

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Escola de Engenharia

Vitor Furtado Paes

**RESULTADOS DE INCERTEZA DE CALIBRAÇÃO PARA SENSORES
INFRATERMELHO DO TIPO MEMS TERMOPILHA.**

Belo Horizonte
2021

Vitor Furtado Paes

**RESULTADOS DE INCERTEZA DE CALIBRAÇÃO PARA SENSORES
INFRAVERMELHO DO TIPO MEMS TERMOPILHA.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Energia e Sustentabilidade

Orientador: Matheus Pereira Porto

Belo Horizonte

2021

P126r

Paes, Vitor Furtado.

Resultados de incerteza de calibração para sensores infravermelho do tipo MEMS termopilha [recurso eletrônico] / Vitor Furtado Paes. - 2021.
1 recurso online (xvi, 77 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Matheus Pereira Porto.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: f. 65-77.

Bibliografia: f. 57-63.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Termografia - Teses. 3. Termômetro e termometria - Teses. 4. Incerteza - Teses. 5. Sensores - Teses. I. Porto, Matheus Pereira. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621 (043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

RESULTADOS DE INCERTEZA DE CALIBRAÇÃO PARA SENSORES INFRAVERMELHO DO TIPO MEMS TERMOPILHA

VITOR FURTADO PAES

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, constituída pelos Professores: Dr. Matheus Pereira Porto (Orientador-Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), Dr. Renato Nunes Teixeira (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia/INMETRO), Dr. Rafael Augusto Magalhães Ferreira (Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG) e Dr. Pedro Bastos Costa (Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Mestre em Engenharia Mecânica**", na área de concentração de "**Energia e Sustentabilidade**".

Dissertação aprovada no dia 27 de julho de 2021.

Por:



Documento assinado eletronicamente por **Matheus Pereira Porto, Servidor(a)**, em 20/08/2021, às 08:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Renato Nunes Teixeira, Usuário Externo**, em 25/08/2021, às 10:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Rafael Augusto Magalhães Ferreira, Professor do Magistério Superior**, em 25/08/2021, às 16:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Pedro Bastos Costa, Professor do Magistério Superior**, em 25/08/2021, às 16:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0913607** e o código CRC **9BBCC241**.



Referência: Processo nº 23072.243693/2021-18

SEI nº 0913607

Agradecimentos

Ao meu orientador, Professor Matheus Porto. Obrigado pela paciência, confiança e, principalmente, por estar sempre preocupado com a formação de seus alunos como pesquisadores. São raros os professores que se dedicam desta forma para o sucesso de seus alunos. Agradeço também ao Professor Rafael Ferreira. Muito obrigado por todo apoio e disponibilidade para meus questionamentos. Sua didática é invejável.

Aos meus colegas do Laboratório de Termometria (LabTerm), por todo incentivo, companhia e colaboração, que são essenciais para tornar o ambiente de pesquisa mais agradável. Um agradecimento especial aos colegas Clara, Giovanna, Kelvin e Matheus Moreira, que contribuíram diretamente no desenvolvimento deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro durante o período de mestrado, e também ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGMEC) da UFMG por disponibilizar um ambiente favorável para o desenvolvimento da pesquisa.

Resumo

A calibração infravermelho ainda é um tópico em discussão na literatura científica. Os trabalhos publicados sobre calibração de termômetros de radiação e termovisores pecam na análise de incertezas, o que prejudica a comparação entre resultados e a confiabilidade nas medições de temperatura com estes equipamentos. Apesar disto, a utilização de dispositivos MEMS (*Micro-Electro-Mechanical Systems*) termopilha para medições de temperatura quantitativa segue aumentando, o que reforça a necessidade de uma análise da exatidão deste tipo de termômetro infravermelho. Neste contexto, este trabalho apresenta os resultados de calibração para três termômetros MEMS termopilha do mesmo fabricante. Uma metodologia de calibração que envolve a combinação de modelos matemáticos e procedimentos experimentais é proposta, e pode ser dividida nas seguintes etapas: (1) Coleta de dados experimentais; (2) Desenvolvimento de um algoritmo de calibração que envolve modelos radiométricos de transferência de calor, modelos de regressão e modelos de correção de não-uniformidade; (3) Estimativa das incertezas expandidas associadas às fontes de incerteza consideradas. A estimativa de incertezas foi feita com base nas recomendações propostas pelo método GUM (*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*), sendo consideradas as incertezas do radiador corpo-negro, do modelo matemático usado para estimar temperatura de forma indireta a partir de radiação térmica, da integração dos modelos matemáticos, e dos termômetros IR. Os resultados mostram um desvio máximo de 0,46 °C para o modelo de regressão RBF e de 0,49 °C para o modelo de Sakuma-Hattori, para a faixa de medição de 30 °C a 80 °C. As incertezas relacionadas ao radiador corpo-negro, principalmente a uniformidade e a indicação de temperatura, foram dominantes no valor de incerteza expandida, seguidas pelas incertezas da integração do modelo matemático e do ruído temporal. Foi feita uma comparação entre os resultados de incerteza deste trabalho com trabalhos da literatura científica e dados de fabricantes. A máxima incerteza expandida obtida neste trabalho ($\pm 1,9^\circ\text{C}$) é menor que a reportada pelo fabricante ($\pm 2,5^\circ\text{C}$). Os resultados do trabalho também demonstraram a importância de uma análise de incerteza feita pixel-a-pixel para verificar a confiabilidade dos instrumentos.

Palavras-chave: termografia, sensores térmicos, calibração de termopilhas, incertezas de medição.

Abstract

The calibration of IR sensors is still a subject of debate. The scientific literature still struggles with the systematic evaluation of measurement uncertainties, which hinders the comparison between calibration results and the reliability of temperature measurements. Despite this, MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) thermopile arrays are primarily used for quantitative temperature measurements, then a study that puts the accuracy of this type of sensor to the test is critical. Given this background, this work presents the calibration results of three units of commercial MEMS thermopile arrays provided by the same manufacturer. A calibration methodology is proposed, based on the combination of mathematical models and experimental procedures divided into the following parts: (1) Experimental data collection; (2) Application of algorithms (radiation heat transfer, regression models and Non-uniformity Correction models); (3) Estimation of uncertainty sources and estimation of expanded uncertainties. Uncertainty estimations are based on the GUM method (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) and took into account the uncertainty sources of the blackbody radiator, radiation heat transfer model, mathematical models integration, and IR thermometers. The results led to a maximum deviation of 0,46 °C, in the RBF model and 0,49 °C in the Sakuma-Hattori model for a measurement range of 30 °C to 80 °C. Uncertainties related to the blackbody radiator, mainly uniformity, and temperature, were dominant in the uncertainty budget, followed by the mathematical model's propagation of errors and temporal noise. The uncertainty results were compared with the scientific literature and the manufacturer's data. The maximum calibration uncertainty provided by this work ($\pm 1,9^{\circ}\text{C}$) is lower than the one provided by the manufacturer ($\pm 2,5^{\circ}\text{C}$). The results also indicates the importance of a pixel-by-pixel uncertainty analysis to verify the instruments' reliability.

Keywords: thermography, thermal sensors, thermopile calibration, uncertainty analysis.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Transmissividade atmosférica em função do comprimento de onda para duas distâncias de propagação (10 m e 100 m). Adaptado de (BUDZIER; GERLACH, 2011).	21
Figura 2 – Estrutura básica de um módulo termopilha e seus principais componentes. Adaptado de (XU <i>et al.</i> , 2017).	23
Figura 3 – Ilustração do efeito Seebeck.	24
Figura 4 – Representação do efeito Seebeck nos termopares (esquerda) e nas termopilhas (direita).	25
Figura 5 – Componentes radiométricas em um procedimento de calibração.	26
Figura 6 – Procedimento de correção de não-uniformidade aplicado a um termograma. Fonte: (HE <i>et al.</i> , 2018).	30
Figura 7 – Diagrama esquemático da metodologia de calibração. Os dados de entrada da metodologia são representados pelos colchetes na parte superior do gráfico e consistem em: modelo NUC, dados experimentais, regressões de Planck e revisões da literatura. A caixa vermelha tracejada representa a integração dos modelos matemáticos realizada com os dados experimentais e os modelos NUC e de regressão, detalhados na Fig. 8. Na parte inferior do diagrama, a análise de incerteza é esquematizada com seus respectivos grupos de incerteza. A análise pós-calibração também é detalhada.	35
Figura 8 – Diagrama da rotina integrada. Os colchetes representam as entradas do modelo, e consistem dos dados experimentais e das regressões de Planck. O método NUC também é uma entrada da rotina integrada, porém, como é um modelo matemático, está representado pela caixa tracejada. As saídas do algoritmo são as curvas de calibração, com seus respectivos coeficientes de calibração, e o desvio de medição. A saída do método NUC é o parâmetro RNU (residual de não-uniformidade).	36
Figura 9 – Croqui do procedimento experimental de calibração dos termômetros IR.	38
Figura 10 – Residual de não-uniformidade para o método <i>two-point</i> NUC.	40
Figura 11 – Residual de não-uniformidade para o método <i>multi-point</i> NUC.	40
Figura 12 – Curva de regressão e seus respectivos coeficientes de calibração para o modelo Sakuma-Hattori.	41
Figura 13 – Curva de regressão e seus respectivos coeficientes de calibração para o modelo RBF.	42

Figura 14 –Análise da uniformidade do radiador corpo-negro.	45
Figura 15 –Contribuição das fontes de incerteza ao longo das temperaturas de referência (CAM 1).	48
Figura 16 –Contribuição das fontes de incerteza ao longo das temperaturas de referência (CAM 2).	49
Figura 17 –Contribuição das fontes de incerteza ao longo das temperaturas de referência (CAM 3).	49
Figura 18 –Distribuição das incertezas expandidas na matriz de pixels ao longo dos pontos de calibração (CAM 1).	50
Figura 19 –Distribuição das incertezas expandidas na matriz de pixels ao longo dos pontos de calibração (CAM 2).	50
Figura 20 –Distribuição das incertezas expandidas na matriz de pixels ao longo dos pontos de calibração (CAM 3).	51
Figura 21 –Incerteza percentual relativa entre os pontos de calibração (CAM 1). . .	52
Figura 22 –Incerteza percentual relativa entre os pontos de calibração (CAM 2). . .	52
Figura 23 –Incerteza percentual relativa entre os pontos de calibração (CAM 3). . .	53
Figura 24 –Valores médios da incerteza do modelo de correção (u_{fit}) considerando o <i>multi-point</i> , <i>two-point</i> NUC e a correção aplicada diretamente nos dados brutos.	54
Figura 25 –Termômetro MEMS termopilha AMG8833 Grid-Eye. Fonte: (PANASONIC, 2021).	66
Figura 26 –Radiador corpo-negro FLUKE 4181. Fonte: (FLUKE, 2013).	67
Figura 27 –Termo-higrômetro TESTO 622. Fonte: (TESTO, 2021).	68
Figura 28 –Sistema de aquisição de dados NI 9211 Series C. Fonte: (INSTRUMENTS, 2015).	69
Figura 29 –Câmera científica FLIR SC660. Fonte: (FLIR, 2011).	70
Figura 30 –Termorresistência PT-100 Ecil 4W.	71
Figura 31 –Sistema de aquisição de dados Agilent 34970A.	72

Lista de tabelas

Tabela 1	– Coeficientes de calibração e desvio máximo absoluto ($ \Delta T_{max} $) para o modelo de regressão Sakuma-Hattori.	41
Tabela 2	– Coeficientes de calibração e desvio máximo absoluto ($ \Delta T_{max} $) para o modelo de regressão RBF (Eq. 3.11).	41
Tabela 3	– Fontes de incerteza contempladas em estudos prévios de calibração e neste presente trabalho.	42
Tabela 4	– Fontes de incerteza assumidas no modelo de calibração proposto. . . .	43
Tabela 5	– Incertezas de calibração para a CAM 1. A incerteza expandida U foi determinada com um fator de abrangência $k_p = 2$, para um intervalo de confiança de 95,45 %.	47
Tabela 6	– Incertezas de calibração para a CAM 2. A incerteza expandida U foi determinada com um fator de abrangência $k_p = 2$, para um intervalo de confiança de 95,45 %.	47
Tabela 7	– Incertezas de calibração para a CAM 3. A incerteza expandida U foi determinada com um fator de abrangência $k_p = 2$, para um intervalo de confiança de 95,45 %.	48
Tabela 8	– Incertezas expandidas de calibração para diferentes estudos e fabricantes. O termo NI indica a falta de informações.	53
Tabela 9	– Especificações do termômetro AMG8833 Grid-Eye. Fonte: (PANASONIC, 2021).	66
Tabela 10	– Especificações do radiador corpo-negro FLUKE 4181. Fonte: (FLUKE, 2013).	67
Tabela 11	– Especificações do termo-higrômetro TESTO 622. Fonte: (TESTO, 2021). . . .	68
Tabela 12	– Especificações do sistema de aquisição de dados NI 9211 Series C. Fonte: (INSTRUMENTS, 2015).	69
Tabela 13	– Especificações do termovisor FLIR SC660. Fonte: (FLIR, 2011).	70
Tabela 14	– Especificações da termorresistência Ecil PT-100 4W.	71
Tabela 15	– Especificações do sistema de aquisição de dados Agilent 34970A. Fonte: (TECHNOLOGIES, 2019)	72

Lista de abreviaturas e siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
DTR	<i>Digital Temperature Resolution</i>
FPA	<i>Focal plane array</i>
GUM	<i>Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements</i>
IR	Infravermelho
JCGM	<i>Joint Committee for Guides in Metrology</i>
LWIR	<i>Long-Wave Infrared</i>
MEMS	<i>Micro-Electro-Mechanical Systems</i>
MWIR	<i>Medium-Wave Infrared</i>
NETD	<i>Noise Equivalent Temperature Difference</i>
NUC	<i>Non-Uniformity Correction</i>
RBF	Modelo de regressão baseado nos coeficientes R, B e F
RNU	Residual de Não-Uniformidade
ROIC	<i>Readout Integrated Circuit</i>
SWIR	<i>Short-Wave Infrared</i>

Lista de símbolos

A	coeficiente de calibração (Sakuma-Hattori)
B	coeficiente de calibração (Sakuma-Hattori e RBF)
C	coeficiente de calibração (Sakuma-Hattori)
c_i	coeficiente de sensibilidade
E_b	poder emissivo de corpo-negro, W/m^2
F	coeficiente de calibração (RBF)
F_{12}	fração de energia
G	coeficiente de ganho (NUC)
I	intensidade de radiação, $W/m^2\mu m$
J_0	coeficiente de calibração (RBF)
J_1	coeficiente de calibração (RBF)
k	resolução do conversor analógico-digital
k_0	constante dependente das propriedades ópticas e geométricas do termômetro
k_b	constante de Boltzmann, J/K
k_p	fator de abrangência
N_f	número de frames
N_t	número de pixels
N_{tp}	quantidade de termopares conectados em série
O	coeficiente de offset (NUC)
R	coeficiente de calibração (RBF)
R_λ	responsividade espectral
S	sinal de resposta
\bar{S}	sinal médio de resposta

s	desvio padrão
T	temperatura, K
\bar{T}	temperatura média, K
T_{det}	temperatura do detector, K
ΔT	diferença de temperatura, K
ΔT_{max}	desvio máximo de temperatura, K
ΔT_{span}	faixa de operação do termômetro, K
u_c	incerteza combinada
U	incerteza expandida
u	incerteza padrão
ΔV	diferença de potencial, μV

Letras gregas

α	coeficiente Seebeck, $\mu V/K$
ϵ	emissividade
λ	comprimento de onda, μm
ν	graus de liberdade
ρ	refletividade
τ	transmissividade
$\varphi\%$	umidade relativa

Subscritos

amb	relativo à ambiente
atm	relativo à atmosfera
bb	relativo a corpo-negro
c	relativo a corrigido
cam	relativo à câmera
emi	relativo à emissividade

<i>fit</i>	relativo a integração dos modelos matemáticos
<i>full</i>	relativo à soma de componentes radiométricas
<i>hl</i>	relativo à perda de calor
<i>nuc</i>	relativo a NUC
<i>obj</i>	relativo à componente do objeto
<i>refl</i>	relativo à componente refletida
<i>sta</i>	relativo à estabilidade
<i>std</i>	relativo a desvio padrão
<i>tn</i>	relativo a ruído temporal
<i>tr</i>	relativo à resolução de temperatura
<i>uni</i>	relativo à uniformidade

Sobrescritos

<i>ij</i>	relativo à posição na matriz
-----------	------------------------------

Sumário

1	Introdução	17
1.1	Objetivos	18
1.2	Estrutura do trabalho	19
2	Sensores IR	20
2.1	Classificação dos sensores IR	20
2.2	Termopilhas	22
2.3	Efeito Seebeck	23
3	Fundamentos de calibração IR	26
3.1	Modelo radiométrico de transferência de calor	26
3.2	Modelos de regressão	28
3.3	Correção de não-uniformidade (NUC)	30
3.4	Análise de incertezas	32
4	Fluxogramas de calibração	34
5	Calibração de termômetros de radiação do tipo MEMS termopilha	37
5.1	Procedimento experimental	37
5.2	Correção de não-uniformidade (NUC)	39
5.3	Modelos de regressão	40
5.4	Análise de incertezas	42
5.4.1	Análise de incertezas: Modelo de medição	43
5.4.2	Análise de incertezas: Radiador corpo-negro	44
5.4.3	Análise de incertezas: Termômetro infravermelho	46
5.4.4	Análise de incertezas: Integração dos modelos matemáticos	46
5.4.5	Análise de incertezas: Incertezas de calibração	47
6	Conclusão	55
6.1	Sugestão para trabalhos futuros	56
	Referências	58
	Apêndices	65
	APÊNDICE A Lista de equipamentos	66

APÊNDICE B Certificado de calibração da termorresistência PT-100 . . .	73
--	----

1 Introdução

A calibração é um procedimento que estabelece uma relação, sob condições especificadas, entre os valores de um padrão e as indicações de um instrumento em teste, com suas respectivas incertezas associadas (JCGM:200, 2012). No caso da calibração infravermelho, há uma relação entre as indicações de temperatura do instrumento em teste (termômetro de radiação ou termocâmara) e os valores de temperatura do radiador padrão corpo-negro, de modo que as incertezas de medição sejam compreendidas. Para que o termômetro em teste realize medições de temperatura quantitativa confiáveis, o procedimento de calibração deve conter rastreabilidade, ou seja, é necessário que as temperaturas do padrão estejam associadas à uma escala internacional de medição, que no caso da temperatura é a Escala Internacional de Temperatura (ITS-90). Além disto, a calibração de termômetros de radiação recorre à análise do modelo de medição empregado para se obter os valores de temperatura, no qual se observam vários fatores de influência na determinação do mensurando, o que torna a avaliação das incertezas de medição um passo fundamental para que a calibração seja realizada de maneira adequada e tenha resultados confiáveis.

Os termômetros de radiação do tipo MEMS (*Micro-Electro-Mechanical Systems*) termopilha são equipamentos amplamente utilizados para medições de temperatura (SUN *et al.*, 2014; HSU *et al.*, 2015; FRANCHI *et al.*, 2019). Apesar de serem empregados como instrumentos de medição, é difícil encontrar na literatura científica estudos que abordam a confiabilidade e a incerteza de medição do procedimento de calibração deste tipo de sensor. Os estudos de calibração, em sua grande maioria, abordam apenas os modelos de regressão utilizados para se obter os coeficientes de calibração, sem levar em consideração a análise metrológica do procedimento.

A calibração de termômetros infravermelho, em geral, é um tópico negligenciado (MACHIN; SIMPSON; BROUSSELY, 2009; LANE; WHITENTON, 2016). DeWitt (1986) e Martiny *et al.* (1996) foram pioneiros nos estudos de calibração, apresentando métodos para relacionar o sinal dos dispositivos IR com a temperatura de corpo-negro, baseando-se na Lei física de Planck. Autores como Rainieri e Pagliarini (2002), Horny (2003), Ochs, Schulz e Bauer (2010), e Chung e Chen (2010) aprimoraram os estudos da área, apresentando metodologias com diferentes modelos de regressão e também incorporando correções de erros sistemáticos que afetam o sinal de resposta dos detectores. Por outro lado, a análise de incertezas de calibração nestes estudos é negligenciada, ou então tratada de maneira arbitrária, muitas vezes sem levar em consideração as principais componentes de incerteza no procedimento de correção. Isto culminou na publicação da norma ASTM E2847-14 (ASTM, 2014), que discorre sobre técnicas, aparatos experimentais e fontes de incerteza que são predominantes nos procedimentos de calibração de termômetros de

radiação.

A análise sistemática das incertezas de calibração é um passo extremamente importante para se obter confiabilidade nas medições e para que o procedimento possa ser replicado por pares científicos (LANE; WHITENTON, 2016). No entanto, observa-se nos trabalhos científicos a negligência de fontes importantes de incerteza, e muitas vezes sem a devida justificativa para tal, prejudicando o desenvolvimento de metodologias robustas que sirvam de referência para a calibração IR.

Outro dilema que os pesquisadores encontram é a falta de informações dos fabricantes de instrumentos IR: (i) os termômetros de radiação e câmeras termográficas comerciais raramente dão acesso ao sinal de resposta (tensão ou digital) dos sensores; (ii) os fabricantes geralmente não emitem certificados de calibração, e quando o fazem, o documento não contém rastreabilidade ou informações detalhadas sobre a análise de incertezas; (iii) os fabricantes não fornecem dados sobre o algoritmo de pós-processamento das imagens termográficas; e (iv) a termografia é uma área de conhecimento transdisciplinar, e apesar disto, os pesquisadores em geral se limitam à apenas um objetivo.

Neste contexto, o presente trabalho apresenta os resultados de calibração para três termômetros de radiação do tipo MEMS termopilha, do mesmo fabricante. Propõe-se uma análise robusta do procedimento de calibração, que envolve uma combinação de procedimentos experimentais e a integração de modelos matemáticos de transferência de calor por radiação, modelos de regressão e procedimentos de correção. As incertezas de calibração foram estimadas no intervalo de medição de 30 °C a 80 °C, utilizando como referência a norma ASTM E2847-14 e o método GUM (JCGM:100, 2008).

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é apresentar os resultados de incerteza de calibração de termômetros de radiação do tipo MEMS termopilha por meio de uma metodologia que incorpora diferentes modelos matemáticos, procedimentos experimentais, e uma análise de incerteza baseada em normas internacionais.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- i. Obter os coeficientes de calibração de cada termômetro na faixa de temperatura especificada;
- ii. Avaliar o desempenho dos diferentes procedimentos de correção de não-uniformidade para reduzir o ruído espacial entre os detectores de um mesmo equipamento;
- iii. Avaliar a influência dos diferentes procedimentos de correção de não-uniformidade na incerteza da integração dos modelos matemáticos;

- iv. Análise comparativa entre os resultados de calibração obtidos no presente trabalho e nos dados da literatura e de fabricantes;

1.2 Estrutura do trabalho

Este trabalho foi dividido em seis capítulos, começando pela introdução. No Capítulo 2, apresenta-se uma breve introdução sobre sensores IR, com ênfase no grupo de sensores térmicos do tipo MEMS termopilha. O Capítulo 3 apresenta uma discussão sobre os modelos matemáticos utilizados para a calibração infravermelho: (i) modelo radiométrico de transferência de calor; (ii) modelos de regressão; e (iii) modelo de correção de não-uniformidade (NUC). Os modelos apresentados no Capítulo 3 podem ser combinados de diferentes maneiras para se desenvolver um algoritmo de calibração. É importante destacar como esses modelos funcionam juntos, e isto é demonstrado por meio de fluxogramas apresentados no Capítulo 4. Apresenta-se em detalhes o procedimento experimental, os resultados de calibração e as análises no Capítulo 5. No Capítulo 6, apresentam-se as conclusões deste trabalho. Por fim, o Apêndice A detalha a lista de equipamentos utilizados nos procedimentos experimentais da pesquisa.

2 Sensores IR

Neste capítulo será feita uma breve introdução sobre instrumentos e sensores IR utilizados na termografia quantitativa, com enfoque no grupo de sensores térmicos do tipo MEMS termopilha, objeto de estudo deste trabalho. Serão apresentados também o princípio de operação, os componentes básicos das termopilhas, além de destacar a gama de aplicações para este tipo de sensor.

2.1 Classificação dos sensores IR

Sensores IR são instrumentos eletrônicos que captam radiação eletromagnética nos comprimentos de onda do espectro infravermelho ($\approx 0,7 \mu m - 1000 \mu m$), e convertem esta radiação incidente em valores de temperatura mostrados na interface do dispositivo IR. A tecnologia infravermelho, criada pelos militares para o desenvolvimento de equipamentos de monitoramento e visão noturna, hoje em dia é amplamente utilizada na indústria e nos centros de pesquisa. Apesar de serem muito utilizados para inspeções termográficas qualitativas, visando apenas uma análise superficial e comparativa entre as superfícies inspecionadas, os dispositivos IR possuem um modelo matemático radiométrico embutido para a determinação de temperatura. Este modelo apresenta considerações generalistas que descrevem o comportamento espectral e as características ópticas das superfícies analisadas. Isto implica que diversos fatores podem influenciar as medições realizadas por esses equipamentos e devem ser devidamente contabilizados para que o registro feito pelos termômetros ou câmeras tenha um significado físico real. Minkina e Dudzik (2009) retratam de forma bem detalhada a análise desses fatores de influência, considerando os erros e incertezas nas medições de temperatura por termografia.

Os sensores IR podem ser divididos de acordo com a sua faixa de operação espectral. Na termografia científica, divide-se o espectro infravermelho em três bandas espectrais menores, que compreendem a radiação emitida pela maioria dos objetos (VOLLMER; MÖLLMANN, 2018): (i) $0,9 \mu m - 1,7 \mu m$, banda espectral de ondas curtas (SWIR); (ii) $3 \mu m - 5 \mu m$, banda espectral de ondas médias (MWIR); e (iii) $8 \mu m - 14 \mu m$, banda espectral de ondas longas (LWIR). A maioria dos termômetros de radiação e termovisores operam nas bandas de onda média (MWIR) e onda longa (LWIR), aproveitando a elevada transmissividade atmosférica nessas janelas espectrais (vide Fig. 1). Os dispositivos IR, em geral, não operam nos comprimentos de onda de $5 \mu m$ a $8 \mu m$ e nem acima de $14 \mu m$. Isto acontece pela elevada absorção de energia pelas moléculas de gases presentes na atmosfera, principalmente o CO_2 e H_2O (ROGALSKI, 2003).

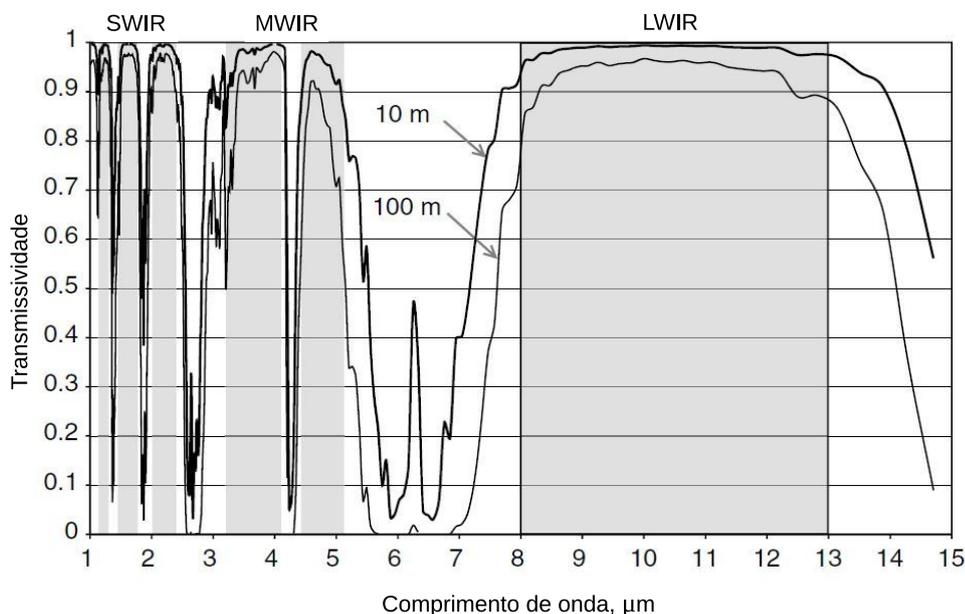


Figura 1: Transmissividade atmosférica em função do comprimento de onda para duas distâncias de propagação (10 m e 100 m). Adaptado de (BUDZIER; GERLACH, 2011).

Além da classificação por faixa de operação espectral, os sensores IR podem ser divididos em dois grupos distintos, de acordo com o princípio de conversão de sinal radiométrico para sinal eletrônico: sensores térmicos e sensores fotônicos. Nos sensores fotônicos, a interação entre a camada absorvedora (semicondutor) e os fótons da radiação incidente geram um sinal de resposta, proporcional à concentração de elétrons presentes no material absorvedor. A responsividade dos sensores fotônicos exibe uma elevada dependência espectral em relação a radiação incidente. As principais características dos sensores fotônicos são a altíssima sensibilidade, as elevadas taxas de aquisição, e os pequenos tempos de integração. A grande desvantagem desses detectores é a necessidade de resfriamento devido à sua elevada sensibilidade. Os sensores fotônicos precisam manter sua temperatura controlada, principalmente em medições de temperatura próximas das condições ambiente, a fim de evitar ruído no sinal de resposta. Isto acarreta em um produto caro, pesado e que requer periódicas manutenções no sistema de resfriamento (GADE; MOESLUND, 2014).

Nos sensores térmicos, o processo de conversão do sinal depende de propriedades físicas intrinsecamente relacionadas à temperatura. Primeiramente, há um aumento da temperatura do detector em decorrência da absorção de radiação incidente. Este aumento de temperatura induz uma variação em alguma propriedade física do elemento sensor, gerando um sinal de resposta. No caso dos bolômetros, há uma variação na resistência interna do detector. Nos detectores piroelétricos, a variação de temperatura provoca uma mudança na polarização do material, gerando um potencial elétrico. As termopilhas, por sua vez, operam com base em efeitos termoelétricos (efeito Seebeck). Independente do

tipo de sensor térmico, o sinal de resposta geralmente está apenas relacionado ao fluxo de radiação total, não havendo uma dependência espectral (BUDZIER; GERLACH, 2011). As características dos sensores térmicos são baixo custo, sensibilidade moderada, e tempos de resposta relativamente altos (na ordem dos *ms*). Além disto, as câmeras termográficas que operam com sensores térmicos não necessitam de resfriamento criogênico, o que permite um equipamento com maior custo benefício e melhor desempenho na operação em temperatura ambiente.

Historicamente, considerando o desenvolvimento da tecnologia de sensores infravermelho, os sensores fotônicos sempre foram mais utilizados nas aplicações industriais e militares (ROGALSKI, 2003). Isto ocorreu pelas melhores características dos sensores fotônicos em comparação com os sensores térmicos, principalmente a resposta rápida e a elevada sensibilidade. No entanto, com o advento das câmeras termográficas com matrizes de detectores no plano focal de lentes (FPA, *Focal Plane Arrays*), os sensores térmicos passaram a ser mais utilizados nos termovisores e termômetros de radiação. A grande quantidade de detectores em uma matriz compensa a moderada sensibilidade, além de apresentar uma melhor relação sinal-ruído (NETD, *Noise Equivalent Temperature Difference*). Outro fator que contribuiu para o desenvolvimento e implementação dos sensores térmicos foi o surgimento dos modernos processos de fabricação microeletrônica e os sistemas microeletromecânicos (MEMS, *Micro-Electro-Mechanical System*), que possibilitaram a produção em massa de matrizes de sensores térmicos com alta resolução, baixo custo, leves e portáteis, o que revolucionou a termografia científica.

2.2 Termopilhas

As termopilhas são sensores térmicos que operam por meio do efeito Seebeck, no qual vários termopares são ligados em série, contribuindo para a amplificação do sinal de resposta. A produção em massa deste tipo de sensor também viabilizou a utilização dos mesmos em diversas aplicações, onde se destacam: fabricação de termômetro timpânico (CHEN, 2011); triagem de febre (SUN *et al.*, 2014); detecção de gases (HOULET *et al.*, 2008); avaliação de eficiência energética em edifícios (VALENTE *et al.*, 2019); e monitoramento de temperatura de células de combustíveis (FRANCHI *et al.*, 2019). Isto se deve aos novos processos de manufatura, em especial a tecnologia MEMS, que possibilitou a fabricação das termopilhas com baixo custo, vários elementos detectores, interface simples e tamanho compacto (XU *et al.*, 2017). O progresso da engenharia de materiais também viabilizou o design de termopilhas com melhores materiais termoelétricos, membranas absorvedoras mais finas e estruturas isolantes mais eficientes (XU *et al.*, 2017).

Um sensor MEMS termopilha pode ser composto de apenas um detector, ou seja, uma termopilha, ou então várias termopilhas organizadas em uma matriz. Cada uma das

termopilhas é chamada de módulo, e os componentes básicos de um módulo termopilha são: termopares de materiais metálicos ou semicondutores; substrato de silício, onde a junta fria dos termopares está conectada; membrana termicamente isolante que repousa sob a junta quente dos termopares; filme absorvedor, que está disposto acima da junta quente dos termopares; e um termistor, disposto no substrato de silício, que mede a temperatura da junta fria (referência) (GRAF *et al.*, 2007; HOU *et al.*, 2019). A Figura 2 ilustra o design básico de um módulo termopilha com seus principais componentes.

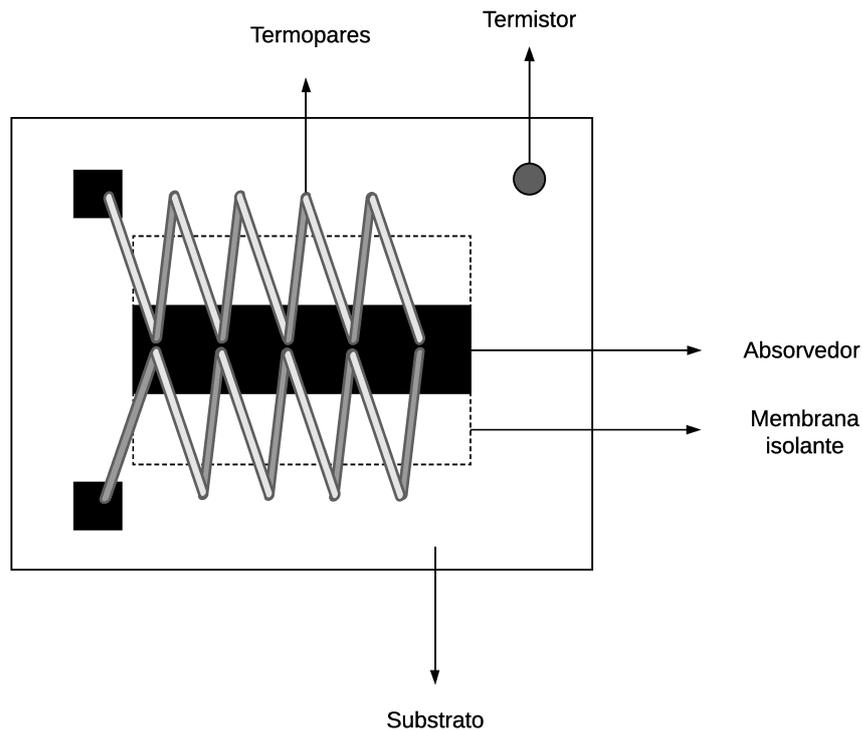


Figura 2: Estrutura básica de um módulo termopilha e seus principais componentes. Adaptado de (XU *et al.*, 2017).

2.3 Efeito Seebeck

O efeito Seebeck é o fenômeno termoelétrico que descreve a movimentação de elétrons ao se estabelecer uma diferença de temperatura entre as duas juntas de dois materiais dissimilares (vide Fig. 3). A diferença de potencial elétrico gerado (ΔV) está relacionada a diferença de temperatura estabelecida entre as duas juntas dos materiais conectados (ΔT), e a constante de proporcionalidade que relaciona as duas figuras de mérito é chamada de coeficiente Seebeck (α_m), descrita na Eq. 2.1.

$$\alpha_m = \frac{dV}{dT} \quad (2.1)$$

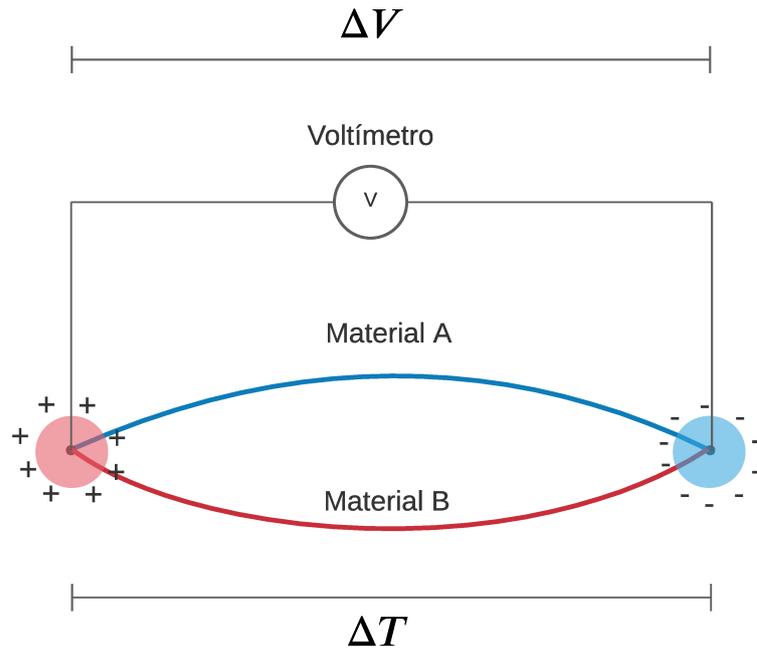


Figura 3: Ilustração do efeito Seebeck.

A aplicação mais difundida do efeito Seebeck está relacionada ao desenvolvimento dos termopares e das termopilhas, equipamentos utilizados para medição de temperatura quantitativa. A força eletromotriz gerada pelos termopares tem uma ordem de grandeza geralmente pequena (μV), o que dificulta a medição de pequenas diferenças de temperatura. A solução encontrada para aumentar a sensibilidade destes dispositivos foi conectar vários termopares em série (termopilha), o que resulta em uma força eletromotriz amplificada, proporcional ao número de termopares conectados em série, conforme ilustra a Fig. 4. A força eletromotriz gerada pelas termopilhas (V_{out}) pode ser descrita pela equação a seguir:

$$V_{out} = N_{tp} \alpha_r(T) \Delta T \quad (2.2)$$

onde N_{tp} é a quantidade de termopares conectados em série, $\alpha_r(T)$ é o coeficiente Seebeck relativo entre os dois materiais dissimilares (material A e B), e ΔT é a diferença de temperatura entre as duas juntas.

O sinal gerado por dispositivos eletrônicos que operam com base no efeito Seebeck corresponde apenas à diferença de temperatura entre as duas juntas dos diferentes materiais. No caso da termometria por radiação, para que a medição de temperatura absoluta seja possível, é necessário aplicar uma compensação de junta fria, de modo que o sinal medido represente apenas a temperatura da junta quente.

Essa compensação pode ser feita principalmente por meio de dois artifícios: (i) Ponto do gelo; e (ii) Temperatura de referência. No primeiro caso, a junta fria do dispositivo é conectada a um banho de gelo a $0\text{ }^\circ\text{C}$, de modo que não há força eletromotriz sendo

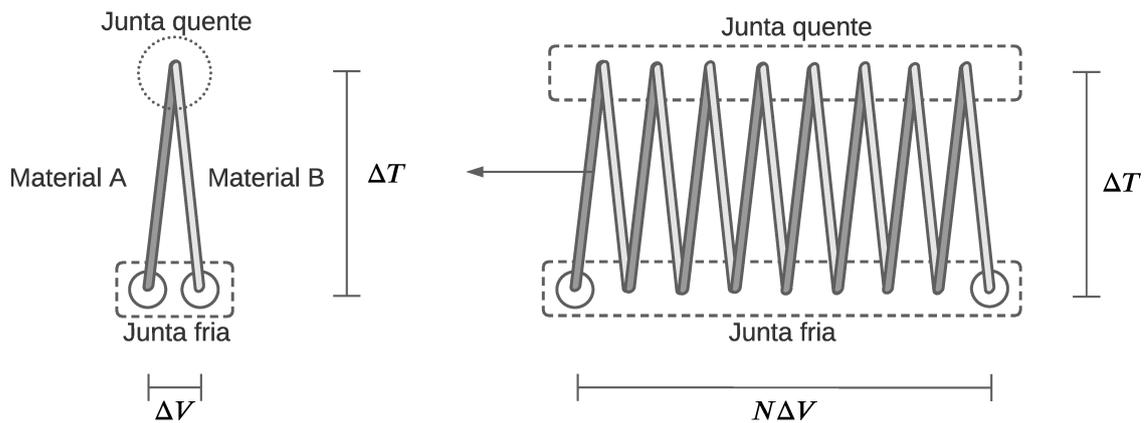


Figura 4: Representação do efeito Seebeck nos termopares (esquerda) e nas termopilhas (direita).

gerada nos terminais do instrumento de leitura. Neste caso, apenas a força eletromotriz da junta quente é considerada, portanto temos o valor de temperatura absoluta sendo medida. No segundo caso, a compensação de junta fria é feita medindo-se o valor da temperatura da junta fria (temperatura de referência). Para cada tipo de termopar diferente, existe uma tabela de referência (ABNT, 1999) que relaciona a temperatura da junta fria com sua respectiva força eletromotriz. Soma-se então a força eletromotriz gerada pelo instrumento de medição com a força eletromotriz correspondente à temperatura de junta fria, obtendo-se a força eletromotriz corrigida. Na maior parte das termopilhas comerciais, a compensação da junta fria é feita de maneira automática por meio dos valores de temperatura de referência registrados pelo termistor.

É de extrema importância entender a classificação dos sensores infravermelho e seus princípios físicos de operação para a realização da termometria por radiação. A escolha de um sensor IR e o dispositivo que o opera (termômetro de radiação ou uma termocâmara) requer um amplo conhecimento das características do dispositivo (FOV, IFOV, taxa de aquisição, comprimento de onda de operação, etc) e também do que foi exposto neste Capítulo. Além disto, o entendimento do processamento de sinal é fundamental para se avaliar as medições de temperatura realizadas com estes instrumentos nos procedimentos de calibração, tópico que será abordado no próximo capítulo.

3 Fundamentos de calibração IR

Neste capítulo serão apresentados três modelos matemáticos utilizados em procedimentos de calibração IR: (i) modelo radiométrico de transferência de calor; (ii) modelos de regressão; e (iii) modelo de correção de não-uniformidade. Os modelos matemáticos citados anteriormente são importantes pois os instrumentos IR fazem medições de temperatura de maneira indireta. Neste contexto, as variáveis utilizadas para converter energia térmica em sinal eletrônico, e posteriormente sinal eletrônico em temperatura, dependem da natureza física do fenômeno radiométrico de transferência de calor e também da parte eletrônica embutida nos dispositivos. A apresentação dos modelos matemáticos evidencia a natureza dessas conversões, o que facilita o entendimento da estimativa das incertezas de calibração.

3.1 Modelo radiométrico de transferência de calor

Nesta seção, são apresentados os modelos matemáticos de transferência de calor que caracterizam a energia incidente na superfície dos dispositivos IR. Dependendo do nível de exatidão que se almeja no procedimento de calibração, pode-se optar pela formulação geral de transferência de calor por radiação (Eq. 3.1), ou então por formulações mais algébricas, como as apresentadas nas Eqs. 3.2 e 3.4.

A interpretação física mais usual utilizada em procedimentos de calibração sugere que três componentes radiométricas chegam à superfície dos dispositivos IR (vide Fig. 5): componente emitida pelo radiador; componente refletida pelo radiador, oriunda de fontes externas; e a componente emitida pela atmosfera. A Equação 3.1 descreve a formulação matemática mais geral para cômputo do sinal radiométrico incidente sobre o instrumento de medição.

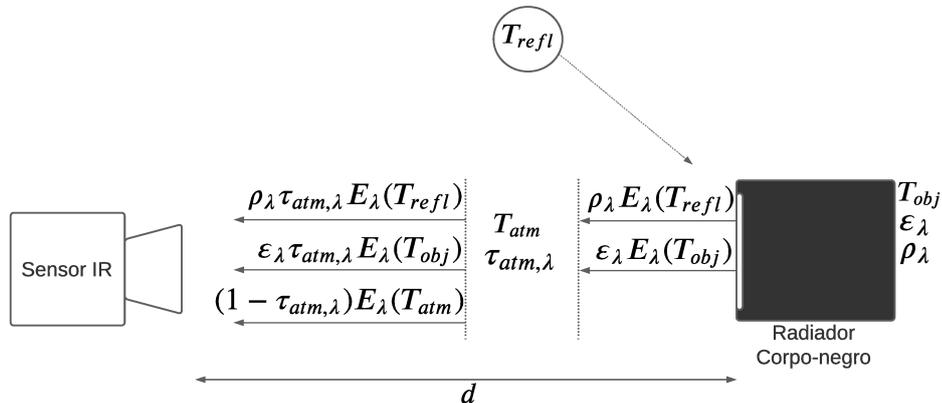


Figura 5: Componentes radiométricas em um procedimento de calibração.

$$E_{full} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left[\varepsilon_{\lambda} \tau_{atm,\lambda} I_{\lambda}(T_{obj}) + \rho_{\lambda} \tau_{atm,\lambda} I_{\lambda}(T_{refl}) + (1 - \tau_{atm,\lambda}) I_{\lambda}(T_{atm}) \right] d\lambda, \quad (3.1)$$

onde os subscritos *full*, *obj*, *refl*, *atm* e λ se referem a soma de componentes radiométricas, componente do objeto, componente refletida, componente atmosférica e dependência espectral, respectivamente. Os símbolos ε , ρ , τ , E , T e I se referem à emissividade do radiador padrão (corpo-negro), refletividade do corpo-negro, transmissividade da atmosfera, poder emissivo [W/m^2], temperatura [K] e intensidade [$W/m^2\mu m$], respectivamente.

Em uma abordagem mais algébrica, as superfícies de corpo-negro são caracterizadas por modelos cinza-difusos, o que é uma generalização bem fidedigna ao se analisar superfícies com emissividade elevada. Feita a consideração de um modelo cinza-difuso, a Equação 3.2 pode ser utilizada para a determinação da temperatura cheia (T_{full}), iterativamente:

$$T_{full}^4 F_{12}(T_{full}) = \varepsilon \tau_{atm} T_{obj}^4 F_{12}(T_{obj}) + (1 - \varepsilon) \tau_{atm} T_{refl}^4 F_{12}(T_{refl}) + (1 - \tau_{atm}) T_{atm}^4 F_{12}(T_{atm}), \quad (3.2)$$

onde T_{full} pode ser caracterizada como a temperatura do radiador padrão com o mesmo fluxo de energia que chega aos sensores IR; ε é a emissividade hemisférica de banda espectral do corpo-negro; τ_{atm} é a transmissividade atmosférica de banda espectral, obtida por meio da distância de inspeção e da umidade relativa; e F_{12} é a fração de energia correspondente a banda espectral de operação do termômetro de radiação ou termovisor, determinada a partir de

$$F_{12} = \frac{15}{\pi^4} \left\{ \sum_{m=1}^3 \left[\frac{e^{-m\zeta_2}}{m} \left(\zeta_2^3 + \frac{3\zeta_2^2}{m} + \frac{6\zeta_2^2}{m^2} + \frac{6}{m^3} \right) \right] + \right. \\ \left. - \sum_{m=1}^3 \left[\frac{e^{-m\zeta_1}}{m} \left(\zeta_1^3 + \frac{3\zeta_1^2}{m} + \frac{6\zeta_1^2}{m^2} + \frac{6}{m^3} \right) \right] \right\}, \quad (3.3)$$

onde $\zeta_i = c_2/(\lambda_i T)$, e c_2 tem o valor de 0,014388 mK .

Caso a dependência espectral seja negligenciada, e as componentes radiométricas sejam estimadas como hemisféricas-totais, a temperatura T_{full} pode ser determinada por

$$T_{full} = \left[\varepsilon \tau_{atm} T_{obj}^4 + (1 - \varepsilon) \tau_{atm} T_{refl}^4 + (1 - \tau_{atm}) T_{atm}^4 \right]^{0.25}. \quad (3.4)$$

A Equação 3.4 é a interpretação física mais utilizada em procedimentos de calibração e pelos fabricantes de instrumentos IR (TRAN *et al.*, 2017). É importante notar que o modelo de corpo-cinza só deve ser aplicado a superfícies próximas a de um corpo-negro, e deve ser evitado em algumas aplicações de engenharia, como nos trabalhos de M. FERREIRA *et al.* (2019) e MOREIRA *et al.* (2021).

Durante o procedimento de calibração, T_{full} é utilizada ao invés de T_{obj} , pois esta temperatura representa o sinal que é gerado pelo dispositivo IR para um determinado experimento. Neste contexto, para a aplicação das Eqs. 3.2 e 3.4, a temperatura T_{obj} pode ser obtida por meio de um termopar calibrado, em contato com a superfície de emissão do corpo-negro. Caso a superfície de corpo-negro analisada apresente uma emissividade $\varepsilon \approx 1$, a correção apresentada não é necessária, pois $T_{obj} \approx T_{full}$, e os modelos de regressão podem ser aplicados diretamente com T_{obj} .

3.2 Modelos de regressão

O sinal eletrônico gerado pelos termômetros de radiação e câmeras termográficas, quando expostos a um corpo-negro de temperatura T , pode ser formulado como exposto por Battuello e Ricolfi (1992):

$$S(T) = k_0 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_\lambda I_{\lambda,b}(T) d\lambda \quad (3.5)$$

onde: R_λ é a responsividade espectral do instrumento; k_0 é uma constante dependente das propriedades geométricas, ópticas e eletrônicas do instrumento; λ_1 e λ_2 representam a faixa espectral de operação do dispositivo; e $I_{\lambda,b}$ é a intensidade espectral do corpo-negro, obtida por meio da distribuição de Planck:

$$I_{\lambda,b}(T) = \frac{c_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} \quad (3.6)$$

onde c_1 e c_2 são as duas constantes de radiação com valores de $1,19104282 \cdot 10^{-16} \text{ Wm}^{-2}$ e $0,014388 \text{ mK}$, respectivamente.

Para resolver a integral da Eq. 3.5, é necessário o conhecimento prévio da responsividade espectral da câmera ou termômetro, o que raramente é fornecido pelos fabricantes. Além disto, a medição da responsividade espectral é um procedimento complexo, dificultando a aplicação da Eq. 3.5.

Para contornar este problema, modelos de regressão foram desenvolvidos para se estabelecer uma relação entre o sinal eletrônico registrado pelo dispositivo IR e a temperatura do corpo-negro, sendo baseados em funções polinomiais (HONORAT *et al.*, 2005; PRON; BOUACHE, 2016; ARAGON *et al.*, 2020) ou aproximações da integral de Planck (MARTINY *et al.*, 1996; HORNY, 2003; LIN *et al.*, 2018). Os modelos de regressão polinomiais são geralmente utilizados nos casos onde o termômetro não responde com sinal eletrônico, mas com valores de temperatura. Já os modelos de regressão de Planck são obtidos expandindo a função de Planck por meio de uma série de Taylor ao redor de um valor médio de comprimento de onda λ_0 , resultando em uma equação de interpolação que

caracteriza a Eq. 3.5 de forma fidedigna (SAUNDERS; MANOI, 2020). A grande vantagem da utilização da regressão de Planck é que nenhuma informação sobre a responsividade espectral precisa ser obtida, pois os parâmetros ajustáveis da equação de interpolação já carregam esta informação (SAUNDERS; WHITE, 2003; SAUNDERS; MANOI, 2020).

O primeiro passo para se obter os coeficientes de interpolação é a realização de um procedimento experimental, em um laboratório com ambiente controlado, utilizando um radiador corpo-negro como referência. A equação de Sakuma-Hattori (ASTM, 2014), uma das mais utilizadas para termômetros infravermelho, pode ser utilizada para relacionar o sinal medido com a temperatura do corpo-negro:

$$S_{full} = \frac{C}{\exp\left(\frac{c_2}{AT_{full}+B}\right) - 1}, \quad (3.7)$$

onde A , B e C são os parâmetros ajustáveis, obtidos por meio da regressão dos dados experimentais, e c_2 é a segunda constante de radiação.

Outra função de regressão amplamente utilizada por fabricantes de dispositivos IR e na literatura (MARTINY *et al.*, 1996; MINKINA; DUDZIK, 2009), é baseada nos coeficientes R , B e F :

$$S_{full} = \frac{R}{\exp\left(\frac{B}{T_{full}}\right) - F}. \quad (3.8)$$

Para converter o sinal medido em temperatura, inverte-se as Eqs. 3.7 e 3.8, resultando nas seguintes relações

$$T_{full} = \frac{c_2}{A \ln\left(\frac{C}{S_{full}} + 1\right)} - \frac{B}{A}, \quad (3.9)$$

$$T_{full} = \frac{B}{\ln\left(\frac{R}{S_{full}} + F\right)}. \quad (3.10)$$

As Eqs. 3.8 e 3.10 são utilizadas quando estão disponíveis os sinais de resposta em tensão. Recomenda-se a adição de dois parâmetros de interpolação para compensar o ganho e offset (J_0 e J_1), caso esteja disponível apenas o sinal digital (SUNDIN, 2015), resultando em

$$S_{full} = \frac{R}{\left[\exp\left(\frac{B}{T_{full}}\right) - F\right] J_1} - J_0, \quad (3.11)$$

$$T_{full} = \frac{B}{\ln\left[\frac{R}{(S_{full}+J_0)J_1} + F\right]}. \quad (3.12)$$

3.3 Correção de não-uniformidade (NUC)

Ao serem expostos a uma radiação incidente uniforme, espera-se que os detectores de um termômetro infravermelho respondam com a mesma intensidade. No entanto, cada detector da matriz tem uma responsividade diferente, dado o mesmo estímulo, o que se caracteriza como não-uniformidade. A origem das não-uniformidades está vinculada aos processos de fabricação das matrizes de detectores, diferenças nos circuitos eletrônicos de leitura (ROIC), material dos detectores, temperatura de operação e outros fatores ópticos (MILTON; BARONE; KRUEER, 1985; SCHULZ; CALDWELL, 1995; KUMAR; SARKAR; AGARWAL, 2007; LI *et al.*, 2017).

Esta diferença de resposta entre os detectores pode ser observada tanto qualitativamente quanto quantitativamente. As imagens geradas por câmeras IR afetadas pelas não-uniformidades apresentam o que se chama de *fixed pattern noise*, que são listras verticais que degradam a qualidade dos termogramas (veja Fig. 6a). O ruído espacial também afeta a exatidão de medição, principalmente em câmeras não-refrigeradas e para medições de temperaturas próximas as das condições ambientes (LIANG *et al.*, 2017; LI *et al.*, 2017).



(a) Termograma com *fixed pattern noise*. (b) Termograma após a aplicação do método NUC.
Figura 6: Procedimento de correção de não-uniformidade aplicado a um termograma. Fonte: (HE *et al.*, 2018).

A tecnologia desenvolvida para reduzir as não-uniformidades entre os detectores é chamada de NUC (*Non-uniformity correction*). Os métodos NUC são algoritmos de pós-processamento que corrigem a resposta bruta de cada pixel, fazendo com que eles respondam uniformemente ao serem expostos a uma radiação uniforme. Além disto, são procedimentos importantes em um esquema de calibração, podendo ter um papel fundamental para aumentar a exatidão das medições. As metodologias NUC podem ser divididas em dois grupos: *reference-based* NUC e *scene-based* NUC. O grupo *reference-based* NUC (MIAO *et al.*, 2009; KRUPIŃSKI *et al.*, 2014; CHANG; LI, 2019) se baseia

em correções de corpo-negro, com a finalidade de determinar os coeficientes de correção (ganho e offset). Neste grupo, um radiador padrão é utilizado para expor os detectores a diferentes níveis de irradiação, dependendo do tipo de correção empregado. Existem três tipos de *reference-based* NUC: (i) *single-point* NUC; (ii) *two-point* NUC; e (iii) *multi-point* NUC. Essas correções são, em geral, simples e confiáveis, pois se utilizam de uma referência calibrada (radiador corpo-negro) com temperatura conhecida.

Já os procedimentos do grupo *scene-based* NUC (RUI *et al.*, 2009; REDLICH *et al.*, 2015; YU; ZHANG; WANG, 2015; RONG *et al.*, 2017) se baseiam em análises estatísticas de uma sequência de termogramas, redes neurais, filtros Kalman e outros algoritmos que estimam os coeficientes de correção de maneira iterativa. Os métodos *scene-based* NUC foram desenvolvidos para retirar a dependência de um equipamento caro e robusto como um radiador corpo-negro, porém apresentam uma exatidão menor que os do grupo *reference-based*, além de necessitarem de um esforço computacional maior pela demanda de uma sequência muito grande de imagens para a estimativa estatística das não-uniformidades (HU; XU; WAN, 2014).

Neste trabalho, será apresentada a formulação matemática para o grupo *reference-based* NUC, assumindo um modelo linear de resposta dos detectores em relação ao fluxo de radiação incidente. Para a consideração de um modelo não linear de resposta, os seguintes trabalhos trazem a formulação necessária (ZHOU *et al.*, 2005; ZHOU *et al.*, 2010).

Os detectores, em geral, respondem de forma linear ao serem expostos a um poder emissivo arbitrário E_{full} , de acordo com a seguinte formulação

$$S_{full}^{ij} = G^{ij} E_{full} + O^{ij}, \quad (3.13)$$

onde S_{full}^{ij} é o sinal digital de resposta, G^{ij} é o coeficiente de ganho e O^{ij} é o coeficiente de offset. Os sobrescritos i e j se referem à posição de um determinado pixel na matriz.

O primeiro passo para se obter os coeficientes de correção G_c^{ij} e O_c^{ij} é selecionar uma sequência de *frames*, para um valor arbitrário de temperatura no corpo-negro, e calcular a média de resposta dos detectores (\bar{S}_{full}) por meio da Eq. 3.14. A média de resposta é utilizada para o cálculo dos coeficientes de correção, de acordo com as Eqs. 3.15 e 3.16.

$$\bar{S}_{full}(T) = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N S_{full}^{ij}(T). \quad (3.14)$$

$$G_c^{ij} = \frac{\bar{S}_{full}(T_2) - \bar{S}_{full}(T_1)}{S_{full}^{ij}(T_2) - S_{full}^{ij}(T_1)}, \quad (3.15)$$

$$O_c^{ij} = \bar{S}_{full}(T_2) - G_c^{ij} S_{full}^{ij}(T_2), \quad (3.16)$$

onde T_1 e T_2 ($T_2 > T_1$) são dois valores arbitrários de temperatura do corpo-negro, e M e N representam a quantidade de detectores na linha e coluna da matriz.

Por fim, toda vez que um detector, em particular, responde com S_{full}^{ij} , o valor será corrigido para $S_{nuc_{full}}^{ij}$, pela aplicação dos coeficientes de correção na seguinte equação

$$S_{nuc_{full}}^{ij} = G_c^{ij} S_{full}^{ij} + O_c^{ij}. \quad (3.17)$$

A correção NUC propõe um ajuste às matrizes de resposta bruta nos pontos de correção. Porém, é necessário avaliar o desempenho desta correção a fim de se examinar o comportamento do sinal em todo o intervalo de medição analisado, inclusive em pontos intermediários. Na literatura, a performance da correção NUC é calculada pelo erro quadrático médio normalizado, que indica o nível residual de não-uniformidade (RNU) presente nos dados corrigidos (ZHOU *et al.*, 2010; CHANG; LI, 2019):

$$RNU = \frac{100}{\bar{S}_{full}} \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [S_{nuc_{full}}^{ij} - \bar{S}_{full}]^2}. \quad (3.18)$$

3.4 Análise de incertezas

O método GUM estabelece critérios para a avaliação e expressão das incertezas em medições diretas ou indiretas. De acordo com JCGM:100 (2008), as fontes de incerteza podem ser classificadas em dois tipos: tipo A e tipo B. As incertezas do tipo A são avaliadas por meio de uma análise estatística de uma série de observações. Já as incertezas do tipo B são obtidas por meio de certificados de calibração ou estudos prévios acerca da componente.

No caso de medições indiretas, o mensurando y é associado a um conjunto de grandezas de influência (denominadas aqui como x_i), de acordo com a seguinte formulação

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n). \quad (3.19)$$

Para medições não correlacionadas, a incerteza combinada do mensurando y pode ser determinada, de forma geral, propagando-se as incertezas de todas as grandezas de influência, como mostra a Eq. 3.20.

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n [c_i u_i(x_i)]^2}, \quad (3.20)$$

onde u_c é a incerteza padrão combinada do mensurando y ; c_i são os coeficientes de sensibilidade associados a cada variável de entrada, calculados por meio das derivadas parciais $\frac{\partial y}{\partial x_i}$; e u_i são as incertezas padrão de cada variável de entrada no modelo.

Após a determinação da incerteza combinada, a incerteza expandida U é obtida pelo produto da incerteza combinada u_c pelo fator de abrangência k_p , como mostra a Eq. 3.22. O fator de abrangência k_p que alcança um intervalo de confiança p é obtido a partir da aproximação $k_p = t_p(\nu_{eff})$, onde $t_p(\nu_{eff})$ é um fator derivado da distribuição t-Student, com um grau de liberdade efetivo ν_{eff} , calculado por meio de

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^n [c_i u_i(x_i)]^4 / \nu_i}, \quad (3.21)$$

$$U = u_c k_p. \quad (3.22)$$

4 Fluxogramas de calibração

Neste capítulo serão apresentadas as diretrizes para o procedimento de calibração dos termômetros de radiação MEMS termopilha. A metodologia proposta será apresentada por meio de dois fluxogramas (Figs. 7 e 8), podendo servir como referência para esquemas de calibração e análise de incerteza em dispositivos IR.

Na Figura 7, apresenta-se o diagrama geral da metodologia, onde são exibidos os modelos matemáticos, dados experimentais, saídas da rotina computacional, análises de incerteza e as análises pós-calibração. Os dados de entrada da metodologia são representados pelos colchetes na parte superior do diagrama e consistem em: modelo NUC, dados experimentais, regressões de Planck e as revisões da literatura (procedimentos de calibração, resultados de incerteza, dados de fabricantes). A combinação dos modelos de regressão de Planck (Seção 3.2), com os modelos NUC (Seção 3.3) e os dados experimentais, em uma única rotina, é representada pela caixa vermelha tracejada (integração dos modelos matemáticos). Esta rotina matemática é detalhada no diagrama da Fig. 8.

O primeiro passo para a aplicação da Figura 8 é a seleção de um modelo radiométrico de transferência de calor, descrito na Seção 3.1. Alimentando este modelo matemático com as variáveis de entrada (T_{obj} , T_{amb} e ε), obtém-se o valor de T_{full} . Durante o procedimento de calibração, para cada temperatura T_{obj} do radiador corpo-negro, uma temperatura T_{full} é obtida. Além disto, cada pixel do termômetro irá responder com um diferente sinal S_{full}^{ij} quando exposto à temperatura T_{obj} .

Na caixa vermelha tracejada, na Figura 8, aplicando-se a Eq. 3.14 em S_{full}^{ij} , o valor médio S_{full}^- é obtido. Os pares experimentais S_{full}^- e T_{full} servem como dado de entrada para os modelos de regressão, selecionados a partir da Seção 3.2, para se obter os coeficientes de calibração (R , B , F ou A , B , C).

Na caixa preta tracejada, na Figura 8, o modelo NUC é descrito. As matrizes geradas pelo termômetro (S_{full}^{ij}), combinadas com os valores médios (S_{full}^-), retornam os coeficientes de correção ganho e offset (G_c^{ij} e O_c^{ij}), aplicando-se as Eqs. 3.15 e 3.16. Após esse procedimento, os pixels terão suas respostas corrigidas pelos coeficientes G_c^{ij} e O_c^{ij} , e a rotina retornará a matriz corrigida $S_{nucfull}^{ij}$. Os valores de $S_{nucfull}^{ij}$, juntamente com os coeficientes de calibração, servirão como dado entrada para determinar as temperaturas corrigidas $T_{nucfull}^{ij}$. As matrizes $T_{nucfull}^{ij}$ apresentam um desvio em relação à T_{full} , e como consequência, será considerado como uma fonte de incerteza.

As fontes de incertezas do procedimento de calibração estão representadas na Fig. 7 em quatro grupos: radiador corpo-negro, modelo radiométrico de transferência de calor (determinação da temperatura T_{full}), modelo de correção (rotina integrada), e termômetro

infravermelho. Os números circulados indicam a origem de cada um dos grupos de fontes de incerteza.

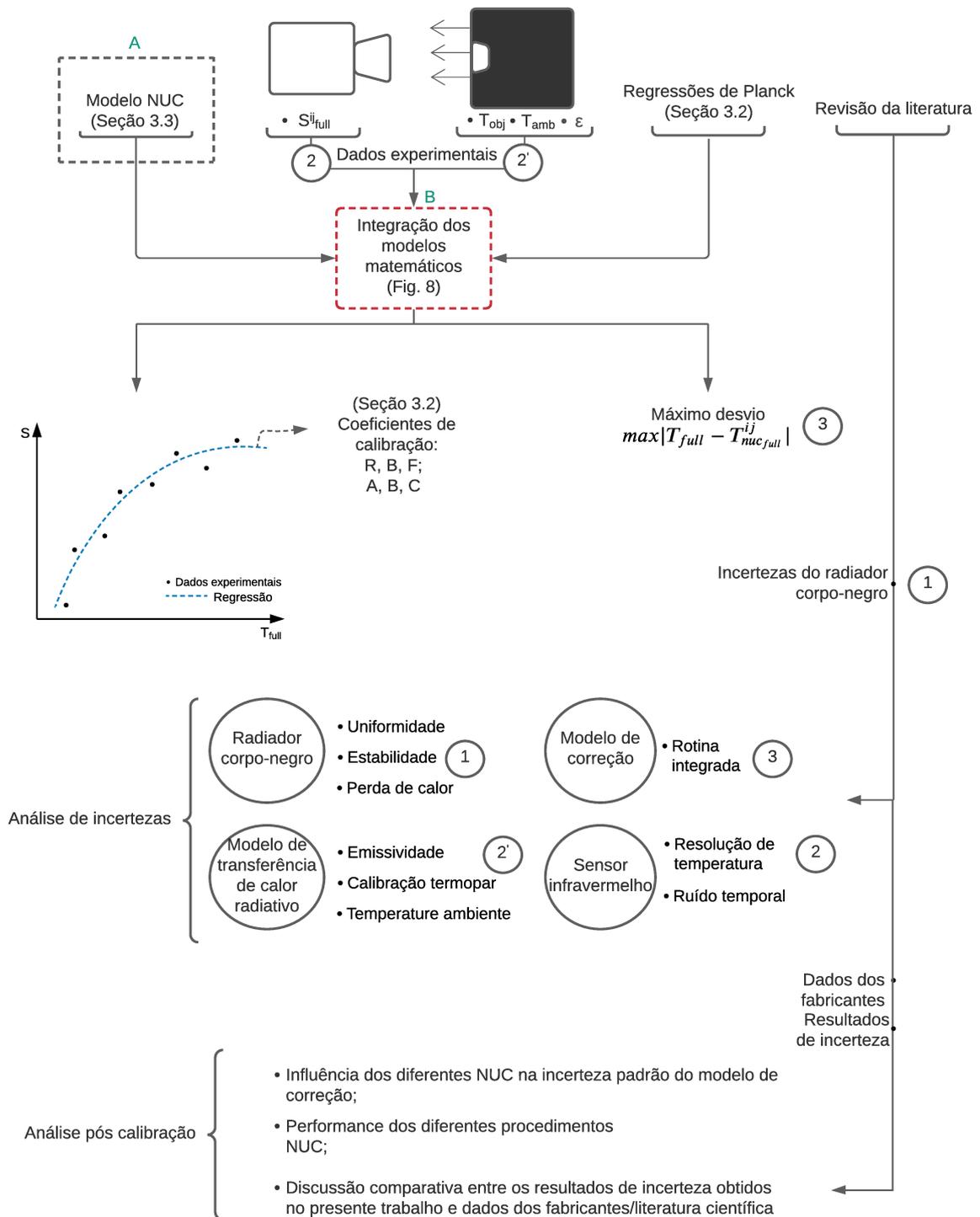


Figura 7: Diagrama esquemático da metodologia de calibração. Os dados de entrada da metodologia são representados pelos colchetes na parte superior do gráfico e consistem em: modelo NUC, dados experimentais, regressões de Planck e revisões da literatura. A caixa vermelha tracejada representa a integração dos modelos matemáticos realizada com os dados experimentais e os modelos NUC e de regressão, detalhados na Fig. 8. Na parte inferior do diagrama, a análise de incerteza é esquematizada com seus respectivos grupos de incerteza. A análise pós-calibração também é detalhada.

As análises pós-calibração também estão descritas no diagrama da Fig. 7 e consistem em: (i) desempenho dos diferentes métodos NUC em reduzir o nível de ruído espacial; (ii) discussão comparativa entre os resultados obtidos pela aplicação da metodologia e dados do fabricante/literatura científica; e (iii) influência dos diferentes métodos NUC na incerteza padrão da rotina integrada.

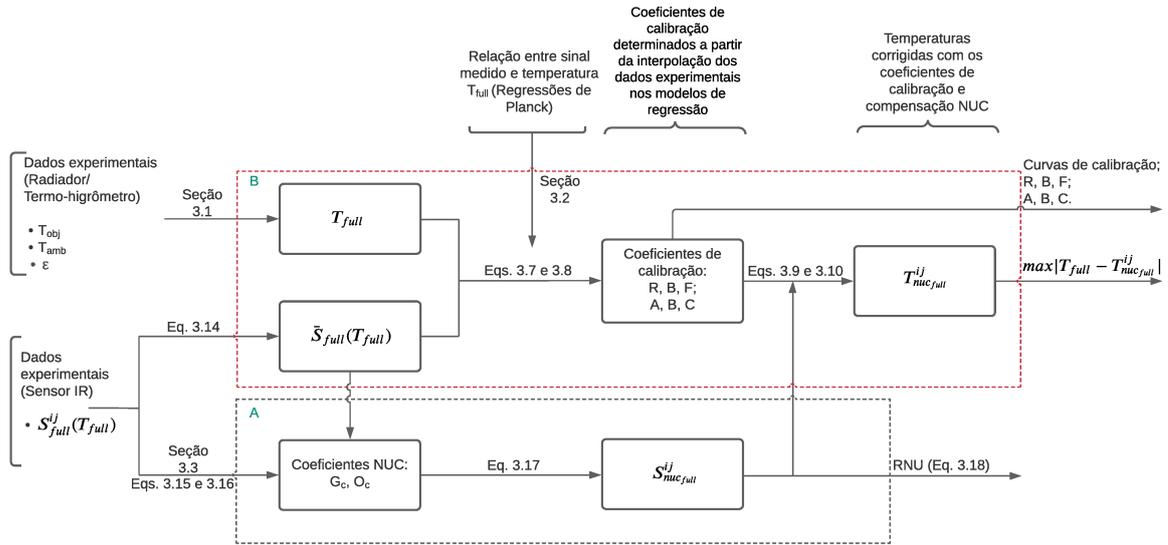


Figura 8: Diagrama da rotina integrada. Os colchetes representam as entradas do modelo, e consistem dos dados experimentais e das regressões de Planck. O método NUC também é uma entrada da rotina integrada, porém, como é um modelo matemático, está representado pela caixa tracejada. As saídas do algoritmo são as curvas de calibração, com seus respectivos coeficientes de calibração, e o desvio de medição. A saída do método NUC é o parâmetro RNU (residual de não-uniformidade).

5 Calibração de termômetros de radiação do tipo MEMS termopilha

Neste capítulo, o fluxograma de calibração exposto na Fig. 7 será aplicada a três termômetros infravermelho do tipo MEMS termopilha, produzidos pelo mesmo fabricante. Os termômetros aqui descritos são denominados CAM 1, CAM 2 e CAM 3. Serão apresentados também os resultados de calibração e as análises pós-calibração para os três dispositivos.

5.1 Procedimento experimental

O procedimento experimental deste trabalho permite a extração dos dados de entrada (S_{full}^{ij} , T_{obj} , T_{amb} e ε) para o algoritmo de integração dos modelos matemáticos em cada ponto de calibração setado no radiador corpo-negro. Os termômetros utilizados nos ensaios são do fabricante Panasonic, modelo AMG8833 Grid-Eye, com uma faixa de medição entre 0 °C e 80 °C e incerteza de medição de $\pm 2,5$ °C. A resolução digital do termômetro é de 8×8 pixels, operando no comprimento de onda de 5,0 μm a 13 μm , com um campo de visão de 60°. As informações do *datasheet* estão resumidas no Apêndice A.

O radiador de placa plana Fluke 4181 foi utilizado como referência de fonte de radiação uniforme. O equipamento opera na faixa de temperatura entre 30 °C e 500 °C, com uma emissividade estimada em 0,95. As temperaturas do corpo-negro (T_{obj}) foram monitoradas por meio de um termopar tipo T previamente calibrado e pela placa de aquisição de dados NI 9211 Series C. A escolha do monitoramento das temperaturas a partir do termopar e não pelo *display* do corpo-negro se deve à necessidade de rastreabilidade do procedimento de calibração, requisito fundamental para seguir as normas da ITS-90.

Os experimentos foram realizados em ambiente climatizado, e as condições de temperatura ambiente e umidade relativa foram aferidas pelo termo-higrômetro digital Testo 622, com uma incerteza expandida de $\pm 0,4$ °C e ± 3 % ($k_p = 2$), respectivamente. A especificação completa dos equipamentos está disposta no Apêndice A deste documento.

Para começar o procedimento de calibração, os termômetros e o radiador corpo-negro foram posicionados em suportes para garantir o alinhamento entre os equipamentos. A distância de medição estabelecida foi de 0,05 m, de modo que o campo de visão dos termômetros (FOV) estivesse completamente inserido na área de emissão do radiador. Antes do início da coleta dos dados experimentais, os equipamentos foram ligados, e houve uma espera de 30 min até que o equilíbrio termodinâmico fosse estabelecido. A

temperatura ambiente foi mantida entre 18 °C e 20 °C, e a umidade relativa entre 30 % e 40 %. O intervalo de temperatura avaliado nos experimentos foi de 30 °C a 80 °C, com intervalo de 5 °C entre as medições. Ao selecionar uma temperatura no corpo-negro, uma barreira de contenção era posicionada entre o termômetro em teste e o radiador, evitando assim uma deriva térmica do elemento detector. Após a estabilização da temperatura do radiador, a contenção era removida e dez *frames* de S_{full}^{ij} eram coletados pelo termômetro. A Figura 9 apresenta um croqui da montagem experimental do procedimento de calibração.

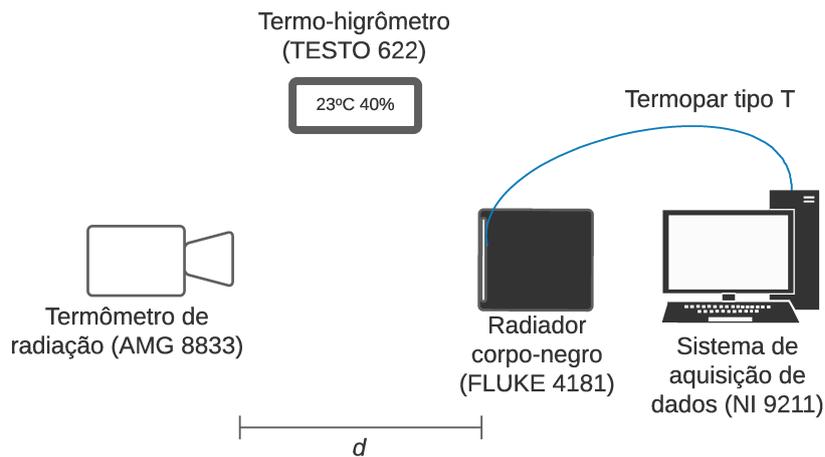


Figura 9: Croqui do procedimento experimental de calibração dos termômetros IR.

A temperatura interna do termômetro (T_{det}) foi monitorada pelo termistor da termopilha. A variação de T_{det} foi de 21 °C a 28 °C. A temperatura interna não foi considerada uma fonte de emissão pois sua variação em relação ao intervalo de medição foi negligenciada. No caso da compensação de junta fria, o circuito interno do termômetro já corrige o sinal medido com a temperatura (T_{det}).

Os procedimentos para a extração dos dados experimentais estão descritos a seguir:

- i. Climatização do ambiente;
- ii. Posicionamento do termômetro e do corpo-negro nos suportes e na distância adequada, de modo que o campo de visão do dispositivo IR esteja inserido na área de emissão do radiador;
- iii. Seleção do ponto de calibração no corpo-negro;
- iv. Posicionamento da barreira de contenção entre o termômetro e o radiador corpo-negro;
- v. Estabilização da termômetro e do radiador por 30 minutos;
- vi. Retirada da barreira de contenção;

- vii. Aquisição dos dados brutos pelo termômetro;
- viii. Registro das temperaturas do corpo-negro medidas pelo termopar;
- ix. Registro da temperatura ambiente e umidade relativa;
- x. Checagem dos dados obtidos;
- xi. Armazenamento dos dados em um computador para posterior análise;
- xii. Retornar ao item iii até a avaliação completa do intervalo de medição.

5.2 Correção de não-uniformidade (NUC)

Neste trabalho, dois procedimentos NUC foram realizados para fins comparativos: (i) *two-point* NUC; e (ii) *multi-point* NUC. A diferença nos dois métodos é apenas o número de pontos de correção, sendo que a formulação matemática é a mesma (ver Seção 3.3). No caso do *two-point* NUC, as temperaturas de correção setadas no corpo-negro foram 30 °C e 80 °C. Já no procedimento *multi-point* NUC, seis temperaturas de correção foram selecionadas: 30 °C, 40 °C, 50 °C, 60 °C, 70 °C e 80 °C.

A Figura 10 mostra as curvas do residual de não-uniformidade (Eq. 3.18), dos três termômetros, para a resposta bruta e a corrigida pelo modelo *two-point* NUC. Percebe-se pelas curvas do modelo NUC que o desvio padrão nos pontos de correção é zero, o que indica que todos os detectores de um mesmo termômetro possuem a mesma resposta, igual a média da resposta bruta. À medida que a temperatura se afasta dos pontos de correção, o desvio padrão aumenta, porém o nível de residual de não-uniformidade permanece inferior ao dos dados brutos, configurando uma melhor uniformidade que a resposta original. A redução percentual média para o residual de não uniformidade (RNU) foi de 74,1 % na CAM 1, 70,0 % na CAM 2 e 70,0 % na CAM 3.

A Figura 11 apresenta as curvas do residual de não-uniformidade para o modelo *multi-point* NUC. A redução percentual média de RNU obtida foi de 87,6 % na CAM 1, 88,0 % na CAM 2 e 87,3 % na CAM 3. Como o desempenho do *multi-point* NUC em reduzir o ruído espacial foi superior ao do *two-point* NUC, o mesmo foi utilizado na rotina integrada de calibração.

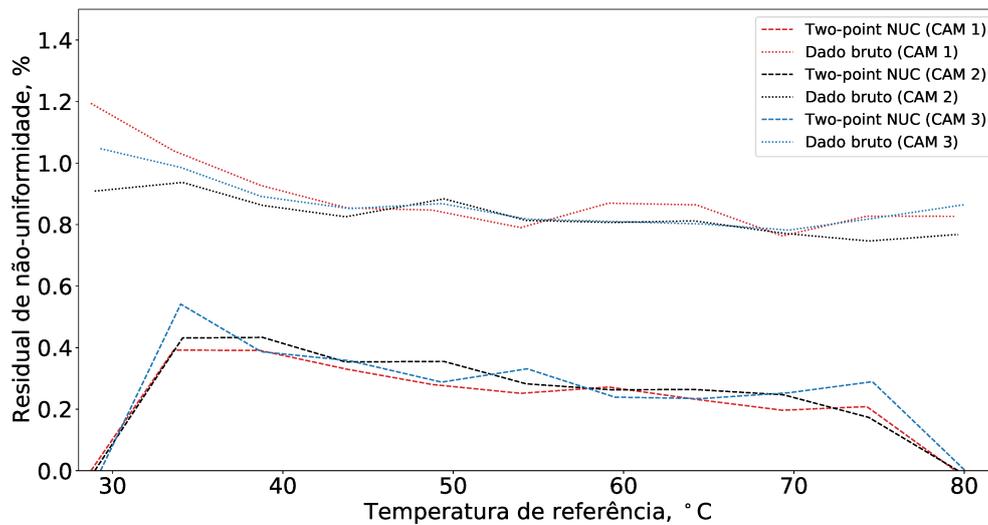


Figura 10: Residual de não-uniformidade para o método *two-point* NUC.

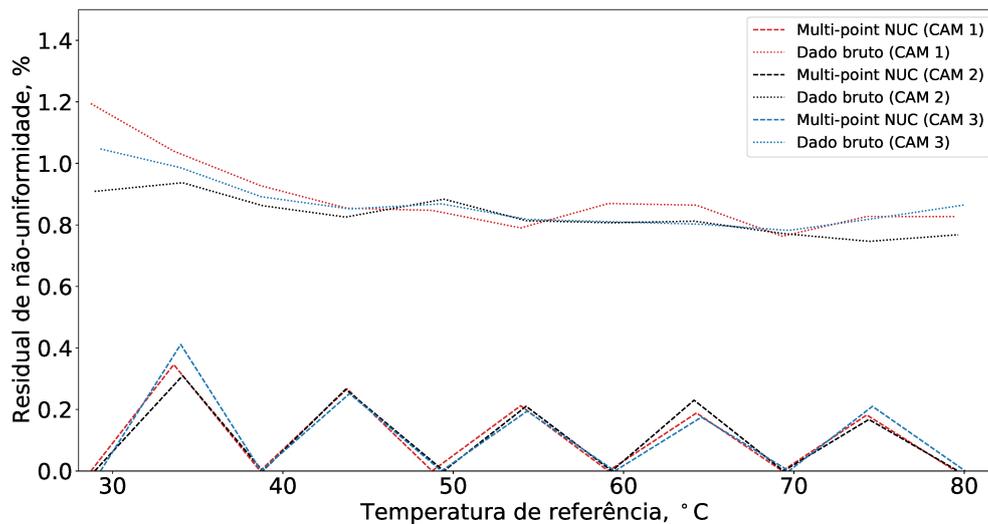


Figura 11: Residual de não-uniformidade para o método *multi-point* NUC.

5.3 Modelos de regressão

A Figura 12 mostra as curvas do modelo de regressão de Sakuma-Hattori (Eq. 3.7), para cada termômetro inspecionado, com seus respectivos coeficientes de calibração, obtidos a partir do método dos mínimos quadrados. Estes coeficientes são únicos para cada termopilha, e devem ser utilizados apenas no intervalo de medição da calibração. A Tabela 1 apresenta um resumo dos resultados obtidos para a regressão Sakuma-Hattori.

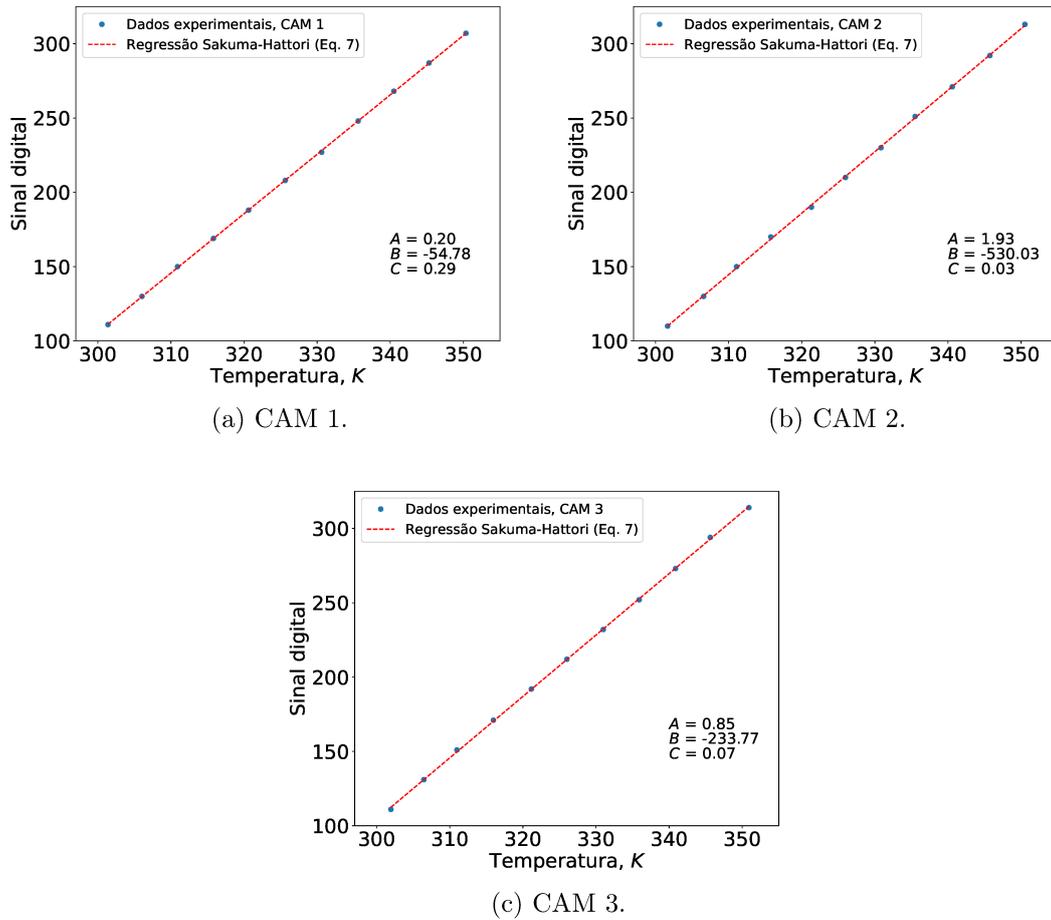


Figura 12: Curva de regressão e seus respectivos coeficientes de calibração para o modelo Sakuma-Hattori.

Tabela 1: Coeficientes de calibração e desvio máximo absoluto ($|\Delta T_{max}|$) para o modelo de regressão Sakuma-Hattori.

Termômetro	A	B	C	Intervalo de medição	Desvio máximo absoluto ($ \Delta T_{max} $)
CAM 1	0,20	-54,78	0,29	30 °C a 80 °C	0,48 °C
CAM 2	1,93	-530,03	0,03	30 °C a 80 °C	0,41 °C
CAM 3	0,85	-233,77	0,07	30 °C a 80 °C	0,49 °C

A Figura 13 apresenta as curvas de regressão considerando o modelo RBF (Eq. 3.11). A Tabela 2 apresenta os coeficientes de calibração, obtidos a partir do método dos mínimos quadrados, e o desvio máximo absoluto para o modelo.

Tabela 2: Coeficientes de calibração e desvio máximo absoluto ($|\Delta T_{max}|$) para o modelo de regressão RBF (Eq. 3.11).

Termômetro	R	B	F	J_0	J_1	Intervalo de medição	Desvio máximo absoluto ($ \Delta T_{max} $)
CAM 1	1,78	0,85	1,00	1040,67	1,78	30 °C a 80 °C	0,46 °C
CAM 2	1,78	0,88	1,00	1047,42	1,78	30 °C a 80 °C	0,39 °C
CAM 3	2,01	0,80	1,00	1273,76	2,01	30 °C a 80 °C	0,44 °C

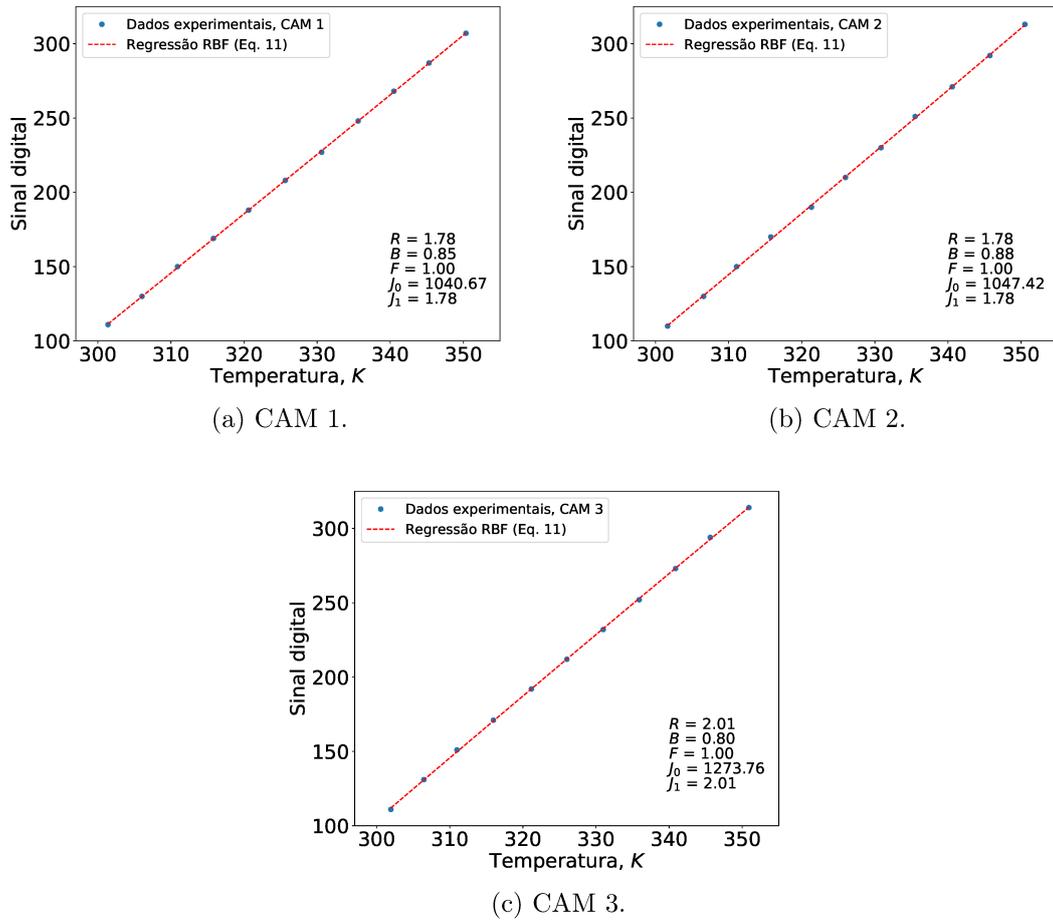


Figura 13: Curva de regressão e seus respectivos coeficientes de calibração para o modelo RBF.

5.4 Análise de incertezas

A norma ASTM E2847-14 sugere uma lista das principais componentes de incerteza presentes nas calibração de termômetros de radiação, conforme mostra a Tab. 3. Dependendo do tipo de tecnologia empregada, do procedimento experimental e do nível de exatidão que se deseja, os estudos avaliam todas ou apenas algumas delas.

Tabela 3: Fontes de incerteza contempladas em estudos prévios de calibração e neste presente trabalho.

Referência	ASTM (2014)	Rainieri e Pagliarini (2002)	Saunders <i>et al.</i> (2008)	Chung e Chen (2010)	Presente trabalho, 2021
Faixa de temperatura	Abaixo de 1000 °C	10 - 70 °C	-50 - 961.78 °C	34.5 - 40.5 °C	30 - 80 °C
Radiador corpo-negro					
Temperatura de referência	X	X	X	X	X
Emissividade	X	X	X	X	X
Temperatura refletida	X	X	X	X	X
Troca de calor	X		X		X
Condições ambiente	X		X		
Uniformidade	X	X	X		X
Termômetro IR					
<i>Size-of-source effect</i>	X		X		
Temperatura ambiente	X		X		
Absorção da atmosfera	X		X		
Ruído	X	X	X	X	X
Resolução de temperatura	X			X	X

Para possibilitar uma avaliação completa das incertezas de calibração dos termôme-

tros, contabilizou-se as incertezas desde o modelo de medição, utilizado para a definição do mensurando e das grandezas de influência, até o aparato experimental utilizado na calibração. Foram negligenciadas as incertezas devido às condições ambiente, *size-of-source effect* e transmissão da atmosfera, pois suas contribuições seriam insignificantes na incerteza expandida. A justificativa se dá pela geometria de calibração empregada e pelas condições ambientes controladas no momento de calibração. As incertezas do modelo foram então divididas em quatro grupos, resumidas na Tabela 4. Primeiramente, serão avaliadas as incertezas do modelo de medição, que neste trabalho são classificadas como as incertezas do modelo radiométrico de transferência de calor. A seguir, são analisadas as incertezas associadas ao aparato experimental utilizado no procedimento de calibração, que também influenciam a determinação do mensurando. Por fim, a incerteza relacionada à rotina de integração dos modelos matemáticos é contabilizada.

Tabela 4: Fontes de incerteza assumidas no modelo de calibração proposto.

Fonte de incerteza	Componente	Distribuição	Caracterização
Modelo radiométrico de transferência de calor			
Emissividade	u_{emi}	Uniforme	B
Temperatura do objeto	u_{obj}	Uniforme	B
Temperatura refletida	u_{amb}	Uniforme	B
Radiador corpo-negro			
Estabilidade	u_{sta}	Uniforme	B
Uniformidade	u_{uni}	Uniforme	A
Perda de calor	u_{hl}	Normal	B
Termômetro infravermelho			
Resolução de temperatura	u_{tr}	Uniforme	B
Ruído temporal	u_{tn}	Uniforme	A
Modelo de correção			
Integração dos modelos matemáticos	u_{fit}	Uniforme	A

5.4.1 Análise de incertezas: Modelo de medição

A análise de incerteza começa pela definição do mensurando a partir do modelo de medição, no qual são identificadas as grandezas de influência e suas estimativas de incerteza. No procedimento de calibração dos termômetros IR deste trabalho, o sinal de medição S_{full}^{ij} é a grandeza que representa o mensurando T_{full} , obtido por meio de um modelo radiométrico de transferência de calor. A temperatura T_{full} é caracterizada como a temperatura ideal de um corpo-negro para um determinado ponto de calibração, e pode ser estimada a partir do modelo radiométrico da Eq. 5.1, desconsiderando a emissão da atmosfera ($d \approx 0$; $\tau_{atm} \approx 1$).

$$T_{full} = [\varepsilon T_{obj}^4 + (1 - \varepsilon) T_{refl}^4]^{0.25}. \quad (5.1)$$

A partir do modelo de medição da Eq. 5.1, as grandezas de influência são definidas: ε , T_{obj} e T_{refl} . Assumindo nenhuma correlação entre as variáveis e os coeficientes de sensibilidade determinados a partir das derivadas parciais (Eqs. 5.3, 5.4 e 5.5), a Eq. 5.2 traz a estimativa da incerteza do modelo de medição u_{full} .

$$u_{full} = \sqrt{\left(\frac{\partial T_{full}}{\partial \varepsilon} u_{emi}\right)^2 + \left(\frac{\partial T_{full}}{\partial T_{obj}} u_{obj}\right)^2 + \left(\frac{\partial T_{full}}{\partial T_{refl}} u_{amb}\right)^2}, \quad (5.2)$$

$$\frac{\partial T_{full}}{\partial \varepsilon} = \frac{0,25 (T_{obj}^4 - T_{refl}^4)}{[\varepsilon T_{obj}^4 + (1 - \varepsilon T_{refl}^4)]^{0,75}}, \quad (5.3)$$

$$\frac{\partial T_{full}}{\partial T_{obj}} = \frac{\varepsilon T_{obj}^3}{[\varepsilon T_{obj}^4 + (1 - \varepsilon T_{refl}^4)]^{0,75}}, \quad (5.4)$$

$$\frac{\partial T_{full}}{\partial T_{refl}} = \frac{(1 - \varepsilon) T_{refl}^3}{[\varepsilon T_{obj}^4 + (1 - \varepsilon T_{refl}^4)]^{0,75}}. \quad (5.5)$$

Na Eq. 5.2, u_{emi} é dada pelo fabricante do radiador padrão (LIEBMANN, 2008; FLUKE, 2013) e u_{obj} foi determinada por uma calibração prévia do termopar tipo T, utilizando como referência uma termorresistência PT-100 (certificado de calibração disponível no Anexo B) e procedimentos para a aproximação da ITS-90 (BEDFORD; QUINN, 1997; LIRA *et al.*, 1999; LIRA; SANTOS, 1999). Os valores de resistência da termorresistência PT-100 medidos no procedimento de calibração do termopar foram obtidos por meio do sistema de aquisição de dados Agilent 34970A. A temperatura refletida T_{refl} foi considerada a mesma da temperatura ambiente T_{amb} , medida pelo termo-higrômetro. A incerteza padrão u_{amb} , relacionada à temperatura refletida foi determinada a partir da incerteza expandida fornecida pelo fabricante (TESTO, 2021).

Além das grandezas de influência, identificadas no modelo de medição, outros fatores irão influenciar a determinação do mensurando, como as características do radiador corpo-negro e do termômetro utilizados no procedimento de calibração, além da rotina de integração dos modelos matemáticos utilizados para obtenção dos coeficientes de calibração. A seguir, as fontes de incerteza externas ao modelo de medição são caracterizadas e suas incertezas estimadas.

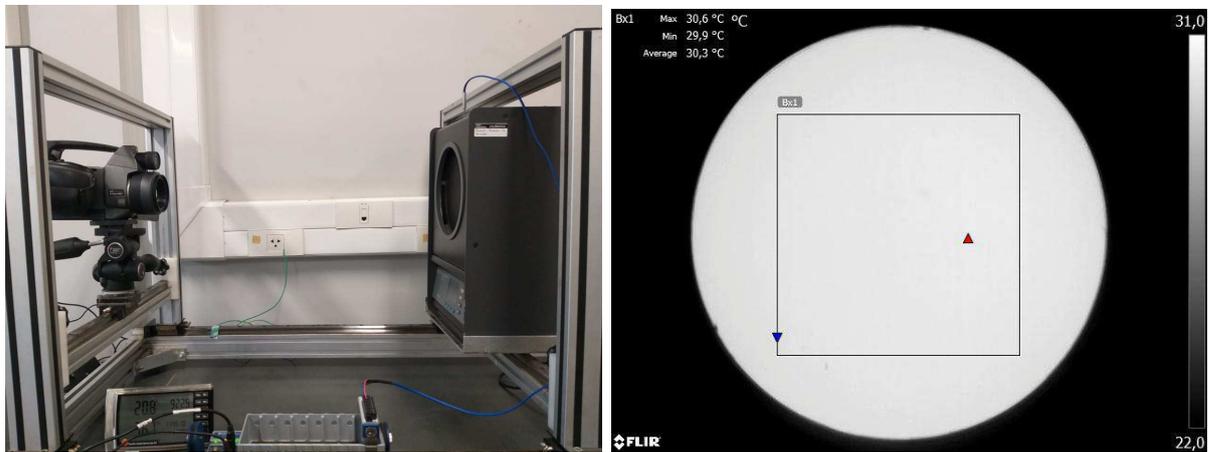
5.4.2 Análise de incertezas: Radiador corpo-negro

Nesta subseção, apresenta-se a formulação matemática utilizada para estimar as incertezas do radiador corpo-negro, baseada em estudos prévios que abordam calibração de radiadores padrão para a realização da ITS-90 (ASTM, 2014; SAUNDERS *et al.*, 2008; FISCHER *et al.*, 2003; LIEBMANN, 2008; FLUKE, 2013). A incerteza padrão das

componentes u_{sta} e u_{hl} , relacionadas à estabilidade e perda de calor do corpo-negro, respectivamente, foram determinadas a partir de informações da fabricante Fluke (LIEBMANN, 2008; FLUKE, 2013).

A incerteza devido a uniformidade do corpo-negro u_{uni} foi estimada por meio de um procedimento experimental (Fig. 14a), utilizando a câmera termográfica FLIR SC660 com uma lente de 36 mm de distância focal e menor incerteza de calibração que o termômetro IR da Panasonic utilizado no procedimento de calibração ($\pm 2^\circ\text{C}$ ou 2 % da medição). A resolução digital do termovisor é de 640×480 pixels, operando numa faixa espectral de $7,5 \mu\text{m}$ a $13 \mu\text{m}$. A uniformidade do radiador foi inspecionada numa faixa de medição de 30°C a 80°C , com um intervalo de 5°C entre as medições.

No experimento, os termogramas foram extraídos em cada ponto de referência setado no corpo-negro. Avaliou-se a região central da placa de emissão do radiador, considerando a área representada pelo campo de visão do sensor Panasonic (Fig. 14b). A indicação de temperatura dos 67.600 pixels localizados na área de interesse foram registradas e o desvio padrão s_{std} foi calculado por meio da Eq. 5.6. A incerteza padrão atribuída a esse procedimento experimental (u_{std}) foi determinada a partir da Eq. 5.7. Para estimar u_{uni} , considerou-se tanto a incerteza u_{std} quanto a incerteza do termovisor FLIR u_{cam} . Assumindo nenhuma correlação entre as componentes, a incerteza u_{uni} foi determinada a partir da Eq. 5.8.



(a) Procedimento experimental.

(b) Região de interesse.

Figura 14: Análise da uniformidade do radiador corpo-negro.

$$s_{std} = \sqrt{\frac{1}{N_t - 1} \sum_{j=1}^{N_t} (T^{ij} - \bar{T})^2}, \quad (5.6)$$

$$u_{std} = \frac{s_{std}}{\sqrt{N_t}}, \quad (5.7)$$

$$u_{uni} = \sqrt{u_{std}^2 + u_{cam}^2}. \quad (5.8)$$

onde N_t é o número de *pixels*, T^{ij} é a indicação de temperatura de cada *pixel* e \bar{T} é a média das indicações de temperatura.

5.4.3 Análise de incertezas: Termômetro infravermelho

As fontes de incerteza assumidas para os termômetros infravermelho são a resolução digital de temperatura e o ruído temporal. A resolução digital de temperatura se refere à influência da resolução do termômetro para detectar uma mínima diferença de temperatura na cena observada. De acordo com Chrzanowski (CHRZANOWSKI, 2001), a resolução digital de temperatura (DTR) pode ser determinada por

$$DTR = \frac{\Delta T_{span}}{2^k}, \quad (5.9)$$

onde ΔT_{span} é faixa de operação do instrumento e k é a resolução do conversor analógico-digital, em bits. Assumindo uma distribuição uniforme, a incerteza u_{res} pode ser estimada por

$$u_{res} = \frac{DTR}{\sqrt{12}}. \quad (5.10)$$

O ruído temporal se refere à variação de resposta de cada pixel em *frames* consecutivos, nas mesmas condições ambientes (FERREIRA *et al.*, 2019). Para determinar esta incerteza, 10 *frames* foram extraídos do termômetro da Panasonic para cada temperatura de referência setada no corpo-negro. O ruído temporal foi determinado por meio do desvio padrão (s_{tn}) de cada pixel nos N_f *frames*, de acordo com a Eq. 5.11. A incerteza padrão do ruído temporal u_{tn} foi determinada por meio da Eq. 5.12.

$$s_{tn} = \sqrt{\frac{1}{N_f - 1} \sum_{j=1}^{N_f} (T_{full}^{ij} - \bar{T}_{full})^2}, \quad (5.11)$$

$$u_{tn} = \frac{s_{tn}}{\sqrt{N_f}}. \quad (5.12)$$

5.4.4 Análise de incertezas: Integração dos modelos matemáticos

A incerteza da rotina de integração dos modelos matemáticos (u_{fit}) foi determinada a partir do máximo desvio da temperatura T_{full} e a temperatura obtida pela rotina de integração $T_{nucfull}^{ij}$. Assumindo uma distribuição uniforme, u_{fit} é determinada por

$$u_{fit} = \frac{\max |T_{full} - T_{nucfull}^{ij}|}{\sqrt{3}}. \quad (5.13)$$

5.4.5 Análise de incertezas: Incertezas de calibração

As Tabelas 5, 6 e 7 mostram os valores de incerteza de calibração para os três termômetros inspecionados, respectivamente. Apresenta-se os valores para os seguintes pontos de calibração: 30 °C, 50 °C, 60 °C e 80 °C. Considerando que o cálculo das incertezas referentes ao ruído temporal foram feitos por meio de uma análise pixel a pixel, os valores reportados são do detector com a maior incerteza na matriz.

As incertezas relacionadas ao radiador corpo-negro foram as mais relevantes ao longo dos pontos de calibração (ver Tabs. 5, 6 e 7), principalmente a uniformidade (u_{uni}) e a indicação de temperatura (u_{obj}). Resultado similar foi obtido por Rainieri e Pagliarini (2002) e Nugent, Shaw e Pust (2013), o que reforça a necessidade de uma referência confiável e calibrada.

Tabela 5: Incertezas de calibração para a CAM 1. A incerteza expandida U foi determinada com um fator de abrangência $k_p = 2$, para um intervalo de confiança de 95,45 %.

Fontes de incerteza	Comp.	Distr.	Incerteza (CAM 1), °C				ν
			30 °C	50 °C	60 °C	80 °C	
Modelo radiométrico de transferência de calor							
Emissividade	u_{emi}	Uniforme	0,092	0,186	0,228	0,308	∞
Temperatura do objeto	u_{obj}	Uniforme	0,421	0,411	0,408	0,403	10
Temperatura refletida	u_{amb}	Uniforme	0,002	0,001	0,000	0,000	∞
Radiador corpo-negro							
Estabilidade	u_{sta}	Uniforme	0,067	0,076	0,081	0,090	∞
Uniformidade	u_{uni}	Uniforme	0,291	0,482	0,583	0,782	∞
Perda de calor	u_{hl}	Normal	0,001	0,006	0,009	0,014	∞
Termômetro infravermelho							
Resolução de temperatura	u_{tr}	Uniforme	0,006	0,006	0,006	0,006	∞
Ruído temporal	u_{tn}	Uniforme	0,147	0,098	0,091	0,102	9
Modelo de correção							
Integração dos modelos matemáticos	u_{fit}	Uniforme	0,064	0,006	0,139	0,017	9
Incerteza combinada	u_c	Normal ($k = 1$)	0,589	0,705	0,797	0,957	∞
Incerteza expandida	U	Normal ($k_p = 2$)	1,177	1,410	1,593	1,915	

Tabela 6: Incertezas de calibração para a CAM 2. A incerteza expandida U foi determinada com um fator de abrangência $k_p = 2$, para um intervalo de confiança de 95,45 %.

Fontes de incerteza	Comp.	Distr.	Incerteza (CAM 1), °C				ν
			30 °C	50 °C	60 °C	80 °C	
Modelo radiométrico de transferência de calor							
Emissividade	u_{emi}	Uniforme	0,092	0,186	0,228	0,308	∞
Temperatura do objeto	u_{obj}	Uniforme	0,421	0,411	0,408	0,403	10
Temperatura refletida	u_{amb}	Uniforme	0,002	0,001	0,000	0,000	∞
Radiador corpo-negro							
Estabilidade	u_{sta}	Uniforme	0,067	0,076	0,081	0,090	∞
Uniformidade	u_{uni}	Uniforme	0,293	0,489	0,586	0,784	∞
Perda de calor	u_{hl}	Normal	0,001	0,006	0,009	0,014	∞
Termômetro infravermelho							
Resolução de temperatura	u_{tr}	Uniforme	0,006	0,006	0,006	0,006	∞
Ruído temporal	u_{tn}	Uniforme	0,132	0,112	0,173	0,097	9
Modelo de correção							
Integração dos modelos matemáticos	u_{fit}	Uniforme	0,046	0,173	0,081	0,057	9
Incerteza combinada	u_c	Normal ($k = 1$)	0,584	0,733	0,804	0,960	∞
Incerteza expandida	U	Normal ($k_p = 2$)	1,168	1,466	1,608	1,920	

Tabela 7: Incertezas de calibração para a CAM 3. A incerteza expandida U foi determinada com um fator de abrangência $k_p = 2$, para um intervalo de confiança de 95,45 %.

Fontes de incerteza	Comp.	Distr.	Incerteza (CAM 1), °C				ν
			30 °C	50 °C	60 °C	80 °C	
Modelo radiométrico de transferência de calor							
Emissividade	u_{emi}	Uniforme	0,092	0,186	0,228	0,308	∞
Temperatura do objeto	u_{obj}	Uniforme	0,421	0,411	0,408	0,403	10
Temperatura refletida	u_{amb}	Uniforme	0,002	0,001	0,000	0,000	∞
Radiador corpo-negro							
Estabilidade	u_{sta}	Uniforme	0,067	0,076	0,081	0,090	∞
Uniformidade	u_{uni}	Uniforme	0,297	0,487	0,587	0,787	∞
Perda de calor	u_{hl}	Normal	0,001	0,006	0,009	0,014	∞
Termômetro infravermelho							
Resolução de temperatura	u_{tr}	Uniforme	0,006	0,006	0,006	0,006	∞
Ruído temporal	u_{tn}	Uniforme	0,118	0,115	0,105	0,102	9
Modelo de correção							
Integração dos modelos matemáticos	u_{fit}	Uniforme	0,133	0,012	0,092	0,037	9
Incerteza combinada	u_c	Normal ($k = 1$)	0,597	0,712	0,795	0,962	∞
Incerteza expandida	U	Normal ($k_p = 2$)	1,193	1,424	1,590	1,925	

As Figuras 15, 16 e 17 mostram a contribuição de cada fonte de incerteza ao longo das temperaturas de referência. As componentes de incerteza relacionadas à perda de calor (u_{hl}) e a resolução digital de temperatura (u_{tr}) não foram representadas nos gráficos pois suas contribuições eram de aproximadamente zero. Percebe-se que as fontes de incerteza relacionadas à uniformidade (u_{uni}) e ao modelo de transferência de calor por radiação (u_{full}) foram dominantes em todos os pontos de calibração, contabilizando até 67 % e 68 %, respectivamente. Em seguida, as fontes relacionadas à rotina de integração (u_{fit}) e ao ruído temporal (u_{tn}) contabilizaram até 13 % e 24 %, respectivamente.

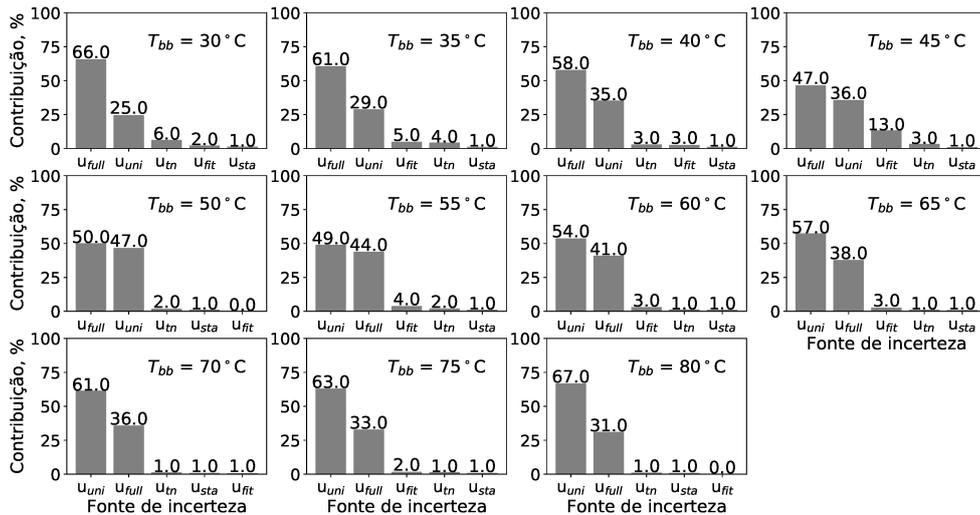


Figura 15: Contribuição das fontes de incerteza ao longo das temperaturas de referência (CAM 1).

Levando em consideração que a análise de incertezas foi feita pixel-a-pixel, é desejável entender a distribuição das mesmas ao longo da matriz de detectores. As Figuras 18, 19 e 20 mostram a distribuição das incertezas expandidas ao longo dos pontos de calibração,

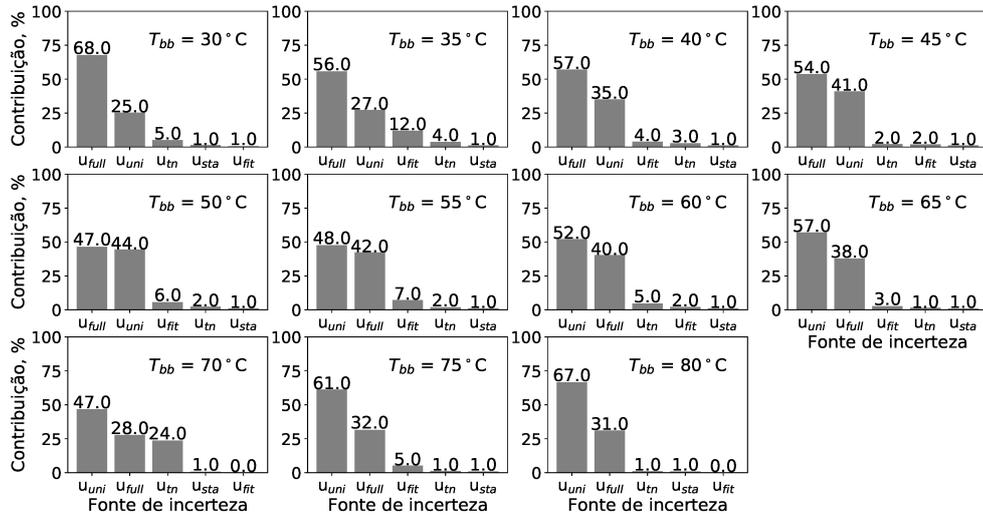


Figura 16: Contribuição das fontes de incerteza ao longo das temperaturas de referência (CAM 2).

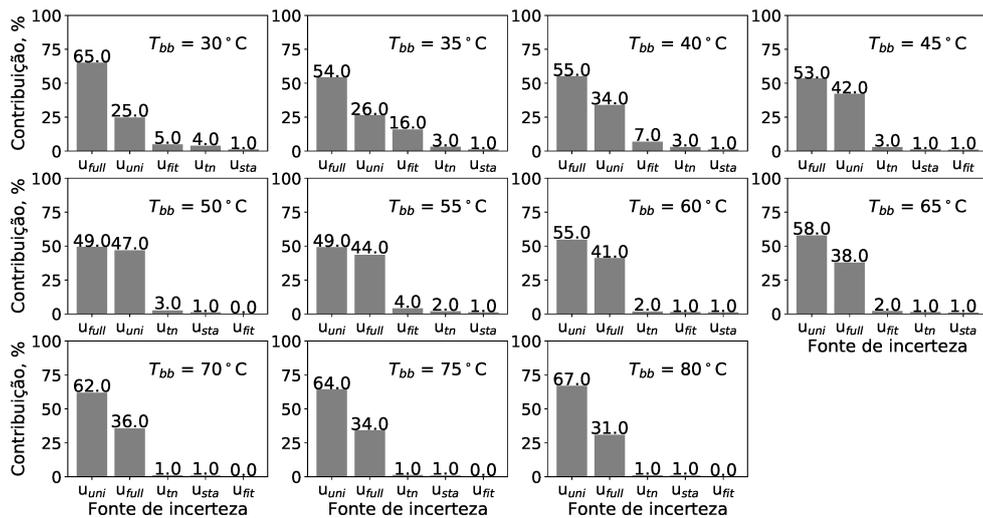


Figura 17: Contribuição das fontes de incerteza ao longo das temperaturas de referência (CAM 3).

para cada dispositivo. Percebe-se que o comportamento das incertezas apresenta um padrão randômico entre os detectores, fruto da característica intrínseca do ruído temporal. Ainda que o intervalo de distribuição das incertezas ao longo das matrizes seja relativamente pequeno, a incerteza do ruído temporal, que é avaliada pixel-a-pixel, possui uma influência significativa nos padrões exibidos, podendo modificar a contribuição de cada detector. Nota-se na Fig. 19, para $T_{bb} = 70,0$ °C, que quatro detectores apresentaram ruído temporal acima da média, o que deixou a figura sem contraste. Para medições de temperatura que requerem elevada confiabilidade, estes detectores devem ser considerados como defeituosos.

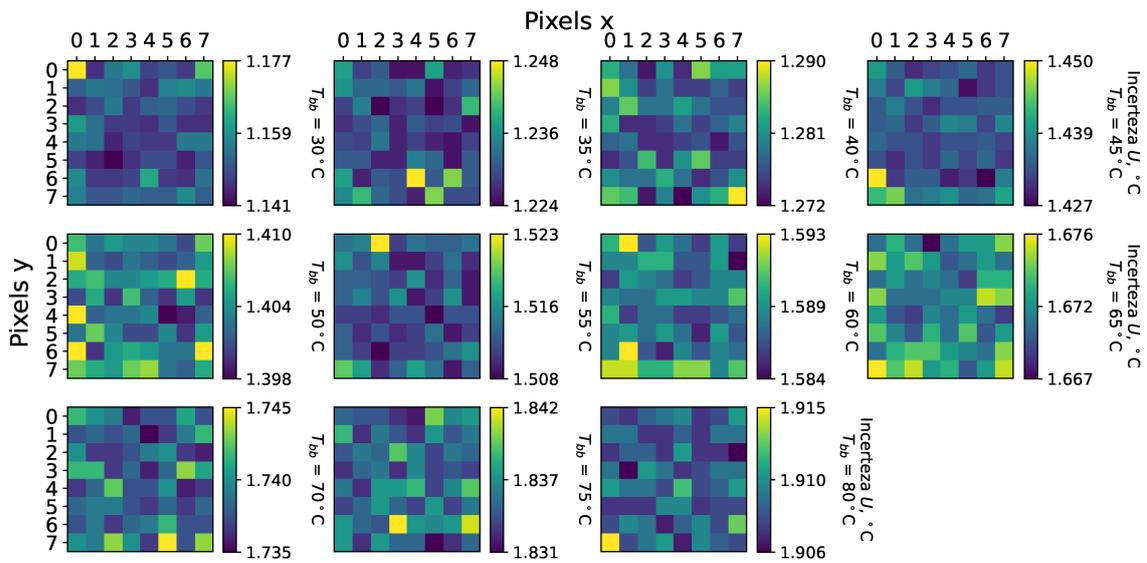


Figura 18: Distribuição das incertezas expandidas na matriz de pixels ao longo dos pontos de calibração (CAM 1).

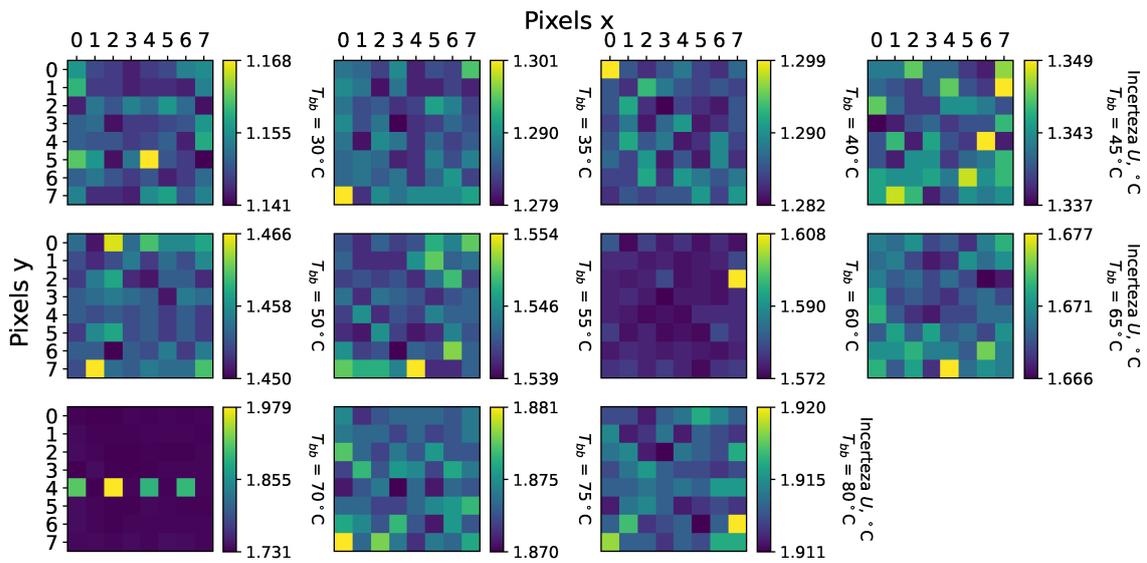


Figura 19: Distribuição das incertezas expandidas na matriz de pixels ao longo dos pontos de calibração (CAM 2).

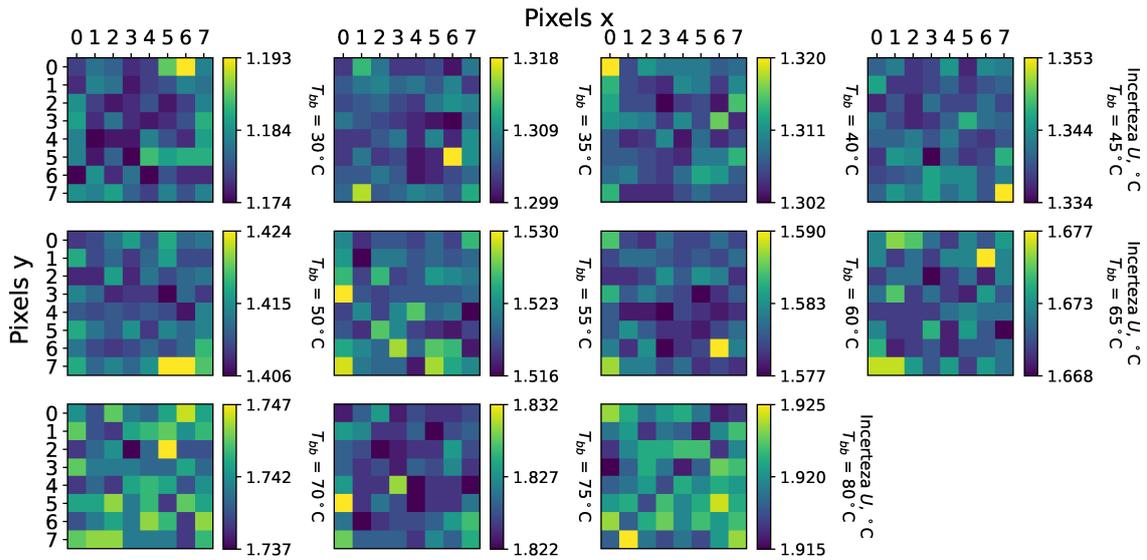


Figura 20: Distribuição das incertezas expandidas na matriz de pixels ao longo dos pontos de calibração (CAM 3).

Outra maneira de expor os resultados de incerteza é mostrada nos gráficos das Figs. 21, 22 e 23. Nos gráficos, uma escala universal é definida para todas as temperaturas de calibração. O máximo desta escala é a máxima incerteza percentual relativa, considerando todos os pixels e todas as temperaturas de calibração, e o mínimo da escala é a mínima incerteza percentual relativa. Nota-se, que, apesar da temperatura de 80 °C possuir as maiores incertezas expandidas absolutas (ver Figs. 18, 19 e 20), fica claro nos gráficos das Figs. 21, 22 e 23 que a pior situação de medição para os termômetros acontece nas temperaturas mais baixas (maior incerteza relativa).

Além disto, percebe-se também, que, a incerteza relativa percentual, em função da temperatura de calibração, apresenta uma relação praticamente linear, com uma incerteza relativa alta (temperaturas baixas) e uma incerteza relativa baixa (temperaturas altas). Esta visualização também permite constatar pixels defeituosos, que apresentam incerteza absoluta e relativa elevadas, como observado nos gráficos das Figs. 19 e 22, respectivamente.

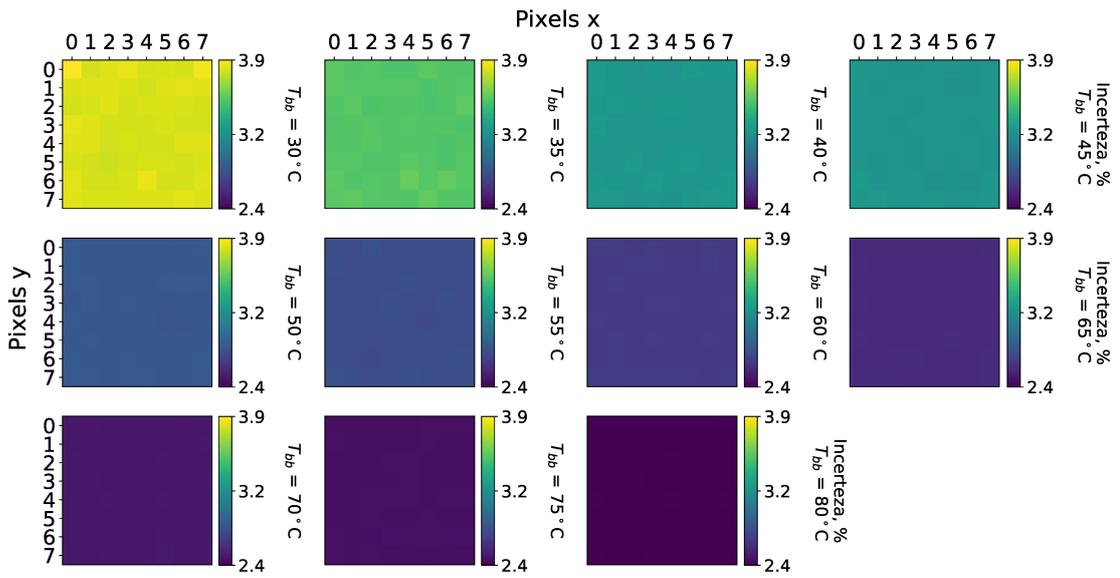


Figura 21: Incerteza percentual relativa entre os pontos de calibração (CAM 1).

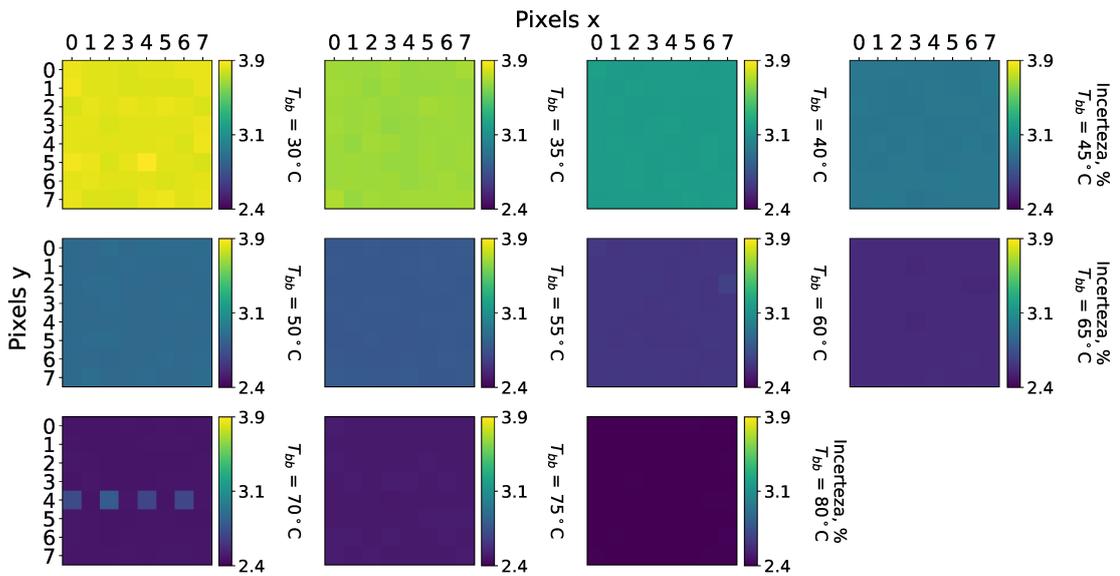


Figura 22: Incerteza percentual relativa entre os pontos de calibração (CAM 2).

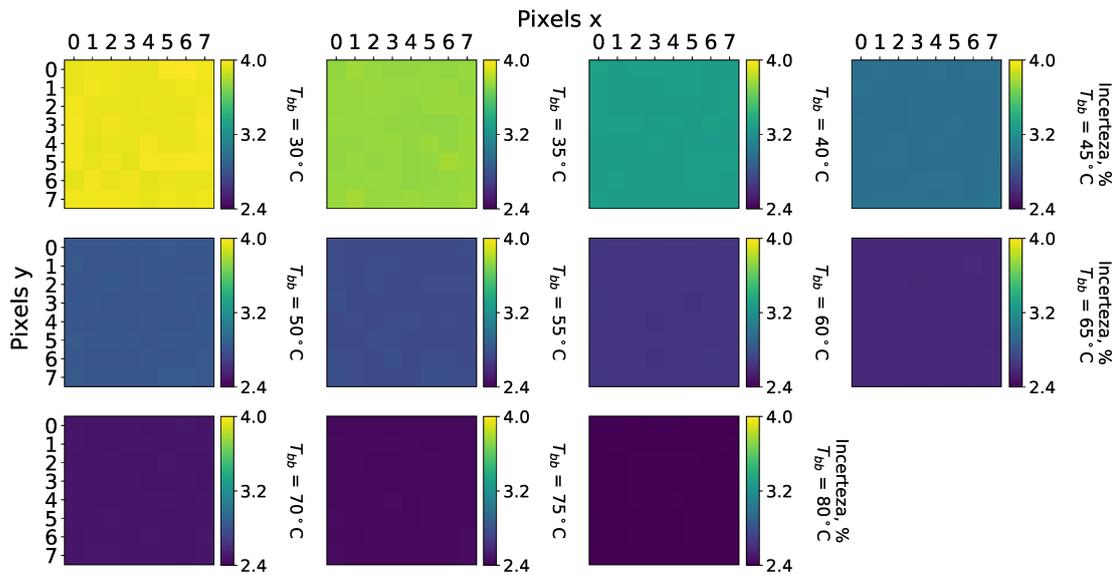


Figura 23: Incerteza percentual relativa entre os pontos de calibração (CAM 3).

A Tabela 8 apresenta uma comparação qualitativa entre os resultados de incerteza obtidos por este trabalho e resultados de fabricantes e estudos da literatura. Cada estudo citado na Tab. 8 aplica diferentes metodologias, modelos de regressão e modelos de análise de incerteza, portanto uma comparação quantitativa não seria adequada. A incerteza expandida obtida para o modelo de termopilha utilizado neste trabalho é menor que a reportada pelo fabricante Panasonic. Este resultado aponta que as termopilhas testadas podem ter uma incerteza de medição melhor que a apresentada no *datasheet*. É importante destacar que as incertezas reportadas pelos fabricantes são, em geral, valores arbitrários que excedem os resultados obtidos em seus respectivos laboratórios. Do ponto de vista comercial, essa abordagem é interessante para contemplar condições de medições muito diferentes daquelas realizadas no momento da calibração. Por outro lado, do ponto de vista científico, esses valores não trazem informações relevantes que sirvam de base para a validação ou comparação destes resultados de incerteza.

Tabela 8: Incertezas expandidas de calibração para diferentes estudos e fabricantes. O termo NI indica a falta de informações.

Referência	Instrumento	Tipo de sensor	Modelo de regressão	Máximo Desvio	Incerteza expandida
Presente trabalho	AMG8833 Grid-eye	MEMS termopilha	Equação de Planck	0,46 °C	± 1,9 °C
FLIR	SC660	Microbolômetro	Equação de Planck	NI	± 2,0 °C
Panasonic (2021)	AMG8833 Grid-eye	MEMS termopilha	NI	NI	± 2,5 °C
Budzier e Gerlach (2015)	NI	Microbolômetro	Equação de Planck	NI	± 1,0 °C
Chung e Chen (2010)	OMRON MC-510	Termopilha	Polinomial	0,30 °C	± 0,5 °C
Raimeri e Pagliarini (2002)	FLIR PRISM DS	Fotônico	Equação de Planck	NI	± 0,2 °C

Foi avaliada também a influência dos diferentes métodos NUC na integração dos modelos matemáticos das Figs. 7 e 8. Nesta análise, a média da incerteza padrão do modelo de correção (u_{fit}) ao longo dos pontos de correção foi calculada considerando o *multi-point*, *two-point* NUC e a correção aplicada diretamente nos dados brutos. Os resultados são

apresentados por meio de um gráfico de barras na Fig. 24. Os resultados indicam que a aplicação dos métodos NUC reduzem substancialmente a incerteza do modelo de correção, em comparação com a correção aplicada diretamente nos dados brutos. Além disso, a aplicação do *multi-point* NUC se mostrou mais eficiente do que o tradicional *two-point* NUC. A redução percentual da incerteza u_{fit} atingiu até 79 % na aplicação do *multi-point* e até 70 % na aplicação do *two-point* (CAM 1).

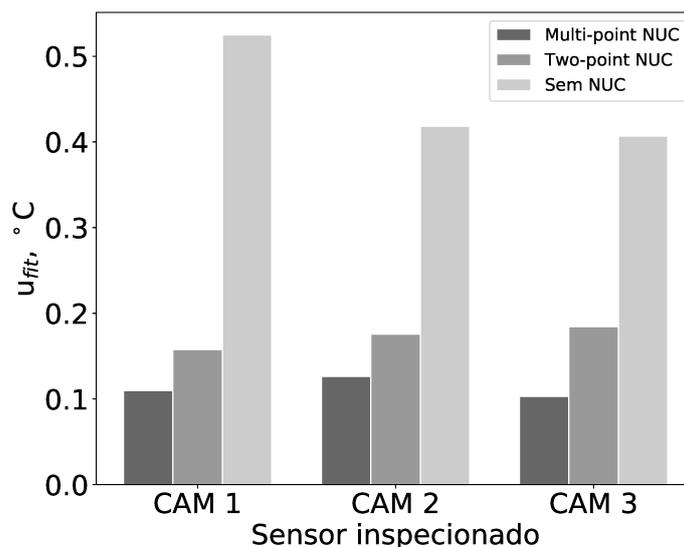


Figura 24: Valores médios da incerteza do modelo de correção (u_{fit}) considerando o *multi-point*, *two-point* NUC e a correção aplicada diretamente nos dados brutos.

6 Conclusão

Este trabalho apresenta resultados de calibração de termômetros infravermelho do tipo MEMS termopilha, amplamente utilizados para medições de temperatura. A metodologia de calibração proposta envolve revisão da literatura, procedimentos experimentais, e a integração de modelos de regressão baseados na Lei de Planck com métodos de correção de não-uniformidade. O modelo de propagação de incertezas foi baseado nas diretrizes expostas no método GUM e na norma ASTM E2847-14, levando em consideração as incertezas do corpo-negro de referência, do modelo radiométrico de transferência de calor, dos termômetros termopilha e do modelo de correção.

Na metodologia experimental, uma bancada foi montada para posicionar o radiador corpo-negro e os termômetros, de modo que o alinhamento entre os equipamentos fosse preservado. Os experimentos foram realizados em ambiente controlado e climatizado. Os dados brutos dos termômetros foram coletados em uma faixa de temperatura de 30 °C a 80 °C, com 5 °C de intervalo entre as medições.

O modelo de correção proposto envolve a combinação de três modelos matemáticos: correção de não-uniformidade para uniformizar a resposta dos detectores; modelo radiométrico de transferência de calor para a determinação da temperatura T_{full} ; e modelo de regressão para a obtenção dos coeficientes de calibração de cada termopilha testada. Foram analisados dois métodos de correção de não-uniformidade, o *two-point* e *multi-point* NUC. O modelo radiométrico de transferência de calor assumido foi o modelo de corpo-cinza, ideal para análises de superfícies de alta emissividade. Os modelos de regressão utilizados neste trabalho foram o Sakuma-Hattori e a regressão RBF, sendo ambas aproximações da Lei de Planck.

A análise dos procedimentos de correção de não-uniformidade mostrou que o método *multi-point* NUC é mais eficiente que o tradicional *two-point* NUC, podendo reduzir em até 88 % o ruído espacial entre os detectores (74,1 % no método *two-point*). Na análise dos modelos de regressão, ambos mostraram uma exatidão elevada com os dados experimentais, com um desvio máximo absoluto de 0,49 °C para a aproximação de Sakuma-Hattori e 0,46 °C para o modelo RBF.

Em relação à avaliação de incertezas, as componentes relacionadas ao corpo-negro de referência, principalmente a uniformidade (u_{uni}) e a indicação de temperatura (u_{obj}) proveniente da calibração do termopar tipo T foram dominantes, seguidos pela componente do modelo de correção (u_{fit}) e do ruído temporal (u_{tn}). Este resultado reforça a utilização de radiadores que tenham rastreabilidade bem definida para procedimentos de calibração. O modelo de incertezas mostrou que a abordagem pixel a pixel é interessante para revelar

detectores que estão defeituosos. Por mais que as incertezas do grupo do corpo-negro tenham contribuição majoritária no valor total, as incertezas do ruído temporal, que são avaliadas para cada detector, tem uma influência significativa na distribuição de incertezas expandidas na matriz, como pode ser visto nas Figs. 18, 19 e 20. Os resultados de incerteza também mostraram que o pior cenário de medição para os termômetros testados se encontra nas temperaturas mais baixas, onde se apresentam as maiores incertezas relativas percentuais, considerando todos os pixels e todas as temperaturas de calibração.

Os resultados também indicam uma influência substancial dos métodos NUC na determinação da incerteza do modelo de correção. A aplicação do método *multi-point* NUC conseguiu reduzir em até 79 % a incerteza u_{fit} , comparado à correção aplicada diretamente nos dados brutos. Este resultado é relevante para futuros trabalhos que avaliem a incerteza de calibração de termômetros infravermelho.

Neste contexto, o trabalho aqui exposto fornece uma boa alternativa para procedimentos de calibração deste tipo de sensor. A metodologia proposta, além de apresentar resultados consistentes na correção radiométrica, fornece uma incerteza expandida abaixo daquelas apresentadas por fabricantes de termômetros do tipo MEMS termopilha.

6.1 Sugestão para trabalhos futuros

O presente trabalho emprega uma metodologia generalista, composta por uma combinação de modelos matemáticos e procedimentos experimentais que permitem a estimativa das incertezas de calibração de termômetros do tipo MEMS termopilha. Esta metodologia pode ser utilizada para qualquer tipo de sensor térmico (bolômetro, termopilha ou piroelétrico), pois o processo de conversão de sinal radiométrico para sinal eletrônico está fundamentado em efeitos térmicos.

A metodologia pode ser aprofundada a fim de se contabilizar também a incerteza devida a eventual não-linearidade de resposta do termômetro, que dependeria de uma análise da responsividade espectral dos detectores da matriz. Para tal, novos procedimentos experimentais teriam de ser implementados, possibilitando a utilização direta da formulação de Planck. Outra análise que pode ser realizada é a influência da temperatura interna do sensor, medida pelo termistor, no sinal extraído pela termômetro. Dependendo da temperatura que o objeto inspecionado se encontra, da temperatura ambiente, e também da distância de medição, a temperatura do sensor deve ser contabilizada como uma fonte emissão e ser adicionada às outras componentes radiométricas que chegam à superfície do instrumento IR.

Para englobar a calibração de sensores fotônicos, a metodologia pode implementar nos modelos matemáticos de regressão e nos procedimentos de correção de não-uniformidade

variáveis características de sensores fotônicos, em especial o tempo de integração, parâmetro que estabelece o período em que o detector está exposto à radiação térmica. Desta maneira, a metodologia poderia ser utilizada como um modelo padrão para análise de incertezas de calibração em sensores IR.

Referências

- ABNT. *NBR 12771: Termopares - Tabelas de referência*. Rio de Janeiro - RJ, 1999. Citado na página 25.
- ARAGON, B.; JOHANSEN, K.; PARKES, S.; MALBETEAU, Y.; AL-MASHHARAWI, S.; AL-AMOUDI, T.; ANDRADE, C. F.; TURNER, D.; LUCIEER, A.; MCCABE, M. F. A Calibration Procedure for Field and UAV-Based Uncooled Thermal Infrared Instruments. *Sensors*, v. 20, n. 11, 2020. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/20/11/3316>>. Citado na página 28.
- ASTM. *E2847-14: Standard Test Method for Calibration and Accuracy Verification of Wideband Infrared Thermometers*. West Conshohocken, Pensilvânia, EUA, 2014. Citado 4 vezes nas páginas 17, 29, 42 e 44.
- BATTUELLO, M.; RICOLFI, T. Precision infrared thermometry at IMGC between the tin and copper points. *Measurement*, v. 10, n. 3, p. 119–123, 1992. ISSN 0263-2241. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/026322419290004N>>. Citado na página 28.
- BEDFORD, R.; QUINN, T. Techniques for approximating the international temperature scale of 1990. *Practical Guide, BIPM reprint, Paris*, 1997. Citado na página 44.
- BUDZIER, H.; GERLACH, G. *Thermal infrared sensors: theory, optimisation and practice*. West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 8, 21 e 22.
- BUDZIER, H.; GERLACH, G. Calibration of uncooled thermal infrared cameras. *Journal of Sensors and Sensor Systems*, v. 4, n. 1, p. 187–197, 2015. Disponível em: <<https://jsss.copernicus.org/articles/4/187/2015/>>. Citado na página 53.
- CHANG, S.; LI, Z. Single-reference-based solution for two-point nonuniformity correction of infrared focal plane arrays. *Infrared Physics & Technology*, v. 101, p. 96–104, 2019. ISSN 1350-4495. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350449519301033>>. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 32.
- CHEN, C.-N. Temperature error analysis and parameter extraction of an 8–14- μm thermopile with a wavelength-independent absorber for tympanic thermometer. *IEEE Sensors Journal*, v. 11, n. 10, p. 2310–2317, 2011. Citado na página 22.
- CHRZANOWSKI, K. Evaluation of thermal cameras in quality systems according to ISO 9000 or EN 45000 standards. *Thermosense XXIII*, v. 4360, p. 387–401, 2001. Citado na página 46.
- CHUNG, W.; CHEN, C. Evaluation of performance and uncertainty of infrared tympanic thermometers. *Sensors*, Molecular Diversity Preservation International, v. 10, n. 4, p. 3073–3089, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 17, 42 e 53.

DEWITT, D. Inferring temperature from optical radiation measurements. *Optical engineering*, International Society for Optics and Photonics, v. 25, n. 4, p. 254596, 1986. Citado na página 17.

FERREIRA, R.; SILVA, B.; TEIXEIRA, G.; ANDRADE, R.; PORTO, M. Uncertainty analysis applied to electrical components diagnosis by infrared thermography. *Measurement*, v. 132, p. 263–271, 2019. ISSN 0263-2241. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224118308716>>. Citado na página 46.

FISCHER, J.; BATTUELLO, M.; SADLI, M.; BALLICO, M.; PARK, S. N.; SAUNDERS, P.; ZUNDONG, Y.; JOHNSON, B. C.; HAM, E. van der; SAKUMA, F. *et al.* Uncertainty budgets for realization of ITS-90 by radiation thermometry. *AIP Conference Proceedings*, v. 684, p. 631–638, 2003. Citado na página 44.

FLIR. *User's manual: FLIR SC6XX*. Wilsonville, Oregon, EUA, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 9, 10 e 70.

FLUKE. *4181 Precision Infrared Calibrator Technical Guide*. Everett, Washington, EUA, 2013. Citado 5 vezes nas páginas 9, 10, 44, 45 e 67.

FRANCHI, D.; GONZATTI, F.; MIOTTO, M.; KUHN, V.; FARRET, F. Use of infrared matrix sensor for temperature measurement and monitoring of pem/fc stacks. *Sensors and Actuators A: Physical*, v. 293, p. 119–127, 2019. ISSN 0924-4247. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424718316972>>. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 22.

GADE, R.; MOESLUND, T. B. Thermal cameras and applications: a survey. *Machine vision and applications*, Springer, v. 25, n. 1, p. 245–262, 2014. Citado na página 21.

GRAF, A.; ARNDT, M.; SAUER, M.; GERLACH, G. Review of micromachined thermopiles for infrared detection. *Measurement Science and Technology*, IOP Publishing, v. 18, n. 7, p. R59–R75, may 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/0957-0233/18/7/r01>>. Citado na página 23.

HE, Z.; CAO, Y.; DONG, Y.; YANG, J.; CAO, Y.; TISSE, C.-L. Single-image-based nonuniformity correction of uncooled long-wave infrared detectors: a deep-learning approach. *Appl. Opt.*, OSA, v. 57, n. 18, p. D155–D164, Jun 2018. Disponível em: <<http://ao.osa.org/abstract.cfm?URI=ao-57-18-D155>>. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 30.

HONORAT, V.; MOREAU, S.; MURACCIOLE, J.-M.; WATTRISSE, B.; CHRYSOCHOOS, A. Calorimetric analysis of polymer behaviour using a pixel calibration of an IRFPA camera. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, Taylor & Francis, v. 2, n. 2, p. 153–171, 2005. Citado na página 28.

HORNY, N. FPA camera standardisation. *Infrared Physics & Technology*, v. 44, n. 2, p. 109–119, 2003. ISSN 1350-4495. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350449502001834>>. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 28.

- HOU, H.; HUANG, Q.; LIU, G.; QIAO, G. Enhanced performances of CMOS-MEMS thermopile infrared detectors using novel thin film stacks. *Infrared Physics & Technology*, v. 102, p. 103058, 2019. ISSN 1350-4495. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350449519306085>>. Citado na página 23.
- HOULET, L. F.; SHIN, W.; TAJIMA, K.; NISHIBORI, M.; IZU, N.; ITOH, T.; MATSUBARA, I. Thermopile sensor-devices for the catalytic detection of hydrogen gas. *Sensors and Actuators B: Chemical*, v. 130, n. 1, p. 200–206, 2008. ISSN 0925-4005. Proceedings of the Eleventh International Meeting on Chemical Sensors IMCS-11. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400507006053>>. Citado na página 22.
- HSU, A. L.; HERRING, P. K.; GABOR, N. M.; HA, S.; SHIN, Y. C.; SONG, Y.; CHIN, M.; DUBEY, M.; CHANDRAKASAN, A. P.; KONG, J. *et al.* Graphene-based thermopile for thermal imaging applications. *Nano letters*, ACS Publications, v. 15, n. 11, p. 7211–7216, 2015. Citado na página 17.
- HU, J.; XU, Z.; WAN, Q. Non-uniformity correction of infrared focal plane array in point target surveillance systems. *Infrared Physics & Technology*, v. 66, p. 56–69, 2014. ISSN 1350-4495. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350449514000838>>. Citado na página 31.
- INSTRUMENTS, N. *NI 9211: Getting started guide*. Austin, Texas, EUA, 2015. Citado 3 vezes nas páginas 9, 10 e 69.
- JCGM:100. Evaluation of Measurement Data - Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. *BIPM: Sevres*, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 32.
- JCGM:200. Vocabulário Internacional de Metrologia - Conceitos Fundamentais e Gerais e Termos Associados. *BIPM: Sevres*, 2012. Citado na página 17.
- KRUPÍŃSKI, M.; BIESZCZAD, G.; SOSNOWSKI, T.; MADURA, H.; GOGLER, S. Polish Academy of Sciences Committee on Metrology and Scientific Instrumentation, n. No 4, p. 709–718, 2014. Disponível em: <http://journals.pan.pl/Content/90290/PDF/Journal10178-VolumeXXI+Issue4_09.pdf>. Citado na página 30.
- KUMAR, A.; SARKAR, S.; AGARWAL, R. A novel algorithm and hardware implementation for correcting sensor non-uniformities in infrared focal plane array based staring system. *Infrared Physics & Technology*, v. 50, n. 1, p. 9–13, 2007. ISSN 1350-4495. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350449506000491>>. Citado na página 30.
- LANE, B.; WHITENTON, E. *Calibration and Measurement Procedures for a High Magnification Thermal Camera*. Gaithersburg, Maryland, EUA: NIST Interagency/Internal Report (NISTIR), National Institute of Standards and Technology, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.
- LI, Z.; YU, Y.; TIAN, Q.-J.; CHANG, S.-T.; HE, F.-Y.; YIN, Y.-H.; QIAO, Y.-F. High-efficiency non-uniformity correction for wide dynamic linear infrared radiometry system. *Infrared Physics & Technology*, v. 85, p. 395–402, 2017. ISSN 1350-4495. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350449517301603>>. Citado na página 30.

- LIANG, K.; YANG, C.; PENG, L.; ZHOU, B. Nonuniformity correction based on focal plane array temperature in uncooled long-wave infrared cameras without a shutter. *Appl. Opt.*, OSA, v. 56, n. 4, p. 884–889, Feb 2017. Disponível em: <<http://ao.osa.org/abstract.cfm?URI=ao-56-4-884>>. Citado na página 30.
- LIEBMANN, F. Infrared Calibration Development at Fluke Corporation Hart Scientific Division. v. 6939, p. 693906, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 44 e 45.
- LIN, D.; MAAS, H.-G.; WESTFELD, P.; BUDZIER, H.; GERLACH, G. An advanced radiometric calibration approach for uncooled thermal cameras. *The Photogrammetric Record*, v. 33, n. 161, p. 30–48, 2018. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/phor.12216>>. Citado na página 28.
- LIRA, I.; CAMARANO, D.; VILLALOBOS, J. P.; SANTIAGO, F. Expression of the uncertainty of measurement in the calibration of thermometers. Part I: Standard platinum resistance thermometers. *Metrologia*, IOP Publishing, v. 36, n. 2, p. 107–111, apr 1999. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/0026-1394/36/2/5>>. Citado na página 44.
- LIRA, I.; SANTOS, P. R. Expression of the uncertainty of measurement in the calibration of thermometers. Part II: Thermocouples. *Metrologia*, IOP Publishing, v. 36, n. 5, p. 415–419, oct 1999. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/0026-1394/36/5/3>>. Citado na página 44.
- M. FERREIRA, R. A.; L.F. Pottie, D.; C. Dias, L. H.; J. Cardoso Filho, B.; P. Porto, M. A directional-spectral approach to estimate temperature of outdoor PV panels. *Solar Energy*, v. 183, p. 782–790, 2019. ISSN 0038-092X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X19302786>>. Citado na página 27.
- MACHIN, G.; SIMPSON, R.; BROUSSELY, M. Calibration and validation of thermal imagers. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, Taylor & Francis, v. 6, n. 2, p. 133–147, 2009. Citado na página 17.
- MARTINY, M.; SCHIELE, R.; GRITSCH, M.; SCHULZ, A.; WITTIG, S. In situ calibration for quantitative infrared thermography. *Quantitative InfraRed Thermography*, 1996. Citado 3 vezes nas páginas 17, 28 e 29.
- MIAO, L. ifeng; XU, Q.; ZHANG, M. tao; SUN, D. xin; LIU, Y. nian. Real-time implementation of multi-point nonuniformity correction for IRFPA based on FPGA. In: PUSCHELL, J.; GONG, H. mei; CAI, Y.; LU, J.; FEI, J. dong (Ed.). *International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2009: Advances in Infrared Imaging and Applications*. SPIE, 2009. v. 7383, p. 143 – 150. Disponível em: <<https://doi.org/10.1117/12.835055>>. Citado na página 30.
- MILTON, A. F.; BARONE, F. R.; KRUER, M. R. Influence Of Nonuniformity On Infrared Focal Plane Array Performance. *Optical Engineering*, SPIE, v. 24, n. 5, p. 855 – 862, 1985. Disponível em: <<https://doi.org/10.1117/12.7973588>>. Citado na página 30.
- MINKINA, W.; DUDZIK, S. *Infrared Thermography: Errors and Uncertainties*. 1^a. ed. United Kingdom: John Wiley & Sons, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 29.

- MOREIRA, M. de O.; ABRÃO, A. M.; FERREIRA, R. A.; PORTO, M. P. Temperature monitoring of milling processes using a directional-spectral thermal radiation heat transfer formulation and thermography. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 171, p. 121051, 2021. ISSN 0017-9310. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001793102100154X>>. Citado na página 27.
- NUGENT, P. W.; SHAW, J. A.; PUST, N. J. Correcting for focal-plane-array temperature dependence in microbolometer infrared cameras lacking thermal stabilization. *Optical Engineering*, SPIE, v. 52, n. 6, p. 1 – 8, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1117/1.OE.52.6.061304>>. Citado na página 47.
- OCHS, M.; SCHULZ, A.; BAUER, H.-J. High dynamic range infrared thermography by pixelwise radiometric self calibration. *Infrared Physics & Technology*, v. 53, n. 2, p. 112–119, 2010. ISSN 1350-4495. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350449509001303>>. Citado na página 17.
- PANASONIC. *Specifications for infrared array sensor*. Osaka, Japão, 2021. Citado 4 vezes nas páginas 9, 10, 53 e 66.
- PRON, H.; BOUACHE, T. Alternative thermal calibrations of focal plane array infrared cameras. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, Taylor & Francis, v. 13, n. 1, p. 94–108, 2016. Citado na página 28.
- RAINIERI, S.; PAGLIARINI, G. Data processing technique applied to the calibration of a high performance FPA infrared camera. *Infrared Physics and Technology*, v. 43, n. 6, p. 345–351, 2002. ISSN 1350-4495. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135044950200124X>>. Citado 4 vezes nas páginas 17, 42, 47 e 53.
- REDLICH, R.; FIGUEROA, M.; TORRES, S. N.; PEZOA, J. E. Embedded nonuniformity correction in infrared focal plane arrays using the constant range algorithm. *Infrared Physics & Technology*, v. 69, p. 164–173, 2015. ISSN 1350-4495. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350449515000389>>. Citado na página 31.
- ROGALSKI, A. Infrared detectors: status and trends. *Progress in Quantum Electronics*, v. 27, n. 2, p. 59–210, 2003. ISSN 0079-6727. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079672702000241>>. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 22.
- RONG, S.; ZHOU, H.; WEN, Z.; QIN, H.; QIAN, K.; CHENG, K. An improved non-uniformity correction algorithm and its hardware implementation on FPGA. *Infrared Physics & Technology*, v. 85, p. 410–420, 2017. ISSN 1350-4495. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135044951630696X>>. Citado na página 31.
- RUI, L.; YIN-TANG, Y.; QING, L.; HUI-XIN, Z. Improvement in adaptive nonuniformity correction method with nonlinear model for infrared focal plane arrays. *Optics Communications*, v. 282, n. 17, p. 3444–3447, 2009. ISSN 0030-4018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030401809005112>>. Citado na página 31.

- SAUNDERS, P.; FISCHER, J.; SADLI, M.; BATTUELLO, M.; PARK, C. W.; ZUNDONG, Y.; YOON, H.; LI, W.; HAM, E. van der; SAKUMA, F.; YAMADA, Y.; BALLICO, M.; MACHIN, G.; FOX, N. P.; HOLLANDT, J.; MATVEYEV, M.; BLOEMBERGEN, P.; UGAR, S. Uncertainty budgets for calibration of radiation thermometers below the silver point. *Int. J. Thermophysics*, v. 29, n. 3, p. 1066–1083, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 42 e 44.
- SAUNDERS, P.; MANOI, A. Uncertainties in blackbody corrections for low-temperature radiation thermometers. *Metrologia*, IOP Publishing, v. 57, n. 2, p. 024002, 2020. Citado na página 29.
- SAUNDERS, P.; WHITE, D. R. Physical basis of interpolation equations for radiation thermometry. *Metrologia*, IOP Publishing, v. 40, n. 4, p. 195–203, jul 2003. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/0026-1394/40/4/309>>. Citado na página 29.
- SCHULZ, M.; CALDWELL, L. Nonuniformity correction and correctability of infrared focal plane arrays. *Infrared Physics & Technology*, v. 36, n. 4, p. 763–777, 1995. ISSN 1350-4495. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/1350449594000023>>. Citado na página 30.
- SUN, G.; SAGA, T.; SHIMIZU, T.; HAKOZAKI, Y.; MATSUI, T. Fever screening of seasonal influenza patients using a cost-effective thermopile array with small pixels for close-range thermometry. *International Journal of Infectious Diseases*, v. 25, p. 56–58, 2014. ISSN 1201-9712. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1201971214014957>>. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 22.
- SUNDIN, P. *Intuitive Colorization of Temperature in Thermal Cameras*. 2015. Citado na página 29.
- TECHNOLOGIES, K. *Keysight 34970A/34972A Data Acquisition System/Switch Unit: User's Guide*. Austin, Texas, EUA, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 72.
- TESTO. *Testo 622: Instruction manual*. Titisee-Neustadt, Alemanha, 2021. Citado 4 vezes nas páginas 9, 10, 44 e 68.
- TRAN, Q.; HAN, D.; KANG, C.; HALDAR, A.; HUH, J. Effects of ambient temperature and relative humidity on subsurface defect detection in concrete structures by active thermal imaging. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), v. 17, n. 8, ago. 2017. ISSN 1424-8220. Funding Information: This research was supported by a grant (17RDRP-B076564-04) from the Regional Development Research Program funded by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport of the Korean government. Publisher Copyright: © 2017 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. Citado na página 27.
- VALENTE, J.; ROLDÁN, J. J.; GARZÓN, M.; BARRIENTOS, A. Towards airborne thermography via low-cost thermopile infrared sensors. *Drones*, v. 3, n. 1, 2019. ISSN 2504-446X. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2504-446X/3/1/30>>. Citado na página 22.
- VOLLMER, M.; MÖLLMANN, K.-P. *Infrared thermal imaging: fundamentals, research and applications*. Weinheim, Alemanha: John Wiley & Sons, 2018. Citado na página 20.

- XU, D.; WANG, Y.; XIONG, B.; LI, T. MEMS-based thermoelectric infrared sensors: A review. *Frontiers of Mechanical Engineering*, Springer, v. 12, n. 4, p. 557–566, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 8, 22 e 23.
- YU, H.; ZHANG, Z. jie; WANG, C. sheng. An improved retina-like nonuniformity correction for infrared focal-plane array. *Infrared Physics & Technology*, v. 73, p. 62–72, 2015. ISSN 1350-4495. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350449515002091>>. Citado na página 31.
- ZHOU, H. xin; LAI, R.; LIU, S. qian; JIANG, G. New improved nonuniformity correction for infrared focal plane arrays. *Optics Communications*, v. 245, n. 1, p. 49–53, 2005. ISSN 0030-4018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003040180400971X>>. Citado na página 31.
- ZHOU, H. xin; QIN, H. lin; BAI, L. ping; LIU, Q. chang; GENG, X.; WANG, B. jian. Nonuniformity correction algorithm with nonlinear model for infrared focal plane arrays. *Infrared Physics & Technology*, v. 53, n. 1, p. 10–16, 2010. ISSN 1350-4495. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350449509001029>>. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.

Apêndices

APÊNDICE A – Lista de equipamentos

A.1 Termômetro termopilha AMG8833 Grid-Eye

Termômetro infravermelho do tipo MEMS termopilha utilizado nos ensaios de calibração.



Figura 25: Termômetro MEMS termopilha AMG8833 Grid-Eye. Fonte: (PANASONIC, 2021).

Tabela 9: Especificações do termômetro AMG8833 Grid-Eye. Fonte: (PANASONIC, 2021).

Item	Especificação
Tensão de operação	3,3 V
Temperatura de operação	0 °C - 80 °C
Resolução de temperatura	0,25 °C
Precisão de medição	± 2,5 °C
Campo de visão (FOV)	60°
Número de <i>pixels</i>	64 (8 × 8)
Comprimento de onda de operação	5,0 μm - 13 μm
Taxa de aquisição	1 or 10 frames/s
<i>Output</i>	°C ou <i>bits</i>

A.2 Radiador corpo-negro FLUKE 4181

Radiador corpo-negro utilizado como referência de radiação uniforme e temperatura para a calibração das termopilhas.



Figura 26: Radiador corpo-negro FLUKE 4181. Fonte: (FLUKE, 2013).

Tabela 10: Especificações do radiador corpo-negro FLUKE 4181. Fonte: (FLUKE, 2013).

Item	Especificação
Faixa de operação	30 °C - 500 °C
Tempo de aquecimento	20 min de 30 °C a 500 °C
Tempo de estabilização	10 min
Emissividade nominal	0,95
Diâmetro da superfície de emissão	152,4 mm
Peso	9,5 kg
Temperatura ambiente	5 °C - 35 °C

A.3 Termo-higrômetro TESTO 622

Monitoramento das condições ambientes (temperatura e umidade) na calibração do termopar e dos sensores termopilha.



Figura 27: Termo-higrômetro TESTO 622. Fonte: (TESTO, 2021).

Tabela 11: Especificações do termo-higrômetro TESTO 622. Fonte: (TESTO, 2021).

Item	Especificação
Taxa de aquisição	10 s
Temperatura de operação	-10 °C a 60 °C
Peso	240 g
Dimensões	185 x 105 x 36 mm
Incerteza para temperatura	$\pm 0,4^{\circ}\text{C}$
Incerteza para umidade	$\pm 3\%$
Resolução de temperatura	0,1 °C
Resolução de umidade	0,1 %

A.4 Sistema de aquisição de dados NI 9211 Series C

Monitoramento das leituras do termopar (temperatura de referência) em contato com a área de emissão do corpo-negro.



Figura 28: Sistema de aquisição de dados NI 9211 Series C. Fonte: (INSTRUMENTS, 2015).

Tabela 12: Especificações do sistema de aquisição de dados NI 9211 Series C. Fonte: (INSTRUMENTS, 2015).

Item	Especificação
Resolução	24 bits
Temperatura de operação	0 °C a 60 °C
Faixa de medição de tensão	$\pm 80 \text{ mV}$
Erro de offset	$\pm 20 \text{ } \mu\text{V}$
Erro de ganho	$\pm 0,1 \%$
Dimensões	140 mm x 86 mm x 25 mm
Peso	350 g

A.5 Câmera termográfica FLIR SC660

Termovisor científico utilizado nos experimentos para determinar a incerteza de uniformidade do radiador corpo-negro.



Figura 29: Câmera científica FLIR SC660. Fonte: (FLIR, 2011).

Tabela 13: Especificações do termovisor FLIR SC660. Fonte: (FLIR, 2011).

Item	Especificação
Lente	36 mm
Faixa de temperatura	-40 °C - 1500 °C
Incerteza de medição	$\pm 2,0$ °C ou ± 2 %
Campo de visão (FOV)	45° x 34°
Resolução	640 × 480
Temperatura de operação	-15 °C - 50 °C
Comprimento de onda de operação	7,5 μm - 13 μm
Taxa de aquisição	30 Hz
Dimensões	299 mm x 144 mm x 147 mm
Peso	1,8 kg

A.6 Termômetro de resistência PT-100

Termorresistência utilizada como referência na calibração do termopar tipo T em contato com a área de emissão do corpo-negro.



Figura 30: Termorresistência PT-100 Ecil 4W.

Tabela 14: Especificações da termorresistência Ecil PT-100 4W.

Item	Especificação
Faixa de temperatura	0 °C - 420 °C
Erro	-0.02 °C - 0,39 °C
Incerteza de calibração	0,01 °C - 0,07 °C
Comprimento	320 mm
Diâmetro	6 mm

A.7 Sistema de aquisição de dados para termorresistência

Instrumento de conversão/leitura da temperatura medida pela termorresistência no procedimento de calibração do termopar.



Figura 31: Sistema de aquisição de dados Agilent 34970A.

Tabela 15: Especificações do sistema de aquisição de dados Agilent 34970A. Fonte: (TECHNOLOGIES, 2019)

Item	Especificação
Faixa de medição de temperatura	-200 °C a 600 °C
Temperatura de operação	0 °C a 55 °C
Resolução	22 bits
Incerteza	$\pm 0,06$ °C
Dimensões	374 mm x 254 mm x 104 mm

APÊNDICE B – Certificado de calibração da
termorresistência PT-100



CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO
Laboratório de Metrologia ECIL
Rede Brasileira de Calibração

Nº 2464/20

Fls: 1/4

CLIENTE: Fundação e Desenvolvimento da Pesquisa.

Endereço: Avenida Antonio Carlos, N.º 6627 Unid.adm.II - Belo Horizonte - MG

Documento do Cliente: OS 292022

Documento ECIL: PI-316811

OBJETO DA CALIBRAÇÃO: Termorresistência tipo Pt-100 a 4 fios

Fabricante: Ecil

Modelo: - x - x -

Nº Série: 2464/20

Comprimento: 320 mm

Diâmetro: 06 mm

Ident. Cliente: - x - x -

Identificação do Laboratório: 2464/20

Rastreabilidade Ecil: C.Q.25145

PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO:

A calibração foi conduzida em um meio termostático de homogeneidade conhecida, onde se realizaram medições subsequentes das indicações do(s) termômetro(s) padrão e do sensor em calibração. O valor de referência foi determinado com base no Certificado de Calibração do termômetro padrão (ou média dos dois padrões). Calculou-se o erro apresentado pelo sensor em calibração, baseando-se na tabela de referência. Procedimento de referência: IT000380 Rev.14. Norma de referência: IEC 60751:2008.

NOTAS:

1. Este Laboratório adota a Escala Internacional de Temperatura de 1990.
2. Condições ambientais: Temperatura: $23 \pm 3^{\circ}\text{C}$; Umidade: entre 30 e 75%.
3. Este certificado atende aos requisitos de credenciamento pela CGCRE que avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida (ou ao Sistema Internacional de Unidades - SI).
4. Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração nas condições especificadas, não sendo extensivos a quaisquer lotes.
5. A reprodução deste certificado deverá ser completa. A reprodução de partes requer aprovação escrita do Laboratório.

Data da Emissão: 05/06/2020

Data da Calibração: 05/06/2020

PIEDADE - SP - BRASIL



Moisés Vieira de Jesus
Signatário Autorizado

IMP000006 REV. 05



Ecil Produtos e Sistemas de Medição e Controle Ltda
Rodovia Raimundo Antunes Soares, Nº. 1315 - 18170-000 - Piedade-SP
Tel.: (15) 3244-8019
www.ecil.com.br selab@ecil.com.br

RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO:

Os resultados a seguir apresentados referem-se à situação do instrumento conforme recebido pelo Laboratório, sendo V_r o valor de referência, V_s o valor do sensor em calibração e Erro a diferença entre a indicação do sensor em calibração e a tabela de referência.

Profundidade de imersão (mm)	Padrão Utilizado	V_r (°C)	V_s (Ω)	Erro (°C)	U (°C)	Fator K	V_{eff}
250	Ponto de Gelo	0,00	99,991	-0,02	0,01	2,00	∞
250	909/180	29,97	111,676	0,04	0,01	2,00	∞
250	909/689	156,02	159,623	0,14	0,03	2,00	∞
250	909Q/1673	231,83	187,579	0,21	0,03	2,00	∞
300	909Q/1673	419,61	253,962	0,39	0,07	2,00	∞

R_o inicial = 99,9909 Ω

R_o final = 99,9909 Ω

U = 0,0039 Ω

Os resultados acima apresentados referem-se à média de 4 leituras, tomadas em intervalos de 1 minuto. A corrente de medição utilizada foi de 1 mA. A incerteza expandida de medição relatada (U) é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição t com V_{eff} graus de liberdade efetivo corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

A temperatura ($t^{\circ}C$) foi relacionada com a resistência do termômetro $R_{(t^{\circ}C)}$ e a resistência no ponto de gelo pela equação:

$$R_{(t^{\circ}C)}/R_{(0^{\circ}C)} = 1 + At + Bt^2, \text{ onde:}$$

$$a = 3,9129E-03$$

$$b = -5,7980E-07$$

Atenção: É essencial que o valor de $R_{(0^{\circ}C)}$ seja medido em intervalos periódicos e que sempre o valor mais recente seja usado na fórmula.

Esses coeficientes foram usados para gerar a tabela de Resistência x Temperatura x Erro, deste Certificado. A incerteza dos valores determinados através da equação de interpolação é:

Temperatura (°C)	Incerteza (°C)	Fator K	V_{eff}
0	0,05	2,87	4
30	0,05	2,65	5
156	0,05	2,32	10
232	0,05	2,32	9
420	0,09	2,03	93

RASTREABILIDADE DOS PADRÕES UTILIZADOS

1. Termômetros Padrão:

Identificação	Tipo	Certificado	Validade	Rastreabilidade
909/180	25 Ohms	1288/20	20/03/2021	RBC/ECIL
909/689	25 Ohms	0433/20	10/02/2021	RBC/ECIL
909Q/1673	25 Ohms	1077/20	14/02/2021	RBC/ECIL

2. Instrumentos Padrão:

Descrição	Modelo	Certificado	Validade	Rastreabilidade
Ponte Resistiva	ASL F700	DIMCI 0160/2020*	07/02/2022	INMETRO

*O certificado acima mencionado refere-se ao resistor padrão usado para ajuste periódico da Ponte (Ajuste válido até 03/04/2021).

Tabela: Temperatura x Erro

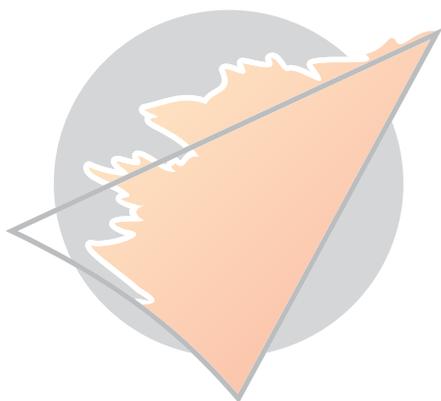
Temperatura (°C)	Resistência (Ohm)	Erro (°C)
0	99,9909	-0,02
5	101,9457	-0,02
10	103,8977	-0,01
15	105,8467	-0,01
20	107,7929	0,00
25	109,7361	0,00
30	111,6765	0,01
35	113,6139	0,01
40	115,5485	0,02
45	117,4801	0,03
50	119,4089	0,03
55	121,3347	0,04
60	123,2577	0,04
65	125,1777	0,05
70	127,0949	0,05
75	129,0092	0,06
80	130,9205	0,06
85	132,829	0,07
90	134,7346	0,07
95	136,6372	0,08
100	138,537	0,08
105	140,4339	0,09
110	142,3278	0,09
115	144,2189	0,10
120	146,1071	0,10

Temperatura (°C)	Resistência (Ohm)	Erro (°C)
125	147,9923	0,11
130	149,8747	0,11
135	151,7542	0,12
140	153,6308	0,12
145	155,5044	0,13
150	157,3752	0,13
155	159,2431	0,14
160	161,1081	0,14
165	162,9702	0,15
170	164,8293	0,15
175	166,6856	0,16
180	168,539	0,16
185	170,3895	0,17
190	172,2371	0,17
195	174,0818	0,18
200	175,9236	0,18
205	177,7625	0,19
210	179,5985	0,19
215	181,4316	0,20
220	183,2618	0,20
225	185,0891	0,21
230	186,9134	0,21
235	188,7349	0,22
240	190,5536	0,22
245	192,3693	0,23

IMP000006 REV. 05

Temperatura (°C)	Resistência (Ohm)	Erro (°C)
250	194,1821	0,23
255	195,992	0,24
260	197,799	0,24
265	199,6031	0,25
270	201,4043	0,25
275	203,2026	0,26
280	204,998	0,26
285	206,7905	0,26
290	208,5801	0,27
295	210,3668	0,27
300	212,1507	0,28
305	213,9316	0,28
310	215,7096	0,29
315	217,4847	0,29
320	219,2569	0,30
325	221,0263	0,30
330	222,7927	0,31
335	224,5562	0,31

Temperatura (°C)	Resistência (Ohm)	Erro (°C)
340	226,3168	0,31
345	228,0746	0,32
350	229,8294	0,32
355	231,5813	0,33
360	233,3304	0,33
365	235,0765	0,34
370	236,8197	0,34
375	238,5601	0,35
380	240,2975	0,35
385	242,032	0,35
390	243,7637	0,36
395	245,4924	0,36
400	247,2183	0,37
405	248,9412	0,37
410	250,6612	0,37
415	252,3784	0,38
420	254,0926	0,38



temperatura industrial

IMP000006 REV. 05