

Carlos Eduardo de Oliveira Chaves

Confiabilidade metrológica da medição de elevadas temperaturas em processos industriais

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre do Programa de Pós-Graduação da PUC-Rio. Área de Concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação.

Orientador: Alcir de Faro Orlando, PhD, Stanford. PUC-Rio

Co-orientador Paulo Roberto da Fonseca Santos, MSc, PUC-Rio.
Inmetro

Carlos Eduardo de Oliveira Chaves

Confiabilidade metrológica da medição de elevadas temperaturas em processos industriais

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Metrologia da PUC-Rio. Área de Concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Alcir de Faro Orlando, PhD, Stanford Orientador PUC-Rio

Paulo Roberto da Fonseca Santos, MSc, PUC-Rio Coorientador Inmetro

Luiz Fernando Alzuguir Azevedo, PhD, Minnesota PUC-Rio

Humberto Siqueira Brandi, PhD, MIT UFRJ

Carlos Alberto Aragão de Carvalho, PhD, Princeton UFRJ

José Eugênio Leal

Coordenador Setorial de Pós-Graduação do Centro Técnico Científico PUC-Rio

Rio de Janeiro, 16 de agosto de 2004

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Carlos Eduardo de Oliveira Chaves

Graduou-se em Engenharia Mecânica pela PUC-Rio (Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro) em 1996. É responsável pelo Laboratório de Metrologia das Indústrias Nucleares do Brasil (INB).

Ficha Catalográfica

Chaves, Carlos Eduardo de Oliveira

Confiabilidade metrológica da medição de elevadas temperaturas em processos industriais / Carlos Eduardo de Oliveira Chaves ; orientador: Alcir de Faro Orlando ; co-orientador: Paulo Roberto da Fonseca Santos. Rio de Janeiro : PUC-Rio, Programa de Pós-Graduação em Metrologia, 2004.

136 f.: il; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Metrologia. Área de Concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação.

Incluí referências bibliográficas.

1.Metrologia – Teses. 2.Metrologia térmica. 3.Radiação eletromagnética. 4.Radiação infravermelha. 5.Detectores de radiação. 6.Pirômetro infravermelho. 7.Altas temperaturas. 8.Calibração. 9.Incerteza de medição. I. Orlando, Alcir de Faro. II. Santos, Paulo Roberto da Fonseca III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Metrologia. Área de Concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação.. IV. Título

Para os meus pais, Sebastião e Heloisa, pela educação, carinho e estímulo ao estudo.

Para a minha esposa, Ana Beatriz, pelo carinho, apoio e motivação.

Para minha avó, Célia Millen, pelo apoio, força e garra.

Para a minha querida tia, Nair Millen, pelos fundamentos cristãos.

Para meus tios, Paulo César e Luiz Fernando, pelo carinho e incentivo constante.

Para meus irmãos Ana Luiza e Luiz Claudio, pela confiança e amizade.

Para Nosso Senhor Jesus Cristo, pela vida que em mim se encerra e a saúde que me faz lutar.

Agradecimentos

Ao meu orientador Professor Alcir de Faro Orlando, pelo estímulo, orientação, conhecimento e parceria para realização deste trabalho.

Ao meu co-orientador Engenheiro Paulo Roberto da Fonseca Santos, pelos ensinamentos e a infraestrutura que proporcionou junto ao Inmetro.

Ao amigo Renato Teixeira, pelo valoroso trabalho e grandes ensinamentos.

Ao Inmetro, pela utilização de seus laboratórios.

A INB, pela oportunidade ímpar que me possibilitou cursar e finalizar meu curso de mestrado na PUC-Rio.

Aos meus amigos Willians Portela, Luiz, Anselmo, Alfredo e Marcelo e as amigas Bianca, Cristiane e Olívia, por todo apoio, motivação e carinho.

Aos professores que participaram da comissão examinadora.

A todos os professores e funcionários do Departamento pelos ensinamentos e pela ajuda.

A inestimável Eliane Albernaz, por todo o seu auxílio e zelo na secretaria do Departamento.

A todos os amigos e familiares que de uma forma ou outra me estimularam e ajudaram.

Resumo

Chaves, Carlos Eduardo de Oliveira. Confiabilidade metrológica da medição de elevadas temperaturas em processos industriais. Rio de Janeiro, 2004. 136p. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Metrologia. Área de atuação: Metrologia para Qualidade e Inovação, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A confiabilidade metrológica da medição de elevadas temperaturas em processos industriais é importante para a segurança, qualidade e as características de produtos de diversas indústrias do Brasil. Devido ao fato de que a rastreabilidade dos resultados de uma calibração de termômetro de radiação infravermelha, utilizado para a medição de processos industriais, é assegurada pelo Inmetro (Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial) até 1500°C, e levando-se em consideração que as condições de calibração em laboratórios são normalmente diferentes das de medição na indústria, um procedimento foi desenvolvido e validado nesta dissertação para analisar a confiabilidade da mesma em temperaturas mais elevadas (1750°C), estimando-se os valores de erros sistemáticos e de incerteza de medição da temperatura em um forno industrial.

Palayras-chave

Metrologia térmica, radiação eletromagnética; radiação infravermelha; detectores de radiação; pirômetro infravermelho; altas temperaturas; calibração; incerteza de medição.

Abstract

Chaves, Carlos Eduardo de Oliveira. Accuracy of high temperature measurement in industrial processes. Rio de Janeiro, 2004. 136p. MSc. Dissertation - Programa de Pós-Graduação em Metrologia. Área de atuação: Metrologia para Qualidade e Inovação, Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The accuracy of high temperature measurement in industrial processes is important for safety reasons and product quality and specification in different industries. Due to the fact that the traceability of temperature measurement by infrared thermometers, as used in industrial processes, is only assured by Inmetro (National Institute for Metrology, Standards and Industrial Quality) up to 1500°C, and considering that the calibration conditions in laboratory are normally different from measurement conditions in industry, a procedure in the dissertation was developed and validated to analyze the accuracy of higher temperature measurement (1750°C), estimating systematic errors and uncertainty of measurement of temperature in a industrial furnace.

Keywords

Thermal metrology, electromagnetic radiation, infrared radiation, radiation detectors, radiation pyrometers, high temperature, calibration, measurement uncertainty

Sumário

Introdução

1 Indústrias Nucleares do Brasil	19
1.1. Ciclo do Combustível Nuclear	20
1.1.1. Mineração e Beneficiamento	20
1.1.2. Conversão	22
1.1.3. Enriquecimento	22
1.1.4. Reconversão	23
1.1.5. Processo de fabricação de pastilhas	24
1.1.6. Elemento Combustível	25
1.2. Sinterização de pastilhas de dióxido de urânio	26
1.3. Forno de sinterização	27
1.3.1. Zona de Acionamento	29
1.3.2. Zona de Pré-Sinterização	29
1.3.3. Zona de Sinterização	30
1.3.4. Zona de Resfriamento	33
1.3.5. Tampa de Entrada	33
1.3.6. Tampa de Saída	33
1.3.7. Carcaça do Forno	33
2 Base Teórica	34
2.1. Radiação Eletromagnética	34
2.2. Radiação Térmica	36
2.3. Resumo histórico	37
2.4. Base teórica para medição de temperatura a partir da radiação	
infravermelha	40
2.4.1. Lei de Kirchoff	40
2.4.2. Lei de Stefan e Boltzmann	40
2.4.3. Lei do Deslocamento de Wien	41
2.5. Propriedades da radiação eletromagnética	42

2.6. Principio de funcionamento de um pirometro intravermeino	47
2.7. Tipos de Pirômetro Infravermelhos	48
2.7.1. Pirômetros com faixa espectral extensa (broadband)	48
2.7.2. Pirômetros com faixa espectral estreita (narrow band)	49
2.7.3. Pirômetros com razão espectral (ratio)	50
2.8. Detectores	52
2.8.1. Detectores Quânticos	53
2.8.1.1. Detectores fotocondutivos	53
2.8.1.2. Detectores fotovoltáicos	53
2.8.2. Detectores Térmicos	54
2.8.2.1. Detectores que funcionam de acordo com o efeito Seebeck	55
2.8.2.2. Detectores ferroelétricos	55
2.9. Índices de mérito para caracterização estática e dinâmica	58
2.9.1. Pirômetros com detectores quânticos	58
2.9.2. Pirômetros com detectores térmicos	58
2.10. Calibração	59
2.11. Aplicações práticas	62
3 Metodologia Experimental	66
3.1. Introdução	66
3.2. Laboratórios acreditados pela RBC para calibração de termômetro	os de
radiação infravermelha	67
3.2.1. Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais S/A – USIMINAS	67
3.2.2. Companhia Siderúrgica de Tubarão – CST	67
3.3. Padrão de transferência e o objeto da calibração	68
3.3.1. Padrão de transferência[Anexo 1]	68
3.3.2. Objeto da Calibração	69
3.4. Metodologia Experimental	69
3.4.1. Calibração de Termômetros de Radiação Infravermelha no Inme	etro 69
3.4.1.1. Fontes de Radiação Eletromagnética	70
3.4.1.1.1. Cavidade de corpo negro de média temperatura	70
3.4.1.1.2. Cavidade de corpo negro de alta temperatura	70
3 4 1 2 Termômetros de radiação – Pirômetros	70

3.4.1.2.1. Pirometro Padrao Primario	70
3.4.1.3. Instrumento de Leitura de Tensão	71
3.4.1.3.1. Multímetro	71
3.4.2. Calibração do Padrão de Transferência	71
3.4.2.1. Principais fontes de incerteza na calibração do padrão de	
transferência	74
3.4.2.1.1. Padrão de referência da cavidade de corpo negro de média	
temperatura (<i>u_{padrão média}</i>)	74
3.4.2.1.2. Padrão de referência da cavidade de corpo negro de alta	
temperatura (<i>u_{padrão alta}</i>)	74
3.4.2.1.3. Resolução do objeto (<i>u</i> _{res})	74
3.4.2.1.4. Estabilidade da temperatura da cavidade de corpo negro	
(U _{estabilidade}).	74
3.4.2.1.5. Distância focal do objeto (<i>u_{focal}</i>)	74
3.4.2.1.6. Multímetro utilizado nas medições de tensão do padrão de	
referência da cavidade de corpo negro de média temperatura ($u_{ extit{multimetro}}$)75
3.4.2.2. Incerteza de medição para a calibração do padrão de	
transferência(<i>u_{calibração}</i>) no Laboratório de Pirometria (Lapir)	75
3.4.3. Medição do "Objeto da Calibração" na INB	76
3.4.3.1. Procedimento de calibração	76
3.4.3.2. Principais fontes de incerteza na calibração do sensor de	
temperatura do forno de sinterização	79
3.4.3.2.1. Incerteza de medição do padrão de transferência($u_{\it medição}$) ao	
efetuar a leitura de temperatura através do vidro da janela de inspeção	do
forno de sinterização	79
3.4.3.2.2. Vidro da janela de inspeção do forno de sinterização(u_{vidro})	79
3.4.3.2.2.1. Procedimento para determinação do erro sistemático devid	o ao
vidro da janela de inspeção	80
3.4.3.2.2.2. Validação do procedimento para determinação do erro	
sistemático devido ao vidro da janela de inspeção	84
3.4.3.2.2.3. Incerteza de medição devido à presença do vidro(u_{vidro})	84
3.4.3.2.3. Estabilidade da temperatura no interior do forno de	
sinterização(Uestabilidada)	85

3.4.3.2.4. Considerar que o interior do canal do forno de sinterização	
aproxima-se do comportamento ideal de uma cavidade de corpo negro	o(u _{corpo}
negro)	86
3.4.3.2.5. Medição da tensão gerada pelo sensor de temperatura do fo	orno de
sinterização $(u_{medição\ tensão})$	88
3.4.3.2.6. Medição da temperatura da junção de referência do sensor	de
temperatura(<i>u</i> _{medição junção})	88
3.4.4. Incerteza de medição para a calibração do sensor de temperatu	ıra do
forno de sinterização "objeto da calibração" ($u_{objeto\ da\ calibração}$) na INB	89
4 Resultados de Calibração, Medição e Incerteza de Medição	90
4.1. Resultados da calibração do padrão de transferência	90
4.2. Resultados do procedimento de calibração do sensor de tempera	tura do
forno de sinterização na INB "objeto da calibração"	91
4.3. Planilha de Incerteza de medição para o padrão de	
transferência($u_{medi ilde{q} ilde{a} ilde{o}}$) item 3.4.3.2.1	93
4.4. Resultados do procedimento para determinação do erro sistemáti	СО
devido ao vidro da janela de inspeção	94
4.4.1. Resultados da medição de transmissividade do vidro temperado)
comum com 2mm de espessura, Fig.50(item 3.4.3.2.2.1 letra (b))	95
4.4.2. Resultados da medição de transmissividade do vidro do forno de	!
sinterização de 5mm de espessura, Fig.51(item 3.4.3.2.2.1 letra (b))	96
4.4.3. Resultados numéricos para o cálculo da potência emissiva hem	isférica
total e potência emissiva hemisférica na faixa espectral	97
4.4.4. Validação do procedimento para determinação do erro sistemát	ico
devido a presença do vidro da janela de inspeção	100
4.5. Incerteza de medição devido à presença do vidro (u_{vidro}) item 3.4.3	3.2.2.3
	100
4.6. Resultados do monitoramento da temperatura no interior do forno	de
sinterização item 3.4.3.2.3	101
4.6.1. Considerar que o interior do canal do forno de sinterização apro	xima-
se do comportamento ideal de uma cavidade de corpo negro($u_{\it corpo\ negro}$	၈) item
3.4.3.2.4	102

4.6.2. Planlina de incerteza para a medição da tensão gerada pelo ser	isor a
temperatura do forno de sinterização($u_{medição\ tensão}$) item 3.4.3.2.5	102
4.6.3. Planilha de incerteza de medição para a medição da temperatur	a da
junção de referência do sensor de temperatura $(u_{medição\ junção})$ item 3.4.3	3.2.6
	103
4.6.4. Planilha de incerteza de medição para a calibração do sensor de	е
temperatura do forno de sinterização "objeto da calibração" ($u_{objeto\ da\ ca}$	libração)
na INB item 3.4.4	104
4.6.5. Resultados da calibração do sensor de temperatura "objeto da	
calibração" na INB	105
5 Conclusões	106
	100
6 Referências bibliográficas	109
Anexos	111
Alicada	111

Lista de figuras

Figura 1 - FCN-2 Fábrica de Reconversão e Pastilhas[2].	19
Figura 2 - FCN-1 – Fábrica de componentes e montagem do elemento	
combustível[2].	20
Figura 3 INB-Caetité – Mineração e beneficiamento de urânio[2].	21
Figura 4 - Concentrado de urânio, denominado "yelowcake"[2].	21
Figura 5 – Cilindro contendo o gás hexafluoreto de urânio (UF ₆)[2].	22
Figura 6 – Pó de dióxido de urânio (UO ₂)[2].	23
Figura 7 – Pastilhas de dióxido de urânio[2].	24
Figura 8 – Processo de fabricação de pastilhas de dióxido de urânio[2].	24
Figura 9 – Bocal inferior, grade espaçadora e varetas de um elemento	
combustível[2].	25
Figura 10 – Mecanismo esquemático de sinterização de partículas.	26
Figura 11 – Variação de densidade de uma pastilha de dióxido de urânio	0
sinterizada em função da temperatura e do tempo.	27
Figura 12 – Forno de sinterização de pastilhas de dióxido de urânio (UC) ₂)[2].
	28
Figura 13 – Desenho esquemático de construção do forno de sinterizaç	ão[4].
	28
Figura 14 – Desenho esquemático das navetas com pastilhas de dióxido	o de
urânio[4].	29
Figura 15 – Vista superior em corte da região de sinterização, as áreas	
hachuradas são tijolos refratários, as dimensões estão em milímetros.	31
Figura 16 – Vista lateral em corte e detalhe do canal de sinterização, as	;
dimensões estão em milímetros.	32
Figura 17 - Radiação eletromagnética descrita pela teoria clássica.	34
Figura 18 - Espectro eletromagnético e a região do espectro	
infravermelho[5].	35
Figura 19 - Radiação característica de um corpo negro em relação a sua	а
temperatura[6].	39

rigura 20 - Propriedades da radiação eletromagnetica ao atingir um ma	iteriai
semitransparente[6].	42
Figura 21 - Cavidade esférica que simula um corpo negro[9].	43
Figura 22 - Tabela de valores de emissividade para diversos materiais[9].46
Figura 23 - Conceito antigo de medição de temperatura por radiação	
infravermelha[6].	47
Figura 24 - Conceito moderno de medição de temperatura por radiação)
infravermelha[9].	48
Figura 25 - Tabela de materiais fotocondutivos[13].	53
Figura 26 - Tabela de materiais fotovoltáicos[13].	54
Figura 27 – Circuito amplificador para ser usado com sensores	
fotovoltaicos[13].	54
Figura 28 - Tabela de materiais ferroelétricos usados em pirometria[13]	. 55
Figura 29 - Amplificador de entrada tipo FET para sensores	
ferroelétricos[13].	57
Figura 30 - Voltagem de saída de pirômetros ferroelétricos resultante da	
variação de temperatura[13].	57
Figura 31 – Informações técnicas para caracterização dos índices de m	nérito
de detectores quânticos[9].	58
Figura 32 – Informações técnicas para caracterização dos índices de m	nérito
de detectores térmicos[9].	58
Figura 33 - Construção típica de um forno para calibração de pirômetro	S
infravermelhos[9].	59
Figura 34 - Típica calibração de pirômetros infravermelhos[9].	60
Figura 35 – Incerteza de medição para diversos tipos de pirômetros	
infravermelhos[15].	61
Figura 36 – Informações técnicas para aquisição de pirômetros[9].	62
Figura 37 – Medições de temperatura sem contato com o objeto[9].	63
Figura 38 – Medições de altas temperaturas (maiores do que 1300°C)	onde
outros tipos de termômetros de contato não podem ser usados[9].	63
Figura 39 – Medições de temperaturas em objetos móveis[9]	64

Figura 40 – Medições de temperatura em objetos que se encontram	
fisicamente inacessíveis e/ou em lugares com alto nível de periculosida	ade,
como por exemplo: ambientes explosivos, reatores nucleares, redes de	alta
tensão, etc[9].	64
Figura 41 – Produção de imagens térmicas[9]	65
Figura 42 – Exemplo de um tipo de pirômetro infravermelho[9].	65
Figura 43 – Esquema da calibração de termômetro de radiação	
infravermelha (Lapir).	72
Figura 44 – Desenho esquemático da calibração do sensor de tempera	tura
do forno de sinterização na INB.	77
Figura 45 – Desenho esquemático para análise de transferência de cal	or por
radiação.	86
Figura 46 – Circuito elétrico de transferência de calor por radiação	86
Figura 47 – Circuito elétrico de transferência de calor por radiação	
simplificado.	87
Figura 48 – Ajuste dos resultados experimentais de calibração.	91
Figura 49 – Ajuste dos resultados experimentais da calibração com o v	idro.
	95
Figura 50 – Resultado da medição de transmissividade do vidro comun	ո.95
Figura 51 – Resultado da medição de transmissividade do vidro comun	ո.96
Figura 52 – Ajuste dos resultados obtidos numericamente para a razão	entre
as potências emissivas hemisféricas recebida pelo padrão de transferê	ncia.
	98

Lista de tabelas

Tabela 1- Resultados da Calibração do Padrão de Transferência	90
Tabela 2- Temperatura do Circuito 1,2 e 3 medida com o padrão de	
transferência na temperatura nominal de operação do forno de	
sinterização 1750°C	91
Tabela 3 - Tensão lida no sensor de temperatura dos Circuitos 1,2 e 3	
medida com o multímetro	92
Tabela 4 - Resistência lida na junção de referência do sensor de	
temperatura dos Circuitos 1,2 e 3 medida com a termoresistência e o	
multímetro	92
Tabela 5 - Calibração do Padrão de Transferência com o vidro tempera	ado
comum(item 3.4.3.2.2.1 letra (a))	94
Tabela 6 – Potência emissiva hemisférica total e potência emissiva	
hemisférica na faixa espectral de operação recebida pelo padrão de	
transferência(item 3.4.3.2.2.1 letra (d)).	97
Tabela 7 – Razão entre as potências emissivas hemisféricas recebida	
pelo padrão de transferência para cada temperatura de calibração(item	1
3.4.3.2.2.1 letra (d)).	98
Tabela 8 - Erro sistemático de leitura do padrão de transferência devido	o à
presença do vidro do forno de sinterização de 5mm para as temperatur	as
da tabela 4.1(item 3.4.3.2.2.1 letra (e)).	99
Tabela 9- Erro sistemático de leitura do padrão de transferência devido	à
presença do vidro do forno de sinterização de 5mm para as temperatur	as
da Tabela 2(item 3.4.3.2.2.1 letra (e)).	99
Tabela 10 - Resultados para a validação do procedimento(item	
3.4.3.2.2.2)	100
Tabela 11 - Monitoramento da temperatura do canal do forno de	
sinterização.	101