Após a realização destes estudos, todos os valores adquiridos pelo programa em LabVIEW, foram tratados e analisados numa folha de Excel. O tratamento dos dados está descrito no capítulo “5.Resultados”.



---

## 5. Resultados

---

### 5.1. Avaliação da Incerteza de Medição

Numa calibração de instrumentos de medição é necessário realizar uma avaliação da incerteza e esta é baseada no documento “*Guide to expression of uncertainty in measurement,*” este preenche os requisitos necessários para a avaliação da incerteza de medição [10].

Sempre que uma medição é efetuada, esta tem um erro associado ao valor médio. Esse erro de medição é calculado através da diferença entre o valor medido de uma grandeza e o valor de referência dado pelo padrão.

O erro de medição é calculado através da equação 5.1:

$$\varepsilon = V_M - V_{Ref} \quad \text{Equação 5.1}$$

onde,  $V_M$  é o valor medido, e  $V_{Ref}$  é o valor de referência [7].

Os erros obtidos numa calibração podem ter origem nos instrumentos utilizados, no procedimento experimental, operador entre outros. Esses erros podem ser de dois tipos: sistemáticos e aleatórios.

O erro sistemático é uma componente do erro de medição que, em medições repetidas, permanece constante ou varia de maneira previsível. O valor de referência para um erro sistemático é um valor verdadeiro, ou valor medido de um padrão com incerteza de medição desprezável, ou um valor convencional. Num erro sistemático as suas causas podem ser conhecidas ou desconhecidas e pode-se aplicar uma correção para compensar um erro sistemático conhecido [7].

O erro aleatório é uma componente dos erros de medição que, em medições repetidas, varia de maneira imprevisível. O valor de referência para um erro aleatório é a média que resultaria de um número infinito de medições repetidas da mesma mensuranda. Os erros aleatórios de um conjunto de medições repetidas formam uma distribuição que pode ser resumida pela sua esperança matemática, a qual é geralmente assumida como sendo zero, e pela sua variância. Este erro é calculado através da diferença entre o erro de medição e o erro sistemático.

#### 5.1.1. Incerteza de Medição

A incerteza de medição, é o parâmetro não negativo, associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos à mensuranda [7].

A incerteza de medição é constituída por componentes provenientes de efeitos sistemáticos, isto é, componentes associados a correções e a valores atribuídos a padrões, assim como a incerteza

definicional. As vezes, não são corrigidos efeitos sistemáticos estimados mas, em vez disso, são incorporadas componentes de incerteza de medição associadas.

Para calcular a estimativa de incerteza, geralmente usa-se o procedimento descrito por “*Guide to expression of uncertainty in measurement*” de acordo com os seguintes passos [10]:

- Expressar em termos matemáticos a dependência da mensuranda  $Y$  em relação às grandezas de entrada  $x_i$ ;
- Listar todas as componentes de incerteza;
- Avaliar o tipo de incerteza (A e B);
- Calcular a incerteza-padrão para cada componente da incerteza;
- Calcular os respectivos coeficientes de sensibilidade;
- Avaliar a necessidade de cálculo de covariâncias;
- Calcular a incerteza combinada;
- Calcular o fator de expansão  $k$ ;
- Determinar a incerteza expandida.

A mensuranda é a grandeza sujeita à medição. Geralmente na calibração trabalha-se apenas com uma única mensuranda ou grandeza de saída  $Y$ , que está dependente de um certo número de grandezas de entrada,  $X_i (i = 1, 2, \dots, N)$ , de acordo com a relação funcional da Equação 5.2:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \qquad \text{Equação 5.2}$$

### 5.1.2. Avaliação da Incerteza de Medição das Grandezas de Entrada

A incerteza de medição é expressa na forma de um desvio-padrão e que está relacionada com as grandezas de entrada, é avaliada de acordo com o método de avaliação “tipo A” ou “tipo B”. A avaliação de tipo A é avaliada a partir da análise estatística de series de observações. A avaliação de tipo B é avaliada a partir de métodos de análises não estatísticas de series de observações [10].

### 5.1.3. Avaliação de Tipo A da Incerteza-Padrão

A avaliação do “tipo A” da incerteza-padrão pode ser aplicada quando são realizadas várias observações independentes para uma das grandezas de entrada  $X_i$  com as mesmas condições de medição.

A grandeza de entrada  $X_i$  se for medida repetidamente é a grandeza  $Q$  com numero de observações ( $n > 1$ ) estatisticamente independentes, a estimativa da grandeza  $Q$  é  $\bar{q}$ , a média aritmética dos valores individualmente observados  $q_j (j = 1, 2, \dots, n)$  (equação 3.3) [10].

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_j \quad \text{Equação 5.3}$$

O desvio-padrão experimental é a raiz quadrada da variância experimental  $s^2(q)$  [10].

$$s(q) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2} \quad \text{Equação 5.4}$$

A incerteza-padrão  $u(\bar{q})$  da estimativa da grandeza de entrada  $\bar{q}$  é o desvio-padrão experimental da média (equação 5.5) [10].

$$u(\bar{q}) = s(\bar{q}) \quad \text{Equação 5.5}$$

#### 5.1.4. Avaliação de Tipo B da Incerteza-Padrão

Na avaliação do “tipo B” a incerteza associada  $u(x_i)$  é fundamentada numa análise científica, que se assenta em toda a informação disponível sobre a variabilidade possível do  $X_j$ . A este grupo fazem parte os seguintes valores procedentes de [10]:

- Dados de medições prévias;
- Experiencia e/ou conhecimento geral do comportamento da mensuranda da instrumentação e propriedades dos materiais instrumentos;
- Especificações dos fabricantes;
- Dados fornecidos em calibrações e outros certificados;
- Incertezas atribuídas a dados de referência de manuais e outros.

Para diferentes tipos de valores aplicam-se diferentes distribuições de probabilidades como por exemplo: distribuição normal, distribuição retangular e distribuição triangular.

### Distribuição Normal

A figura 5.1 representa uma distribuição normal, quando a estimativa  $X_i$  é retirada de certificados de calibração e especificações de fabricantes, a incerteza-padrão é calculada através da divisão desse valor de incerteza,  $a$ , pelo valor do fator de expansão,  $k$  [10]:

$$u(x_i) = \frac{a}{k} \quad \text{Equação 5.6}$$

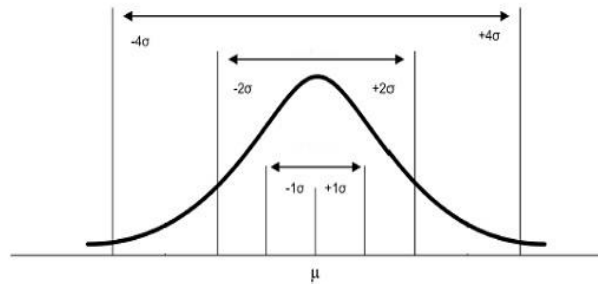


Figura 5.1- Distribuição normal

### Distribuição Retangular

A figura 5.2 representa uma distribuição retangular, esta é usada em casos em que os conhecimentos não são suficientes, mas é possível calcular os valores dos limites superiores e inferiores da grandeza  $X_i$ . A incerteza padrão é obtida através da Equação 5.7:

$$u(x_i) = \frac{(a_+ - a_-)}{\sqrt{12}} \quad \text{Equação 5.7}$$

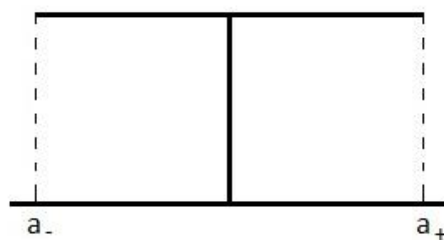


Figura 5.2- Distribuição retangular

### Distribuição Triangular

A figura 5.3 representa uma distribuição triangular, esta é utilizada em distribuições de incertezas com uma probabilidade maior de ocorrer próximo do valor central. Se se considerar que  $2a$  corresponde à largura do intervalo de valores dados à distribuição triangular, a incerteza padrão é obtida através da Equação 3.8 [10]:

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{6}}$$

**Equação 5.8**

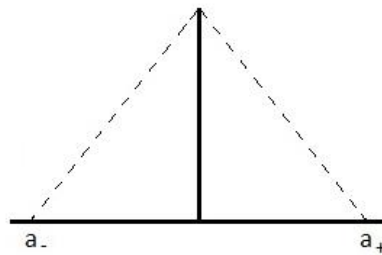


Figura 5.3 - Distribuição triangular

### 5.1.5. Avaliação da Incerteza-Padrão da Estimativa da Grandeza de Saída

Se as grandezas de entrada não forem correlacionadas entre si, o quadrado da incerteza da estimativa da grandeza de saída  $y$  é dada pela Equação 5.9 [10]:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y)$$

**Equação 5.9**

O contributo de  $u_i(y)$  para o cálculo da incerteza-padrão que está relacionada com a estimativa da grandeza de saída  $y$ , que resulta da incerteza-padrão associada à estimativa da grandeza de entrada  $x_i$  da origem à Equação 5.10 [10]:

$$u_i(y) = c_i u(x_i)$$

**Equação 5.10**

O coeficiente de sensibilidade está associado à estimativa da grandeza de entrada  $x_i$  e mostra que a estimativa de grandeza de saída  $y$  sobre influência por cada estimativa de entrada  $x_i$ .

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}$$

**Equação 5.11**

Quando as grandezas de entrada são correlacionados, é necessário ter em conta as covariâncias associadas, sendo consideradas um tributo adicional para a incerteza. Para estes casos é considerada a lei da propagação:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N c_i c_j u(x_i, x_j) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (1/2 c_{ij}^2 + c_{ijj}) u^2(x_i) u^2(x_j)$$

**Equação 5.12**

### 5.1.6. Incerteza de Medição Expandida

A incerteza de medição expandida  $U$ , é calculada através da multiplicação da incerteza-padrão da estimativa da grandeza de saída  $u(y)$  pelo fator de expansão  $k$  [10]:

$$U = k u(y) \tag{Equação 5.13}$$

A estimativa do fator de expansão  $k$ , corresponde a uma determinada probabilidade expandida que considere a fiabilidade da incerteza-padrão  $u(y)$  da estimativa da grandeza de saída  $y$ .

A fiabilidade da incerteza-padrão da estimativa de saída é calculada pelo número de graus de liberdade efetivos  $v_{ef}$ , que é representado pela combinação dos números de graus de liberdade efectivos das diferentes contribuições para a incerteza  $u_i(y)$ .

O número de graus de liberdade efetivos  $v_{ef}$  da incerteza-padrão é calculado pela fórmula de Welch-Satterthwaite [10]:

$$v_{ef} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}} \tag{Equação 5.14}$$

Onde  $u_i(y)$ . ( $i = 1, 2, \dots, N$ ), definidos pela equação 5.14, contribuem para a incerteza-padrão da estimativa da saída  $y$ , resultantes das incertezas-padrão das estimativas da entrada  $x_i$ .

Para uma incerteza-padrão  $u(\bar{q})$  que se obtem através de uma avaliação de tipo A, o número de graus de liberdade é dado por  $v_i = n - 1$ . Se estes forem obtidos por uma avaliação do tipo B, são definidos limites inferiores e superiores a  $a_-$  e  $a_+$  sendo estes geralmente escolhidos para que a probabilidade da grandeza esteja fora destes limites seja extremamente pequena. Logo os graus de liberdade são considerados como  $v_i \rightarrow \infty$  [10].

A tabela 5.1 é baseada numa distribuição  $t$  de Student que está avaliada para uma probabilidade expandida de 95,45%. Caso o valor calculado de  $v_{ef}$  não for inteiro, trunca-se  $v_{ef}$  para o inteiro imediatamente inferior.

Tabela 5.1- Fatores de expansão  $k$  para diferentes números de graus de liberdade efetivos  $v_{ef}$

$v_{ef}$	1	2	3	4	5	6	7	8	10	20	50	$\infty$
$k$	13,97	4,53	3,31	2,87	2,65	2,52	2,43	2,37	2,28	2,13	2,05	2,00

O resultado completo da medição consiste na estimativa  $y$  da mensuranda e na incerteza expandida associada  $U$ , ou seja [10]:

$$Y = y \pm U \quad \text{Equação 5.15}$$

### 5.1.7. Cálculo das Incertezas na Calibração de Termómetros e Sensores de Temperatura

O modelo matemático, para a calibração de um termómetro por comparação com um termómetro padrão, pode ser descrito genericamente pela expressão do erro de medição [ $\varepsilon = t_s - t_{ref}$ ], que aplicado à leitura do termómetro em calibração ( $t_s$ ) corresponderá à temperatura do meio estabelecida pelo termómetro padrão ( $t_{ref}$ )

A temperatura do sensor depende das seguintes correções:

$$t_s = \varepsilon - t_{ref} + \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4 + \delta_5 + \delta_6$$

$\varepsilon$ : erro de medição

$t_{ref}$ : temperatura do termómetro padrão

$\delta_1$ : correção devida à calibração do padrão

$\delta_2$ : correção devida à estabilidade do padrão

$\delta_3$ : correção devida ao equipamento de leitura

$\delta_4$ : correção devida à uniformidade do banho

$\delta_5$ : correção devida à resolução da unidade de leitura do sensor

$\delta_6$ : correção devida à reprodutibilidade

No modelo de calibração as grandezas descritas não são correlacionadas podendo ser apresentadas de acordo com:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y) = u_a^2 + u_{b1}^2 + u_{b2}^2 + u_{b3}^2 + u_{b4}^2 + u_{b5}^2 + u_{b6}^2 \quad \text{Equação 5.16}$$

No que diz respeito aos coeficientes de sensibilidade, estes são apresentados em cada um dos quadros dos balanços de incerteza.

As incertezas de medição  $u_i(y)$  das estimativas das grandezas de entrada, intervêm na calibração de um termómetro de temperatura e estão associadas de acordo com o modelo matemático apresentado em 3.2 “Calibração”:

- Repetibilidade das medições efetuadas, onde a componente de incerteza é avaliada pelo método do tipo A,  $u_a$ , e é obtida através do cálculo do desvio-

padrão da média dos erros de medição

$$u_a = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad \text{Equação 5.17}$$

- Calibração de padrões utilizados, onde a componente de incerteza é avaliada pelo método de tipo B,  $u_{b1}$ , e é obtida através do cálculo das incertezas expandidas,  $U_{calib}$  dos certificados de calibração,  $k = 2$ ;

$$u_{b1} = \frac{U_{calib}}{2} \quad \text{Equação 5.18}$$

- Equipamento de leitura do padrão (ponte resistência, voltímetro ou unidade de leitura do pirômetro ótico) onde a componente de incerteza é avaliada pelo método de tipo B,  $u_{b2}$ , e é obtida através do certificado de calibração, da informação do fabricante, do certificado de calibração da resistência fixa e do valor da resistência do PRT (no caso de se utilizar uma ponte);
- Estabilidade dos meios termorreguladores, onde a componente de incerteza é avaliada pelo método de tipo B,  $u_{b3}$ , e é obtida através do estudo de estabilidade desses meios, onde foi considerada uma distribuição normal;
- A contribuição para a incerteza de medição proveniente da emitância, incerteza do tipo B,  $u_{b4}$ , é obtida a partir das fórmulas e tabelas representadas no Anexo III, baseadas na norma BS 1041 (distribuição de probabilidade retangular) [10];
- A repetibilidade das medições efetuadas pelo pirômetro incerteza tipo A –  $u_{a2}$  obtida pelo cálculo do desvio-padrão da média das medições;
- A resolução da unidade de leitura, incerteza tipo B,  $u_{b5}$ , obtida considerando a resolução igual a  $2^a$  e a distribuição de probabilidade retangular;
- Reprodutibilidade das medições, de variação máxima dos valores,  $2a$ , onde a componente de incerteza é avaliada pelo método de tipo B,  $u_{b6}$ , e foi considerada uma distribuição retangular.

As tabelas 5.2 e 5.3 apresentam os balanços das incertezas na medição da temperatura termodinâmica, para os limites das medições das temperaturas deste trabalho. As tabelas 5.4 e 5.5 apresentam o balanço das incertezas da calibração do pirômetro para o intervalo de medição em estudo.

O número de graus de liberdade efetivo foi calculado através da formula de Welch-Satherwaite, este numero associado as incertezas de tipo A ou B, com distribuição normal é dado por.

$v_i = n - 1$ . Quando as avaliações são do tipo B, com distribuição retangular e são considerados limites de variações o número de graus de liberdade tende para infinito,  $\infty$ . Nos restantes casos,  $v_i = 50$ , foram considerados limites de variações fiáveis a 10%:

$$v_i \cong \frac{1}{2} \frac{u^2(x_i)}{\sigma^2[u(x_i)]} \cong \frac{1}{2} \left[ \frac{\Delta u(x_i)}{u(x_i)} \right]^{-2} = 50 \quad \text{Equação 5.19}$$

### 5.1.8. Demonstração dos Cálculos das Componentes de Incerteza

#### Componentes da incerteza ao padrão utilizado – Termopar tipo S

– Se  $300 \text{ °C} \leq t \leq 600 \text{ °C}$ :

Certificado de calibração:  $U_{\text{calibração}} = 0,5 \text{ °C}$

$$u_{b_1} = \frac{U_{\text{calibração}}}{2} = 0,25 \text{ °C}$$

– Se  $600 \text{ °C} \leq t \leq 900 \text{ °C}$ :

Certificado de calibração:  $U_{\text{calibração}} = 0,7 \text{ °C}$

$$u_{b_1} = \frac{U_{\text{calibração}}}{2} = 0,35 \text{ °C}$$

– Se  $900 \text{ °C} \leq t \leq 1050 \text{ °C}$ :

Certificado de calibração:  $U_{\text{calibração}} = 1 \text{ °C}$

$$u_{b_1} = \frac{U_{\text{calibração}}}{2} = 0,5 \text{ °C}$$

#### Componente de incerteza devida ao meio termorregulado utilizado

A uniformidade e a estabilidade dos meios termorreguladores foram determinadas no laboratório. A incerteza  $u_{b_4}$  obtém-se através do estudo da estabilidade com uma distribuição normal e a incerteza  $u_{b_5}$  obtém-se através do estudo da uniformidade com a distribuição retangular.

#### Componente da incerteza devida ao instrumento de medição a calibrar – Voltímetro

A variância é calculada segundo a equação 5.23:

$$s_{nV}^2 = (\text{f. e. m})^2 \times 8,59 \times 10^{-9} \text{ (mV)}^2$$

E através da curva de calibração do termopar, indicando a variação de temperatura  $\Delta t$  (°C) que corresponde a uma variação de f.e.m. igual a 1 mV:

$$u_{b_6} = (\text{f. e. m} \times 9,27 \times 10^{-5} \times \Delta t) \text{ °C}$$

### 5.1.9. Cálculos Finais do Balanço das Incertezas

De acordo com as equações apresentadas anteriormente e com o auxílio do programa Excel foram calculados todos os componentes para ser possível obter o valor das incertezas do padrão de calibração em estudo. As tabelas seguintes representam o balanço de incertezas na medição de temperatura termodinâmica da cavidade do corpo negro seguindo-se de tabelas para o balanço das incertezas para a calibração do pirômetro apenas para as temperaturas de 300 °C e 1050 °C.

Tabela 5.2- Balanço das incertezas de medição da temperatura termodinâmica da cavidade do corpo negro para 300 °C

t = 300 °C										
Fonte da Incerteza	SÍMBOLO	Valor	LIMITE SUPERIOR DE ERRO	INCERTEZA $u(x)$	DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE	DIVISOR	COEFICIENTE DE SENSIBILIDADE	CONTRIBUIÇÃO PARA A INCERTEZA	VARIÂNCIA	Nº DE GRAUS DE LIBERDADE
							CI	$u_i(y)$ °C	$u_i^2(y)$ °C <sup>2</sup>	
<b>TIPO A</b>										
a1: Repetibilidade	TS	°C		8,42E-04	Combinada	1	1	8,418E-04	7,0863E-07	9
<b>TIPO B</b>										
b1: Calibração	TS	°C		0,4	Normal	2	1	0,2000	4,0000E-02	50
b2: Unidade de Leitura Nanovoltímetro	mV	2,3177		2,15E-04	Combinada	1	111	2,387E-02	5,6967E-04	∞
b3: Estabilidade do forno	Cs	°C		0,0027	Normal	1	1	2,662E-03	7,0863E-06	9
b4: Valor da Emitância	CN inconel	adim.	-0,03		Retangular	1,73	1	-0,0171	2,9392E-04	50
					Variância (TOTAL)				4,0871E-02	
					Incerteza combinada				0,20	
					Incerteza Expandida	2			0,40	835

Tabela 5.3- Balanço da incerteza na medição da temperatura termodinâmica da cavidade do corpo negro para 1050 °C

t = 1050 °C										
Fonte da Incerteza	SÍMBOLO	Valor	LIMITE SUPERIOR DE ERRO	INCERTEZA $u(x)$	DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE	DIVISOR	COEFICIENTE DE SENSIBILIDADE	CONTRIBUIÇÃO PARA A INCERTEZA	VARIÂNCIA	Nº DE GRAUS DE LIBERDADE
							CI	$u_i(y)$ °C	$u_i^2(y)$ °C <sup>2</sup>	
<b>TIPO A</b>										
a1: Repetibilidade	TS	°C		1,74E-02	Combinada	1	1	1,743E-02	3,0368E-04	9
<b>TIPO B</b>										
b1: Calibração dos PRTs	TS	°C		1	Normal	2	1	0,5000	2,5000E-01	50
b2: Unidade de Leitura Nanovoltímetro	mV	10,1502		9,41E-04	Combinada	1	83	7,840E-02	6,1458E-03	∞
b3: Estabilidade do forno	Na	°C		0,0551	Normal	1	1	5,511E-02	3,0368E-03	9
b4: Valor da Emitância	CN inconel	adim.	-0,16		Retangular	1,73	1	-0,0913	8,3431E-03	50
					Variância (TOTAL)				2,6783E-01	
					Incerteza combinada				0,52	
					Incerteza Expandida	2			1,04	916

Tabela 5.4- Balanço da incerteza na calibração do pirômetro por infravermelhos para 300 °C

t =300 °C										
Fonte da Incerteza	SÍMBOLO	VALOR	LIMITE SUPERIOR DE ERRO	INCERTEZA $u(x)$	DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE	DIVISOR	COEFICIENTE DE SENSIBILIDADE	CONTRIBUIÇÃO PARA A INCERTEZA	VARIÂNCIA	Nº DE GRAUS DE LIBERDADE
							CI	$u_i(y)$ °C	$u_i^2(y)$ °C <sup>2</sup>	
<b>TIPO A</b>										
a2: Repetibilidade										
<b>Pirômetro</b>				0,000	Normal			0,00	3,5902E-28	9
<b>TIPO B</b>										
b5: Resolução da Unidade de Leitura										
<b>Pirômetro</b>	°C		0,05		Retangular	1,732	1	0,028867513	8,3333E-04	∞
b1 a b4: Temperatura Termodinâmica										
<b>Cavidade Corpo Negro</b>	°C			0,20	Normal	1	1	0,202166734	4,0871E-02	835
b6: Repetibilidade										
<b>Pirômetro</b>	°C		0,35		Retangular	1,732	1	0,201763039	4,0708E-02	50
				Variância (TOTAL)					8,2413E-02	
				Incerteza combinada					0,29	193
				Incerteza Expandida					2	0,57

Tabela 5.5- Balanço da incerteza na calibração do pirômetro por infravermelhos para 1050 °C

t =1050 °C										
Fonte da Incerteza	SÍMBOLO	VALOR	LIMITE SUPERIOR DE ERRO	INCERTEZA $u(x)$	DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE	DIVISOR	COEFICIENTE DE SENSIBILIDADE	CONTRIBUIÇÃO PARA A INCERTEZA	VARIÂNCIA	Nº DE GRAUS DE LIBERDADE
							CI	$u_i(y)$ °C	$u_i^2(y)$ °C <sup>2</sup>	
<b>TIPO A</b>										
a2: Repetibilidade										
<b>Pirômetro</b>				0,0000	Normal			0,00	5,7443E-27	9
<b>TIPO B</b>										
b5: Resolução da Unidade de Leitura										
<b>Pirômetro</b>	°C		0,05		Retangular	1,732	1	0,028867513	8,3333E-04	∞
b1 a b4: Temperatura Termodinâmica										
<b>Cavidade Corpo Negro</b>	°C			0,52	Normal	1	1	0,517522384	2,6783E-01	916
b6: Repetibilidade										
<b>Pirômetro</b>	°C		0,04		Retangular	1,732	1	0,024852904	6,1767E-04	50
				Variância (TOTAL)					2,6928E-01	
				Incerteza combinada					0,52	926
				Incerteza Expandida					2	1,04

## 5.2. Discussão de Resultados

Nas tabelas que se seguem estão apresentados os resultados finais deste trabalho experimental.

Na tabela 5.6 a coluna “Temperatura de referência” representa a temperatura a que o forno foi programado, ou seja, a temperatura escolhida para fazer o estudo. A coluna “temperatura do padrão TS1” diz respeito às medições realizadas através do termopar, estes valores foram obtidos pelo LabVIEW, onde foram retirados os últimos dez valores, transferidos para o Excel, e convertidos em temperatura com o auxílio de uma folha de cálculo de interpolação, por fim foi realizada uma média desses valores para ser comparada com os valores obtidos pelo pirômetro. A coluna “temperatura indicada pelo pirômetro” corresponde ao valor lido pelo pirômetro durante a medição. A coluna “incerteza” corresponde à incerteza de medição obtida. A coluna “Erro” é a diferença entre o valor da temperatura do pirômetro e o valor da temperatura obtido pelo termopar (padrão).

A emissividade correspondente ao corpo negro utilizado foi de 0,9990 para o tubo de calor de céσιο, e 0,9995 para o tubo de calor de sódio. Estes dados foram fornecidos pelo Laboratório de Temperatura do IPQ.

### 5.2.1. Resultados da Calibração do Pirómetro

Tabela 5.6- Resultados obtidos na calibração do pirómetro MIKRO 190

Temperatura de referência °C	Temperatura do padrão TS1 °C	Desvio padrão da média das medições do TS1	Temperatura indicada pelo pirómetro °C	Incerteza °C	Erro °C
300	300,06	0,0008	299,1	0,6	-1,0
350	350,51	0,0005	348,6	0,5	-1,9
400	400,68	0,0004	399,6	0,5	-1,1
450	450,55	0,0010	450,5	0,5	0,0
500	501,48	0,0137	501,6	0,5	0,1
550	550,68	0,0004	551,2	0,6	0,5
600	599,98	0,0004	601,1	0,5	1,1
650	650,18	0,0006	651,9	0,7	1,7
700	700,45	0,0009	697,1	0,7	-3,3
750	750,59	0,0015	750,3	0,7	-0,3
800	800,81	0,0009	801,5	0,7	0,7
850	850,84	0,0004	852,2	0,7	1,4
900	900,60	0,0004	902,1	0,8	1,5
950	950,37	0,0023	952,0	1,1	1,6
1000	997,26	0,0039	999,7	1,0	2,4
1050	1047,91	0,0174	1051,6	1,0	3,7

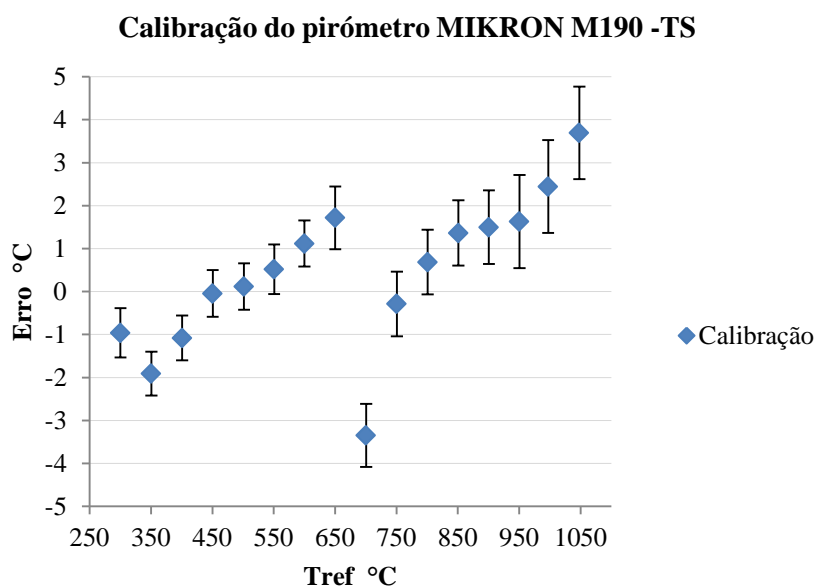


Figura 5.4- Representação gráfica das medições realizadas pelo pirómetro

Analisando o gráfico acima representado, pode-se verificar que o pirômetro tem um comportamento estável. Nas temperaturas iniciais um dos fatores que pode influenciar estes erros são as condições do meio ambiente. À temperatura de 700 °C o pirômetro tem um comportamento aparentemente atípico, mas segundo a calibração do fabricante é um comportamento característico deste pirômetro.

No Anexo IV encontra-se a tabela e os gráficos correspondentes aos valores da repetição da calibração.

### 5.2.2. Resultados do Comportamento do Efeito do Tamanho da Fonte do Pirômetro

Os gráficos e tabelas em seguida representados referem-se ao estudo do efeito do tamanho da fonte do pirômetro. Primeiramente o diafragma foi colocado a 650 mm de distância da mira do pirômetro, com uma abertura inicial 12 mm. Este processo foi realizado a 300 °C, 550 °C, 600 °C e 1050 °C.

Tabela 5.7- Resultados obtidos das medições efetuadas com temperatura de 300 °C, à distância de 650 mm, e abertura do diafragma inicialmente a 12 mm

Temperatura de referência °C	Diâmetro mm	Temperatura do padrão TS1 °C	Temperatura indicada pelo pirômetro °C	Incerteza °C	Erro °C
300 °C	12	301,39	287,2	0,4	-14,2
	13	301,39	291,7	0,4	-9,7
	14	301,39	293,1	0,4	-8,3
	15	301,39	295,2	0,4	-6,2
	16	301,39	296,1	0,4	-5,3
	17	301,39	296,8	0,4	-4,6
	18	301,39	297,2	0,4	-4,2
	19	301,39	297,5	0,4	-3,9
	20	301,39	297,8	0,4	-3,6
	21	301,39	298,0	0,4	-3,4
	22	301,39	298,0	0,4	-3,4
	23	301,39	298,1	0,4	-3,3

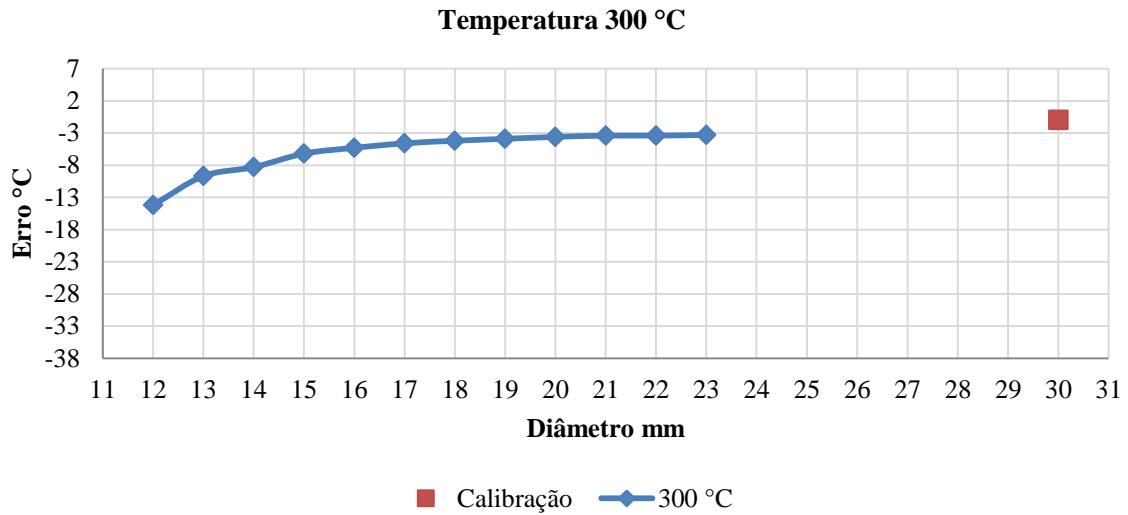


Figura 5.5- Representação gráfica das medições realizadas com temperatura de 300 °C, à distância de 650 mm, e abertura de diafragma a partir de 12 mm

Tabela 5.8- Resultados obtidos das medições efetuadas com temperatura de 550 °C, à distância de 650 mm, e abertura do diafragma inicialmente a 12 mm

Temperatura de referência °C	Diâmetro mm	Temperatura do padrão TS1 °C	Temperatura indicada pelo pirômetro °C	Incerteza °C	Erro °C
550 °C	12	550,73	535,0	0,5	-15,7
	13	550,73	543,8	0,5	-6,9
	14	550,73	547,1	0,5	-3,6
	15	550,73	547,3	0,5	-3,4
	16	550,73	548,2	0,5	-2,5
	17	550,73	549,6	0,5	-1,1
	18	550,73	550,3	0,5	-0,4
	19	550,73	551,0	0,5	0,3
	20	550,73	551,3	0,5	0,6
	21	550,73	551,4	0,5	0,7
	22	550,73	551,5	0,5	0,8
	23	550,73	551,6	0,5	0,9
	24	550,73	551,6	0,5	0,9

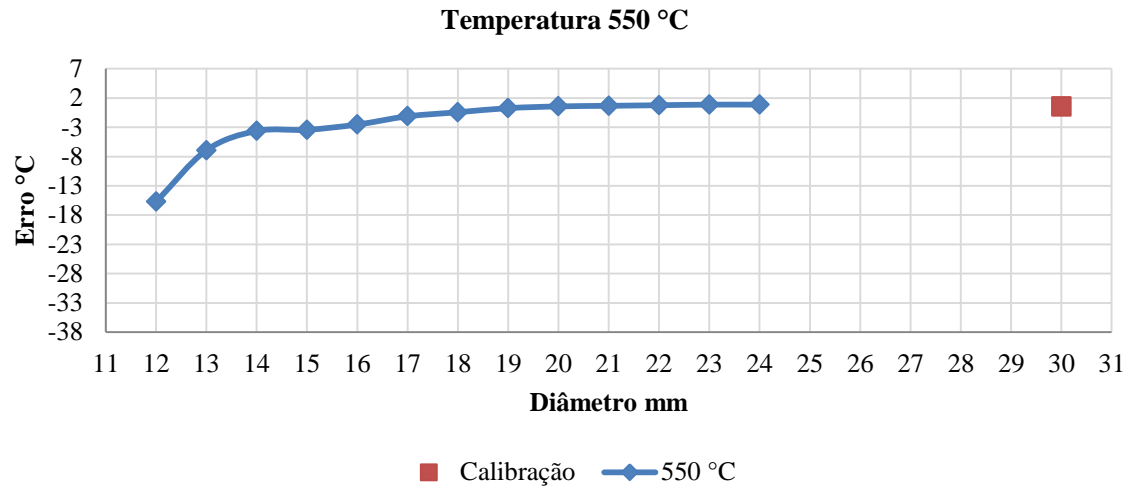


Figura 5.6- Representação gráfica das medições realizadas com temperatura de 550 °C, à distância de 650 mm, e abertura do diafragma a partir de 12 mm

Tabela 5.9- Resultados obtidos das medições efetuadas com temperatura de 600 °C, à distância de 650 mm, e abertura do diafragma inicialmente a 12 mm

Temperatura de referência °C	Diâmetro mm	Temperatura do padrão TS1 °C	Temperatura indicada pelo pirômetro °C	Incerteza °C	Erro °C
<b>600 °C</b>	12	600,13	585,8	0,5	-14,3
	13	600,13	591,1	0,5	-9,0
	14	600,13	596,2	0,5	-3,9
	15	600,13	598,2	0,5	-1,9
	16	600,13	599,7	0,5	-0,4
	17	600,13	600,1	0,5	0,0
	18	600,13	600,6	0,5	0,5
	19	600,13	600,8	0,5	0,7
	20	600,13	601,1	0,5	1,0
	21	600,13	601,2	0,5	1,1

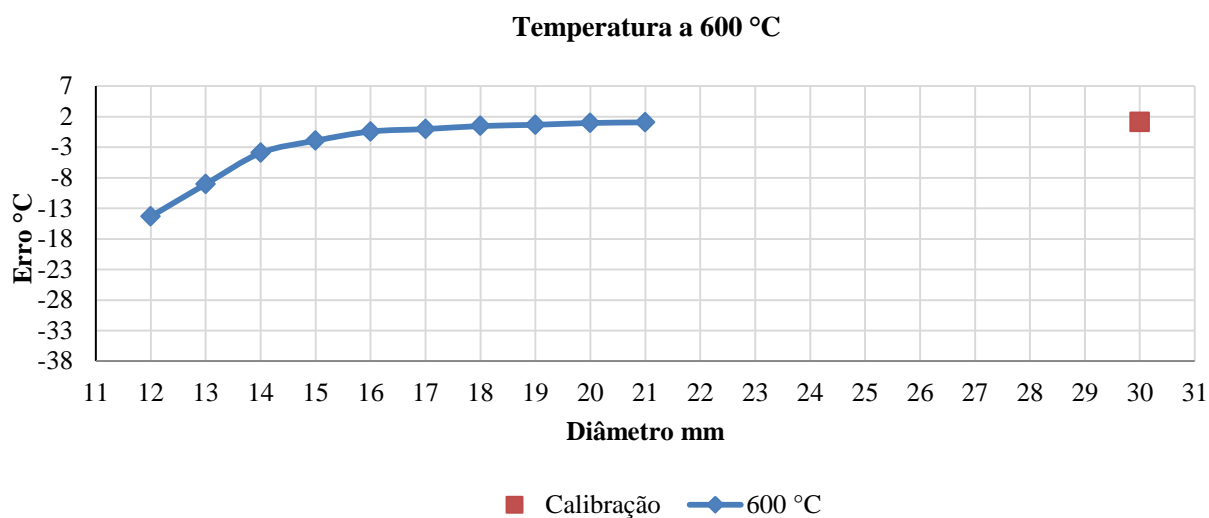


Figura 5.7- Representação gráfica das medições realizadas com temperatura de 600 °C, à distância de 650 mm, e abertura de diafragma a partir de 12 mm

Tabela 5.10- Resultados obtidos das medições efetuadas com temperatura de 1050 °C, à distância de 650 mm, e abertura do diafragma inicialmente a 12 mm

Temperatura de referência °C	Diâmetro mm	Temperatura do padrão TS1 °C	Temperatura indicada pelo pirômetro °C	Incerteza °C	Erro °C
1050 °C	12	1052,51	1018,3	1,1	-34,2
	13	1052,51	1035,4	1,1	-17,1
	14	1052,51	1038,6	1,1	-13,9
	15	1052,51	1043,9	1,1	-8,6
	16	1052,51	1048,1	1,1	-4,4
	17	1052,51	1050,7	1,1	-1,8
	18	1052,51	1051,8	1,1	-0,7
	19	1052,51	1052,6	1,1	0,1
	20	1052,51	1053,1	1,1	0,6
	21	1052,51	1053,5	1,1	1,0
	22	1052,51	1053,7	1,1	1,2
	23	1052,51	1053,7	1,1	1,2

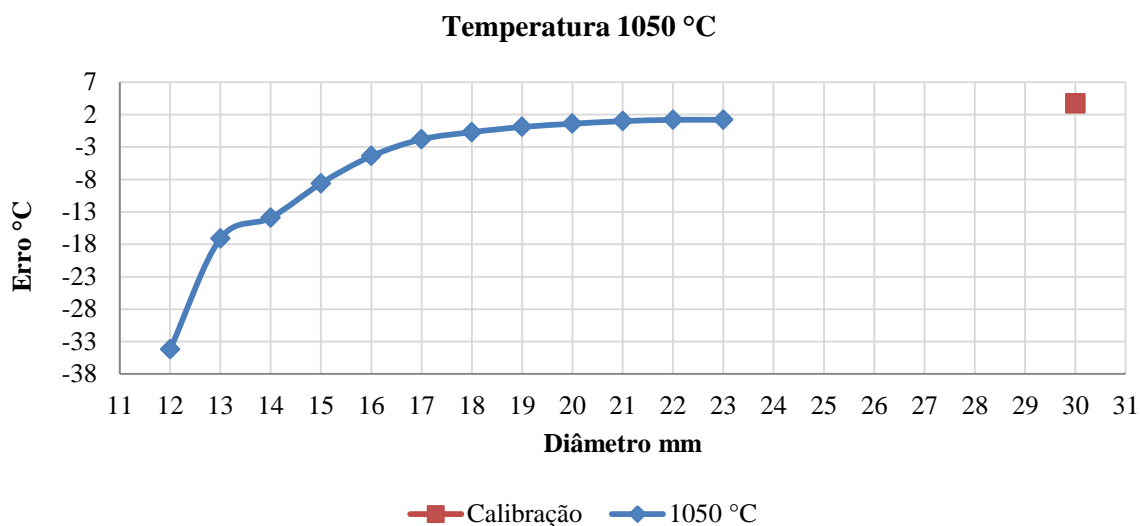


Figura 5.8- Representação gráfica das medições realizadas com temperatura de 1050 °C, à distância de 650 mm, e abertura de diafragma a partir de 12 mm

Nos gráficos acima representados, a vermelho apresenta-se o valor do erro na calibração do pirómetro em cada temperatura, e a curva azul representa o erro de temperatura com o aumento do diâmetro da abertura do diafragma.

O primeiro ponto da curva foi obtido com uma abertura de 12 mm, que segundo os cálculos realizados anteriormente, seria o valor teórico de abertura para o efeito do tamanho da fonte, ou seja, o erro de temperatura obtido com este diâmetro teria um valor muito próximo ao valor obtido na calibração, mas como se pode observar através do gráfico, isso não acontece, tendo um erro muito superior. Após essa verificação a abertura do diafragma foi aumentada de 1 mm em 1 mm até ser atingida um valor de temperatura estável e semelhante ao valor de temperatura obtido na calibração, o que significaria que o erro iria ser próximo do obtido na calibração. A estabilização do erro foi alcançada quando a abertura do diafragma atingiu valores superiores a 21 mm em todas as temperaturas, isto significa que o valor de 12 mm calculado teoricamente para o efeito do tamanho da fonte está com um erro de cerca de 9 mm da realidade.

Os valores dos erros de medição nas temperaturas de 300 °C e 1050 °C, realizados neste estudo para as mesmas condições de medição aquando da realização da calibração, diferem dos valores dos erros obtidos na calibração, podendo esta discrepância estar relacionada com a instabilidade do meio termorregulado quando se encontra a trabalhar nos seus limites de utilização.

Os gráficos seguintes apresentam a continuação da análise do efeito do tamanho da fonte tendo especificações diferentes. O diafragma foi colocado a uma distância de 292 mm da mira do pirómetro, e com uma abertura inicial de 20 mm. Estas medições foram realizadas para temperaturas de 300 °C, 550 °C, 600 °C e 1050 °C.

Tabela 5.11- Resultados obtidos das medições efetuadas com temperatura de 300 °C, à distância de 292 mm, e abertura do diafragma inicialmente a 20 mm

Temperatura de referência °C	Diâmetro mm	Temperatura do padrão TS1 °C	Temperatura indicada pelo pirômetro °C	Incerteza °C	Erro °C
300 °C	20	301,39	297,2	0,4	-4,2
	21	301,39	298,0	0,4	-3,4
	22	301,39	298,1	0,4	-3,3
	23	301,39	298,1	0,4	-3,3
	24	301,39	298,1	0,4	-3,3

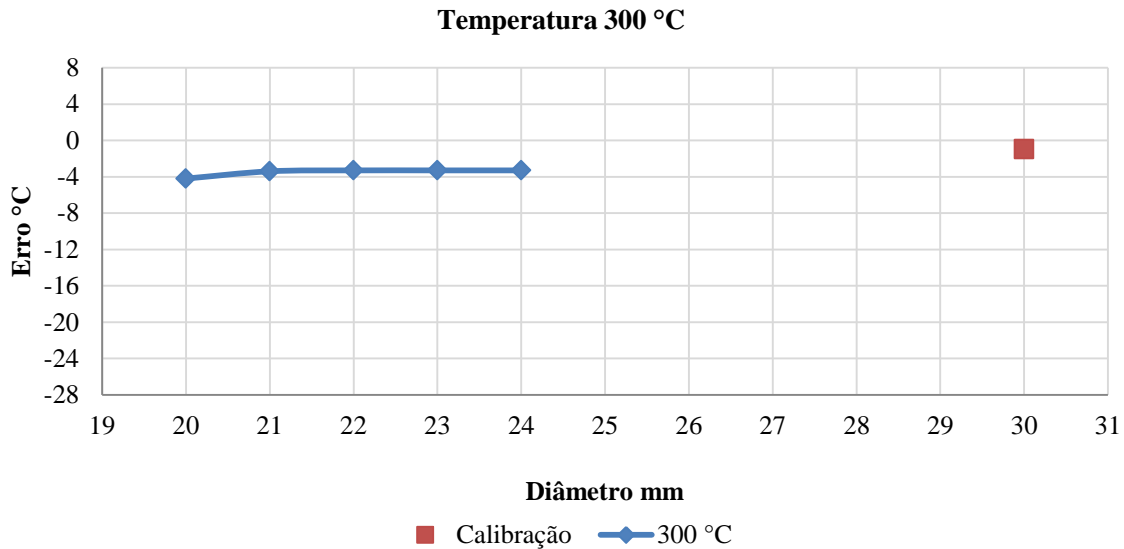


Figura 5.9- Representação gráfica das medições realizadas com temperatura de 300 °C, à distância de 292 mm, e abertura de diafragma a partir de 20 mm

Tabela 5.12- Resultados obtidos das medições efetuadas com temperatura de 550 °C, à distância de 292 mm, e abertura do diafragma inicialmente a 20 mm

Temperatura de referência °C	Diâmetro mm	Temperatura do padrão TS1 °C	Temperatura indicada pelo pirômetro °C	Incerteza °C	Erro °C
550 °C	20	550,73	549,0	0,5	-1,7
	21	550,73	550,7	0,5	0,0
	22	550,73	551,3	0,5	0,6
	23	550,73	551,7	0,5	1,0
	24	550,73	551,8	0,5	1,1
	25	550,73	551,8	0,5	1,1

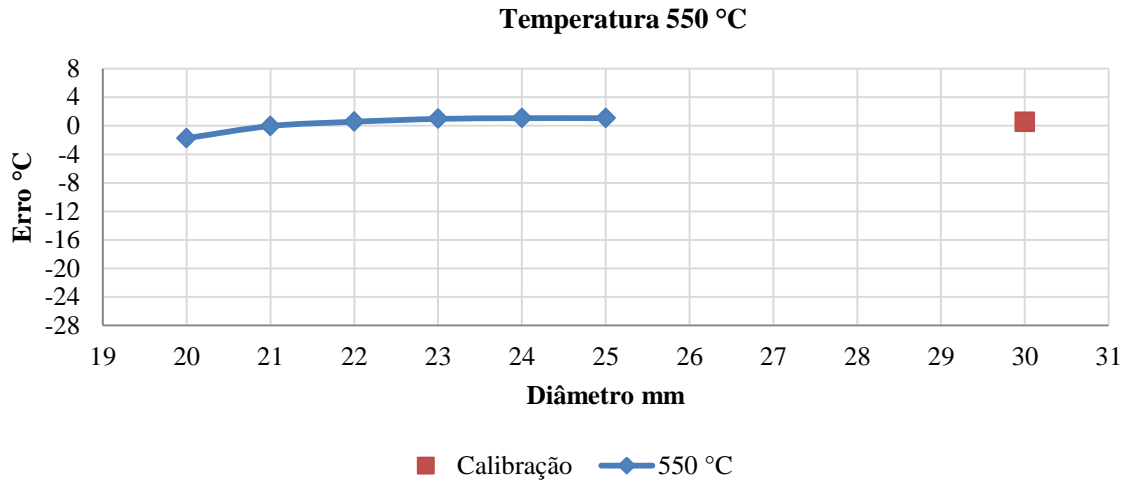


Figura 5.10 - Representação gráfica das medições realizadas com temperatura de 550 °C, à distância de 292 mm, e abertura de diafragma a partir de 20 mm

Tabela 5.13- Resultados obtidos das medições efetuadas com temperatura de 600 °C, à distância de 292 mm, e abertura do diafragma inicialmente a 20 mm

Temperatura de referência °C	Diâmetro mm	Temperatura do padrão TS1 °C	Temperatura indicada pelo pirômetro °C	Incerteza °C	Erro °C
600 °C	20	600,13	598,0	0,5	-2,1
	21	600,13	598,8	0,5	-1,3
	22	600,13	600,2	0,5	0,1
	23	600,13	601,0	0,5	0,9
	24	600,13	601,2	0,5	1,1
	25	600,13	601,3	0,5	1,2

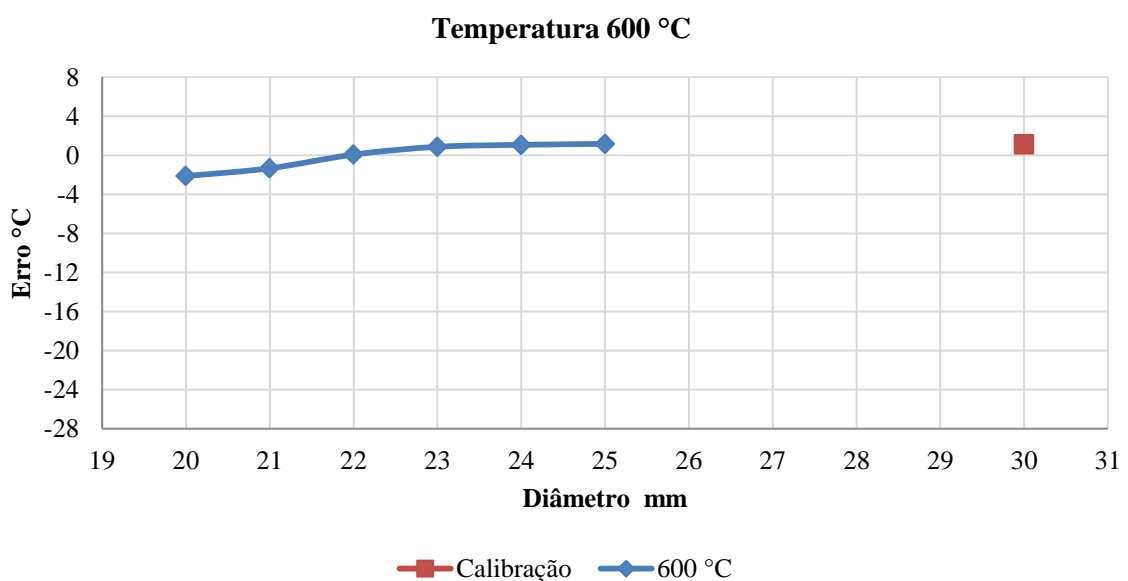


Figura 5.11- Representação gráfica das medições realizadas com temperatura de 600 °C, à distância de 292 mm, e abertura de diafragma a partir de 20 mm

Tabela 5.14- Resultados obtidos das medições efetuadas com temperatura de 1050 °C, à distância de 292 mm, e abertura do diafragma inicialmente a 20 mm

Temperatura de referência °C	Diâmetro mm	Temperatura do padrão TS1 °C	Temperatura indicada pelo pirômetro °C	Incerteza °C	Erro °C
1050 °C	20	1052,51	1026,0	1,1	-26,5
	21	1052,51	1032,6	1,1	-19,9
	22	1052,51	1039,8	1,1	-12,7
	23	1052,51	1046,8	1,1	-5,7
	24	1052,51	1050,1	1,1	-2,4
	25	1052,51	1052,4	1,1	-0,1
	26	1052,51	1053,8	1,1	1,3
	27	1052,51	1054,1	1,1	1,6
	28	1052,51	1054,2	1,1	1,7
	29	1052,51	1054,1	1,1	1,6

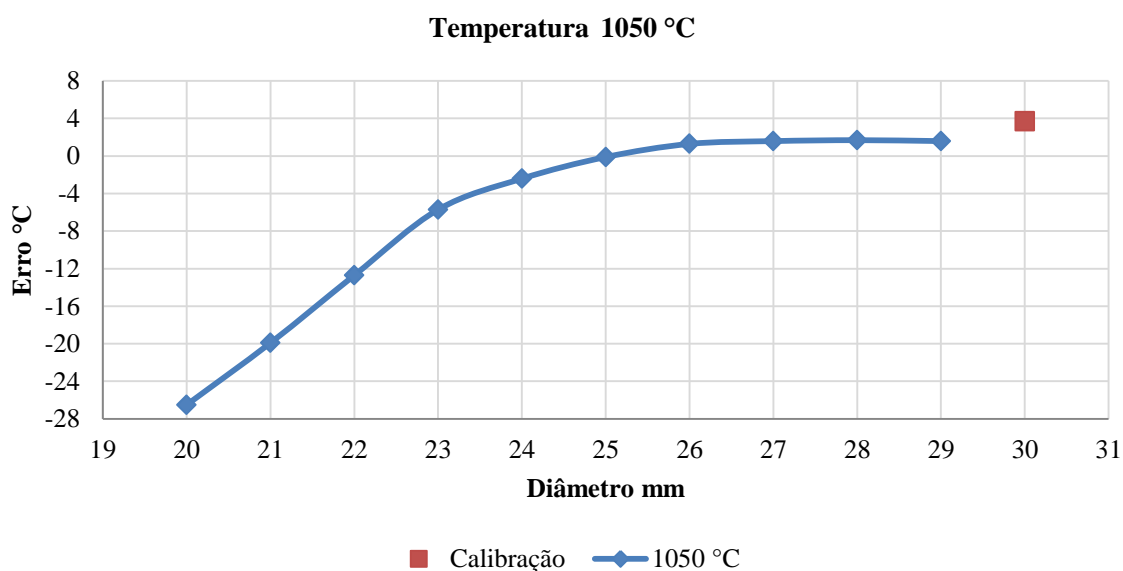


Figura 5.12- Representação gráfica das medições realizadas com temperatura de 1050 °C, à distância de 292 mm, e abertura de diafragma a partir de 20 mm

Nesta segunda análise, o primeiro ponto da curva foi obtido com uma abertura de diafragma de 20 mm, que segundo os cálculos realizados anteriormente, seria o valor teórico calculado para o diâmetro do efeito do tamanho da fonte aquela distância, ou seja, o erro de temperatura obtido com este diâmetro deveria ter um valor próximo ao valor obtido na calibração, mas como é visível através do gráfico, o erro da abertura de 20 mm é novamente superior ao valor da calibração. Após essa verificação o método do estudo anterior foi aplicado novamente aumentando a abertura do diafragma de 1 mm em 1 mm até ser alcançada o valor de temperatura semelhante ao valor de temperatura obtido na calibração. Analisando individualmente, à temperatura de 300 °C obtêm-se valores de erro de medição mais estáveis a partir dos 22 mm, o afastamento do erro de calibração é devido as condições ambientais anteriormente explicadas. Para as temperaturas de 550 °C e 600 °C a estabilidade inicia-se

a partir dos 24 mm e 25 mm de diâmetro (respectivamente). A 1050 °C a estabilidade só é atingida quando o diâmetro da abertura é de 27 mm.

Pode-se concluir que para uma distância de 650 mm da mira do pirômetro, o efeito do tamanho da fonte tem um comportamento muito instável, não apresentado o mesmo tipo de comportamento nas diferentes temperaturas como acontece à distância de 292 mm.

Na figura seguinte foi reproduzida a comparação do efeito do tamanho da fonte teórico, com traço azul e o efeito do tamanho da fonte após os resultados do trabalho experimental, com traço vermelho. Os valores dos diâmetros 24 mm e 21 mm são valores médios retirados dos dados anteriormente expostos, de modo a ser possível uma representação aproximada do efeito do tamanho da fonte, de acordo com os dados experimentais. Esta imagem completa a conclusão anteriormente descrita sendo bastante perceptível a diferença entre os efeitos do tamanho da fonte.

O fato de o valor medido da temperatura sem diafragma relativamente ao com diafragma a 20 mm com 292 mm de distância ser diferente, está relacionado com o a detecção de sinal transmitido pela fonte, quando é colocado o diafragma não ser detetada na sua totalidade.

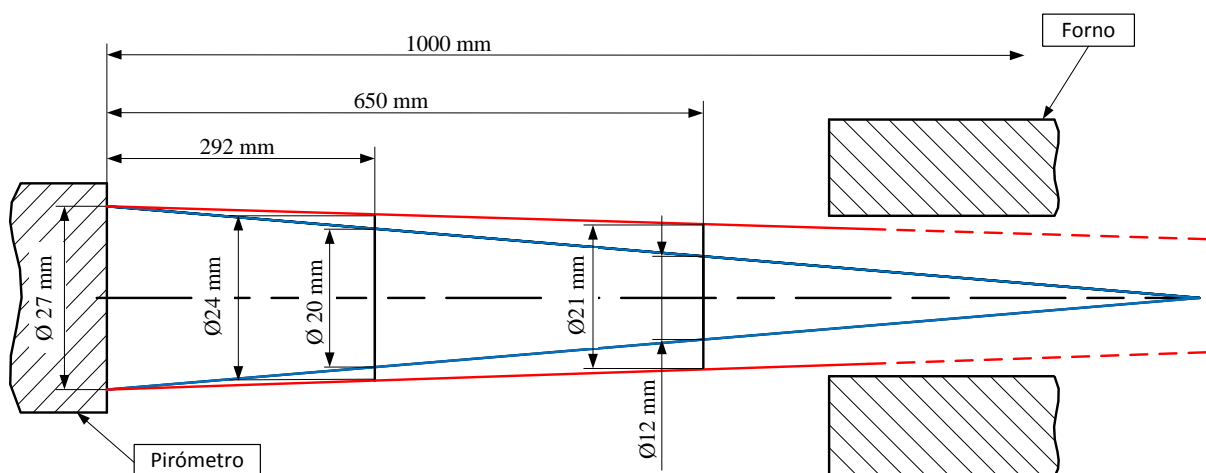


Figura 5.13- Esquema representativo da determinação do efeito do tamanho da fonte teórico e do efeito do tamanho da fonte calculado experimentalmente.

Para concluir o estudo do efeito do tamanho da fonte, foram utilizados dois discos opacos negros com diâmetros de 12 mm e 20 mm, estes foram colocados à distância 650 mm e 292 mm respectivamente, tendo como objetivo fazer o estudo inverso do diafragma e averiguar o efeito do tamanho da fonte nestas condições, ou seja, ao colocar disco opaco negro de 12 mm a uma distância de 650 mm da mira do pirômetro o valor teórico detetado deveria ser nulo, assim como para o caso da colocação do disco de 20 mm a 292 mm. A tabela e o gráfico seguinte apresentam os resultados para estes casos.

Tabela 5.15-Resultaos obtidos das medições efetuadas com o disco opaco de diâmetro 12 mm e 20 mm, à distância 650 mm e 292 mm respetivamente, a várias temperaturas.

Diâmetro mm	Temperatura do padrão TS1 °C	Temperatura indicada pelo pirómetro °C	Incerteza °C	Erro °C
12 mm	301,39	245,0	0,4	-56,4
	550,73	440,0	0,5	-110,7
	600,13	491,9	0,5	-108,2
	1052,51	831,5	1,1	-221,0
20 mm	301,39	241,2	0,4	-60,2
	550,73	341,0	0,5	-209,7
	600,13	434,4	0,5	-165,7
	1052,51	810,1	1,1	-242,4

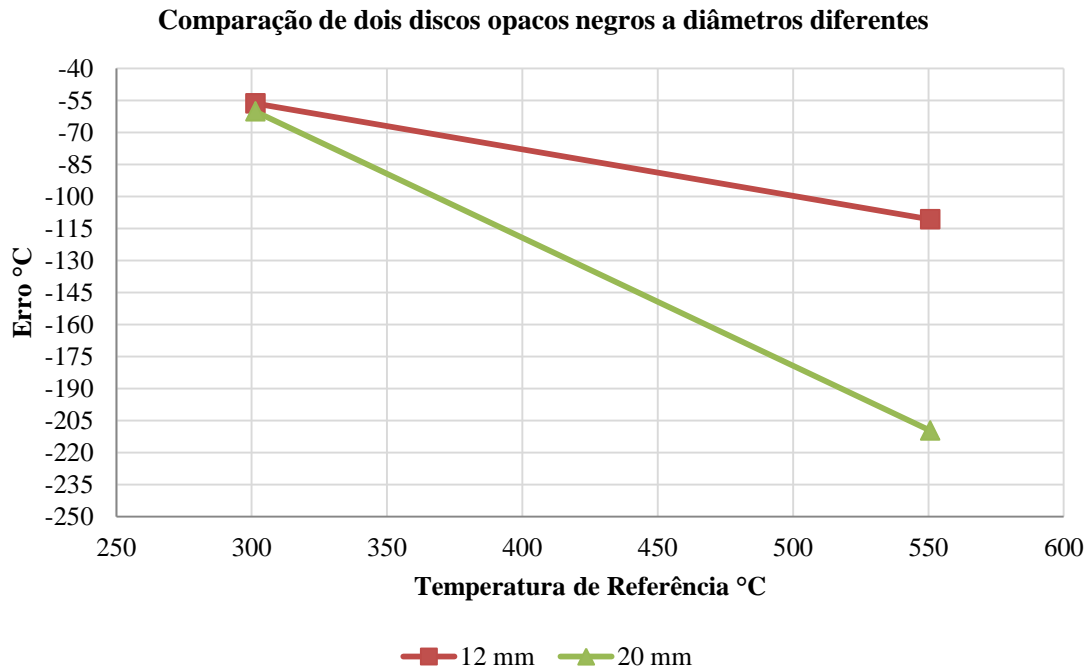


Figura 5.14 - Representação gráfica das medições realizadas com os dois discos opacos negros de diâmetro 12 mm e 20 mm, à distância 650 mm e 292 mm respetivamente, às temperaturas de 300 °C e 550 °C.

### Comparação de dois discos opacos negros a diâmetros diferentes

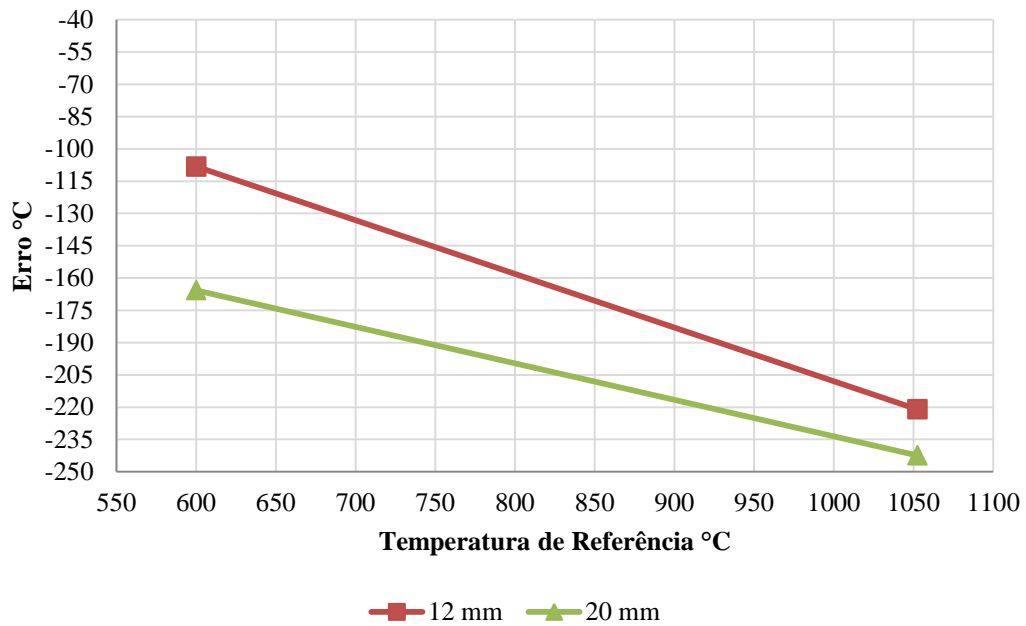


Figura 5.15 - Representação gráfica das medições realizadas com os dois discos opacos negros de diâmetro 12 mm e 20 mm, à distância 650 mm e 292 mm respectivamente, às temperaturas de 600 °C e 1050 °C.

Ao colocar o disco opaco negro alinhado com o pirômetro, foram registados valores de temperatura não nulos, estes dados completam e confirmam o estudo realizado pelo diafragma. É visível no gráfico que os erros dos valores de temperatura obtidos são mais elevados para o disco opaco negro com diâmetro de 20 mm, isto deve-se ao fato de, para o disco de 12 mm a “coroa imaginária” que deixa passar a radiação tem uma espessura de (em média) 9 mm e para o disco de 20 mm a coroa tem (em média) 4 mm, logo, o disco de 20 mm não deixa passar tanta radiação da fonte, por isso a temperatura lida pelo pirômetro é muito inferior à da calibração, fazendo com que o erro seja maior. O disco de 12 mm como deixa passar mais radiação da fonte, obteve uma temperatura mais próxima da calibração, tendo um erro menor.

Consequentemente, a temperatura que teve valores de erros inferiores foi a temperatura a 300 °C tendo assim sofrido uma menor influência do meio envolvente, quando comparada com a temperatura de 1050 °C que sofre uma influência muito mais elevada.



---

## 6. Conclusões

---

A metrologia é uma ciência importante numa sociedade inovadora e tecnologicamente desenvolvida que vise o sucesso económico. Esse sucesso está criticamente dependente das medições realizadas, sendo a calibração dos instrumentos de medição um fator determinante para este objetivo.

O trabalho realizado procurou responder a todos os objetivos propostos para a realização da calibração do pirómetro, sua caracterização, análise e integração da informação técnica e estatística associada aos estudos efetuados.

Relativamente às conclusões obtidas a partir do estudo realizado, os cálculos teóricos efetuados para a determinação do efeito do tamanho da fonte revelaram valores inferiores aos valores do efeito do tamanho da fonte experimentalmente determinados, observando-se assim que o efeito do tamanho da fonte foi superior ao esperado.

Neste estudo as fontes utilizadas apresentam um poço cuja abertura tem um diâmetro maior do que o “campo de visão” calculado experimentalmente, conforme se pode verificar na figura 5.13, garantindo assim que nestas condições a incerteza de medição do efeito do tamanho da fonte é uma fonte de incerteza negligenciável. No entanto há que referir que caso o pirómetro fosse avaliado noutro corpo negro com diâmetro de poço inferior teria de ser realizada uma nova caracterização ao mesmo pirómetro para avaliar este efeito.

Constatou-se ainda que as diferenças encontradas entre os valores de calibração e os valores obtidos no estudo do efeito do tamanho da fonte quando estável, se podem dever ao facto de existirem reflexões e absorções no aro do diafragma, tal como se verificou no estudo onde foi utilizado o disco opaco negro com a dimensão máxima considerada, onde o espetável seria não obter qualquer sinal de entrada no pirómetro, o que não se veio a verificar (Figura 5.14).

Os resultados estatísticos da calibração do pirómetro permitiram caraterizar o comportamento do instrumento de medição em estudo. Constatou-se na prática que o comportamento do pirómetro pode ser influenciado por fatores como instabilidade do forno termorregulado a altas temperaturas, a influência da temperatura ambiente, difrações no meio envolvente, bem como das características intrínsecas ao próprio instrumento de medição.

Após a realização deste trabalho destaca-se a importância do conhecimento e caracterização de um instrumento de medição que garanta a rastreabilidade das medições realizadas. Este estudo permitiu evidenciar a necessidade de efetuar uma caracterização completa, nomeadamente no que diz respeito à determinação do efeito do tamanho da fonte para cada termómetro de radiação. A calibração dos termómetros de radiação deve ter em consideração as conclusões obtidas individualmente no respeitante ao estudo considerado para cada instrumento de medição a utilizar.

O trabalho desenvolvido nesta dissertação vai permitir ao Laboratório de Temperatura utilizar o termómetro de radiação caracterizado e calibrado para garantir a rastreabilidade no intervalo de

medição considerado, bem como possibilitar a realização de um Ensaio de Comparação Interlaboratorial, que permitirá aos laboratórios nacionais acreditados, no âmbito da termometria por radiação, demonstrar a sua capacidade para realizar este tipo de calibração.

---

## Bibliografia

---

- [1] IPQ. *Metrologia - em Síntese*, 1ª edição, Caparica: IPQ, 2001. ISBN 972-766-041-3.
- [2] IPQ. *Pesos e Medidas em Portugal*, Lisboa: IPQ, 1990. ISBN 978-972-763-098-1.
- [3] Decreto-Lei n.º71/2012. *D.R.I Série*. 58 (12-03-21)
- [4] IPQ. *Metrologia*. Obtido em:  
<<http://ipq1sapp02:8088/pt/metrologia/apresentacao/Pages/Metrologia.aspx>> [Online]. Acedido em: 22 maio 2014.
- [5] IPQ. *Domínios de Intervenção*. Obtido em:  
<<http://ipq1sapp02:8088/pt/metrologia/apresentacao/dominios/Paginas/Dominios.aspx>> [Online]. Acedido em 19 janeiro 2015.
- [6] BIPM. *Measurement units: the SI*. Obtido em: <<http://www.bipm.org/en/si/>> [Online]. Acedido em 26 agosto 2014.
- [7] IPQ. *Vocabulário Internacional de Metrologia*, 1ª edição Luso-Brasileira. IPQ, 2012.
- [8] IPQ. *Laboratório de Temperatura*. Obtido em :  
<<http://ipq1sapp02:8088/pt/metrologia/stemperatura/Pages/LTE.aspx>> [Online]. Acedido em 22 maio 2014
- [9] Decreto- Lei nº128/2010. *D.R. I Série* 234 (10-12-03)
- [10] BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAP and OIML. *Evaluation of Measurement Data - Guide to Expression of Uncertainty in Measurement*. JCGM, 2008.
- [11] NF C01-845. 1989, *Vocabulaire électrotechnique*. AFNOR.
- [12] INCROPERA, Frank P [et al.]. *Introduction to Heat Transfer*, 6ª edição, John Wiley & Sons, 2011. ISBN 13 978-0470-50196-2.
- [13] FILIPE, Eduarda. *Corpo Negro para Calibração de Termómetros e Sensores de Temperatura por Infravermelhos*. Lisboa: FCT/UNL, 1999. Tese de Mestrado.
- [14] HOLMAN, J. P. *Heat Transfer*, 6ª Edição, McGraw-Hill, 1986. ISBN 0-07-029620-0.
- [15] INMETRO. *Orientação para calibração de termómetros de infravermelhos*. Obtido em:  
<<http://www.inmetro.gov.br/>> [Online]. Acedido em 30 setembro 2014.
- [16] FILIPE, Eduarda. *Curso de Metrologia da Temperatura*, Monte da Caparica: IPQ, 1996.
- [17] Procedimento Técnico 5010090501-02. 2001. *Utilização do forno para tubos de calor para calibração termométrica*. IPQ.
- [18] INCROPERA, Frank P. [et al.] *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*, 6ª Edição,

- LTC, 2008. ISBN 978-85-216-1584-2.
- [19] DEWITT, D e NUTTER, G.D. *Radiation Thermometry*, Wiley Interscience, 1988. ISBN 0-471-61018-6.
- [20] COLLECTIVE OF AUTHORS. *Pyrometer - Handbook*, IMPAC Infrared GmbH, 2004.
- [21] MIKRON. *Infrared Thermometers: Theory and Construction*. Obtido em: <[http://www.m-r-c.co.il/Media/Doc/TechnicalInformation/Temp\\_Measuring10.pdf](http://www.m-r-c.co.il/Media/Doc/TechnicalInformation/Temp_Measuring10.pdf)>. Acedido em: 19 novembro 2014
- [22] MENDELEYEV, D. *New Method for Measuring the Size-of-Source Effect in standard Radiation Thermometry*, Tempmeko, 2001.
- [23] INFRATEMP. *Termometria Infravermelha - Teoria Básica*. Obtido em: <<http://www.infratemp.com.br/assets/uploads/como-funciona/infratemp-como-funciona-20140113134539-1412011090301.pdf>>. Acedido em 14 novembro 2014.
- [24] NextBigFuture. *Janela de transmissão*. Obtido em: <[nextbigfuture.com](http://nextbigfuture.com)> [Online]. Acedido em 5 janeiro 2015..
- [25] Procedimento Técnico 5010095506-05. 2012. *Calibração de Termômetros e Sensores de Temperatura*. IPQ.
- [26] CEI IEC 584-1. 1995, *Termopares*. CEL.
- [27] Procedimento Técnico 5014001577-02. 2001. *Procedimento de Calibração de Termômetros de Radiação*. IPQ
- [28] INMETRO. *Procedimento de Verificação de Termômetros para Petróleo e seus Derivados Líquidos*. Obtido em: <[www.inmetro.gov.br](http://www.inmetro.gov.br)>. Acedido em 11 novembro 2014..
- [29] NewPort. *Diafragma*. Obtido em: <[http://search.newport.com/?q=\\*&x2=sku&q2=M-DI47.68](http://search.newport.com/?q=*&x2=sku&q2=M-DI47.68)> [Online]. Acedido em 11 Novembro 2014.
- [30] NewPort. *Elevador*. Obtido em: <[http://search.newport.com/?q=\\*&x2=sku&q2=271](http://search.newport.com/?q=*&x2=sku&q2=271)> [Online]. Acedido em 11 novembro 2014
- [31] NewPort. *Placa translação linear em x*. Obtido em: <[http://search.newport.com/?q=\\*&x2=sku&q2=M-UMR8.25](http://search.newport.com/?q=*&x2=sku&q2=M-UMR8.25)> [Online]. Acedido em 11 novembro 2014.
- [32] NewPort. *Mesa de rotação 360°*. Obtido em: <[http://search.newport.com/?q=\\*&x2=sku&q2=M-UTR80](http://search.newport.com/?q=*&x2=sku&q2=M-UTR80)> [Online]. Acedido em 11 novembro 2014.
- [33] NewPort. *Mesa de inclinação*. Obtido em: <<http://search.newport.com/?x1=sku&q1=37>> [Online]. Acedido em 11 novembro 2014.

---

## **Anexos**

---



# Anexo I – Certificado de Calibração do Pirómetro MIKRON M190

Instituto Português da  Qualidade



PORTUGUESE INSTITUTE FOR QUALITY

Rua António Gião, 2  
2829-513 CAPARICA Portugal  
Tel. (+351) 212 948 186  
Fax (+351) 212 948 188  
metrologia@ipq.pt  
www.ipq.pt

## CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

CALIBRATION CERTIFICATE

NÚMERO 501.45 / 1540402  
NUMBER

PÁGINA 1 de 2  
PAGE

### ENTIDADE

ENTITY

NOME

NAME

ENDEREÇO

ADDRESS

Instituto Português da Qualidade

Rua António Gião nº2, 2825-513 Caparica

### INSTRUMENTO DE MEDIÇÃO

MEASURING INSTRUMENT

DESIGNAÇÃO

DESIGNATION

Pirómetro ótico por infravermelhos

MARCA

MANUFACTURER

MODELO

MODEL

NÚMERO

SERIAL NUMBER

COMPOSIÇÃO

COMPONENTS

Sensor

MIKRON

M190QS

7076

---

### CARACTERÍSTICAS METROLÓGICAS

METROLOGICAL CHARACTERISTICS

EMISSIVIDADE

EMISSIVITY

CLASSE DE EXATIDÃO

ACCURACY CLASS

INTERVALO DE INDICAÇÃO

INDICATION INTERVAL

RESOLUÇÃO DO DISPOSITIVO AFIXADOR

RESOLUTION OF THE DISPLAYING DEVICE

1,00

---

200 °C a 1600 °C

0,1 °C

### OPERAÇÃO EFETUADA

MEASUREMENT

TIPO

TYPE

DATA

DATE

MÉTODO

METHOD

DOCUMENTO DE REFERÊNCIA

REFERENCE DOCUMENT

RASTREABILIDADE METROLÓGICA

METROLOGICAL TRACEABILITY

CONDIÇÕES DE REFERÊNCIA

REFERENCE OPERATING CONDITION

INCERTEZA EXPANDIDA

EXPANDED MEASUREMENT UNCERTAINTY

RESULTADO DE MEDIÇÃO

MEASUREMENT RESULT

Calibração

2014-06-20

Calibração por comparação com o termopar padrão TS1 em forno termorregulado.

Procedimento PT5014001577

Ao SI através da realização dos Pontos Fixos da EIT90

SI units through

$t = (20 \pm 2) \text{ °C}; \quad HR = (50 \pm 10)\%$ ;

Ver página 2

See page 2

Ver página 2

See page 2

CAPARICA, 3 de Fevereiro de 2015

Isabel Loio

RESPONSÁVEL DE DOMÍNIO

Head of Domain

TEMPERATURA

ISABEL GODINHO

DIRETORA de UNIDADE

LABORATÓRIO NACIONAL DE METROLOGIA

Director of the National Metrology Laboratory Unit

O presente Certificado de Calibração só pode ser reproduzido no seu todo e apenas se refere ao(s) item(s) ensaiado(s)

This calibration certificate may only be reproduced in full and only refers to the measuring instrument (s) tested (s)



**CERTIFICADO  
DE CALIBRAÇÃO**  
CALIBRATION CERTIFICATE

**NÚMERO** 501.45 / 1540402  
NUMBER

PÁGINA 2 de 2  
PAGE

**RESULTADO:**

Valor verdadeiro da temperatura Emissividade 1,0  (°C)	MIKRON M190QS Nº 7076 Emissividade 1,00  (°C)	Incerteza Expandida  (°C)
300,06	299,1	0,6
350,51	348,6	0,5
400,68	399,6	0,5
450,55	450,5	0,5
501,48	501,6	0,5
550,68	551,2	0,6
599,98	601,1	0,5
650,18	651,9	0,7
700,45	697,1	0,7
750,59	750,3	0,7
800,81	801,5	0,7
850,84	852,2	0,7
900,60	902,1	0,8
950,37	952,0	1,1
997,26	999,7	1,0
1047,91	1051,6	1,0

A incerteza expandida apresentada, está expressa pela incerteza-padrão multiplicada pelo fator de expansão  $k = 2,00$ , a qual para uma distribuição- $t$  corresponde a uma probabilidade de 95% , aproximadamente. A incerteza foi calculada de acordo com o documento *Evaluation of Measurement Data - Guide to the expression of uncertainty in measurement, JCGM 100:2008 (GUM 1995 with minor corrections)*.

*The reported expanded uncertainty is stated as the standard measurement uncertainty multiplied by the coverage factor  $k = 2,00$ , which for a  $t$ -distribution corresponds to a probability of approximately 95 %. The uncertainty was calculated according to the document "Evaluation of Measurement Data - Guide to the expression of uncertainty in measurement, JCGM 100:2008 (GUM 1995 with minor corrections)".*

**Nota:**

A correção teórica da temperatura a emissividade 1,00 teve em consideração a compensação do ganho do pirômetro subtraído da influência do meio ambiente para uma temperatura de referência de 25 °C.

Isabel Loio  
RESPONSÁVEL DE DOMÍNIO  
Head of Domain  
TEMPERATURA

## Anexo II – Certificado de Calibração do Termopar TS1

Instituto Português da **Q**ualidade



GOVERNO DE  
PORTUGAL

MINISTÉRIO DA ECONOMIA  
E DO EMPREGO

PORTUGUESE INSTITUTE FOR QUALITY

Rua António Gião, 2  
2829-513 CAPARICA Portugal  
Tel. 212 948 185  
Fax 212 948 188  
metrologia@ipq.pt  
www.ipq.pt

### CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

NÚMERO 501.10 / 1340389

PÁGINA 1 de 2

#### ENTIDADE

NOME Laboratório de Temperatura – Domínio Pontos Fixos da EIT90  
ENDEREÇO Rua António Gião, 2 2829-513 Caparica

#### INSTRUMENTO DE MEDIÇÃO

DESIGNAÇÃO Termopar tipo S  
MARCA ISOTECH  
MODELO 1600  
NÚMERO 231343/1 (TS1)  
CONSTITUIÇÃO Termopar com ponta fria

#### CARACTERÍSTICAS METROLÓGICAS

CLASSE DE EXATIDÃO  
INTERVALO DE INDICAÇÃO 0 °C a 1600 °C  
RESOLUÇÃO DO DISPOSITIVO AFIXADOR

#### OPERAÇÃO EFETUADA

TIPO Calibração  
DATA 2013-05-28  
MÉTODO Ver página 2  
DOCUMENTO DE REFERÊNCIA PT 5011010510  
RASTREABILIDADE METROLÓGICA Ao SI através da realização dos Pontos Fixos da EIT90  
CONDIÇÕES DE REFERÊNCIA  $t = (20 \pm 2) \text{ °C}$ ;  $HR = (50 \pm 10)\%$ ;  
INCERTEZA EXPANDIDA Ver página 2  
RESULTADO Ver página 2

CAPARICA, 29 de maio de 2013

SÍLVIA GENTIL  
TÉCNICA SUPERIOR  
PONTOS FIXOS DA EIT90

EDUARDA FILIPE  
DIRETOR  
METROLOGIA CIENTÍFICA E APLICADA - LCM

O presente Certificado de Calibração só pode ser reproduzido no seu todo e apenas se refere ao(s) item(s) ensaiado(s)



Este Certificado está de acordo com as Capacidades de Medição e Calibração (CMC), incluídas no Anexo C, do Acordo de Reconhecimento Mútuo (MRA), redigido pelo Comitê Internacional de Pesos e Medidas (CIPM). No âmbito do MRA, todos os Laboratórios Nacionais participantes reconhecem reciprocamente a validade dos Certificados de Calibração e de Medição, emitidos para as grandezas, domínios e incertezas de medição, mencionados no Anexo C (para mais detalhes veja [www.bipm.org](http://www.bipm.org)).

RLCM43



## CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

NÚMERO 501.10 / 1340389

PÁGINA 2 de 2

### RESULTADO:

Resumo do método:

Calibração do termopar TS1 no ponto de gelo ( $\approx 0,00$  °C) por comparação com o padrão smt16 e nos seguintes pontos fixos: ponto de congelação do estanho com o padrão Sn1, ponto de congelação do zinco com o padrão Zn2, ponto de congelação do alumínio com o padrão Al50, ponto de congelação da prata com o padrão AG58 e a  $\approx 1050$  °C por comparação com o termopar padrão TS3. Os valores da *fem* (mV) foram obtidos com o nanovoltímetro Keithley nº 5.

Valor verdadeiro da temperatura (°C)	Indicação do termómetro nº 231343/1 (mV)	Incerteza expandida (°C)
0,000	-0,0013	0,40
231,928	1,7097	0,40
419,527	3,4400	0,40
660,323	5,8540	0,40
961,780	9,1410	0,40
1049,91	10,177	1,5

Polinómio de 3º grau:

$$y = 6,886220E-11x^3 - 6,533554E-08x^2 - 1,649954E-06x$$

Notas:

1. A incerteza expandida apresentada está expressa pela incerteza - padrão multiplicada pelo factor de expansão  $k = 2$ , o qual para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de 95% aproximadamente. A incerteza foi calculada de acordo com o documento IPQ "Guia para a expressão da incerteza de medição nos Laboratórios de Calibração", Dezembro 2005. A estabilidade a longo prazo do objecto foi considerada.

CAPARICA, 29 de maio de 2013

SÍLVIA GENTIL  
TÉCNICA SUPERIOR  
PONTOS FIXOS DA EIT90

RLCM43

### Anexo III – Folha de Cálculo

Erro em temperatura devido à separação das condições ideais - com correção do meio envolvente

		L <sub>a</sub> emissividade					t <sub>amb</sub> comp. onda					298,15 1,300E-06					Cálculo de T <sub>2</sub>					
Temperatura	Temperatura	Cobre T5	Aço inox T1	Inconel T4	Ponto gelo	superficie	Cobre T5	Aço inox T1	Inconel T4	Ponto gelo	superficie	Cobre T5	Aço inox T1	Inconel T4	Ponto gelo	superficie	Cobre T5	Aço inox T1	Inconel T4	Ponto gelo	superficie	
K	°C	0,9960	0,9987	0,9990	0,970	0,950	0,9960 erro	0,9987 erro	0,9990 erro	0,970 erro	0,95 erro	0,9960 erro	0,9987 erro	0,9990 erro	0,970 erro	0,95 erro	0,9960 erro	0,9987 erro	0,9990 erro	0,970 erro	0,95 erro	
573,15	300	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	573,03	-0,12	573,11	-0,04	573,12	-0,03	572,25	-0,90	571,63	-1,52	573,03	-0,12	573,11	-0,04	573,12	-0,03
623,15	350	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	623,01	-0,14	623,10	-0,05	623,11	-0,04	622,08	-1,07	621,36	-1,79	623,01	-0,14	623,10	-0,05	623,11	-0,04
673,15	400	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	672,99	-0,16	673,10	-0,05	673,11	-0,04	671,91	-1,24	671,06	-2,09	672,99	-0,16	673,10	-0,05	673,11	-0,04
723,15	450	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	722,96	-0,19	723,09	-0,06	723,10	-0,05	721,71	-1,44	720,73	-2,42	722,96	-0,19	723,09	-0,06	723,10	-0,05
773,15	500	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	772,93	-0,22	773,08	-0,07	773,10	-0,05	771,51	-1,64	770,39	-2,76	772,93	-0,22	773,08	-0,07	773,10	-0,05
823,15	550	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	822,90	-0,25	823,07	-0,08	823,09	-0,06	821,29	-1,86	820,02	-3,13	822,90	-0,25	823,07	-0,08	823,09	-0,06
873,15	600	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	872,87	-0,28	873,06	-0,09	873,08	-0,07	871,06	-2,09	869,63	-3,52	872,87	-0,28	873,06	-0,09	873,08	-0,07
923,15	650	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	922,84	-0,31	923,05	-0,10	923,07	-0,08	920,81	-2,34	919,22	-3,93	922,84	-0,31	923,05	-0,10	923,07	-0,08
973,15	700	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	972,81	-0,34	973,04	-0,11	973,06	-0,09	970,55	-2,60	968,78	-4,37	972,81	-0,34	973,04	-0,11	973,06	-0,09
1023,15	750	0,00002	0,00002	0,00002	0,00002	0,00002	1022,77	-0,38	1023,02	-0,13	1023,06	-0,09	1020,28	-2,87	1018,32	-4,83	1022,77	-0,38	1023,02	-0,13	1023,06	-0,09
1073,15	800	0,00003	0,00003	0,00003	0,00003	0,00003	1072,73	-0,42	1073,01	-0,14	1073,05	-0,10	1069,99	-3,16	1067,84	-5,31	1072,73	-0,42	1073,01	-0,14	1073,05	-0,10
1123,15	850	0,00005	0,00005	0,00005	0,00005	0,00005	1122,69	-0,46	1123,00	-0,15	1123,04	-0,11	1119,69	-3,46	1117,33	-5,82	1122,69	-0,46	1123,00	-0,15	1123,04	-0,11
1173,15	900	0,00008	0,00008	0,00008	0,00008	0,00008	1172,65	-0,50	1172,98	-0,17	1173,03	-0,12	1169,37	-3,78	1166,81	-6,34	1172,65	-0,50	1172,98	-0,17	1173,03	-0,12
1223,15	950	0,00012	0,00012	0,00012	0,00011	0,00011	1222,61	-0,54	1222,97	-0,18	1223,01	-0,14	1219,05	-4,10	1216,26	-6,89	1222,61	-0,54	1222,97	-0,18	1223,01	-0,14
1273,15	1000	0,00017	0,00017	0,00017	0,00016	0,00016	1272,56	-0,59	1272,95	-0,20	1273,00	-0,15	1268,71	-4,44	1265,68	-7,47	1272,56	-0,59	1272,95	-0,20	1273,00	-0,15
1323,15	1050	0,00023	0,00023	0,00023	0,00023	0,00022	1322,52	-0,63	1322,94	-0,21	1322,99	-0,16	1318,35	-4,80	1315,09	-8,06	1322,52	-0,63	1322,94	-0,21	1322,99	-0,16

Erro em temperatura devido à separação das condições ideais - sem correção do meio envolvente

Temperatura	Temperatura	Cobre T5	Aço inox T1	Inconel T4	Ponto gelo	superficie	calc erro max	pgelo	até 95°C			até CN T4	
K	°C	0,9960	0,9987	0,9990	0,970	0,950	0,98	0,97-0,98	0,9970	0,997-0,996	0,9995	0,9987-0,9992	
573,15	300	-0,12	-0,04	-0,03	-0,92	-1,56	-0,60	0,32	-0,09	0,03	-0,01	0,04	
623,15	350	-0,14	-0,05	-0,04	-1,09	-1,85			-0,11	0,04	-0,02	0,05	
673,15	400	-0,16	-0,05	-0,04	-1,27	-2,15			-0,12	0,04	-0,02	0,06	
723,15	450	-0,19	-0,06	-0,05	-1,46	-2,49			-0,14	0,05	-0,02	0,07	
773,15	500	-0,22	-0,07	-0,05	-1,67	-2,84			-0,16	0,05	-0,03	0,08	
823,15	550	-0,25	-0,08	-0,06	-1,89	-3,22			-0,18	0,06	-0,03	0,09	
873,15	600	-0,28	-0,09	-0,07	-2,13	-3,63			-0,21	0,07	-0,03	0,10	
923,15	650	-0,31	-0,10	-0,08	-2,38	-4,05			-0,23	0,08	-0,04	0,12	
973,15	700	-0,34	-0,11	-0,09	-2,65	-4,50			-0,26	0,09	-0,04	0,13	
1023,15	750	-0,38	-0,13	-0,09	-2,93	-4,98			-0,28	0,10	-0,05	0,14	
1073,15	800	-0,42	-0,14	-0,10	-3,22	-5,48			-0,31	0,11	-0,05	0,16	
1123,15	850	-0,46	-0,15	-0,11	-3,52	-6,00			-0,34	0,12	-0,06	0,17	
1173,15	900	-0,50	-0,17	-0,12	-3,85	-6,54			-0,37	0,13	-0,06	0,19	
1223,15	950	-0,54	-0,18	-0,14	-4,18	-7,11			-0,41	0,14	-0,07	0,20	
1273,15	1000	-0,59	-0,20	-0,15	-4,53	-7,71			-0,44	0,15	-0,07	0,22	
1323,15	1050	-0,64	-0,21	-0,16	-4,89	-8,32			-0,48	0,16	-0,08	0,24	

65

$$L_{emitida} = \epsilon_{BB} L_{BB} + (1 - \epsilon_{BB}) L_{envolvente}$$

$$L_{BB} = \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T_{BB}}\right) - 1}$$

$$T_{BB} = \frac{c_2}{\lambda \ln\left(1 + \frac{1}{L_{BB}}\right)}$$

## Anexo IV – Repetição da Calibração do Pirômetro MIKRON M190

Tabela 0.1 - Tabela IV.1 - Resultados obtidos na repetição da calibração do pirômetro MIKRO 190

Temperatura °C	Temperatura de referência °C	Temperatura indicada pelo pirômetro °C	Incerteza °C	Erro °C
300	299,86	298,2	0,6	-1,7
350	350,61	348,7	0,5	-1,9
400	400,51	399,3	0,5	-1,2
450	451,43	451,1	0,5	-0,3
500	500,98	500,9	0,5	-0,1
550	550,57	551,5	0,6	0,9
600	599,98	601,2	0,5	1,2
650	650,15	651,8	0,7	1,7
700	700,51	697,1	0,7	-3,4
750	750,74	750,7	0,8	0,0
800	800,83	801,4	0,7	0,6
850	850,87	852,4	0,8	1,5
900	900,53	902,7	0,9	2,2
950	950,54	952,6	1,1	2,1
1000	999,91	1002,7	1,1	2,8
1050	1051,42	1055,2	1,1	3,8

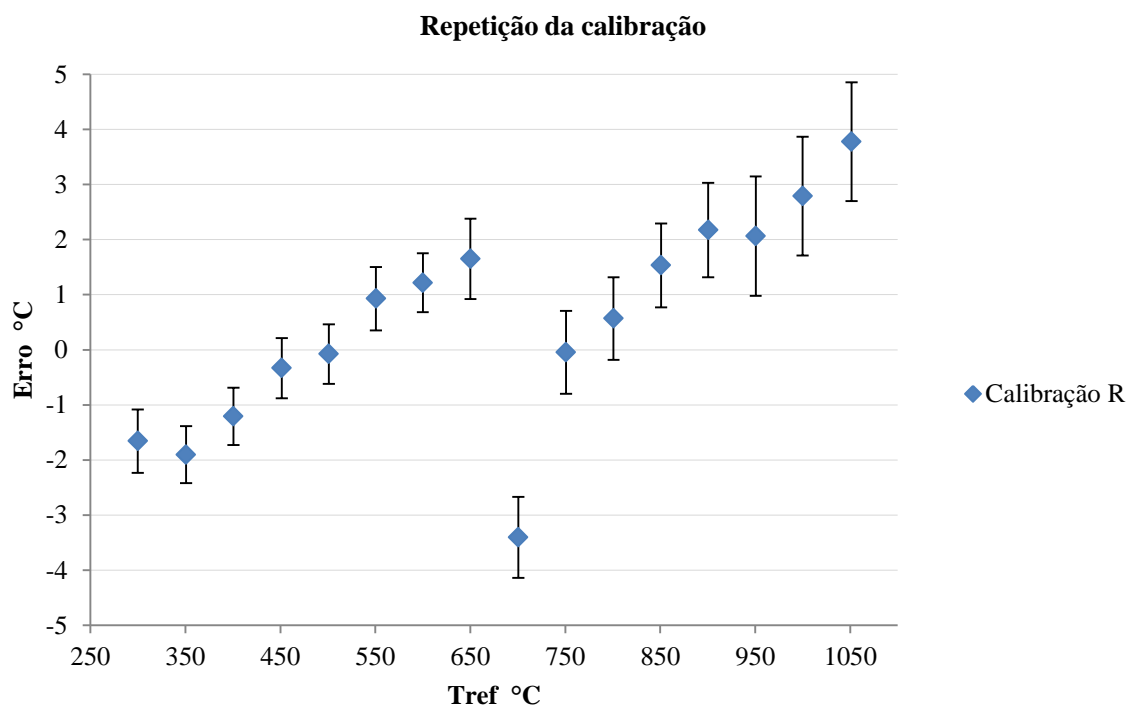


Figura 0.1- Figura IV.1 - Representação gráfica da repetição das medições realizadas pelo pirômetro.